



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Posgrado en Ciencias de la Tierra

Campo II. Exploración, Aguas subterráneas, Modelación y Percepción Remota.

Hidrogeología

Contexto hidrogeológico regional preliminar de la Zona Metropolitana de Guadalajara,

Jalisco, México.

Defensa de Tesis

Que para optar por el grado de:

Maestra en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

Alessia Kachadourian Marras

TUTOR

Dr. José Joel Carrillo Rivera

Instituto de Geografía

Ciudad de México, abril 2023.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.



Alessia Kachadourian Marras

Agradecimientos

“Gracias a la vida que me ha dado tanto, me
dio el corazón que agita su marco, cuando
miro el fruto del cerebro humano”
Violeta Parra, 1966.

Dr. José Joel Carrillo Rivera, le estoy agradecida por mostrarme los Sistemas de Flujo Subterráneos del Agua con la Teoría Tóthiana y compartirme su ética pasión por el agua y su mundo subterráneo, convirtiéndose en el cambio de paradigma de mi vocación. Esta tesis es parte sustancial de mi recorrido científico hasta hoy, por comprender la unicidad y ubicuidad del agua y su sistema planetario y ha sido posible gracias a la confianza, el apoyo y los sueños de muchas personas. Gracias a mi familia por siempre recordarme la alegría de soñar un mundo mejor. Muchas gracias al CONACyT por la beca otorgada para cursar el posgrado; muchas gracias Dr. Rodolfo Silva Casarín y Dr. Edgar Mendoza Baldwin (Instituto de Ingeniería, UNAM) por confiar en mí para materializar conocimiento de la Teoría Tothiana para México, más allá de esta tesis; muchas gracias Dra. Margarita Alconada Magliano, por enseñarme los suelos como la perfecta transición entre la fase subterránea y superficial del ciclo hidrológico; Dr. Antonio Cardona Benavides, muchas gracias por su invaluable enseñanza en hidrogeoquímica y su vocación que facilita la comprensión hidrogeológica; muchas gracias Dr. Luca Ferrari, por orientarme en la correcta comprensión geológica; Dr. Marcos Adrián Ortega-Guerrero y Dr. Rafael Huizar Álvarez (†), gracias por sus cuestionamientos científicos que fortalecieron esta tesis y mi continua formación; muchas gracias Dra. Liliana Peñuela Arévalo, por sus apuntes y correcciones técnicas; Felipe Herrerías Azcue, muchas gracias por el arduo trabajo compartido; muchas gracias, Manuel Llano y Cartocrítica A.C. por su guía en la cartografía al servicio del bien común; IMDEC A.C. y María González, muchas gracias por avivar mi vocación aplicando el contenido de esta tesis para la defensa de la vida junto a los compañeros y compañeras de Temacapulín, Acasico y Palmerajo, aparte de hacer posible el muestreo en Los Altos de Jalisco junto al ciudadano Samuel Martínez Torres y la Dra. Peñuela Arévalo.

Gracias a quiénes hagan de esta tesis una herramienta útil para dar solución a los problemas creados en torno al agua.

Contenido

Agradecimientos	2
1 Resumen.....	6
2 Abstract	7
3 Introducción	8
4 Objetivos	9
5 Referente teórico	10
6 Metodología y materiales	36
7 Descripción del área de estudio.....	49
8 Resultados y análisis.....	25
8.1 Análisis hidrogeoquímico e isotópico	25
8.2 Sistemas de Flujo y secciones esquemáticas hidrogeológicas regionales	66
9 Discusión de resultados y conclusiones	74
10 Referencias y bibliografía.....	77
11 Anexos.....	89

Imagen 1 Esquema genérico de los sistemas de flujos de agua subterránea de la Teoría de Sistemas de Flujos Regionales de Tóth J. (1970, 2010,2016).	16
Imagen 2 Medición de las cargas en un piezómetro. Modificado de WDA Consultants Inc., 2006.	21
Imagen 3 Distinción entre freatófitas (A) y xerofitas (B) en relación con la posición del nivel freático (Robinson, 1958).	28
Imagen 4 Localización del área de estudio en la Faja Volcánica Transmexicana de Ferrari et al. (2018).....	0
Imagen 5 Columna estratigráfica regional propuesta para Los Altos de Jalisco, modificado de Rossotti et al., 2002.	11
Imagen 6 Estructura superficial de la corteza terrestre en la zona sureste del área de estudio, de Campos Enríquez y Alatorre-Zamora (1998).....	13
Imagen 7 Perfil de la Alta montaña poniente-oriente en la FVTM. Modificado de Montero García (2004).	16
Imagen 8 Esquemas de los típicos relieves regionales y su patrón de distribución de los sistemas de flujo regionales. Adaptado de Tóth (2009).....	16
Imagen 9 Contexto regional de “Lluvia acumulada promedio anual” y “Evaporación acumulada promedio anual” del área de estudio (SMN, Sin fecha).....	0
Imagen 10 . Observatorios con ETP promedio mensual por el método de Penman, tomado de Segura-Castruita et al. 2017.	0
Imagen 11 Perfil 4 Endoléptico Húmico	4
Imagen 12 Perfil 7 Phaeozem.....	5
Imagen 13 perfiles de suelo Leptosol.....	6
Imagen 14 Ejemplos de perfiles regosol.	10
Imagen 15 Perfil Regosol 5.....	11

Imagen 16 Representación de los grupos extremos en diagrama de Piper.....	4
Imagen 17 Muestras “tibia-caliente” en diagrama de Piper.	4
Imagen 18 Relaciones de sodio, potasio, sulfato, cloruro, litio y temperatura.	18
Imagen 19 Esquema de la sección hidrogeológica A-A’ propuesta para el área de estudio.	72
Imagen 20 Imagen 19 Esquema de la sección hidrogeológica B-B’ propuesta para el área de estudio....	73
Imagen 21 Muestreo en Los Altos de Jalisco, agosto 2015.....	94
Tabla 1 Rangos de altitud en el área de estudio.	15
Tabla 2 Topoformas dominantes en el área de estudio (INEGI, 2001).	17
Tabla 3 Características de los tipos de climas en el área de estudio (INEGI, 2000, 2008).	0
Tabla 4 Promedio de la altitud, temperatura máxima normal, temperatura mínima normal, precipitación anual normal, evaporación total potencial anual normal, del total de estaciones climatológicas en el área de estudio.....	1
Tabla 5 Características principales de los perfiles edáficos del grupo Phaeozem.	5
Tabla 6 Características principales de los perfiles edáficos del grupo Leptosol.	6
Tabla 7 Características principales de los perfiles Luvisol.....	8
Tabla 8 Características principales de los perfiles vertisol en el área de estudio.	10
Tabla 9 Características principales de los perfiles Regosol.	11
Tabla 10 Características principales del perfil Fluvisol.....	12
Tabla 11 Características principales del perfil Solonetz.	13
Tabla 12 Características principales de perfiles Solonchak.....	14
Tabla 13 Características principales de perfiles Planosol.....	16
Tabla 14 Tipos de vegetación “natural” (INEGI, 1980).....	16
Tabla 15 Tipos de agricultura y zonas urbanas (INEGI, 1989).	16
Tabla 16 Concentración iónica promedio global (51 muestras).	0
Tabla 17 Alcalinidad para las muestras 36-43 (Los Altos de Jalisco).....	1
Tabla 18 Muestras seleccionadas y sus concentraciones iónicas principales.....	2
Tabla 19 Familia por ion dominantes y facie hidroquímica de las muestras.	5
Tabla 20 Muestras “Agua fría” con su familia por ion dominante y su facie hidrogeoquímica.....	6
Tabla 21 Muestras “Agua tibia-caliente” con su familia por ion dominante y su facie hidrogeoquímica. ...	7
Tabla 23 Muestras “Agua termal” con su familia por ion dominante y su facie hidrogeoquímica.....	8
Tabla 24 Muestras con valores de deuterio y oxígeno 18.	23
Tabla 25 Muestras con valores de tritio (UT) y sus concentraciones de litio (Li mg/l) y temperatura (°C).	25
Tabla 26 Grupos de agua propuestos y sus principales características del medio subterráneo de circulación, distancia y tiempo de residencia relativa.	26
Tabla 27 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el Grupo A.	27
Tabla 28 Relación de deuterio y oxígeno 18 en el Grupo B.	28
Tabla 29 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el Grupo C.....	28
Tabla 30 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el Grupo D.	29
Tabla 31 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el grupo E.	30
Tabla 32 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el grupo G.....	31
Tabla 33 Asociación hidrogeológica de las topoformas en el área de estudio.	35
Tabla 34 Clasificación para los polígonos edáficos.....	41

Tabla 35 Asociación final de los suelos como zonas de descarga y descarga-tránsito.	44
Tabla 36 Asociación hidrogeológica edáfica final como zonas de recarga.	45
Tabla 37 Asociación hidrogeológica edáfica final como zonas de recarga-tránsito.	46
Tabla 38 Asociación hidrogeológica de la vegetación y usos de suelo en el área de estudio.	54
Tabla 39 Asociación final de las evidencias en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos del agua.....	57
Tabla 40 Correspondencia entre indicadores de las zonas descarga y recarga de los sistemas de flujo en el área estudio.....	59
Tabla 41 Distribución climáticas de las zonas de descarga y recarga en el área de estudio.....	60
Tabla 42 Características de los Indicadores en superficie en la localización de las muestras de agua.....	65
Tabla 43 Temperatura de recarga estimada a una altitud ≥ 1610 msnm para los últimos 60 años de medición.....	67
Tabla 44 Temperatura mínima de equilibrio agua-roca por cálculos de geotermómetros.	67
Tabla 45 Temperatura y profundidad de recorrido de los sistemas de flujo subterráneos, escenario A..	68
Tabla 46 Temperatura y profundidad de recorrido de los sistemas de flujo subterráneos, escenario B..	68
Tabla 47 Temperatura y profundidad de recorrido de los sistemas de flujo subterráneos, escenario C..	68
Tabla 48 Gradientes geotérmicos considerados para el cálculo de la profundidad del recorrido.	69
Tabla 49 Valores promedio global de los tres escenarios previstos.	69
Tabla 50 Localización de las muestras analizadas.....	89
Tabla 51 Total de muestras con sus concentraciones iónicas en meq/l y su % Error.....	90
Mapa 1 Localización política administrativa del área de estudio.	0
Mapa 2 Contexto hidrográfico y administrativo del agua en el área de estudio.....	0
Mapa 3 Contexto fisiográfico del área de estudio.	0
Mapa 4 Agua perenne en superficie.	0
Mapa 5 Contexto de la profundidad subterránea del agua en el área de estudio.	0
Mapa 6 Distribución climática regional en el área de estudio.....	0
Mapa 7 Contexto edáfico del área de estudio.	0
Mapa 8 Localización de las 51 muestras de agua seleccionadas para el análisis hidrogeoquímico.	0
Mapa 9 Relieve y su asociación por zonas de los sistemas de flujo.....	34
Mapa 10 Asociación hidrogeológica de los rasgos hidrográficos en el área de estudio.....	38
Mapa 11 Profundidad del agua y su relación con la asociación hidrogeológica de las topoformas.....	40
Mapa 12 Asociación hidrogeológica de la cobertura edáfica.	50
Mapa 13 Asociación hidrogeológica de la vegetación y los usos de suelo.	52
Mapa 14 Evidencia en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos regionales del agua.	58
Mapa 15 Zonas de descarga y recarga de sistemas de flujo subterráneos del agua y su contexto climático.	61
Mapa 16 Rocas aflorantes en el área de estudio, modificado de Ferrari et al., 2018.	62
Mapa 17 Relación espacial de las muestras con la evidencia en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos regionales del agua en el área de estudio.	64

1 Resumen

El agua que se extrae en la Zona Metropolitana de Guadalajara se transfiere por sistemas de flujo subterráneo de tipo regional, intermedio y local, a través de una estructura geológica volcánica constituida mayormente por una sucesión de rocas ígneas extrusivas (principalmente basaltos y riolitas). Los flujos de tipo regional tienen temperatura de 35°C a 54 °C, STD de 292-1356 mg/l, concentración promedio 0.26 mg/l de litio y 3.9 mg/l de fluoruros, con una relación de O18 de -8.9 a -9.9 ‰ y de $\delta^2\text{H}$ de -66 a -74 ‰; los flujos de tipo regional recorren profundidades de hasta ~2.4 km, alcanzando temperaturas de entre 50-87°C, con flujo vertical ascendente cuya circulación puede verse facilitada por las fallas y fracturas propias de la Faja Volcánica Transmexicana. Los flujos de tipo local tienen temperatura de 21 a 25°C, STD promedio 459 mg/l, una concentración promedio de litio en 0.17mg/l y 1.4 mg/l de fluoruros, con una relación de O18 de -6.66 a -9.9 ‰ y de $\delta^2\text{H}$ de -55 a -76 ‰. En el área de estudio suceden procesos de recarga, tránsito y descarga de sistemas de flujo regionales cuyos rasgos se imprimen en los indicadores hidrogeológicos en superficie, resultando en una asociación de: *i*) 26% del área estudio se asocia con zonas de descarga; *ii*) 17% con zonas de descarga-tránsito; *iii*) 12% con zonas de recarga; *iv*) 32%, a tránsito-recarga; y *v*) 12% como zonas de tránsito potenciales. Los indicadores hidrogeológicos en superficie confirman que los análisis hidrogeoquímicos a muestras colectadas al manantial en Temacapulín y al río Verde, son manifestaciones de zonas de descarga de sistemas de flujo regional del agua circulando en el área de estudio. Este trabajo es el primero en su tipo para el área de estudio, que integra indicadores hidrogeológicos en superficie y el análisis hidrogeoquímico para la identificación preliminar de los sistemas de flujo, así como las zonas de descarga, recarga y tránsito. El presente trabajo permite una previsualización integral de la dinámica hidrológica desde su fase subterránea hasta la superficie del paisaje del área de estudio y como un primer referente hidrogeológico que apoye en el desarrollo de estudios hidrológicos más detallados, así como para instrumentos de planeación y toma de decisión en materia de política pública transversal al agua.

2 Abstract

The water extracted in the Guadalajara Metropolitan Zone is transferred by groundwater flow systems of regional, intermediate, and local type, through a volcanic geological structure consisting mostly of a succession of extrusive igneous rocks (mainly basalts and rhyolites). The Regional type flows have temperature from 35°C to 54°C, STD of 292-1356 mg/l, average concentration 0.26 mg/l of Li and 3.9 mg/l of F, with an O18 ratio of -8.9 to -9.9 ‰ and from -66 to -74 ‰; regional type flows travel depths of up to 2.4 km, reaching temperatures between 50-87°C, with vertical upward flow whose circulation may be facilitated by faults and fractures characteristic of the Transmexican Volcanic Belt. The local type flows have temperatures of 21 to 25°C, average STD 459 mg/l, an average Li concentration of 0.17mg/l and 1.4 mg/l of fluorides, with an O18 ratio of -6.66 to -9.96 ‰ and -55 to -76 ‰. Recharge, transit, and discharge processes of regional flow systems occur in the study area whose features are imprinted in the surface hydrogeological indicators, resulting in an association of i) 26% of the study area is associated with discharge zones; ii) 17% with discharge-transit zones; iii) 12% with recharge zones; iv) 32%, to transit-recharge; and v) 12% as potential transit zones. The surface hydrogeological indicators confirm that the hydrogeochemical analyses of samples collected from the Temacapulín spring and the Verde River are manifestations of discharge zones of regional water flow systems circulating in the study area. This work is the first of its kind for the study area, which integrates surface hydrogeological indicators and hydrogeochemical analysis for the preliminary identification of flow systems, as well as discharge, recharge, and transit zones. The present work allows an integral preview of the hydrological dynamics from its subterranean phase to the surface of the landscape of the study area and as a first hydrogeological reference that supports the development of more detailed hydrological studies, as well as for planning and decision-making instruments in terms of water-related public policy.

3 Introducción

El crecimiento poblacional y económico de la región donde se localiza la Zona Metropolitana de Guadalajara, la consolida como la segunda metrópoli más importante del país y de acuerdo con el Gobierno de Jalisco (Jalisco, 2021), es una zona productiva reconocida mundialmente por albergar empresas extranjeras de diversas industrias (alimenticia, automovilística, calzado, informática, textil, farmacéutica). Sin embargo, oficialmente se declara que la mayoría de los acuíferos definidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el área han sido oficialmente declarados sin disponibilidad de agua y en los últimos veinte años, la ciudad de Guadalajara mantiene las mismas restricciones en torno al agua, principalmente como inundaciones anuales, distribución inequitativa del agua, extracción sin control, impactos a la salud humana, obras hidráulicas con graves impactos ambientales, efectos que, por la alta tensión ambiental, se han tornado centrales en su abordaje por parte de la ciudadanía.

La CONAGUA, ha declarado que el escaso y desactualizado conocimiento científico y técnico sobre el agua ha desarrollado problemas en torno al agua (Kachadourian Marras, Carrillo Rivera, & Llano Vázquez Prada, 2015). Ante tal situación, se torna imprescindible y urgente, primeramente, entender la dinámica sistémica del agua y sus manifestaciones. Actualmente, a nivel internacional se reconoce que la *Hidrogeología Moderna* (incluye diversas especialidades científicas relacionadas), perfecciona la capacidad humana, para comprender sistémicamente el ciclo del agua, sus interacciones, efectos y manifestaciones. La Hidrogeología moderna, se origina por el cambio de paradigma hidrogeológico con los *sistemas gravitacionales de flujo de agua subterránea*.

Continuamente en cierto momento del ciclo terrestre el agua se encuentra en una condición fisicoquímica líquida y “dulce” (*freshwater*), distribuida espacialmente en: i) 1.2% en la superficie de la biosfera (atmósfera, permafrost, hielo, nieve, suelo, cuerpos de agua, vegetación, fauna, ecosistemas y personas), ii) 30.1% debajo del suelo. Resultando, en que cerca del 97% del agua “dulce y líquida” está circulando por debajo del suelo en la porción subterránea del Planeta, y comúnmente es nombrada “agua subterránea” (Gleick, 1993).

A principios de la década de los sesenta, József Tóth generó el primer modelo analítico donde identificó que el agua subterráneamente circula en flujos regionales transversales no confinados (Tóth J. , A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins, 1962). Dicho modelo, evolucionó a la teoría científica de *Sistemas gravitacionales de flujo de agua subterránea*, gracias a aportes científicos de otros especialistas, hoy usualmente conocida como la Teoría Tothiana (Tóth J. , GRAVITATIONAL SYSTEMS OF GROUNDWATER FLOW Theory, Evaluation, Utilization, 2009; Tóth J. , 2016) La importancia y eficacia de aplicar la Teoría Tothiana, radica en que los sistemas de flujo subterráneos del agua se reconocen

científicamente como el principal agente geológico formador y modelador de la biosfera, desde el contexto geológico hasta la dinámica social, pasando por el relieve, el suelo, la vegetación, los ecosistemas y el clima.

Existen estudios sobre la fase subterránea del agua y su funcionamiento en el territorio mexicano que aplican la Teoría Tohiana, sin embargo, ninguno para la Zona Metropolitana de Guadalajara. El primer estudio realizado en México considerando la Teoría Tothiana fue en un proyecto de plantas termoeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en el que se definieron las zonas de descarga y recarga de sistemas de flujo de agua subterránea (Carrillo Rivera J. J., 1985). Desde entonces se han elaborado estudios en territorios de los estados de San Luis Potosí, Aguascalientes, Baja California Sur, Ciudad de México, Guanajuato, la región de la Mesa Central, Hidalgo y Yucatán (Cardona Benavides, 1990; Cardona Benavides, 2007; Cardona Benavides, y otros, 2018; Carrillo Rivera J. J., 1992, 2000, 2003; Carrillo Rivera, Cardona Benavides, & Moss, 1996; Carrillo Rivera & Ortega G., 2008; Carrillo Rivera & Ouysee, 2011; Edmunds, Cardona Benavides, & Carrillo Rivera, 2002; Hergt *et al.*, 2009; Huizar Álvarez, 1998; Huizar Álvarez *et al.*, 2004, 2016; Molina Maldonado A., 1997; Ortega Guerrero A., 2001, 2003, 2009; Ortega Guerrero A. *et al.*, 2002; Ouysee, Wehncke, & Carrillo Rivera, 2018; Peñuela-Arévalo, 2007, 2013; Perevochtchikova *et al.*, 2005, principalmente).

El presente estudio, se basa en la premisa que, para aminorar y evitar impactos ambientales en torno al agua, es requisito, comprender su funcionamiento natural sistémico. Por lo que, las directrices de la *hidrogeología moderna* rigen los alcances y metodología del presente, con el fin de proponer una maqueta del contexto hidrogeológico regional de la Zona Metropolitana de Guadalajara, componente esencial del origen y desarrollo de toda actividad humana.

4 Objetivos

Objetivo general

Caracterizar preliminarmente el contexto hidrogeológico regional en que se localiza y depende la Zona Metropolitana de Guadalajara aplicando la Teoría de Sistemas de Flujo de Agua Subterránea de Tóth.

Objetivos específicos

1. Muestreo y su análisis hidrogeoquímico
2. Identificación de potenciales sistemas de flujo subterráneos del agua
3. Identificación de zonas de descarga y potenciales zonas de recarga.

5 Referente teórico

Teoría de Sistemas de Flujo de agua subterránea de Tóth

Desde la década de los años 40, se reconoce científicamente que la fase subterránea del agua circula en “líneas” de flujo subterráneo, que se originan en el relieve gracias al impulso gravitacional permitiendo que el agua traspase el suelo, evolucionando, de forma ordenada, en la heterogeneidad del contexto rocoso (King Hubbert, 1940; Tóth J. , 1963; Freeze & Witherspoon, 1966; Freeze & Witherspoon , 1967). Resultando en el gran cambio básico y paradigmático de la hidrología y de la hidráulica, al pasar de la clásica percepción de “flujo confinado, y artesiano en acuíferos”, al concepto moderno de “sistemas de flujo regionales no confinados y transversales” en toda la sección porosa de la corteza superior de la Tierra y que pueden alcanzar profundidades de 15 a 20 km (Tóth J. , 2009).

De acuerdo con Weyer (Weyer, 1978; WDA Consultants Inc., 2006), la hipótesis de Dupuit-Forchheimer, es una de las suposiciones simplificadoras limitantes más utilizadas en la ingeniería y la hidrogeología para considerar que el agua (siempre) fluye subterráneamente en el plano horizontal, en forma paralela a la capa freática y en la dirección de su pendiente; otros supuestos ideales muy populares respecto al movimiento y dirección de los flujos subterráneos, son: *i)* el flujo del agua es únicamente impulsado por gradientes de presión, *ii)* el agua es incompresible y *iii)* las fuerzas de flotación subterráneas suelen dirigirse estrictamente de forma vertical hacia arriba o hacia abajo. Muy posiblemente estas simplificaciones siguen siendo tan populares, ya que permitieron a la ingeniería “lidiar” con los retos hidráulicos locales cotidianos, con resultados temporales. Con base en los principios físicos de los potenciales de fuerza mecánica para el flujo de fluidos en el subsuelo, demostrados en 1940 por Hubbert en *La Teoría del movimiento del agua subterránea* (Weyer, 1978), se ha evolucionado, junto con las leyes de la termodinámica, en la comprensión de las dinámicas regionales de los sistemas de flujo subterráneos y es que la termodinámica es esencia en la dinámica del agua y sus sistemas de flujo subterráneos regionales, que desde la variación de la temperatura del agua a lo largo de su recorrido geológico, condiciona su densidad y viscosidad, modificando los gradientes de presión y densidad, de tal forma que el sistema (hidrogeológico) satisfaga dos de los principios termodinámicos básicos en la naturaleza y que en consecuencia se manifiesten sistemas de flujo con extensiones regionales: *i)* el sistema subterráneo global del agua se esfuerza por alcanzar la condición de menor energía en el campo gravitatorio global; y *ii)* el equilibrio energético se alcanza de tal manera que, en todo el sistema, se gaste la menor energía posible (WDA Consultants Inc., 2006).

En la naturaleza prevalecen las condiciones hidrodinámicas, en las que además de la energía mecánica potencial, se generan otras formas de energía, tales como, la temperatura, la energía química o la energía

osmótica; por ejemplo, la elevación de la temperatura o de la presión, provoca directamente que el agua pierda su tensión superficial y le permite penetrar formaciones rocosas poco permeables (Weyer & Ellis, 2013). El movimiento subterráneo del agua y su dirección están en función de los campos energéticos del potencial gravitacional y del potencial de presión, que en conjunto constituyen el fluido potencial provocando que el agua fluya desde puntos con mayor energía potencial hacia puntos con menor energía potencial, hacia cualquier dirección espacial (hacia arriba, hacia abajo, lateralmente, etc.), inclusive en contra del gradiente de presión potencial, del gradiente gravitacional o de la pendiente del nivel freático, pero siempre fluyendo hacia un menor potencial de fluido o hacia el mayor consumo energético (Weyer, 1978; WDA Consultants Inc., 2006).

A continuación, se presentan las directrices científicas, que se consideran las más destacables para este estudio, provenientes de la Teoría de los Sistemas de Flujos Regionales de Agua Subterránea de Tóth o Tothianos-Freezeanos (Tóth J. , 1962; Tóth J. , 1999; Tóth J. , 2009; Tóth J. , 2016):

- El agua (en su fase) subterránea se mueve en forma de sistemas de flujo, definidos como "movimiento del agua subterránea transversal motivado por la gravedad a escalas espacial y temporal que son proporcionales, respectivamente, con las dimensiones del relieve topográfico natural dentro de periodos temporales geológicos y del ser humano "
- El paradigma antiguo o clásico aborda al agua subterránea como "acuíferos confinados, libres o artesianos", mientras que en el moderno el agua se estudia como "flujos de agua en patrones jerárquicos en sistemas no confinados de escala regional"
- El agua (en su fase) subterránea es el único mecanismo ubicuo de transporte e interacción en la corteza terrestre y en la biosfera, gracias a la distribución espacial-temporal organizada de los productos de la interacción (calor, solutos, partículas de material disuelto, nutrientes, etc.), que son transportados por los sistemas de flujo, actuando como cinturones o canales de interacción simultánea subterránea, cuyos efectos o manifestaciones también se observan en la superficie de la biosfera
- Los sistemas de flujo de agua subterránea son el único y general agente geológico que origina y/o controla procesos y fenómenos naturales de cantidad y diversidad ilimitada
- La Teoría, como especie de sombrilla, cubre y apuntala eficazmente los atributos y principios científicos esenciales de la dinámica sistémica del agua, fomentando y allanando la interacción entre especialistas de todas las especialidades que permita la integración de la información y conocimiento para entender al agua y su dinámica natural y ambiental (socio-natural).

Siendo su directrices generales y esquemáticas, se podrían considerar como la principal y quizás única limitante de la Teoría Tohiana. Sin embargo, también podría no ser considerada como una limitante, al apreciar que los contextos hidrogeológicos son tan diversos y únicos como cada ambiente hidrogeológico¹ y que conforme se ha dado su aplicación, se ha ampliado el registro de la diversidad de procesos y manifestaciones hidrogeológicas posibles desde y hacia los sistemas de flujo regionales del agua subterránea. Y es que, desde cada especialidad científica, se podrían enlistar “limitaciones”, “omisiones”, o “carencias”, como, por ejemplo, que desde la edafología se señale que la Teoría de Tóth, no profundiza en los factores formadores del suelo, tanto pasados como futuros. Sin embargo, la propia Teoría expresa que sus conceptos son evolutivos y, por ende, la Teoría se explica en un continuo perfeccionamiento en la comprensión y explicación científica de la dinámica subterránea del agua, conforme se extienden sus aplicaciones prácticas, estimulando nuevos o más finos desarrollos en todas las especialidades científicas bajo la “sombra” de la Teoría Tothiana (Tóth J. , 2016). La Teoría Tothiana se adjudica a József Tóth, como “original” autor, pero esto no significa que no haya evolucionado con aportes invaluable de otros especialistas como Freeze, Witherspoon y Weyer, en reconocimiento a estos científicos es que algunos especialistas se refieren a dicha teoría como a Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea Tothiano-Freezeanos (Ortega Guerrero M. A., SISTEMAS GRAVITACIONALES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA: UN PARADIGMA, s.f.); más allá de los apellidos que se le agreguen a la Teoría, lo indispensable es comprender las directrices del funcionamiento de los sistemas de flujo subterráneos del agua.

La teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea de Tóth (Tóth J. , 2000) permite identificar los efectos o manifestaciones naturales generadas por el agua y modificados por las condiciones ambientales. Varios de estos efectos y/o manifestaciones pueden ser identificadas en la superficie mediante el análisis del tipo de suelo, vegetación, topoformas, geoformas y presencia de agua perenne, principalmente. A estos componentes, se denominan indicadores en superficie de los sistemas de flujo de agua subterránea (Tóth J. , 1984).

El análisis integral de las características geomorfológicas, climáticas, de vegetación original y suelo, de profundidad freática y de referente geológico permiten caracterizar el ambiente que enmarca las condiciones de recarga (ie., alto topográfico, con más lluvia, sin vegetación, litosol y baja salinidad, nivel freático a decenas de metros de profundidad, roca fracturada) o de descarga (condiciones en general totalmente opuestas a la recarga).

¹ Ambiente hidrogeológico: Sistema conceptual con las características geológicas, morfológicas y climáticas que determinan los principales atributos del “régimen del agua subterránea” en un territorio específico (Tóth J. , 1970).

La teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea de Tóth (Tóth J. , 2000) permite identificar efectos o manifestaciones naturales generadas por el agua subterránea y modificados por las condiciones ambientales. Varios de estos efectos y/o manifestaciones pueden ser identificadas en la superficie mediante el análisis de: presencia de agua perenne, profundidad piezométrica, tipo de suelo, ecosistemas, vegetación, topoformas, geoformas y clima, principalmente. A estos elementos del ambiente, se manifiestan como **indicadores en superficie** de los sistemas de flujo de agua subterránea (Tóth J. , 1984). El agua en su recorrido subterráneo forma “líneas de flujo”, una vez que traspasa el suelo (proceso de infiltración) y alcanza el nivel freático (proceso de recarga), es decir, llega a su fase subterránea del ciclo hidrológico planetario. De tal forma, que el concepto sistema de flujo se define como “familia de líneas de flujo que conectan parte o el total de una zona de recarga con una parte o la totalidad de una zona de descarga” (Tóth J. , 1999). A continuación, se describen los atributos distintivos de las zonas de los sistemas de flujo:

Zona de descarga. – es un territorio dónde uno o varios flujos afloran en, o cerca de, la superficie y cuyos atributos comunes y primarios son: *i)* potencial gradiente positivo, *ii)* posición relativamente baja del relieve, *iii)* composición fisicoquímica del agua alóctona, *iv)* temperatura alóctona del agua. La aparición e intensidad de los atributos primarios depende de la combinación de condicionantes del contexto hidrogeológico: clima, pendiente del relieve, profundidad del basamento, composición fisicoquímica de las rocas, su conductividad hidráulica, tipo de suelo y vegetación (Tóth J. , 1970) ; que originan o condicionan el desarrollo de manifestaciones o efectos por el proceso directo o difuso de la descarga de flujos subterráneos: cuerpos de agua naturales perennes (permanentes), flujo base en cuerpos de agua perennes, manantiales, *geiseres*, zonas de inundación, humedales, terrenos movedizos, acumulaciones de sales, deslizamientos de tierra y/o desprendimientos, profundidad freática somera, valles fluviales, eutrofización natural, depresiones topográficas, pozos artesianos, exceso de humedad en el suelo, vegetación freatofita y/o vegetación halófila, principalmente. Asimismo, en sitios montañosos las zonas de descarga suelen ser también “dulces” mientras que en los relieves llanos y bajos suele ser “salinos”, esto se asocia con el material por donde el flujo de agua circula y la distancia de recorrido (Farvolden, 1961; Ihrig, 1966; Tóth J. , 1972; Tóth J. , 1984 en Tóth J. 2000). Es también posible que, en un mismo sitio, en superficie la salinidad y alcalinidad no sea elevada debido a la existencia de un flujo local y/o agua de escurrimiento, pero que subsuperficialmente incremente la salinidad y alcalinidad debido a la presencia en profundidad variable de flujos intermedios en zonas de tránsito y/o descarga que responde a cambios regionales en las condiciones climáticas e incluso por intervenciones del hombre (drenajes, desmontes, plantaciones).

Zona de recarga. - En la zona de recarga, en general los niveles freáticos no son someros y no hay evidencia de agua permanente. Pero esto es una apreciación comparativa al resto de las condiciones locales o regionales, de acuerdo con la escala de estudio y también está en función de la conductividad hidráulica de rocas, tipo de clima y asociaciones de suelo-vegetación. Por ejemplo, en dunas arenosas aun cuando el nivel freático es profundo y las condiciones climáticas áridas, la alta capacidad de la conductividad hidráulica permite elevar el agua de descarga en los puntos más altos de las dunas (Tóth J. , 2000).

Los flujos subterráneos recorren extensiones variables, desde unos cuantos metros hasta decenas-cientos de kilómetros en especial en el plano horizontal (distancia); en el plano vertical la profundidad de penetración de los sistemas de flujo es consecuencia de las magnitudes relativas del relieve (incluye el contexto geológico) y de la pendiente topográfica regional (Tóth J. , 1999) y para los regionales es básica la profundidad del basamento. Los sistemas de flujo se clasifican comparativamente en local, regional e intermedio. Clasificación que está principalmente en función de la composición fisicoquímica, la profundidad, longitud, tiempo de recorrido de los flujos; la teoría Tothiana considera las características que diferencian los tipos de flujo y sus zonas de descarga y recarga. Sin embargo, no se presentan valores específicos, sino que en general son comparativos dentro de ciertos límites. Es importante tener en cuenta que las características distintivas de cada tipo de sistema de flujo y/o zonas, se definen para cada ambiente hidrogeológico y sus atributos principales (relieve, contexto geológico y clima).

Las características principales, distintivas y comparativas, de los tres tipos de sistemas de flujos son las siguientes:

Sistema de flujo regional

Circula a la mayor profundidad relativa y/o la mayor distancia (decenas hasta cientos de km), razón por la que el agua adquiere mayor temperatura relativa muy por encima de la temperatura ambiente, la mayor concentración de sólidos totales disueltos, sales disueltas, el mayor contenido de litio, suele presentar el menor contenido de oxígeno disuelto, y su pH tiende a ser más alcalino. Suele registrar una edad relativa que puede ser de hasta miles de años y/o reportar un tiempo de residencia elevado (Alley, Reilly, & Franke, 1999). Las principales interacciones, suceden de forma acumulativa-sinérgica, y se distribuyen espacialmente con base en los patrones espaciales y temporales de los flujos regionales.

Sistema de flujo local

Son aquellos flujos de agua que se presentan muy cerca de la superficie y cuyas zonas de recarga y descargan son muy próximas entre ellas, las cuales están definidas por la topografía local en superficies de m^2 a decenas de km^2 , por ende, sus recorridos son muy cortos. Son sistemas muy dinámicos y que, por su localización respecto a la superficie, son ampliamente condicionados por las interacciones climáticas

estacionales. Su temperatura es igual o menor a la temperatura ambiente, registra concentraciones bajas de sólidos totales disueltos, sales disueltas, el mínimo o imperceptible contenido de litio, suele presentar el mayor contenido de oxígeno disuelto, y su pH tiende a ser más ácido. Suele registrar una edad relativa que puede ser de días hasta algunos años.

Sistema de flujo intermedio

Estos sistemas son aquellos flujos que registran características geoquímicas cuyos valores no son ni los mínimos ni los máximos, como sucede en los flujos de tipo local y regional, sino que son valores intermedios. Sus características geoquímicas se manifiestan al compararse de forma relativa con los sistemas de flujo local y regional. Por ejemplo: “mayor contenido de sólidos totales disueltos respecto a los sistemas de flujo local y menor en relación con los de tipo regional”. En ocasión tiende a confundirse una muestra de agua con tales características, si ésta fue tomada en un pozo de extracción.

Manifestaciones y características de los sistemas de flujo

La Teoría Tothiana permite vincular el funcionamiento del agua subterránea con los componentes básicos del ambiente. Asimismo, plantea al suelo como uno de los seis elementos de manifestación del agua subterránea en la superficie del terreno, junto con la vegetación natural, calidad del agua, presencia de agua en superficie, relieve y profundidad del agua subterránea.

De acuerdo con Tóth J. (2009), son tres las principales interacciones entre agua subterránea y el ambiente:

1. Interacción química, con procesos de disolución, hidratación, hidrólisis, oxidación-reducción, ataque ácido, precipitación química, reducción de sulfatos, concentración y ultrafiltración u osmosis
2. Interacción física, procesos de lubricación y modificación de la presión entre poros
3. Interacción cinética, con el proceso de transporte de agua, materia acuosa y materia no acuosa, partículas y calor.

El siguiente esquema elaborado por József Tóth simplifica las partes, tipo de manifestación y características principales de los sistemas de flujo.

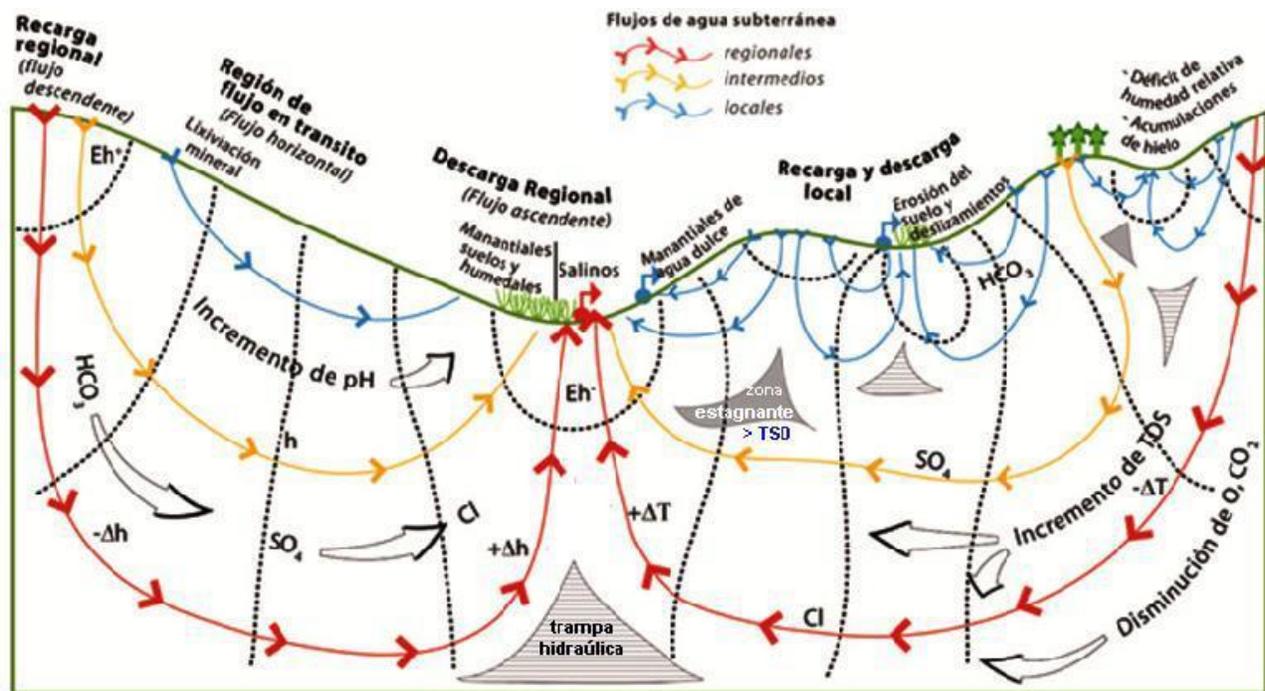


Imagen 1 Esquema genérico de los sistemas de flujos de agua subterránea de la Teoría de Sistemas de Flujos Regionales de Tóth J. (1970, 2010,2016).

En el presente estudio se integró el concepto de ambiente con una definición amplia, que incluye a los componentes físicoquímicos, biológicos, visuales, culturales y socioeconómicos del ambiente global (IAIA, 2009). También se parte de que la *dinámica ambiental* es el resultado de las interacciones sinérgicas y acumulativas de los componentes ambientales (Kachadourian Marras, Carrillo Rivera, & Llano Vázquez Prada, El Zapotillo: herencia de conocimiento obsoleto sobre el agua, 2015).

Componentes hidrogeológicos y sus indicadores en superficie.

Los ecosistemas deben su origen y desarrollo a la dinámica subterránea del agua y a su vez, la condicionan, siendo posible que ecosistemas diferentes se vinculen entre sí o se complementen en su funcionamiento hidrológico. A continuación, se presentan aquellos principales componentes naturales que caracterizan la dinámica hidrogeológica.

Contexto geológico. – Se torna necesario entender las principales características geológicas del área de estudio ya que es el ambiente subterráneo por el cual circulan los sistemas de flujo. Los parámetros geológicos como componentes hidrogeológicos son: contenido mineral y grado de solubilidad, tipo, naturaleza y geometría de las rocas y conjunto de rocas, su conductividad hidráulica, estratificación, fallamiento, fracturas, *karst* y grado de anisotropía. El contexto geológico condiciona la presencia, velocidad y dirección de movimiento, y características físicoquímicas del agua, mediante la interacción de

la actividad tectónica, el agua y el clima que, por grandes periodos de tiempo, han modelado la topografía y por ende el paisaje (Castillo, Muñoz-Salinas, & Ferrari, 2014). Para poder empezar a caracterizar y entender la dinámica del agua es necesario deducir en forma básica la composición, distribución espacial, composición estratigráfica y comportamiento estructural de las unidades litológicas o conjuntos de rocas en el área de estudio. Respecto a la circulación del agua y su atribución en las manifestaciones fisicoquímicas, es elemental la identificación de fallas y fracturas. De forma simple, se puede expresar que las fracturas simulan “autopistas”, mientras que las fallas simulan las “carreteras” de las vías de circulación del agua. Es decir, ambas son estructuras importantes para la circulación del agua.

La composición de las rocas y/o conjunto de rocas que afloran son indicadores de las características de composición y estructuras (granular, fracturada, deformada, etc.) lo que condicionan la facilidad con la que el agua circula en ellas. Sin embargo, esto no es suficiente para indicar los múltiples sentidos y/o direcciones del movimiento del agua (vertical ascendente, vertical descendente, horizontal, inclinado, etc.). El tipo de roca será siempre asociado a su posición en el relieve, y su asociación con el tipo de suelo, vegetación, geoforma y clima.

La permeabilidad, en el caso de las rocas o formaciones rocosas, es la propiedad (cualitativa) del medio físico que, en parte, controla la velocidad del movimiento del agua. Es decir, la facilidad del agua para moverse en el medio rocoso. Todo material tiene un menor o mayor grado de permeabilidad, es decir, no existe un material impermeable o con cero valores absolutos de permeabilidad, lo que existe son materiales de muy baja conductividad hidráulica. Los valores de referencia de la permeabilidad relativa de las rocas se pueden utilizar para afinar el comportamiento relativo de las zonas de recarga y descarga de los sistemas de flujo de agua. Sin embargo, no es objetivo del presente estudio definir un modelo de flujo y transporte donde, entre otras, se debe incorporar la conductividad hidráulica en las direcciones de flujo.

Retomando los rasgos geológicos más relevantes, se deduce que una misma roca puede generar tipos de suelo distintos y por ende diferente tipo de vegetación, gracias a la combinación de dos agentes naturales: el agua subterránea y el clima. Es decir, un agente modelador subterráneo y otro superficial. Por lo que, no se considera correcto realizar una asociación simplista de los tipos de roca que cubren la superficie del territorio continental con las zonas de descarga y/o recarga de sistemas de flujo regionales de agua subterránea. Es decir, el contexto geológico no se considera *per se* cómo un indicador en superficie.

Clima. - El clima establece la cantidad y distribución regional de la fuente de agua. El clima se evalúa en combinación con el resto de los componentes hidrogeológicos. El clima incluye distribución de temperatura, precipitación (tipo, cantidad y variación estacional) y tasas de evaporación. Presentar los

diferentes climas predominantes en el área de estudio es útil para analizar el comportamiento de procesos y manifestaciones de los sistemas de flujo regionales.

Relieve y geoformas. – El contexto geológico, el relieve y el clima, son los tres componentes hidrogeológicos que proveen la energía que inducen y controlan el movimiento del agua. El rol del relieve es proveer la energía natural específica utilizable para el movimiento del agua, que determina la distribución de la energía inducida a los flujos formando los límites del flujo dominante. A su vez, el relieve se va modelando por los continuos procesos del agua, desarrollando diversos modelos morfológicos y geológicos (Tóth J. , 1970); los cuales se pueden ver modificados como resultado de los efectos de la actividad humana. Los sistemas de flujo de agua subterránea como agente modelador geomorfológico imprimen características distinguibles y particulares de las zonas de descarga de agua subterránea. Sin embargo, el proceso de recarga puede presentarse en todo tipo de geoformas.

La Teoría Tothiana establece que los flujos regionales se originan en las zonas más elevadas del relieve regional, de tal forma que se cumpla el principio hidráulico básico de gravedad. Sin embargo, esto es relativo y no es restrictivo para el movimiento ascendente y descendente de los flujos de agua. En términos genéricos y relativos, se puede indicar que el flujo del agua dominante es de tipo: i) vertical descendente (\downarrow) en topografías con una pendiente positiva; y ii) vertical ascendente (\uparrow) en topografías con pendientes negativas y planas (depresiones). Los parámetros topográficos relevantes son: tamaño y forma de la depresión, pendiente, relieve, orientación y frecuencia de topografías (Tóth J. , 2000).

Los fenómenos geomorfológicos en los cuales tiene una participación dominante la descarga subterránea de agua son: acumulaciones de sales, playas, arenas movedizas, lagos o lagunas en cráteres, desprendimientos de masa, derrumbes, hundimientos, hondonadas y barrancos. La descarga de agua subterránea incrementa la movilidad de los materiales en la superficie por dos razones: i) reducción de la presión efectiva resultando un aumento de la presión intergranular y, ii) efecto de lubricación del agua, que facilita el desplazamiento de las partículas. La acción del oleaje, erosión fluvial, son otros fenómenos que reducen la fuerza de las rocas en las zonas de descarga (Tóth J. , 1970).

El relieve regional es de suma importancia como indicador de zonas de descarga y recarga de los sistemas de flujo regionales. La asociación de las topografías es una primera estimación de lo que potencialmente puede estar sucediendo en el marco de sistemas de flujo regional, los cuales incluyen, en forma sobre puesta, sistemas de flujo de tipo intermedio y local. Por ejemplo, una montaña tiene la función de una zona de recarga regional y al mismo tiempo suceden, en la misma estructura de montaña, zonas de tránsito y/o descarga de sistemas de flujo local/intermedio. Alconada-Magliano *et al.* (2018) analiza la importancia del factor relieve en ambientes de Argentina donde la superficie freática se encuentra

próxima a la superficie, estableciendo que en iguales posiciones topográficas pueden reconocerse diferentes tipos de flujo y zonas dentro de estos, variando entonces la composición y dirección del agua subterránea, y consecuentemente su efecto en la evolución del suelo, vegetación, prácticas de manejo del suelo e intervenciones del ambiente en general. Es importante precisar que los valles, planicies, deltas y terrazas de inundación de los ríos son zonas de descarga regionales de agua subterránea, en dónde también coexisten pequeños sistemas locales de flujo de agua subterránea asociados. Es decir, suceden de forma integrada zonas de recarga, tránsito y descarga de sistemas de flujo de tipo local o menor; aumentando el grado de complejidad sistémica de la dinámica hidrológica de los ríos.

Cuerpos de agua natural perenne. - Se denominan cuerpos de agua perenne aquellos que durante todo el año presentan agua, independientemente de temporada de lluvias o estiaje. Dicha cantidad de agua que se presenta de forma constante durante los meses de estiaje se denomina caudal base y se conforma básicamente por agua subterránea (Price, 2011). Un manantial es un fenómeno que consiste en un flujo de agua que emana a través de una apertura natural en las rocas y/o en el suelo; también se manifiesta a través de flujo intergranular. Los manantiales por más pequeño que sean, es agua subterránea aflorando directamente. Por más pequeño que sea un manantial, si está protegido de la evaporación y absorción por parte de plantas, formará un cuerpo de agua (Tóth J. , 1970).

El primer y principal elemento indicador de que el agua está aflorando (desde su fase subterránea) en la superficie, es la presencia natural de agua de forma perenne o semi perenne (estacional). Dicha presencia tiene muchas manifestaciones, tales como: anegamiento, lodo, inundación, humedales, ríos, lagos, lagunas, arenas movedizas, pantanos, suelo salino, etc. Todas estas formas o cuerpos de agua comparten una misma característica: profundidad piezométrica somera.

Data piezométrica. – En la ingeniería hidráulica y la hidrología, se utiliza data piezométrica para inferir o esbozar ciertas características físicas del agua y su comportamiento. La palabra piezometría deriva del griego (πιέζειν piézein 'comprimir' y -metría) y significa “Medida de la compresibilidad de los materiales” (RAE, 2021). El dato directo que se mide dentro de un pozo es la profundidad del nivel estático del agua (metros), “estático” indica que la medición se realiza cuando el pozo o el agua está en reposo (comparativa con nivel dinámico cuando el agua está afectada por la extracción), infiriendo que es la profundidad “natural” del agua en el suelo o subsuelo en ese punto. La profundidad del agua subterránea es un indicador sólido para la identificación y evaluación de los procesos hidrológicos, que originalmente está determinada por el relieve y la estructura geológica y que debe analizarse en relación con su posición topográfica. En zonas de recarga, es raro se presente una profundidad piezométrica somera siendo más

bien profunda y variable a lo largo del año, mientras que en las zonas de descarga la presencia de profundidad piezométrica somera es la condición dominante.

Otro dato piezométrico comúnmente empleado en estudios hidrogeológicos es la elevación del nivel estático o elevación piezométrica (msnm), que resulta en una relación hidráulica simplificada de la columna de agua subterránea (elevación del nivel estático, en un pozo) con la altitud del relieve o la elevación del nivel del brocal del pozo (en metros sobre el nivel del mar). Es decir, a la elevación del brocal del pozo (en el que se mide la profundidad “estática” del agua) se le resta la profundidad del nivel “estático” del agua (*Elevación del Nivel Estático = Elevación del brocal - profundidad al/del nivel estático del agua*). Sin embargo, este tipo de simplificación excluye la presión real de la columna de agua, la velocidad de movimiento y una elevación de referencia. En efecto, Hubbert (King Hubbert, 1940) demostró que dicha simplificación hidráulica se presenta sólo en escasos y especiales casos (WDA Consultants Inc., 2006). En este respecto, las llamadas Redes de Flujo podrían llegar a suponerse, muy limitadamente, como una posible esquematización hidráulica, mas no hidrológica, de la dirección del movimiento subterráneo del agua en el plano horizontal (Maderrey Rascón & Carrillo Rivera, 2005); es de notar que el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua indica que las líneas de flujo (líneas ortogonales a las líneas equipotenciales) son “patrones idealizados seguidos por las partículas del agua (...)” (IMTA, 2014). Comúnmente, se crean configuraciones (llamadas Redes de Flujo) de la elevación del nivel estático para “inferir” la dirección subterránea del agua. Las Redes de Flujo (conjunto de líneas equipotenciales y líneas ortogonales de “flujo”) están basadas en suposiciones ideales (simplificaciones hidráulicas) de la teoría de Dupuit-Forchheimer, tales como: *i*) que el flujo sucede en dirección del gradiente de presión, que *ii*) sea paralelo al nivel freático con, *iii*) la salinidad y temperatura del agua sin contrastante a lo largo de la columna de agua.

En efecto, comúnmente suele considerarse que la elevación del nivel estático es igual a la carga hidráulica (carga total, altura piezométrica, presión del agua), que se refiere a la presión que se debiera medir en la base de una columna de agua de esa altura y moviéndose a la velocidad particular. Literalmente significa registrar la presión dentro de la formación rocosa hasta la profundidad que alcanza dicha "columna" o, mejor dicho, el flujo de agua interceptado en el pozo en forma de "columna", lo cual parece

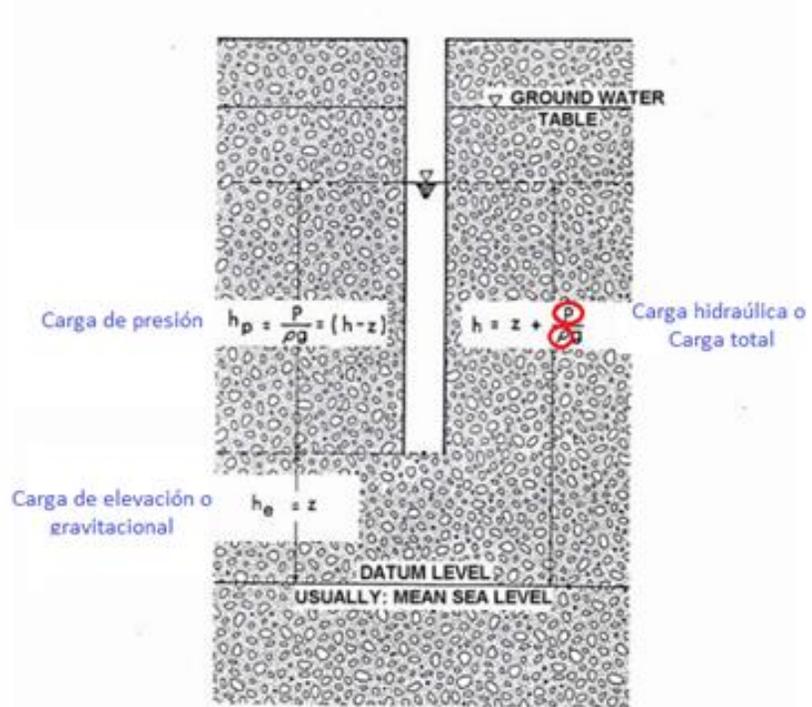


Imagen 2 Medición de las cargas en un piezómetro. Modificado de WDA Consultants Inc., 2006.

una tarea imposible. Sin embargo, actualmente no es imposible considerar las variables de la presión del agua (densidad y profundidad) del flujo interceptado en un piezómetro determinado.

Observando el diagrama de la medición de la carga en un piezómetro, es de apuntar que: i) la carga hidráulica está en referencia a la elevación del mar, y no respecto a la profundidad hasta dónde puede llegar el agua, que podría llegar a ser el basamento; ii) la carga hidráulica está en función de la presión (P) y la densidad del agua (ρ), que sólo en ciertos contextos hidrogeológicos locales y simples podrían considerarse como constantes, tanto la presión ($P = \rho gh$) como la densidad del agua, dependen directamente de la salinidad (STD) y temperatura del agua. Los sistemas de flujo regionales generan temperaturas y concentraciones de STD muy diversas y contrastantes, que condicionan las energías potenciales contenidas en el sistema hidrogeológico.

Por lo descrito anteriormente, en este estudio no es representativo del flujo utilizar líneas equipotenciales de las elevaciones piezométricas y las líneas de flujo ortogonales basadas en los niveles de elevación piezométrica, tanto por la baja densidad de data piezométrica, en especial en el plano vertical, como por la ausencia de su correspondiente data fisicoquímica (densidad y temperatura) para realizar la corrección pertinente.

Suelo. – La historia evolutiva del suelo depende del funcionamiento dinámico subterráneo del agua. La teoría de los sistemas de flujo explica como la calidad, la profundidad y temporalidad del agua subterránea incide durante la evolución del suelo, que puede cambiar en tiempo y forma dependiendo de situaciones naturales y antrópicas, provocando modificar la morfología y propiedades analíticas de dicho suelo a lo largo del tiempo (Tóth J. , 2000). Cabe destacar lo señalado por Fagundo-Castillo (1990) y Fagundo-Castillo *et al.* (2014), respecto a que los elementos geomorfológicos, de suelo y clima, pueden considerarse constantes en un periodo de tiempo y para un mismo ambiente.

El suelo puede ser definido según la visión de ambiente dentro del sujeto o del objetivo del estudio; Porta *et al.* (1994), define al suelo como un cuerpo natural con propiedades distintivas, repetitivas y previsibles, dado que resulta de la combinación de los factores formadores. Estos fueron inicialmente enunciados por Jenny H. (1941) y han sido analizados en diferentes ambientes por un gran número de autores. El suelo evoluciona a partir de la alteración de un material geológico bajo condiciones climáticas definidas, con una biota y un relieve particular. La aplicación de la Teoría Tohiana facilita abordar los suelos como una manifestación cambiante de algo que puede haber sucedido, sucede y resulta alternante (Alconada-Magliano, Lanfranco, & Pellegrini, Suelo en el paisaje: Parte I: condiciones de dotación, 2018). En la visión clásica sobre el suelo se considera el efecto del agua en su evolución principalmente como parte del agente formador “clima”, según un balance entre precipitación y evapotranspiración y permanencia del agua asociado a su permeabilidad. En términos del relieve, se considera desde una concepción estática, analizando en general la fluctuación de la superficie freática y su incidencia en la superficie y principalmente vegetación, pero no se incluye su composición fisicoquímica ni los motivos por los cuales el agua (superficial-subterránea) presenta una composición definida y una dirección de movimiento particular que puede modificarse en el tiempo debido a la concurrencia de diferentes flujos de agua subterránea en un mismo sitio.

Esta concepción del relieve en la edafología clásica, como una forma “ya existente”, es parcial e incompleta para estudiar el suelo ya que se limita a vincular la circulación del agua en el terreno dependiendo de su forma, lo cual será a su vez una condición directa o indirecta de la textura de dicho suelo, permeabilidad, erosión y la posible aportación de agua al subsuelo o del agua subterránea.

Así, a nivel mundial prevalece el ejercicio de tratar de entender al suelo sólo desde la superficie hacia abajo (máximo dos metros) dónde el límite es hasta donde generalmente se produce el desarrollo vegetal y/o acción de la atmósfera. Los sistemas de clasificación de suelos en general establecen los rasgos morfológicos y propiedades analíticas del perfil edáfico, para un tiempo, espacio local y finito, desde la percepción de lo que sucedió en el tiempo y no como una manifestación dinámica. La profundidad que

en general se estudia y es donde se identifican las propiedades y horizontes diagnósticos requeridos para clasificar suelos es de aproximadamente 2 metros, constituyéndose en el límite inferior del suelo se ha fijado de forma arbitraria a nivel mundial con el fin de clasificar globalmente los suelos (USDA, 2014; FAO, 2007; FAO, 2015) . Esto es debido a que, en general, 2 metros es la profundidad donde se desarrollan las raíces de la vegetación (excepción árboles), y donde los procesos pedogenéticos tienen su mayor expresión (Solum). Sin embargo, algunos procesos pueden suceder a mayor profundidad y tener influencia en superficie en tiempos variables y/o cuando se realizan intervenciones en el paisaje. Este es el caso del hidromorfismo que no sólo puede afectar por ejemplo obras de infraestructura y plantaciones, sino que también puede hacerse presente en forma más superficial en épocas de ascensos del nivel freático local y/o regional (zonas de descarga) o cuando la textura edáfica y secuencia de horizontes posibilita el ascenso capilar.

Generalmente la caracterización y descripción del suelo considera principalmente las condiciones climáticas y topográficas locales a fin de definir el desarrollo y aptitud del suelo para establecer manejos agropecuario y forestal, sin considerar, por ejemplo, que ambientes locales de loma pueden ser ámbitos de descarga de flujos provenientes de regiones más lejanas (Alconada-Magliano, Damiano, & Fagundo-Castillo, 2016).

El suelo, como se indicó, es un componente dinámico resultante del ambiente local y regional, por lo cual en un mismo sitio pueden coexistir distintos flujos de agua subterránea (Tóth J. , 2000; 2016). Así, Alconada-Magliano y Damiano (2017) encuentran que, en ambientes con superficies próximas a la superficie con suelos desarrollados en discontinuidad litológica, variaciones en el espesor del material superior produce marcadas diferencias en la forma en que el flujo de agua subterránea de tipo intermedio incide en el perfil, y se vincula a los flujos locales, afectando marcadamente la productividad de los suelos. A continuación, se describen las variables y propiedades analíticas del suelo que son indicadoras fuertes de presencia de zonas de descarga resultando en una profundidad somera del agua subterránea.

Las manchas, moteados o concreciones de Fe y Mn son una manifestación morfológica indicadora de la presencia de agua que recorrió el subsuelo en tiempo suficiente como para generar condiciones de anaeróbicas que posibilitan la reducción del Fe y Mn. Consecuentemente la presencia de estas manchas, indica la incidencia cercana a la superficie de agua subterránea. La consideración común, no necesariamente correcta, a nivel mundial, es que si estas manchas o moteados se observan a más de un metro de profundidad se indica que el agua subterránea no afecta o ha influido de forma significativa. Sin embargo, esto conduce a mal interpretar o desconocer cómo se comporta el agua subterránea, tipo de flujo y zona dentro de éste. Alconada-Magliano *et al.* (2017), señalan que los rasgos hidromórficos pueden

variar conforme el material original (contenido de Mn y Fe), cambios en la humedad del suelo debido a la alternancia de periodos secos-húmedos del sitio e incluso asociados a cambios globales (períodos del Niño o la Niña).

El hidromorfismo se identifica al final de periodos de largo recorrido, el agua en su trayecto subterráneo reduce el Fe^{+3} a Fe^{+2} y el Mn^{3+} a Mn^{+2} (gana un electrón). Es decir, los iones de Mn y Fe son transportados por el agua y se mueven en el suelo por medio de las condiciones de óxido a reducción y de acidez hacia alcalinidad a lo largo del flujo pasando a su forma reducida (Fe^{+2} , Mn^{+2}). Por el contrario, cuando se presenta la fase seca, los cationes de Fe^{+2} que fueron adsorbidos superficialmente por la arcilla, se oxidan a Fe^{+3} (pierden electrones) y se precipitan como algunos minerales que contienen Fe^{+3} (óxidos e hidróxidos). Es en la fase seca cuando el hierro y el manganeso son oxidados y precipitados, formando masas suaves, concreciones o nódulos. Los nódulos y concreciones son cuerpos cementados que se pueden remover en forma intacta. En las reacciones redox el ion Mn se reduce más rápidamente que el ion Fe; mientras que el Fe se oxida más rápidamente al airearse (oxidación) (FAO, 2007). La oxidación química del Mn^{+2} se presenta espontáneamente en soluciones alcalinas aireadas, al precipitar el $\text{Mn}(\text{OH})_2$ rápidamente reacciona con el O_2 para producir una variedad de óxidos dependiendo del pH, de la presión de O_2 y de la presencia de otros cationes. La temperatura del agua, la actividad microbiana, otros organismos, el pH y la textura del suelo son factores que en sinergia condicionan la capacidad de reducir y oxidar el Mn (reacciones redox). A esto se debe incorporar aspectos que suceden en el suelo de zonas de descarga, donde se tenga un aporte importante de agua de lluvia.

El pH, composición catiónica, aniónica, salinidad y alcalinidad son propiedades analíticas del suelo que permiten inferir la composición química del flujo de agua subterránea y su componente (recarga o descarga). Esto posibilita la caracterización de los componentes y tipo de flujo presentes en un ambiente determinado (Alconada-Magliano, Damiano, & Fagundo-Castillo, 2016). Estas variables analíticas del suelo pueden ser la resultante de las características de los sistemas de flujos que coexistan en un territorio determinado.

El pH del suelo es la variable que más se utiliza para caracterizarlo y relacionar su valor con otras propiedades que se pueden usar para esta descripción, la capacidad neutralizante de acidez y su capacidad amortiguadora. El pH es la resultante de un sistema complejo de reacciones que se dan en el suelo y sólo se mide una concentración de protones, que pueden tener diferente fuente y/o ausencia de esta. El pH es necesario para el entendimiento de los procesos fisicoquímicos involucrados en el origen y desarrollo del suelo, fertilidad y su manejo. Desde el agua subterránea, el pH junto con una completa

descripción del suelo son un indicador de acidez que se relaciona con el contenido de bases, grado de meteorización y cantidad de bases lixiviadas.

En general, los tres rangos de acidez en el suelo con base en el valor de pH son (Zapata Hernández, 2004):

- Suelos ácidos pH <6.5 (6.1-6.5, ligeramente ácido; 5.6-6.0, moderadamente ácido; 5.5-5.1, fuertemente ácido; 5.0-4.5, muy fuertemente ácido; 4.4-3.5, extremadamente ácido; <3.5, ultra ácido)
- Suelos neutros pH entre 6.6 y 7.3
- Suelos básicos o alcalino pH > 7.3 (7.4-7.8, ligeramente alcalino; 7.9-8.4, moderadamente alcalino, 8.5-9.0, fuertemente alcalino; >9.0, muy fuertemente alcalino).

La acidez del suelo proviene de un sistema de reacciones químicas resultantes de diversas fuentes que pueden estar combinadas (Zapata Hernández, 2004):

- Contaminación local: ácidos aportados directamente al suelo (agua de riego, fertilizantes, pesticidas, residuos, etc.)
- Contaminación difusa: ácidos transportados por el aire y llevados al suelo por la lluvia
- Procesos de inter-flujo: movimientos laterales de la solución edáfica entre ambientes con diferente altura, tanto por flujos superficiales como por flujos de agua subterránea (laterales, verticales ascendentes y descendentes)
- Materia orgánica: descomposición y transformación
- Meteorización de minerales primarios contenidos en las rocas, y sus minerales secundarios derivados
- CO₂ e hidroxi-polímeros: se refiere a la influencia en el pH de la hidrólisis del CO₂ y de cationes metálicos (Al - Fe)
- Bioabsorción de iones: absorción de nutrientes por las plantas que modifica la solución del suelo e influye directamente en el pH.

Cada uno de estos procesos puede aportar H⁺ (ion hidrógeno o protón) con distinto grado de energía, pero el pH es determinado por aquel de mayor fuerza, es decir, con una constante de acidez mayor (K_a). Los ácidos de mayor nivel de energía de protón con mayor constante de acidez, presentan un cambio de inflexión a pH más bajos. Cuando esas fuentes son neutralizadas podrán expresarse el resto de las fuentes con menor fuerza de acidez.

La concentración de iones H⁺ en el suelo resulta de equilibrio y procesos de los ácidos fuertes (S⁻² - SO₄⁻², lluvia ácida), hidrólisis del Al⁺³, equilibrio CO₂-H₂O, y disociación de grupos ácidos de la materia orgánica. Mientras que los pH neutros y alcalinos son debidos a fuentes de acidez muy débil o la presencia de bases

o sales de reacción alcalina, como los bicarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}) (Alconada-Magliano & Lanfranco, 2020).

Lo anterior orienta en relación con los valores bajos de acidez del suelo pudiéndose relacionar con zonas de descarga de agua subterránea de corta distancia y profundidad de recorrido; en condiciones naturales sugiere la presencia de bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}).

Con base en lo expuesto, al definir si un ámbito es salino, alcalino o ácido, y consecuentemente el tipo de flujo y zona dentro de éste, resulta necesario no sólo definir el pH sino también la composición catiónica, y en forma más precisa incorporar la aniónica. Adicionalmente, es importante indicar que es posible que exista otra fuente de protones, tal como la proveniente de la *materia orgánica* y consecuentemente incidir en el pH del medio aun siendo éste una zona de descarga que puede en parte neutralizar la alcalinización que un flujo de agua subterránea pudiese aportar.

El contenido de materia orgánica de un suelo debe interpretarse en conjunto con el resto de las variables del suelo y del ambiente. Así, el uso de esta variable en forma aislada puede conducir a errores, principalmente cuando se analiza por su concentración absoluta. Algunos ejemplos: *i*) en ámbitos de descarga, la materia orgánica formada puede rápidamente perderse por escurrimiento debido a las malas condiciones de humificación, se forma humato sódico donde la fracción fúlvica del humus es la que prevalece, siendo ésta más soluble en condiciones alcalinas y origina suelos dispersos, con serias dificultades de permeabilidad y con contenido de materia orgánica variable e incluso hasta bajo contenido, asociado al tipo de vegetación que desarrolla; *ii*) en algunos ambientes templados, fríos y húmedos el contenido de materia orgánica humificada puede alcanzar valores tan altos, como 10%. Sin embargo, estos valores en ambientes más secos sólo serían posible por la presencia continua de la descarga de agua subterránea, debido a que se posibilita el desarrollo de vegetación hidrófila que aporta materia orgánica; *iii*) los ecosistemas de bosque con precipitación elevada y temperatura variada, donde el contenido de materia orgánica puede ser muy elevada e incluso no estar muy humificada, pudiendo superar 20% su contenido total, siendo generalmente zonas típicamente de recarga, pero pudiendo ser descargas en algunos bosques ribereños.

Los suelos dónde descargan flujos de tipo regional o intermedio pueden tener una apariencia “seca” pero presentar rasgos de licuefacción, suelo blando, pantanoso o arenas movedizas, deslizamiento, mayor vulnerabilidad de la superficie a la erosión, como resultado del proceso físico de disminución de la presión efectiva ocasionada en las zonas de descarga por el aumento de la presión intersticial resultado de la presión que ejerce la fuerza del agua, “despegando” los granos del suelo (Tóth J. , 2000).

Otros ámbitos de descarga no presentan elevado contenido de sales; esto sucede por ejemplo en zonas de descarga de flujos locales (responden a lluvia local) y son comúnmente denominados “bajos dulces”, en contraste con los salinos y alcalinos “bajos alcalinos”. En todos los casos el régimen de humedad edáfica es *ácuico*.

Vegetación. - Las plantas son un indicador en superficie del afloramiento o descarga de agua subterránea. De forma muy general, se reconoce que existen especies vegetales que obtienen el agua directamente del agua superficial y subterránea, mientras que otras se desarrollan sólo en condiciones aeróbicas y con muy bajos requerimientos de agua tal como sucede en zonas áridas, siendo estos entonces dos grandes grupos de vegetación con condiciones extremas de desarrollo (Meinzer, 1927). Sin embargo, en ambos está involucrado conocer el funcionamiento del agua subterránea, por su presencia o ausencia en superficie. Entre las situaciones intermedias para el desarrollo vegetal y donde el conocimiento del funcionamiento del agua adquiere especial interés, se destacan las especies vegetales que aun requiriendo condiciones de aerobiosis son capaces de tomar agua de una superficie freática próxima a las raíces si existe entre dichas raíces y la superficie de agua una franja capilar suficiente en espesor como para no generar anoxia radicular y posibilitar que se produzca el ascenso capilar del agua. En este último grupo de plantas se destacan todos los cultivos denominados “*comodities*” (trigo, maíz, soja, girasol) y tantas otras especies vegetales cultivadas para la producción de alimentos.

Las especies vegetales que se desarrollan en ámbitos áridos se denominan genéricamente xerofitas, cuya denominación proviene del griego y significa “planta seca” (*xero*, seco). Estas plantas están adaptadas a un medio seco (árido) con una cantidad mínima y/o irregular de agua la cual se obtiene principalmente de la lluvia que acontece entre grandes y prolongados periodos sin lluvia. Por el contrario, las especies freatófitas, palabra de raíz griega “*phreatos*” que significa pozo, son plantas que requieren elevado contenido de agua que es provista por una superficie freática próxima.

Es de apuntar que en México domina la clasificación de plantas hidrófitas y de las terrestres. Las hidrófitas o plantas acuáticas son aquellas que viven en el agua o sobre un substrato que periódicamente es anaerobio por el exceso de agua (Tiner, 1991). En esta clasificación, no se distingue el proceso por el cual la planta se abastece de agua o la caracterización de dónde proviene el flujo de agua del medio acuoso. La ilustración de Robinson (1958) explica la diferencia del mecanismo de las raíces entre las freatófitas y las xerofitas.

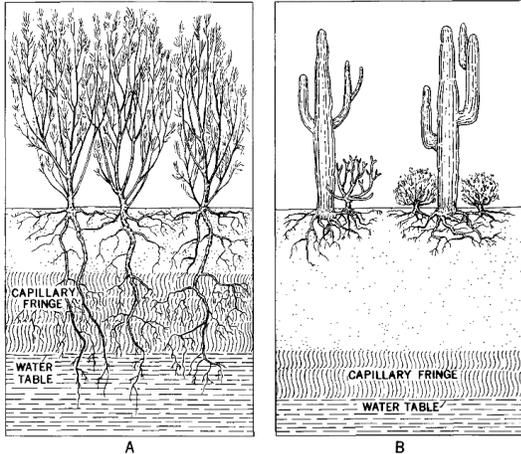


Imagen 3 Distinción entre freatófitas (A) y xerófitas (B) en relación con la posición del nivel freático (Robinson, 1958).

Las freatófitas incluyen muchas especies pertenecientes a diversas familias vegetales, que tienen como elemento común la dependencia del agua subterránea y condiciones de crecimiento en presencia de agua libre (Robinson, 1958). Las freatófitas crecen en zonas áridas como en ambientes húmedos independientemente del clima, ya que dependen del agua subterránea a profundidad somera. Dentro de este gran grupo de plantas, Meinzer (1927) plantea que las *halophytas* (halófilas) son un subgrupo que crece en suelo alcalino, que en regiones áridas coincide con zonas de descarga de

flujos de agua subterránea. Estos dos grandes grupos de vegetación (xerófitas y freatófitas) están bien identificados en las regiones desérticas, pero mucho menos definidos en regiones húmedas, donde las fuentes de agua para la vegetación son más abundantes o diversificadas. A nivel mundial se carece de una clara y sólida clasificación de las especies de plantas que dependen del agua subterránea sin importar el clima en dónde se localicen, esto es la calidad y cantidad de agua que necesitan para efectuar sus funciones.

En medio de estos dos grandes grupos están las plantas que usualmente no dependen del agua subterránea, pero que bajo ciertas condiciones espaciales y temporales específicas sí lo hacen, y por lo tanto no clasifican claramente en ninguno de los dos grupos, ya que son especies que sólo en ciertas condiciones muy específicas obtienen agua subterránea y/o una mezcla de agua de la fase subterránea y/o pluvial. Conforme un ambiente tenga menor grado de aridez y aumente su contenido de humedad, la clasificación de especies dependientes de agua subterránea, y las que no, es cada vez menos rígida y más complicada. De acuerdo con Meinzer (1927), se ha documentado en muchos lugares la presencia de conjuntos de especies de vegetación dependientes al agua subterránea localizadas lejos de zonas con nivel freático somero. Estas plantas no son una excepción a la regla sino un indicador certero del afloramiento de agua subterránea en dónde comúnmente no se esperaría. Lo anterior coincide con lo establecido en la *Teoría de Sistemas de Flujo de Tóth* (Tóth J. , 2000; 2016) debido a que una de las manifestaciones superficiales resultado de la dinámica subterránea del agua es el tipo de suelo y vegetación.

Desde la época del imperio Romano, se ha reconocido el alcance de las plantas y árboles como indicador para la localización exitosa de pozos para la extracción de agua (Meinzer, 1927), es decir, para la identificación de zonas de descarga de los sistemas de flujo.

En ecosistemas hidrohalomórficos, donde puede indicarse que en general se corresponden con ámbitos de descarga de flujos regionales, puede haber escasa vegetación debido a la alta alcalinidad y a que no aportan suficiente materia orgánica al medio.

Se ha reconocido de forma general que ciertas especies de plantas extraen el agua subterránea en zonas con condiciones de saturación; sin embargo, el esfuerzo científico ha sido muy débil para integrar que el agua subterránea es posiblemente el factor más fuerte y decisivo en la diferenciación de las especies de vegetación en un territorio. Para comprender la dinámica del agua, es útil y necesario reconocer comparativamente las asociaciones de especies de vegetación dominantes en su estado natural, más que una lista descriptiva detallada de cada especie. Donde las características de calidad y cantidad de agua que requiere cada especie o conjunto resultan determinantes en lograr bases sólidas para un buen entendimiento del funcionamiento sistémico del agua (fase subterránea y superficial).

Hidrogeoquímica e isotopía.

La hidrogeoquímica o geoquímica del agua es una especialidad de la geología. La hidrogeoquímica establece que la composición fisicoquímica del agua es resultado de un proceso complejo que sucede en la interacción del agua con las rocas del medio geológico por donde circula. Durante el recorrido de los flujos de agua subterránea pueden suceder diversos procesos fisicoquímicos, los más importantes son: adquisición y escape de gases, disolución de minerales, precipitación de minerales, hidrólisis, oxidación-reducción, intercambio iónico, efecto de ion común, efecto salino y la mezcla de agua esto usualmente en pozos de extracción.

El agua durante su fase subterránea se caracteriza por presentar ciertos rangos naturales (sin contaminación) de concentración de constituyentes inorgánicos disueltos: i) los constituyentes mayores, tienden a presentarse en concentraciones mayores a 5 mg/l; ii) los iones menores se caracterizan por concentraciones en un rango de 0.01-10 mg/l, aun con infiltración reciente de agua de lluvia; y iii) los constituyentes traza, oscilan en concentraciones menores a 0.1 mg/l (Freeze & Cherry, 1979).

Los datos analíticos deben ser siempre interpretados con base en el referente geológico. En primer lugar, debe conocerse la composición química de los minerales que componen las rocas y formaciones rocosas dominantes en el área de estudio.

El análisis fisicoquímico del agua permite estimar los sistemas de flujo de agua subterránea. Asimismo, es necesario considerar otros elementos del paisaje tal como la geomorfología, el suelo, el clima, y la vegetación, los cuales si bien no tienen una relación inequívoca con los sistemas de flujo que circulan por una región en particular, presentan en general relaciones que permiten prever el funcionamiento de dichos flujos.

La alta concentración de nitrato (NO_3) está asociada a contaminación de tipo antrópico (agua residual, fertilizantes, fosas sépticas, depósitos de excretas, principalmente.). El nitrato (NO_3) es la principal presentación del nitrógeno (N_2) disuelto en el agua subterránea. Otras presentaciones del nitrógeno disuelto es amonio (NH_4), amoníaco (NH_3), nitrito (NO_2), óxido de nitrógeno (N_2O) y nitrógeno orgánico presente en la materia orgánica, los cuales son comúnmente identificados en el agua subterránea. En el agua subterránea, que tiende a ser fuertemente oxidante, el nitrato se mueve con el flujo de agua subterránea sin transformarse por ser la forma estable del nitrógeno disuelto. El nitrato es un componente menor que en aguas subterráneas naturales no contaminadas suele presentarse con una concentración de 0.01_a 10 mg/l como NO_3 (Freeze & Cherry, 1979). En México es común determinar el contenido de Nitrógeno de Nitrato (N- NO_3) en unidades de mg/l, de acuerdo con normatividad mexicana (NMX-AA-079-SCFI-2001). El contenido de Nitrógeno de Nitrato no es lo mismo que la concentración de

Nitrato, por lo que es de suma importancia conocer el método de análisis y las unidades con las que se reporta. Por ejemplo, una muestra que reporta una concentración de Nitrato (NO_3) de 10 mg/L contiene una concentración de Nitrógeno de Nitrato (N- NO_3) de 2.26 mg/L.

Es pertinente que un análisis hidrogeoquímico incluya los siguientes parámetros fisicoquímicos: temperatura, pH, alcalinidad, oxígeno disuelto (OD), potencial de oxido reducción (Eh), conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (SDT), calcio, bicarbonato, sodio, potasio, magnesio, cloruros, nitratos, sulfatos, fluoruros, así como los elementos traza (metales y metaloides), tales como: arsénico, estroncio, plomo, berilio, litio; etc. Los primeros cinco parámetros deben medirse en campo bajo estrictos protocolos y calibración de los instrumentos usados.

La temperatura del agua afecta al grado de disolución de los elementos. La temperatura del agua es dada por la estructura geológica y el clima. La temperatura del agua y su relación con la temperatura ambiental es un indicador relevante sobre el posible origen y evolución fisicoquímico del agua, por lo que es deseable agruparla en diferentes rangos.

Respecto a la estructura geológica, en términos generales, se reconoce que la temperatura se eleva conforme aumenta la profundidad en la corteza terrestre, es decir, por el gradiente geotérmico. Para el área de estudio se toma como referencia, el gradiente geotérmico de 3-4°C cada 100 m, es decir, se considera que el aumento de cada 3-4°C temperatura del agua por encima de la temperatura ambiente; esto implica que el agua extraída recorrió 100 m de profundidad para aproximar la localización del agua. El valor anterior se considera con base en los datos regionales documentados en la Zona Metropolitana de Guadalajara, 4°C /100 m es el valor indicado por la CFE (2000) en Sánchez-Díaz (2007), mientras que 31.4 - 39.3°C/km es indicado para la región de San Luis Potosí en varios estudios hidrogeológicos (Cardona Benavides, 1990; Carrillo Rivera J. J., 1992; Cardona Benavides, 2007; Peñuela Arévalo, 2013; Molina Maldonado A. , 1997).

La alcalinidad es la capacidad de una solución para neutralizar ácidos, y se define a partir de la suma de las bases que reaccionan con un ácido fuerte. En el agua natural (pH entre 6 y 9), estas bases corresponden con carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) principalmente; por lo que es posible aproximar el valor de la alcalinidad a la suma de las concentraciones de estas bases (Alcalinidad = $\text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-}$). La alcalinidad del agua luego de ser extraída de su fuente puede ser modificada por procesos fisicoquímicos (disolución de gases, precipitación de CaCO_3 y oxidación de metales) por lo que, la alcalinidad debe ser medida en campo.

La relación de STD con la temperatura del agua, presenta que el aumento del contenido de los principales iones (sodio, potasio, magnesio, calcio cloruros, sulfatos y bicarbonatos) tiende a ser directamente proporcional al aumento de la temperatura del agua.

Los altos contenidos de cloruro se asocian a flujos de agua de mayor distancia y/o tiempo de recorrido, lo que permite indicar una mayor interacción del agua con las rocas. Por lo tanto, concentraciones elevadas de cloruro y valores elevados de litio (> 0.1 mg/l) puede ser un indicador de un agua de mayor recorrido, ayudando a concluir en la edad relativa del agua, en especial en regiones con rocas félsicas. Excluir las muestras con una concentración de nitratos mayor a 10 mg/l (NO_3) permite tener claridad de que la concentración de cloruros en las muestras con 0.01 a 10 mg/l NO_3 , no es por contaminación, sino que es “original/natural” del agua subterránea.

En un estudio hidrogeológico es de suma utilidad definir las facies hidroquímicas del agua, ya que los aniones pueden dar información referente al posible sistema de flujo de agua subterránea con base en la *Secuencia de Chevotareb* que sugiere la distancia y el tiempo de recorrido, siendo $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ en una zona de recarga y de forma inversa asociada a una zona de descarga $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3$, Tóth (2000); mientras que los cationes dan información respecto al tipo de roca con la que interactuó el agua en el subsuelo, aportando a la descripción del tipo de litología presente. En un grupo de agua con el mismo rango de temperatura o en una misma familia de agua (por ion dominante) puede existir diversas facies hidroquímicas; la facie hidroquímica es una parte identificable con composición diferente, perteneciente a un mismo sistema (Freeze & Cherry, 1979).

El fluoruro es un ion inorgánico no metálico cuya presencia es bastante común. De acuerdo con Freeze y Cherry (1979), la presencia del fluoruro, al igual que el selenio es, principalmente, de origen natural. Es decir, se debe a la composición de los minerales en las rocas y la interacción del agua con la estructura geológica. La concentración natural resultante puede variar de menos de 0.1 mg/l hasta valores muy altos de 10-20 mg/l. Por lo tanto, se comporta como un indicador de la composición de las rocas por donde circuló el agua de la muestra, aun cuando se presenta en concentraciones tóxicas para los seres vivos. El fluoruro disuelto en el agua subterránea es un indicador de la distancia y/o tiempo de recorrido del agua ya que, de acuerdo con Kullenberg y Sen (1973) y Handa (1975) en Huizar-Álvarez *et al.* (2014), el fluoruro disuelto sólo es posible en ciertas condiciones fisicoquímicas y cuando el tiempo de residencia o de recorrido es muy largo. También, el aumento de la concentración de fluoruro es directamente proporcional con la temperatura del agua, ya que, a mayor temperatura, en función de la profundidad y tiempo de residencia del agua, se incrementa la disolución de los minerales que contienen fluoruro en las rocas usualmente de tipo félsico. En efecto, Nordstrom *et al.* (1989) y Saxena y Ahmed (2003) en Huizar

et al. (2014), Sánchez-Díaz (2007) y Cardona *et al.* (2018) señalan que, las rocas ígneas de composición félsica aportan mayor cantidad de fluoruro al agua subterránea con respecto a rocas volcánicas básicas e intermedias. En el caso de la Zona Metropolitana de Guadalajara, se reportan valores tóxicos de 7.59 mg/l y un promedio de 1.68 mg/l. Es de anotar que el fluoruro disuelto en diferente proporción en los sistemas de flujo reportados en la ciudad de San Luis Potosí puede ser controlado en un pozo de extracción dando seguimiento a la temperatura del agua extraída (Carrillo Rivera, Cardona Benavides, & Edmunds, 2002). La concentración de sodio tiende a aumentar en las aguas más “antiguas” (Carrillo Rivera, Cardona Benavides, & Moss, 1996) es decir, con un mayor tiempo de residencia ya sea por la distancia y/o la velocidad del agua, condicionando el grado de interacción agua-roca. La concentración del sodio está en función del grado de reacción que tenga con el calcio a lo largo del recorrido, razón por la cual se analizan en conjunto en relación con la temperatura del agua.

Si bien de forma genérica, el agua con temperaturas elevadas se relaciona con flujos de mayor recorrido, es pertinente revisar la relación de la temperatura con el litio, un elemento traza que indica la edad relativa del agua, como indicador del tiempo o distancia de recorrido del agua, por su carácter conservador, es decir, que difícilmente reacciona por lo tanto logra conservarse por mayor tiempo, lo que permite que se asocie con flujos de mayor distancia de recorrido o de mayor estancia temporal.

Otra caracterización del agua de uso poco frecuente, pero de gran utilidad para definir el origen de dicha agua es medir el contenido de isótopos estos son diferentes configuraciones atómicas de un mismo elemento. El oxígeno y el hidrógeno, los elementos que conforman la molécula del agua, tienen diversos isótopos, dependiendo de su número de neutrones. La diferencia de masa entre isótopos de un mismo elemento se manifiesta en las propiedades físicas y químicas del compuesto que conforman, tal como sucede en el agua. Para estudios del agua, comúnmente se usan los isótopos del hidrógeno y del oxígeno: deuterio, ^2H (D); tritio, ^3H (T); y oxígeno 18 (^{18}O). El deuterio y el oxígeno 18 son isótopos estables, isótopos que se fraccionan en su fase de vapor (cambios en su concentración) y que una vez disueltos en el agua no cambian con el tiempo o su cambio está bien definido, mientras que el tritio es un isótopo de tipo radioactivo. La relación de la abundancia isotópica puede variar o no dependiendo de los procesos naturales y/o ambientales, lo que permite utilizar las relaciones de los isótopos como trazadores para la identificación del origen de los flujos de agua subterránea, edades relativas del agua, información sobre la zona de recarga, las proporciones de agua de diferente origen y los diferentes grados de mezcla, principalmente.

Cuando el agua pasa de una fase a otra (líquido a vapor, etc.) se presenta el fraccionamiento isotópico, porque los componentes isotópicos del agua (deuterio y oxígeno 18) tienen una presión de vapor más

baja. Los valores de ^{18}O y ^2H del vapor de agua se hacen progresivamente más negativos a medida que se producen las precipitaciones conforme avanza su localización hacia el continente. El fraccionamiento isotópico es afectado por la temperatura, la latitud, la altitud, la cercanía al continente y la variación climática estacional. Por lo que, a temperaturas más bajas menor es la concentración de los isótopos pesados (deuterio y $\text{O}18$), el agua en las altas montañas presenta valores más negativos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ (menor concentración). El agua (de lluvia, lagos, ríos, lagunas, humedales) al infiltrarse en el suelo, antes de la recarga, adquiere una composición isotópica media de la zona de infiltración-recarga, pero ya una vez el agua en su fase subterránea, no varía su composición isotópica a menos que suceda intercambio de oxígeno con las rocas, lo cual es notable a temperaturas termales. En el caso de los cuerpos de agua superficial el contenido de isótopos pesados suele ser mucho mayor por la evaporación (Fagundo Castillo & González, 2005).

La relación proporcional de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del agua natural en el planeta Tierra se expresa mediante una ecuación que representa gráficamente la curva conocida como Línea del Agua Meteorica Global (GMWL, por sus siglas en inglés). La GMWL fue definida por Craig H. en 1961 (Clark & Fritz, 1997), la cual ha sido mejorada por diversas investigaciones hasta llegar al monitoreo isotópico de la precipitación mundial realizado por la Organismo Internacional de Energía Atómica (GNIP-OIEA), lo que redefinió la relación isotópica del agua: $\delta^2\text{H} = 8.13 \delta^{18}\text{O} + 10.8 \text{ SMOW}$ (Standard Mean Ocean Water). Con base en la posición de $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ de cada muestra respecto a la expresión gráfica de la ecuación de la GMWL, se puede establecer las zonas de recarga, si son cercanas al océano, o aguas con influencia geotérmica, agua de ríos, lagos, regiones frías o cálidas, etc. La abundancia de deuterio y oxígeno 18, es medida con respecto al VSMOW (Viena Estándar Mean Ocean Water), y se expresa en partes por mil (Clark & Fritz, 1997).

El agua, a lo largo de todo su ciclo, presenta en los diferentes ambientes distintas velocidades de circulación, lo que resulta en diferentes tiempos de residencia. De acuerdo con Kazemi *et al.* (2006), el concepto tiempo de residencia del agua subterránea se define como el lapso que le lleva a una gota de agua viajar desde la zona de recarga (nacimiento) hasta que aflora en superficie de forma natural (no extracción artificial), el tiempo o rango de residencia subterráneo del agua es de 2 semanas a 10 mil años (Freeze & Cherry, 1979).

La abundancia de tritio es un indicador de la edad del agua subterránea, es decir, el tiempo transcurrido desde el momento en que una gota de agua entra en un sistema hidrogeológico hasta cuando llega a un lugar específico. La abundancia de oxígeno 18 y deuterio, se emplea básicamente como indicador de zonas de recarga del agua subterránea y del grado de evaporación del agua en la superficie terrestre.

Como referencia internacional, se establece que: muestra sin detección de tritio (0 UT), se asocia a un agua cuya recarga no es reciente y por lo tanto se da una edad superior a los cien años; una concentración 0-2 UT, indica agua recargada antes de 1952; si la muestra de agua reporta una concentración de 5-15 UT representa una mezcla de aguas recargadas después de 1952 y aportes recientes y si se tiene entre 20-50 UT, tiene una gran influencia de las pruebas atómicas (1954-1963) y dependerá del decaimiento sufrido (Clark & Fritz, 1997; Mazor, 2004).

El oxígeno 18 y deuterio son datos que en contraste con las otras variables fisicoquímicas de las muestras y los componentes ambientales (suelo, vegetación, rocas, relieve, etc.), permite establecer la edad relativa del agua. Si bien el contenido de tritio se considera una medición directa de la edad del agua, esto sólo se aplica cuando en el estudio hidrogeológico se tienen registros históricos del tritio del agua de lluvia, así como de las zonas de recarga. Dado que esta información histórica no se ha generado en el área de estudio, se consideran las concentraciones de tritio, ^{18}O y ^2H , exclusivamente para establecer características relativas respecto a la temperatura y altitud de la recarga: “mayor altitud que”, “menor altitud que”, “lluvia más fría que o menos que”.

Para una caracterización de los sistemas de flujo subterráneos, es de gran interés e importancia establecer la temperatura y profundidad subterránea que alcanza el recorrido del agua. El geotermómetro es un método químico que permite estimar la temperatura y profundidad del agua en su fase subterránea. Los métodos geotermométricos se basan en observaciones de las variaciones mineralógicas y químicas a lo largo de pozos geotérmicos y experimentos de la interacción agua-roca (Kharaka & Mariner, 1989). El empleo de los métodos geotermométricos se basa en los supuestos de que: i) las reacciones químicas generadas a profundidad dependen de la temperatura, ii) todos los constituyentes involucrados en la reacción agua-roca son abundantes (Molina Maldonado A. , 1997). Los geotermómetros arrojan una temperatura mínima de equilibrio, la cuál es la temperatura a la que el agua llegó a un equilibrio químico con la roca. A partir del valor de temperatura mínima de equilibrio, se estima la profundidad subterránea que alcanza el agua. Los geotermómetros más usados son los basados en la solubilidad de la sílice y sus polimorfos (calcedonia, sílice amorfo y cristobalita) y aquellos basados en las relaciones de los cationes (Na-K, Na-K-Ca, principalmente) constituyentes en el agua (Fournier, 1981). De acuerdo con Cardona Benavides (2007), el uso de estos cálculos de geotermómetros considera las siguientes condiciones: i) no hay mezcla de agua de distintos tipos de flujo, ii) no existe precipitación de sílice y otros minerales durante el ascenso del agua subterránea, iii) no se presenta adsorción y/o desorción de reactantes en el agua subterránea y iv) existe equilibrio químico entre agua y roca.

Para estimar el grado de equilibrio agua-roca, a las muestras con temperatura “termal” se calcula el Índice de Madurez (IM) con la ecuación de Giggenbach (1989). Las muestras con temperatura “fría” no son de interés, ya que su circulación es somera y/o de corta duración, siendo muestras “inmaduras” debido a que, por la baja temperatura del agua, el análisis sólo arrojaría los efectos de la disolución, más no del equilibrio del agua con la roca. Las muestras provenientes de “mezcla” de diferentes flujos de agua, usualmente obtenidas en pozos de extracción, no son confiables para estimar su temperatura mínima de equilibrio con geotermómetros.

Una caracterización hidrogeológica debe expresarse en su respectivo esquema hidrogeológico, al menos en las dos dimensiones primarias (profundidad y largo). La principal limitación de un perfil hidrogeológico es que esquematiza dos (profundidad y largo) de las cuatro dimensiones (profundidad, largo, ancho y tiempo) de la circulación subterránea del agua. La dimensión de profundidad viene dada por el límite inferior (basamento hidrogeológico) y el límite superior (relieve), mientras que la dimensión de largo es la longitud del perfil. En cada sección hidrogeológica de este estudio, se esquematizan los siguientes componentes hidrogeológicos: a) Profundidad del basamento hidrogeológico, b) Temperatura de recarga, y c) Temperatura mínima de equilibrio.

6 Metodología y materiales

La metodología y materiales, en su mayoría, empleados para el presente estudio fueron utilizados en *Characterization of Surface Evidence of Groundwater Flow Systems in Continental Mexico* (Kachadourian Marras *et al.*, 2020). En seguida, se describe la metodología y materiales aplicados, tanto para la *descripción* del área de estudio como para su análisis, empleando los softwares Excel Office 365, ArcMap (10.4.1) y Phytton.

La data espacial se obtuvo por solicitud directa o de los diversos materiales publicados por las siguientes instancias públicas: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). La data geográfica utilizada es la más antigua disponible y con cobertura nacional (continuo nacional), con el objetivo de expresar las condiciones más naturales u originales, dentro de lo posible con base en la información más antigua registrada y publicada oficialmente en formato digital y editable.

Como ya se ha explicado previamente, la descarga hidráulica del agua subterránea tiene atributos de tipo *primarios* y *secundarios* (Tóth J. , 2009). Con base en estos atributos es que se establece la jerarquía para la *superposición, unión* y *validación* de los atributos espaciales reclasificados.

De las cuatro características primarias de zonas de descarga hidráulica de agua subterránea contenidas en la cartografía son: posición baja relativa del relieve y profundidad somera del nivel estático. Del contenido de atributos cartográficos también se identificaron los atributos secundarios o mejor conocidos como fenómenos y manifestaciones ambientales de la descarga directa o difusa de agua subterránea.

Con base en los criterios previamente definidos y en las características mostradas en las tablas de atributos espaciales temáticas originales, se elaboraron matrices de Excel para su clasificación sistemática de los criterios y la generación del nuevo calificador hidrogeológico como nuevo atributo espacial en cada conjunto de datos: las declaraciones condicionales se programaron en Python y se implementaron a través de ArcGIS (v. 10.4.1); después de asociar cada uno de los conjuntos de datos temáticos, se combinaron en una única clase de características utilizando la herramienta ArcGIS Identity (v10.4.1), que calcula una intersección geométrica de las características de entrada heredando todos los atributos de las características que se cruzan. Este proceso tiene limitaciones, ya que combina diferentes conjuntos de datos temáticos con diferente resolución espacial, precisión y temporalidad de registro en campo, y debe interpretarse con precaución y sólo en un enfoque general y de contexto regional del área de estudio.

Una vez obtenida la tabla de atributos de la clase de rasgos, generando las nuevas clasificaciones hidrogeológicas para cada atributo y conjunto de atributos espaciales, se expresaron en mapas. A partir de los mapas de asociación hidrogeológica de cada indicador, se realizó un análisis multi-interdisciplinario (edafología, hidrogeoquímica, ecología, botánica, etc.) exhaustivo, sistémico y no lineal de todas las condiciones definidas para cada uno de los indicadores, definiendo las zonas de sistemas de flujo regionales, a partir de las cuales se generó el mapa final titulado “Evidencia superficial de los Sistemas de Flujo Regionales de Agua Subterránea”, (figura 7, en Kachadourian-Marras *et al.*, 2020) el cual incluye las evidencias en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos del agua circulante en el área de estudio.

A continuación, se indican los aspectos considerados relevantes para establecer las asociaciones hidrogeológicas de los atributos originales (indicadores en superficie) así como de componentes generadores (clima, contexto geológico y relieve):

Contexto geológico. – Actualmente los mapas geológicos públicos y asequibles para el área de estudio, son: el Continuo Nacional Vectorial Geológico Serie I escala 1: 250 000 (INEGI) y el Mapa Geológico Digital de la Faja Volcánica Transmexicana de Ferrari *et al.* (Ferrari, Orozco Ezquivel, Navarro, López-Quiroz, & Luna, 2018), ambos empleados en este estudio.

Relieve. - La caracterización del relieve y sus sistemas de topofomas, se utilizó el Continuo de Elevaciones México Modelo Digital de Elevación 3.0 (INEGI, 2013) y el Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos

Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I Sistema topofomas; la asociación de las geoformas se afina con otras características registradas por INEGI, tales como: *material de depósito, ubicación, y fase* (INEGI, 2001).

Clima. – A pesar de que el clima no es un indicador en superficie de zonas de los sistemas de flujo, siempre es parte del estudio hidrogeológico, como condicionante del desarrollo de los indicadores en superficie y condicionantes hidrogeoquímicas. Para el presente estudio, se empleó: la Carta de Climas, escala 1: 1 000 000 (INEGI, 2008) con datos de 1921 a 1975; para obtener las características generales de los tipos de clima señalados en la Carta Climática se revisó el Diccionario de Datos Climáticos (Vectorial) 1:100 000 (INEGI, 2000), la Guía para la interpretación de Cartografía (INEGI, 2005) y el libro de Enriqueta García Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana (García, 2004), dicha carta utilizó la metodología de la clasificación de Köppen del año 1936, modificada para la República Mexicana en 1964 por la investigadora Enriqueta García y complementada por el INEGI en 1980; se consultaron los datos disponibles publicados en internet de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA) localizadas en el área de estudio para estimar y evaluar: *i*) precipitación y evaporación y *ii*) temperatura de recarga de agua (lluvia) en las estaciones meteorológicas con una altitud mayor respecto a las muestras de agua seleccionadas para estimar la profundidad de recorrido de los potenciales sistemas de flujo.

Agua natural perenne en superficie. – Los cuerpos de agua natural son la manifestación más evidente de zona de descarga de sistemas de flujo de agua subterránea. Por ello, es que el primer indicador superficial a registrar son los cuerpos de agua natural perenne, así como otras manifestaciones o mecanismos directos e indirectos de descarga de agua subterránea (agua en la superficie o somera, proveniente del territorio continental), tales como: manantial, cuerpo de agua (perenne), fango, terreno sujeto a inundación, humedal, humedal potencial, área inundable, cenote, lago perenne, laguna perenne, marisma, pantano, poza perenne, río perenne y terreno sujeto a inundación. Se analizaron los atributos espaciales contenidos en: Conjunto de Datos Vectoriales Topográficos Escala 1:1 000 000 Corrientes y Cuerpos de agua (INEGI, 2000; INEGI, 2000), Red Hidrográfica Digital de México 1.0 Escala 1:250 000 (INEGI, 2006), Conjunto de Datos Vectoriales Topográficos Escala 1:250 000 Serie II (INEGI, 1995), Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación Escala 1:250 000 Serie I Continuo Nacional (INEGI, 1980), Conjunto de datos Vectoriales Fisiográficos Escala 1:1 000 000 Serie I Continuo Nacional Provincias fisiográficas (INEGI, 2001), Cuerpos de Agua Escala 1:50 000 (INEGI, 2009), Conjunto de Datos Vectoriales Climatológicos Escala 1:1 000 000 Humedad de Suelo (INEGI, 2005), Conjunto de Datos Vectoriales de Vegetación Primaria Escala 1:1 000 000 Nivel I y II, Continuo Nacional de Aguas

Subterráneas Escala 1:250 000 Serie II (INEGI, 2008), Inventario Nacional de Humedales (CONAGUA, 2016), Conjunto de Datos Vectoriales de Humedales Potenciales Escala 1:250 000 Serie II (INEGI, 2012). El mapa digital de Humedales Potenciales del INEGI (2012) presenta en polígonos aquellas áreas que, de acuerdo con las características naturales (vegetación, suelo, agua, pendiente, etc.) tienen la capacidad potencial de albergar un humedal. Adicional a la información espacial publicada por INEGI, se incluyó manantiales termales localizados por la Comisión Federal de Electricidad (SARH, 1976 en Peñuela Arévalo, 2013).

Profundidad subterránea del agua. - La profundidad del agua subterránea se obtiene de la profundidad del nivel estático registrado en pozos y norias de las bases de datos oficiales: Red de monitoreo de Aguas Subterráneas (CONAGUA, 2019), Continuo Nacional de Aguas Subterráneas Escala 1:250 000 Serie II (INEGI, 2008) y el Continuo de Elevaciones Mexicano (INEGI, 2013) se empleó para el análisis de la profundidad del agua en relación con el contexto topográfico.

Suelos. – Los insumos de información y datos utilizados para la caracterización edafológica preliminar del ambiente de interés son: Carta edafológica escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional (INEGI, 2013) que contiene los datos levantados en el periodo 2002-2006, Conjunto de Datos de Perfiles de Suelos Escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional) (INEGI, 2013), Diccionario de Datos Alfanuméricos escala 1:250 000 (INEGI, 2001), Diccionario de Datos Edafológicos escala 1:250 000 versión 2 (INEGI, 2009), Diccionario de Datos Edafológicos escala 1: 250 000 versión 3 (INEGI, 2014), Carta Humedales Potenciales escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional (INEGI, 2012), Claves para la Taxonomía de Suelos (USDA & NRCS, 2014), Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, ISRIC, & FAO, 2007; 2015), Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos Continuo Nacional serie I Sistema topofomas (INEGI, 2001) y Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000 Unidades climáticas Serie I (INEGI, 2008). Dicha información se procesó y analizó mediante el sistema de información geográfica ArcMap 10.4.1. y Excel. Las cartas edafológicas del INEGI muestran la distribución geográfica de los suelos en México, sus características fisicoquímicas y su clasificación con base en el sistema FAO/UNESCO modificado por el INEGI para adaptarlo a México, así como la Base de Referencia Mundial (WRB, por sus siglas en inglés) generada por Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés).

El continuo nacional de la cobertura edáfica se forma por polígonos espaciales, cada uno tiene tres principales atributos (INEGI, 2009, 2014): *i) suelo dominante*, atributo en $\geq 60\%$ del polígono; *ii) calificador primario* del suelo dominante, que indica su cualidad predominante; y *iii) suelo secundario*, que cubre 20-40% del polígono edáfico, en cuestión.

Es importante señalar que la WRB es una referencia mundial y que el significado o descripción de los Grupos de Suelo de Referencia son una apreciación general de la cubierta edáfica mundial (IUSS, ISRIC, & FAO, 2007; 2015). Respecto a los sistemas de clasificación de suelos se indica que el sistema de clasificación denominado genéricamente FAO (2007; 2015) y el sistema denominado Soil Taxonomy (USDA & NRCS, 2014) son los dos esquemas de clasificación más utilizados a nivel mundial. Si bien consideran aspectos comunes tal como la presencia de horizonte diagnóstico y régimen de humedad, los criterios para incluirlos en uno u otro grupo no son iguales. En trabajos científicos, este último sistema de clasificación es en general el más utilizado. En el presente estudio se utilizan ambos sistemas de clasificación con el fin de ampliar las posibilidades de comprensión y/o considerar los aspectos relevantes de ambos criterios con la finalidad de encontrar las mejores asociaciones de los suelos con la fase subterránea del agua.

Se organizó la base de datos original de los perfiles edáficos del INEGI en nuevos perfiles de modo que pueda ser interpretada de forma más sencilla y didáctica, debido a que la base de datos del INEGI no presenta un orden de fácil comprensión, debiéndose ordenar conforme a las coordenadas espaciales, el límite del horizonte, profundidad, variables química y morfológica.

Las descripciones taxonómicas se analizaron con su posición en el relieve, utilizando para ello la carta Topográfica Escala 1:250 000 serie II y Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0); se señalan las topoformas que coinciden con el grupo de suelo dominante y el análisis visual general del área de estudio (ambiente regional y no local) del modelo digital de elevación, la carta topográfica y la carta de suelos. Posteriormente, se analizó el patrón de distribución espacial de los suelos con mayor cobertura espacial respecto a los suelos de menor representatividad. La información edafológica fue organizada a modo de establecer asociaciones entre las propiedades morfológicas y analíticas descritas en perfiles edáficos representativos de los diferentes ambientes, con el posible origen de dichas propiedades. A tal fin, se consideran factores formadores de los suelos y como podrían estar participando los flujos de agua subterránea en su formación y evolución considerando la concepción propuesta por Tóth (Tóth J. , 1970; 2000). La comprensión de la forma en que interaccionan los factores formadores para definir un suelo es lo que permite analizar dicho suelo como un componente de ecosistemas locales vinculados con los regionales. Los porcentajes de superficie calculados por tipo de suelo es respecto a la cobertura edáfica del área de estudio.

Vegetación y usos de suelo. - Se analizó la información pública más antigua oficial, accesible y asequible registrada con datos de campo de los años 1968, 1971-1986 contenida en la base de datos vectoriales de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación Escala 1:250 000 Serie I (INEGI, 1992). La descripción se

complementó con el análisis integral de: Carta de Unidades climáticas (INEGI, 2008), Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos Continuo Nacional serie I Sistema topofomas (INEGI, 2001) y Carta edafológica escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional (INEGI, 2013). Así mismo, con el estudio de la Guía para la Interpretación de Cartografía Uso del Suelo y Vegetación Serie I-II (INEGI, 2005) se identificaron las especies dominantes presentes para posteriormente buscar aquellas que forman parte de las especies publicadas por Meinzer (1927) y Robinson (1958) y que corresponden con especies que habitualmente extraen el agua en la fase subterránea del ciclo hidrológico. La suculencia (habilidad de almacenar agua) es una característica frecuente en las halófitas de familia diferente.

Hidrogeoquímica e isotopía. - Los datos hidrogeoquímicos compilados para el presente estudio son obtenidos de los siguientes estudios: Muestreo en 8 puntos de Los Altos de Jalisco, realizado para el presente estudio en agosto del 2015 por Alessia Kachadourian Marras bajo la supervisión del Dr. José Joel Carrillo-Rivera y la Dra. Liliana Peñuela Arévalo; *Understanding the dynamics and contamination of an urban aquifer system using groundwater age (^{14}C , ^3H , CFCs) and chemistry* de Mahlknecht *et al.*, 2017; *Groundwater flow processes and mixing in an active volcanic system: the case of Guadalajara (Mexico)* de Hernández *et al.*, 2015; *Estudio de actualización geohidrológica integral de las cuencas Atemajac-Toluquilla, estado de Jalisco, México* (GEOEX S.A de C.V., 2003) para el Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado; Peñuela Arévalo (2013) y Sánchez Díaz (2007).

Métodos para la toma de parámetros fisicoquímicos, muestreo y análisis de las muestras. - El método empleado para la recolección y el almacenamiento de una muestra es de suma importancia, ya que determina el que una muestra alcance o no un estado de equilibrio, lo cual sería una composición química diferente al agua subterránea que se busca caracterizar. Con el fin de entender la posible causa de que las muestras evaluadas presentan concentraciones de los iones mayores, menores y trazas fuera de los rangos de referencia, se revisó la metodología para la recolección y análisis de las muestras con base en la información pública y asequible presentada en los reportes correspondientes:

– Muestras colectadas en Los Altos de Jalisco, agosto de 2015 (temporada de lluvias): Los procedimientos para la toma de las muestras y la medición en campo de la temperatura, pH, potencial de óxido reducción (Eh), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y alcalinidad, fueron los establecidos en APHA-AWWA-WEF (2017); se utilizaron medidores (Conductronic) con una celda de aislamiento de flujo para impedir la interacción del agua subterránea con la atmósfera, evitando en gran medida que la muestra disuelva oxígeno y libere dióxido de carbono, previo a la medición, pues al realizarse la interacción entre el agua (subterránea) y la atmósfera las lecturas de pH, Eh y CE no

representarían las condiciones del agua a profundidad; la medición de alcalinidad se realizó en muestras filtradas por titulación volumétrica (titulador Hach, 0.16N/H₂SO₄, para este muestreo fue con una normalidad de 0.16, es un ácido con una concentración baja y se eligió porque la hipótesis es que el agua objetivo contiene pocos bicarbonatos (En Anexo se describen los pasos del muestreo realizado). El contenido isotópico fue determinado en el Laboratorio Isotópico Ambiental del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona, la determinación de los cationes y aniones mayoritarios se realizó por cromatografía de iones en el laboratorio de Cromatografía del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM, reportados el 29 de septiembre del 2015 y para los elementos traza se analizaron en el Laboratorio de Química Ultrapura (LABQUP) y de Q-ICP-MS (Espectrometría de masas), del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM. Los límites de detección de los laboratorios de la UNAM son: Sodio (Na⁺), 0.4 mg/L; Potasio (K⁺), 0.3 mg/L; Calcio (Ca²⁺), 0.4 mg/L; Magnesio (Mg²⁺), 0.2 mg/L; Cloruro (Cl⁻), 3 mg/L; Fluoruro (F⁻), 3 mg/L; Bromo (Br⁻), 5 mg/l; Fosfatos (PO₄³⁻), 10 mg/l; Sulfatos (SO₄²⁻), 10 mg/l; Nitratos (NO₃⁻), 5 mg/l; Arsénico (As), 0.03 mg/L; Amonio (NH₄⁺), 0.4 mg/l; Cobalto (Co), 0.05 mg/l. Los límites de detección para el potasio, fluoruro, bromo, sulfato, nitrato, arsénico, amonio, cobalto y fosfatos están por encima del valor mínimo esperado en muestras de agua subterránea, de acuerdo con los rangos de referencia de Freeze y Cherry (1979). Como control de calidad el LABQUAP duplicó dos muestras las cuales presentaron una diferencia porcentual relativa menor al 20%.

– Las muestras publicadas en Hernández *et al.*, 2015 y Mahlknecht *et al.*, 2017 se colectaron en marzo de 2011 (temporada de secas): recolectadas en 40 pozos de extracción de agua y analizadas para iones mayores, menores, elementos traza e isótopos estables (deuterio, oxígeno 18 y Tritio). Los parámetros medidos en campo como temperatura, pH, conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto fueron medidos usando medidores portátiles (Thermo, Orion,). La alcalinidad fue determinada en campo mediante *volumetric titration* (0.02N/H₂SO₄) en muestras filtradas (0.45 µm) a un pH 4.3. Las muestras para cationes fueron acidificadas con HCl (ácido clorhídrico) ultrapuro a un pH <2, y todas las muestras fueron conservadas a una temperatura constante de 4°C. Cationes disueltos y aniones fueron determinados por ICP espectrometría de masa y cromatografía de iones, respectivamente. Los duplicados de muestras seleccionadas fueron analizados usando ICP-OES, de acuerdo con los métodos estándar (APHA, 2012). Los isótopos estables fueron analizados en el Environmental Isotope Laboratory de la Universidad de Waterloo, Canadá. Para el análisis de deuterio, se empleó el método de manganeso caliente y se analizó por GC-MS. La precisión analítica es de 0.15% para el 18-O y de 2% para el deuterio. El tritio fue analizado en el Environmental Isotope Laboratory, de la Universidad de Arizona, donde se usó un contador de

escintilación líquido después del enriquecimiento electrolítico (“liquid scintillation counter after electrolytic enrichment”). La precisión analítica promedio del análisis de tritio es de 0.3 UT.

– Muestras reportadas por GEOEX S.A de C.V. (2003) en temporada de secas: 48 muestreos fisicoquímicos por parte de GEOEX S.A de C.V., de acuerdo con GEOEX S.A de C.V. (2003) “las muestras de los pozos de abastecimiento fueron tomadas directamente en el tren de descarga de pozos activos, y en el caso de pozos inactivos, éstas se tomaron después de un mínimo de 15 minutos de operación del pozo.” Las cuales se colectaron y transportaron en “dos envases con capacidad de un (1) litro de pvc y aseguradas con tapa y contratapa para las determinaciones fisicoquímicas (...)” y conservadas a temperaturas entre 3-5 °C. En campo se midió temperatura (°C), conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$; Sólidos Totales Disueltos en ppm y pH con equipo portátil marca Hanna. De acuerdo con GEOEX S.A de C.V. (2003), se realizaron duplicados por cada 10 muestras colectadas, los análisis fisicoquímicos se realizaron en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). GEOEX S.A de C.V. (2003), reporta que 40 muestras se efectuaron en época de estiaje para la determinación de isótopos y que para dichos análisis realizados en los laboratorios del Instituto de Tecnología del Agua (IMTA) y la Universidad de Arizona, utilizaron “1 envase de pvc con tapa y contratapa con capacidad de 350 ml para análisis de Deuterio, 1 envase de pvc con tapa y contratapa con capacidad de 350 ml para análisis de O-18, 1 envase de pvc con tapa y contratapa con capacidad de 500 ml para análisis de Tritio ambiental y 1 envase de pvc con tapa y contratapa con capacidad de 1000 ml para análisis de Carbono14.” El CIATEJ se basó en la siguiente normatividad oficial mexicana para realizar los análisis fisicoquímicos: *NMX-AA-073 Determinación de Cloruros. Método Argentométrico*, *NMX-AA-036 Determinación de Alcalinidad / Acidez Total. Método Titulométrico*, *NMX-AA-072 Determinación de Dureza total. Método del EDTA.*, *NMX-AA-077 Determinación de Fluoruros. Método del electrodo de ión selectivo*, *NMX-AA-082 Determinación de Nitratos. Método Espectrofotométrico Ultravioleta*, *NMX-AA-020 Determinación de Sólidos Disueltos Totales. Método de Evaporación*, *NMX-AA-074 Determinación de Sulfatos. Método de turbidimétrico*, *NOM-117-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica*; y Método de Espectrometría de Absorción Atómica. En el caso de GEOEX S.A de C.V. (2003), el responsable del estudio Marco Antonio Ramírez confirmó por comunicación oral que para dicho estudio los pozos estaban en operación. El método descrito arriba es sólo el aplicado para las muestras colectadas por GEOEX S.A de C.V., ya que el estudio integra otras muestras reportadas por el SIAPA directamente a GEOEX S.A. de C.V. para ser incorporadas en el estudio, en el cual no se hace ninguna mención respecto al método de recolección y análisis empleado por el SIAPA. Es decir, que de las

149 muestras reportadas por GEOEX S.A de C.V. (2003) en su Tabla 7.4 *Análisis Físicoquímicos*, sólo 48 fueron muestreadas por GEOEX S.A de C.V. Es decir, sólo del 32% de las muestras se conoce su metodología de muestreo.

Para poder caracterizar los sistemas de flujo de agua subterránea es necesario identificar la composición química original o más natural posible. Se integraron todas aquellas muestras de las bases de datos que presentaban las siguientes condiciones:

- ✓ Concentración de nitratos (NO_3) menor o igual a 10 mg/l
- ✓ Registro de temperatura y pH
- ✓ Con valores de sodio (Na) y potasio (K)

Las muestras reportadas en GEOEX S.A de C.V. (2003) y en Sánchez Díaz (2007) no especifica si reportan N-NO_3 ó NO_3 , sin embargo, se interpreta que las muestras reportan concentraciones de N-NO_3 debido a que es lo que estila en México por parte de las instancias públicas y porque que las muestras colectadas por Sánchez-Díaz fueron analizadas en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, quienes suelen reportar en términos de N-NO_3 ; el resto de las muestras también reportan concentraciones de N-NO_3 obtenidas de Hernández *et al.*, (2015) y Mahlkecht *et al.*, (2017); en el caso de las muestras colectadas para el presente estudio los laboratorios del Instituto de Geología-UNAM, reportan concentraciones de Nitratos (NO_3) (Comunicación e-mail Dra. Blanca Prado).

Para el presente estudio todas las muestras fueron analizadas en concentraciones de nitratos (NO_3), para lo cual se calcularon las concentraciones de nitratos (NO_3) a partir de aquellas muestras reportadas en concentraciones de nitrógeno de nitratos (N-NO_3).

A las 221 muestras se les aplicaron las tres condiciones y se obtienen 51 muestras (49 pozos, 1 manantial y el Río Verde) con valores de temperatura, pH, sodio y potasio y con concentraciones menores o iguales a 10 mg/l de NO_3 . En estas 51 muestras se incluyen 7 muestras que los laboratorios de la UNAM reportaron con una concentración como *No Detectada* (ND), es decir, que presentan concentraciones menores a 5 mg/l de nitratos (límite de detección para Nitrato), se sustituyó ND por el valor de <5 mg/l; asimismo, todas aquellas muestras con reportes en cero o sin valor de nitratos.

Es de suma relevancia mencionar que el total de las 34 muestras de análisis físicoquímicos reportadas en Sánchez Díaz (2007) se reportan con una concentración de nitratos mayor a 10 mg/l, por lo que no fueron incluidas en el análisis hidrogeoquímico.

Es esencial en un análisis hidrogeoquímico revisar que los principales iones mayoritarios que siempre están presentes en el agua (sodio, calcio, bicarbonato, magnesio, cloruro y sulfato), reporten concentración y no en cero. De las 221 muestras compiladas, 36 muestras no reportan valores de sodio,

99 muestras sin reporte de potasio, y para el resto de los iones mayoritarios alrededor del 5% de las muestras reportan en cero o sin valor; todas las muestras con concentraciones en cero o sin valor en los iones mayoritarios son obtenidas del estudio de GEOEX S.A de C.V. (2003) y de las muestras analizadas en el laboratorio de Cromatografía del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM. Como parte de la evaluación de los resultados analíticos es también necesario utilizar los conceptos del balance de electroneutralidad (Appelo & Postma, 2005) Para poder realizar el balance de electroneutralidad de los cationes y aniones detectados en el análisis de laboratorio, es decir, calcular el % de error de las muestras tomadas, así como las reportadas en las bases de datos de los estudios seleccionados. Se convirtieron sus concentraciones iónicas en forma absoluta en valores de miliequivalentes por litro (meq/l) con la siguiente ecuación:

$$\frac{meq}{l} = \frac{mg}{l} \times \frac{1}{P.M} \times Valencia$$

Una vez obtenido las concentraciones en meq/l se realiza la suma total de los aniones y cationes para entonces calcular el % de error con la siguiente formula:

$$\% Error = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} \times 100$$

En hidrogeoquímica se considera un análisis confiable con un % de error menor o igual a 5% y aceptable con un error menor o igual a 10%. Continuando con el análisis de las muestras, se calculó con Excel el % de error a las 51 muestras (Tabla 51). Tabla en la que además de pueden ver valores de temperatura, pH, sodio, potasio y con una concentración de nitratos menor a 10 mg/l; los cálculos en Excel se verificaron en el software PHREEQC. Ninguna muestra de análisis físico químico reportadas en Sánchez Díaz (2007) presentó un error mayor al 10%, por lo que no fueron incluidas.

Para las muestras de Los Altos, la medición de alcalinidad se realizó con el método de titulación, que consiste en hacer reaccionar una muestra de agua con un ácido fuerte. A medida que se añade el ácido, los bicarbonatos amortiguan la disminución del pH mediante la incorporación de H⁺ (proveniente de la disociación del ácido), formando H₂CO₃⁻. Cuando la totalidad de bicarbonatos son consumidos (punto de equivalencia, pH ≈4.3), la solución pierde su capacidad de amortiguar y con la siguiente gota añadida de ácido el pH disminuye drásticamente. El punto de equivalencia es el punto en el cual la totalidad del HCO₃⁻ ha sido convertido en H₂CO₃⁻ por efecto de la adición de un ácido fuerte, generalmente encontrado alrededor de un pH ≈4.5.

El procedimiento de titulación incluye un ensayo con indicadores de alcalinidad (fenolftaleína, verde de bromocresol) con el fin de poder visualizar cuáles son los constituyentes mayores de la alcalinidad

presentes en la muestra. Al agregar las gotas de fenolftaleína, al color de la muestra le pueden pasar dos situaciones: *i*) se torna “rosa”, se alude a que la muestra tiene $\text{pH} > 8.3$, e indica que el CO_3^{2-} domina la alcalinidad; *ii*) si la muestra se mantiene incolora (no se tiñe), indica que el $\text{pH} < 8.3$ y que el constituyente principal de la alcalinidad es el HCO_3^- . Luego se agregan unas gotas de verde de bromocresol y la muestra adopta un color verde azulado, se continua con la titulación (adición de ácido) agitando suavemente, el color cambiará a rosa, indicando un $\text{pH} \approx 4.3$.

Para calcular el volumen de ácido añadido y la alcalinidad, se utiliza el método de Gran, que se basa en el comportamiento lineal de los iones de H^+ aportados por el ácido añadido, una vez rebasado el punto de equivalencia. Por eso, se debe seguir titulando con ácido hasta obtener un pH inferior a 3.5, y así asegurar la identificación del punto en el cual toda la alcalinidad ha sido titulada y los iones de H^+ comienzan a estar en exceso. La fórmula para calcular la alcalinidad total (CaCO_3 , OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^-):

$$\text{Alcalinidad total} = \frac{\text{volumen ácido (ml)} \times \text{concentración del ácido (N)} \times 50000}{\text{volumen muestra (ml)}}$$

El volumen total de ácido añadido es directamente proporcional a la alcalinidad total de la muestra. Para obtener la concentración de los analitos por separado se realizaron los cálculos de algunas de las seis funciones ($F_1 - F_4$) de Gran (Rounds, 2012) y sus respectivos gráficos (Ver Anexo), en el calculador de alcalinidad del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://or.water.usgs.gov/alk/>).

Análisis de los datos hidrogeoquímicos. - Se revisaron las concentraciones de iones mayores, menores y traza presentes en 51 muestras (con valores de temperatura, de pH , de sodio, de potasio, concentración de nitratos menor o igual a 10 mg/l y con un % de error menor o igual al 10).

Se estimó la concentración de STD de las 51 muestras, sumando las concentraciones (mg/l) de sodio, potasio, magnesio, calcio, cloruro, sulfato y bicarbonatos, es un valor estimado a partir de las concentraciones reportadas, las cuales están sujetas a las posibles variaciones sucedidas por el tipo de método de muestreo, almacenamiento y método de análisis en los laboratorios.

Las muestras se agruparon en función de su temperatura para analizar comparativamente los parámetros físicos y el resto de los elementos químicos, que permita aportar más información para auxiliar con la agrupación de las muestras, en términos de jerarquía de los sistemas de flujos de agua subterránea, así como a que zona del flujo corresponde cada muestra. Para empezar a definir los grupos de agua, primero se revisaron los rangos de temperatura de las muestras seleccionadas respecto a la temperatura ambiente reportada en el momento del muestreo o la temperatura promedio en el área de estudio y mes o temporada del año que se colectó la muestra. Debido a que las 51 muestras seleccionadas se obtienen de 4 fuentes distintas, se consideró que la temperatura ambiente promedio es de 23°C (sólo las 16 muestras

de Los Altos de Jalisco reportan la temperatura ambiente), para el resto, se hizo referencia a la temperatura promedio anual o estacional consultada en la literatura.

Posteriormente, las muestras agrupadas térmicamente se representaron en Diagramas de Piper, un tipo de diagrama que facilita identificar visualmente la composición fisicoquímica de cada análisis de muestra, a partir del cual se identifican los grupos o familia de agua por ion dominante y su correspondiente facie hidroquímica (Freeze & Cherry, 1979).

Los análisis de las muestras se ordenaron en Excel y se ingresaron en el software PHREEQC para determinar las facies hidroquímica, con las concentraciones iónicas absolutas de cada muestra y su porcentaje, se determinó manualmente la facie hidroquímica con base en la concentración de los cationes y aniones mayoritarios (HCO_3 , Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K) presentes en más del 20% o más del total de los analitos, con base en la concentración iónica de total de lo aniones/cationes (meq/l) para HCO_3 , Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, ejemplo:

$$\text{HCO}_3 = 100 / \left(\text{Total Aniones} \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}} \right) * \text{HCO}_3 \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}} \right) \right)$$

Una vez obtenida la concentración en porcentaje, entonces se denomina la familia empezando por nombrar el anión o aniones con mayor porcentaje, seguido de nombrar el catión o cationes predominantes y se escribe su facie hidrogeoquímica correspondiente.

La identificación de los grupos de agua, continua mediante el análisis de los rangos de valores de: *i*) los cationes, indicadores de la composición rocosa dominante, por la que circula el agua; *ii*) de los aniones, los cuales sugieren la distancia y/o tiempo de residencia relativo del agua; *iii*) contenido de litio, por tratarse de un ambiente dominado por rocas ígneas; y *iv*) análisis entre diversos analitos y parámetros físicos de las muestras; se graficaron las relaciones entre ciertos analitos para visualizar la tendencia de su comportamiento.

El análisis hidrogeoquímico se vio limitado por aquellas muestras en las que las concentraciones de analitos tipo *traza* se reportaron como menor a 0.005 mg/l, sobre todo en el caso de litio y fluoruro.

Para estimar el grado de equilibrio agua-roca, a las muestras con temperatura “termal” se les aplicó el cálculo de Índice de Madurez (IM) con la ecuación de Giggenbach (1988), donde se emplean las concentraciones (mg/l) de los cationes potasio, magnesio y sodio:

$$IM = 0.315 \log \left(\frac{K}{Mg} \right) - \log \left(\frac{K}{Na} \right)$$

Cuando el valor de IM es mayor a dos ($IM > 2$) se considera suficiente para estimar la *temperatura mínima de equilibrio agua-roca* y la *profundidad de recorrido del agua*, correspondiente. Con métodos geotérmicos se estimó la *temperatura mínima de equilibrio* para aquellas muestras con temperaturas “termales”, usando el software PHREEQC. Una vez obtenida la *temperatura mínima de equilibrio*, se estima la *temperatura de recorrido* y la *profundidad del recorrido* del agua:

$$\text{Temperatura de recorrido} = \text{temperatura mínima de equilibrio} - \text{temperatura de recarga}$$

$$\text{Profundidad del recorrido del agua} = \frac{\text{Temperatura de recorrido} * 100}{\text{gradiente geotérmico}}$$

La *temperatura de recarga* se estima con base en la temperatura atmosférica promedio anual histórica obtenida de las estaciones meteorológicas localizadas a una altitud igual o mayor de las muestras con $IM > 2$.

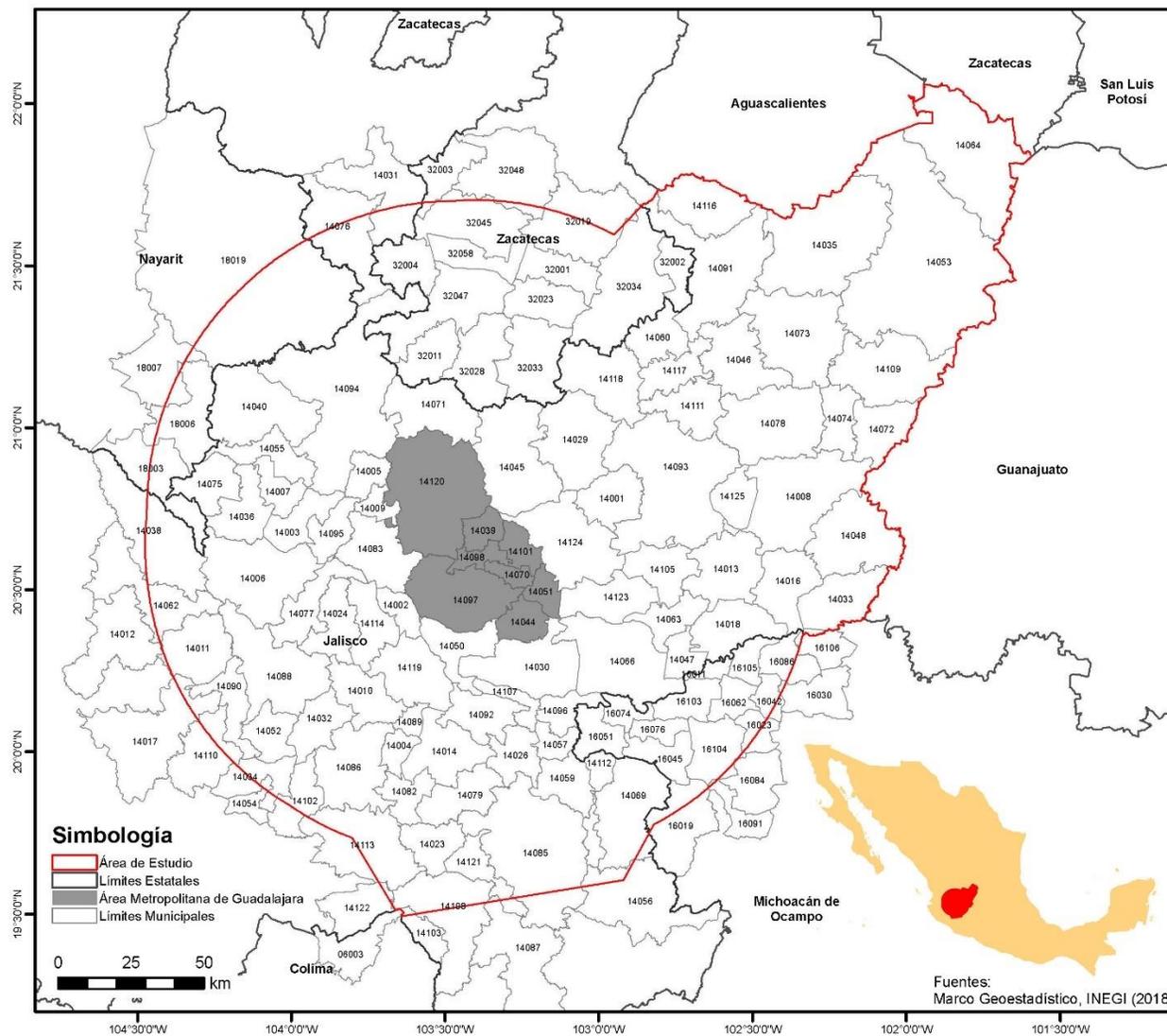
La abundancia de ^2H y ^{18}O , calculada con respecto al estándar VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water), se expresa en partes por mil (Clark & Fritz, 1997). La Línea Meteorica Global se graficó de acuerdo con la ecuación $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 11.27$, dando valor de -1 a -22 a $\delta^{18}\text{O}$. La precisión analítica de los resultados sólo se conoce para ciertas muestras, en el caso de las muestras 44-51 (Peñuela Arévalo, 2013) y de las muestras 13-20 generadas para el presente estudio, reportan una precisión analítica de $\delta^2\text{H} \text{‰} = 0.9$ y $\delta^{18}\text{O} \text{‰} = 0.08$; para las muestras 21-43 la precisión analítica $\delta^2\text{H} \text{‰} = 2\%$ y $\delta^{18}\text{O} \text{‰} = 0.15$ para el resto de las muestras (1, 2 y 6), se desconoce la precisión analítica, ya que no es reportada en los documentos asequibles de GEOEX S.A. De C. V (2003).

Construcción de los perfiles hidrogeológicos. - Para la elaboración de un modelo conceptual regional preliminar del área de estudio se establecieron dos secciones (A-A' y B-B') para las cuales se tomaron en cuenta los siguientes criterios: *i*) localización de muestras de los grupos extremos de las muestras analizadas, *ii*) orientación del relieve; y *iii*) similitud del tipo de rocas aflorantes y geoformas en el lugar de las muestras. Con base en las muestras intersecadas y las proyectadas en cada sección (muestras proyectas se localizan a ≤ 1 km del perfil), se desarrollaron las secciones geológicas, a partir de las cuales, se propusieron las respectivas secciones hidrogeológicas.

7 Descripción del área de estudio

Localización política y administrativa. - Para la selección del área de estudio se consideraron los límites de la Zona Metropolitana de Guadalajara, dentro del territorio de Los Altos de Jalisco y de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana; también se consideró la localización de los principales cuerpos de agua natural perenne; y los elementos topográficos más altos y bajos dentro de los 100 km a la redonda de la Zona Metropolitana de Guadalajara. El área de estudio con una superficie de 52 390.17 kilómetros cuadrados (km²), incluye las muestras de agua y su contexto ambiental regional, abarcando 145 municipios en 7 entidades federativas: Jalisco, 98 municipios; Michoacán de Ocampo, 18 municipios; Zacatecas, 15 municipios; Guanajuato, 4 municipios; Nayarit, 4 municipios; Aguascalientes, 3 municipios; y Colima, 1 municipio (Ver Mapa 1).

La Zona Metropolitana de Guadalajara es la segunda ciudad más importante de México la novena ciudad más poblada de Latinoamérica. El grado de importancia se debe a los casi cuatro y medio millones de personas que la viven, su extensión territorial y su aporte a la actividad económica regional-nacional, etc. Se estima que para el año 2030, la Zona Metropolitana de Guadalajara albergará el 70% de la población estatal y más del 90% de la población regional. Los habitantes de la Zona Metropolitana de Guadalajara contabilizan entre el 70% y el 80% de la riqueza generada en los sectores secundario y terciario de la economía del estado de Jalisco. Actualmente, la Zona Metropolitana de Guadalajara se conforma por 8 municipios: Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga, El Salto, Ixtlahuacán de los Membrillos y Juanacatlán. La Zona Metropolitana de Guadalajara se localiza a 80 km de Los Altos de Jalisco y es territorio líder en la producción agropecuaria para consumo nacional y de exportación.

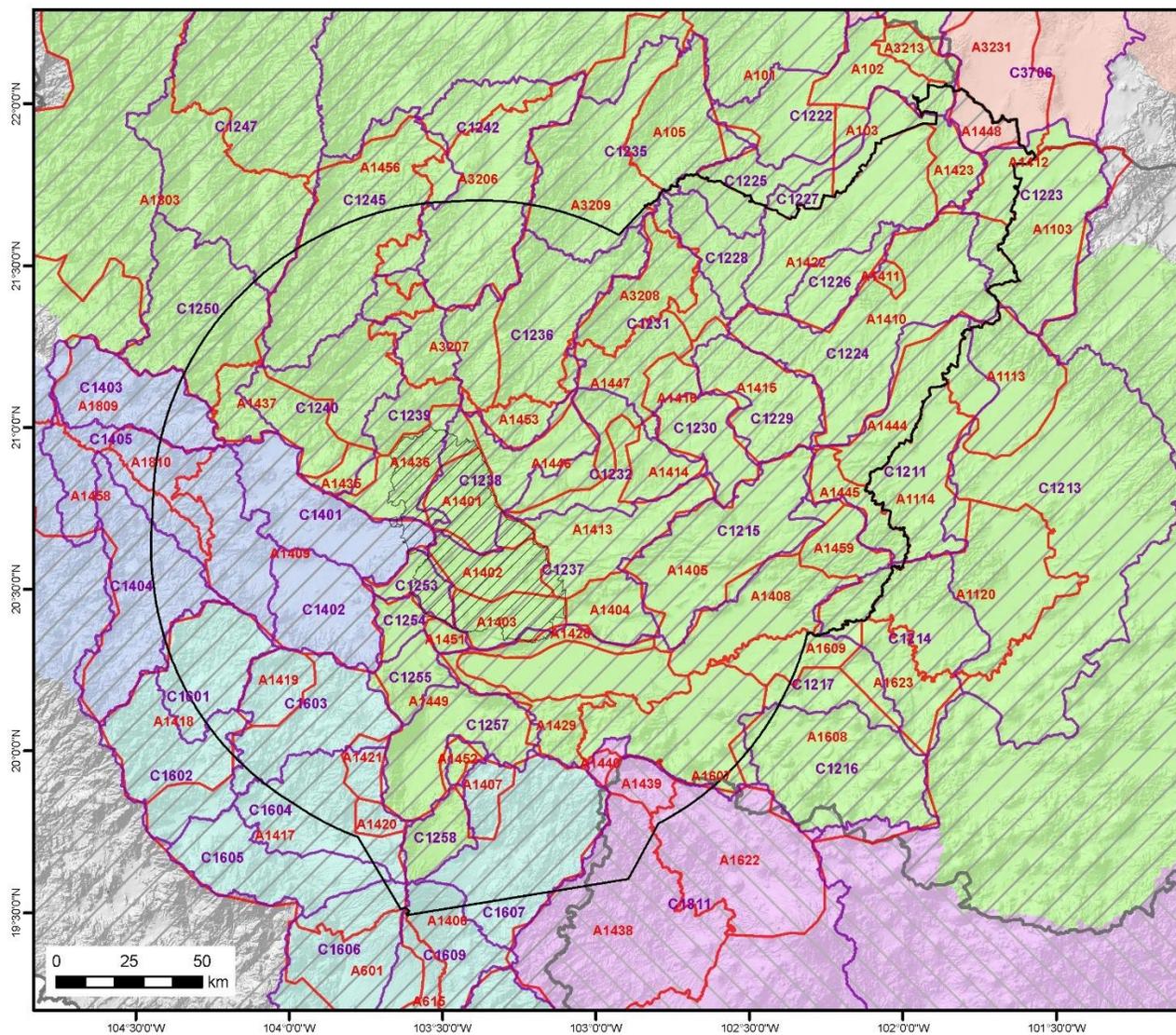


Localización General del Área de Estudio

Clave	Municipio	Clave	Municipio
1001	Aguascalientes	14085	Tanzulza de Gordiano
1002	Ayamoles	14086	Tapalpa
1003	Caballo	14087	Tecuilán
1004	Cajuma	14088	Tecolotlán
1005	Colima	14089	Tehuacan de Montesiego
1006	Comala	14090	Tenamaxtlán
1007	Manuel Doblado	14091	Tecolotlán
1008	León	14092	Tepic
1009	Changos	14093	Tepic
1010	Perote	14094	Tequila
1011	Purísima del Rincón	14095	Tepic
1012	San Felipe	14096	Tirapán el Alto
1013	Acapulco	14097	Tlajomilco de Zúñiga
1014	Acapulco de Juárez	14098	San Pedro Tlaquepaque
1015	Ahuacatlán	14099	Tonalá
1016	Amacuzac	14100	Tonayán
1017	Amatitlán	14101	Tonalá
1018	Anahuac	14102	Tototlán
1019	San Benito de Escobedo	14103	Tuxtepec
1020	Aranzaz	14104	Tuxpan
1021	Atzaceta	14105	Unión de San Antonio
1022	Atzaceta	14106	Unión de Tula
1023	Atzaceta	14107	Valle de Guadalupe
1024	Atzaceta	14108	Valle de Juárez
1025	Atzaceta	14109	San Gabriel
1026	Atzaceta	14110	Villa Corona
1027	Atzaceta	14111	Villa Hidalgo
1028	Atzaceta	14112	Cañadas de Obregón
1029	Atzaceta	14113	Tehuacan de González Gallo
1030	Atzaceta	14114	Tehuacan de Torres
1031	Atzaceta	14115	Zapotlán
1032	Atzaceta	14116	Zapotlán
1033	Atzaceta	14117	Zapotlán
1034	Atzaceta	14118	Zapotlán
1035	Atzaceta	14119	Zapotlán
1036	Atzaceta	14120	Zapotlán
1037	Atzaceta	14121	Zapotlán
1038	Atzaceta	14122	Zapotlán
1039	Atzaceta	14123	Zapotlán
1040	Atzaceta	14124	Zapotlán
1041	Atzaceta	14125	Zapotlán
1042	Atzaceta	14126	Zapotlán
1043	Atzaceta	14127	Zapotlán
1044	Atzaceta	14128	Zapotlán
1045	Atzaceta	14129	Zapotlán
1046	Atzaceta	14130	Zapotlán
1047	Atzaceta	14131	Zapotlán
1048	Atzaceta	14132	Zapotlán
1049	Atzaceta	14133	Zapotlán
1050	Atzaceta	14134	Zapotlán
1051	Atzaceta	14135	Zapotlán
1052	Atzaceta	14136	Zapotlán
1053	Atzaceta	14137	Zapotlán
1054	Atzaceta	14138	Zapotlán
1055	Atzaceta	14139	Zapotlán
1056	Atzaceta	14140	Zapotlán
1057	Atzaceta	14141	Zapotlán
1058	Atzaceta	14142	Zapotlán
1059	Atzaceta	14143	Zapotlán
1060	Atzaceta	14144	Zapotlán
1061	Atzaceta	14145	Zapotlán
1062	Atzaceta	14146	Zapotlán
1063	Atzaceta	14147	Zapotlán
1064	Atzaceta	14148	Zapotlán
1065	Atzaceta	14149	Zapotlán
1066	Atzaceta	14150	Zapotlán
1067	Atzaceta	14151	Zapotlán
1068	Atzaceta	14152	Zapotlán
1069	Atzaceta	14153	Zapotlán
1070	Atzaceta	14154	Zapotlán
1071	Atzaceta	14155	Zapotlán
1072	Atzaceta	14156	Zapotlán
1073	Atzaceta	14157	Zapotlán
1074	Atzaceta	14158	Zapotlán
1075	Atzaceta	14159	Zapotlán
1076	Atzaceta	14160	Zapotlán
1077	Atzaceta	14161	Zapotlán
1078	Atzaceta	14162	Zapotlán
1079	Atzaceta	14163	Zapotlán
1080	Atzaceta	14164	Zapotlán
1081	Atzaceta	14165	Zapotlán
1082	Atzaceta	14166	Zapotlán
1083	Atzaceta	14167	Zapotlán

Mapa 1 Localización política administrativa del área de estudio.

De acuerdo con la CONAGUA, el área de estudio abarca parcialmente cinco *Regiones Hidrológicas*: RH 12 *Lerma- Santiago*, RH 16 *Armería Coahuayana*, RH 14 *Río Ameca*, RH18 *Balsas* y RH 37 *El Salado*, las cuales son parte de la *Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma-Santiago* y una porción mínima de la RHA IV *Balsas*. La CONAGUA ha dividido el territorio nacional en 653 polígonos en superficie denominados *acuíferos*; el área de estudio se integra por 67 *acuíferos*, de forma parcial o total. Con base en el escurrimiento superficial del agua y los parteaguas del relieve (hidrografía) la CONAGUA ha dividido el territorio nacional en 757 polígonos nombrados como *cuencas para la administración de aguas superficiales* y el área de estudio abarca 48, algunas parcialmente (Ver Mapa 2).



Contexto hidrográfico y administrativo del agua

Simbología

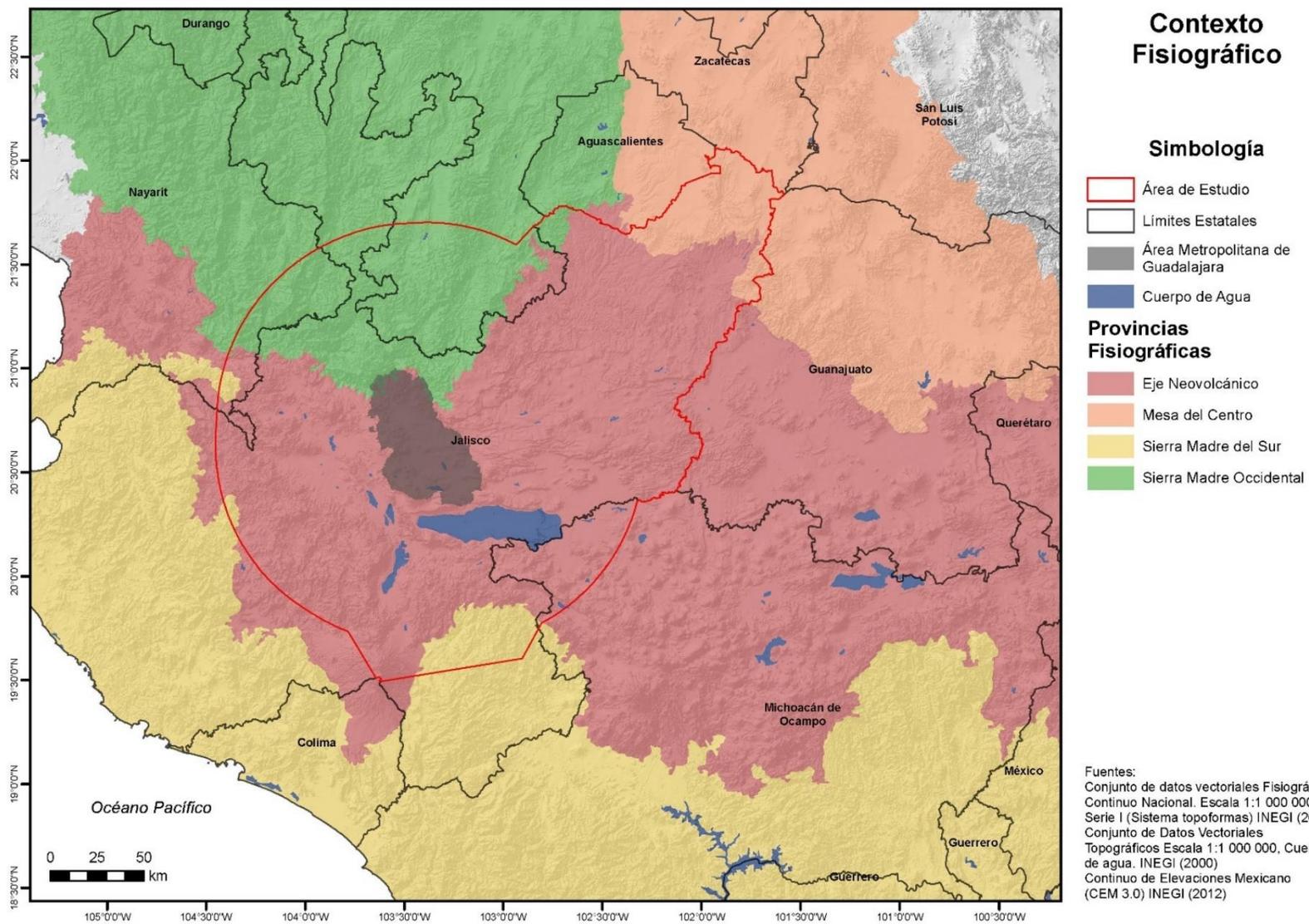
- Área de Estudio
 - Área Metropolitana de Guadalajara
 - Cuencas
 - Acuíferos
- Regiones hidrológicas**
- RH 12 Lerma Santiago
 - RH 14 Río Ameca
 - RH 16 Armería-coahuayana
 - RH 18 Balsas
 - RH 37 El Salado
- Regiones hidrológico-administrativas**
- RH-A IV: Balsas
 - RH-A VIII: Lerma-Santiago

Fuentes:
 Disponibilidad de cuencas hidrológicas
 CONAGUA (2020)
 Disponibilidad de aguas subterráneas
 CONAGUA (2020)
 División hidrológico-administrativa
 CONAGUA (2020)
 Regiones hidrológicas (Nacional)
 CONAGUA (2021)
 Continuo de Elevaciones Mexicano
 (CEM 3.0) INEGI (2012)

Mapa 2 Contexto hidrográfico y administrativo del agua en el área de estudio.

Contexto geológico y estratigráfico. - En términos geológicos regionales el área de estudio se localiza, casi en su totalidad, en la provincia geológica² de nombre Faja Volcánica Transmexicana. Una mínima parte al norte y noreste del área de estudio forma parte de la provincia geológica Sierra Madre Occidental (Ver Mapa 3). Previamente a la descripción extensa del contexto geológico, se presenta un breve resumen.

² "Provincia geológica es toda parte cartografiable de la superficie sólida del planeta, de centenares a millones de kilómetros cuadrados de extensión, caracterizada por sus rocas, por su estructura y por una secuencia de eventos tal que integre una historia evolutiva singular diferente a la de las áreas adyacentes, de las cuales está separada por límites estratigráficos, tectónicos o por ambos" (Ortega-Gutiérrez, Fernando, Mitre-Salazar, L. M., Alaniz-Álvarez, Susana, Roldán-Quintana, Jaime, Aranda-Gómez, J. J., Nieto-Samaniego, Á. F., Y Morán-Zenteno 1991, pp.143–144)



Mapa 3 Contexto fisiográfico del área de estudio.

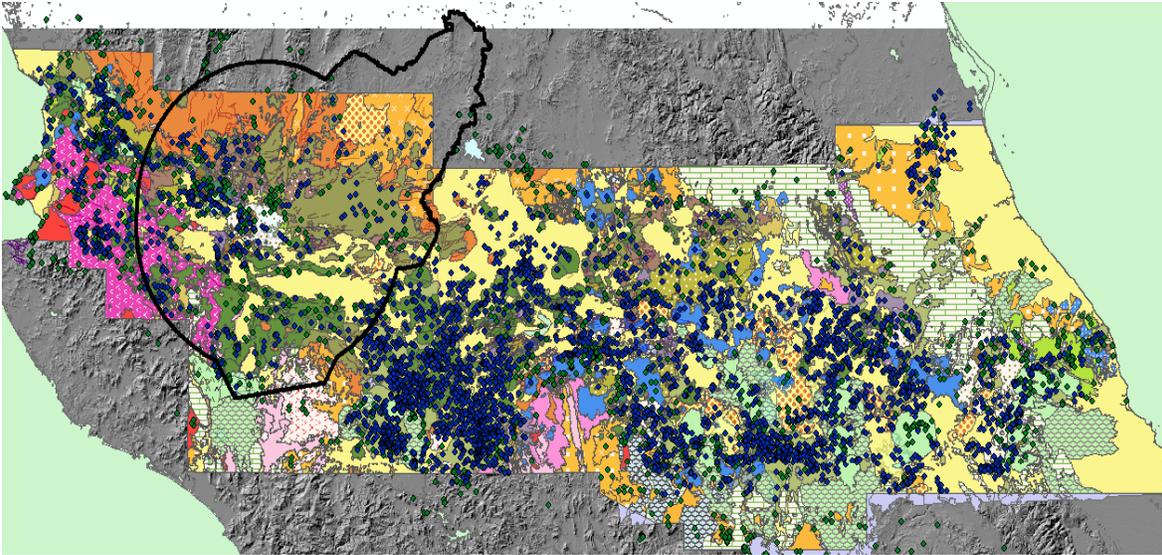


Imagen 4 Localización del área de estudio en la Faja Volcánica Transmexicana de Ferrari *et al.* (2018).

Descripción sucinta

El área de estudio se sostiene en una estructura geológica integrada básicamente por una sucesión de rocas y/o conjuntos de rocas de tipo ígneo extrusivo que son principalmente basaltos y riolitas, localizada casi en su totalidad en la Faja Volcánica Transmexicana formando parte de la banda de transición entre la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana (Rossotti, Ferrari, López Martínez, & Rosas Elguera, 2002; Rosas Elguera & Urrutia Fucugauchi, 1998). La Faja es una región volcánica que atraviesa el territorio nacional desde las costas de Nayarit y Colima hasta la costa de Veracruz. De acuerdo con Ferrari (Ferrari, Orozco Esquivel, Manea, & Manea, 2012) la Faja se origina y evoluciona por procesos de vulcanismo casi exclusivamente monogenético y de composición basáltico-andesítica. El contexto geológico del área estudio se caracteriza por una alternancia estructural de vulcanismo máfico y silíceo; la Faja es famosa por ser una región geológicamente compleja. En el área de estudio tienen lugar diversos y numerosos elementos geológicos, como son: volcanes monogenéticos, fosas, fracturamiento, fallamiento, calderas, rupturas, etc.

En el área de estudio afloran las siguientes rocas (Ferrari, Orozco Esquivel, Navarro, López-Quiroz, & Luna, 2018):

- Altos de Jalisco se registran basaltos en forma de flujos, flujos de piroclásticos, volcanes escudo, sedimentos volcánicos, depósitos clásticos y depósitos lacustres, principalmente (Mioceno Tardío-Cuaternario)
- Zona Metropolitana de Guadalajara, domina la presencia de flujos piroclásticos silíceos (Pleistoceno Medio-Holoceno) salpicado de domos y flujos silíceos e ignimbritas (Pleistoceno Tardío-Holoceno),

así como por conos de lava y escudos de composición basáltica y andesítica (Mioceno Tardío-Plioceno) y depósitos sedimentarios superficiales (Cuaternario)

- Lago de Chapala, flujos y conos de lava basáltica y andesítica (Mioceno tardío-Plioceno) y depósitos sedimentarios superficiales (Cuaternario)
- *Área de lagunas*, al oeste del Lago de Chapala (lagunas de Sayula, San Marcos y Zacoalco y sus alrededores) está cubierta por depósitos superficiales (Cuaternario), flujos y conos de lava basáltica y andesítica (Mioceno Tardío-Plioceno), así como por escudos de basaltos y andesitas y en el sursureste también hay conos de lava (Mioceno Tardío-Plioceno)
- *Área occidente*, es dominada en superficie por ignimbritas silíceas y depósitos volcanos sedimentarios continentales (Cretácico)
- *Área norte*, se destaca por ignimbritas silíceas (Mioceno Temprano).

En términos territoriales, el área de se constituye por las siguientes rocas y/o conjuntos de rocas desde lo profundo hacia la superficie: el basamento formado por granito y localizado a profundidades de ~500- 4 000 m; dicho granito suele estar cubierto por secuencias importantes y alternantes de andesitas y/o riolitas de espesor variable; pero, también puede anteceder a las andesitas y/o riolitas importantes secuencias de basaltos. La toba es otro conjunto de rocas piroclásticas dominante en esta parte de la Provincia, cuya posición estratigráfica es variante en el área de estudio; en la superficie domina la presencia de pumicita y/o sedimentos lacustres, aluviales y fluviales; salpicados de domos y flujos silíceos y máficos (riolitas y basaltos). En términos generales hay una diferencia en cuanto a la posición estratigráfica de las rocas en Los Altos de Jalisco respecto al Zona Metropolitana de Guadalajara, en los primeros mil metros de Los Altos de Jalisco dominan los basaltos y andesitas, mientras que en la Zona Metropolitana de Guadalajara prevalecen las riolitas y andesitas, hacia lo profundo, ambas áreas se caracterizan por secuencias alternantes de riolitas y andesitas, que descansan sobre rocas de granito (basamento).

Descripción en extenso

La Faja es el arco volcánico magmático formado sobre la margen meridional de la Placa Norteamericana su origen es "(...) resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco" Ferrari *et al.*, (2000). En un contexto geodinámico, la Faja se encuentra en el borde de la placa norteamericana sobre la microplaca Rivera y en la parte norte de la placa de Cocos-Silva. Es el arco magmático más largo de Norteamérica con más de 8 000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos que se formó en el Neógeno a partir desde hace unos 20 millones de años aproximadamente. Con una extensión de 1 000 km y una superficie de 160 000 km² cruza el centro del país desde las costas

del Pacífico en San Blas, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco hasta el Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (18°30' y 21°30' N). La Faja es una región de sismicidad y vulcanismo en una zona de subducción. La Faja suele dividirse en tres secciones: occidental, central y oriental. La Zona Metropolitana de Guadalajara se localiza en el límite de la sección occidental y central, mientras que Los Altos de Jalisco se considera que forma parte de la sección central.

El área de estudio se localiza en una estructura tectónica compuesta por los *rifts* Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala y el de Citala que separan al Bloque Jalisco y al Bloque Michoacán de la Placa Norteamericana (Ver Ilustración 1) Rosas-Elguera *et al.* (1998). La sección occidental de la Faja abarca entre la costa del Golfo de California y la junta triple de los *rifts* de Zacoalco, Chapala (Citala) y Colima (Allan, 1986). En esta sección la Faja “se sobrepone a la parte norte del Bloque Jalisco (BJ) y al límite meridional de la Sierra Madre Occidental (SMO)” Ferrari (2000). El Bloque Jalisco es la parte occidental del Terreno Guerrero, el cual también se extiende en la sección central de la Faja; el Bloque Jalisco se constituye principalmente por batolitos intrusivos del Cretácico Tardío-Paleoceno y en esquistos de Jurásico Tardío-Medio pertenecientes a las provincias geológicas “Batolito Jalisco” y “Complejo Orogénico Guerrero-Colima” y cubiertos por ignimbritas y lavas del Cretácico Tardío-Eoceno (Ferrari *et al.*, 2000; Frey *et al.*, 2007).

El sector central comprende “entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-Querétaro (...) donde se desarrolla el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, formado por centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltica o basáltico-andesítica.” Ferrari (2000). De acuerdo con Ferrari *et al.* (2012) se puede explicar la evolución de la Faja debido a un vulcanismo que sucedió en cuatro grandes fases: Arco del Mioceno Medio y Tardío, Episodio máfico del Mioceno Tardío, Vulcanismo silíceo del final de Mioceno y vulcanismo bimodal del Plioceno Temprano, y Arco del Plioceno Tardío-Cuaternario. Las cuales se presentan a continuación resaltando los eventos o características particulares de la sección occidental y central:

En el Mioceno Temprano (23.5-20 Ma) se presenta una actividad explosiva o pulso ignimbrítico que forma parte de la actividad final de la Sierra Madre Occidental y alcanza parte de la sección occidental y central de la Faja. Este pulso se observa en las típicas secuencias de ignimbritas al norte de la Zona Metropolitana de Guadalajara en el cañón del río Grande de Santiago (Rossotti *et al.* 2002), dichas ignimbritas son subyacidas por un intrusivo del Mioceno Temprano (Nieto, Delgado A., & Damon, 1985) que aflora al noreste de la Presa de Santa Rosa.

1. *Arco del Mioceno Medio y Tardío*-. Este episodio se establece en un periodo comprendido entre ~21, 19 Ma y 16~10 Ma (Ferrari *et al.* 2003a y García-Palomo *et al.* 2000 en Gómez-Tuena *et al.* 2007). A principios

del Mioceno Medio en el centro de México sucede el emplazamiento de un arco con orientación aproximada de este a oeste (Gómez Tuena, Orozco Esquivel, & Ferrari, 2005). Siguiendo con la explicación de Gómez-Tuena *et al.* (2007) “el vulcanismo se aleja de la trinchera y forma estratovolcanes y conos de lava con edades que varían entre ~13 y 10 Ma.”

El arco migra hacia el interior y se *horizontaliza* la placa de Cocos subducida, el magmatismo se asocia inicialmente al proceso de deshidratación de la placa y por la fusión de la placa; Gómez-Tuena *et al.* (2005) señalan que: Las secuencias del Mioceno Tardío en Los Altos de Jalisco y en el área de Cotija, Michoacán, cubren directamente a ignimbritas del Oligoceno-Mioceno Temprano (Ferrari & Rosas Elguera, 2000; Rosas Elguera J. *et al.*, 2003) (...) En los pozos profundos perforados (...) en la Caldera de La Primavera, las lavas del Mioceno Tardío también sobreyacen directamente a lavas andesíticas del Eoceno (Ferrari & Rosas Elguera, 2000; Ferrari *et al.*, 2003).

2. Episodio máfico del Mioceno Tardío

Hace 11 Ma ~7, 5 Ma ocurre un episodio de vulcanismo máfico (rocas ígneas basálticas) a lo largo de toda la Faja avanzando desde el Oeste hacia el Sureste, y cuyo volumen también va decreciendo conforme avanza. Los Flujos basálticos del Mioceno Tardío marcan el inicio de la actividad volcánica de la Faja en su sector occidental. Se caracteriza principalmente por mesetas basálticas, generalmente emplazadas por fisuras. Este episodio sucede entre ~11 y 8 Ma al norte de Guadalajara y en Los Altos de Jalisco (*Lavas de Los Altos de Jalisco*).

Los productos volcánicos presentes en este periodo constituyen el *Grupo Río Santiago*. La secuencia de basaltos *San Cristóbal* es el principal elemento que constituye al *Grupo Río Santiago*, el cual fue reportado por Watkins *et al.*, (1971) en afloramientos a lo largo del río Grande de Santiago. Esta secuencia de basalto ha sido nombrada informalmente como *Basalto San Cristóbal* por Moore *et al.* (1994). El *Grupo Río Santiago* con espesores máximos de 800 m en el río Grande de Santiago, se extienden 200 km y se adelgazan hacia el sur de Guadalajara y hacia Los Altos de Jalisco, donde se registran espesores de ~250 a 200 m, estimando así un volumen de tres mil km³ (Ferrari *et al.*, 1994 en Rosas-Elguera *et al.*, 1997). La composición de sus rocas son basaltos, andesitas basálticas y andesitas (Ferrari *et al.*, 2000). El *Grupo Río Santiago* no ha sido perforado por ningún pozo en el área de estudio. Sin embargo, en la Caldera de La Primavera los pozos geotérmicos encontraron lavas del Mioceno Tardío pertenecientes a este episodio que sobre yacen directamente a lavas andesíticas del Eoceno.

Ferrari *et al.* (2000b) en Gómez-Tuena *et al.* (2005) mencionan que “*final de esta fase de vulcanismo máfico (8 Ma) inició la actividad del sistema de fallas normales de la parte central de la meseta de Los*

Altos, con dirección WSW-ENE.”. También a partir del Mioceno Tardío comenzó el desarrollo de las fosas y semifosas que conforman la ruptura Tepic-Zacoalco.

Las rocas volcánicas de este periodo se extienden desde el oeste de Nayarit hasta Hidalgo (~600 km), formando un cinturón que se puede considerar como una única provincia volcánica máfica. El volumen de lava máfica contenida en esta provincia es incierto debido a la erosión, fallamiento, enterramiento que han sufrido las rocas. Con base en afloramientos se estima que el volumen oscila entre 3 200-6 800 km³.

3. *Vulcanismo silícico del final de Mioceno y Vulcanismo bimodal del Plioceno Temprano.* Hace 7.5~5 Ma el vulcanismo decrece, en el área de estudio. De acuerdo con Gómez-Tuena *et al.* (2005) al sur de las rocas producidas en el periodo anterior (vulcanismo máfico) se formó una “franja de grandes volúmenes de ignimbrita emitida por calderas regionales y se emplazaron complejos de domos dacítico y riolítico”. Gómez-Tuena *et al.* (2005) exponen que los domos de tipo riolítico se localizaron principalmente en la sección occidental de la franja donde se presenta mezcla de magma silícica y máfica. Parte de estos grandes volúmenes conforman el nombrado informalmente *Grupo Guadalajara*, integrado por domos silícicos exógenos y algunos flujos piroclásticos silícicos y máficos. Estas rocas son la única prueba de la actividad volcánica en la sección occidental de la Franja hasta hace unos ~5 Ma. De acuerdo con Rossotti *et al.*, (2002) el *Grupo Guadalajara* cubre más de 750 km² y se estima que alcanzan un volumen de 212 km³.

En el Mioceno Tardío alrededor del Lago de Chapala también tuvo lugar un vulcanismo máfico de composición alcalina. En este periodo también se formaron fallas extensionales a lo largo de los límites del Bloque Jalisco.

A partir de los 5.5 Ma en el actual territorio de la Zona Metropolitana de Guadalajara, se emplazaron coladas de lava de basalto alcalino de tipo intra-placa. Estas rocas siguieron siendo extruidas contemporáneamente a complejos de domos e ignimbritas silícicas, por lo que en conjunto se le denomina “vulcanismo bimodal del Plioceno Temprano” (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Las ignimbritas *San Gaspar* y *Guadalajara* “muestran evidencias de mezcla entre un magma máfico y uno silícico siendo los *basaltos alcalinos con una afinidad intraplaca (basalto Mirador de Ixcatán)*” en Rossotti *et al.*, 2002.

4. Arco del Plioceno Tardío-Cuaternario

Un arco volcánico (“moderno”) de composición andesítico-basáltica sustituye el vulcanismo silíceo bimodal que se presenta en casi toda la Faja; en la parte occidental de la Faja las lavas con características intra-placa se siguen emplazando y se forman los principales estratovolcanes. El principal estratovolcán de la sección occidente de la Faja es el complejo volcánico de Colima, que constituye el mayor volumen de material volcánico emplazado en la región $\sim 700 \text{ km}^3$ (Robin *et al.*, 1987).

De acuerdo con Gómez-Tuena *et al.* (2005), los estratovolcanes Tequila, Ceboruco, Tepetitlic, Sangangüey, Las Navajas y San Juan tienen volúmenes menores a los 100 km^3 y “se alinean a lo largo de fallas regionales de orientación WNW-ESE que definen la frontera norte del Bloque Jalisco”.

Durante esta etapa sucede el vulcanismo silíceo Cuaternario ($<1.8 \text{ Ma}$) que cubre al actual territorio de la Zona Metropolitana de Guadalajara y la Caldera de La Primavera (Sierra La Primavera). Entre las rocas Cuaternarias hay lavas máficas (basalto) con poca o nula evidencia de fluidos por la subducción, pero con marcas de la astenosfera.

La alineación con orientación general de norte a sur de los grandes estratovolcanes es señalada por diversos estudios que la relacionan con la evolución de los sistemas de fallas distensivas. Pero a la fecha no hay evidencias claras de que los estratovolcanes estén afectados por fallas distensivas o laterales (Gómez-Tuena *et al.* 2005).

En este periodo siguen formándose las dos semi-fosas que conforman el *rift* de Chapala. A grandes rasgos, el vulcanismo en el sector occidental lo explica Ferrari (2000): El vulcanismo emplazado en el límite sur de la Sierra Madre Occidental es claramente bimodal, formado tanto por estratovolcanes y complejos de domos dacítico-riolítico como por centros monogenético basáltico. En cambio, el vulcanismo emplazado dentro del Bloque Jalisco es casi exclusivamente monogenético y de composición basáltico-andesítica.

Rossotti *et al.* (2002), proponen que el vulcanismo de la Faja puede ser dividido en dos grandes periodos. El primero en el Mioceno Tardío se caracteriza por el emplazamiento de gran cantidad de lava máfica (basaltos y gabro), que conforma el llamado *Grupo Río Santiago* y el segundo gran periodo corresponde a los domos y flujos silíceos que constituyen el *Grupo Guadalajara*. Estos autores también explican que la alternancia de vulcanismo máfico y silíceo cambia con la llegada del basalto alcalino con afinidad intraplaca (Basalto de Mirador de Ixcátán) durante el primer pulso extensional a principios del Plioceno. Este basalto coincide con el emplazamiento de ignimbrita (*San Gaspar* y *Guadalajara*) que son evidencia de la mezcla de magmas silíceos y máficos. Este hecho sugiere que el basalto desencadenó la erupción de la ignimbrita al proveer de energía térmica a una antigua cámara de magma silíceo. El vulcanismo máfico y silíceo siguió presentándose durante el Plioceno Tardío y el Cuaternario. En esta fase se formó el cañón

del río Grande de Santiago que bordea la Zona Metropolitana de Guadalajara, ya que afecta a las lavas riolíticas más jóvenes.

La estratigrafía de la Zona Metropolitana de Guadalajara y de la región es descrita hasta el día de hoy con base en la histórica recolección de datos de los distintos afloramientos de las diferentes unidades expuestas en la región que confirman y/o complementan la información geológica profunda obtenida del pozo geotérmico PR-9 de 2 986 m de profundidad perforado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a principios de la década de los 80's en el centro del Complejo Volcánico La Primavera (CVLP) (Rosas-Elguera *et al.* 1998) a una altitud de ~ 1 900 msnm.

El Complejo Volcánico La Primavera es un sistema hidrotermal convectivo de carácter ácido producto de la actividad volcano-tectónica cuaternaria localizado en la Sierra La Primavera.

La sucesión volcánica identificada en el pozo PR-9 se compone en términos generales, desde lo profundo hacia la superficie, de la siguiente forma:

~200 m de **granodiorita y granito** de probable edad Cretácico-Tardía-Paleoceno Temprano, que se puede correlacionar con el Bloque Jalisco y que constituye aparentemente el basamento de La Caldera (Gutiérrez Negrín, 1988).

~670 m de lava **andesítica (andesitas y dioritas)** fechada en 51.0 ± 2.5 Ma

~150 m de tobas **riolíticas** (ignimbritas)

~870 m de lava **basáltica (basaltos) y basáltico-andesítica (basaltos y andesitas)** (fechadas en ~12.5 Ma), que puede correlacionarse con el Grupo Río Santiago de Rossotti *et al.* (2002), que incluye la unidad Basalto San Cristóbal

~360 m de lava **riolítica (riolitas)** e ignimbrita (andesitas-riolitas), que puede correlacionarse con el llamado *Grupo Guadalajara* de Rossotti *et al.* (2002)

~60 m de flujos de **andesita (andesita)**

~180 m de tobas de ignimbrita (**granito/riolita y andesita/diorita**) (1.6 ± 0.2 Ma, Cuaternario)

~140 m de flujos de lava y domos **riolíticos** (riolitas) cuaternarios previos a la formación de la caldera (0.25 a 0.145 Ma, Cuaternario)

~280 m de toba Tala (Formación Tala), ignimbritas **riolíticas (riolita)** producto del colapso calderico (0.095-0.10 Ma, Cuaternario)

~ 40 m de **Sedimento aluvial** lacustre intracaldera.

Esta secuencia litológica es la referencia para describir la estructura rocosa en la Zona Metropolitana de Guadalajara, por lo anterior se puede considerar que la estratigrafía conocida en La Primavera alcanza al menos una profundidad de ~2.6 km. Actualmente, la única descripción estratigráfica profunda reconocida

para la Zona Metropolitana de Guadalajara es la identificada en el PR-9. Un segundo pozo geotérmico de la CFE nombrado San Marcos (SM-1) localizado aproximadamente a 40 km al Suroeste de la ciudad de Guadalajara expuso una estratigrafía compuesta por 750 m de depósitos lacustres atribuidos a la Laguna de San Marcos, seguido de la sucesión de San Marcos compuesta por ~1 000 m de ignimbritas, andesitas y riolacitas en la base, que sobre yace a una profundidad de ~1 800 m el Bloque Jalisco, considerado el basamento.

Con base en la sección litológica de Rosas-Elguera *et al.* (1998), las 13 secciones geológicas de GEOEX S.A de C.V. (2003), los siete perfiles geológicos de Sánchez Díaz (2007), los dos perfiles geológicos de Hernández-Antonio *et al.* (2015), se obtiene que son siete las principales unidades estratigráficas en el área de estudio:

1. Basamento (Bloque Jalisco)

Unidad compuesta por granito-granodiorita Cretácico Superior-Paleoceno que intrusión turbiditas (rocas sedimentarias), está cubierto por andesitas, depósitos vulcano-clásticos y toba riolítica. (Gastil *et al.*, 1978 ; Allan, 1986 ; Köhler *et al.*, 1988 ; Zimmermann *et al.*, 1988 ; Lange and Carmichael, 1991 ; Richter *et al.*, 1995 en Rosas-Elguera *et al.*, 1998). El basamento de granito en la Zona Metropolitana de Guadalajara se halla afectado por temperaturas mayores a 300 °C (Maciel Flores & Rosas-Elguera, 1992). De acuerdo con Campos-Enríquez y Alatorre-Zamora (1998), en el área de Guadalajara el basamento constituye una depresión alargada con orientación noreste-suroeste, que se profundiza hacia el este de Guadalajara, quedando perpendicular a la tectónica general del sur del área de estudio (Grábenes de Ameca y Zacoalco, depresiones tectónicas).

De acuerdo con las conclusiones de Rossotti *et al.* (2002), el Bloque Jalisco llega en su parte norte a la altura de la alineación de la Caldera La Primavera y el Volcán de Tequila.

2. Andesitas

Las rocas andesitas son ígneas extrusivas de textura muy fina (afanítica) de color claro (silicatos no ferromagnesianos), de composición intermedia; están conformadas por plagioclasas y silicatos oscuros (anfíboles, piroxeno y biotita). “Presentan una porosidad secundaria debida al fracturamiento que, según datos de Davis y De Wiest (1981) en rocas similares, puede variar entre el 1 y 25%” (Sánchez Díaz, 2007).

3. Grupo Río Grande de Santiago

Este grupo es representado por una secuencia basáltica que alcanza 800 m de espesor y se extiende a Los Altos de Jalisco, ocupando en la región un volumen de 3 000 km³. La sucesión de basaltos olivínicos y andesitas basálticas (Watkins *et al.*, 1971; Damon *et al.*, 1979; Moore *et al.*, 1994 en Rossotti *et al.*, 2002) denominados Basaltos de San Cristóbal, es la principal unidad que compone al Grupo Santiago. De

acuerdo con Moore *et al.*, 1994, en la parte inferior de la secuencia de basaltos se presenta una toba silícica soldada, mientras que en la parte superior de la secuencia se encuentra una sucesión silícica heterogénea constituida de flujos de piedra pómez, depósitos de ceniza y piroclásticos retrabajados (Toba Los Caballos) (Moore *et al.*, 1994).

La porosidad efectiva de los basaltos es entre 14-18% (Domenico y Schwartz, 1998 en Sánchez Díaz, 2007). Las andesitas presentan una porosidad secundaria, en rocas similares, de 1-25% y porosidad eficaz 10% (Davis y De Wiest, 1981, en Sánchez Díaz, 2007). De acuerdo con Rossotti *et al.*, (2002) la sucesión de basaltos (Unidad San Cristóbal) que constituyen principalmente al *Grupo Río Santiago* son de carácter calco-alcálicas y transicionales.

Este grupo incluye las siguientes unidades litológicas que afloran en distintas partes del área de estudio: Toba San Cristóbal (10.17 Ma), basalto San Cristóbal (11.0 a 8.5 Ma), Toba Los Caballos (~8.0 Ma) y Basalto Arroyo Mezcala (7.5 Ma) (Rossotti *et al.*, 2002). Estos productos máficos dominan la estratigrafía del área de estudio. De acuerdo con GEOEX S.A De C.V. (2003) “la base de esta unidad no fue alcanzada en ninguno de los pozos de abastecimiento consultados en los archivos de Geoex y CNA.”, al mismo tiempo que indican que “Esta unidad normalmente exhibe una porosidad y conductividad hidráulica muy baja, asociada a locales zonas de fracturamiento y/o alteración, zonas saturadas que forman acuíferos semiconfinados de muy baja a nula potencialidad (...)”.

4. Grupo Guadalajara, lavas riolíticas e ignimbritas

Este grupo está compuesto por una sucesión de flujos riolíticos, ignimbritas y lavas basálticas emplazadas entre 7.5 y 3.1 Ma, expuesto en un territorio alargado N-S que cubre más de 900 km² y con un volumen estimado de 350 km³ (Gilbert *et al.*, 1985; Rossotti *et al.*, 2002). Las unidades más antiguas son domos y flujos de riolita y flujos piroclásticos, que de forma informal se conocen como *Grupo Guadalajara Inferior* por GEOEX S.A de C.V. (2003); a esto sobre yacen basaltos de tipo *islas oceánicas* y por otros domos silícicos y piroclásticos asociados, secuencia nombrada informalmente como *Grupo Guadalajara Superior* (GEOEX S.A de C.V., 2003).

Las rocas volcánicas félsicas del *Grupo Guadalajara Inferior* son identificadas por Rossotti *et al.* (2002) en afloramientos al norte del área de estudio. Según GEOEX S.A de C.V. (2003), “El *Grupo Guadalajara Inferior* se describe en los registros litológicos de perforación consultados, como rocas volcánicas félsicas con poca cantidad de obsidiana, ignimbrita, brecha y escoria. Sin embargo, con mayor frecuencia se reportan como brechas y, ocasionalmente, como flujos de lava fracturada”. De acuerdo con las formaciones aflorantes, estas rocas se localizan mayormente en la parte centro y norte de la Zona Metropolitana de Guadalajara,

cuyo espesor aumenta hacia el norte; la profundidad a la que se encuentra es desde 18 a 242 m (GEOEX S.A de C.V., 2003-2004) lo que coincide con los afloramientos en la región.

De acuerdo con GEOEX S.A de C.V. (2003-2004), la secuencia volcánica superior del *Grupo Guadalajara* consiste en flujos de ignimbrita, basalto y domos riolíticos (silícicos) con menor contenido de brecha, material piroclástico y escoria. Esta unidad estratigráfica incluye a la Ignimbrita San Gaspar (4.71 Ma); el Basalto Guadalajara/Basalto Mirador de Ixcatán (4.7 a 3.7 Ma), la ignimbrita Guadalajara (3.44-3.23 Ma) y los domos riolíticos del grupo Chicharrón (3.07–1.39 Ma). La ignimbrita San Gaspar y la Ignimbrita Guadalajara (Gilbert *et al.*, 1985, en Rosas-Elguera *et al.*, 1997) son dos depósitos piroclásticos intercalados en la sucesión del Grupo Guadalajara. Ambas ignimbritas evidencian la mezcla de dos tipos de magma, lo cual se presenta en el *Grupo Guadalajara Inferior*.

Es difícil establecer los contactos litológicos entre el *Grupo Guadalajara Superior* y el *Grupo Guadalajara Inferior* “debido a la falta de detalle en las descripciones litológicas de los pozos de abastecimiento consultados (...)” (GEOEX S.A de C.V., 2003-2004). Ferrari (comunicación personal, 6 de marzo 2017), señala que “se puede inferir que la parte inferior se constituye por coladas y domos riolíticos productos de erupciones efusivas, mientras que la parte superior tiene más depósitos piroclásticos por erupciones explosivas”.

De acuerdo con GEOEX S.A de C.V. (2003), el Grupo Guadalajara “en términos generales presenta una baja porosidad y conductividad hidráulica asociada a zonas de brechamiento y/o fracturamiento y/o alteración, zonas saturadas que constituyen acuíferos semiconfinados de baja (localmente nula) potencialidad”.

5. Unidades del Cuaternario

El Cuaternario está representado por alineaciones calco-alcaldas de conos de lava y ceniza basáltica, mesetas basálticas alcalinas, y domos silícicos con flujos que se correlacionan con los domos riolíticos. Las unidades estratigráficas más jóvenes de la región son andesíticas-dacíticas y calco-alcaldas que constituyen el complejo Volcánico de Tequila (Nixon *et al.*, 1987; Wallace y Carmichael, 1994 en Rosas-Elguera *et al.*, 1997) y la Cadena Volcánica de Guadalajara localiza al SE de la Zona Metropolitana de Guadalajara y se conforma por ocho pequeños conos de lava y ceniza (volcanes de andesita basáltica), conocidos como los cerros El Gachupín, Santa María, El Cuatro, El Tapatío, Escondido, San Martín y Papantón de Juanacatlán. Así como los domos y depósitos de piroclastos silico-alcaldos (>75% SiO₂) de la Caldera La Primavera (Mahood, 1980 en Rosas-Elguera *et al.*, 1997; Gómez-Tuena *et al.*, (Gómez-Tuena, Orozco-Esquivel, & Ferrari, 2007). Los domos más recientes son El Tajo (Maciel Flores & Rosas-Elguera, 1992).

Formación Tala, Toba Tala

La Toba Tala es una “roca compuesta de cenizas volcánicas y fragmentos de roca, trozos de obsidiana y piedra pómez”; es parte de los depósitos piroclásticos que fueron emitidos durante la erupción que formó la caldera de La Primavera. En esta erupción “la cámara magmática explotó con gran fuerza, creando una nube de ceniza volcánica, flujos de cenizas y rocas líquidas incandescentes” sucediendo hace 95 mil años. Aproximadamente, fueron expulsados 45 km³ de toba que se depositó en una superficie de 700-1 200 km², desde lo que hoy es Tala hasta la parte central de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Los mayores espesores (>100 m) se localizan en un radio de 3-5 km de La Primavera, principalmente en la zona de El Bajío del Arenal con ~322 m de espesor registrado en el pozo de abastecimiento público de nombre Pozo Tecnológico de Zapopan (GEOEX S.A de C.V., 2003).

La principal característica de la Toba Tala es su alta permeabilidad (Maciel Flores y Rosas Elguera, 1992). En GEOEX S.A de C.V. (2003), se señala que de acuerdo con pruebas de acuífero (bombeo) en pozos de abastecimiento en la zona, reportan “rangos de porosidad y conductividad hidráulica muy favorables asociadas a las propiedades físicas de los materiales piroclásticos granulares intersectados, (...)”. De acuerdo con Hernández Antonio *et al.*, (2015), en términos de conductividad hidráulica se considera que los sedimentos lacustres, la Toba Tala, así como los flujos de lava, lapilli y domos riolíticos (Unidades del Cuaternario), en conjunto presentan rangos de conductividad hidráulica de 1.6×10^{-7} a 2.0×10^{-4} m/s, y con una porosidad de 20 a 40% (Sánchez Díaz, 2007).

6. Sedimentos lacustres intracaldera y aluviales

Los sedimentos lacustres son depósitos formados en el lago dentro de una caldera circular (11 km de diámetro) originada por el colapso de la cámara magmática que había producido la Toba Tala. Estos sedimentos fueron erosionados y depositados cuesta abajo y que de acuerdo con Domenico y Schwartz (1998) en depósitos similares, se considera una porosidad de entre el 30 y 60%. Esta unidad extendida para el resto de la Zona Metropolitana de Guadalajara, incluyen los depósitos de arrastre continental o aluvial, compuestos por limo, arena y grava con un grado de compactación variable.

Campos Enríquez y Alatorre-Zamora (1998) ilustran que en Los Altos de Jalisco y la superficie circundante al lago de Chapala se caracteriza por andesitas y andesitas basálticas del Plioceno. Para Los Altos de Jalisco se cuenta con una secuencia litológica referencia que es una continuación de los basaltos del Grupo San Cristóbal que sobre yacen a la secuencia litológica característica del sur de la Sierra Madre Occidental, ya que Los Altos de Jalisco y al norte de la Zona Metropolitana de Guadalajara son una zona de transición compleja entre la Faja y la Sierra Madre Occidental. La secuencia volcánica que posiblemente es la que predomina en Los Altos de Jalisco se asemeja a una secuencia estratigráfica propuesta con base en las columnas estratigráficas regionales de la Faja Volcánica Transmexicana y la *Sierra Madre Occidental* expuestas por Rossotti *et al.* (2002),

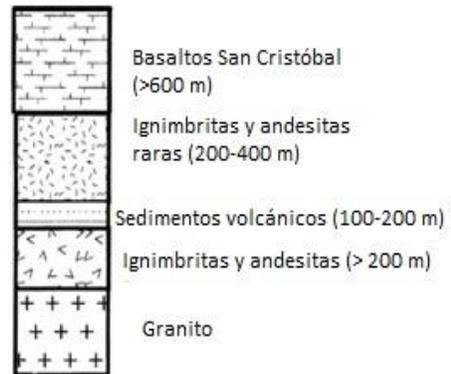


Imagen 5 Columna estratigráfica regional propuesta para Los Altos de Jalisco, modificado de Rossotti *et al.*, 2002.

que desde la profundidad hacia la superficie se constituye en su base por granito, al que sobreyace un estrato de ignimbritas y andesitas (> 200 m), seguido de un estrato de menor espesor de depósitos volcánico sedimentarios (100-200 m), al que sobreyacen ignimbritas y andesitas (200-400 m), las cuales son cubiertas por basaltos del Grupo San Cristóbal (> 600 m) (Ver Imagen 5).

De acuerdo con Ferrari *et al.* (2000), Los Altos de Jalisco consiste en una meseta basáltica con 130 km de longitud, 60 km de ancho y con una elevación media de 1900 msnm. Estas lavas máficas de los Altos de Jalisco (sucesión máfica del Mioceno) afloran en el valle del Río Verde, con un espesor de 220 m y que sobreyacen a un conglomerado, mismo al que subyacen las ignimbritas del Mioceno pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Las lavas de Los Altos de Jalisco cubren la frontera de la Sierra Madre Occidental con el bloque de Michoacán, siendo una zona de transición en la que coinciden dos sistemas de falla extensional (100 km). De acuerdo con Ferrari *et al.* (2000), las *Lavas de los Altos de Jalisco* o las llamadas “mesas” (Campos Enríquez y Alatorre-Zamora, 1998) se extienden hacia el sur de Guadalajara, pero en esta zona disminuye su espesor a ~170 m y sobreyacen a una sucesión muy erosionada de flujos de andesitas y secuencias sedimentarias continental de origen fluvio-lacustre.

Hoy, las diversas teorías y el avance en la investigación sobre la geología estructural de la Faja acuerdan que no hay certeza sobre el tipo y distribución de la roca basamento. Para la sección occidental se especula que el basamento es el Bloque Jalisco (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Mientras que hacia Los Altos (sección central) no se tiene certeza de cuál es el basamento y se especula que subyace a una secuencia continental misma que subyace a los basaltos, como parte del Terreno Guerrero, que en esta franja se conforma por magmatismo máfico marino y meta-flysch (Ferrari *et al.*, 2012).

El Lago de Chapala rellena una fosa originada por la actividad tectónica y volcánica en el Cenozoico Tardío. El Lago de Chapala se localiza en el *rift* homónimo a ~60 km al sursuroeste de la Zona Metropolitana de Guadalajara (Zárate-del Valle & Simoneit, 2005). En una depresión topográfica alargada con una longitud aproximada de al menos 115 km, y por 37 km de ancho, rodeada de amplias mesetas basálticas (basaltos), separadas por fallas normales, que al Este se alargan hacia el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985 en Rosas-Elguera *et al.*, 1998). De acuerdo con Rosas-Elguera *et al.* (1998) la depresión tectónica en que se localiza el Lago de Chapala es parte de la estructura regional de depresiones tectónicas denominada “La Junta Continental Triple” (Luhr *et al.*, 1985; Allan *et al.*, 1991, en Rosas-Elguera *et al.*, 1998), gracias al cual se conformaba un sistema lacustre integrado por el lago de Sayula, Laguna de San Marcos y el Lago de Chapala. Hoy, la estructura interna del lago de Chapala no ha sido formalmente establecida. Alatorre-Zamora *et al.*, (2015), reporta que con un levantamiento magnético que generó cinco perfiles cuya interpretación indica que al interior del lago: se presentan estructuras tipo semi fosa tectónica debido a una estructura sometida a una tectónica de extensión, se considera una estructura muy compleja rodeada de fallas con orientación E-O, la profundidad del basamento de granito es muy variable desde muy superficial, ~500 m de profundidad, hasta niveles profundos de ~3 km, que subyace a una secuencia de sedimentos lacustres, andesitas y riolitas.

El estudio gravimétrico de Campos Enríquez y Alatorre-Zamora (1998), ilustra que, desde la Sierra de Quila al noroeste de la Sierra de Tapalpa, pasando por el valle lacustre de Ameca y la Sierra de Ameca hasta el volcán de Tequila es una estructura geológica que se compone principalmente por un basamento de granito menos profundo, siendo el valle de Ameca una semi-fosa tectónica rellena de toba y sedimentos aluviales. A su vez que los perfiles B-B’ y C-C’ de Campos Enríquez y Alatorre-Zamora (1998) ilustran (Ver Imagen 6) que desde la Sierra de Tapalpa, pasando por el Valle de Tala hasta La Caldera de La Primavera, el basamento de granito es menos profundo (1 000-1 500 m) y es cubierto por toba con espesores de 500-600 m; en la zona de la fosa tectónica de Zacoalco y hacia el sureste de la Caldera de La Primavera el basamento se localiza a 500 m aproximadamente, que en la parte final conjunta a la Sierra de Tapalpa, el granito es cubierto por 500 m de basalto, mientras que en la zona de la cuenca de Zacoalco, el basamento es cubierto por una secuencia de limos, basaltos y sedimentos lacustres, con espesor de 700 m, aproximadamente. En general, la zona de depresión Chapala está dominado por elementos volcánicos y sedimentos lacustres esparcidos.

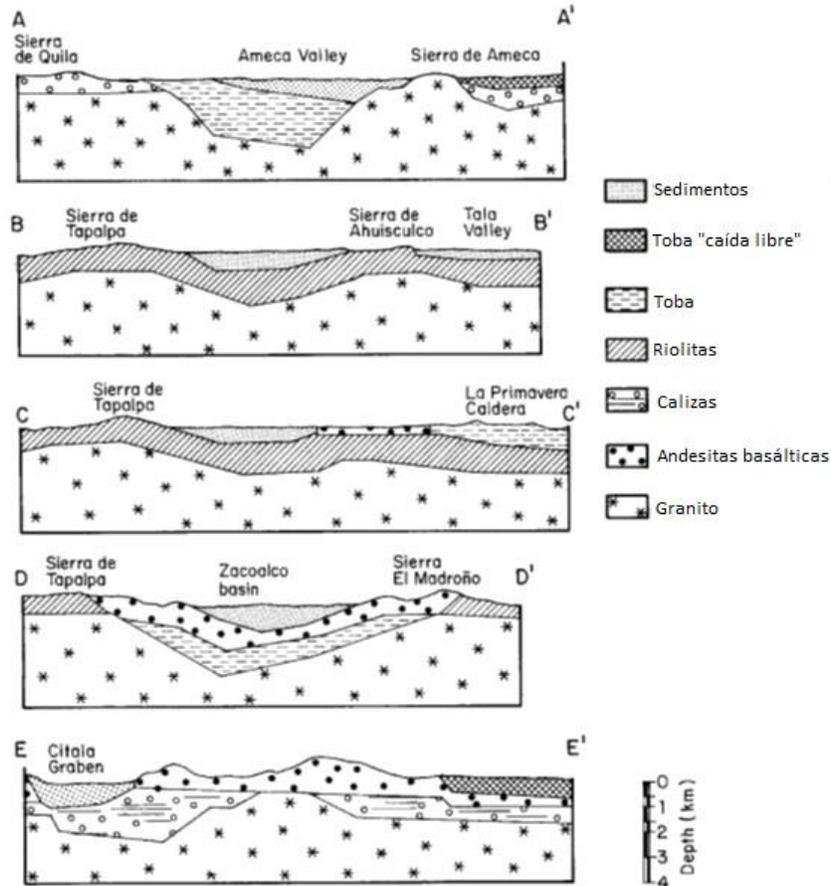


Imagen 6 Estructura superficial de la corteza terrestre en la zona sureste del área de estudio, de Campos Enríquez y Alatorre-Zamora (1998).

Rosas-Elguera *et al.*, (1998), estiman que la secuencia vulcano-sedimentario del Lago de Chapala tiene un espesor de 900 a 1 000 m, y proponen que el actual lago forma parte de un antiguo lago, al que nombran "paleo-lago Jalisco" (hace 5-3 Ma) cuya línea de costa se localizaba a la altura de Atotonilco El Alto, es decir, 30 km aproximadamente al norte de la actual línea de costa norte del lago de Chapala.

La secuencia geológica registrada en Atotonilco está compuesta por basaltos del Mioceno cubiertos por una secuencia de sedimentos lacustres intercalada con tobas riolíticas; Rosas-Elguera *et al.*, (1998), señalan que esta secuencia en Atotonilco concuerda con la observada al norte de Guadalajara descrita por Moore *et al.*, (1994).

Fracturas y fallas. – El territorio occidental de la Faja se caracteriza por fallas y fracturas territoriales con dirección oeste-noroeste-este-sureste, dichas fallas y fracturas afectan regionalmente desde el basamento hasta la superficie (Maciel Flores y Rosas Elguera, 1992). Debido a la dinámica tectónica en el territorio de interés, como lo es la unión Triple Jalisco donde coinciden tres *rifts* (Zacoalco, Colima y Chapala), la activación de fracturas y fallas es variable. En este territorio las fosas tectónicas (grábens) de

fondo plano están limitadas por fallas normales (Michaud, Gasse, Bourgois, & Quintero, 2000). Por ejemplo, al sur del lago de Chapala, en la fosa tectónica de Citala, se presenta adicionalmente una red de fallas activas con dirección este-oeste que cortan valles, y también existe una red de fallas norte-sur más antigua (Michaud, Bourgois, Parrot, Taud, & Kesser, 1994). De acuerdo con Gómez-Tuena *et al.* (2007), en el área de estudio existen los siguientes sistemas de fallas regionales del Mioceno-Cuaternario: Una falla regional con dirección oeste noroeste-este sureste define el límite norte del Bloque Jalisco y sobre la cual se alinea el complejo volcánico Colima o el llamado volcán de Colima, el volcán de Tequila, el Ceboruco, Tepetitlic, Sangangüey, Las Navajas y San Juan; el sistema de fallas de Los Altos de Jalisco con dirección noreste-oeste suroeste que corta los basaltos de los Altos de Jalisco y su activación aconteció hace 8 Ma, de acuerdo con Ferrari *et al.* (2000); la falla de San Marcos, la falla de Pajacuarán-Ixtlán de los Hervores al oeste-suroeste del lago de Chapala; el sistema de fallas Tamazula se localiza al sur del volcán de Colima y es el límite sureste del Bloque Jalisco, con una dirección noreste-suroeste, siendo fallas normales.

El sistema de fallamiento extensional o distendido que caracteriza a Los Altos de Jalisco consta de fallas de edad menor a los 10 Ma, que cortan a los basaltos del Mioceno, pero en mucha menor medida a las rocas del Plioceno (ignimbrita y basalto alcalino). En su mayoría las fallas presentan una inclinación hacia el norte y basculan al sur a las secuencias del Mioceno y Plioceno. Estas fallas al estar alineadas con los pequeños volcanes escudo del Mioceno Tardío se consideran que eran las líneas de alimentación de lava máfica.

Con base en la Carta Geológica digital de la Faja Volcánica Transmexicana de Ferrari *et al.* (2018), la localización general de las fallas y/o sistemas de fallas con dirección noreste-suroeste domina en la franja de Los Altos de Jalisco hacia la Zona Metropolitana de Guadalajara. El área de estudio en su porción occidental hacia el lago de Chapala se ve afectada por fallas y/o sistemas de fallas con dirección este-oeste, mientras que, hacia la sección oriental, las fallas y/o sistemas de fallas presentan mayormente una dirección noroeste-sureste.

Maciel Flores y Rosas Elguera (1992), hacen mención de que las fracturas y fallas regionales de dirección predominante Noroeste-Sureste, son una condición para el flujo subterráneo en el sistema geotérmico La Primavera y la región, al señalar que el sistema geotérmico La Primavera presenta la mayoría de sus zonas de recarga de los flujos de agua subterránea fuera de La Sierra La Primavera, por lo que los autores clasifican al sistema geotérmico como de tipo mixto en términos de flujos subterráneos del agua presente en el sistema geotérmico.

Otro factor condicionante del comportamiento de los flujos subterráneos es la permeabilidad relativa de las rocas-conjuntos rocosos (Freeze y Cherry, 1979; Peñuela-Arévalo, 2013). Los grados de permeabilidad relativa de las rocas y formaciones rocosas dominantes del área de estudio son:

- “Roca no alterada” con un grado de permeabilidad relativa “Alta” (basalto, toba, andesita, andesita basáltica, caliza, arenisca, riolita, ignimbrita, toba riolítica, grava y arena no cementada)
- “Roca fracturada” con un grado de permeabilidad relativa “Media” (intrusiva/extrusiva, metamórfica, dolomita, caliza, arenisca y loess)
- “Roca no fracturada y no meteorizada” con un grado de permeabilidad relativa “Baja” (Granito, rocas intrusivas, metamórficas, lutita, conglomerados y areniscas cementados).

Relieve y topoformas. – El relieve del área de estudio, al igual que el relieve de la Faja Volcánica Transmexicana, consiste en una serie de planicies escalonadas. En México la alta montaña se localiza en los más altos volcanes identificados todos en la Faja Volcánica Transmexicana: Pico de Orizaba (5 675 msnm), Popocatepetl (5 452 msnm), Iztaccíhuatl (5 286 msnm – 4 740 msnm), Nevado de Toluca (4 690 msnm), La Malinche (4 430 msnm), Nevado de Colima (4 430 msnm), Volcán de Fuego o de Colima (3 900 msnm), Cofre de Perote (4 220 msnm), Ajusco (3 930 msnm) y Pico de Tancítaro (3 860 msnm). En el área de estudio se localiza el volcán de Tequila (2 950 msnm), el Cerro Viejo (2950 msnm) y la Sierra de Tapalpa (2 900 msnm). También, se localiza una de las principales anomalías geomorfológicas del relieve mexicano: el cañón del río Grande de Santiago con profundidades de 500 a 800 metros, se considera que su origen es una falla profunda aparentemente de desplazamiento y forma parte de la zona de contacto entre la Sierra Madre Occidental y la Faja (Lugo-Hubp, El Relieve de la República Mexicana., 1990); la altitud en el área de estudio va de 273 a 4 260 msnm, el 72% de la superficie se encuentra en una altitud $>1\ 200 \leq 2\ 000$ msnm (INEGI, 2013).

Rango altitud (msnm)	Área de estudio (%)
273-900	1
>900-1200	4
>1200-1600	30
>1600-2000	42
>2000-2400	20
>2400-4260	2

Tabla 1 Rangos de altitud en el área de estudio.

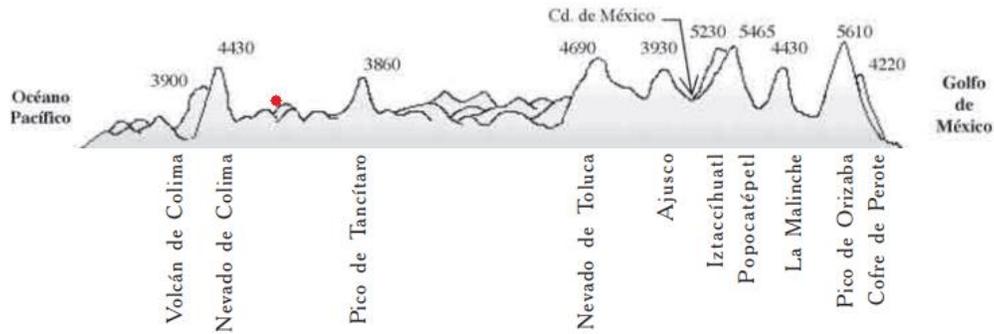


Imagen 7 Perfil de la Alta montaña poniente-oriental en la FVTM. Modificado de Montero García (2004).³

El relieve del área de estudio se asemeja al esquema *cordillera-cum-foreland* (Tóth, 2009); sin embargo, dada su gran extensión, dentro de ella se identifican los cuatro esquemas propuestos por Tóth (2009), recordando que la escala regional y local, es relativa. Por ejemplo, el cañón del río Grande de Santiago corresponde al esquema *V-notch canyon*. Las sierras volcánicas, del área de estudio, equivalen las cordilleras del esquema d) en la Imagen 8; faldas/piedemontes de las sierras, los valles intermontanos, valles de laderas tendidas; como foothills; foreland, como las mesetas y lomeríos.

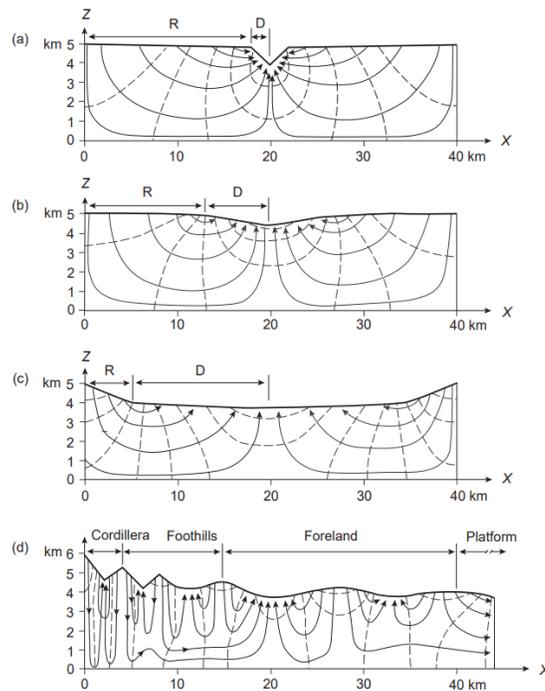


Fig. 3.6 Schematics of groundwater flow patterns for four common types of regional landforms: (a) V-notch canyon; (b) intracratonic basin with broad uplands; (c) intermontane broad valley; (d) cordillera-cum-foreland.

Imagen 8 Esquemas de los típicos relieves regionales y su patrón de distribución de los sistemas de flujo regionales. Adaptado de Tóth (2009).

³ El punto rojo señala esquemáticamente la localización de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

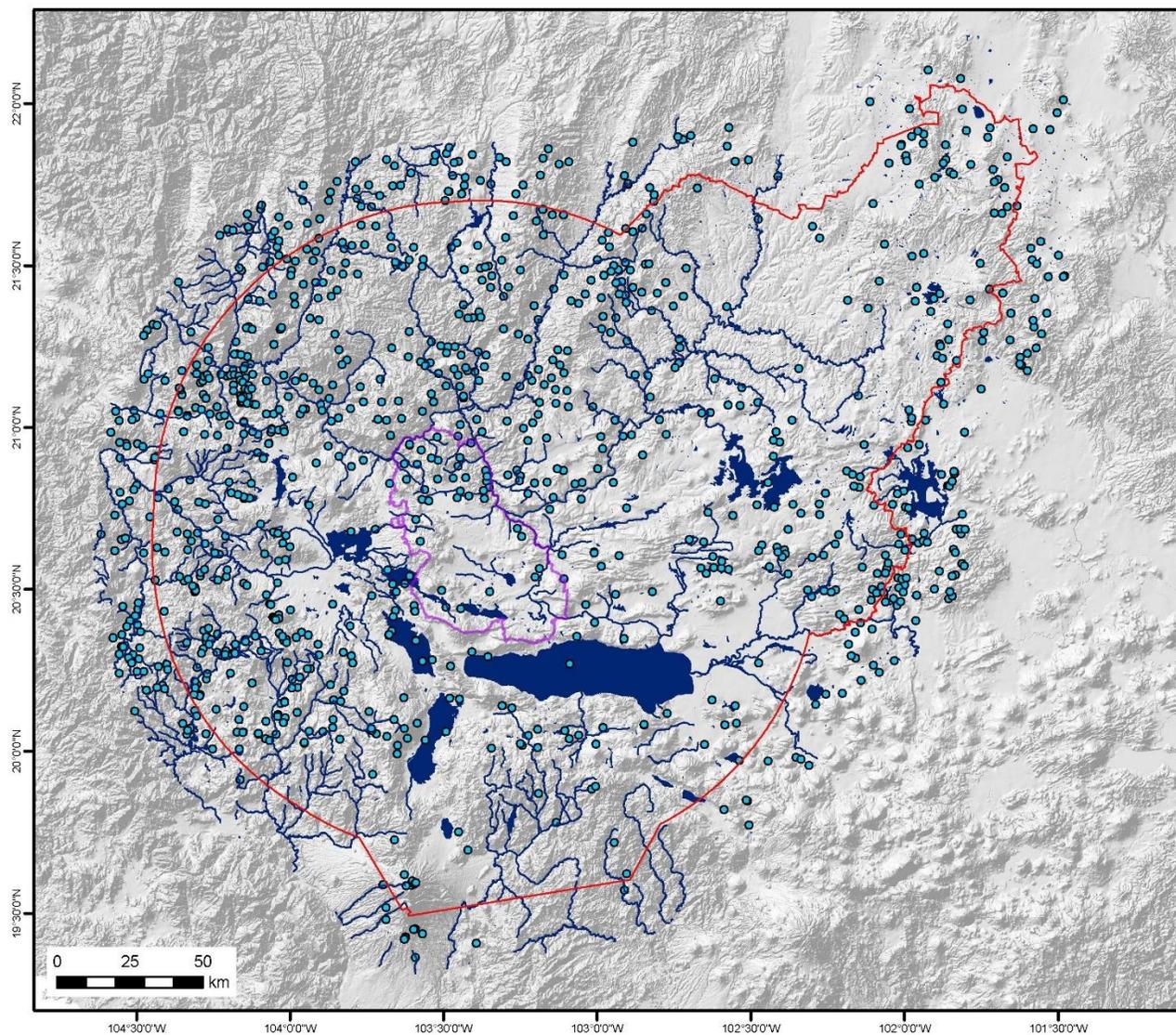
La Sierra Madre Occidental domina la parte norte del área de estudio, con grandes bloques riolíticos con profundos y abruptos valles. Al norte del área de estudio, el relieve se caracteriza por amplios valles longitudinales, montañas y mesetas de variada extensión, elevación y con vertientes abruptas; hacia el occidente, el relieve es en general plano donde dominan los altiplanos (Tepatitlán) o mesetas (Arandas y San Julián) con llanuras aluviales, siendo la del Río Verde la principal cuenca; se presentan espesores considerables de sedimentos fluviolacustres calcáreos, regosoles, suelos halófilos y concreciones silíceas (tepetate). Con mayor detalle la subprovincia de los Altos de Jalisco se define por vastas mesetas volcánicas, valles profundos y laderas escarpadas, altiplanicies con colinas redondeadas, cañones y depresiones, con altitudes máximas de 2600 msnm; el centro del área de estudio presenta un relieve de formas montañosas y de pequeños valles o llanos (promedio 1 500 msnm), tales como: Atemajac, Tesistán y Ameca-Cocula, limitados por una serie de cerros (1 700 – 2 225 msnm), como: El Pelón, Las Latillas, El Colli, El Cuatro, Sacramento, San Bartolo, Escondido y San Martín. La Sierra La Primavera es un elemento de la topografía relevante del área de estudio, con una altitud que varía de 1 800 a 2 225 msnm. Los relieves planos centrales (~1 600 msnm) del lago de Chapala y de la Ciénega de Chapala rodeadas de sierras con fallamientos se extienden hacia el estado de Michoacán aumentando su elevación (1 800-2 000 msnm). El INEGI (2001), caracteriza el 80% del área de estudio con las siguientes topoformas que en conjunto son sierras y mesetas dominando el paisaje:

Topoforma	Área de estudio (%)	Topoforma	Área de estudio (%)
Sierra alta con mesetas	10	Sierra volcánica de laderas escarpadas	6
Llanura aluvial	10	Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados	3.5
Sierra alta con mesetas	10	Lomerío de basalto	3.7
Meseta basáltica con lomerío	8	Lomerío de basaltos con llanuras	3.3
Lomerío de aluvión antiguo	8	Valle de laderas tendidas	2.2
Cañón típico	6.6	Cuerpo de agua	2.6
Sierra con laderas de escarpa de falla	6	Meseta basáltica con cañadas	2.6

Tabla 2 Topoformas dominantes en el área de estudio (INEGI, 2001).

Topoformas cuyas definiciones son (INEGI, 2001): Sierra, línea de montañas; Lomerío, conjunto de lomas; Meseta, terreno elevado y llano de gran extensión; Bajada, franja de terreno suavemente inclinado formado en la base de cadenas montañosas; Llanura, superficie sin elevaciones o depresiones prominentes; Valle, Depresión alargada e inclinada hacia el mar o hacia una cuenca endorreica, generalmente ocupada por un río; cañón, valle cortado con paredes casi verticales con un río que fluye en el fondo.

Agua en la superficie. – Se presentan cuerpos de agua o ambientes dominados por agua perenne en la superficie, tales como: lagunas, lagos, ríos, humedales/humedales potenciales, manantiales, pantanos, zonas sujetas a inundación o inundables, poza perenne, fango y marisma, principalmente (Kachadourian Marras *et al.*, 2020); como principales ríos, lagos y lagunas perennes, se nombran los lagos de Chapala, Atotonilco, Zacoalco; las lagunas de San Marcos, Atotonilquillo, Sayula, Zapotlan, principalmente (Ver Mapa 4).



Agua perenne en superficie

Simbología

- Área de Estudio
- Área Metropolitana de Guadalajara
- Corriente de agua perenne
- Agua perenne en superficie
- Manantial

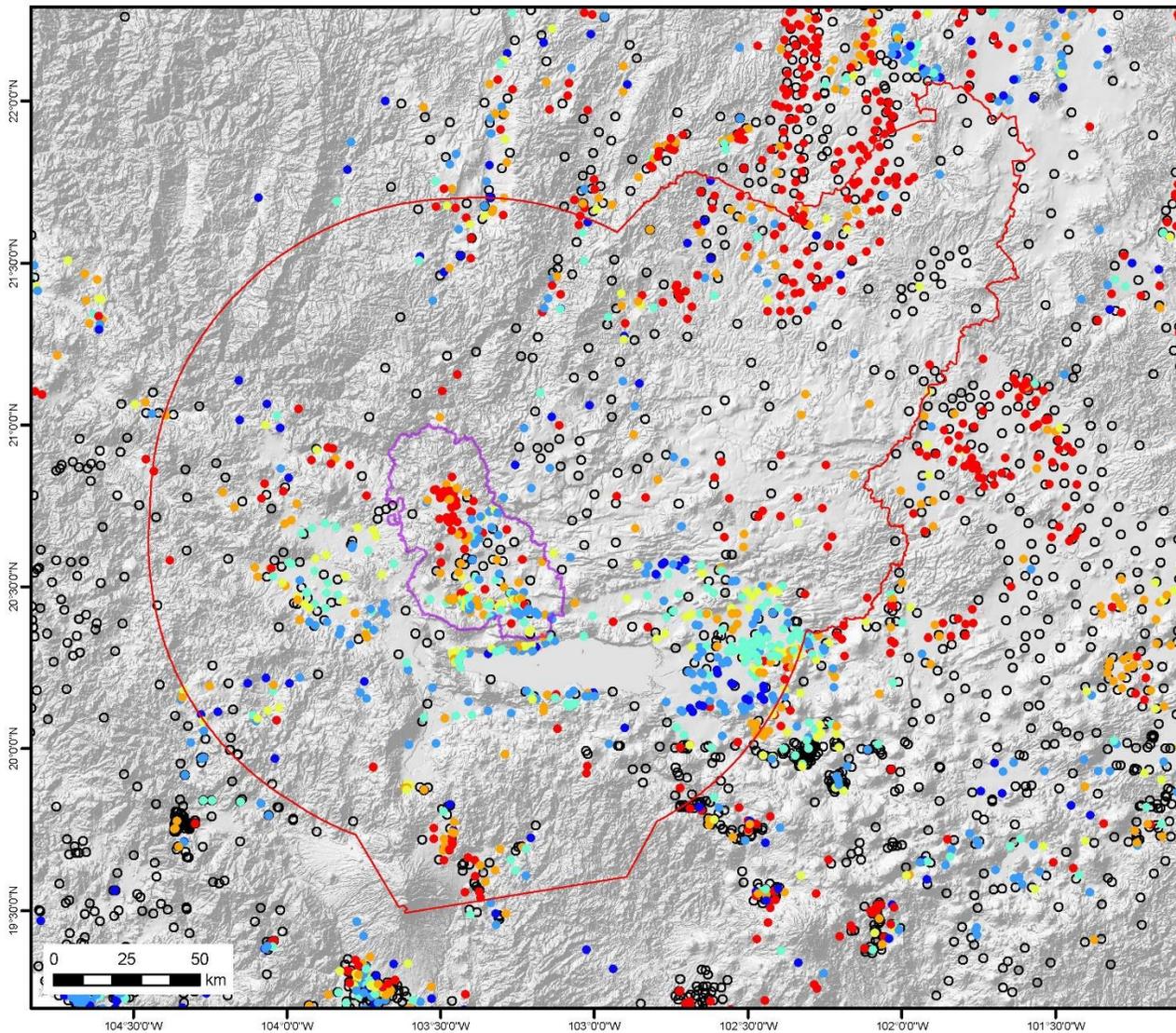
Fuentes:

- Conjunto de Datos Vectoriales Topográficos Escala 1:1 000 000, Corrientes y Cuerpos de agua. INEGI (2000)
- Red Hidrográfica Digital de México 1.0 Escala 1:250 000. INEGI (2006)
- Conjunto de Datos Vectoriales Topográficos Escala 1:250 000, Serie II. INEGI (1995)
- Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, Serie I. Continuo Nacional INEGI (1980)
- Conjunto de datos Vectoriales Fisiográficos Escala 1:1 000 000, Serie I. Continuo Nacional, Provincias fisiográficas. INEGI (2001)
- Cuerpos de Agua Escala 1:50,000. INEGI (2009)
- Conjunto de Datos Vectoriales Climatológicos Escala 1:1 000 000. Humedad de Suelo. INEGI (2005)
- Conjunto de Datos Vectoriales de Vegetación Primaria Escala 1:1 000 000, Nivel I y II. INEGI (1993-09)
- Continuo Nacional de Aguas Subterráneas Escala 1:250 000, Serie II. INEGI (2008)
- Inventario Nacional de Humedales. CONAGUA (2016)
- Conjunto de Datos Vectoriales de Humedales Potenciales Escala 1:250 000, Serie II. INEGI (2012)
- Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) INEGI (2012)
- Manantiales termales CFE

Mapa 4 Agua perenne en superficie.

Profundidad del nivel estático. – La CONAGUA (2019) con 507 puntos de registro y el INEGI (2008) con 258 puntos con data valida, reportan profundidades del agua entre ~0.5 a ~270 metros (pozos y norias). La densidad de puntos de registro de profundidad del agua es ínfima, aproximadamente de 10 puntos con registro de profundidad del nivel estático en 1 000 km² (100 000 Ha).

Es importante diferenciar entre profundidad del agua (profundidad del nivel estático) y profundidad del pozo, como estructura. En el área de estudio, se registran pozos para abastecimiento cuya máxima profundidad es de ~500 m, y no se tiene conocimiento público de algún otro pozo más profundo, aunque no se descarta.



Profundidad Piezométrica

Simbología

- Área de Estudio
- Área Metropolitana de Guadalajara

Profundidad del nivel estático (metros)

- 0.0 - 3.0
- 3.00 - 11.0
- 11.00 - 20.0
- 20.00 - 30.0
- 30.00 - 60.0
- 60.00 - 500.0
- Sin Datos

Fuentes:
 Red de monitoreo de Aguas Subterráneas (CONAGUA 1979-2018). Continuo Nacional de Aguas Subterráneas Escala 1:250 000, Serie II. INEGI (2008). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) INEGI (2012)

Mapa 5 Contexto de la profundidad subterránea del agua en el área de estudio.

Contexto climático. - Son tres los grupos climáticos presentes: cálidos húmedos (A), secos (B) y templados húmedos (C), que de acuerdo con el INEGI (2000) se caracterizan por lluvia escasa todo el año o en el invierno, y el régimen de lluvias es en el verano, el mes de máxima precipitación es entre mayo y octubre, mes que recibe diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año; los climas templado subhúmedo y semisecos (templado, semicálido, muy cálido) dominan el área de estudio: templado subhúmedo, 38%; semisecos, 32% y cálido subhúmedo, 29.68%. (Tabla 4, Mapa 6). El área de estudio registra *lluvia acumulada anual promedio* histórico (1981-2010), de ~600-1 000 mm, y conforme al Índice Estandarizado de Precipitación o Índice Normalizado de Precipitación (PSI, por sus siglas en inglés), oscila en las categorías *moderadamente seco*, *ligeramente seco* y *muy seco*; mientras que el *promedio de la evaporación acumulada anual* es ~1 600- 2 000 mm (SMN, Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), Sin fecha), ver Imagen 9.

Grupo Climático	Tipos de clima	Características	Área de estudio (%)
Grupo Clima C (Templados subhúmedos, 38%)	<i>(A)C(w0) (w)</i>	Templado lluvioso con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C, ya la del mes más caliente > 10 °C, con características afines al Grupo A. Clima semicálido con temperatura media anual > 18 °C. Lluvias de verano con lluvia invernal con un % menor al 5 del anual.	16.8
	<i>C(w1) (w) y C(w1)</i>	Templados subhúmedos con lluvias en verano, que, para la vertiente al SO de la Altiplanicie Mexicana a la altura de Guadalajara, presenta una temperatura promedio anual de 19.5 °C, precipitación promedio anual de 923 mm y una variación de 7.9 °C. Lluvias de verano con lluvia invernal con un % menor al 5 del anual. Subtipo intermedio en cuanto grado de humedad con un cociente Precipitación/Temperatura (P/T), entre 43.2-55.	6.9
	<i>(A)C(w1) (w)</i>	Templado lluvioso con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C y la del mes más caliente > 10 °C con características afines al Grupo A. Clima semicálido con temperatura media anual > 18 °C. Lluvias de verano con lluvia invernal con un % menor al 5 del anual. Subtipo intermedio en cuanto grado de humedad con un cociente P/T entre 43.2-55.	9.7
	<i>C(w0) (w), C(w0), C(w0) (x'), C(w2) (w) y C(w2)</i>	Templados húmedos, con distintos grados de humedad, dominante la lluvia en verano. Temperatura media anual entre 12-18 °C. A cuanto grado de humedad, domina un P/T < 43.2.	4.17
Grupo Clima A, Cálido subhúmedo	<i>Aw0(w)</i>	denominado "caliente subhúmedo con lluvias en verano" que, en la vertiente al Pacífico, de acuerdo con García E. (2004), la temperatura promedio anual es de 25.2 °C con una oscilación de 4.5 C, precipitación promedio anual de 930.8 cm, en el más seco la precipitación es < 60 mm. Es el tipo de clima más seco de los subhúmedos, dónde el cociente P/T es menor a 43.2.	29.68
Grupos Clima B, Semiseco	<i>BS1kw</i>	Seco o árido subtipo estepario (BS), es decir es el menos seco, siendo semiseco templado con verano cálido con temperatura media anual entre 12 y 18 C, en el mes más caliente es > 18, y en el mes más frío es entre - 3 C y 18 C, con lluvias en verano y lluvia invernal con un % menor al 10.2 de la anual, es el menos seco del tipo BS. en la parte alta del río Verde. Asociación con cactáceas, matorrales espinosos o inermes, etc.	27.86
	<i>BS1hw(w)</i>	<i>Semisecos semicálido y muy cálido</i> Seco o árido subtipo estepario (BS), es decir es el menos seco. Es semicálido con invierno fresco, temperatura promedio anual mayor a 18 C, Temperatura del mes más frío es < 18 C, régimen de lluvias de verano con 5 -10.2% de lluvias invernal, respecto al total anual. Esteparios semisecos muy cálidos con lluvias en verano, con una temperatura media anual mayor a 22 ° C y la temperatura del mes más frío es > 18° C. La única diferencia es el % de lluvia invernal. Donde BS1(h') w (w) presenta 5% de la cantidad de lluvia que cae en el invierno respecto a la total anual y en BS1(h') w cae entre 5 y 10.2 % del total anual.	4.32

Tabla 3 Características de los tipos de climas en el área de estudio (INEGI, 2000, 2008).

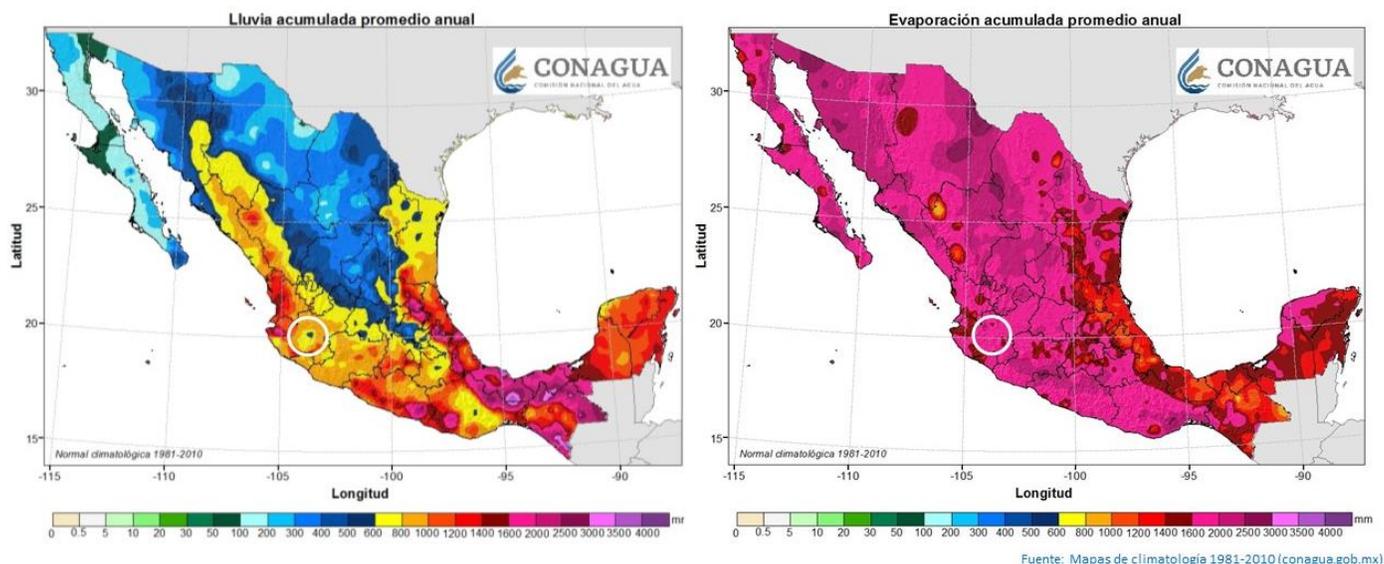


Imagen 9 Contexto regional de “Lluvia acumulada promedio anual” y “Evaporación acumulada promedio anual” del área de estudio (SMN, Sin fecha)

Según la FAO (1985) en Segura-Castruita y Ortiz-Solorio (2017), la evapotranspiración potencial promedio mensual medido en Guadalajara es 112 mm, siendo los meses de marzo a agosto en dónde la tasa de evapotranspiración es mayor al promedio anual y durante dichos meses el promedio mensual es de 139 mm (Ver Imagen 10).

Obs.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Chihuahua	51	67	122	145	172	166	149	141	109	97	69	45
Chilpancingo	89	92	121	121	117	91	95	91	79	84	74	69
Durango	53	74	111	133	154	149	130	121	110	101	71	53
Guadalajara	80	94	139	156	171	132	119	116	102	95	78	71
Jalapa	62	68	95	105	110	102	103	103	87	77	62	55
La Paz	64	72	105	132	161	171	160	155	132	113	80	60
Mérida	89	98	140	158	165	149	145	141	121	109	89	81
Monterrey	50	62	98	119	133	142	155	143	109	84	55	48
Tacubaya	75	89	128	130	129	110	101	99	86	81	68	64
Tapachula	168	161	177	154	145	120	134	136	112	124	135	146

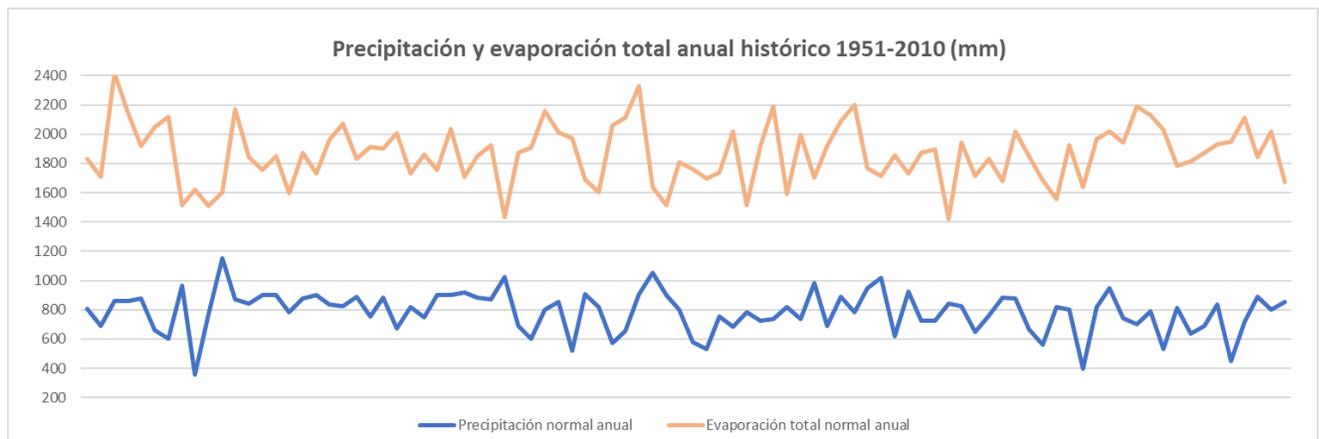
Imagen 10 . Observatorios con ETP promedio mensual por el método de Penman, tomado de Segura-Castruita *et al.* 2017.

En el área de estudio, el SMN (Información de Estaciones Climatológicas.) indica 227 estaciones climatológicas, de las cuales, 114 están “operando” (17 en Zacatecas, 90 en Jalisco, 3 en Michoacán y 4 en Nayarit) y reportan un registro histórico de 1951-2010 con valores de *altitud*, *temperatura máxima normal*, *temperatura mínima normal*, *precipitación anual normal*, *evaporación total anual normal*, el resto son etiquetadas como “suspendida”.

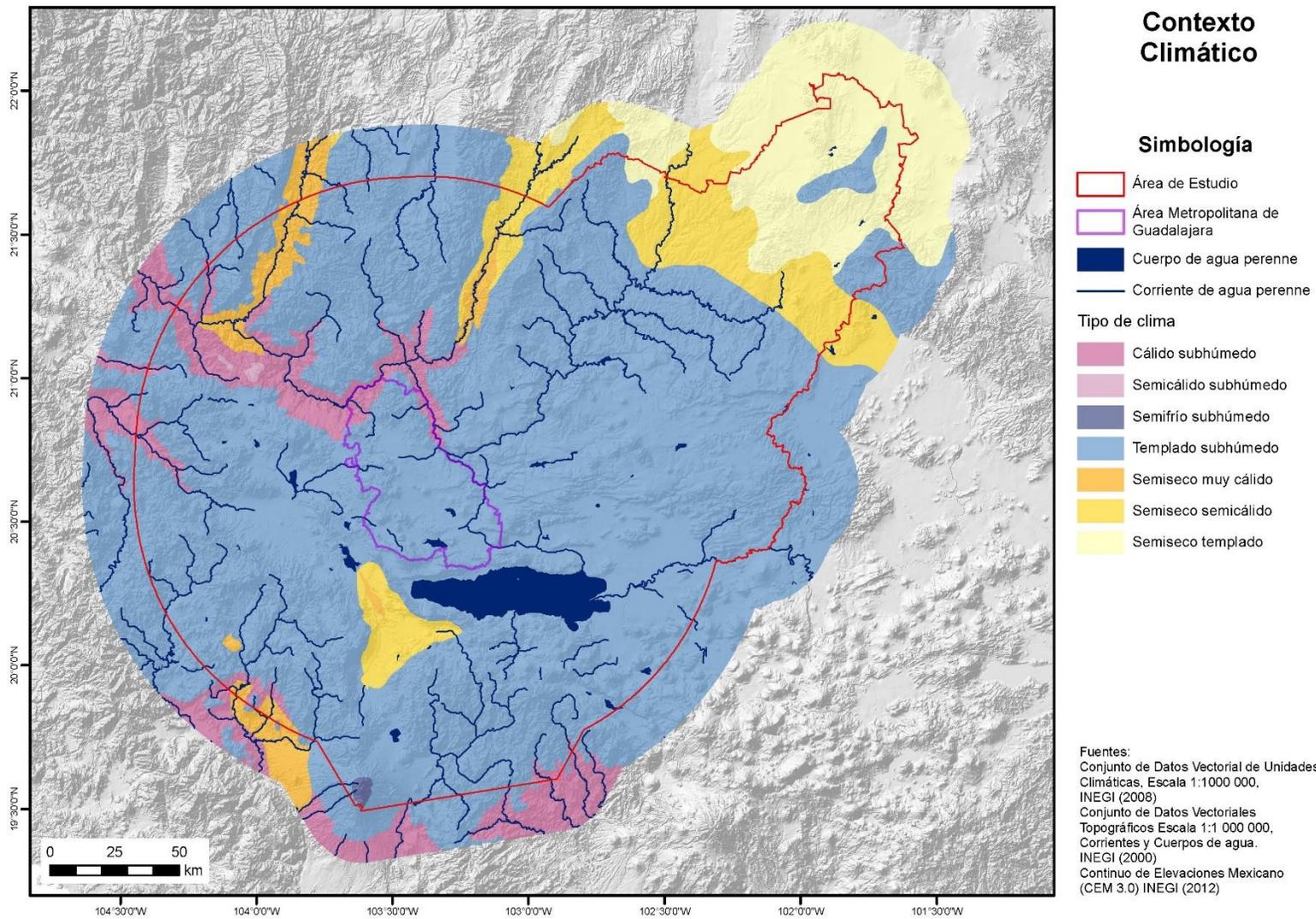
Promedio Global	Altitud msnm 1605.20	Temperatura máxima normal 27.45	Temperatura media normal °C 18.88	Temperatura mínima normal 10.29	Precipitación normal anual 788.76	Evaporación total normal anual mm 1862.59
-----------------	----------------------------	------------------------------------	---	------------------------------------	--------------------------------------	---

Tabla 4 Promedio de la altitud, temperatura máxima normal, temperatura mínima normal, precipitación anual normal, evaporación total potencial anual normal, del total de estaciones climatológicas en el área de estudio.

La siguiente gráfica, expresa el comportamiento promedio anual histórico de la precipitación y la evaporación potencial en el área de estudio, mostrando que, en un total de 90 estaciones la tasa de precipitación anual está muy por debajo de la cantidad de evaporación total (potencial) anual.



Gráfica 1 Precipitación y evaporación potencial total anual en 90 estaciones climatológicas operando y con data disponible (1951-2010) (SMN, Información de Estaciones Climatológicas).

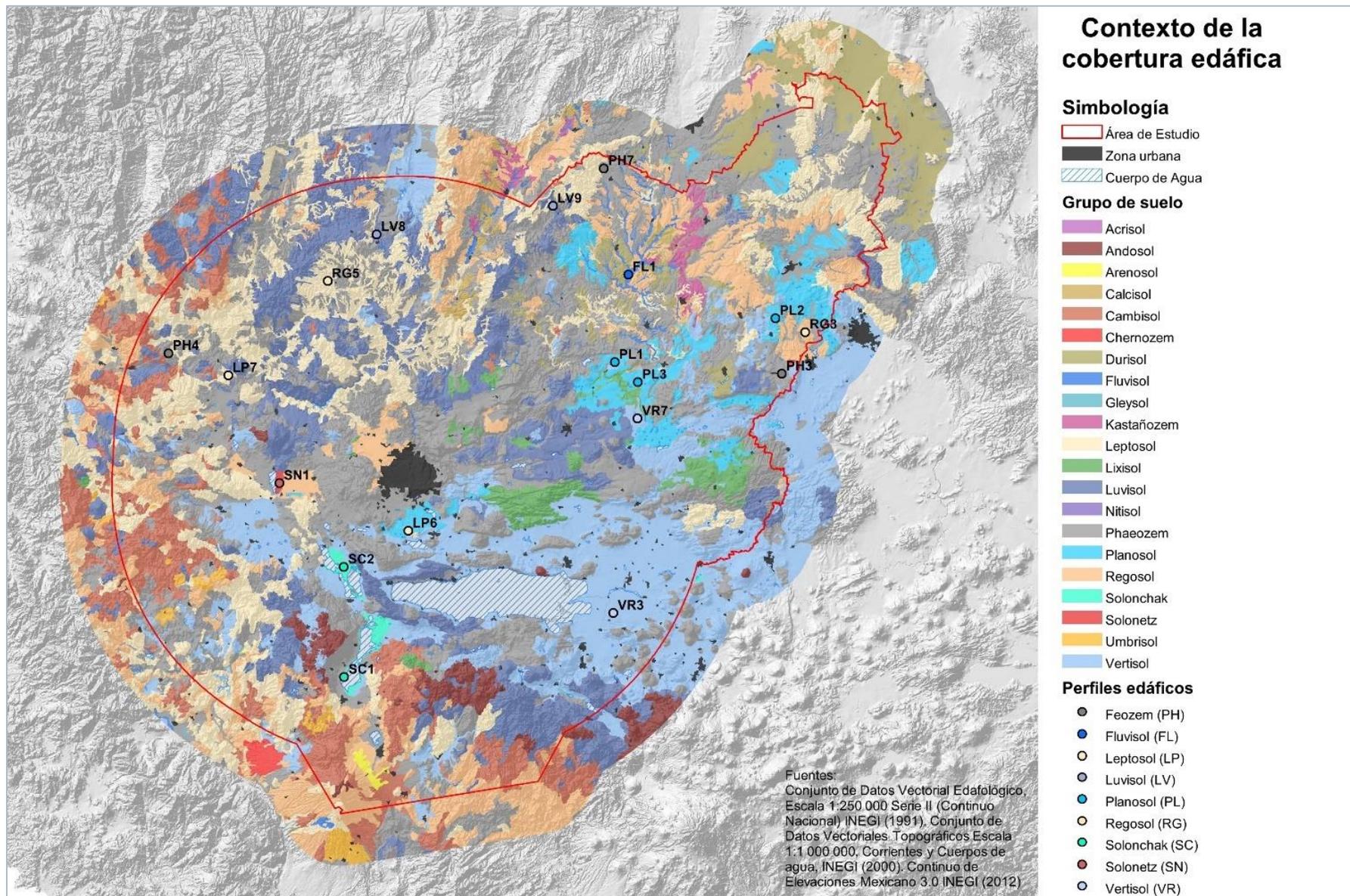


Mapa 6 Distribución climática regional en el área de estudio.

Contexto edáfico. - En el área de estudio, se reconocen 19 grupos de suelo del total de 32 Grupos de Suelo de Referencia Mundial (FAO, 2007; 2015). La mayoría de estos suelos, provienen de materiales volcánicos, dada su localización en la denominada Faja Volcánica Transmexicana, llegando a cumplir en algunos sitios con los requisitos para pertenecer al orden Andosol (Krasilnikov, y otros, 2013). El mapa 7 expone la distribución de los suelos que prevalecen y cubren en total un 78% del área de estudio (*suelos dominantes*): *Phaeozem* (PH, 29%); *Leptosol* (LP, 14%); *Luvisol* (LV, 13%); *Vertisol* (VR, 13%) y *Regosol* (RG, 8%); catorce suelos cubren una superficie menor (*suelos menores*), 17%: *Cambisol* (CM), *Planosol* (PL), *Lixisol* (LX), *Durisol* (DU), *Andosol* (AN), *Fluvisol* (FL), *Kastanosem* (KS), *Calcisol* (CL), *Umbrisol* (UM), *Solonchak* (SC), *Arenosol* (AR), *Solonets* (SN), *Gleysol* (GL) y *Chernozem* (CH).

Los suelos de los grupos *Vertisol*, *Fluvisol*, *Solonetz*, *Solonchak* y *Gleysol* han evolucionado con una marcada influencia del agua subterránea (presente o pasada) (FAO, 2007; 2015) localizados, en general, en posiciones topográficas más bajas respecto al paisaje local y/o regional; en el área de estudio representan el 14% de la superficie. A continuación, se presenta la descripción de los suelos dominantes y de los suelos que genéricamente se asocian con agua (subterránea) en el área de estudio; los suelos que cubren la mayor parte, como se indicó precedentemente, pertenecen a cinco grupos. Los **suelos dominantes** en el área de estudio tienen la siguiente correlación FAO/Soil taxonomy: 1- *Phaeozems*/Molisoles; 2- *Leptosol* o Listosol/Entisol; 3- *Luvioles*/Alfisoles; 4- *Vertioles*/*Vertisoles* y 5- *Regosol*/Inceptisol:

- ***Phaeozem/Molisol***: es el suelo dominante en el área de estudio como en el resto de la Faja Volcánica, es un suelo que en general se ha desarrollado en sedimentos volcánicos frescos que acumulan materia orgánica. Se caracterizan por presentar un epipedón mólico que se localiza en superficie y presenta mayor contenido de materia orgánica, colores más oscuros y mayor saturación de bases (>50%), respecto a otros epipedones. Estos suelos se han desarrollado en general en ambientes altos, planos, ondulados, e incluso con marcada pendiente. Los perfiles más profundos son frecuentes en los ámbitos más planos. En el área de estudio los suelos *Phaeozem* han evolucionado a partir de rocas ígneas extrusivas y rocas sedimentarias, principalmente, y coinciden mayormente con un relieve regional caracterizado por el INEGI (2001) como sierras volcánicas, altas complejas, con mesetas, etc., mesetas y lomeríos.



Mapa 7 Contexto edáfico del área de estudio.

- **Leptosol o Litosol/Entisol:** son suelos de escaso desarrollo por ser depósitos recientes, relieves pronunciados y/o de escasa precipitación. En el caso de los *Leptosoles*, se caracterizan por presentar en general, poco enraizamiento debido a que tienen mucha grava. Cabe destacar que *leptos* significa delgado o fino, debido a la presencia somera de roca. En el área de estudio los suelos *Leptosol* han evolucionado a partir de rocas ígneas extrusivas ácidas y rocas sedimentarias. Coincide con un relieve regional compuesto mayormente por *sierras*, mesetas, valles y llanuras (INEGI, 2001), y se localiza básicamente en la franja noroeste del área de estudio dónde predominan sierras en combinación con cañones, mientras que las mesetas y valles predominan en Los Altos de Jalisco.
- **Luvisol/Alfisol:** suelos que suelen ser profundos, bien estructurados y se caracterizan por tener un horizonte subsuperficial con abundante arcilla. Esta arcilla se acumula en el horizonte subsuperficial por la alternancia de periodos húmedos y secos en periodos de miles de años. Presentan un *epipedón ócrico* que se caracteriza por ser de menor grosor o menos contenido de materia orgánica o color más claro o presentar consistencias más duras que un *horizonte mólico*. Es un suelo dominante en Los Altos de Jalisco. En el área de estudio los *Luvisoles* aparentemente han evolucionado a partir de *rocas ígneas extrusivas* y mayoritariamente catalogadas como *ácidas*. Los *Luvisoles* en el relieve del área de estudio se localizan principalmente en sierras intercaladas con mesetas, lomeríos y con una presencia importante de cañones (INEGI, 2001). Es de destacar la asociación espacial de *Luvisoles* con llanuras, llanuras aluviales, de piso rocoso y vasos lacustres salinos como las lagunas de San Marcos y Sayula aledañas al lago de Chapala. Los *Luvisoles* localizados en llanuras, llanuras aluviales y mesetas basálticas espacialmente, comparten con el suelo *Planosol* (hidromorfo).
- **Vertisol/Vertisol:** suelo que tiene más de 30% de arcilla en todas sus capas dentro del primer metro de espesor. Dentro de estas arcillas se presentan las de tipo expansivo (montmorillonita) en cantidad suficiente como para generar grietas en periodo seco y *slickenside* (superficies de fricción en época húmeda). Las grietas tienen al menos 0.01 m de ancho y alcanza profundidad de al menos 0.50 m. A través de estas grietas entra material superficial, y al expandirse genera relieve *gilgai*. La arcilla expandible se forma en ambiente con alto contenido de agua que se mantiene por periodos suficientes como para que la arcilla presente en el material original evolucione a la de tipo montmorillonita. Los *Vertisoles* son característicos en bajos antiguos o actuales (fondo de lago, cauce de río, terraza inferior de un río, etc.), consecuentemente, es también posible que puedan presentarse actualmente en relieves altos debido a la evolución geomorfológica del ambiente territorial. Los *Vertisoles* en el relieve del ambiente de estudio se localizan en las llanuras aluviales, llanuras de piso rocoso o cementado, vasos lacustres salinos y vasos lacustres salinos inundables,

localizados en las franjas bajas hacia el este de la laguna de Chapala y en ciertas partes centrales y al sur de Los Altos de Jalisco.

- **Regosol/Inceptisol** (del latín *inceptum* que significa inicial). El INEGI los caracteriza de forma genérica como *suelo claro, pobre en materia orgánica*, con escasa alteración respecto al material de origen. Los *Regosoles* pertenecen al grupo taxonómico que contiene todos los suelos que no cumplen las exigencias requeridas para pertenecer a otros grupos u órdenes de suelo (FAO, 2007, 2015; USDA, 2014). El orden *Regosol* en el paisaje regional del ambiente de interés aparece principalmente en las partes altas y laderas *de sierras y lomeríos, pero también en las partes bajas de lomerío de basalto con cañadas y en llanuras, cañones, mesetas y valles, pero en muy menor proporción e inclusive aparece rodeando cuerpos de agua, los cuales no son distinguibles si son artificiales o naturales*. Los *Regosoles* en el área de estudio se presentan principalmente en un medio de rocas *ígneas extrusivas ácidas* (INEGI, 2001).

Suelos de menor representación superficial. - A continuación, se indican las características regionales de los suelos menores en contexto con los suelos dominantes antes descritos.

- *Cambisol* se considera un suelo poco desarrollado, incipiente o somero (5% de la cobertura edáfica), localizándose principalmente en relieves moderadamente escarpados. A nivel internacional, suele ser el tipo de suelo que no presenta rasgos definidos para clasificar en algún otro tipo de suelo, debido a que puede ser un suelo muy maduro, pero en un relieve abrupto muy expuesto a procesos erosivos, en paisajes degradados; o suelos jóvenes localizados en topográficamente más protegidos frente a procesos de erosión (Ibáñez & Manríquez Cosío, 2011). En el área de estudio se localiza principalmente en bosques, rodeado de los suelos mayores *Leptosol, Phaeozem y Regosol*.
- Los *Planosoles* (4% de la cubierta edáfica) aparecen mayormente en las partes bajas de las topoformas *llanura aluvial, lomerío de aluvión antiguo, mesetas basálticas con lomerío* y en menor presencia en las partes altas de sierras o en sectores más bajos dentro de las sierras, característicamente se forman en ámbitos de descarga de agua subterránea, pudiendo ser que se den también en sitios donde dos materiales litológicos se superponen, entonces entra el agua y al llegar al otro material sale el agua en forma de vergel, valles y *cuerpos de agua*. Lo anterior sucede principalmente en Los Altos de Jalisco especialmente en los municipios de San Miguel El Alto, Valle de Guadalupe, Tepatitlán de Morelos, San Ignacio Cerro Gordo, Unión de San Antonio y Lagos de Moreno y norte del *lago de Chapala*, dominando los territorios municipal y metropolitano de

Tlajomulco de Zuñiga y El Salto. En un mosaico regional de suelos de orden *Phaeozem*, *Vertisol* y *Luvisol* (INEGI, 2001).

- *Fluvisol* (1% de la cubierta edáfica), coincide principalmente en cuerpos de agua o las franjas más bajas de toposformas denominadas *llanura aluvial*, *lomerío de aluvión antiguo*, *valle intermontano con lomerío*, con un material rocoso sedimentario tipo limolita-arenisca y en los fondos de cañones de basalto (INEGI, 2001).
- El *Lixisol* (2%), es un suelo arcilloso que genéricamente se caracteriza por estar saturado con base y arcilla de baja actividad; del latín *lixivia*, sustancias lavadas. En el área de estudio forma parte de toposformas de tipo *lomeríos*, *mesetas*, *valles*, *llanuras* y *cuerpos de agua*, principalmente. Integrando mosaicos de relieves más bajos y continuos a suelos *Vertisol*, *Phaeozem* y *Luvisol*, primordialmente.
- *Durisol*, (2% del suelo), suelos muy meteorizados con una capa dura de sílice (horizonte *petrodúrico*) o en forma de nódulos de sílice (horizonte *dúrico*) que en el área de estudio cubre mesetas y valles suaves. Un *Durisol* se caracteriza por presentar un horizonte cementado, endurecimiento irreversible, por sílice que para haber sido liberado requiere esencialmente de presencia de agua. El mosaico edáfico en el que se localizan los polígonos *Durisol* en el área de estudio es dominado por *Fluvisol*, *Planosol*, *Regosol*, *Phaeozem* y *Kastañosem*, en un relieve natural dominado por llanuras (planicies) y lomeríos de aluvión antiguo (INEGI, 2001).
- *Andosol* (1.4%), forma parte de un mosaico edáfico dominado por suelos de tipo *Luvisol* y *Phaeozem*, principalmente, localizado en el área de estudio en *valles suaves* en un mosaico con dominio de *Luvisol* y *Vertisol*.
- *Kastañozem*, de latín castaño y del ruso, suelo o tierra. Es un suelo que presenta un horizonte secundario de acumulación de carbonato de calcio (horizonte cálcico). Se desarrolla en relieves planos a ondulados. Cubre 0.55% de la cobertura edáfica del área de estudio, se localiza en un relieve natural de llanuras aluviales y lomeríos de aluvión antiguo de latitudes bajas de la región, en una franja de clima semiseco semicálido, en un mosaico edáfico compuesto por *Durisol*, *Regosol*, *Phaeozem* y *Planosol*; su perfil edáfico es similar al del suelo de tipo *Chernozem*, pero su horizonte húmico es más delgado y con una mayor concentración de carbonatos (Lugo-Hubp, 2011).
- *Calcisol* del latín, cal y suelo, un suelo rico en carbonatos de calcio. Es un suelo con acumulación secundaria de carbonato de calcio. Es un suelo que se desarrolla en ambientes ricos en cationes, de origen aluvial, coluvial y eólico, en relieves planos a ondulados en climas áridos y semiáridos. La vegetación natural asociada genéricamente es escasa y dominada por arbustos y árboles xerófitos y/o pastos efímeros (FAO, 2007; Lugo-Hubp, 2011). Representa el 0.38% de la cobertura edáfica del

área de estudio en una franja cuyo material parental es dominado por depósitos lacustres en forma de llanuras y lomeríos de antiguos aluviones, en climas secos-semi cálidos.

- El *Arenosol* (<1% cobertura edáfica) es un suelo de textura predominantemente arenosa (65%) en los primeros 100 cm, su origen suele ser por la alta meteorización. En el área de estudio se localiza en una franja dominada por los suelos *Regosol* y *Phaeozem*.
- Los suelos de orden *Solonchak* (< 0.5%) se presentan en un mosaico de *Vertisoles* y *Luvisoles* principalmente aledaños a cuerpos de agua, vasos lacustres salinos, llanuras aluviales en donde actualmente se manifiestan las lagunas de Sayula, San Marcos y Atotonilco, en Jalisco.
- Los *Solonetz* (<0.05%) se localizan sólo en llanuras aluviales. El mayor polígono caracterizado como *Solonetz* se localiza en una *llanura aluvial* donde se formó en el 2009 la presa La Vega, humedal artificial RAMSAR que retiene el agua de los ríos Teuchitlán y Salado, formadores del río Ameca. En esta llanura aluvial es importante resaltar que se presentan manantiales termales y fríos, algunos de gran caudal como los de Río Caliente, Tala y Teuchitlán y otros de caudal reducido, pero aproximadamente constante (SEMADET, 2010).
- El suelo con menor cobertura es el *Chernozem* (0.01%), suelo franco arcilloso, rico en hummus, siendo uno de los más fértiles para la agricultura. En el área de estudio forma parte de *Regosol*, *Vertisol* y *Phaeozem*, en un contexto de material parental de depósitos y sedimentos lacustres en forma de meseta, lo que implica que existe algún aporte subterráneo de agua. Es un suelo rico en materia orgánica, a nivel mundial es un suelo que se asocia preliminarmente a zonas de recarga.

Selección e interpretación de perfiles edáficos representativos por tipo de suelo_. A continuación, se presentan los perfiles seleccionados para el análisis de los suelos:

Phaeozem_. De un total de siete perfiles *Phaeozem*, se seleccionaron los indicados como *perfil 3, 4 y 7 Phaeozem*. Los perfiles *Phaeozem* analizados tienen en común un escaso a moderado desarrollo, con la presencia de roca a aproximadamente 55-90 cm de profundidad, presentan un horizonte B cámbico en dos de los perfiles considerados. La textura en general es media a algo fina, lo que conduce en algunos casos a definir permeabilidades moderadas, pero en general son bien drenados, al igual que el drenaje superficial.

Puede indicarse que en general no presentan una elevada saturación de bases y esto se corresponde con bajos valores de pH en algunos casos. Sin embargo, no siempre se observa esta correspondencia, destacándose en algunos horizontes pH alcalinos y elevados PSI, pero no pudiendo establecerse una tendencia clara del motivo de su presencia. La salinidad es entre nula a ligeramente salina, en un caso. Lo

comentado en relación con variaciones en el pH, PSI o salinidad, puede ser debida a variaciones en el régimen hídrico del suelo, con acumulaciones de agua debido a textura algo fina y/o a la composición mineralógica de los materiales originales (R) e incluso a que existan discontinuidades litológicas. No obstante, en ningún caso se presenta hidromorfismo. Se destaca, sin embargo, que el contenido de materia orgánica en un caso resultó elevado y pueda también ser debido a acumulaciones de agua. Es también de destacar la presencia de enlame en superficie en uno de los perfiles, lo cual suele asociarse a procesos erosivos que se corresponde elevado drenaje superficial (escurrimiento). El contexto de vegetación primaria en todos los perfiles *Feozems* son los siguientes tipos de vegetación: Bosque de Encino, Matorral Subtropical, Selva Baja Caducifolia y Pastizal Natural.

El *perfil 3 Phaeozem*, es un suelo de escaso a moderado desarrollado, hasta el horizonte R (roca) a 55 cm de profundidad, dado que presenta un B cambio de 28 cm de espesor, poco profundo, a partir de los 55 cm aparece la roca, de textura franco-arcillosa, que definen un drenaje interno (permeabilidad) moderado. El valor de pH en superficie es de 6.7 y en profundidad se mantiene en el mismo orden de valores, presenta ligera salinidad, ausencia de CaCO_3 , y muy bajo contenido de materia orgánica. La saturación de bases resulta baja, lo cual no se correspondería con el pH indicado. Los contenidos de cationes son en general de bajos a medios dependiendo del horizonte, sin embargo, el contenido de sodio conduce a valores de PSI que, aunque no resultan excesivamente altos revelan cierta sodicidad y podría explicar parcialmente los valores de pH. Esta composición catiónica es posiblemente debida al material parenteral dado que no incide la superficie freática. En la superficie registra clastos y depósitos lacustres. El perfil se observó en octubre de 1991 en un clima templado subhúmedo en un contexto rocoso de depósitos lacustres (Ferrari *et al.*, 2018).



Imagen 11 Perfil 4
Endoléptico Húmico

El *perfil 4 Phaeozem* es un suelo de escaso a moderado desarrollo hasta el horizonte R (roca) a 96 cm, textura arcillosa, drenaje interno (permeabilidad) bien drenado, con pH ácido en todo el perfil estudiado (5.2-5.4) valor que se corresponde con la baja saturación de bases especialmente el horizonte B cámbico, no salino, no alcalino, sin CaCO_3 , y muy rico en contenido de materia orgánica (4.7% en superficie). Este suelo ha evolucionado en un contexto de rocas superficiales integradas por piroclásticos silíceos y depósitos de derrumbe (Ferrari *et al.*, 2018), se observó el 28 de agosto del 2003 en un clima cálido subhúmedo con lluvia en el verano, relieve abrupto, altitud 1 040 msnm.

El perfil 7 Phaeozem es un suelo de escaso desarrollo hasta la profundidad de 71 cm de profundidad donde comienza la roca (R), no presenta horizonte B, textura franco arcillosa, bien drenados en superficie (escurrimiento) y en forma vertical (permeabilidad), con una alcalinidad medida en pH y PSI variable, así presenta un enlame de tan solo 3 cm de profundidad con pH ácido pero un PSI de 7.3 (algo elevado), luego hasta los 23 cm de profundidad aumenta el pH a 8,4 y PSI 1.8, esta variabilidad se observa en el resto del perfil. Se destaca, sin embargo, que los cationes en general se encuentran en niveles entre bajos a medios con excepción del Mg, siendo la saturación de bases elevada. Esta variabilidad podría ser explicada por cambios en el régimen del agua en los suelos con precipitación de sales en períodos más secos y/o por materiales originales que difieren en su litología (discontinuidades litológicas). Es no salino, sin CaCO₃, y moderado contenido de materia orgánica. Este suelo ha evolucionado en un contexto de rocas superficiales constituidas por areniscas (sedimentarias), se observó el 11 de marzo del 2003 en un clima Templado subhúmedo C(w0) (w), cuando por la fecha no son comunes las lluvias (INEGI, 2008), presentando cierta humedad en una temporada aparentemente seca, en una altitud de 2065 msnm en un relieve local fuertemente ondulado.



Imagen 12 Perfil 7 Phaeozem

Perfil	Horizontes	Profundidad (cm)		Horizonte	pH	CE	K+	Ca+2	Na+	Mg+2	CaCO3 %	MO* %	CIC cmol/K g	SB %	PSI*	Color en campo	Arcilla <.002mm (%)	
Phaeozem 3	Endoléptico	0	22	Ap1	Mólico	6.7	2.0	0.7	6.1	0.9	1.7	0	1.21	17.40	54.0	5.2	10YR3/2	22
		22	28	A2	Ócrico	6.6	2.0	1.1	9.9	1.4	2.6	0	0.69	24.30	61.7	5.8	10YR4/2	38
		28	55	B1	Cámbico	7.0	2.0	1.6	12.1	1.7	3.0	0	0.69	32.70	56.3	5.2	10YR3/3	42
		55		R	Sin valor	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.00	0.00	0.0	0.0	N/A	0
Phaeozem 4	Endoléptico Húmico	0	23	A1	Mólico	5.4	0.3	1.7	11.3	0.1	2.8	0	4.655	24.1	65.6	0.415	10YR2/1	32
		23	58	B1	Cámbico	5.2	0	0.6	7	0.2	2.2	0	0.862	39.9	24.8	0.501	7.5YR3/2	24
		58	96	C1	Sin valor	5.4	0	0.8	8.4	0.2	3	0	0.345	18.2	67.9	1.099	7.5YR3/3	28
		96		R	Sin valor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	0
Phaeozem 7	Endoléptico Esquelético	0	3	A1	Mólico	6.2	0.0	3.9	17.0	2.6	9.4	0	0.69	35.60	92.4	7.3	10YR3/2	33
		3	21	A2	Mólico	8.4	0.3	0.9	8.1	0.3	4.3	0	2.07	17.00	80.0	1.8	10YR3/3	33
		21	39	A2	Mólico	6.3	0.0	1.1	8.0	0.5	4.7	0	1.21	16.70	85.6	3.0	10YR3/2	27
		39	71	B1	Ócrico	6.3	0.0	1.8	9.2	0.7	6.8	0	0.52	16.00	100.0	4.4	10YR3/2	31

Tabla 5 Características principales de los perfiles edáficos del grupo Phaeozem.

Leptosol_. De un total de 8 perfiles de *Leptosol* se analizaron dos perfiles indicados como *perfil 6 Leptosol* y *perfil 7 Leptosol*. Se aprecia que los perfiles *Leptosol* analizados presentan muy escaso desarrollo con la roca a muy escasa profundidad, sin salinidad ni alcalinidad, ni rasgo de hidromorfismo. Es de destacar el contenido de materia orgánica que aun en el clima en que se desarrollan resulta entre moderada a alta. Como se indicó, el clima no se corresponde con la humedad de estos suelos, dado que las lluvias se producen en verano y son muy escasas en invierno. Puede estimarse que, en la fecha de observación del perfil, la humedad sea debida a influencias de suelos más húmedos y/o texturas que han

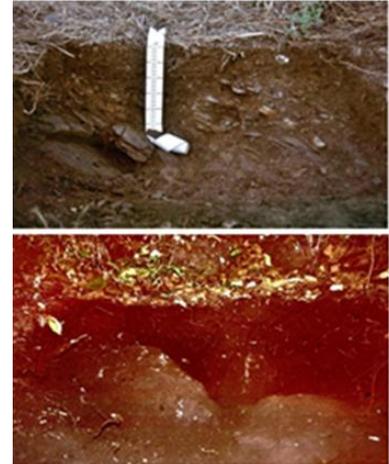


Imagen 13 perfiles de suelo Leptosol.

retenido una lluvia ocasional. El contexto de vegetación primaria en los perfiles *Leptosol* son los siguientes tipos de vegetación: Selva Baja Caducifolia, Bosque de Encino, Bosque de Encino-Pino, Matorral Subtropical y Bosque de Pino (SEMARNAT, 2003).

El *perfil 6 Leptosol* es un suelo muy escasamente profundo y desarrollado, la roca se encuentra a 22 cm, de textura franco arcilloso-arenosa, es un suelo no alcalino con un pH de 6.4 y bajo PSI, no salino, con escasa presencia de CaCO_3 que determina una saturación de 100 % de bases, y un contenido rico en materia orgánica. Este perfil ha evolucionado en un contexto superficial de basaltos y andesitas (Ferrari *et al.*, 2018), se observó el 13 de marzo de 1972 localizado en un clima *sémicalido- subhúmedo* en un relieve intermedio o ladera de una sierra volcánica rodeada de suelo *Regosol*.

El *perfil 7 Leptosol* (febrero, 1996) es muy poco profundo presentando sólo un horizonte A úmbrico de 12 cm, se describe la presencia de CaCO_3 , aunque no se correspondería con la baja saturación de bases, textura franco-arcillosa, con moderado contenido de materia orgánica, localizado en un contexto superficial de domos silíceos y flujos piroclásticos (Ferrari *et al.*, 2018), clima semicálido subhúmedo habiéndose registrado lluvias durante el verano y sequía en invierno en el periodo en que se estudió este perfil. Consecuentemente la humedad presente en perfil posiblemente no es debida a lluvias recientes. Se localiza en una zona baja a 1 454 msnm de una meseta basáltica con un suelo clasificado como *Phaeozem*.

Perfil	Horizontes	Profundidad (cm)	Horizonte	pH	CE	K+	Ca+2	Na+	Mg+2	CaCO3	MO*	CIC	SB	PSI*	Color en campo	Arcilla	
										%	%	cmol/Kg	%				
Leptosol 6	Mólico	0	Ap1	Mólico	6.40	2.00	1.20	0.00	2.07	0.60	0.20	3.60	16.30	100.00	1.23	10YR3/2	24.00
	Mólico	22	R	N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	N/A	0.00
Leptosol 7	Úmbrico	0	A1	Úmbrico	5.40	1.00	2.30	0.00	3.97	0.60	0.20	2.60	16.20	43.20	1.23	10YR3/3	20.00
	Úmbrico	12	R	N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	N/A	0.00

Tabla 6 Características principales de los perfiles edáficos del grupo Leptosol.

Luvisol. De un total de 24 perfiles de suelo *Luvisol* reportados por el INEGI en el área de estudio, se analizaron 2: el *perfil 8 Luvisol* y *9 Luvisol*. En síntesis, los suelos *luvisol* analizados se caracterizan por estar bien desarrollados dado la presencia del horizonte diagnóstico B argico, aunque de escasa a moderada profundidad debido a la presencia de roca a 60/78 cm. Las texturas varían entre franca, franco-arcillosa a arcillosa, definiendo así drenajes internos de moderado a escaso, y asociados a estas acumulaciones de agua que se visualizan en algunos de los colores observados. Si bien no se han identificado otros rasgos hidromorfismos (manchas, moteados), la presencia de materia orgánica hasta en superficie indica que ha habido depósitos que pueden haberse producido en otras épocas, o que sean debido a aportes de agua que en determinadas posiciones conduce a esta acumulación de materia orgánica. Cabe destacar que la materia orgánica en estos ambientes no llega a horizontes más profundos. Son suelos no salinos, ni alcalinos, solo en un caso hay un aumento del pH en profundidad, que no puede ser claramente asociado a la presencia de agua con sodicidad, ni a la presencia observada en todo el perfil de carbonato de calcio, dado que éste se presentó también con bajos valores de pH. Ambos perfiles se localizan en franjas donde el suelo ha sido clasificado como *Phaeozem* y *Cambisol*, en altitudes elevadas del relieve regional. Llama la atención el contenido de materia orgánica y de carbonatos de calcio en todos los horizontes para ambos perfiles. El contexto de vegetación primaria en todos los perfiles *Luvisol* son: *Bosque de Pino-Encino*, *Matorral Subtropical* y *Pastizal natural* (SEMARNAT, 2003).

El *perfil 8 Luvisol* es un suelo bien desarrollado hasta la regolita que aparece a 78 cm, caracterizado por la presencia de un horizonte B árgico. El perfil presenta una textura franca, con moderado drenaje externo e interno. Presenta un pH ligeramente ácido en superficie y aumenta en profundidad hasta valores de 7.4 el cual puede ser asociado a la presencia de CaCO_3 y un ligero aumento de PSI. Sin embargo, se destaca el elevado contenido de materia orgánica hasta incluso la profundidad donde dicho pH fue registrado (pH 7.4 y MO 4.8 %), y la presencia de carbonato en todo el perfil, no existiendo niveles de Na que varíen significativamente. Consecuentemente, no puede establecerse una relación clara entre pH, MO y PSI. Se observó en noviembre del 2002 en un clima regional que se caracteriza por presentar lluvias en verano (mayo-octubre), ha evolucionado en un contexto superficial de ignimbritas (Ferrari *et al.*, 2018), en un polígono catalogado como *Cambisol-Luvisol*, en un relieve local con pendiente 2%, levemente ondulado. El *perfil 9 Luvisol*, es un suelo bien desarrollado, con presencia de un horizonte B argico de 52 cm de espesor, y con una moderada profundidad, a 0.8 m se encuentra la roca. La textura es fina en todo el perfil dado que prevalece la fracción arcilla (37%), siendo el drenaje interno (permeabilidad) escaso al igual que el externo (escurrimiento), pudiendo conducir a acumulación de agua dependiendo de la precipitación.

Los colores podrían vincularse a condiciones de hidromorfismo. El pH es ligeramente ácido en superficie y aumenta hasta la neutralidad en profundidad (5.5 y 6.8 respectivamente). Al igual que el perfil anterior en todos los horizontes se mide un elevado contenido de materia orgánica, lo cual puede explicar los valores relativamente bajos de pH aun con la presencia de CaCO₃ en todo el perfil. El perfil se observó en noviembre del 2002 en un clima regional que se caracteriza por presentar lluvias en verano, ha evolucionado en un contexto superficial de rocas *ígneas extrusivas ácidas* (INEGI, 2001), localizado en un relieve regional elevado (2268 msnm). El contenido de MO parece inconsistente con el resto de las variables.

Perfil	Horizontes	Profundidad (cm)		Horizonte	pH	CE	K+	Ca+2	Na+	Mg+2	CaCO3 %	MO* %	CIC cmol/K g	SB %	PSI*	Color en campo	Arcilla <.002mm (%)	
Luvisol 8	Endoléptico	0.00	4.00	A1	Ócrico	5	0	2	0	3	2	0	2	18	61	2	10YR3/3	20
	Endoléptico	4.00	33.00	A2	Ócrico	6	0	1	0	1	1	0	3	16	65	3	10YR3/3	22
	Endoléptico	33.00	48.00	B1	Árgico	7	0	0	0	1	1	1	4	17	74	3	10YR2/2	24
	Endoléptico	48.00	74.00	B2	Árgico	7	0	0	0	1	1	1	5	20	77	3	10YR2/2	26
	Endoléptico	74.00	78.00	B3	Árgico	7	0	0	0	0	1	1	5	18	85	4	10YR2/2	28
	Endoléptico	78.00		CR1	Regolita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		N/A	0
Luvisol 9	oléptico Esquelé	0	2	A1	Ócrico	6	0	1	0	2	1	0	4	20	61	1	5YR2.5/3	28
	oléptico Esquelé	2	15	A2	Ócrico	6	0	1	0	1	1	0	3	20	56	1	5YR2.5/3	38
	oléptico Esquelé	15	28	B1	Árgico	6	0	1	0	1	1	0	4	22	61	2	5YR2.5/3	46
	oléptico Esquelé	28	45	B2	Árgico	7	0	1	0	1	1	1	5	25	66	2	5YR3/4	54
	oléptico Esquelé	45	60	B3	Árgico	7	0	0	0	0	1	1	5	26	63	2	5YR3/3	56
	oléptico Esquelé	60		R	N												N/A	0

Tabla 7 Características principales de los perfiles Luvisol⁴.

Vertisol. De un total de siete perfiles de suelo *Vertisol* se analizaron *perfil 3 Vertisol* y *perfil 7 Vertisol*, los cuales presentan escaso desarrollo, con elevado contenido de sodio, variable salinidad, y un elevado contenido de arcillas, siendo estas en elevada proporción de tipo expansivas, el drenaje interno resulta restringido, al igual que el externo, debido este último a la ubicación local y regional de estos suelos. Son suelos saturados en bases, por la presencia de carbonato de calcio, y sodio. Si bien no se describen manchas de hidromorfismo, el suelo ha evolucionado con la influencia de superficie freática próxima, lo cual se aprecia por la salinidad, alcalinidad y acumulación de materia orgánica en un clima donde las precipitaciones resultan insuficientes como para generar dichos contenidos. El contexto de vegetación primaria en todos los perfiles *Vertisol* son los siguientes tipos de vegetación: Mezquital, Pastizal natural, Bosque de Pino, Bosque de Encino y Matorral subtropical (SEMARNAT, 2003).

El perfil 3 Vertisol es un suelo muy bien desarrollado habiendo sido estudiado hasta una profundidad de 1.25 m, de textura muy arcillosa (59%), que definen un drenaje interno escaso. Asimismo, el drenaje externo es definido como nulo, por lo cual se ubica en una zona baja plana, elevada alcalinidad, cinco

⁴ En el atributo color en campo, N/A (No aplicable) el INEGI lo indica cuando el valor del atributo Horizonte o Capa es: Roca, Regolita, Petrocálcico, Nivel Freático, Petrodúrico, Petrogípsico, Petrosálico o Petroplíntico.

horizontes A indicando un muy alto contenido de materia orgánica coherente con su posición topográfica localizado en una franja pantanosa a lo largo del lago de Chapala. Es un suelo muy alcalino, salino con un valor de pH en superficie de 7.8 y en profundidad aumenta a valores de 8.5. Presenta un elevado contenido de CaCO_3 . Esto también se asocia a elevados contenidos de agua con acumulación de material vegetal. El complejo de intercambio se encuentra saturado con bases, siendo el sodio el que prevale y contribuye marcadamente en dificultar el drenaje interno. El perfil estudiado en febrero de 1991 se localiza en un contexto de sedimentos lacustres y aluviales (Ferrari *et al.*, 2018) en un polígono clasificado como suelo *Vertisol* en una *llanura aluvial* continua al lago de Chapala y colindante con un vaso lacustre inundable y salino a 1521 msnm (INEGI, 2001); clima templado subhúmedo con lluvias en verano.

El *perfil 7 Vertisol*, es un suelo escasamente desarrollado, sin horizontes diagnóstico hasta la profundidad de 0.6 m donde aparece un horizonte cementado (petrodúrico). Todo el perfil presenta textura muy arcillosa (44%), con excepción de un sector a 38 cm de profundidad de textura más gruesa de 8 cm de espesor con menor contenido de materia orgánica, la cual es muy elevada en todo el perfil. El perfil presenta un drenaje interno escaso al igual que el externo, debido esto último a su posición plana. Es un suelo con salinidad y alcalinidad, que, aunque significativamente inferior a la medida en el *perfil 3*, resulta en un valor suficientemente alto como para contribuir junto con la textura a dificultar la circulación de agua y asociado a esto, acumulaciones de materia orgánica. El pH en superficie es de 5.6 y en profundidad aumenta a valores de 7.6, lo cual puede asociarse a la presencia de CaCO_3 , elevada saturación de bases principalmente sodio y calcio. Situado en laderas de una llanura (2061 msnm) de la presa La Joya, Zapotlanejo, Jalisco, habiéndose desarrolla en un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, ha evolucionado en un contexto de basaltos en un polígono clasificado como suelo Planosol (INEGI, 2001).

Perfil	Horizontes	Profundidad (cm)		Horizonte	pH	CE	K+	Ca+2	Na+	Mg+2	CaCO3	MO*	CIC	SB	PSI *	Color en campo	Arcilla <0.02mm (%)	
		%	%								cmol/kg	%	% Saturación en Sodio					
Vertisol 3	Sódico Húmico	0	25	A1	Vértico	7.8	2.5	1.2	0.0	2.1	10.0	4.4	6.2	21.3	100.0	20.7	10YR3/1	44
	Sódico Húmico	25	50	A2	Vértico	8.3	3.7	1.3	0.0	2.2	5.6	8.1	6.7	22.3	100.0	36.3	10YR3/1	50
	Sódico Húmico	50	75	A3	Vértico	8.5	4.7	3.8	0.0	6.6	2.6	8.4	6.7	19.3	100.0	43.5	10YR2/1	48
	Sódico Húmico	75	100	A4	Vértico	8.5	3.5	2.6	0.0	4.5	2.0	6.9	6.2	18.0	100.0	38.3	10YR3/1	46
	Sódico Húmico	100	125	A5	Vértico	8.5	3.8	2.0	0.0	3.4	1.6	6.6	6.9	15.8	100.0	41.8	7.5YR2/8	48
Vertisol 7	Endopetrodúrico Mázico	0	18	Ap1	Vértico	5.6	1.9	0.6	0.0	1.0	1.2	1.1	7.0	22.4	98.2	4.9	10YR4/2	54
	Endopetrodúrico Mázico	18	38	A2	Vértico	6.7	1.9	0.4	0.0	0.7	1.2	1.3	5.6	21.9	97.7	5.9	10YR4/2	54
	Endopetrodúrico Mázico	38	46	C1	N	7.2	1.9	0.1	0.0	0.2	1.0	1.0	2.6	12.2	94.3	8.2	10YR5/2	22
	Endopetrodúrico Mázico	46	60	C2	N	7.5	1.9	0.1	0.0	0.2	1.5	1.4	7.0	25.9	100.0	5.4	10YR4/2	44
	Endopetrodúrico Mázico	60		Cm1	Petrodúrico												N/A	0

Tabla 8 Características principales de los perfiles vertisol en el área de estudio.⁵

Regosol. De un total de seis perfiles de suelo *Regosol* en el área de estudio, se analizaron *perfil 3 Regosol* y *perfil 5 Regosol*. Puede concluirse para los perfiles *Regosol* analizados que son suelos muy poco desarrollados y profundos, sin salinidad y con alcalinidad variable, con contenido de materia orgánica entre rico a muy rico. Los valores medidos en algunas variables no se corresponden entre sí, pudiendo existir errores de laboratorio. Presentan ligero contenido de CaCO₃, y no presentan rasgos de hidromorfismo. Es de señalar que varios perfiles que el INEGI clasificó como *Regosol* sus coordenadas geográficas coinciden con suelos de otro tipo. El perfil *3 Regosol* reporta valores de CIC incongruentes respecto al contenido de arcilla. El contexto de vegetación primaria en todos los perfiles *Regosol* son: bosque de Encino, bosque de Encino-Pino, bosque de Pino-Encino, Selva Baja Caducifolia y Matorral subtropical (SEMARNAT, 2003).



Imagen 14 Ejemplos de perfiles regosol.

El *perfil 3 Regosol* es un suelo poco desarrollado, y moderada a escasa profundidad dado que a 0.74 m se presenta la roca. El contenido de arcilla es muy bajo en superficie, y moderado en profundidad, destacándose a 20-44 cm un incremento marcado, lo cual revela una discontinuidad litológica. En conjunto se define un drenaje interno moderado, y excesivo externo debido a su localización en una pendiente topográfica. El pH en superficie es de 5.7 y en profundidad aumenta a valores de 7.3, con

⁵ En el atributo color en campo, N/A (No aplicable) el INEGI lo indica cuando el valor del atributo Horizonte o Capa es: Roca, Regolita, Petrocálcico, Nivel Freático, Petrodúrico, Petrogípsico, Petrosáfico o Petroplíntico.

presencia de CaCO₃. Por los valores de PSI que se consignan podría indicarse moderada alcalinidad, no obstante, los contenidos absolutos de Na no son tan elevados. Si bien el contenido de materia orgánica es rico en superficie y moderado subsuperficialmente, esto podría contribuir al valor de CIC; no pareciera que exista una adecuada correspondencia con el contenido de arcilla en el horizonte superficial (8%), pudiendo hablar de un error de laboratorio. La saturación de bases es elevada, y no presenta salinidad. El color no revela condiciones de hidromorfismo. Ha evolucionado en un contexto rocoso de ignimbritas silíceas (Ferrari *et al.*, 2018) dentro de un polígono edáfico *Regosol* localizado en una extensa meseta basáltica con lomerío en Los Altos de Jalisco, se observó el 11 de julio del 2003, en un clima templado subhúmedo con lluvias en verano.

El *perfil 5 Regosol* es un suelo muy poco desarrollado, y somero, a 0.4 m se presenta la roca. Las textura franco-arcillosa, que define un drenaje interno moderado, siendo el externo excesivo. Es un suelo ligeramente ácido, no salino, ni alcalino. Presenta CaCO₃ sólo en superficie. El contenido de materia orgánica es elevado correspondiéndose con el pH reportado. Los valores de CIC registrados



Imagen 15 Perfil Regosol 5.

difieren en forma marcada para igual contenido de materia orgánica y arcilla, lo cual podría deberse a diferencias en los materiales o error de laboratorio. La saturación con base en la presencia de CaCO₃ resultaría elevada, si bien así no ha sido consignada. El suelo ha evolucionado en una extensa meseta basáltica con lomerío en una parte baja (1 830 msnm) de Los Altos de Jalisco en un polígono edáfico clasificado como *Planosol*, observado en noviembre 04 (2002) en un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (mayo-octubre).

Perfil	Horizontes	Profundidad (cm)		Horizonte	pH	CE	K+	Ca+2	Na+	Mg+2	CaCO ₃	MO*	CIC	SB	PSI*	Color en campo	Arcilla <.002mm (%)	
											%	%	cmol/Kg	%				
Regosol 3	Endoléptico Hiposódico	0	20	A1	Ócrico	5.7	0.1	1.7	14.6	1.5	3.0	0.0	86%	24.1	86.2	6.0	7.5YR3/2	8
	Endoléptico Hiposódico	20	44	C1	Sin valor	6.8	0.1	1.0	8.4	0.9	1.8	0.0	69%	12.4	97.5	7.3	7.5YR3.5/2	42
	Endoléptico Hiposódico	44	74	C2	Sin valor	7.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17%	0.0	0.0	0.0	7.5YR3/2	17
	Endoléptico Hiposódico	74	999	R	Sin valor	0.0	0.0	1.7	19.0	0.5	12.0	0.0	0%	38.4	86.5	1.3	N/A	0
Regosol 5	Epiléptico	0.0	8.0	A1	Ócrico	5.8		2.50	4.60	0.30	4.20	0.3	4.2	17.6	65.9	1.70	10YR3.5/3	26
	Epiléptico	8.0	15.0	A2	Ócrico	5.5		2.60	9.50	0.40	4.80	0.4	4.8	30.0	57.7	1.33	10YR3/3	26
	Epiléptico	15.0	27.0	C1		5.4		0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	10YR4.5/4	30	
	Epiléptico	27.0	40.0	C2		0.0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	10YR6.5/4	0	
	Epiléptico	40.0		R		0.0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	N/A	0	

Tabla 9 Características principales de los perfiles Regosol. ⁶

⁶ En el atributo color en campo, N/A (No aplicable) el INEGI lo indica cuando el valor del atributo Horizonte o Capa es: Roca, Regolita, Petrocálcico, Nivel Freático, Petrodúrico, Petrogípsico, Petrosáfico o Petroplíntico.

Fluvisol_. El INEGI sólo reporta un perfil *Fluvisol* en el área de estudio: es un suelo profundo, con horizontes de escaso desarrollo que han evolucionado a partir de diferentes depósitos, reconociéndose estos por la presencia de horizontes enterrados (horizontes ócricos a diferente profundidad). La presencia de materiales originales discontinuos es característica de ámbitos fluviales. Las texturas son principalmente francas y con buen drenaje interno. El drenaje externo es moderado dada su posición en una llanura fluvial. El pH en superficie es de 6.4 con un contenido rico en materia orgánica sólo en superficie, y aumenta en profundidad a pH 8.6, siendo esta alcalinidad atribuible a la presencia de sodio, el PSI aumenta con la profundidad. Si bien se reconoce CaCO_3 moderado en todo el perfil, y contribuye a la alcalinidad medida, los valores de pH que genera dicha sal es algo menor a los valores registrados. El perfil no es salino, y presenta elevada saturación de bases. Respecto al color no revela condiciones de hidromorfismo. El suelo estudiado en octubre del 2002 se localiza en un *lomerío aluvión antiguo* continuo a la margen izquierda del Río Verde (corriente de agua perenne) a la altura del poblado Los Barrenos en el municipio de Teocaltiche, en franjas bajas del relieve regional (1 680 msnm). Prevalece el clima tipo templado subhúmedo con lluvias en verano, en un contexto geológico de sedimentos volcanogénicos, depósitos lacustres rodeado de estructuras volcánicas y tectónicas (Ferrari *et al.*, 2018). Se localiza en un polígono edáfico del INEGI clasificado como grupo *Xerosol*. El contexto de vegetación primaria o natural en el perfil *Fluvisol* el tipo de vegetación es Mezquital (SEMARNAT, 2003).

Perfil	Profundidad (cm)	Horizonte	PH	CE	CO (%)	CaCO ₃	MO *	HCl	K	Ca	Na	Mg	Suma de Bases	CIC	SB	PSI*	PSI	Color en campo	% Arcilla		
Fluvisol	0	5	Ap1	Ócrico	6.4	0.4	2.00	2.80	3.45	4	3	12	0	2	17	22.2	75	1.80	1.7	10YR3.5/3	14
	5	26	A2	Ócrico	7.4	0	0.30	2.20	0.52	4	2	8	1	1	12	15.2	78	4.61	4.6	10YR3.5/3	14
	26	42	C1	N	7.9	0	0.30	3.00	0.52	4	1	10	1	2	14	15.6	91	7.05	7.1	10YR3.5/3	16
	42	55	A1b	Ócrico	8	0	0.30	0.70	0.52	4	1	12	1	2	16	18.0	91	7.78	7.8	10YR3/2	20
	55	70	C1b	N	7.9	0	0.30	1.50	0.52	4	1	11	2	1	15	14.4	100	10.42	10.4	10YR3.5/3	18
	70	95	C2b	N	8.6	0.1	0.20	3.70	0.34	5	1	30	2	2	34	19.2	100	9.37	9.4	10YR4/3	22
	95	106	A1b	Ócrico	8.6	0.1	0.20	3.00	0.34	6	1	30	2	1	34	16.8	100	10.71	10.7	10YR3/2	20
	106	135	C1b	N	8.6	0.1	0.30	2.50	0.52	5	1	26	2	1	29	20.8	100	7.21	7.2	10YR4/4	16

Tabla 10 Características principales del perfil Fluvisol.

Solonetz_. El INEGI sólo reporta un perfil *Solonetz* en el área de estudio: un suelo poco profundo, pero con horizontes bien desarrollados. Se reconoce un horizonte de eluviación máxima E y un horizonte B natrico, pero a 45 cm aparece un C cementado. No obstante, las texturas con moderado a bajo contenido de arcilla (texturas francas), el drenaje interno se define como muy escaso debido a la muy elevada alcalinidad que dispersa y compacta el suelo. El pH en superficie es de 8.2 y en profundidad aumenta a valores de 9.8, con PSI de 50 y 70 respectivamente, asociado a muy alto contenido de Na, sin salinidad ni presencia de CaCO_3 . El contenido de materia orgánica es muy bajo. Presenta colores que revelan hidromorfismo. Se localiza en una llanura aluvial en el distrito de riego de Jalisco al este de la presa de La Vega, en franjas bajas del relieve regional (1 260 msnm), siendo pobremente drenado. Ha evolucionado en un contexto de sedimentos aluviales y lacustres. Se observó noviembre 11 del año 2002, en un clima

de tipo templado subhúmedo. Se localiza en un polígono edáfico del INEGI clasificado como grupo *Phaeozem*. El contexto de vegetación primaria o natural en el perfil *Solonetz* el tipo de vegetación es Selva baja espinosa (SEMARNAT, 2003) y el INEGI registra como mezquital.

Perfil	Profundidad (cm)		Horizonte	PH	CE	CO (%)	CaCO ₃	MO *	HCl	K	Ca	Na	Mg	Suma de Bases	CIC	SB	PSI*	PSI	Color en campo	% Arcilla	
Solonetz	2	12	A1	Ócrico	8.2	0	0.30	0.00	0.52	1	4	0	6	1	10	10.9	100	50.46	50.5	5Y4.5/1	16
	12	25	E	Álbico	9	0.1	0.10	0.00	0.17	1	3	0	8	1	11	10.9	100	70.64	70.6	5Y4.5/1	12
	25	40	B1	Nátrico	9.8	0.9	0.20	0.00	0.34	2	4	0	19	1	24	24.2	100	78.10	78.0	5Y3/1.5	20
	40	45	Cm2	Dúrico																	N/A

Tabla 11 Características principales del perfil Solonetz.⁷

Solonchak_. En el área de estudio el INEGI reporta dos perfiles *Solonchak*. El *perfil Solonchak 1* es un suelo profundo y bien desarrollado, se estudió hasta 125 cm reconociéndose diversos horizontes B, de textura muy arcillosa (>60 %). Esta textura junto al elevadísimo contenido de Na, PSI, y pH, define un drenaje interno muy escaso, que no llega a ser mejorado aun con tan elevada salinidad. El pH es próximo a 10 en todo el perfil, y PSI superior a 100 %. Cabe destacar que estos valores de PSI y los de Na registrados presentan errores de registro, no obstante, la alcalinidad es sin duda extremadamente alta. La salinidad es muy alta en todo el perfil. No se registró CaCO₃. Respecto al contenido de materia orgánica presenta contenido medio a bajo en todo el perfil, lo cual no se corresponde con los otros valores comentados, pudiendo haber algún error de registro o medición. Los colores en profundidad son característicos de ambiente hidromórfico. El suelo está localizado a 1 307 msnm en la Laguna de Sayula, Jalisco, registrado topográficamente como *vaso lacustre salino*, evolucionado en un contexto de sedimentos aluviales y lacustres (Ferrari *et al.*, 2018), se observó en abril, 2003 en un clima semiseco templado con lluvias en verano. Se localiza en un polígono edáfico del INEGI clasificado como grupo *Regosol*.

El *perfil Solonchak 2* es un suelo profundo con escaso desarrollo, presenta horizonte A y C, habiendo sido estudiado hasta una profundidad de 125 cm. Las texturas varían entre muy arcilloso en superficie a textura franca a franco arcillosas, lo cual indicaría la existencia de materiales de diferente origen. El drenaje interno es muy escaso y se corresponde con la muy elevada alcalinidad con pH próximos a 9.5 en todo el perfil y PSI hasta del 100%. Si bien, como en otras ocasiones se indica parecieran que existen errores de medición o cálculo, igualmente, la alcalinidad es indudablemente extrema y revela condiciones de elevado hidromorfismo, lo cual se aprecia también en el desarrollo de colores *gley*. Asimismo, es un suelo muy salino y con CaCO₃. En superficie presenta un contenido elevado de materia orgánica que no se correspondería a priori con las características extremas de alcalinidad, salinidad, pH; sin embargo, podría

⁷ En el atributo color en campo, N/A (No aplicable) el INEGI lo indica cuando el valor del atributo Horizonte o Capa es: Roca, Regolita, Petrocálcico, Nivel Freático, Petrodúrico, Petrogipsico, Petrosálico o Petroplíntico.

ser debido a la presencia de algún tipo de vegetación muy resistente a dichas condiciones y un ambiente que se mantiene muy húmedo o mojado. Este suelo ha evolucionado en un contexto de sedimentos aluviales y lacustres (Ferrari *et al.*, 2018) en una zona baja del área de estudio (1 351 msnm) en una *llanura-vaso lacustre salino*, en un *suelo aluvial* entre las lagunas de Atotonilco y San Marcos, Jalisco, se observó en marzo (1972) en un clima semiseco templado con lluvias en verano. Se localiza en un polígono edáfico del INEGI clasificado como grupo *Solonchak*. El contexto de vegetación primaria en todos los perfiles *Solonchak* son: cuerpo de agua y vegetación halófila (SEMARNAT, 2003).

Perfil	Profundidad (cm)	Horizonte	PH	CE	CO (%)	CaCO3	MO *	HCl	K	Ca	Na	Mg	Suma de Bases	CIC	SB	PSI*	PSI	Color en campo	% Arcilla		
Solonchak 1	0	3	A1	Sálico	10.3	13.6	0.60	0.00	1.03	6	11	10	100	2	123	82.3	100	121.51	100.0	7.5YR4/4	44
	3	6	A2	Sálico	10.5	11.5	0.60	0.00	1.03	6	9	14	100	2	124	71.2	100	140.45	100.0	7.5YR3/2	50
	6	26	B1	Sálico	10.5	11.7	0.60	0.00	1.03	5	8	13	100	2	123	78.9	100	126.74	100.0	10YR5/2	58
	26	45	B2	Sálico	10.5	14.9	0.80	0.00	1.38	3	9	14	100	2	125	60.5	100	165.29	100.0	10YR4/1.5	62
	45	70	B3	Sálico	10.5	15.2	0.80	0.00	1.38	3	4	13	100	2	120	61.2	100	163.40	100.0	10YR5/2	64
	70	95	B4	Sálico	10.5	13.9	1.00	0.00	1.72	3	5	13	100	2	119	67.9	100	147.28	100.0	2.5Y4.5/1.5	64
	95	112	B5	Sálico	10.5	13.3	1.20	0.00	2.07	3	4	14	100	2	120	82.8	100	120.77	100.0	5Y4.5/2	64
112	125	C1	N	10.6	6.8	0.40	0.00	0.69	5	12	14	88	1	116	70.0	100	126.29	100.0	GLE Y1 4.5/10GY	68	
Solonchak 2	0	9	A1	Sálico	9.6	15.4	1.20	1.00	2.07	3	5	7	20	0	32	22.7	100	86.34	86.3	10YR5/1	32
	9	80	A2	Sálico	10	18.6	2.50	15.00	4.31	5	5	7	22	1	34	25.5	100	87.84	87.8	10YR6/1	36
	80	108	C1	Sálico	9.8	14.1	0.60	17.00	1.03	5	4	6	23	1	33	24.5	100	91.84	91.8	N/A	28
	108	125	C2	Sálico	9.8	8.4	0.50	4.20	0.86	5	3	7	21	1	32	31.8	99	66.35	66.4	N/A	24

Tabla 12 Características principales de perfiles Solonchak.⁸

Planosol. De los 9 perfiles *Planosol* que el INEGI reporta en el área de estudio se seleccionaron tres para su análisis: el *perfil 1 Planosol* es un suelo bien desarrollado con horizonte álbico y B árgico, pero poco profundo, a 55 cm, se encuentra un horizonte C petrodúrico. Las texturas son muy arcillosas y corresponde con el escaso drenaje interno. Asimismo, este drenaje se vincula con la alcalinidad que aumenta en profundidad, si bien en superficie el pH es bajo y el PSI moderado. No presenta salinidad ni CaCO₃. El contenido de materia orgánica es bajo y no permitiría explicar el bajo pH superficial, tal vez este último sea debido a condiciones de saturación agua de en superficie, si bien el suelo presenta marcadas condiciones de endosaturación por una superficie freática. Se destaca también, que no hay correspondencia entre los valores de arcilla y CIC, debiendo haber algún error y esto conducir a otras inconsistencias en los valores e interpretaciones. No obstante, la alcalinidad es lo que caracteriza este suelo y la presencia del E confirma su desarrollo en condiciones hidromórficas. Este suelo se observó octubre 30 (2002) en un clima tipo templado subhúmedo con lluvias en verano, ha evolucionado en un contexto rocoso de depósitos lacustre y clástico, en una elevación intermedia (1862 msnm) del relieve regional en una meseta basáltica de Los Altos de Jalisco (Valle de Guadalupe, Jalisco), inmerso en un mosaico edáfico donde predomina el *Phaeozem*.

⁸ En el atributo color en campo, N/A (No aplicable) el INEGI lo indica cuando el valor del atributo Horizonte o Capa es: Roca, Regolita, Petrocálcico, Nivel Freático, Petrodúrico, Petrogípsico, Petrosálico o Petroplíntico.

El *perfil 2 Planosol* es un suelo bien desarrollado con un horizonte E y un B, pero escaso desarrollo de 59 cm. Las texturas son muy arcillosas que determinan un drenaje escaso y se vincula también a una moderada alcalinidad medida en PSI con valores variables de Na, aunque el pH en superficie es de 6.6 y en profundidad aumenta a 7.9 con presencia de CaCO₃. Presenta salinidad moderada en todo el perfil. El contenido de materia orgánica es bajo, no obstante, es un ambiente que podría indicarse con hidromorfismo por tiempo prolongado, dada la presencia de un horizonte E, y contenido de sales. Se destaca que no resultan consistentes los valores de CIC con los de arcilla, siendo factible errores de registro o medición. Este perfil se observó septiembre 25 (1993) en un clima de tipo seco o semi-árido con lluvias en verano, ha evolucionado en un contexto rocoso de flujos volcánicos de basaltos, en una elevación intermedia (1974 msnm) localizado en una *meseta basáltica con lomeríos*, en Los Altos de Jalisco (Unión de San Antonio, Jalisco). Se localiza en un polígono edáfico del INEGI clasificado como grupo *Planosol*.

El *perfil 3 Planosol* es un suelo bien desarrollado con horizonte álbico y árgico, y moderada a escasa profundidad, a 70 cm se encuentra un horizonte petrodúrico. La textura es muy arcillosa y no se corresponde con el drenaje que se consigna (drenado), los contenidos de arcilla no permiten una adecuada circulación de agua y aire. Asimismo, la presencia de un horizonte E álbico, revela condición de hidromorfismo y restricciones en el drenaje. El pH es próximo a 7 en todo el perfil y se asocia con la presencia de CaCO₃. La alcalinidad es moderada, pero se aprecia que no hay correspondencia con otros valores. Se destaca los bajos valores de CIC y alto contenido de arcilla, debiendo existir aquí algún error de registro o medición. No presenta salinidad. Presenta muy bajo contenido de materia orgánica, que al igual que lo indicado en perfil anterior, no es tan fácilmente explicado en presencia de un horizonte E; sin embargo, podría ser debido al momento en que se efectuó el estudio del perfil. El perfil ha evolucionado en un contexto rocoso de flujos de lava basáltica y volcanes de escudo, se observó en diciembre 01 (1971) en un clima de tipo Templado subhúmedo con lluvias en verano, localizado en una altitud intermedia (1958 msnm) en una llanura en el municipio de San Miguel El Alto, Jalisco. Se localiza en un polígono edáfico del INEGI clasificado como grupo *Phaeoem* rodeado de polígonos *Planosol*.

El contexto de vegetación primaria en todos los perfiles *Planosol* son: pastizal natural, matorral subtropical, cuerpo de agua y bosque de encino (SEMARNAT, 2003); sólo se publica un perfil clasificado por el INEGI como del grupo *Calcisol* localizado en un polígono clasificado como *Kastañozem*, en un clima cálido semicálido.

Perfiles	Profundidad (cm)		Horizonte		PH	CE	CO (%)	CaCO3	MO *	HCl	K	Ca	Na	Mg	Suma de Bases	CIC	SB	PSI*	PSI	Color en campo	% Arcilla	Drenaje Externo	Drenaje Interno
Planosol 1	0	7	A1	Mólico	5.60	0.10	0.80	0	1.38	1	0.80	4.00	0.40	1.70	6.90	10.00	68.70	4.0	3.6	7.5YR3/2	54	Escaso	Escaso
	7	19	A2	Mólico	6.40	0.00	0.60	0	1.03	1	1.00	4.20	0.60	1.80	7.60	9.50	79.20	6.3	5.8	7.5YR3/2	50	Escaso	Escaso
	19	27	E	Álbico	7.10	0.00	0.40	0	0.69	1	0.60	2.50	0.60	0.90	4.60	5.60	82.90	10.7	11.3	10YR5.5/2	52	Escaso	Escaso
	27	43	B1	Árgico	7.90	0.10	0.50	0	0.86	1	3.60	10.70	3.20	4.40	21.90	21.60	100.00	14.8	14.8	7.5YR3/1	32	Escaso	Escaso
	43	46	C1	N	8.30	0.20	0.20	0	0.34	1	3.70	10.50	3.30	4.60	22.10	24.00	92.20	13.7	13.8	7.5YR4/2	40	Escaso	Escaso
46	55	Cm1	Petrodúrico	8.60	0.10	0.00	0	0.00	1	3.20	8.80	2.80	4.00	18.80	16.40	100.00	17.1	17.2	N/A	52	Escaso	Escaso	
Planosol 2	0	15	A1	Ócrico	6.6	2	0.7	0	1.21	1	0.8	4.6	0.3	0.8	6.5	8.8	73.9	3.4	3.4	10YR3/2	54	Escaso	Drenado
	15	21	E	Álbico	7	2	0.3	0	0.52	1	0.8	3.1	0.4	0.6	4.9	4	100	10.0	10	10YR4/2	50	Escaso	Drenado
	21	44	A1b	Vértico	7.6	2	0.2	0	0.34	1	4.2	18.7	3	3.1	29	31.1	93.2	9.6	9.6	10YR2/2	28	Escaso	Drenado
	44	59	CB	N	7.9	2	0.2	0	0.34	1	3.7	17.4	3.3	2.9	27.3	30.5	89.5	10.8	10.8	10YR3/3	28	Escaso	Drenado
	59	999	R	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	0	Muy Escaso	Drenado
Planosol 3	0	15	A1	Ócrico	6.7	2	0.4	0	0.69	1	0.6	4	0.3	0.6	5.5	6.8	80.9	4.4	4.4	7.5YR6/2	54	Drenado	Moderado
	15	21	E	Álbico	6.9	2	0.2	0	0.34	1	0.6	3	0.5	0.5	4.6	5.3	86.8	9.4	9.4	10YR7/1	58	Drenado	Moderado
	21	36	B1	Árgico	7	2	0.3	0	0.52	1	2.4	4.3	1	1.9	9.6	15.8	60.8	6.3	6.3	10YR3/2	34	Drenado	Moderado
	36	70	C1	N	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10YR8/2	0	Drenado	Moderado
	70	999	Cm1	Petrodúrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	0	Drenado

Tabla 13 Características principales de perfiles Planosol.

Contexto de la vegetación. - En la década de los 70's y 80's, en el área de estudio se registraban 18 tipos de vegetación primarias "naturales", es decir, que no han sido cultivados y/o inducidos por el ser humano. El 10% del territorio estaba cubierto por vegetación "no natural", dominada por pastizal inducido o cultivado y el 2.6% era ocupado por cuerpos de agua sin distinción de ser natural o artificial (INEGI, 1980). El 57% del área de estudio, era ocupada por bosques, pastizales y matorrales; casi la mitad de la vegetación eran bosques de encino y pino-encino (INEGI, 1980). INEGI (2015), reporta tipos de vegetación secundaria, como es el caso de *Vegetación Secundaria Arbustiva de Selva Mediana Sub-caducifolia* que no se presenta como vegetación primaria, esto significa que la *Selva Mediana Subcaducifolia* se está regenerando de forma natural. Este detalle de clasificación de sucesión vegetal no se registraba en la Serie I, a la escala de 1: 250 000 INEGI (1980). Sin embargo, para una caracterización hidrogeológica regional, es indiferente esta diferenciación del grado de sucesión de la vegetación.

Tipo de vegetación "original"	Área
Bosque de pino-encino	14.78%
Pastizal natural	10.34%
Selva baja caducifolia	10.16%
Bosque de encino	9.16%
Matorral subtropical	7.46%
Matorral crasicaule	4.32%
Pastizal - huizachal	1.08%

Tabla 14 Tipos de vegetación "natural" (INEGI, 1980).

Para efectos de análisis de la fase subterránea del agua, es conveniente especificar el tipo de agricultura de acuerdo con el suministro de agua que requiere. En la década de los 80's, el 29% del área de estudio se destinaba para la agricultura, del total, el 22.86% era de temporal, es decir, terrenos dónde los cultivos dependen del agua de lluvia, independientemente de la duración de sus cultivos; 6.17% era por riego, es decir, de agua que se extrae de pozos, presas y/o ríos; menos del 1% es clasificada como *agricultura de humedad* que aprovecha exclusivamente la humedad del suelo

Usos de suelo	Área de estudio
Agricultura de temporal	22.67%
Agricultura de riego	6.17%
Agricultura de humedad	0.48%
Agricultura de riego eventual	0.07%
Zona urbana	0.31%

Tabla 15 Tipos de agricultura y zonas urbanas (INEGI, 1989).

independientemente de la lluvia; y 0.31% era zona urbana (INEGI, 1980). A continuación, se describen los tipos de vegetación y uso de suelo que caracterizaba al área de estudio (INEGI, 1980). Los tipos de vegetación se componen por diversas especies de plantas, de las cuales algunas fueron identificadas como especies relacionadas con agua subterránea o freatofitas, de acuerdo con lo publicado por Meinser (1927) y Robinson (1958) que incluye una lista de 74 especies.

Bosque de Encino_. Esta comunidad se conforma por diferentes especies de Encino o Roble del género *Quercus*, que son parte de las 200 especies identificadas en México. El tipo de Vegetación Bosque de Encino se integra principalmente por: encino laurelillo (*Quercus laurina*), encino nopis (*Q. magnoliifolia*), encino blanco (*Q. candicans*), roble (*Q. crassifolia*), encino quebracho (*Q. rugosa*), encino tesmolillo (*Q. crassipes*), encino cucharo (*Q. urbanii*), charrasquillo (*Q. microphylla*), encino colorado (*Q. castanea*), encino prieto (*Q. laeta*), laurelillo (*Q. mexicana*), *Q. glaucoides*, y *Q. scytophylla*. En lugares de zona tropical se tiene el *Quercus oleoides* (INEGI, 1980, 2015). Su presencia se considera una transición entre bosque de coníferas, y de selva; se manifiestan desde los 4 hasta los 30 m de altura más, son menos abiertos o muy densos, y se desarrollan en muy diversas condiciones ecosistémicas, desde casi el nivel del mar hasta los 3 000 msnm.

De acuerdo con Meinser (1927) las especies de árbol del género *Quercus* difieren en gran medida por su relación con el agua. De las especies señaladas en el área de estudio, ninguna se menciona en la publicación de Meinzer (1927) o Robinson (1958) y sólo hace referencia a tres especies de encino (*Quercus douglasii*, *Quercus agrifolia* y *Quercus lobata*) estudiados en las planicies centrales de California (EUA), donde se encontró que la especie *Quercus douglasii* crece en zonas donde el agua subterránea no aflora. La especie *Quercus agrifolia* conocida en México como Encino verde se ha identificado en suelos donde el nivel del agua subterránea está a 10 m o más por debajo de la superficie del terreno; mientras que la especie *Quercus Lobata* comúnmente conocido como Roble o Encino del Valle depende estrictamente del agua subterránea.

Matorral subtropical_. Este matorral es una comunidad formada por arbustos o árboles bajos, inermes o espinosos que se desarrolla en una amplia franja de transición ecológica entre la Selva Baja Caducifolia y los bosques templados (de Encino o Pino-Encino) y matorrales de zonas áridas y semiáridas principalmente en la Faja Volcánica Transmexicana y en la Sierra Madre del Sur. La mayor parte de las plantas que lo constituyen pierden su follaje durante un periodo prolongado del año. Las principales especies registradas son: *Ipomoea spp.* (Cazahuates), *Bursera spp.* (Copales, Papelillos), *Eysenhardtia polystachya* (Vara dulce), *Acacia pennatula* (Tepame), *Forestiera sp.* (Acebuche), *Erythrina spp.* (Colorín), entre los más importantes. El Matorral subtropical es una de las 14 comunidades que conforman la

vegetación Matorral que en la década de los 80's cubría el 40% del territorio nacional. El INEGI (1980) en la cartografía impresa representa los tipos de vegetación con diferente color con base en las determinantes de precipitación, temperatura ambiental y comunidad vegetal, se considera al matorral como la comunidad vegetal más xerófila. El matorral se localiza en condiciones anuales de temperatura más o menos altas y baja precipitación, y se representan con colores que van desde amarillo al anaranjado (INEGI, 1989, pág. 33).

Selva Baja Caducifolia_. La selva Baja Caducifolia se extiende en gran parte del territorio nacional (3.38%), es uno de los tipos de Selva Seca, el adjetivo de Baja es porque su altura no es mayor a los 15 m, y el nombre de Caducifolia, porque más del 75% de las especies pierden sus hojas. De la gran cantidad de especies que la integran, las siguientes son las caracterizadas por Meinser (1927):

- *Prosopis* (mezquite), es común hallar mezquite en franjas con nivel freático que oscila entre 3 m, o menos, hasta los 15 m o más de profundidad. Probablemente el mezquite que crece en zonas con nivel freático mayor a 15 m no envía sus raíces hasta el agua subterránea.
- *Cercidium floridum* (palo verde azul), es una especie muy común en la selva baja caducifolia, de acuerdo con Robinson (1958) es una planta freatofita que crece en llanuras aluviales con pastizal y en cañadas.

De acuerdo con Meinzer (1927) los mezquites en conjunto con ciertas especies de Acacias, también conocidas como *Vachallia*, forman asociaciones o sistemas, y son plantas indicadoras de presencia de agua subterránea, tales como: *Prosopis juliflora*, *Prosopis velutina*, *Acacia greggii* y *Acacia constricta* (Huizache). El sistema de acacia y mezquite como indicador de presencia de agua subterránea se debe a las características y funcionamiento de sus raíces, las cuales pueden desarrollarse en profundidad y de forma muy extendida en superficie, lo cual les permite en caso de poca humedad en el suelo alcanzar fuentes profundas y constantes de agua. Las suculentas son especies frecuentes en la Selva Baja Caducifolia, especialmente los géneros *Agave*, *Opuntia*, *Stenocereus* y *Cephalocereus* (INEGI, 1980).

En el desarrollo de climas cálidos subhúmedos, semi-secos o sub-secos, el más común es el clima tropical subhúmedo con lluvias en verano (Aw), aunque también se presenta clima seco (BS) y clima templado húmedo con estación invernal seca (Cw). En general, el INEGI (1980, 2015) caracteriza el clima de selva baja caducifolia con temperatura anual superior a 20 °C, con precipitación anual de 600 a 1200 mm con una temporada seca bien marcada que puede durar 7-8 meses.

Pastizal-Huizachal_. El INEGI (1980) describe a esta comunidad vegetal como asociación de especies *graminoides* (pastos) y *Acacia schaffneri* (Huizache chino) que se desarrolla en terreno plano o con poca pendiente, en sitios al occidente del área de estudio, sitios donde se dan condiciones de mayor cantidad

de luz y de temperatura. Esta comunidad se encuentra en contacto con pastizal natural, pero difiere de él por su fisonomía, ya que es de tipo sabana y tiene presencia de elementos subtropicales; limita, además, con el matorral crasicaule y con matorral subtropical. Rzedowski (2006), describe que en la zona de Los Altos de Jalisco hay presencia de zacatales o pastizal en el contexto de depósito volcánico con suelo salino que llega a ser alcalino en fondos de cuencas cerradas en climas áridos y semi-áridos.

Bosque de Pino-Encino_. Este bosque es una comunidad característica de las montañas de la Faja Volcánica Transmexicana conformada por especies del género pino (*Pinus spp.*) y encino (*Quercus spp.*). Las especies más comunes son pino chino (*Pinus leiophylla*), pino (*P. hartwegii*), ocote blanco (*P. montezumae*), pino lacio (*P. pseudostrobus*), pino (*P. rudis*), pino escobetón (*P. devoniana*, *P. michoacana*), pino chino (*P. teocote*), ocote trompillo (*P. oocarpa*), pino ayacahuite (*P. ayacahuite*), pino (*P. pringlei*), *P. duranguensis*, *P. chihuahuana*, *P. engelmannii*, *P. lawsoni*, *P. oaxacana* y las especies de encino señaladas en la vegetación Bosque de Encino. INEGI (1980, 2015). Meinser (1927), menciona la especie *Pinus Flexilis* como planta que habitualmente crece en zonas con agua subterránea somera y/o en aquellas donde la profundidad del nivel freático es considerable. En México el *pinus flexilis* se conoce como Pino Torcido. Los Altos de Jalisco originalmente contenían bosques de pino y encino que en la actualidad es sustituida por extensos pastizales (CONAGUA, 2020).

Matorral Crasicaule_. Vegetación dominada fisonómicamente por cactáceas grandes con tallo aplanado o cilíndrico que se desarrollan principalmente en zonas áridas y semiáridas del centro y norte del país. Algunas especies comunes son: *Carnegiea gigantea*, *Pachycereus pringlei*, *Opuntia spp.*, *Stenocereus thurberi*. Ésta se asocia comúnmente con Nopaleras, Chollales, Cardonales, Tetecheras, etc. En Jalisco es común una cubierta vegetal de *Opuntia* en las “nopaleras”, las especies dominantes son: *Opuntia streptacantha* y *O. leucotricha*. De acuerdo con INEGI (2015), el matorral crasicaule se caracteriza en ser integrado por el mezquite (*prosopis sp.*), indicando que el *prosopis* convive con especies de *Mimosa spp.*, *Acacia spp.*, *Dalea spp.*, *Rhus spp.*, *Larrea sp.*, *Brickelia sp.*, *Eupatorium sp.*, *Buddleia sp.*, *Celtis sp.*, etc.

Mezquital/Bosque de Mezquite_. Para el INEGI (1980), la comunidad vegetal dominada mezquite (*Prosopis spp.*) incluye árboles espinosos de 5 a 10 m de altura en condiciones de humedad; pero en condiciones de aridez crece como arbusto. Su crecimiento es frecuente en terreno de suelo profundo y en aluvión cercano a escorrentía. Es común encontrar esta comunidad mezclada con elementos como huizache (*Acacia spp.*), palo fierro (*Olneya tesota*), palo verde (*Cercidium spp.*) y guamúchil (*Pithecellobium dulce*). Tipo de vegetación que el INEGI (2015) describe como “Comunidad arbórea con especies de *Prosopis* que se desarrolla en suelo aluvial de fondo de valle y depresiones en planicies, donde la superficie freática se mantiene a poca profundidad, siendo común a lo largo de arroyos y ríos

intermitentes en regiones semiáridas (...). Meinzer (1927) señala que la estructura general del mezquite es de una planta xerofita, considerada como una planta desértica, pero con alto requerimiento de agua, al interior almacena gran cantidad de agua. Los Mezquites se caracterizan por raíces (de 9 m) de profundidad y bien desarrolladas, son clasificados como freátofita (Robinson, 1958).

Bosque Mesófilo de Montaña_. De acuerdo con el INEGI (1980), este bosque es vegetación fisonómicamente densa propia de laderas montañosas encontrándose protegida de fuertes vientos y de excesiva insolación donde se forman neblinas durante casi todo el año, también crece en barrancas y otros sitios resguardados en condiciones más favorables de humedad. En el bosque mesófilo es notable la mezcla de elementos arbóreos con alturas de 10 a 25 m o mayores, es denso y la mayoría de sus componentes son de hoja perenne, también se encuentran árboles caducifolios que en alguna época del año tiran sus hojas, es común la presencia de plantas trepadoras y epífitas debido a la alta humedad atmosférica y abundante lluvia. Generalmente se encuentran entre los 800 y 2400 msnm. Por sus características de clima las franjas con esta vegetación son utilizadas en agricultura de temporal.

Las especies más comunes que lo conforman son: micoxcuáhuatl (*Engelhardtia mexicana*), lechillo (*Carpinus caroliniana*), liquidámbar (*Liquidambar styraciflua*), encino, roble (*Quercus* spp.), pino, ocote (*Pinus* spp.), tila (*Ternstroemia pringlei*), jaboncillo (*Clethra* spp.), *Podocarpus* spp., *Styrax* spp., *Chaetoptelea mexicana*, *Junglans* spp., *Dalbergia* spp., *Eugenia* spp., *Ostrya virginiana*, *Meliosma* spp., *Chiranthodendron pentadactylon*, *Prunus* spp., *Matudea trinervia*, Acanthaceae, Rubiaceae, Myrsinaceae, *Archibaccharis* sp., *Celastrus* sp., *Clematis* sp., *Gelsemium* sp., *Parthenocissus* sp., *Philadelphus* sp., *Rhus* sp., *Smilax* sp., *Vitis* sp., y las familias Orchidaceae, *Bromeliaceae*, *Piperaceae* y *Araceae*. Las especies anteriores son sólo algunas de la gran cantidad que pueden conformar a este bosque, de las cuales sólo el encino y roble se han registrado en contacto directo con el agua subterránea. De acuerdo con el INEGI (2015) el bosque mesófilo de montaña suele presentarse “en sustratos de caliza y sobre laderas de cerros andesítico y basáltico, en suelo somero o profundo con abundante materia orgánica en horizontes superiores y generalmente es ácido, es húmedo durante todo el año”.

Bosque de Oyamel_. Este bosque es una comunidad vegetal que puede presentarse sólo por el género *Abies* spp. (Oyamel) o mixto con otras especies: pino u ocote (*Pinus* spp.), encino o roble (*Quercus* spp.) y aile (*Alnus firmifolia*). Se localiza especialmente en sierras y laderas de la Faja Volcánica Transmexicana y “se desarrolla en climas templado y semifrío, húmedos, entre los 2000 a 3600 msnm, con una temperatura media anual de 6 a 18 °C y una precipitación de los 600 a 3000 mm, en una pendiente por arriba del 40% (...) el sustrato predominante es de roca ígnea como andesita y basalto, los suelos son andosoles, leptosoles, cambisoles y acrisoles” (INEGI, 2015). En México, en el bosque de oyamel, también crece la

especie *Alnus* (Aile o Aliso) (INEGI, 2015). De acuerdo con Robinson (1958) la especie *Alnus* es freatófita y se puede localizar a lo largo de arroyos, ríos, tierras bajas, así como otras tierras húmedas.

Tular_. El Tular se integra por plantas clasificadas como acuáticas que crecen en lagunas y lagos de agua dulce o salada y de escasa profundidad, áreas pantanosas, canales y remansos de ríos (INEGI, 1980, 2015).

- *Scirpus*, *Cyperaceae* (*Juncaceae*); Junco, *Juncus* y Tule, *Typha* (*Typhaceae*): tres especies dominantes de la vegetación Tular. Especies que se desarrollan en franjas húmedas producto de aporte superficial y/o subterráneo, no pueden sobrevivir ningún periodo seco. Comúnmente crecen a lo largo de la margen de cuerpos de agua superficial resultado de manantiales y de terrenos donde el nivel freático es somero (Meinzer, 1927).
- *Carrizo Phragmites communis- Poaceae (Gramineae)*. La caña es una planta que se encuentra a lo largo de ríos, riachuelos, franjas de encharcamiento o humedales, así como también en sitios donde no hay agua en la superficie, pero el agua subterránea se haya a poca profundidad. De acuerdo con Ball y Brown citados en Meinzer (1927), la caña es “indicador fiable de agua subterránea a poca profundidad”.
- El Zacatón, es el nombre común que reciben diversas especies de pasto. De acuerdo con Meinzer (1927), el pasto genera asociaciones de gran extensión, por lo que es importante identificar las especies dominantes. Robinson (1958) enlista como freatófita a la especie *Sporobolus wrightii* (Zacatón) que tiene presencia amplia en terrenos áridos donde el agua subterránea es considerable demostrándose su presencia también en suelos con humedad proveniente de la superficie, como la especie *Sporobolus airoides* (zacatón, zacate alcalino).

Pradera de Alta Montaña_. Vegetación que se conforma por comunidades de pocos centímetros de altura, con aspecto cespitoso (Pradera), amacollado (Zacatonal) o arrosado, localizado sólo en las partes altas de las montañas y volcanes más altos de México, desde los 3500 msnm a 4300-4500 msnm (Pico de Orizaba, Sierra Negra, Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, la Malinche, El Nevado de Toluca, El Nevado de Colima, El Tacaná, El Cofre de Perote, El Tancítaro, El Ajusco, El Tláloc y Cerro del Potosí). En general, se desarrolla en suelo “de textura generalmente ligera, reacción algo ácida, contenido elevado de materia orgánica y húmeda durante la mayor parte del año, al menos en las capas profundas. No hay permafrost, pero en las noches se congela con frecuencia la capa superficial” (INEGI, 2015). El INEGI (1980), indica que la pradera de alta montaña se conforma principalmente por especies de gramíneas tales como: *Calamagrostis tolucensis*, *Stipa ichu*, *Festuca amplissima*, *F. livida*, *F. tolucensis*, *Muhlenbergia macroura*, *M. repens*, *M. quadridentata*, *Potentilla candicans*, *Eryngium* spp., *Arenaria bryoides*, *Draba* spp., *Vulpia myuros*, *Deschampsia pringlei*, *Cyperus sesleroides* y *Carex peucophyla*, entre otras.

Pastizal Halófilo_. Pastizal dominado por gramíneas rizomatosas (con tallo subterráneo) y herbáceas suculentas. Se desarrolla en suelo alcalino (salino-sódico) independiente del clima, pero a menudo en terrenos áridos y semi-áridos, en relieve plano y bajo. (INEGI, 1980). Esta comunidad se conforma principalmente por las siguientes especies: *Hilaria mutica*, *Distichlis spicata*, *Sporobolus virginicus*, *Monanochloë Littoralis*, *Spartina spp.* y *Uniola spp.* (INEGI, 1989, 2015). De las especies que coinciden en la publicación de Robinson (1958) la *Distichlis spicata* es mejor conocida en México como Zacate Salado o *Salt Grass* en inglés y *pelo de chancho* en Argentina:

- Zacate salado (*Distichlis spicata*), se considera como una de las plantas más confiables como indicador de agua subterránea que aflora o está a profundidad raramente mayor a 4 m. Se reconoce que, de contar con más información es posible identificar que esta planta también crece dónde se riega con otras fuentes de agua o en suelo arcilloso con humedad importante, pero con nivel freático no definido. Las especies que se asocian con el Zacate salado de acuerdo con el USGS son: Zacate (*Mexican Salt Grass*), *Eragrostis obtusiflora* con niveles freático somero; *Sarcobatus vermiculatus* (Palo de grasa), especie halófila y altamente tolerante a la salinidad, *Chrysothamnus nauseosus*, chamisa o escobilla (Suelo alcalino); *Atriplex torreyi*, *Populus alba* (Poplar, planta halófila), sauces (*Salix*), *Salicornia* (Vidrillo), Romerito (*Suaeda*), *Allenrolfea occidentalis* (Pinacate, Hierba de Burro).

Selva Mediana Subcaducifolia_. Las selvas son comunidades muy complejas por la gran cantidad y diversidad de especies, entre las cuales, los bejucos, lianas, árboles espinosos y plantas epífitas, suelen ser especies dominantes. La clasificación del INEGI (1980, 2015) se rige por “su aspecto fisonómico y secundariamente en su composición florística. Se clasifican de acuerdo con su altura y a la persistencia o caducidad de la hoja durante la época más seca del año, que para la Selva Mediana Subcaducifolia es de 15 a 30 m de altura y que entre el 50 y el 75% de las especies tiran la hoja en la época crítica. Se desarrolla en regiones cálidas subhúmedas con lluvia en verano y con un promedio anual de precipitación de 1000 a 1229 mm) y una temperatura media anual de 25.9 a 26.6°C y con una temporada seca muy bien definida y prolongada (INEGI, 2015). El INEGI (1980), indica que la Selva Mediana Subcaducifolia se localiza entre los 150 y 1250 msnm. Suele desarrollarse donde abundan “rocas basálticas o graníticas y donde hay afloramientos de caliza que dan origen a suelos oscuros, muy someros, con abundante pedregosidad o bien en suelos grisáceos arenosos y profundos. Los valores de pH son francamente ácidos o cercanos a la neutralidad, aunque sin llegar a 7.” (INEGI, 1980).

Pastizal Natural_. De acuerdo con el INEGI (1980, 2015), este pastizal “es una comunidad dominada por especies de gramíneas y gramínoideas, en ocasiones acompañadas por hierbas y arbustos de diferentes familias, como son: compuestas, leguminosas, etcétera.” El noreste de Jalisco forma parte de la franja

continúa más importante de pastizales naturales del país. Este tipo de vegetación, a nivel mundial se describe como una porción de la transición entre la banda de matorrales xerófilos y los bosques. Los suelos propios de estos pastizales en general presentan pH de 6-8, con “textura que varía de migajón arcilloso a migajón arenoso y coloración rojiza a café” (INEGI, 1980). Conformado por las especies del género *Bouteloua* y la más común de todas es *B. gracilis*, *B. curtipendula*, *B. hirsuta*, *B. rothrockii*, *B. radicata*, *B. repens*, *B. eriopoda* y *B. chondrosioides*, *B. eriopoda* y *B. scorpioides*. La dominancia de estas especies varía principalmente por la pendiente y la actividad de pastoreo o por agricultura generalmente de temporal (INEGI, 1989, 2015). El género *Bouteloua* pertenece a la familia de las gramíneas o poáceas. Robinson (1958) menciona a la especie *B. gracilis* (Grama grass o Blue Grama Grass, en inglés), como una de las especies de pasto indicadora de presencia somera de agua subterránea en pastizales donde domina el zacate salado (*Distichlis spicata*), especie de la familia de las gramíneas.

Bosque de Tásate_. Para el INEGI (1980), este bosque está formado por árboles escumifolios (hojas en forma de escama) del género *Juniperus* a los que se les conoce como *tásate*, *enebro* o *cedro*, con una altura promedio de 8 a 15 m que crece en regiones sub-cálidas templadas y semi-frías, y está siempre en contacto con los bosques de encino, pino-encino, selva baja caducifolia y matorral de territorio árido. La especie más común y de mayor distribución es el *Juniperus flaccida*. Otras especies comunes son *J. deppeana*, *J. monosperma* y algunas especies del género *Quercus* y *Pinus*. Este bosque está en contacto con bosques de encino, pino-encino, selva baja caducifolia y matorral de zonas áridas (INEGI, 2015). El *juniperus* es uno de los géneros que puede o no presentarse como freatófita, aunque ciertas especies a veces se presentan con sus raíces cercanas al agua subterránea (Robinson, 1958).

Vegetación Halófila_. Esta vegetación forma parte del grupo del Matorral (INEGI, 1989) y se constituye por comunidades vegetales arbustivas o herbáceas que se desarrollan en suelo con alto contenido de sales en partes bajas de territorios áridos y semiáridos. Vegetación que comúnmente es asociada con suelo salino y cuyas especies más abundantes son: el chamizo (*Atriplex spp.*), romerito (*Suaeda spp.*), hierba reuma (*Frankenia spp.*), alfombrilla (*Abronia maritima*) y lavanda (*Limonium spp.*). Dentro de este tipo de vegetación también se incluye especies capaces de soportar condiciones de suelo con alto contenido de sales solubles como la verdolaga (*Sesuvium spp.*), zacate toboso (*Hilaria spp.*), zacate (*Eragrostis obtusiflora*) y diversos pastos marinos como *Zostera marina* y *Spartina foliosa*, entre otras. Esa vegetación permite asociaciones de *Atriplex spp.*, *Suaeda spp.*, *Batis maritima* (vidrillo), *Frankenia spp.*, entre otras (INEGI, 1980; 2015). Meinzer (1927) y Robinson (1958) presentan especies de vegetación halófila y sus características indicadoras de la presencia inmediata de agua subterránea:

- *Atriplex spp.*, *Atriplex canescens*, Costilla de vaca, chamizo, *Atriplex polycarpa*, Saladillo. Ésta se presenta en suelo seco y alcalino con agua subterránea registrada a profundidad somera
- *Eragrostis obtusiflora*, se identifica dónde el nivel freático es somero en estaciones secas, se presenta sola y/o asociada con mezquite, zacate alcalino (*Sporobolus airoides*), zacate salado (*Distichlis spicata*) y el chamizo
- Especie *Suaeda*, se asocia en comunidades vegetales con dominio de pasto salado
- *Sesuvium verrucosum*, *S. portulacastrum*, verdolaga de playa.

El bosque y pastizal cultivados (inducido, artificial) son tipos de vegetación que se desarrollan en el lugar dónde fue eliminada la vegetación original o natural, principalmente por alguna acción o actividad humana (incendio provocado y/o desmonte).

Pastizal inducido_. Este pastizal se puede generar por incendio, tala y/o desmonte para modificar el uso del suelo. Este pastizal también puede ser una fase de sucesión natural de algún bosque o matorral, que puede ser mantenido en esta fase de sucesión con desmonte o actividad ganadera. En general el pastizal inducido suele presentarse en terrenos dónde existía bosque de *Pinus* y/o *Quercus*, matorral xerófilo, pastizal de Alta Montaña, dependiendo de la altitud topográfica, principalmente.

Bosque cultivado o artificial_. Es principalmente desarrollado para fin recreativo, ornamental y forestal, con normalidad en terrenos donde anteriormente la vegetación original era algún tipo de bosque. Las principales especies plantadas son: pino (*Pinus spp.*), eucalipto (*Eucalyptus spp.*), cedro (*Cupressus spp.*), casuarina (*Casuarina sp.*), pirul (*Schinus mollis*), álamo o chopo (*Populus spp.*), fresno (*Fraxinus sp.*), aíle (*Alnus sp.*), entre otros (INEGI, 1980).

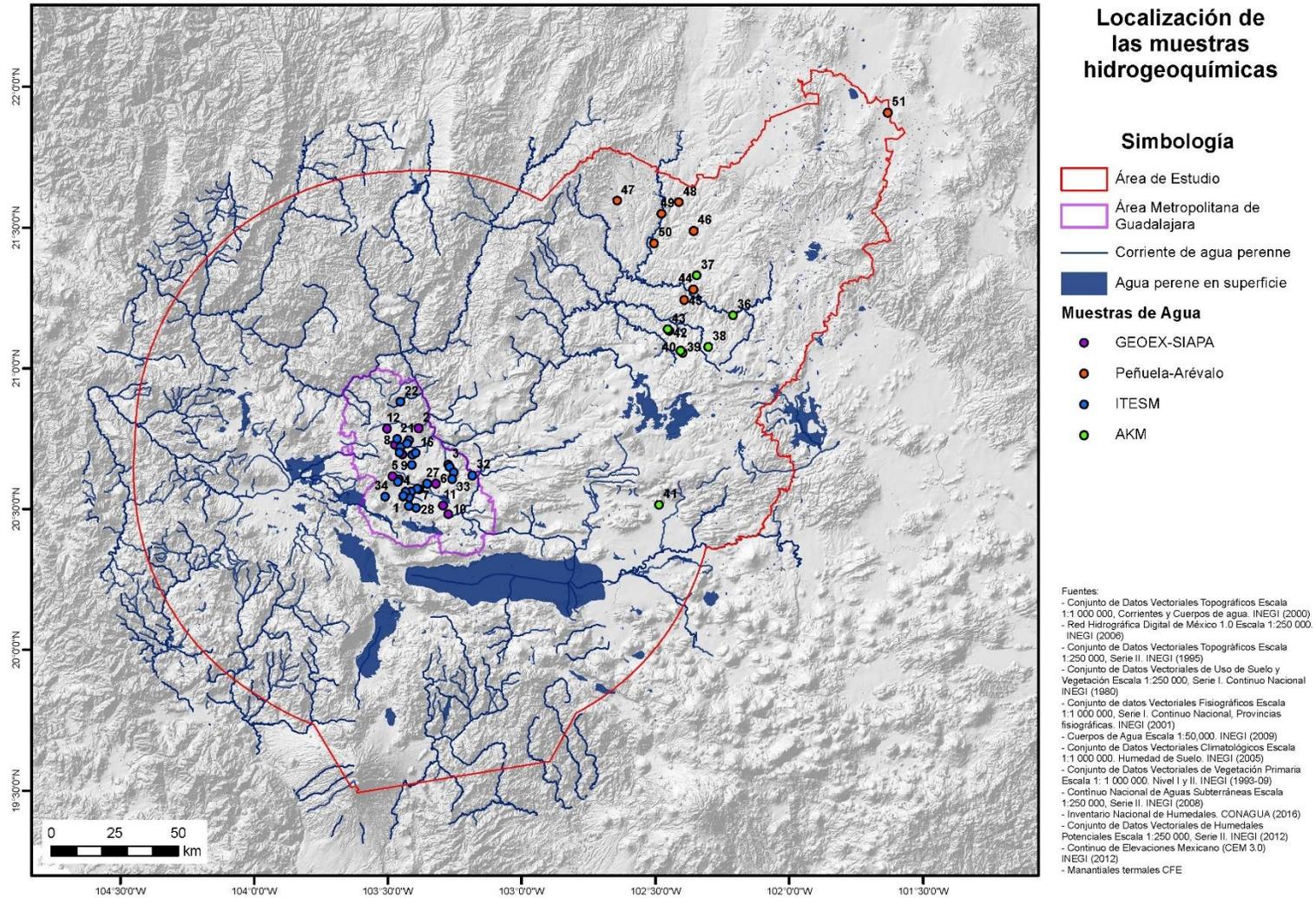
8 Resultados y análisis

8.1 Análisis hidrogeoquímico e isotópico

En 51 muestras con valores de temperatura, pH, sodio, potasio y con una concentración de nitratos <10mg/l y con %E<10 (%E ≤5, 49 muestras; 2 muestras, %E>5; Ver Anexo Tabla 1), se observa:

- Concentración de STD, entre 50-1 897 mg/l y promedio en 461.7 mg/l
- Temperatura, de 21 a 54 °C y promedio 29.6 °C
- pH, de 6.3-9.27
- Oxígeno disuelto, de 1.4-10.1% (34 muestras con data)
- Conductividad eléctrica (μS/cm), de 62 a 2 310 y promedio 549.92 (50 muestras con data)
- Potencial REDOX (Eh), sólo las 8 muestras recolectadas en Los Altos de Jalisco presentan valores de Eh, cuyos valores se registraron directamente en un rango de 18 a 212 mV.

En el mapa 8 las muestras de agua se identifican, como: ID 1-12, obtenidas de GEOEX S.A de C.V. (2003); ID 13-35, de los estudios realizados por el instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey en el 2011 (Hernández, y otros, 2015; Mahlkecht, y otros, 2017); ID 36-43 muestras realizadas en el 2015 para el presente estudio en Los Altos de Jalisco por Alessia Kachadourian y el Dr. Joel Carrillo Rivera; e ID 44-51 de Peñuela Arévalo (2013). A su vez, las muestras identificadas con el ID 1-35 corresponden a muestras en pozos localizados en la Zona Metropolitana de Guadalajara, mientras que las muestras ID 36-51 se recolectaron en pozos en Los Altos de Jalisco, a excepción de la 42 y 43, las cuales corresponden a muestras en el Río Verde en Los Altos de Jalisco y a un manantial en Temacapulín (Cañadas de Obregón, Los Altos de Jalisco), respectivamente.



Mapa 8 Localización de las 51 muestras de agua seleccionadas para el análisis hidrogeoquímico.

En relación con los iones mayoritarios, la mayoría de las muestras presentan concentraciones >5 mg/l para cada respectivo ion mayoritario; 100% de las muestras presentan una concentración >5 mg/l en bicarbonatos, calcio y en silicio (a excepción de las muestras AKM analizadas en los laboratorios de la UNAM que no reportan concentración de Si); sólo una muestra presenta concentración de sodio menor a 5 mg/l; 66% de las muestras con cloruros y sulfatos >5 mg/l y el 44 % con Mg >5 mg/l. Para el caso del boro, el 20% presenta datos dentro del rango natural; sólo las muestras AKM (36-43) reportan valores de CO_3^{2-} ; el total de las muestras reportan una concentración natural de fluoruro; el potasio se presenta en valores naturales para el 68% de las muestras, y el 32% con potasio en un rango de 11-58 mg/l, principalmente en pozos de la Zona Metropolitana de Guadalajara; la concentración del hierro se presenta natural en el 63% de las muestras, 1 muestra con 12.5 mg/l en Los Altos de Jalisco y el resto sin valores reportados; el estroncio con concentraciones naturales (0.01-10 mg/l) en el 74% de las muestras, una muestra (35) reporta <0.01 mg/l y el resto no reporta concentraciones de estroncio.

Analito	Concentración promedio global (mg/l)
Bicarbonato (HCO_3^-)	227
Cloruro (Cl)	25
Sulfato (SO_4)	49
Sodio	60
Calcio	25
Potasio	11
Magnesio	14
Silicato	81

Tabla 16 Concentración iónica promedio global (51 muestras).

Como fue previamente descrito en el apartado del referente geológico, el área de estudio se constituye por rocas ígneas. De acuerdo con Freeze y Cherry (1979), en los sistemas de rocas ígneas (granito, riolita, diorita, andesita, basalto y gabro), el agua subterránea tiene baja concentración iónica, con la excepción del bicarbonato (HCO_3^-), que es ion dominante, los aniones cloruro y sulfato se presentan en baja concentración y el ion SiO_2 está presente con una mayor concentración, el potasio suele ser el ion menos abundante. Estas características de los medios rocosos ígneos se identifican en el área de estudio al calcular la concentración iónica promedio (mg/l) de las muestras (Tabla 17). Los valores de alcalinidad para las muestras (36-43), con base en la data generada en campo durante la titulación, varían respecto al cálculo de alcalinidad realizado para estas muestras. La tabla 18 expone las concentraciones de los analitos dominantes de la alcalinidad (CO_3 , HCO_3 , CaCO_3) en las muestras de agua obtenidas para el presente estudio.

La tabla 19 expone los resultados analíticos de las 51 muestras con sus principales características fisicoquímicas.

Muestra		CO3 (Lab)	CO3 (USGS)	HCO3 (Lab)	HCO3 (USGS)	CaCO3 (Lab)	CaCO3 (USGS)
ID	Nombre	mg/L					
36	SJL1	ND	28.25	357.6	223.7	586.2	232.2
37	SJL2	ND	0.2	149	112.5	244.25	92.6
38	JALOS	ND	2.9	208.6	158.3	341.95	134.8
39	VG1	ND	1.3	178.8	150.9	293.1	126.2
40	VG2	ND	1.3	178.8	144	293.1	120.4
41	TEPA1	ND	3.1	149	104.5	244.25	92.1
42	RV1	ND	1.6	208.6	177.7	341.95	148.4
43	TMCA1	ND	15.2	208.6	142.3	341.95	144.2

Tabla 17 Alcalinidad para las muestras 36-43 (Los Altos de Jalisco).

Los valores iónicos y concentraciones están en mg/l, la profundidad del pozo es en metros, temperatura en °C y C.E. en mS/cm

Muestra	Fuente	Profundidad	Temperatura	pH	C.E.	TDS*	OD	NO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na	K	Ca	Mg	Si	F	Fe	Li	As	Sr	Mn	
1	Pozo	150	32	7	841	743	Sin data	4	519	37	7	88	21	28	43	51	1	0.10	Sin data	0.01	Sin data	0.04	
2	Pozo	100	28	7	140	92	Sin data	4	56	7	2	15	5	5	2	31	1	0.04	Sin data	0.01	Sin data	0.04	
3	Pozo	240	27	8	Sin data	149	10	9	102	8	0	13	5	16	5	32	0	0.04	Sin data	0.01	Sin data	0.04	
4	Pozo	250	30	7	220	94	Sin data	4	57	9	0	25	1	2	0	33	5	0.13	Sin data	0.10	Sin data	40.05	
5	Pozo	380	28	8	130	98	Sin data	9	55	22	0	1	1	3	16	38	4	0.20	Sin data	0.01	Sin data	0.04	
6	Pozo	150	27	8	520	385	Sin data	0	263	16	6	54	15	17	14	32	0	1.18	Sin data	0.01	Sin data	0.04	
7	Pozo	26	21	7	240	202	Sin data	4	84	13	47	41	4	4	4	42	2	1.18	Sin data	0.01	Sin data	0.24	
8	Pozo	350	31	8	190	192	Sin data	4	101	31	1	46	8	3	2	56	4	0.04	Sin data	0.01	Sin data	0.04	
9	Pozo	Sin data	27	7	516	379	3.7	4	216	51	6	29	9	58	10	Sin data	3	2.05	Sin data	0.02	Sin data	0.20	
10	Pozo	228	31	9	480	313	Sin data	0	189	19	11	88	4	2	0	20	0	0.04	Sin data	0.01	Sin data	0.04	
11	Pozo	150	27	8	400	281	Sin data	9	189	10	7	39	10	18	8	35	0	0.04	Sin data	0.01	Sin data	0.04	
12	Pozo	450	26	7	214	266	4	4	37	124	15	34	12	30	14	Sin data	1	0.09	Sin data	0.09	Sin data	0.01	
13	Pozo	235	22	7	569	362	6	2	242	5	9	64	21	14	6	38	1	0.03	0.03	0.03	0.03	0.10	0.01
14	Pozo	300	33	7	1111	147	4	2	103	1	1	15	6	17	5	35	0	0.02	0.03	0.03	0.03	0.12	0.01
15	Pozo	292	33	7	325	108	4	5	59	5	7	23	6	5	3	23	1	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01
16	Pozo	70	30	7	334	117	4	6	68	6	8	21	7	5	2	20	0	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01
17	Pozo	120	23	8	345	136	5	0	88	2	2	27	9	5	4	26	2	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01
18	Pozo	200	24	7	649	83	7	9	44	2	7	18	8	3	2	44	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01
19	Pozo	90	176	33	191	176	6	7	114	2	9	35	6	8	3	42	0	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01
20	Pozo	300	29	7	363	208	5	3	146	1	1	44	7	5	3	52	1	0.12	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01
21	Pozo	275	25	7	222	125	6	9	83	1	3	27	4	4	2	48	0	0.35	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01
22	Pozo	200	25	6	242	137	4	1	103	0	12	8	9	5	36	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01	
23	Pozo	300	25	7	1619	1487	6	0	1069	70	6	152	58	29	103	39	0	0.14	0.33	0.03	0.03	0.38	0.26
24	Pozo	200	25	7	2310	1420	5	0	1031	82	5	114	36	59	93	35	1	0.18	0.33	0.03	0.03	0.45	0.51
25	Pozo	300	32	7	1792	1898	5	0	1415	85	7	147	41	90	113	54	1	0.05	0.37	0.03	0.03	0.61	0.22
26	Pozo	230	36	7	1900	1356	5	0	698	229	22	174	48	81	104	62	4	0.37	0.47	0.06	0.06	0.52	0.83
27	Pozo	250	34	7	718	639	6	0	435	15	6	102	34	31	16	40	0	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
28	Pozo	150	24	7	382	239	2	2	163	3	2	39	9	13	9	38	0	0.19	0.03	0.03	0.03	0.16	0.01
29	Pozo	60	25	7	569	262	4	4	172	7	6	38	9	17	13	44	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.18	0.01
30	Pozo	150	28	8	214	735	5	4	468	42	20	93	29	37	48	47	1	0.06	0.16	0.03	0.03	0.47	0.13
31	Pozo	118	30	7	351	261	4	5	182	3	2	40	13	13	8	35	0	0.06	0.03	0.03	0.03	0.14	0.01
32	Pozo	285	24	7	451	184	4	0	132	0	0	20	8	16	8	34	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.17	0.01
33	Pozo	250	26	7	192	254	5	3	166	6	2	45	13	13	8	36	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.14	0.01
34	Pozo	55	27	7	139	148	7	9	98	1	6	22	7	9	6	41	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.11	0.01
35	Pozo	54	28	6	160	50	6	5	29	2	2	14	1	2	0	20	5	0.14	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02
36	Pozo	Sin data	32	9	542	357	2	5	224	0	6	122	3	2	0	Sin data	<3	0.08	0.21	0.21	0.01	0.00	0.00
37	Pozo	Sin data	23	7	1468	1343	2	5	113	0	850	22	6	330	22	Sin data	<3	12.50	0.77	0.45	3.31	0.00	0.00
38	Pozo	Sin data	24	9	298	233	5	5	158	2	3	58	4	6	1	Sin data	<3	0.26	0.17	0.01	0.04	0.00	0.00
39	Pozo	Sin data	36	8	364	264	2	5	151	5	33	55	3	13	4	Sin data	<3	0.62	0.08	0.02	0.16	0.00	0.00
40	Pozo	Sin data	34	8	366	255	2	5	144	5	32	54	3	13	4	Sin data	<3	0.66	0.08	0.02	0.15	0.00	0.00
41	Pozo	Sin data	54	9	480	294	1	5	105	11	81	90	2	6	0	Sin data	<3	0.30	0.15	0.07	0.10	0.00	0.00
42	río	Sin data	24	8	481	341	6	10	178	21	38	48	16	35	6	Sin data	<3	2.03	0.09	0.01	0.37	0.02	0.00
43	Manantial	No aplica	40	9	743	432	3	5	142	25	119	141	2	4	0	Sin data	<3	0.12	0.51	0.09	0.02	0.00	0.00
44	Pozo	Sin data	46	8	62	495	Sin data	4	131	25	177	154	2	6	0	21	5	0.02	0.23	0.04	0.07	0.00	0.00
45	Pozo	Sin data	25	7	407	328	Sin data	4	239	1	1	30	2	50	4	51	2	Sin data	0.09	0.00	0.00	0.18	0.00
46	Pozo	120	36	8	530	361	Sin data	5	199	9	40	97	3	12	1	29	4	Sin data	0.27	0.02	0.16	0.00	0.00
47	Pozo	Sin data	32	7	105	70	Sin data	2	47	1	2	14	3	3	0	35	1	Sin data	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00
48	Pozo	120	24	8	371	286	Sin data	4	199	3	5	21	13	42	4	53	4	Sin data	0.11	0.01	0.33	0.00	0.00
49	Pozo	200	23	8	392	320	Sin data	6	209	5	15	51	11	24	6	53	6	Sin data	0.37	0.02	1.06	0.00	0.00
50	Pozo	300	30	8	1261	987	Sin data	0	183	13	502	247	5	36	0	47	20	Sin data	0.60	0.36	0.43	0.00	0.00
51	Pozo	400	38	7	587	340	Sin data	7	170	17	39	59	17	36	2	31	3	Sin data	0.11	0.02	0.22	0.00	0.00

Tabla 18 Muestras seleccionadas y sus concentraciones iónicas principales.

Clasificación de las muestras de agua por temperatura, ion dominante y facies hidrogeoquímica

Con base en su temperatura, las muestras de agua se agrupan en:

- Agua “fría”, 31.4% de las muestras en un rango de temperatura de 21-25°C, con una temperatura ambiental promedio de 22.31 °C. En este grupo, aquellas muestras que registran una temperatura del agua mayor a la temperatura ambiental son aquellas en las que se tomó un valor promedio estacional de la literatura, es decir, no es la temperatura ambiente del momento del muestreo
- Agua “tibia-caliente”, 54.9 % de las muestras con una temperatura de 25.3 a 33.7°C, en una temperatura ambiental promedio de 22.89 °C
- Agua “termal”, muestras (13.7%) con temperaturas de 35.5 a 54°C, con una temperatura ambiental promedio de 25.87°C.

Los grupos extremos son de agua “fría” y agua “termal”.

Cada análisis por muestra se visualiza en los siguientes Diagramas de Piper, en los que se identifica la familia por ion dominante de cada muestra. Los Diagramas de Piper se conforman por dos triángulos y un rombo: uno de cationes (Ca, Mg y Na+K, en cada eje del triángulo inferior izquierdo) y el triángulo derecho para los aniones (Cl, SO₄ y HCO₃+CO₃ en cada eje); en el rombo se visualiza la facie hidrogeoquímica de la muestra. A Continuación, se presentan los diagramas para cada grupo de agua con base en su temperatura (pozos, símbolo triángulo; manantial, círculo; río Verde, rombo):

- En términos generales, todas las muestras (fría, termal y tibia-caliente), tienen una composición homogénea a pesar de la extensión y diversidad de la localización de las muestras
- En termino de los aniones (Cl, SO₄, HCO₃+CO₃), 48 de 51 muestras tienen predominante al bicarbonato
- Con relación a los cationes, en la mayoría de las muestras predomina el catión sodio (Na+K)
- Se identifican siete tipos de familias por ion dominante: bicarbonatada sódica (65% de las muestras), bicarbonatada mixta (13%), bicarbonatada cálcica (8%), bicarbonatada magnésica (8%), clorurada mixta, sulfatada cálcica y sulfatada sódica.

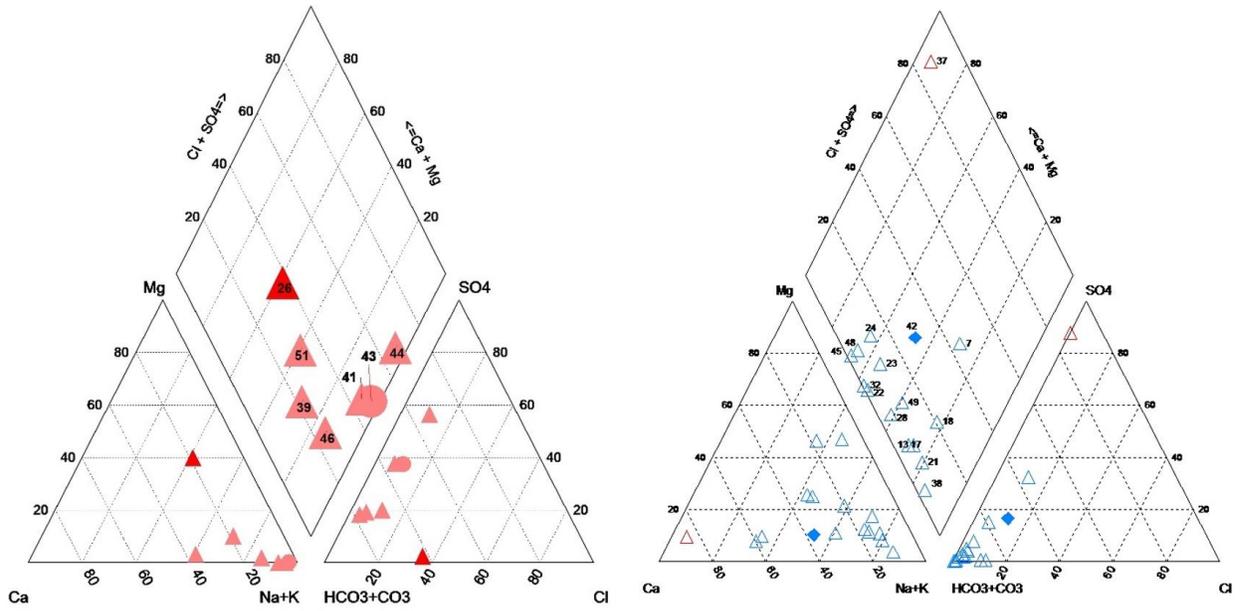


Imagen 16 Representación de los grupos extremos en diagrama de Piper.

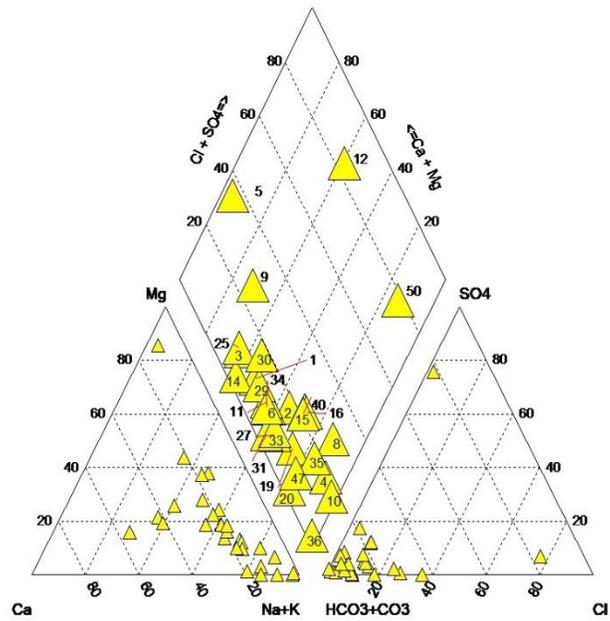


Imagen 17 Muestras "tibia-caliente" en diagrama de Piper.

En las siguientes tablas se presenta cada muestra con la familia de agua a la que pertenece y con su correspondiente facie hidrogeoquímica (por cálculo manual y por PHREEQC), y la concentración de STD.

ID	Familia de agua por ion dominante	Facie hidrogeoquímica		STD Estimado (mg/l)	ID	Familia de agua por ion dominante	Facie hidrogeoquímica		STD Estimado (mg/l)
		Cálculo manual	PHREEQC				Cálculo manual	PHREEQC	
7	Bicarbonatada sódica	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4	202	2	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	92
13	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	361.69	5	Bicarbonatada magnésica	HCO3>Cl-Mg	Mg-HCO3-Cl	98
17	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	135.57	20	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	208.25
37	Sulfatada cálcica	SO4-Ca	Ca-SO4	1379.1	50	Sulfatada sódica	SO4>HCO3-Na	Na-SO4-HCO3	986.673
49	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	320.39	31	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-Ca-HCO3	260.8
28	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-Mg-Ca-HCO3	238.84	4	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Mn-Na-HCO3	94
32	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-Mg-HCO3	183.93	16	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	116.69
42	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	372.1	8	Bicarbonatada sódica	HCO3>Cl-Na	Na-HCO3-Cl	192
38	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	283.5	10	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	313
18	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	83.42	25	Bicarbonatada magnésica	HCO3-Mg>Na	Mg-Na-HCO3	1897.75
48	Bicarbonatada cálcica	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3	286.37	36	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	490.9
21	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	124.81	1	Bicarbonatada mixta	HCO3-Na>Mg	Na-Mg-HCO3	743
22	Bicarbonatada mixta	HCO3-Na-Ca-Mg	Na-Ca-Mg-HCO3	136.5	47	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	69.955
45	Bicarbonatada cálcica	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3	328.01	15	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	107.52
23	Bicarbonatada magnésica	HCO3-Mg>Na	Mg-Na-HCO3	1487.27	19	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	175.95
24	Bicarbonatada magnésica	HCO3-Mg>Na	Mg-Na-HCO3	1420.31	14	Bicarbonatada mixta	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-Mg-HCO3	147.39
29	Bicarbonatada mixta	HCO3-Na-Mg	Na-Mg-Ca-HCO3	262.06	27	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	638.65
33	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	253.59	40	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	289.8
12	Clorurada mixta	Cl-Ca<Na>Mg	Ca-Na-Mg-Cl	266	46	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	361.18
34	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Mg	Na-Mg-Ca-HCO3	148.47	39	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	292
3	Bicarbonatada cálcica	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3	149	26	Bicarbonatada mixta	HCO3>Cl-Mg>Na	Mg-Na-Ca-HCO3-Cl	1356.1
6	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Mg	Na-Mg-HCO3	385	51	Bicarbonatada sódica	HCO3>SO4-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	339.92
9	Bicarbonatada mixta	HCO3>Cl-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-Cl	379	43	Bicarbonatada sódica	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4	498.4
11	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	281	44	Bicarbonatada sódica	SO4>HCO3-Na	Na-SO4-HCO3	495.278
30	Bicarbonatada mixta	HCO3-Na>Mg	Na-Mg-HCO3	735.2	41	Bicarbonatada sódica	HCO3>SO4-Na	Na-HCO3-SO4	338.1
35	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3-F	50.38					

Tabla 19 Familia por ion dominantes y facie hidroquímica de las muestras.

De acuerdo con Freeze y Cherry (1979), los cloruros y sulfatos son componentes menos sobresalientes en las rocas ígneas, las cuales se componen mayormente de minerales de silicatos (minerales conformados por silicio-oxígeno y otros elementos), por lo que, no hay tendencia al desarrollo de facies sulfatada o clorurada, a medida que el agua se mueve entre las rocas ígneas. Condición que sucede incluso en sistemas regionales dónde los flujos de agua logran mayor recorrido y con edades mayores y antiguas. Lo anterior provoca que la secuencia evolutiva hidrogeoquímica de Chervoratev sea menos relevante para determinar el recorrido relativo del agua.

Las muestras de agua de familia bicarbonatada, o en las que el anión dominante es el bicarbonato no pueden asociarse directamente a flujos de agua de tipo local o de menor recorrido, por lo que deben ser analizadas con mayor atención considerando otros datos fisicoquímicos, e indicadores hidrogeológicos en superficie de la zona de la muestra objeto. La presión de CO₂, es un elemento que considerar para afinar el análisis de los sistemas de flujo de agua subterránea, sobre todo en medios de rocas ígneas, debido a que el CO₂ en el medio provoca aumento de bicarbonatos, y altera la identificación de la edad y/o tiempo de residencia, lo cual se puede aclarar con el contenido de litio como trazador fiable. Mientras que las

muestras cuyo anión dominante es el cloruro (Cl⁻) o el sulfato (SO₄²⁻), preliminarmente sugieren para el agua un recorrido más largo en distancia y/o en tiempo.

En el grupo “agua fría” domina la familia bicarbonatada sódica, seguida de la familia bicarbonatada magnésica. Por el dominio del anión bicarbonato, relacionado con un agua de poco recorrido o agua joven. La muestra 37 se es de una familia sulfatada cálcica. Respecto a los STD, las muestras 23, 24 y 37 indican un contenido de STD más elevado, lo cual deberá revisarse con otros parámetros fisicoquímicos, ya que podrían ser muestras de flujos de agua asociadas a flujos locales por su baja temperatura, pero con un recorrido mayor y/o “más lento” y cercano a la superficie, circulando por un material geológico que permite mayor solubilidad de sus minerales lo que genera una mayor interacción agua-roca provocando un elevado contenido de STD; la concentración grupal promedio de STD es 448.68 mg/l, si se excluyen las muestras 23, 24 y 37 con valores de STD muy por encima del promedio grupal y global (51 muestras), el valor promedio del “agua fría” es 225.25 mg/l.

ID	Familia de agua por ion dominante	Facies hidrogeoquímica		STD Estimado (mg/l)
		Cálculo manual	PHREEQC	
7	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ >SO ₄ -Na	Na-HCO ₃ -SO ₄	202
13	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na	Na-HCO ₃	361.69
17	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na	Na-HCO ₃	135.57
37	Sulfatada cálcica	SO ₄ -Ca	Ca-SO ₄	1379.1
49	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na>Ca	Na-Ca-HCO ₃	320.39
28	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na	Na-Mg-Ca-HCO ₃	238.84
32	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na>Ca	Na-Ca-Mg-HCO ₃	183.93
42	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na>Ca	Na-Ca-HCO ₃	372.1
38	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na	Na-HCO ₃	283.5
18	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na	Na-HCO ₃	83.42
48	Bicarbonatada cálcica	HCO ₃ -Ca>Na	Ca-Na-HCO ₃	286.37
21	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na	Na-HCO ₃	124.81
22	Bicarbonatada mixta	HCO ₃ -Na-Ca-Mg	Na-Ca-Mg-HCO ₃	136.5
45	Bicarbonatada cálcica	HCO ₃ -Ca>Na	Ca-Na-HCO ₃	328.01
23	Bicarbonatada magnésica	HCO ₃ -Mg>Na	Mg-Na-HCO ₃	1487.27
24	Bicarbonatada magnésica	HCO ₃ -Mg>Na	Mg-Na-HCO ₃	1420.31

Tabla 20 Muestras “Agua fría” con su familia por ion dominante y su facie hidrogeoquímica.

En el grupo “tibia-caliente” domina el anión bicarbonato y el cloruro, identificando principalmente familia de agua de tipo bicarbonatada sódica, pero hay dos muestras que clasifican con tipos de familia clorurada (muestra 12, Zona Metropolitana de Guadalajara) y sulfatada (muestra 50, Los Altos de Jalisco); la concentración STD promedio es 346.36 mg/l.

ID	Familia de agua por ion dominante	Facies hidrogeoquímica		STD Estimado
		Cálculo manual	PHREEQC	
29	Bicarbonatada mixta	HCO3-Na-Mg	Na-Mg-Ca-HCO3	262.06
33	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	253.59
12	Clorurada mixta	Cl-Ca<Na>Mg	Ca-Na-Mg-Cl	266
34	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Mg	Na-Mg-Ca-HCO3	148.47
3	Bicarbonatada cálcica	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-HCO3	149
6	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Mg	Na-Mg-HCO3	385
9	Bicarbonatada mixta	HCO3>Cl-Ca>Na	Ca-Na-HCO3-Cl	379
11	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na>Ca	Na-Ca-HCO3	281
30	Bicarbonatada mixta	HCO3-Na>Mg	Na-Mg-HCO3	735.2
35	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3-F	50.38
2	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	92
5	Bicarbonatada magnésica	HCO3>Cl-Mg	Mg-HCO3-Cl	98
20	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	208.25
50	Sulfatada sódica	SO4>HCO3-Na	Na-SO4-HCO3	986.673
31	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-Ca-HCO3	260.8
4	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Mn-Na-HCO3	94
16	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	116.69
8	Bicarbonatada sódica	HCO3>Cl-Na	Na-HCO3-Cl	192
10	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	313
25	Bicarbonatada magnésica	HCO3-Mg>Na	Mg-Na-HCO3	1897.75
36	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	490.9
1	Bicarbonatada mixta	HCO3-Na>Mg	Na-Mg-HCO3	743
47	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	69.955
15	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	107.52
19	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	175.95
14	Bicarbonatada mixta	HCO3-Ca>Na	Ca-Na-Mg-HCO3	147.39
27	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	638.65
40	Bicarbonatada sódica	HCO3-Na	Na-HCO3	289.8

Tabla 21 Muestras "Agua tibia-caliente" con su familia por ion dominante y su facie hidrogeoquímica.

En el grupo “agua termal” siguen siendo familias bicarbonatadas, con las facies se identifica que los sulfatos son más relevantes que en los otros grupos; STD promedio es 505.96 mg/l.

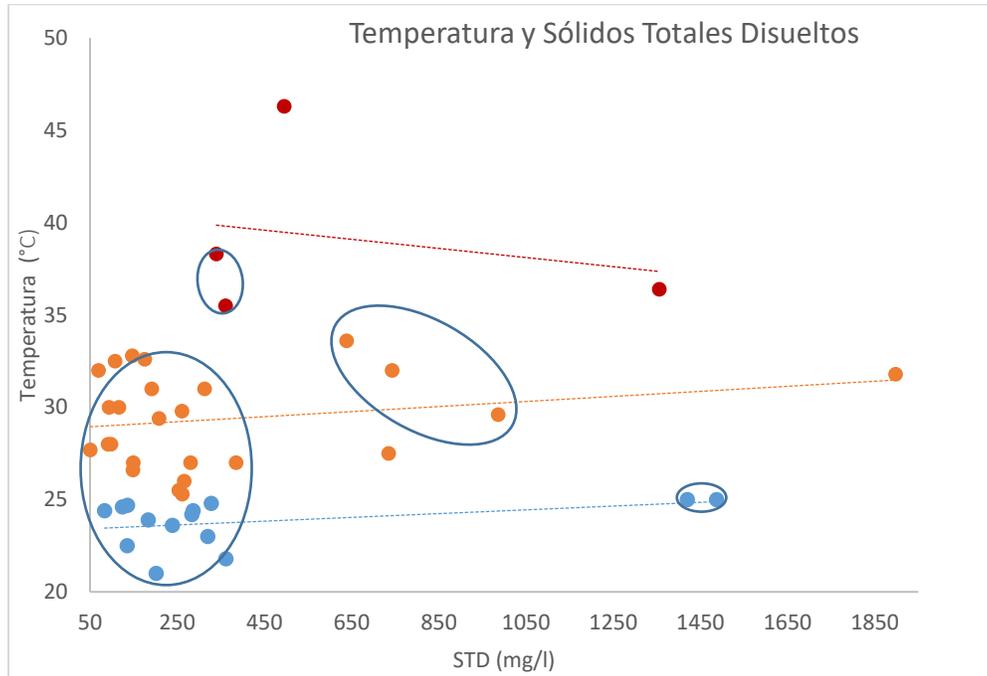
ID	Familia de agua por ion dominante	Facies hidrogeoquímica		STD Estimado (mg/l)
		Cálculo manual	PHREEQC	
46	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na	Na-HCO ₃	361.2
39	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ -Na	Na-HCO ₃	292.0
26	Bicarbonatada mixta	HCO ₃ >Cl-Mg>Na	Mg-Na-Ca-HCO ₃ -Cl	1356.1
51	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ >SO ₄ -Na>Ca	Na-Ca-HCO ₃	339.9
43	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ >SO ₄ -Na	Na-HCO ₃ -SO ₄	498.4
44	Bicarbonatada sódica	SO ₄ >HCO ₃ -Na	Na-SO ₄ -HCO ₃	495.3
41	Bicarbonatada sódica	HCO ₃ >SO ₄ -Na	Na-HCO ₃ -SO ₄	338.1

Tabla 22 Muestras “Agua termal” con su familia por ion dominante y su facies hidrogeoquímica.

Para facilitar el análisis del comportamiento hidrogeoquímico y su variación para cada ion, a continuación, se presentan las gráficas de las muestras de agua con sus relaciones entre parámetros fisicoquímicos identificando las diferencias fisicoquímicas existentes entre los tres grandes grupos por temperatura. Las muestras se identifican por color, de acuerdo con el rango de temperatura, y con sus ID correspondientes: color azul, muestras del grupo “agua fría” (21 a 25 °C); color naranja, muestras agrupadas como “tibia-caliente” (25.5 a 33.7 °C); y en color rojo las muestras “agua termal” (35.5 a 54°C). Es de recordar que las muestras 1-35 se localizan en el Zona Metropolitana de Guadalajara y las 36-51 en Los Altos de Jalisco.

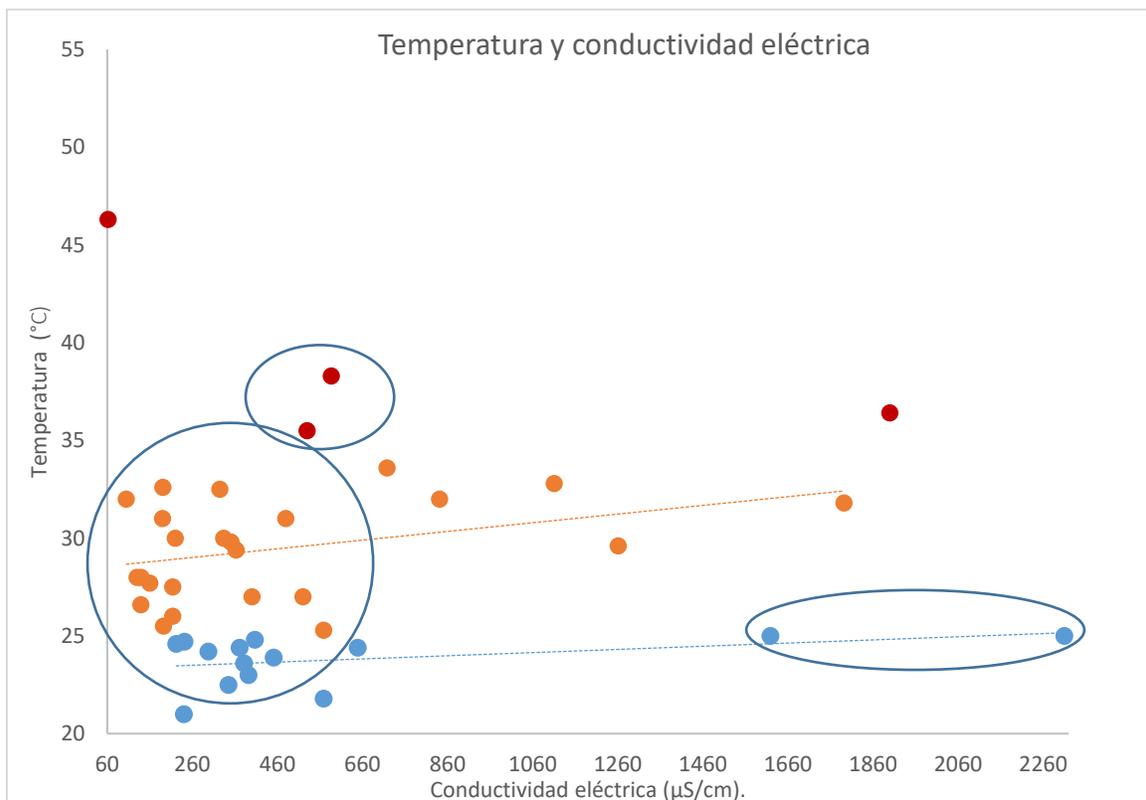
Temperatura y Sólidos Totales Disueltos. – en la relación de STD y temperatura, se observa que la mayor parte de las muestras de “agua fría” contienen el menor contenido de STD, por debajo del promedio (461 mg/l), sin embargo, se identifica un subgrupo de agua fría (muestras 23, 24 y 37) con alto contenido de STD (>1 300 mg/l), por encima del promedio global e inclusive mayor a las concentraciones del “grupo termal”. En el grupo “agua termal”, se distingue un subgrupo con una concentración de STD menor al promedio (muestras 39, 41, 43, 46 y 51) con las temperaturas más elevadas, localizadas en Los Altos de Jalisco, la muestra 44 puede integrarse en este subgrupo; la muestra 26 tiene un muy elevado contenido de STD (>1 350 mg/l) pero con una temperatura menor al resto del grupo termal, caracterizando un comportamiento similar a la muestra 25 “tibia-caliente”. Entre los dos grupos extremos, se identifica el grupo de agua “tibia-caliente”, el cual con base en la gráfica se observan dos posibles subgrupos. El comportamiento global, es el aumento de STD directamente proporcional al aumento de la temperatura. En el caso del “Agua termal”, se observa que la tendencia no es directamente proporcional, lo cual puede

deberse a un ascenso vertical más rápido lo que permite una mayor temperatura y una menor concentración relativa de STD, este tipo de comportamientos son típicos en pozos.



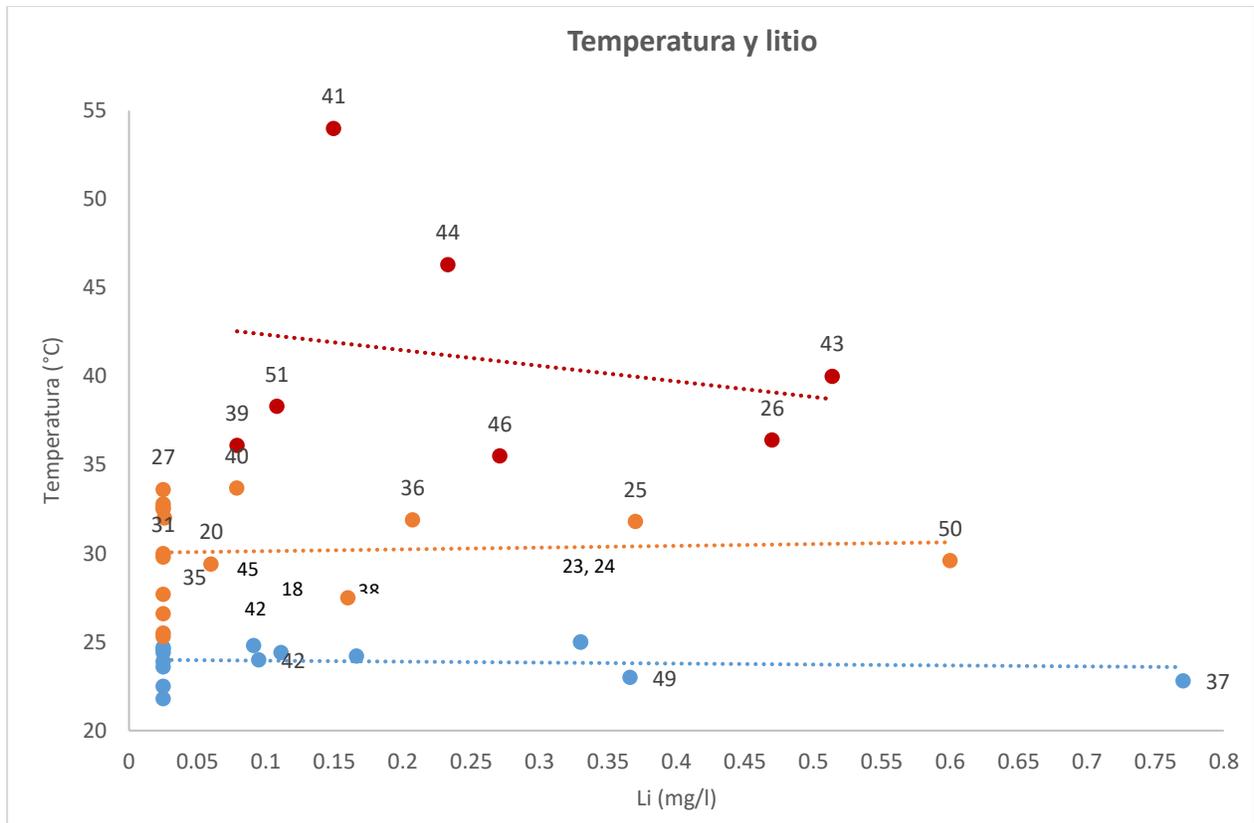
Gráfica 2 Relación de la temperatura y el contenido de STD.

Temperatura y conductividad eléctrica – Se observa, como se esperaba, un comportamiento similar al de la relación de los STD y temperatura, el comportamiento global cumple con la tendencia natural de que el aumento de la C.E. es directamente proporcional al de la temperatura del agua (Ver Gráfico 3). Se siguen manteniendo los subgrupos en los extremos de temperatura, la mayoría de las muestras “agua fría” registran una baja conductividad eléctrica, por debajo del valor promedio de C.E del total de las muestras (550 $\mu\text{S}/\text{cm}$), manteniéndose un subgrupo de agua fría con baja temperatura pero con elevada C.E (muestras 23, 24 y 37); el grupo “agua termal”, en su mayor parte está por encima del valor promedio, con un par de muestras (28 y 32) que a pesar de sus elevadas temperaturas registran una menor C.E, al igual que en lo expuesto en los STD. Sólo la muestra 3 no reporta C.E., con STD en 149 mg/l (GEOEX S.A de C.V, 2003).



Gráfica 3 Relación de la temperatura y la conductividad eléctrica.

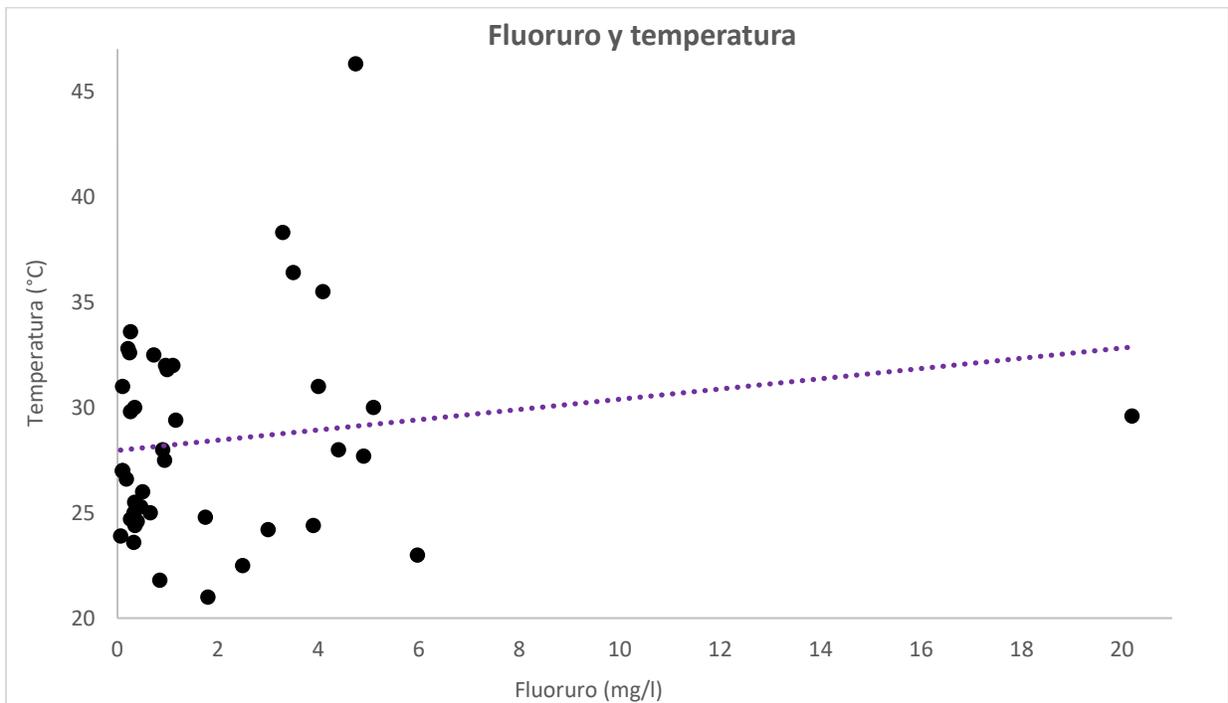
Temperatura y litio. - Las muestras tienen un promedio de 0.15 mg/l de litio; la mayoría de las muestras “frías” presentan los valores más bajos, a excepción del subgrupo (muestras 23, 24, 37, 38 y 49), destaca la 37 con la concentración más elevada del total de las 51 muestras (22.8 °C, 0.77 mg/l de litio, pozo en Los Altos de Jalisco); el grupo “termal” registra la mayor concentración promedio de litio (0.26 mg/l), en este grupo la muestra 43 (manantial) registra 0.5 mg/l, que llama la atención al ser un manantial, siendo un indicador infalible de los rangos naturales del litio en su presencia del flujo subterráneo en la región. El comportamiento de los dos grupos extremos, expone diferentes dinámicas en el área de estudio: *i)* las características de la muestra 43 (manantial, 0.5 Li mg/l, 40°C), señalan que posiblemente la elevada temperatura se genera por recorridos que alcanza mayor profundidad en rocas de tipo granito con posibilidad de ascender verticalmente mediante fallas-fracturas facilitando el ascenso que provoca una residencia menor o corta, evitando que se enriquezca con mayor contenido de litio durante el ascenso; *ii)* en el mismo contexto de rocas ígneas, el agua circula por flujos que alcanzan profundidad mayor pero con un mayor tiempo de residencia, por circular fuera de estructuras que agilicen la circulación del agua (ascendente, descendente, horizontal); *iii)* flujos someros (cercaos a la superficie), que recorren más lentamente y/o mayor distancia en la horizontal, la muestra 37 presenta características que pueden ser resultado de esta posible dinámica hidrogeológica (pozo, 0.77 Li mg/l, 22.8°C). Ambas gráficas exponen claramente que el litio es un indicador del tiempo relativo de residencia o de la edad relativa del agua, lo que puede ser referente de la jerarquía del flujo, mientras que la temperatura es un indicador de la profundidad relativa del recorrido.



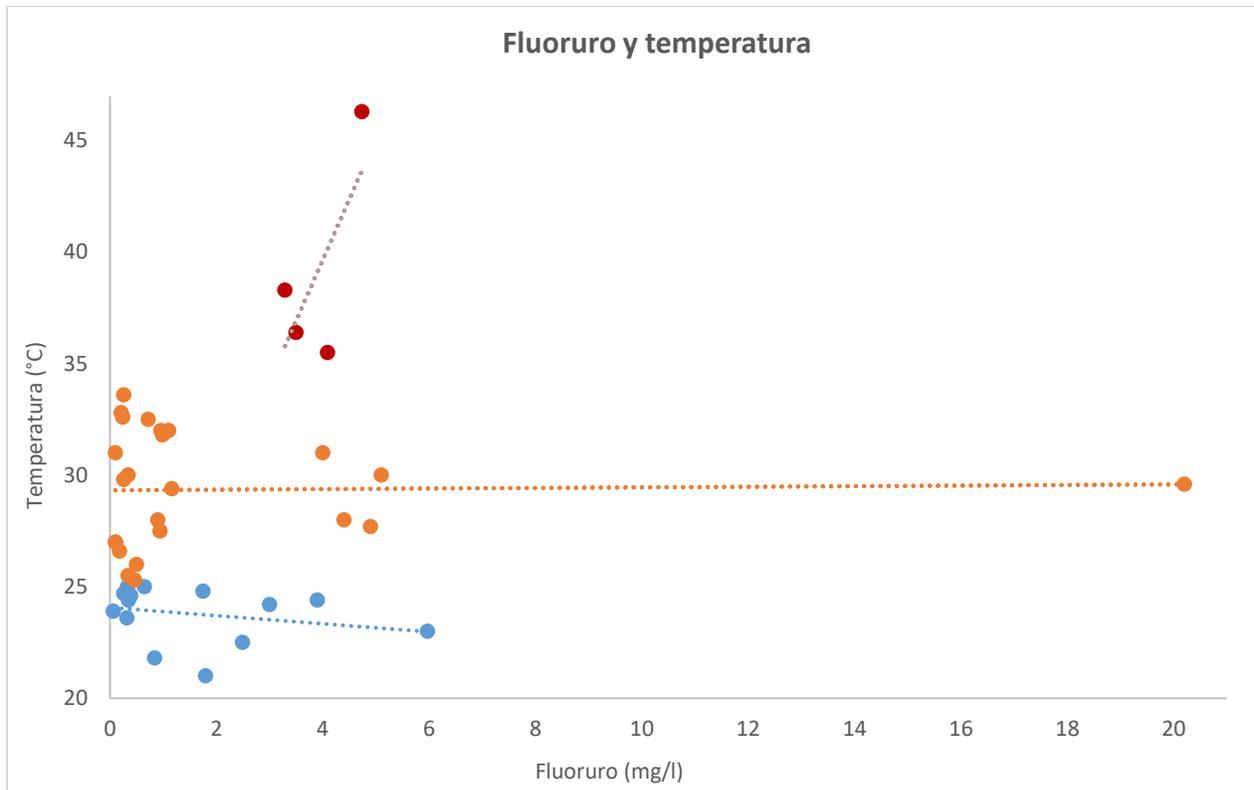
Gráfica 4 Relación temperatura y litio.

Se excluyeron doce muestras sin valor de litio (GEOEX S.A de C.V, 2003-2004) y las muestras con reporte de Li <0.05 (mg/l), se graficaron como 0.025 mg/l (0.05/2) con el objetivo de integrar el posible comportamiento de dichas muestras (13-19, 21, 22, 27, 28, 29, 31-35) agrupadas como “agua fría”- “tibia-caliente” localizadas en pozos en el Zona Metropolitana de Guadalajara (muestras recolectadas por el ITESM, 2011).

Temperatura y fluoruro. – Las siguientes gráficas indican que el contenido de fluoruro determinado (0.06-20.2 mg/l) aumenta con la temperatura, con un promedio global de 2.16 mg/l. El agua termal registra la concentración promedio más alta (2.87 mg/l), seguida por el agua tibia-caliente (1.8 mg/l) y el valor promedio más bajo lo reporta el agua fría (1.57 mg/l). Sin embargo, no es en el agua termal que se registra la concentración más alta de fluoruro, es en el grupo intermedio en la muestra 50 con 20.2 mg/l en Los Altos de Jalisco, mientras que en el agua fría se registra la segunda concentración más alta (5.97 mg/l), en la muestra 49 también localizada en Los Altos de Jalisco, sitios donde se infiere que el agua subterránea ha estado con rocas de tipo basaltos y granodioritas. Veintiún muestras reportan una concentración mayor al promedio (2.16 mg/l), y la mayoría se localiza en Los Altos de Jalisco en todos los grupos de temperatura, mientras que, en la Zona Metropolitana de Guadalajara los contenidos de fluoruro más elevados se registran en pozos con temperatura entre 30 y 32°C.



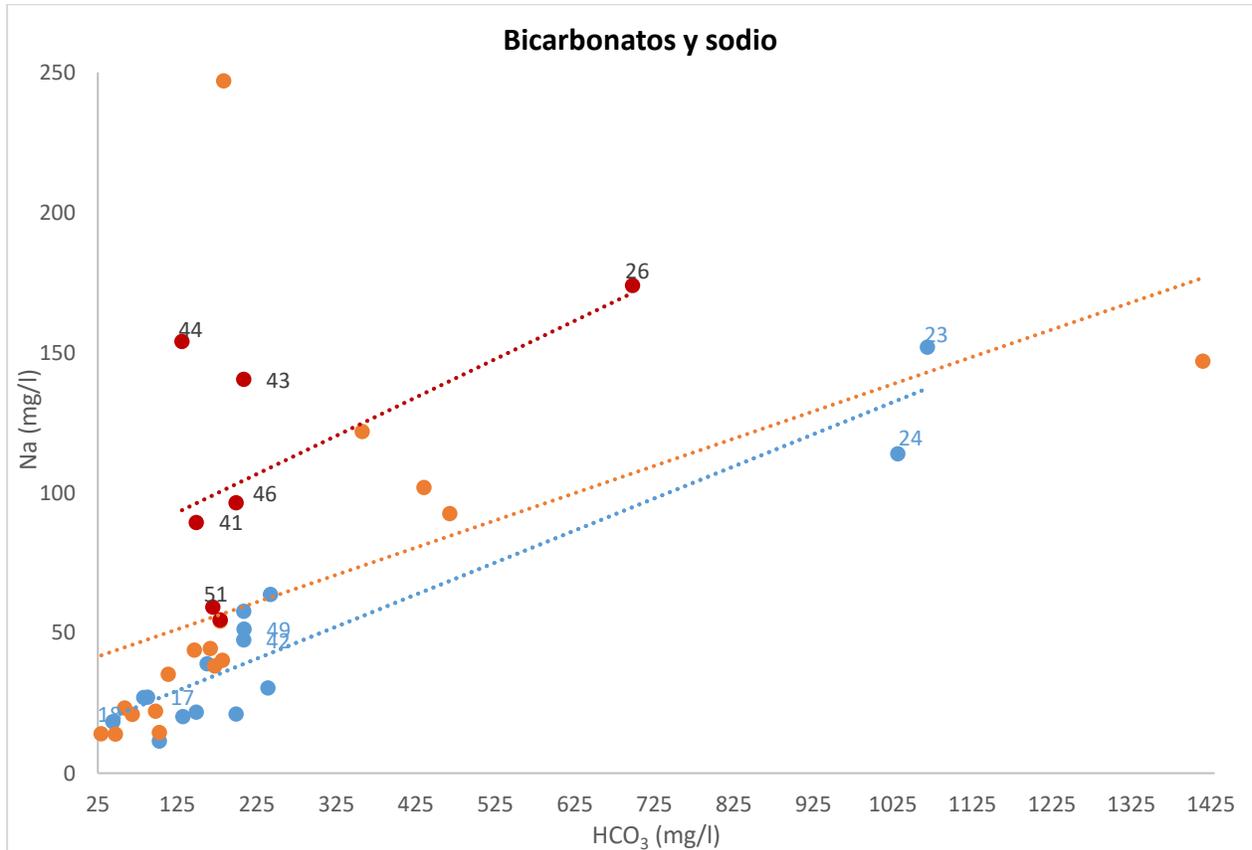
Gráfica 5 Relación de la temperatura con el contenido de fluoruro en las muestras en global.



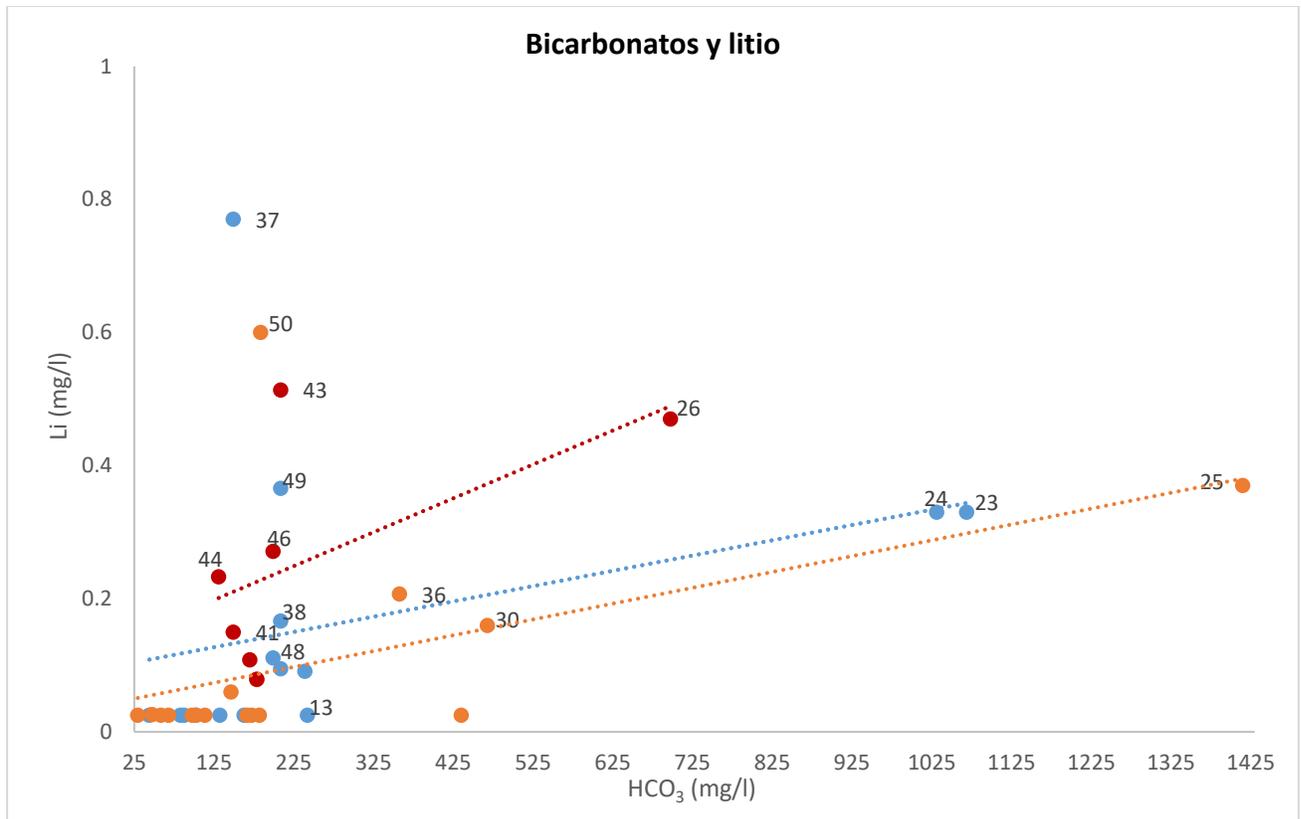
Gráfica 6 Relación de la temperatura con el contenido de fluoruro en las muestras agrupadas térmicamente.

Las muestras 36-43 en Los Altos de Jalisco, se graficaron con 1.5 mg/l (F⁻) dado que el laboratorio reportó sus concentraciones como <3 mg/l.

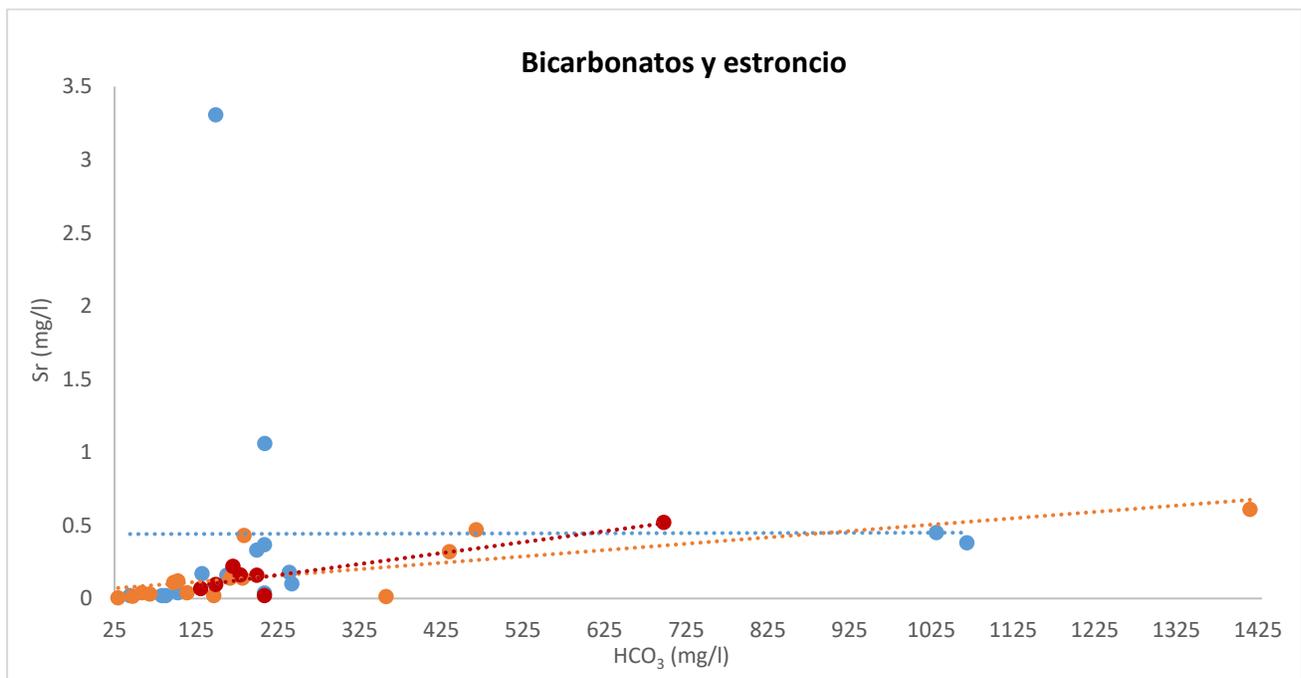
Bicarbonatos. – Si bien la mayoría de las muestras de agua son de facies bicarbonatadas, al analizarse con otros iones se clarifica la tendencia de evolución hidrogeoquímica durante el recorrido, infiriendo una jerarquía dentro de los sistemas de flujo.



Gráfica 7 Relación bicarbonatos y sodio.

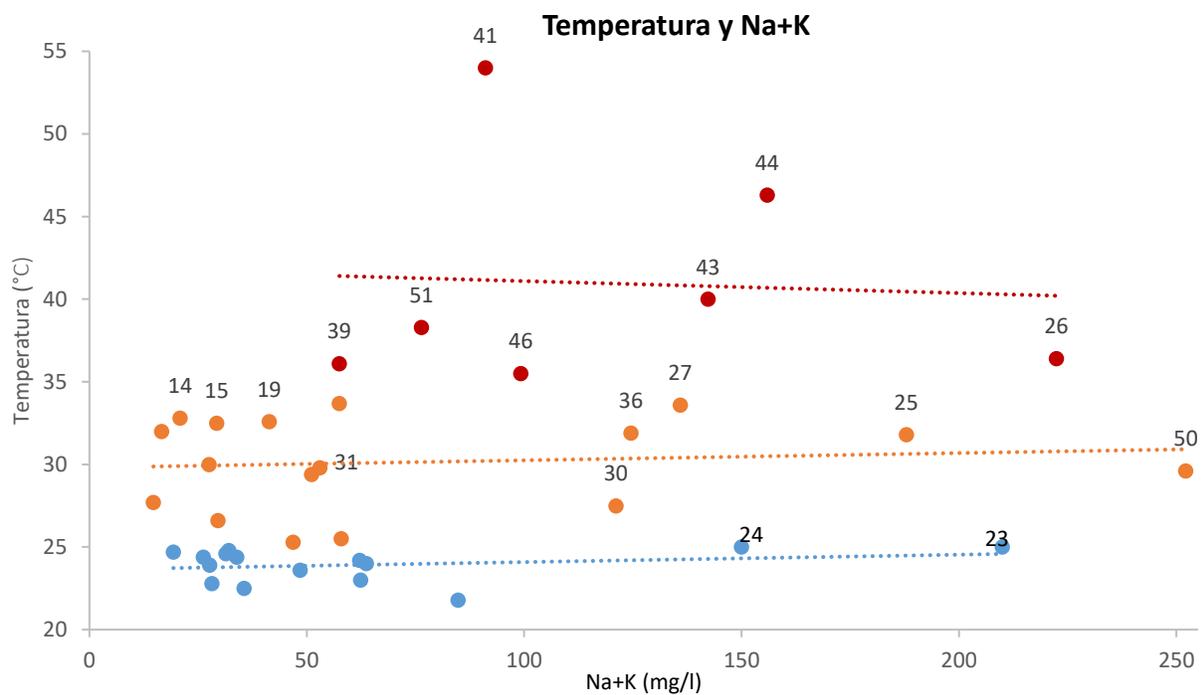


Gráfica 8 Relación bicarbonatos y litio.



Gráfica 9 Relación bicarbonatos y estroncio.

Sodio y potasio. – La jerarquización relativa de los sistemas de flujo en términos de la profundidad y tiempo de residencia de su recorrido se expresa en las siguientes gráficas del contenido de sodio y potasio, en relación con la temperatura, litio, cloruros y sulfatos (Cl+SO₄). Las gráficas exponen claramente que, dentro de un contexto rocoso similar, a mayor tiempo de residencia y profundidad aumenta el contenido de los iones y la temperatura. La relación sodio y potasio (Na+K) con la temperatura, en los grupos extremos (agua fría y termal) expresa claramente la jerarquización relativa de los sistemas de flujo (local, regional, intermedio) con diferentes periodos de residencia; el “agua fría” con menor concentración de Na+K, litio, Cl+SO₄ y menor temperatura; las características opuestas se observan en el grupo “termal”.



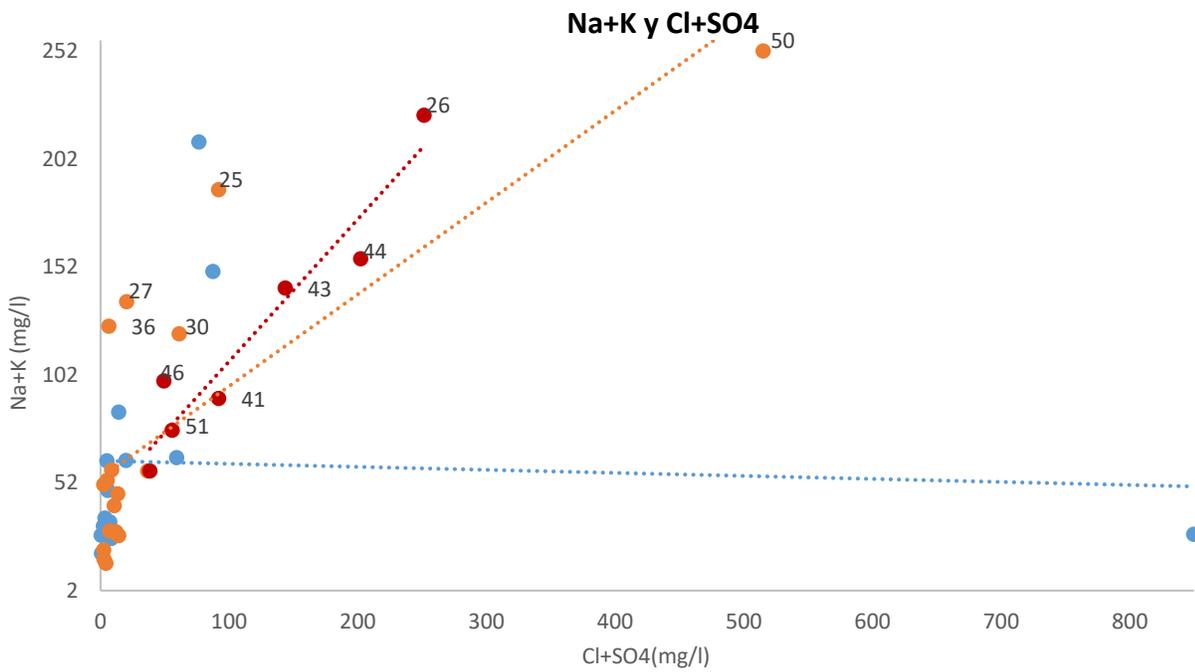
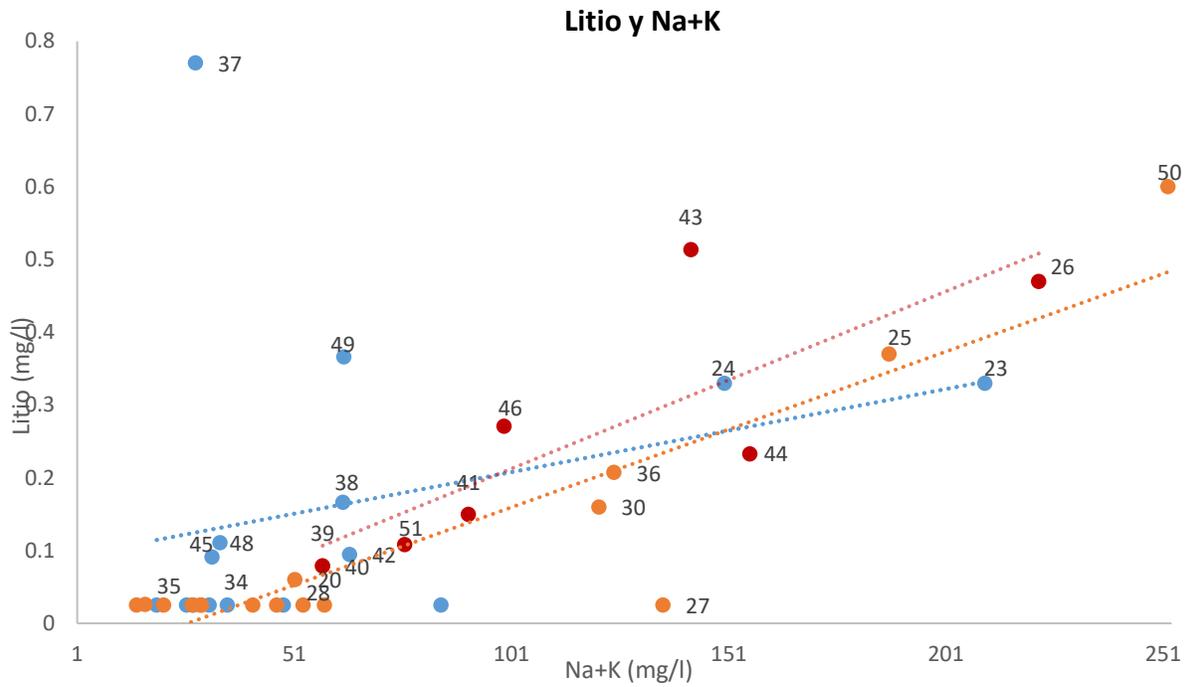
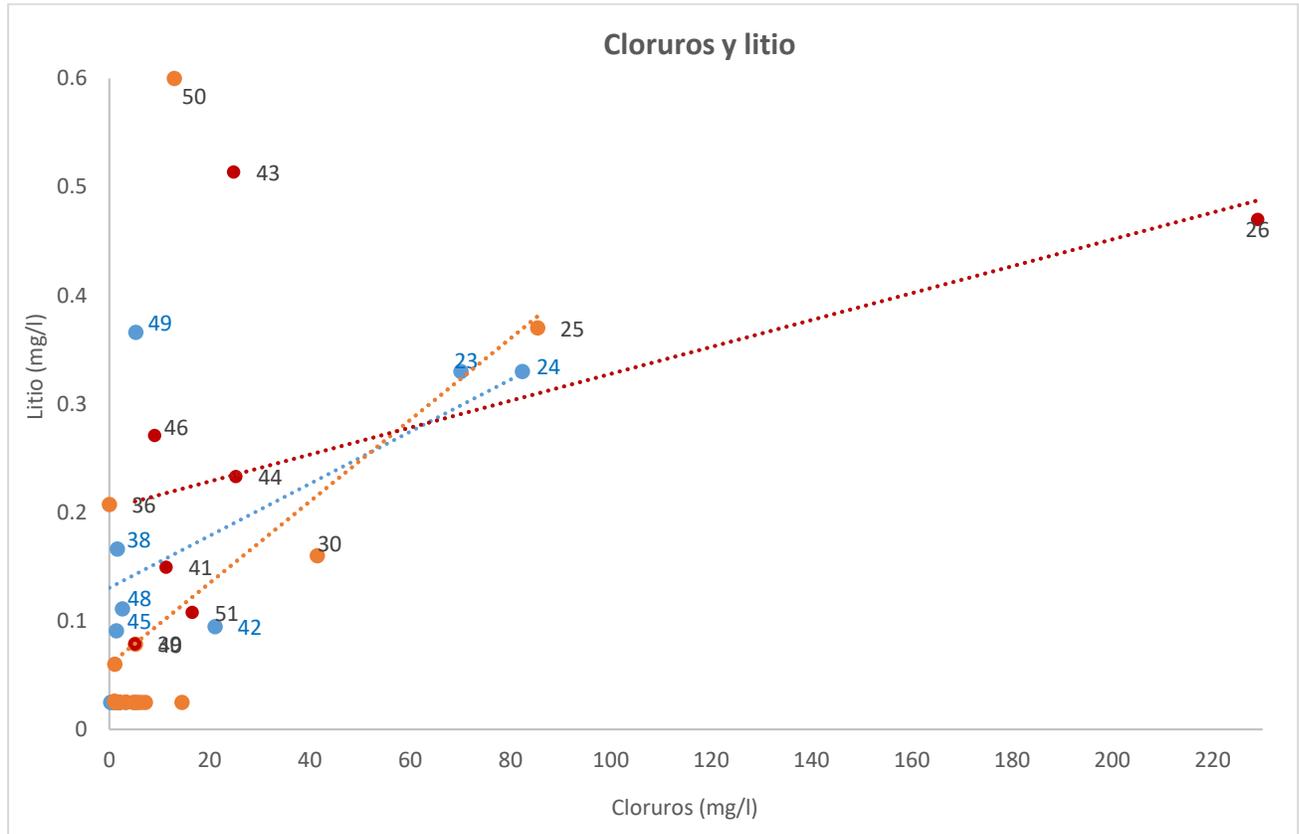


Imagen 18 Relaciones de sodio, potasio, sulfato, cloruro, litio y temperatura.

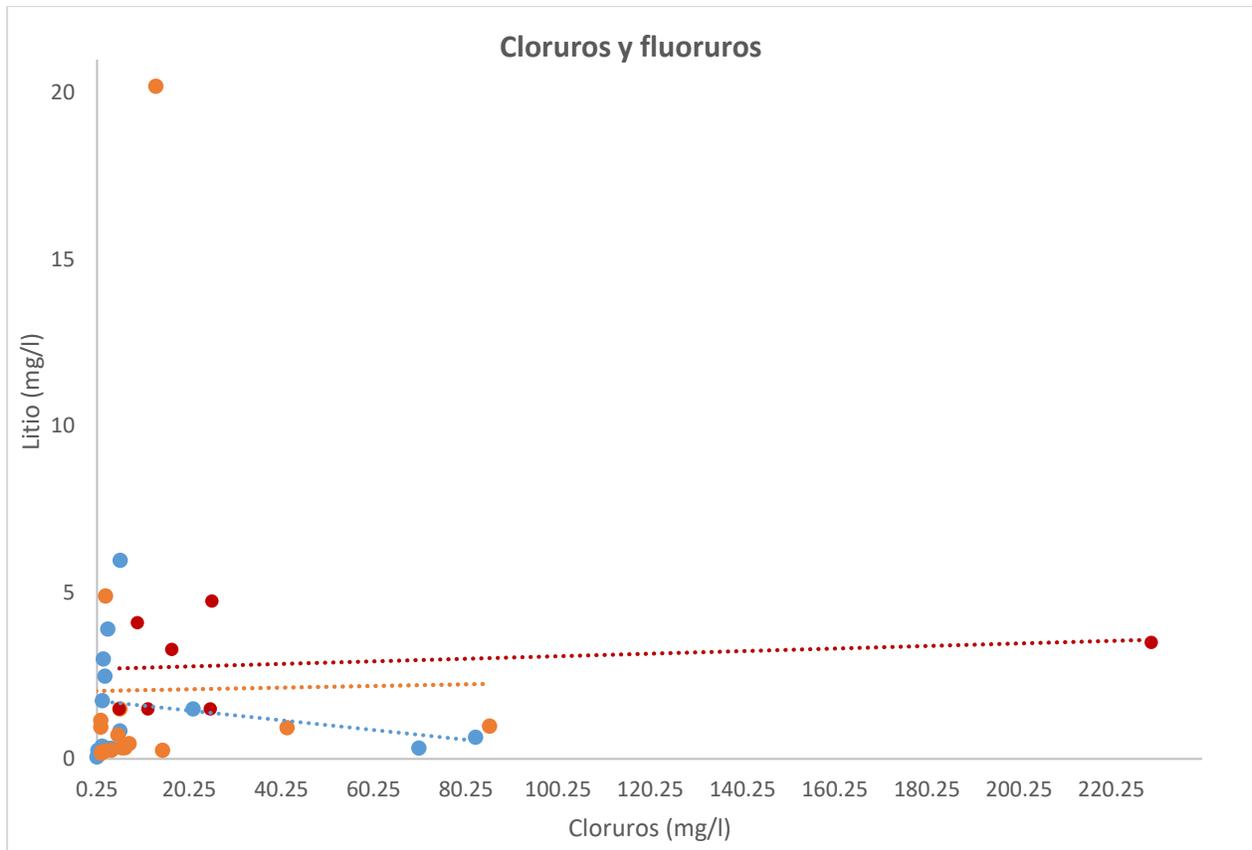
Cloruro, litio y fluoruro. – La relación de litio y cloruro respalda el comportamiento natural del tiempo de residencia subterránea del agua y su evolución geoquímica, permitiendo diferenciar con mayor detalle las facies. Por ejemplo, en el grupo extremo “termal” hay familias bicarbonatadas, pero con concentración de litio-cloruro mayor (0.26 Li, 45 Cl mg/l) respecto a las facies bicarbonatadas del grupo “agua fría” (0.12 Li, 17 Cl mg/l).



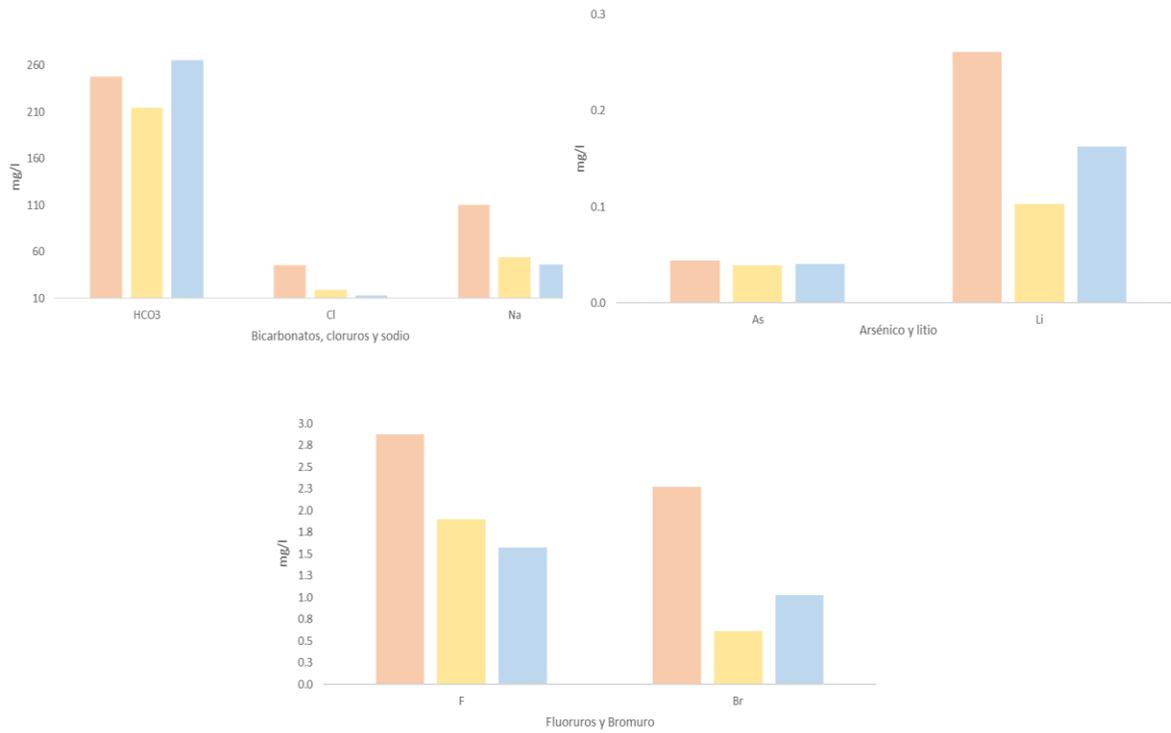
Gráfica 10 Relación del contenido de litio y cloruros en las muestras agrupadas por temperatura.

Es de resaltar que la muestra 37 (“agua fría”) registra la mayor concentración de litio (0.77 mg/l) y reporta cero en cloruros, siendo naturalmente imposible de suceder en la litosfera-ciclo del agua-biosfera (Rankama & Sahama, 1954); se considera un error de análisis o de reporte por parte del laboratorio del Instituto de Geología, UNAM, con esta misma situación se identifica la 36 que reporta cero de cloruros y 0.21 mg/l de litio. Eliminando tales datos, el comportamiento general es que la concentración del ion cloruro es directamente proporcional al contenido de litio, comportamiento que se considera representativo en el área, por el número y distribución de las muestras graficadas. En los grupos extremos, se observa que el “agua fría” presenta en general los valores más bajos de ambos iones, con excepción del subgrupo (23, 24, 37 y 49) el cuál además de presentar elevados contenidos de litio, como ya se había

observado anteriormente, registran concentraciones de cloruros muy por encima del promedio (21.7 mg/l), este subgrupo confirma que el registro de cero cloruros en la muestra 37 es un error de laboratorio; en el grupo extremo “termal” se reafirma que la muestra 39, 41 y 51 deban su temperatura a un flujo vertical profundo que asciende relativamente más rápido, posiblemente mediante alguna falla y/o fractura en las rocas granodioritas y granitos, resultando en un tiempo menor de residencia y con una composición “menos antigua” o “más joven” que las muestras 26, 43 (manantial), 44 y 46; la muestra 50 nuevamente resalta al presentar bajo contenido de cloruros, a pesar de su elevada concentración de litio, y con valores de C.E. y STD elevados. A pesar de las fallas en concentraciones de cloruros, la alta concentración de fluoruro es indicativo de la circulación rápida ascendente de agua proveniente de mayor profundidad.



Con la siguiente gráfica es sencillo observar las grandes diferencias entre los grupos extremos (fría y termal) y el comportamiento fisicoquímico del grupo intermedio (tibia-caliente), resulta ser “mezcla” de los grupos extremos.



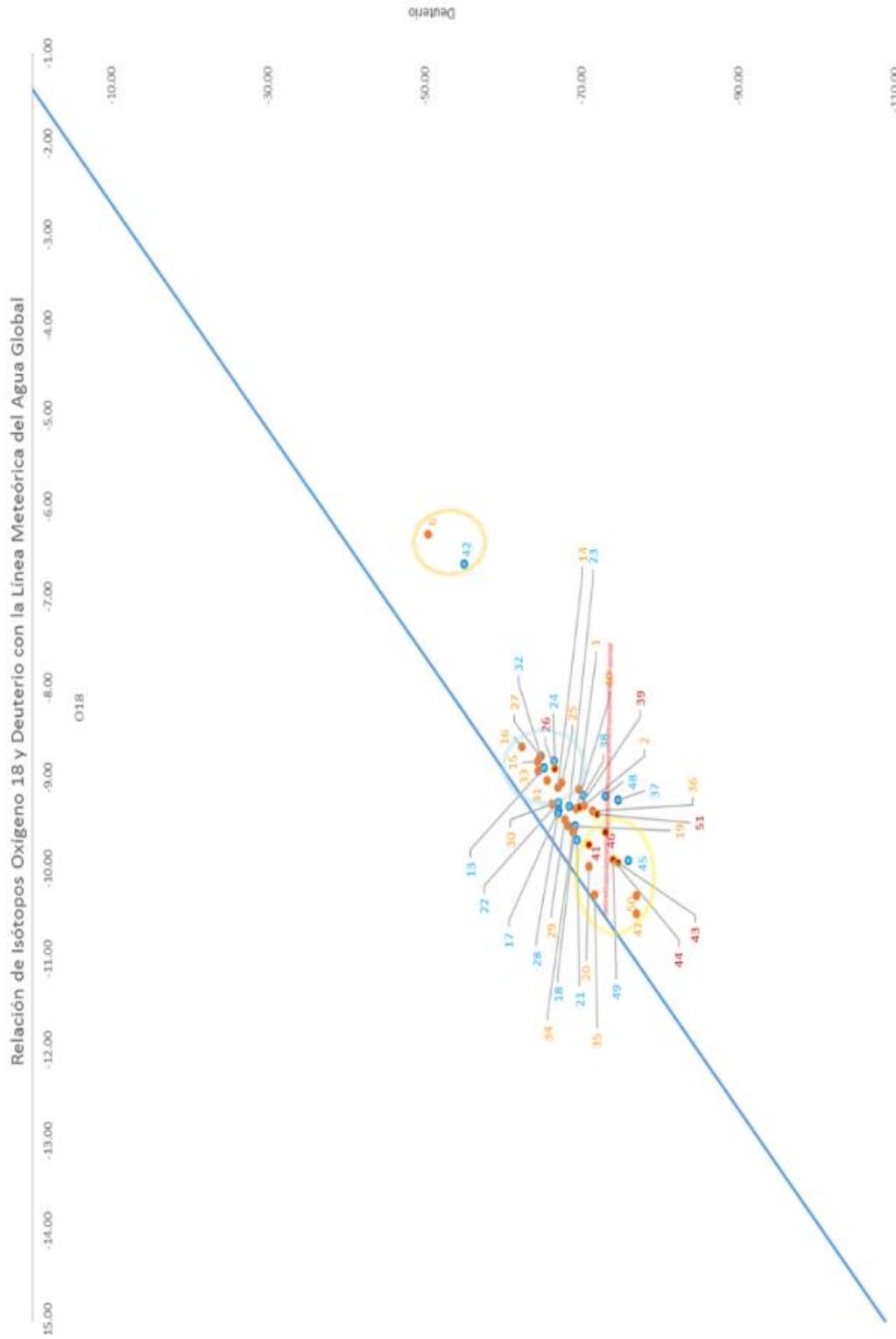
Gráfica 12 Comportamiento global de los grupos extremos de agua subterránea

Análisis isotópico. - Son 42 muestras que reportan la concentración relativa de los isótopos estables oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$ ‰) y deuterio ($\delta^2\text{H}$ ‰):

- La relación $\delta^2\text{H}$ ‰ - $\delta^{18}\text{O}$ ‰ con valores más negativos se registran principalmente en las muestras del grupo termal, lo que es un indicio de que corresponden a flujos de agua cuyas zonas de recarga se localizan en zonas más altas y/o en ambientes más fríos, respecto a su lugar y en comparación con el resto de las muestras.
- La relación $\delta^2\text{H}$ ‰ - $\delta^{18}\text{O}$ ‰ con valores menos negativos, se agrupan principalmente en el grupo de agua fría, indicando que pertenecen a flujos de agua cuya recarga tuvo lugar en los relieves más bajos y/o en los climas más cálidos respecto a su lugar de muestreo.
- Las muestras 6 y 42 (río Verde), presentan valores de un fraccionamiento isotópico mayor a causa de la evaporación; la evaporación en el río Verde es de esperarse debido a que es agua en contacto directo y constante con la atmósfera; en el caso de la muestra 6 que es extraída de un pozo, el fraccionamiento por evaporación puede ser a causa de que el agua meteórica, antes de infiltrarse y recargarse, se mantuvo en la superficie en condiciones que permitieron la evaporación, sin embargo, se desconoce el método de muestreo de la muestra 6.

ID	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰ -	ID	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰ -	ID	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰ -
13	-8.89	-65.21	29	-9.45	-67.82	15	-8.81	-64.40
17	-9.35	-67.06	33	-8.92	-64.46	19	-9.53	-68.27
37	-9.24554932	-74.6576221	34	-9.60	-68.88	14	-9.11	-66.96
49	-9.9	-74	6	-6.31	-50.40	27	-8.75	-64.67
28	-9.39	-66.98	30	-9.28	-66.27	40	-9.3381043	-69.3384204
32	-8.76	-64.80	35	-10.29	-71.62	46	-9.6	-73
42	-6.63676605	-55.0091249	2	-9.30	-70.30	39	-9.32070727	-69.7499982
38	-9.19248006	-70.2160341	20	-9.98	-70.93	26	-8.90	-66.52
18	-9.53	-69.18	50	-10.3	-77	51	-9.4	-72
48	-9.2	-73	31	-9.03	-65.58	43	-9.93355143	-74.6026597
21	-9.68	-69.39	16	-8.65	-62.37	44	-9.9	-74
22	-9.27	-67.06	25	-9.06	-67.45	41	-9.73212626	-70.9451369
45	-9.9	-76	36	-9.36283682	-71.4332896			
23	-9.31	-68.45	1	-9.12	-69.60			
24	-8.80	-66.52	47	-10.5	-77			

Tabla 23 Muestras con valores de deuterio y oxígeno 18.



Gráfica 13 Relación isotópica general respecto a la Línea Meteórica Global del Agua.

Veintiséis muestras reportan concentración de tritio, todas localizadas en el Zona Metropolitana de Guadalajara; el rango de valores de tritio es 0.3-2.0 UT, es decir, las muestras analizadas son provienen de una recarga ocurrida antes de 1952. Las muestras con menor UT son “más antiguas” de los tres grupos de temperatura (tibio y termal) y con una concentración promedio de litio ~0.11 mg/l, y el resto de las muestras se asocian a una recarga “más reciente” con una menor concentración de litio (~0.09 mg/l) y con temperaturas más frías.

ID	Temperatura	Tritio	Li	ID	Temperatura	Tritio	Li	ID	Temperatura	Tritio	Li
13	21.8	0.90	0.049	33	25.5	0.70	0.049	29	25.3	0.80	0.049
17	22.5	0.70	0.049	35	27.7	0.50	0.049	34	26.6	2.00	0.049
18	24.4	0.80	0.049	2	28	1.23 ± 0.79	Sin data	6	27	1.30 ± 0.83	Sin data
21	24.6	1.60	0.049	20	29.4	0.80	0.06	30	27.5	0.50	0.16
28	23.6	0.40	0.049	31	29.8	0.70	0.049	25	31.8	1.20	0.37
32	23.9	0.70	0.049	16	30	0.30	0.049	1	32	0.90 ± 0.75	Sin data
22	24.7	0.70	0.049	15	32.5	1.00	0.049	14	32.8	0.50	0.049
23	25	0.70	0.33	19	32.6	1.60	0.049	26	36.4	0.40	0.47
24	25	0.70	0.33	27	33.6	0.90	0.049				

Tabla 24 Muestras con valores de tritio (UT) y sus concentraciones de litio (Li mg/l) y temperatura (°C).

A continuación, se describen los patrones de comportamiento identificados en las muestras, distinguiendo grupos de agua y tipos de flujo:

Grupos propuestos	Muestras de agua	Tipo de valor de los parámetros	Medio de circulación propuesto							Distancia y tiempo de residencia relativa (mg/l)				Facies	
			Temperatura	pH	C.E.	STD*(mg/l)	Na+K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	HCO ₃	Cl	SO ₄	Li		
Agua fría	42	Rio Verde	Único	24	8.18	481	372.1	63.7	34.6	5.9	208.6	21.1	38.2	0.09	HCO ₃ -Na>Ca
	A	7,13,17,18,21,38,49	Rango	21-24.6	6.7-8.6	222-649	83-361	26.2-84.8	3.1-23.7	1.4-6.3	43.9-242.2	1.35-13	1.51-47	<0.05-0.36	HCO ₃ -Na, HCO ₃ -Na>Ca (M 49)
			Promedio	23	7.33	387.9	215.91	49.65	9.2	3.53	136.9	4.31	12.2	0.12	HCO ₃ >SO ₄ -Na (M 7)
	B	45 y 48	Único	24.4 y 24.8	7.2 y 7.5	371 y 307	286 y 328	32 y 34	50 y 41	4 y 4.3	199 y 239	1.42-2.6	0.94-4.6	0.09-0.11	HCO ₃ -Na>Ca
			Promedio	24.6	7.3	389	307	33	46	4.2	219	2	2.8	0.1	
	C	22,23,24,28,32	Rango	23.6-25	6.4-7.14	242-2310	136-1487	19.3-210	sep-58	4.7-103	102.5-1068	0.25-82.4	0.18-6.47	<0.05-0.33	HCO ₃ -Mg>Na, HCO ₃ -Na>Mg,
Promedio			24.4	6.8	1000.8	693	91.1	25	43.4	499.5	31.29	2.88	<0.16	HCO ₃ -Ca>Mg	
37	37	Único	22.8	7.3	1468	1379	28.2	329	22.2	149	0	849.8	0.77	SO ₄ -Ca	
Agua Tibia-caliente	D	2,4,8,10,15,16,19,20,27,31,33,35,36,40,47,50	Rango	25.5-33.7	6.3-9.2	105-1261	50-986	14-252	1.9-35	0-16	29.3-435.2	0-31	0-502	0.026-0.6	HCO ₃ -Na, SO ₄ >HCO ₃ -Na (M 50)
			Promedio	30.51	7.4	371	271.25	65.85	9.15	3.23	148.11	7.81	37.08	<0.11	HCO ₃ >Cl-Na (M 8)
	E	1,3,6,11,12,14,25,29,30,34	Rango	25.3-32.8	6.5-8	138.9-1792	147-1897	18-187.9	8.5-89.7	4.8-113	37-1415.2	1.2-124	1.06-19.6	<0.05-0.37	HCO ₃ -Na>Mg, HCO ₃ -Ca>Na
			Promedio	28.3	7.2	644	501.48	69.74	27.8	26.8	336.54	33.16	8.26	<0.136	HCO ₃ -Mg>Na, Cl-Ca>Na>Mg (M12)
	F	9 y 5	Único	27.28 y 27.5	6.5 y 7.8	130 y 516	98 y 379	2 y 38	3 y 58	10 y 16	55 y 216	22 y 51	6	Sin data	HCO ₃ >Cl-Ca>Na
			Promedio	27.5	7.1	323	238.5	20	30.5	13	135.5	36.5	Sin data		HCO ₃ >Cl-Mg
Agua termal	43	Manantial en Temacapulín	Único	40	9.1	743	498.4	142.3	3.9	0.1	208.6	24.8	118.7	0.51	HCO ₃ >SO ₄ -Na
	G	39,41,44,46,51	Rango	35.5-54	7.1-8.5	62-587	292-495	57.5-155.91	6-36.1	0.1-4.3	130.7-199.1	5.1-25.2	33.3-177	0.07-0.27	HCO ₃ -Na, HCO ₃ >SO ₄ -Na
			Promedio	42	7.9	404	365	96.03	14.7	1.5	165.5	13.42	74.04	0.17	SO ₄ >HCO ₃ -Na
26	26	Único	36.4	6.9	1900	1356	222.4	80.7	104	697.6	229	22.4	0.47	HCO ₃ >Cl-Mg>Na	

Tabla 25 Grupos de agua propuestos y sus principales características del medio subterráneo de circulación, distancia y tiempo de residencia relativa.

Agua fría. -

- Río Verde: la muestra 42 (Río Verde) registra el contenido de SO_4 más elevado (38.2 mg/l) del Grupo B y un contenido de Li de 0.094 mg/l, localizada muy cerca del manantial termal de Temacapulín (muestra 43), con un valor de Eh en 190 mV, registrado en campo. Es un agua de tipo bicarbonatada sódica cálcica y presenta una relación $\delta^2\text{H}$ -55 ‰ y $\delta^{18}\text{O}$ -6.63 ‰, característico de un agua evaporada, lo esperado en cuerpos de agua.
- Grupo A: registra 21-24.6°C, pH de 6.7-8.62, con un contenido promedio bajo de STD^* (215.91 mg/l), C.E. de 387.91 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en general presenta un contenido iónico bajo. Es un grupo de agua de tipo bicarbonatada sódica, sólo la muestra 7 registra una facie bicarbonatada sulfatada ($\text{HCO}_3 > \text{SO}_4\text{-Na}$). Este grupo presenta las características fisicoquímicas de un sistema de flujo de tipo local, que circula someramente en un medio rocoso más rico en sodio y calcio y de corto recorrido, a excepción de las muestras 7 y 49 que quizás son de mayor recorrido al presentar contenidos de Cl y SO_4 más elevados del grupo, sólo se conoce el valor de litio para la muestra 49 reportado en 0.366 mg/l, siendo la concentración más alta de litio de éste grupo; la muestra 7 no reporta contenido de litio y se considera con cierta reserva ya que es reportada por GEOEX S.A de C.V, (2003). Todas las muestras del grupo A reportan un contenido de tritio <2 UT, valor indicativo de un agua cuya recarga sucedió antes de 1952, por lo que su tiempo de residencia es mayor; la única muestra con registro de Eh es la 38, con un valor registrado en campo de 154 mV; El grupo A reporta un contenido promedio de $\delta^2\text{H}$ -68.33 ‰ y $\delta^{18}\text{O}$ -9.33 ‰.

ID muestra	Oxígeno 18	Deuterio	Tritio
7	Sin valor	Sin valor	Sin valor
13	-8.89	-65.21	0.9
17	-9.35	-67.06	0.7
18	-9.53	-69.18	0.8
21	-9.68	-69.39	1.6
28	-9.39	-66.98	0.4
32	-8.76	-64.80	0.7
38	-9.19	-70.22	Sin valor
49	-9.90	-74	Sin valor

Tabla 26 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el Grupo A.

- Grupo B: Se integra por dos muestras de pozos en Los Altos de Jalisco. Este grupo es similar al Grupo A, aparentemente circula en rocas más ricas en calcio, como en rocas basaltos, siendo el contenido de calcio que aumenta, en promedio, de 9 a 46 mg/l; ninguna muestra de este grupo registra valor de potencial redox (Eh). En términos de la posible distancia y tiempo de residencia relativa del agua es similar al Grupo A; se interpreta como un sistema de flujo de tipo local, que circula cercano a la superficie, reporta un contenido promedio de $\delta^2\text{H}$ -68 ‰ y $\delta^{18}\text{O}$ -8.57 ‰, valores menos negativos respecto al Grupo A, lo que sugiere que su recarga sea la misma o no que el Grupo A, pero que se presenta en altitud ligeramente menos elevada y/o con temperatura más cálida, estas muestras no fueron sujetas a análisis de tritio.

ID muestra	Oxígeno 18	Deuterio	Tritio
45	-9.9	-76	Sin valor
48	-9.2	-73	Sin valor

Tabla 27 Relación de deuterio y oxígeno 18 en el Grupo B.

- Grupo C: se conforma por muestras de agua fría en el Zona Metropolitana de Guadalajara, que en promedio tienen una temperatura de 24.4 °C con un pH promedio de 6.82, siendo el grupo más ácido de todas las muestras en el área de estudio, con una C.E. elevada comparable con valores de agua termal (> 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Este grupo aparentemente circula por ignimbritas y lavas riolíticas distintas que el Grupo A y B, al revisar los contenidos de magnesio, sodio y potasio, lo cual se manifiesta al predominar facies de tipo bicarbonatada magnésica. Es de notar que en éste hay dos muestras de agua que registran un contenido de litio en 0.33 mg/l de facie bicarbonatada magnésica. El contenido de cloruros es mucho mayor que el promedio indicado en el A y B, así como del promedio de las muestras de “agua fría”; ninguna muestra de este grupo registra valor de potencial redox (Eh). Este grupo clasifica como un sistema de flujo de agua de tipo local, pero de mucho mayor recorrido y cercano a la superficie. El Grupo C reporta un contenido promedio $\delta^2\text{H}$ -66.76‰ $\delta^{18}\text{O}$ -9.10 ‰ y reporta 0.64 UT en promedio, lo que sugiere que el agua fue recargada antes que la del Grupo A, en un ambiente de menor elevación y/o clima menos frío que el A y el B.

ID muestra	Oxígeno 18	Deuterio	Tritio
22	-9.27	-67.06	0.7
23	-9.31	-68.45	0.7
24	-8.80	-66.52	0.7
28	-9.39	-66.98	0.4
32	-8.76	-64.80	0.7

Tabla 28 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el Grupo C.

- Muestra 37, “San Juan de los Lagos”: agua extraída de un pozo en Los Altos de Jalisco con una temperatura de 22.8 °C, pero con características fisicoquímicas muy diferentes a los otros grupos de agua fría con una facie hidrogeoquímica sulfatada cálcica que en el diagrama de Piper (Imagen 16) claramente se observa que forma parte de un sistema de flujo diferente a los otros

identificados en el área de estudio. Inclusive aparenta ser un agua que circula por rocas diferentes al presentar la concentración de calcio más elevada del estudio (329.9 mg/l) concomitante con el valor más alto registrado de estroncio (3.307 mg/l); su potencial redox (Eh) se registró en campo en 142 mV; también reporta los valores más elevados del estudio en STD (1379 mg/l), C.E. (1468 $\mu\text{S/cm}$), SO_4^{2-} (849 mg/l) y litio con 0.77 mg/l, y sus concentraciones de bicarbonatos y Na+K son las menores de los grupos de agua fría. Su concentración de cloruros fue reportada en cero por el laboratorio de la UNAM, lo que claramente es un error del laboratorio. Reporta un contenido $\delta^2\text{H}$ -74.65‰ y $\delta^{18}\text{O}$ -9.24 ‰, relación isotópica muy cercana al Grupo B (Los Altos de Jalisco), lo que sugiere similitud de las zonas de recarga de estos sistemas de flujo. La muestra de San Juan de Los Lagos se propone como un sistema de flujo regional superficial, por su largo recorrido o elevado tiempo de residencia y su baja temperatura, su contenido de litio es mucho mayor que para las temperaturas termales observadas, su contenido de estroncio y calcio sugieren contacto extenso de esta agua con roca como el granito o ultra-básicas; sin eliminar los fósiles incluidos en roca caliza.

En términos del potencial redox, las dos muestras con registros de Eh están en valores mayores al promedio del registro del total de las ocho muestras con registro de su potencial, siendo valores más positivos lo cual es de esperar en flujos de tipo local.

Agua tibia-caliente. -

- Grupo D: grupo integrado por la mayoría de las muestras preagrupadas en “tibia-caliente”, es decir, muestras intermedias entre los grupos extremos “agua fría” y “agua termal”. Es un grupo con una temperatura promedio de 30.5 °C, 6.8 °C más que el promedio de los flujos locales superficiales A, B, C y 37. Aparentemente, el agua de este grupo circula por medios rocosos del tipo de andesitas, riolitas e ignimbritas similares a los grupos extremos, en rocas con contenido mayor en Na+K y Ca^{2+} , lo cual tiene sentido al considerar que

ID muestra	Oxígeno 18	Deuterio	Tritio
33	-8.92	-64.46	0.7
35	-10.29	-71.62	0.5
2	-9.30	-70.30	1.23 ± 0.79
20	-9.98	-70.93	0.8
50	-10.30	-77.00	
31	-9.03	-65.58	0.7
4			
16	-8.65	-62.37	0.3
8			
10			
36	-9.36	-71.43	
47	-10.50	-77.00	
15	-8.81	-64.40	1
19	-9.53	-68.27	1.6
27	-8.75	-64.67	0.9
40	-9.34	-69.34	

Tabla 29 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el Grupo D.

este grupo de muestras de pozos con temperatura intermedia, contiene mezcla de agua de flujos local superficial y flujos regionales profundos, y que la estratigrafía regional se caracteriza por que

en cercanía a la superficie dominan los basaltos y andesitas (mayor contenido de Ca^{2+} , Fe y Mg^{2+}), y a mayor profundidad el agua puede circular por rocas como riolita, andesita y granito (ricas en Na^+ y K^+). El Grupo D, se caracteriza por presentar valores más altos en la concentración de Cl^- y Li^+ respecto a los grupos A, B y C clasificados como flujos de tipo local, lo anterior indica que hay mezcla de flujos con un mayor recorrido y/o tiempo de residencia, lo cual es congruente con la temperatura más elevada. Es un grupo en el que se manifiestan diferentes facies hidrogeoquímicas como: $\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Na}$ y $\text{HCO}_3\text{>Cl-Na}$, lo cual es un indicador de una mezcla de flujos locales superficiales y flujos regionales o un sistema de flujo intermedio, es decir, que presenta valores intermedios entre los sistemas local y regional. De forma grupal, de acuerdo con los valores isotópicos, el Grupo D es un sistema de flujo cuya recarga sucedió antes de 1952 pero antes que la recarga del sistema de flujo del Grupo A y el Grupo C, su relación $\delta^2\text{H}$ -69.02‰ y $\delta^{18}\text{O}$ -9.44 ‰, expresa que la recarga se presentó en una mayor altitud y/o en un ambiente más frío respecto al C y el B, con similitud al Grupo A.

- Grupo E: lo integran muestras preagrupadas en “tibia-caliente” todas recolectadas en el Zona Metropolitana de Guadalajara. Es un grupo con una temperatura promedio de 28.3°C, con 4 °C más que el promedio de los flujos locales superficiales A, B, C y 37, pero menos caliente que el sistema de flujo intermedio del Grupo D. El Grupo E circula en un medio rocoso constituido por riolitas y granitos con un mayor contenido de Na^+ + K^+ y Mg^{2+} respecto al promedio global de los de circulación de los flujos locales, y posiblemente similar a las rocas ignimbritas y riolitas del Grupo C. Presenta valores altos de bicarbonatos, concentraciones de litio ligeramente mayor a los grupos A, B y C, pero mucho más elevados en cloruro y bicarbonato respecto a dichos grupos. Este grupo presenta facies desde bicarbonatadas hasta cloruradas, magnésicas, sódicas y cálcicas ($\text{HCO}_3\text{-Na>Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca>Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Mg>Na}$, Cl-Ca>Na>Mg) lo que es característico de mezclas de flujos distintos que circulan por diversos tipos de rocas félsicas y máficas. De acuerdo con los valores isotópicos, el Grupo E es un sistema de flujo cuya recarga sucedió antes de 1952 y es más reciente que el de los grupos A, B, C y D, su relación $\delta^2\text{H}$ -65.34‰ y $\delta^{18}\text{O}$ -8.84‰ expresa que la recarga sucedió en una menor altitud y/o en

ID muestra	Oxígeno 18	Deuterio	Tritio
29	-9.45	-67.82	0.8
12			
34	-9.60	-68.88	2
3			
6	-6.31	-50.40	1.30 ± 0.83
11			
30	-9.28	-66.27	0.5
25	-9.06	-67.45	1.2
1	-9.12	-69.60	0.90 ± 0.75
14	-9.11	-66.96	0.5

Tabla 30 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el grupo E.

un ambiente más cálido respecto a los grupos anteriores. El Grupo E se asocia a un sistema de flujo de mezcla por ser todas muestras extraídas de pozos en operación.

- Grupo F: este grupo se creó por dos muestras en el Zona Metropolitana de Guadalajara (GEOEX S.A de C.V, 2003-2004) con valores intermedios de temperatura (27.28- 27.5 °C), pero por su contenido de cationes difiere mucho del resto de las muestras localizadas tanto en el Zona Metropolitana como del total de las muestras del presente estudio, lo cual podría deberse a ser un flujo de temperatura intermedia y que circula por rocas muy ricas en calcio y magnesio, como los basaltos. Sus dos facies son $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{Ca} > \text{Na}$ y $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{Mg}$, lo que sugiere que son muestras de un flujo con mayor recorrido, si se considera la concentración de cloruros, ya que no reportan contenido de litio ni isotopos.

Agua termal. -

- Manantial termal “Temacapulín” (43): es una muestra de agua de un manantial en Los Altos de Jalisco, que registró una temperatura de 40 °C (temperatura ambiental de 25 °C), pH de 9.15 (el más alcalino del total de las muestras), con un valor Eh en 80 mV (siendo el segundo valor más bajo, del total de los registros en los Altos de Jalisco) en los flujos de tipo regional el potencial redox suelen ser valores bajos o negativos; circulando por un medio rocoso similar al Grupo G (rocas ricas en sodio y potasio como las graníticas, registra una facie $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Na}$, y concentración de sulfato y litio mayor al promedio del resto de las muestras termales, con 0.51 mg/l de litio, es el segundo valor más elevado del presente estudio, después de la muestra 37 con 0.77 mg/l de litio y 22.8°C (flujo regional superficial). Su temperatura, contenido de litio y facie hidrogeoquímica, permite clasificar que este manantial es una manifestación superficial directa de una zona de descarga de un sistema de flujo de tipo regional. Su relación isotópica $\delta^2\text{H} -74.60\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O} -9.93\text{‰}$ es indicativa de una recarga en zonas altas y/o en un ambiente más frío respecto al promedio de todos los grupos analizados, muy similar a las muestras 44, 45 y 49 (pozos en Los Altos de Jalisco). No fue sometida a análisis de contenido de tritio.
- Grupo G: agrupa cinco muestras (pozos en los Altos de Jalisco) de las 7 muestras con temperaturas termales. Con temperaturas de 35.5 a 54 °C, incluye la temperatura termal menor y la mayor registrada del estudio; la muestra 39 registra el Eh más positivo registrado en campo (212 mV); sus valores

ID muestra	Oxígeno 18	Deuterio	Tritio
46	-9.60	-73.00	Sin valor
39	-9.32	-69.75	Sin valor
51	-9.40	-72.00	Sin valor
44	-9.90	-74.00	Sin valor
41	-9.73	-70.95	Sin valor

Tabla 31 Relación de deuterio, oxígeno 18 y tritio en el grupo G.

promedio de C.E, STD, cloruros y litio no son muy altos, sugiere una circulación del agua con mayor velocidad y que quizás llega a transitar a través de fallas y/o fracturas, aparentemente en rocas ricas en Na^+ K^+ , como ignimbritas y riolitas de similar composición al Grupo C, pero a mucha mayor profundidad, reflejado en la diversidad de facies ($\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{>SO}_4\text{-Na}$ y $\text{SO}_4\text{>HCO}_3\text{-Na}$) y con un pH 7.95, segundo valor promedio más alcalino. Al ser muestras de pozos, no se puede asegurar que en las muestras de este grupo no haya captado mezcla con flujos locales o intermedios. Lo que sí es que este grupo es característico de flujos de tipo regional, que deben alcanzar una gran profundidad con menor tiempo de residencia relativa. De forma grupal, su relación isotópica es $\delta^2\text{H} -71.93\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O} -9.59\text{‰}$ por lo que su recarga sucedió en una zona más alta y/o en un ambiente más frío respecto a todos los grupos anteriores.

- Muestra 26: indica que el medio de circulación es distinto al resto de las muestras con temperatura termal, su contenido de magnesio es el más elevado del total de las muestras (104 mg/l), al igual que las muestras 23 y 24 (103 y 92.9 mg/l, respectivamente) del Grupo C clasificado como sistema de flujo local superficial y también localizadas en la Zona Metropolitana de Guadalajara, sugiere que ambos tipos de flujo circulan por rocas de tipo basalto-andesitas del mismo tipo o muy similares, pero a diferente profundidad ya que la muestra 26 registró una temperatura de 36.4°C y las muestras 23 y 24 reportan 25°C ; otra similitud entre estas muestras es el elevado valor de C.E ($>1000 \mu\text{s/cm}$); la muestra 26 reporta contenido elevado de cloruros, sulfatos y litio (229, 22.4 y 0.47 mg/l, respectivamente), el contenido de cloruros es el más alto del total de muestras y el litio, es la tercer concentración elevada; reporta una facie $\text{HCO}_3\text{>Cl-Mg}>\text{Na}$; su relación isotópica $\delta^2\text{H} -66.52\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O} -8.89\text{‰}$ alude que su recarga sucedió en una zona más alta y/o en un ambiente más frío respecto al Grupo E pero a menor altura y/o en un ambiente más cálido que la mayoría del resto de los grupos, muy parecida a las zonas de recarga de la muestra 13 (flujo local) y 33 (flujo intermedio); reporta un valor de tritio en 0.4 UT, es decir, es de las muestras cuya recarga es muy anterior a 1952, siendo una de las tres muestras más antiguas, al igual que las de las muestras 16 (flujo intermedio) y 28 (flujo local). La muestra 26 se asocia en forma relativa a un sistema de flujo de tipo regional, de mayor profundidad respecto al resto de las muestras y con un alto tiempo de residencia relativo y mayor, respecto al Grupo G.

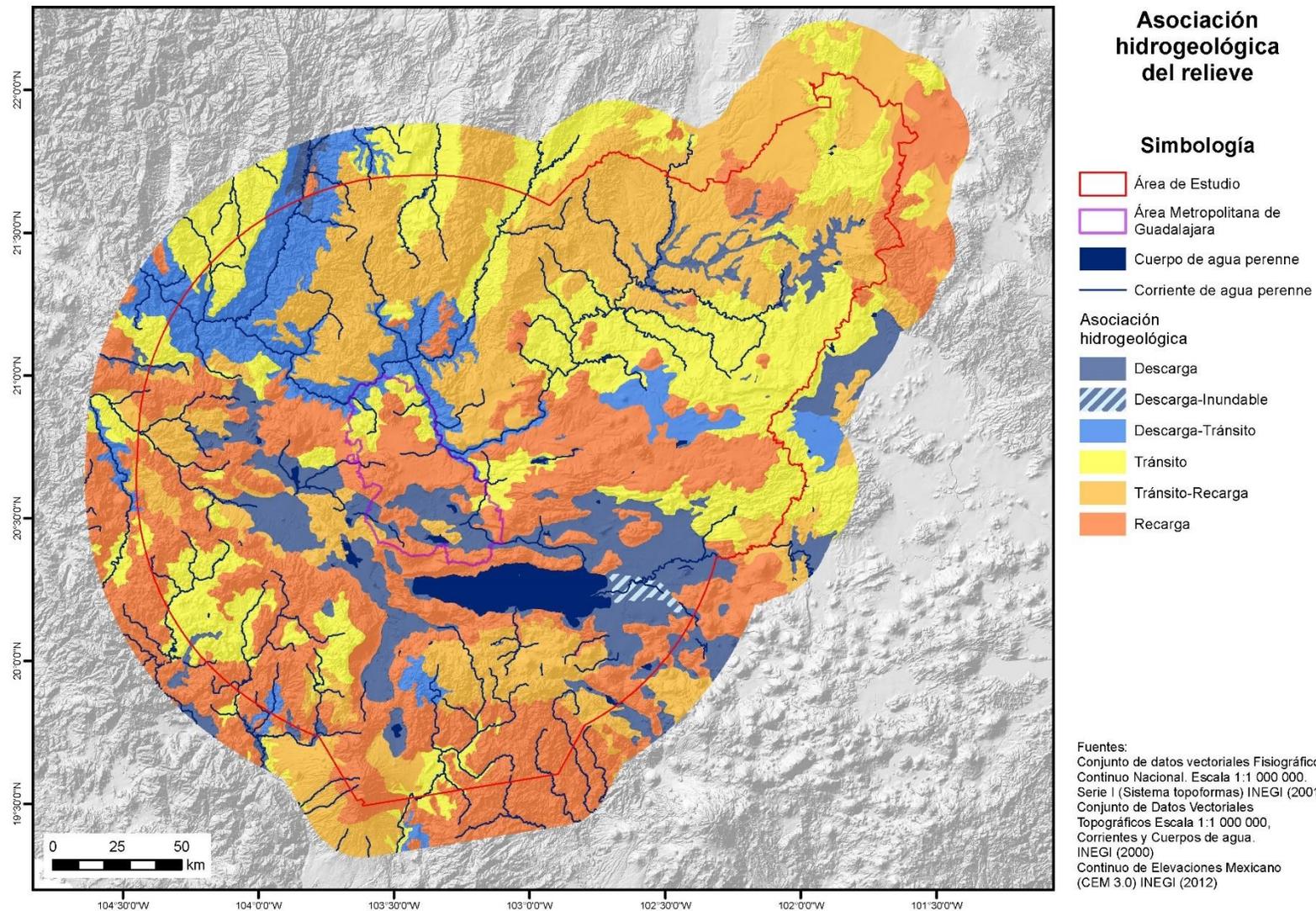
Análisis de indicadores de sistemas de flujo en superficie

A continuación, se presentan los resultados de los indicadores en superficie, expresando las evidencias de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos del agua. Los indicadores en superficie definidos son: *i) agua natural perenne en superficie; ii) profundidad subterránea del agua; iii) suelo; iv) vegetación y usos del suelo; y v) relieve y topoformas.*

Asociación hidrogeológica del relieve. – Con base en las características geomorfológicas del relieve, 51 tipos de topoformas que clasifican en las 6 categorías propuestas en Kachadourian-Marras *et al.*, 2020 (*Recarga, Tránsito-Recarga, Tránsito, Descarga-Tránsito, Descarga, Descarga-Inundable*) que conforme a sus características geomorfológica apuntan a ser territorios propicios dónde se presentan los siguientes procesos y manifestaciones de sistemas de flujo regional: *i) 13%, descarga; ii) 8%, descarga-tránsito; iii) 57%, recarga y/o recarga-tránsito; y iv) 21%, tránsito.*

De acuerdo con Tóth (2009), algunas características de los patrones de flujo factibles en el contexto topográfico en el área de estudio son: *i) en sierras, se pueden generar flujos intermedio o regional, cuya descarga llegue a las mesetas; ii) en lomeríos y mesetas con lomeríos, prevalecen los sistemas locales y se desarrollan sistemas intermedios que descargan predominantemente en las llanuras o amplios valles; iii) la extensión relativa de las zonas de descarga y recarga depende de la morfología particular de cada sub ambiente en el área de estudio, pero esquemáticamente en el contexto regional se puede considerar una relación Recarga/Descarga ~1; iv) el flujo intermedio - regional entre valles o lomeríos es raro.*

El contexto topográfico del área de estudio y su asociación hidrogeológica, se visualiza en el siguiente mapa en el que se aprecian: los cuerpos de agua relevantes (Escala 1:250 000 y 1:50 000) coinciden con topoformas regionales (Escala 1: 1 000 000) asociadas a zonas de descarga, descarga-tránsito, descarga-inundable; que, en relieves de cañones, se presentan ríos perennes, que como ya se explicó anteriormente, son zonas en las que domina la descarga por tramos; y donde las zonas y topoformas responden a los esquemas de patrones de flujo (Tóth, 2009).



Mapa 9 Relieve y su asociación por zonas de los sistemas de flujo.

Asociación hidrogeológica de las topoformas (escala 1:1 000 000)			
Zonas	Área de estudio	Zonas	Área de estudio
Tránsito	21%	Recarga	29%
MESETA BASALTICA	0.9%	DOMO VOLCANICO	0.7%
MESETA BASALTICA CON CANADAS	2.6%	ESCUDO VOLCANES	3.1%
MESETA BASALTICA CON LOMERIO	8.0%	LLANURA DESERTICA	0.3%
MESETA BASALTICA ESCALONADA	0.5%	LOMERIO DE BASALTO	3.7%
MESETA BASALTICA ESCALONADA CON LOMERIO	0.5%	LOMERIO DE BASALTO CON CANADAS	1.5%
MESETA TIPICA	1.8%	LOMERIO TIPICO	0.3%
SUPERFICIE DE GRAN MESETA CON VALLES	0.5%	SIERRA ALTA COMPLEJA	2.9%
VALLE DE LADERAS ESCARPADAS	0.2%	SIERRA ALTA ESCARPADA CON MESETAS	0.3%
VALLE DE LADERAS ESCARPADAS CON LOMERIO	0.5%	SIERRA BAJA	0.7%
VALLE DE LADERAS TENDIDAS	2.2%	SIERRA CON LADERAS DE ESCARPA DE FALLA	5.0%
VALLE DE LADERAS TENDIDAS CON CANADAS	0.3%	SIERRA CON LADERAS DE ESCARPA DE FALLA CON MESETAS	1.0%
VALLE INTERMONTANO CON LOMERIO	1.9%	SIERRA VOLCANICA CON ESTRATO VOLCANES	0.7%
VALLE RAMIFICADO	0.6%	SIERRA VOLCANICA CON ESTRATO VOLCANES O ESTRATO VOLCANES AISLADOS	2.5%
Tránsito- Recarga	28%	SIERRA VOLCANICA DE LADERAS ESCARPADAS	5.0%
LLANURA DESERTICA DE PISO ROCOSO O CEMENTADO	1.6%	SIERRA VOLCANICA DE LADERAS ESCARPADAS CON CANADAS	0.8%
LOMERIO DE ALUVION ANTIGUO	8.0%	SIERRA VOLCANICA DE LADERAS TENDIDAS CON CANADAS	0.1%
LOMERIO DE ALUVION ANTIGUO CON CANADAS	0.1%	SIERRA VOLCANICA DE LADERAS TENDIDAS CON LOMERIO	0.0%
LOMERIO DE BASALTO CON LLANURAS	3.3%	SIERRA VOLCANICA DE LADERAS TENDIDAS CON MESETAS	0.3%
LOMERIO DE PIE DE MONTE	0.4%		
LOMERIO DE TOBAS	0.9%		
LOMERIO DE TOBAS CON CANADAS	0.2%	Descarga	13%
SIERRA ALTA CON MESETAS	10.0%	DEPRESION	0.1%
SIERRA VOLCANICA CON ESTRATO VOLCANES O ESTRATO VOLCANES AISLADOS CON LLANURAS	0.0%	LLANURA ALUVIAL	8.9%
SIERRA VOLCANICA CON ESTRATO VOLCANES O ESTRATO VOLCANES AISLADOS CON MESETAS	0.2%	LLANURA ALUVIAL DE PISO ROCOSO O CEMENTADO	1.0%
SIERRA VOLCANICA DE LADERAS TENDIDAS	2.9%	CUERPO DE AGUA	2.7%
SIERRA VOLCANICA DE LADERAS TENDIDAS CON LLANURAS	0.4%	VASO LACUSTRE SALINO	0.4%
Descarga-tránsito	8%		
CANON TIPICO	6.6%		
LLANURA DE PISO ROCOSO O CEMENTADO	1.1%	Descarga-inundable	0.4%
VALLE DE LADERAS TENDIDAS CON LOMERIO	0.5%	VASO LACUSTRE INUNDABLE Y SALINO	0.4%
Gran total 99%			

Tabla 32 Asociación hidrogeológica de las topoformas en el área de estudio.

Con base en su forma, origen y desarrollo, las topoformas continentales se ajustan a una primera asociación de zonas de descarga o recarga:

Topoformas asociadas a zonas de descarga: *Valle, llanura y meseta*

Topoformas probables en zonas de recarga: *Sierra, montaña, lomerío.*

- Las siguientes topoformas son estructuras del relieve en donde pueden producirse diversas dinámicas de circulación subterránea (recarga, descarga, tránsito): *cañón, lomerío bajo.*

Tipos de fase asociados a zonas de descarga:

- *Inundable: Sumersión de la zona por efecto de un ascenso temporal del nivel de un río largo o del mar*
- *Salina: Zona con un alto contenido en sales.*

Tipos de ubicación asociados a zonas de descarga:

- *Deltaico: Que se encuentra a las orillas de un río en forma de la letra griega Delta*
- *Vaso lacustre: Depósito que contiene agua.*

Tipos de material de depósito asociados a zonas de descarga:

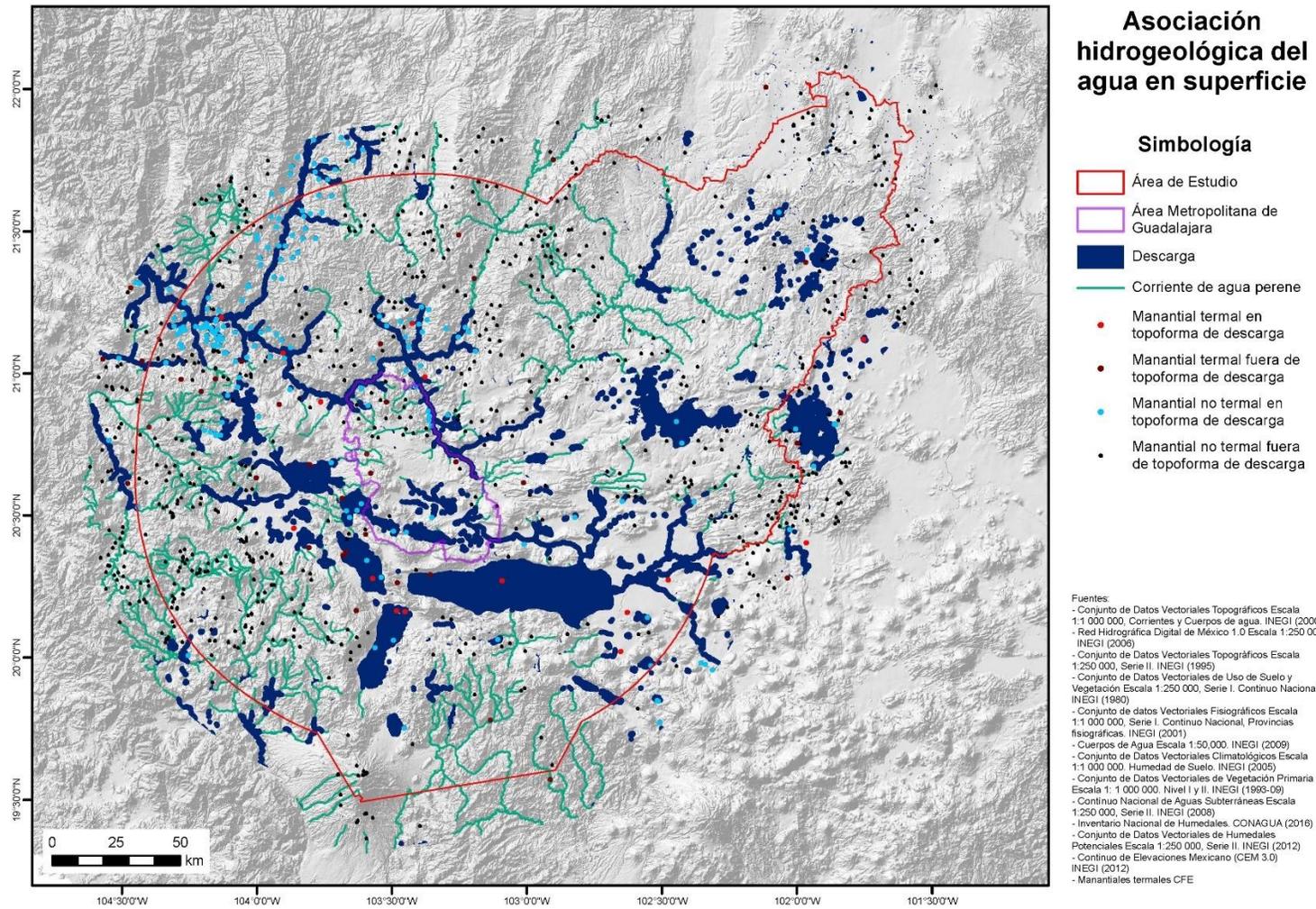
- *Aluvial: Material fragmentario no consolidado, transportado y depositado por corrientes de agua*
- *Aluvión antiguo: Material fragmentario semiconsolidado*
- *Lacustre o depósito lacustre: Depósito de un lago.*

Los materiales de depósito lacustre son indicativos de que el origen y desarrollo en el pasado y/o presente tienen relación directa con descarga de sistemas de flujo de agua subterránea.

La asociación de las topoformas es una primera estimación de lo que potencialmente puede estar sucediendo en el marco de sistemas de flujo regionales, los cuales incluyen sistemas intermedios y locales. Por ejemplo, una montaña tiene la función de una zona de recarga regional y al mismo tiempo se presentan, en la misma estructura de montaña, zonas de tránsito y/o descarga de sistemas de flujo local/intermedio.

Es importante precisar que los valles, planicies, deltas y terrazas de inundación de los ríos son zonas de descarga regional de agua subterránea, en donde coexisten sistemas locales asociados. Es decir, se presentan de forma integrada zonas de recarga, tránsito y descarga de sistemas de flujo de tipo local o menor. Aumentando el grado de complejidad sistémica de la dinámica hidrológica de los ríos.

Asociación hidrogeológica del agua perenne en superficie. - El 14.6% del área de estudio, registra en la superficie agua perenne. Los lagos, lagunas, pantanos y/o zonas de inundación natural, así como los manantiales que son manifestaciones en la superficie que directamente se asocian a procesos o manifestaciones de descarga de flujos de agua subterránea. La presencia de manantiales termales próxima a los cuerpos de agua (perennes o semiperennes), respalda una descarga de tipo regional. El Mapa 10 es resultado de integrar los atributos seleccionados de 15 cartas temáticas. Se aplicó un *buffer* de un kilómetro a: *i)* manantiales en topoformas asociadas a descarga, descarga-inundable y descarga-transito; *ii)* cenotes con profundidad somera (menor o igual a 3 metros) en topoformas asociadas a *descarga, descarga-inundable* y *descarga-transito*; *iii)* pozos y norias con profundidad somera (menor o igual a 3 metros) en topoformas asociadas a descarga, descarga-inundable y descarga-transito; y *iv)* *cuerpo de agua perenne, lagos, lagunas, humedales, ríos perennes, zona inundable, poza, fango, marisma, terreno sujeto a inundación* y *salina* en topoformas asociadas a descarga, descarga-inundable y descarga-transito. Lo anterior auxilia en la representación de que, si en la superficie hay permanencia de agua en un relieve bajo, plano y/o inundable, estarán sucediendo en las inmediaciones fenómenos y manifestaciones ambientales resultantes de la descarga de agua de sistemas de flujo de agua gravitacionales. También, se expresan los manantiales clasificados en términos de su temperatura y respecto a la clasificación topográfica, previamente descrita.



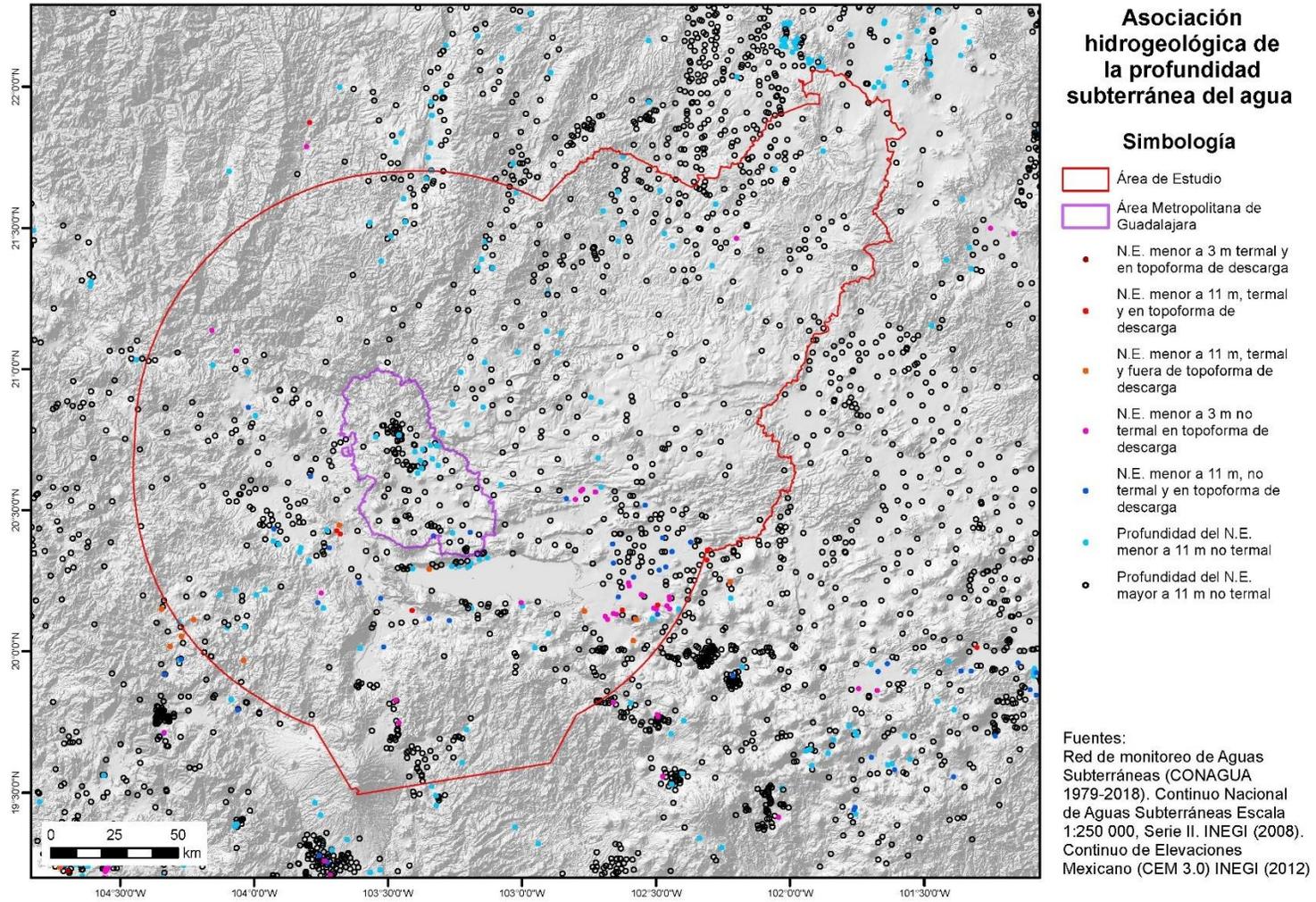
Mapa 10 Asociación hidrogeológica de los rasgos hidrográficos en el área de estudio.

Algunos de los principales lagos: de Chapala, de Atotonilco, y lagunas: de Cajititlán, Sayula, San Marcos y Zapotlán; los ríos principales como: el Lerma, Grande de Santiago, Calderón, Zula, Verde, El Valle, San Miguel, San Juan de Los Lagos, San Isidro y Juchipila. Así como algunos valores del atributo “humedal”, se refieren a actuales presas localizadas en ambientes que originalmente eran dominados por lagunas o ríos perennes (indicadores de zona de descarga), como en el caso de la presa La Vega (antigua laguna La Vega) y Presa Magdalena (antigua laguna Magdalena).

Profundidad del agua subterránea. – El mapa 11 es resultado del análisis de la profundidad del nivel estático y la asociación hidrogeológica de las topoformas, que expone la localización de los pozos y/o norias clasificadas acorde con las siguientes características: profundidad del nivel estático (metros), termalismo (temperatura alóctona) y localización en topoformas asociadas a zonas de *descarga*, *descarga-inundable* y *descarga-tránsito de agua* subterránea. Los atributos que contiene este mapa son:

- I. Profundidad del nivel estático menor a 3 metros, termal y en topoforma de descarga
- II. Profundidad del nivel estático menor a 3 metros, no termal y en topoforma de descarga
- III. Profundidad del nivel estático menor a 11 metros, termal y en topoforma de descarga
- IV. Profundidad del nivel estático menor a 11 metros, termal y fuera de topoforma de descarga
- V. Profundidad del nivel estático menor a 11 metros, no termal y en topoforma de descarga
- VI. Profundidad del nivel estático menor a 11 metros, no termal y fuera de topoforma de descarga
- VII. Profundidad del nivel estático mayor o igual a 11 metros.

Se destaca, que la concentración de pozos y norias se localiza en relieves bajos y planos relativos. La baja densidad de los datos piezométricos y su monitoreo histórico limita fuertemente la expresión del indicador de la profundidad del agua. Sin embargo, todos los registros (puntos en mapa) con una profundidad menor a los 11 metros se consideran topoformas de descarga (puntos en color sólido).



Mapa 11 Profundidad del agua y su relación con la asociación hidrogeológica de las topografías.

Asociación hidrogeológica de los suelos. - Se presentan asociaciones posibles y perfectibles entre características de los suelos y las zonas de los sistemas de flujo. La cobertura edáfica resultó asociada, en nueve clasificaciones: 16%, a descarga; 25%, descarga-tránsito; 24%, tránsito-recarga; 10.6%, recarga; 10.1%, recarga-tránsito; 6%, indistinto; 1.8%, recarga-descarga. Debido a que cada polígono edáfico se subdivide espacialmente, como ya se detalló en la metodología, las categorías descarga-recarga y recarga-descarga, reflejan que dichos polígonos edáficos se constituyen por dos tipos de suelo hidrogeológicamente contrastados ($\geq 60\%$ del suelo de un tipo, suelo dominante; y 20-40% de otro tipo de suelo, suelo secundario): descarga-recarga, indica que el 60% del polígono es suelo de descarga y el 20-40% es un suelo con condiciones de recarga; categoría recarga-descarga, indica un polígono edáfico con $\geq 60\%$ cubierto por un tipo de suelo asociado a zonas de recarga y que el 20-40% del polígono tiene un suelo con rasgos de procesos de descarga.

Los *calificadores primarios* contenidos en cada polígono edáfico que se clasificaron como asociados a los procesos de descarga, son: álbico, alcalino, endogleyico, endopetrocálcico, endopetrodúrico, endoplíntico, endosálico, endosódico, epigleyc, epiplíntico, episálico, férrico, fíbrico, fúlvico, gélico, gípsico, gípsico, gleyc, grumico, hipersálico, hipersódico, hipogleyc, hiposódico, mazico, mesotrófico, nátrico, petrosálico, plíntico, reico, ródico, rúbico, sálico, estancado, takírico y vértico. El resto de los calificadores son características edáficas que pueden darse tanto por procesos de recarga como de descarga, por lo que se asignaron como indistintos. Los polígonos edáficos se clasificaron con las siguientes condiciones:

	Suelo dominante	Suelo secundario	Calificador principal	Asociación
1	Descarga	Descarga	Descarga o Indistinto	Descarga
2	Descarga	Indistinto	Descarga	Descarga
3	Indistinto	Descarga	Descarga	Descarga
4	Vertisol	Descarga	Indistinto	Descarga
5	Vertisol	Indistinto	Descarga	Descarga
6	Descarga	Indistinto	Indistinto	Descarga-tránsito
7	Indistinto	Descarga	Indistinto	Descarga-tránsito
8	Indistinto	Recarga	Descarga	Descarga-tránsito
9	Descarga	Recarga	Descarga	Descarga-tránsito
16	Indistinto	Indistinto	Descarga	Descarga-tránsito
10	Vertisol	Recarga	Descarga	Descarga-tránsito
11	Descarga	Recarga	Indistinto	Descarga-Recarga
12	Recarga	Descarga	Descarga o Indistinto	Recarga-Descarga
13	Indistinto	Recarga	Indistinto o Recarga	Tránsito-recarga
14	Vertisol	Recarga	Indistinto	Tránsito-recarga
15	Recarga	Indistinto	Indistinto	Tránsito-recarga
16	Indistinto	Indistinto	Indistinto o Descarga	Indistinto
17	Recarga	Recarga	Indistinto	Recarga

Tabla 33 Clasificación para los polígonos edáficos.

1. *Vertisol* (13.66%), suelos con profundidad mayor a 0.5 m, suelen presentarse en clima templado subhúmedo con lluvias en verano en relieves bajos propios o relacionados con suelos lacustres, llanuras aluviales, etc., suelos neutros-alcalinos y algunos ligeramente ácidos, la concentración de sales se destaca por la presencia de sodio y magnesio y son de colores café-grisáceos. Este suelo se asocia a zonas de descarga y/o tránsito y domina el sureste del ambiente de estudio, destacando su coincidencia espacial con el Lago de Chapala, Jalisco. Los suelos Vertisoles, si bien también han evolucionado en condiciones de elevado contenido de agua (formación de arcillas expansivas, montmorillonita), su origen está también condicionado al tipo de material original y por flujos de cualquier tipo (local, intermedio o regional). De los suelos con mayor extensión en el área de estudio, sólo el *Vertisol* se clasifica como suelo bajo influencia del agua subterránea o lo que sería más correcto, es el tipo de suelo que expone fácilmente en los perfiles (condiciones locales puntuales), al menos, algunos rasgos hidromórficos.
2. *Planosol* (4.03%), es un suelo con agua estancada, con discontinuidad textural abrupta. La característica genérica de este suelo se presenta en los perfiles analizados como por ejemplo el presentar un horizonte superficial de color claro que muestra signos de estancamiento de agua periódico y sobreyace a otro subsuelo denso, son muy arcillosos y de colores grisáceos. Es un suelo plano presente en relieves regionales bajos correspondiente a llanuras y mesetas, en alguna parte del año se inundan en su superficie. Es un suelo típico de los Altos de Jalisco y al sur del Zona Metropolitana de Guadalajara.
3. *Lixisol* (2.2%), es un grupo de suelo caracterizado por ser arcilloso, tienen una alta saturación con bases (> 35%); suelen contener agua disponible para las plantas mesofíticas al menos durante tres meses consecutivos en la época más cálida (USDA & NRCS, 2014). Son suelos que siempre presentan un horizonte superficial tipo árgico. Los polígonos Lixisoles en el área de estudio se presentan mayoritariamente en un contexto de vertisoles y planosoles y los 5 perfiles *Lixisol* registran una saturación con bases mayor al 80%.
4. *Fluvisol* (0.61%) del latín *fluvius*, que significa río, es un suelo alcalino con poca materia orgánica, caracterizado por tener una serie de capas estratificadas de sedimentos recientes de origen fluvial, marino o lacustre. En el área de estudio sólo se reporta un perfil *Fluvisol* y sólo es indicado por el INEGI en algunas secciones de pocos ríos perennes, el perfil presenta valores de sodio que indican claramente que han evolucionado directamente con agua subterránea.

5. *Solonchak* (0.3%) del ruso, *sol* que significa sal, suelos con una alta presencia de sales por lo menos en algún momento del año, lo cual se ve reflejado en un pH totalmente alcalino y con altos valores de CE, climas secos o áridos en zonas de vasos lacustres salinos como lo son las lagunas de Sayula, San Marcos y Atotonilco, zonas con dominio del *Vertisol*. Los perfiles *Solonchak* analizados son altamente alcalinos, enriquecidos con sales fácilmente solubles en agua (horizontes sálicos), con rasgos hidromórficos y alto contenido de humedad que no corresponde con las características climáticas según la fecha de observación, argumento que motiva a indicar que son suelos cuya evolución es condicionada por la presencia permanente de agua subterránea independientemente del clima. Los *Solonchaks* se asocian con ámbitos de descarga de agua subterránea dado que presentan elevado contenido de sales, encontrándose con frecuencia próximos a los *Solonetz*. Sin embargo, es recomendable mencionar que es posible que los materiales originales de estos suelos tengan acumulaciones de sales por su origen geológico (por ejemplo, antiguos mares) y consecuentemente en ambientes con elevada evapotranspiración potencial favorece la concentración salina en superficie. No obstante, esto no es lo que en general se observa en el área de estudio, siendo su origen más probable por flujos de agua de mayor recorrido o residencia subterránea.
6. *Solonets* (0.04%) del ruso, *sol* que significa sal. Es un suelo con perfil que presentan un elevado contenido de sales (alto contenido sódico) principalmente en el primer metro de profundidad, contiene un horizonte subsuperficial arcilloso y denso, tiene una proporción alta de iones de sodio y son de color gris oscuro y en el área de estudio su mayor extensión es ocupada por la presa La Vega, Jalisco rodeado de suelos potencialmente asociados a zonas de tránsito o recarga de flujos de agua. Los suelos del orden *Solonetz* dado su elevado contenido sódico, el agua proviene posiblemente de flujos de tipo intermedio o regional
7. *Gleysol*, (0.02%) del ruso *gley* que significa pantanoso, es un suelo de humedal que, a menos que sean drenados, están saturados con agua subterránea por períodos suficientemente largos para desarrollar un característico patrón de color gléyico. Tiene condiciones reductoras manifiestas, al menos en el primer 0.5 m del perfil, localizado en llanuras aluviales: en la zona de la laguna de Zapotlán y Ciudad Guzmán en el municipio de Zapotlán el Grande, al sur de Jalisco y en la laguna Guadalupe en el municipio de Quitupan, Jalisco al sur del lago de Chapala en una zona dominada por el suelo *Vertisol*.

En los *Fluvisoles*, *Gleysoles* y Los *Solonchaks*, si bien también pueden recibir aporte subterráneo continuo de agua y ser efectivamente zonas de descarga, los flujos pueden ser de cualquier tipo, y el elevado

contenido hídrico puede provenir también de agua de escurrimiento. Se destaca que los *Fluvisoles* se asocian a ríos, arroyos y vías de escurrimiento que pueden funcionar como influentes y efluentes de agua, debido a las diferencias de alturas entre el nivel freático y los cursos de agua, variando entonces la composición del agua en el subsuelo. Se aprecia entonces, que es posible encontrar diferentes condiciones del agua en cantidad y calidad aún para un mismo grupo de suelos. Dado que presentan elevado contenido de sales, encontrándose con frecuencia próximos a los *Solonetz*. Lo que se observa en general en el área de estudio, es que su origen es más probable por flujos de agua de mayor recorrido o residencia subterránea.

El análisis con mayor detalle reduce el porcentaje de cobertura edáfica asociada a zonas de descarga, a un 16%; ya que se consideran los *calificadores primarios* de los suelos *secundarios* y *terciarios* atribuidos por el INEGI (2009), resultando en que algunos suelos cuyo suelo dominante inicialmente clasifica como “indistinto” pero cuyo *clasificador primario, suelo secundario y/o suelo terciario*, dan una sólida impronta de rasgos de procesos de descarga. Los suelos asociados a zonas de descarga, con base en las características básicas de los *suelos dominantes* (INEGI, 2009), resultan en la clasificación más confiable, que incluye la propuesta de clasificación descarga-tránsito (Ver tabla 35):

Asociación final	Superficie edáfica	Asociación del suelo dominante	Asociación final	Superficie edáfica	Asociación del suelo dominante
DESCARGA	16.28%		DESCARGA-TRANSITO	25.7%	
FLUVISOL	0.04%	Descarga	VERTISOL	3.34%	Descarga
GLEYSOL	0.01%		PLANOSOL	1.50%	
LIXISOL	0.73%		LIXISOL	1.42%	
PLANOSOL	2.49%		GLEYSOL	0.004%	
SOLOCHAK	0.33%		PHAEZEM	15.2%	
SOLONETZ	0.04%		CAMBISOL	3.0%	
VERTISOL	9.53%		DURISOL	0.4%	
CAMBISOL	0.01%		CALCISOL	0.2%	
PHAEZEM	3.08%	UMBRISOL	0.074%		
UMBRISOL	0.01%		KASTAÑOZEM	0.023%	

Tabla 34 Asociación final de los suelos como zonas de descarga y descarga-tránsito.

Los grupos de suelo regosol, leptosol y luvisol, son los grupos asociados directamente a zonas de recarga:

1. *Leptosol*, es un suelo con incipiente desarrollo, de muy poco espesor y suele no presentar horizontes de diagnóstico; esto es resultado de la presencia somera de roca, y al aporte reciente de material original. Los ocho perfiles aseguibles que fueron analizados presentan valores, aun con las inconsistencias entre las variables relacionadas, que se asocian principalmente a ambientes con

dinámica de zona de recarga al agua subterránea. En los perfiles destaca principalmente su localización en geoformas regionales de tipo escarpado, abrupto y volcánico.

2. *Luvisol*, significa rico en arcilla (horizonte árgico), su riqueza en arcilla aumenta con la profundidad, no incluye un horizonte mólico. Presenta un epipedón ócrico que es muy delgado o seco, contiene muy poco carbono orgánico, es masivo y duro o durísimo cuando está seco. Para el desarrollo del sub-horizonteárgico se requiere la alternancia de periodos húmedos y secos a lo largo de muchísimos años incluso siglos. Es decir, que posiblemente se formaron en climas antiguos y que ahora estén en ambiente más seco, pudiendo ser que en el periodo de formación era zona de recarga y que con el tiempo quedará una posición más baja del relieve y ahora se localice en un ambiente de descarga. Los 10 perfiles aseguibles que fueron analizados presentan valores, aun con las inconsistencias de los valores entre variables relacionadas, que se asocian principalmente a un ambiente con dinámica de zona de recarga y tránsito (relieve bajo).
3. *Regosol*, suelo muy poco desarrollado, muy parecido al material de origen. Del griego *reghos*, manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca. En el ambiente de interés se localiza en geoformas (sierra volcánica con estrato volcanes, lomerío de aluvi3n antiguo, meseta basáltica con lomerío, sierra alta con mesetas y cañ3n típico) que presupone presentan discontinuidad litológica con presencia de dep3sitos alcalinos, en ambientes de tránsito local o regional y con algunas zonas de recarga local o regional.

Los grupos *Phaeozem*, *Leptosol* y *Regosol*, si bien en algunas categorías inferiores del sistema clasificatorio de suelos FAO pueden presentar régimen de humedad con exceso hídrico y/o acumulaci3n de sales en al menos alguna parte del perfil edáfico, a nivel de grupo, pueden indicarse que “*a priori*” se corresponden con zonas de recarga. Los *Luvisoles* en las lagunas salinas y zonas aledañas con suelos *Solonchak*, posibilita considerar con base cierta que en este ambiente con *Luvisoles* (“*a priori*” recarga) coexisten con zonas de descarga de flujos de agua regional o intermedia que afloran conforme el espesor del material original superior e incluso que se hayan depositado materiales geológicos posteriores que alejan el agua subterránea en los sectores de *Luvisoles* no haciéndose presentes al estudiarlos desde el punto de vista edafológico según criterios FAO o Soil Taxonomy.

Asociaci3n final	Superficie edáfica
RECARGA	10.6%
LEPTOSOL	8.1%
LUVISOL	1.8%
REGOSOL	0.7%

Tabla 35 Asociaci3n hidrogeológica edáfica final como zonas de recarga.

Asociación final	Superficie edáfica	Asociación del suelo dominante
RECARGA-TRANSITO	10.1%	Recarga
LEPTOSOL	0.1%	
LUVISOL	4.3%	
REGOSOL	5.7%	

Tabla 36 Asociación hidrogeológica edáfica final como zonas de recarga-tránsito.

El grado de dominancia de los suelos no debe limitarse al porcentaje particular de su extensión superficial, sino que debe ser evaluado por su patrón de distribución y vinculación con el resto de los suelos, es decir, visualizar a los suelos en un mosaico y no cada uno aislado del resto. Esta relación entre los suelos permite “a priori” establecer la existencia de zonas de descarga de agua subterránea aun en ámbitos típicamente de recarga.

Al ser el suelo un componente dinámico condicionado al ambiente local y regional, es necesario señalar que en un mismo ambiente pueden coexistir distintos elementos del sistema de flujos (Tóth, 2000, 2016) y como lo señalan Alconada Magliano y Damiano (2017), “pequeñas diferencias de altura topográfica como en el espesor de la discontinuidad litológica, produce marcadas diferencias en la forma en que el flujo de agua subterráneo de tipo intermedio incide en el perfil, y se vincula a los flujos locales.”

Los siguientes suelos son los más extensos en el área de estudio, en conjunto con el Vertisol:

-*Feozem, Phaeozem*, es un suelo que presenta una capa superficial Mólico, son pobres en contenido de materia orgánica, con un pH ligeramente ácido a neutro. Se asocian principalmente con un ambiente con dinámica de zona de recarga de agua subterránea. Los perfiles *Phaeozem* analizados no presentan contenidos de bicarbonatos de calcio, ni reacción al HCl y tampoco manchas de hidromorfismo. Sin embargo, algunos perfiles de *Feozem*, presentan concentraciones mayores de sodio y calcio y al localizarse en mesetas basálticas y llanuras aluviales, deja abierto el cuestionar si ese perfil representa una zona de recarga o tránsito de orden local o regional.

-*Cambisol*, es un suelo muy somero o erosionado debido a su posición en el relieve. A priori, podría relacionarse con suelos de recarga. Pero, en el área de estudio también coincide en zonas alledañas a cuerpos de agua menores en las laderas de sierras y lomeríos en la porción suroeste y sureste de la laguna de Sayula en las laderas o relieves más elevados en las localidades de Atoyac, Teocuitatlán de Corona, Jalisco. En esta porción del área de estudio, los Cambisoles presentan rasgos de suelos de tipo Fluvisol, lo cual se infiere a que fue dado por el INEGI debido a la cercanía del polígono con ríos y/o cuerpos de agua

perennes o intermitentes naturales o no. Sin embargo, el INEGI no ha publicado perfiles edáficos en estos polígonos Cambisoles-Fluvisoles. En el área de estudio se tienen cuatro perfiles edáficos Cambisoles, de los cuales dos se localizan en polígonos Vertisol (Cambisol 2) y Luvisol (Cambisol 4); los cuatro perfiles no presentan rasgos hidromórficos, su contenido de materia orgánica es menores al 1%, el Cambisol 2 presenta color *gleyco* desde la base del perfil, lo cual indica una muy probable alteración del material parental, sin concreciones, manchas o nódulos, además de que el pH promedio es ácido (contexto de basaltos), el clima es templado subhúmedo con temperaturas mayores a los 18 °C y con una posición baja en una cañada de ríos, por lo que este perfil podría estar indicando una zona que se comporta como zona de descarga-tránsito. Los perfiles etiquetados como *Cambisoles*, en general tienen características asociadas a zonas de recarga. De forma genérica y preliminar los perfiles y polígonos clasificados como *Cambisoles* se asocian a zonas de descarga-tránsito. Sin embargo, podrían estarse comportando ciertos sitios como zonas de tránsito, como en los polígonos aledaños de cuerpos y/o corrientes de agua naturales. Algunos polígonos de los suelos andosol, cambisol, chernozem, durisol, kastañozem, phaeozem y umbrisol, su asociación final resultó en indistinto, abarcando el 6% de la cobertura edáfica. Mientras que ciertos polígonos edáficos andosol, arenosol, cambisol, kastañozem, phaeozem y umbrisol, su asociación final resultó como zona de tránsito, abarcando el 4% de la cobertura edáfica.

Los perfiles edáficos analizados se pueden asociar de forma preliminar a procesos o zonas de descarga, recarga, recarga/tránsito, sin hacer especificación a qué tipo de sistema de flujo corresponde:

- Suelo *Phaeozem*, genéricamente clasificado como zona recarga y/o tránsito regional. Los perfiles *Phaeozem 3, 4* asociados directamente a zona de recarga; el *perfil 7 Phaeozem*: más asociado a una zona de recarga y/o tránsito
- Suelo *Leptosol* regionalmente clasificado como zona recarga y/o tránsito regional y cuyos perfiles analizados indican que los perfiles *6 y 7 Leptosol* pueden asociarse a zonas de recarga o tránsito.
- Suelo *Luvisol*, regionalmente clasificado como zona recarga y/o tránsito regional y cuyos dos perfiles (*7 y 8*) analizados tienen relación con zonas de tránsito-recarga de flujos de agua
- Suelo *Regosol*, regionalmente clasificado como zona recarga y/o tránsito regional y su perfil *3* aparentemente se localiza en una zona de recarga de agua y el perfil *5 regosol* se asocia más a una zona de recarga-tránsito.
- Suelo *Vertisol*, genéricamente clasificado en zona de descarga, sus perfiles *3 y 7* se asocian a zonas de descarga regional y descarga-tránsito regional de flujos de agua subterránea, respectivamente.

- Suelos *Fluvisol* y *Solonetz* genéricamente clasificados en zonas de descarga, aparentemente sus perfiles se localizan en zonas asociadas a descarga-tránsito de flujos de agua subterránea.
- Suelo *Solonchak* genéricamente clasificado en zona de descarga, y sus dos perfiles se asocian a zonas de descarga regional.
- Suelo *Andosol*, genéricamente clasificado como zona de recarga; en el área de estudio el INEGI publica dos perfiles: el perfil Andosol 1 con rasgos edáficos de tipo más similar a un comportamiento de tipo de suelo asociado a zonas de recarga localizado en una zona de suelo Vertisol (descarga) en topofomas de mestas y sierras.
- Suelo *Arenosol*, el único perfil y presenta características edáficas claras de un perfil en zona de recarga, localizado en una sierra volcánica.
- Suelos Solonets, su único perfil se localiza a orillas de un cuerpo de agua permanente y presenta rasgos hidromórficos.
- Suelo *Chernozem*, su único perfil presenta valores edáficos poco claros para ser un perfil de este grupo, en efecto se localiza en un polígono clasificado por el INEGI como un suelo del grupo *Kastañozem* el cual genéricamente se asocia a un suelo de zona de recarga. Sin hacer caso al nombre que le da el INEGI a este perfil, se localiza en un contexto físico y con rasgos edáficos que en conjunto se pueden asociar a un punto de descarga-tránsito.

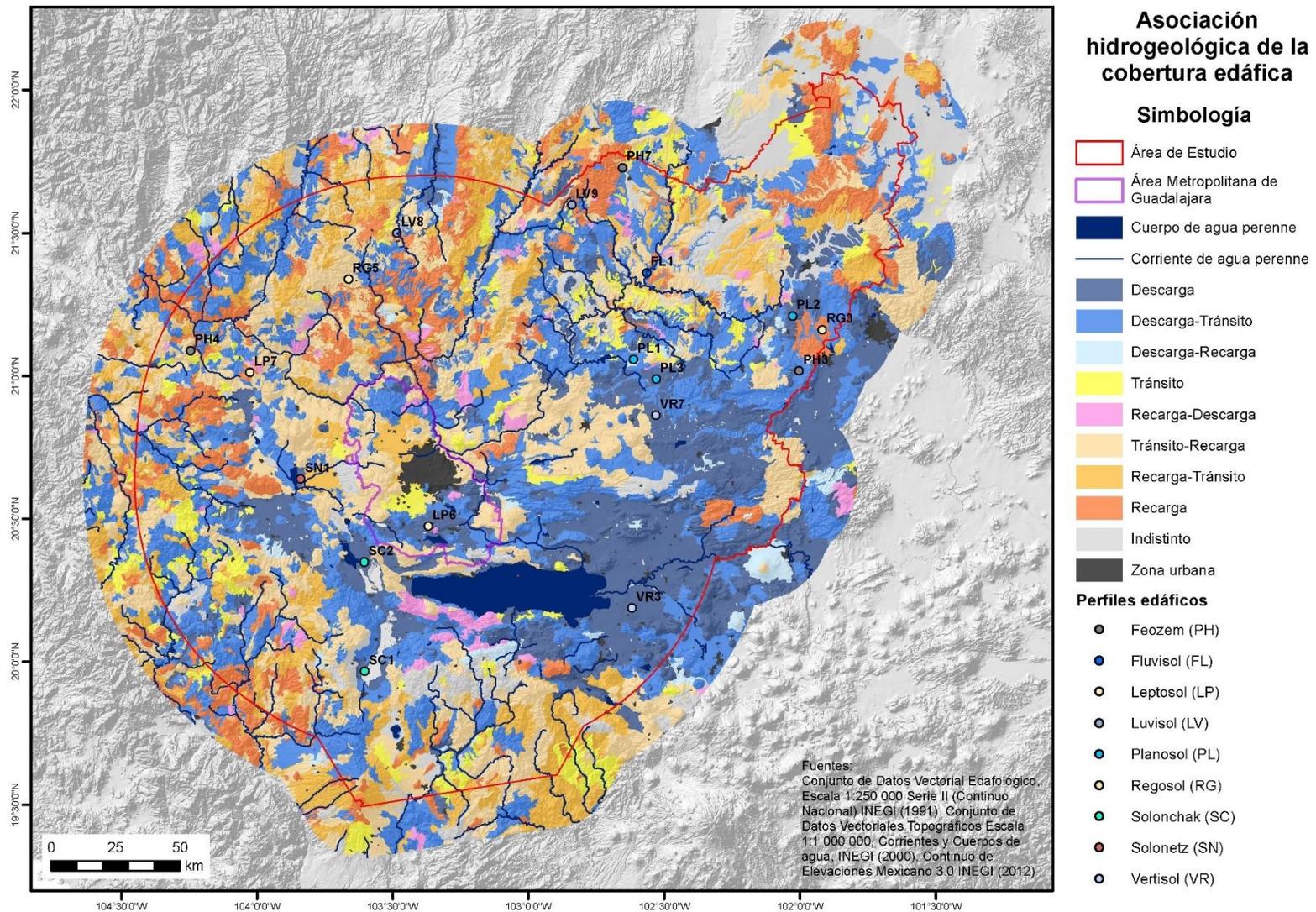
Todos los perfiles analizados de los suelos *Phaeozem*, *Leptosol*, *Luvisol*, *Regosol* coinciden con zonas de recarga, recarga/tránsito, es decir, igual que la clasificación inicial de los suelos previo al análisis de sus perfiles.

En los perfiles edáficos es frecuente que aun cuando se describen rasgos hidromórficos y/o se observa incremento de sales/ Na^+ en la base del perfil e incluso en horizontes más superficiales que revela que el agua subterránea incide al menos en algunos períodos, debido a que son escasos o en concentraciones de Na^+ relativamente bajas y/o están profundos no se consideran al clasificar el suelo y/o definir su uso y manejo. Esto puede ser atribuido a los siguientes motivos: *i)* El nivel taxonómico de clasificación usado no incluye dicha condición; *ii)* incluye, pero el valor alcanzado no resulta suficiente como para que se lo caracterice, por ejemplo, como sódico (menor contenido de sodio que el exigido), hidromorfo (abundancia menor de rasgos hidromórficos), vértico (contenido de arcilla montmorillonita insuficientes para imprimir Vertisolización), ándico (contenido de arcillas alófanas insuficientes) etc. La clasificación es taxativa, jerárquica y cuantitativa. Consecuentemente, no siempre queda reflejada en el nombre una característica que es importante desde el punto de vista de funcionamiento del suelo en el paisaje; *iii)* al

interpretar un perfil edáfico se subestima la presencia de un rasgo, tal como los mencionados precedentemente, y no se repara en el origen y en tiempos variables, dependiendo de dicho origen, su incidencia puede modificarse aun sin que llegue a afectar significativamente la evolución del suelo en el corto plazo, si podría afectar las actividades en superficie.

Las *manchas, moteados o concreciones de Fe y Mn*, como se detalló en puntos anteriores, son una manifestación morfológica indicadora de la presencia de agua que recorrió el subsuelo en tiempo suficiente como para generar condiciones de anaeróbicas que posibilitan la reducción del Fe y Mn. Consecuentemente la presencia de estas manchas, indica la incidencia cercana a la superficie de agua subterránea. La consideración común, no necesariamente correcta, a nivel mundial, es que si estas manchas o moteados se observan a más de un metro se indica que la fase subterránea no influye o ha influido de forma significativa. Sin embargo, esto conduce o es resultado de mal interpretar o desconocer cómo se comporta la fase subterránea del agua.

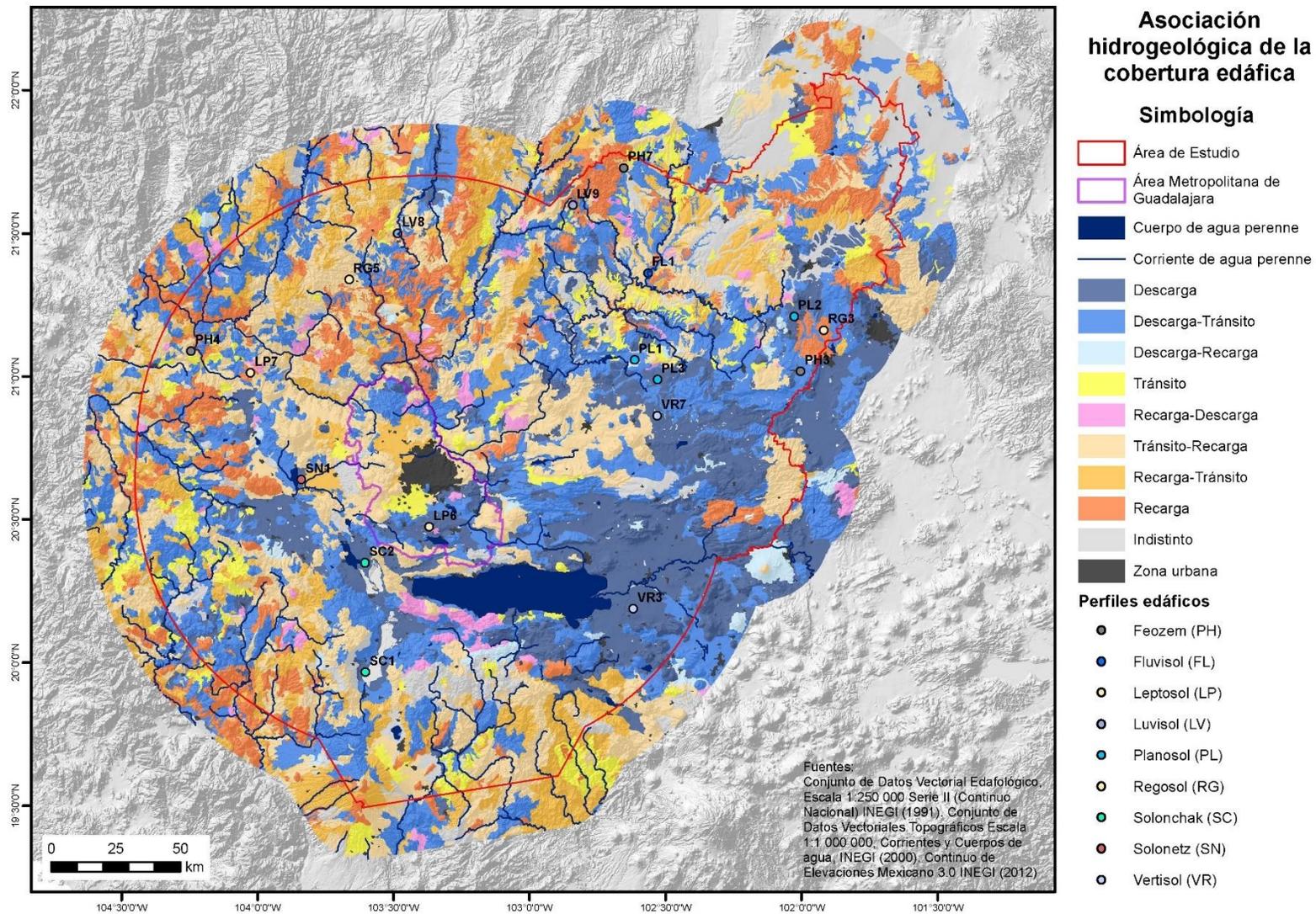
Alconada-Magliano *et al.* (2018), señalan que los rasgos hidromórficos pueden variar conforme el material original (contenido de Mn y Fe), cambios en la humedad del suelo debido a la alternancia de periodos secos-húmedos del sitio e incluso asociados a cambios globales (períodos del Niño o la Niña).



Mapa 12 Asociación hidrogeológica de la cobertura edáfica.

El análisis anterior, permite comprender que la forma en que usualmente se estudia el suelo (hasta 2 m) si bien puede resultar pertinente en muchos casos es insuficiente para clasificar al suelo o frente al manejo o intervenciones del ambiente dado que no considera el *cómo* desde la profundidad por debajo del suelo el agua funciona en la integración de los componentes del ambiente y consecuentemente, como inciden dichas intervenciones en la regulación del agua, por ejemplo, preservando un sitio que controla exceso o déficit de agua, como si una superficie freática alcanza la proximidad de dicho límite de estudio (2 m) igualmente incide (en tiempo variable de condiciones local y regional) sobre dicho suelo y sobre su aptitud de uso y manejo.

Asociación hidrogeológica de la vegetación y usos de suelo. – Los atributos espaciales de las franjas con cubierta vegetal y usos de suelo se asociaron en las siguientes clasificaciones propuestas: i) *descarga*, 3.5%; ii) *descarga-tránsito*; 7.5%; iii) *recarga*, 25%; iv) *tránsito*, 4.5%; v) *tránsito-recarga*, 20%. Se clasificó como zonas de tránsito-descarga o tránsito-recarga, aquellos tipos de vegetación y usos de suelo cuyas características descriptivas no coinciden claramente con una zona de descarga o recarga. Por lo que, dichas zonas se consideran que son secciones de tránsito de sistemas de flujo y que posiblemente, dependiendo de las características locales y temporales del ambiente, pueden llegar a tener funciones de descarga o recarga asociado a sistemas de flujo de tipo local.



Mapa 13 Asociación hidrogeológica de la vegetación y los usos de suelo.

Para este estudio se relaciona de forma discreta y genérica a la agricultura temporal de riego y de riego eventual con zonas potenciales de descarga de agua subterránea acorde con el análisis espacial de su localización en relación con los tipos de vegetación que claramente se relacionan con zonas de recarga y descarga.

Otra forma de interpretar esta primera clasificación del suelo (escala 1: 250 000) es que las zonas de *descarga-tránsito* y *recarga-tránsito* se consideran a priori como zonas de *tránsito*.

A continuación, se describen los principales rasgos de vegetación en el área de estudio:

- La Selva Baja Caducifolia coincide principalmente con tipos de suelo asociado a zonas de recarga y/o tránsito de flujos de agua subterránea, mayormente en sierras y en un clima templado subhúmedo.
- El Matorral subtropical se da mayormente en suelos genéricamente no condicionados fuertemente por agua subterránea, sin embargo, aproximadamente, un 25% de los polígonos coinciden con suelo asociado a zonas de descarga de agua subterránea (*Solonchak, Kastañozem, Planosol* y *Vertisol*, principalmente), en un relieve heterogéneo y el clima es templado subhúmedo.
- La Selva Baja Caducifolia coincide mayormente con suelos asociados a zonas de recarga y/o tránsito de flujos de agua subterránea, pero con un registro revelador de suelos asociados con zonas de descarga de agua subterránea que en algunos casos son cercanos a cuerpos de agua. Se han observado en zonas de clima templado subhúmedo (60%) y semi-seco (40%). Robinson (1958), menciona la asociación de acacias, huizaches y otras gramíneas (pastos) como zonas de descarga de agua subterránea. Sin embargo, el INEGI (1989) sólo menciona a una especie de Huizache.
- El bosque de Pino-Encino, coincide con tipos de suelo asociados a zonas de recarga y /o tránsito de flujos de agua subterránea, principalmente en sierras volcánicas y lomeríos de basalto, en climas de tipo templado subhúmedo. En menor superficie se identifica en clima semifrío subhúmedo que coincide con suelo asociado con recarga.
- El Matorral Crasicaule, sucede en un contexto geológico dominado tanto por roca ígnea extrusiva ácida y roca sedimentaria, localizado mayormente en suelo asociado con zonas de recarga de flujos de agua subterránea (67%, *Phaeozem*) y en un 33% en suelo asociado con zonas de descarga de agua subterránea (*Planosol, Vertisol* y *Fluvisol*). En un relieve dominado por mesetas basálticas con

lomerío, lomerío de aluvión antiguo y llanura aluvial y en un clima de templado subhúmedo (60%) y clima semiseco (40%).

- El Mezquital, se presenta en un 66% en suelo asociado con zonas de descarga de agua subterránea (*Solonchak, Vertisol* y *Planosol*) en llanuras aluviales y vasos lacustres y en un clima dominante tipo semi-seco semi-cálido, principalmente.
- El Bosque Mesófilo de Montaña, se observa que coinciden en un contexto geológico dominado tanto por rocas ígnea extrusiva básica, en suelos asociados con zonas de recarga de flujos de agua subterránea en sierras volcánicas con estrato volcanes y en un clima de tipo templado subhúmedo y semifrío subhúmedo.
- El Bosque de Oyamel, se localiza en un contexto regional geológico dominado tanto por roca ígnea extrusiva básica; localizada en suelo asociado con zona de recarga de flujos de agua subterránea en sierras volcánicas con estrato volcanes y en un clima de tipo templado subhúmedo y semifrío subhúmedo.
- Independientemente de la clasificación botánica del Tular, se desarrolla en cuerpos de agua perennes siendo indicador de zonas de descarga de agua subterránea.
- El Tular coincide en un contexto geológico dominado tanto por roca ígnea extrusiva intermedia; localizado en suelo asociados con zonas de descarga de flujos de agua subterránea (*Planosol, Vertisol* y *Gleysol*) en llanuras aluviales y cuerpos de agua con un clima de tipo templado subhúmedo.
- La Pradera de Alta Montaña, se desarrolla en un contexto geológico dominado tanto por rocas ígnea extrusiva básica en suelos asociados con zonas de recarga de flujos de agua subterránea en sierras volcánicas con estrato volcanes con un clima de tipo semifrío subhúmedo y templado subhúmedo.

Uso de suelo y vegetación (USV)	Superficie de USV del área de estudio
DESCARGA	3.4%
Cuerpo de agua	2.7%
humedad	0.5%
Tular	0.03%
Vegetacion halofila	0.2%
DESCARGA-TRANSITO	7.5%
Pastizal - huizachal	7.5%
Pastizal halofilo	0.01%
RECARGA	24.9%
Bosque de encino	14.9%
Bosque de encino-pino	3.4%
Bosque de oyamel	0.1%
Bosque de pino	1.1%
Bosque de pino-encino	5.1%
Bosque de tascate	0.4%
Pradera de alta montaña	0.025%
Selva mediana subcaducifolia	0.002%
TRANSITO	4.5%
Mezquital	0.1%
Pastizal natural	4.4%
TRANSITO-RECARGA	19.9%
Bosque cultivado	0.01%
Bosque mesofilo de montaña	0.1%
Matorral crasicaule	0.2%
Matorral subtropical	10.4%
Selva baja caducifolia	9.2%

Tabla 37 Asociación hidrogeológica de la vegetación y usos de suelo en el área de estudio.

- El Pastizal Halófilo, se presenta en un contexto geológico dominado tanto por roca ígnea extrusiva ácida en suelos asociados con zonas de descarga de flujos de agua subterránea (*Solonchak*, *Planosol* y *Vertisol*) en relieves dominados por mesetas basálticas con lomerío, vasos lacustres salinos y cuerpos de agua con climas de tipo semi-seco, semi-cálido y templado subhúmedo.
- Las especies que enlista el INEGI (1989, 2015) para la selva mediana subcaducifolia es extensa e incompleta, de las cuales no están enlistadas como freatófitas (Meinzer, 1927; Robinson, 1958). Lo cual era de esperarse, ya que el estudio de las plantas en términos de su dependencia con el agua subterránea no ha avanzado en climas húmedos. Esto no quiere decir que en las selvas no existan plantas freatofitas o con comportamientos de freatófitas en ciertas condiciones ambientales (roca, suelo, relieve y presencia de manantial). Con base en el análisis en información espacial cartográfica en materia de litología, edafología y topografía del INEGI, se obtiene que los polígonos de selva mediana subcaducifolia en el área de estudio coinciden en un contexto geológico de roca de tipo ígneo extrusivo ácido y sedimentario, en sierras y laderas escarpadas de valles y en suelos de tipo andosol, donde suelos Cambisol están asociados con zonas de recarga de flujos de agua subterránea, en especial en laderas escarpadas y sierras volcánicas; y en climas de tipo templado subhúmedo y cálido subhúmedo.
- *Pastizal Natural*, se presenta en un contexto geológico dominado por rocas de tipo ígneo de composición ácida; mayormente en suelo asociado en terrenos topográficamente altos con zonas de recarga y de recarga-tránsito de flujos de agua subterránea. Mientras que, en llanuras desérticas, lomerío de pie de monte y sierras bajas, se relaciona con zonas de descarga, fundamentalmente.
- Bosque de Táscate, se presenta en un contexto dominado por roca sedimentaria de tipo caliza-limolita; mayormente en suelos asociados a zonas de recarga-tránsito de flujos de agua subterránea y un 20% de suelo asociado con zonas de descarga de agua subterránea (*Planosol*, *Vertisol* y *Fluvisol*) principalmente en lomeríos de aluvión antiguo, planicies de ladera tendida, mesetas basálticas y llanuras aluviales en un clima de tipo templado subhúmedo, fundamentalmente.
- La Vegetación Halófila, se presenta con un contexto geológico dominado por roca ígnea extrusiva básica en un 80% en suelo asociado con zona de descarga de agua subterránea (*Solonchak* y *Vertisol*) en sitios lacustres salinos, llanuras aluvial y cuerpos de agua con un clima de tipo semiseco a semicálido.

El análisis del *cultivo específico* sería necesario para reforzar el análisis del tipo de agricultura y su asociación preliminar con los sistemas de flujo de agua subterránea. Sin olvidar que el tipo de agricultura

también está condicionada a las políticas públicas del momento ya que se han considerado factor determinante en la lectura de la dinámica ambiental y económica. Considerando este elemento, es que para fines de este estudio sólo la *Agricultura de Humedad* puede asociarse directamente con zonas de descarga de flujos de agua subterránea, con base en la descripción del INEGI (1989): Es la de aquellos terrenos que se cultivan antes o después de la temporada de lluvias, aprovechando la humedad del suelo, e incluye a los terrenos de zonas inundables o materiales amorfos que retienen agua y que aún en periodo de sequía presentan humedad, o bien aquellos que después de la temporada de lluvias soportan cultivos que desarrollan todo su ciclo, llamados comúnmente de invierno. Se les conoce también como “tierras de jugo”.

Es de notar que los porcentajes anteriores son bastante conservadores, ya que se basan en la clasificación propuesta por el INEGI. Por ejemplo, el concepto de hidrófitas del INEGI debería ser modificado a freatófitas, ya que todas las comunidades de plantas agrupadas en hidrófitas se componen por especies con una relación o dependencia directa y dominante con el agua subterránea o zonas de descarga de flujos de agua subterránea (Manglar, Popal, Tular, Bosque de Galería, Selva de Galería, Vegetación de Galería, Vegetación Halófila o Halófila Hidrófila).

La asociación del tipo de vegetación con zonas de los sistemas de flujo es menos confiable por diversas limitantes de la información pública accesible y asequible. La clasificación y mapeo del tipo de vegetación por parte del INEGI se basa en la propuesta de Rzedowski (2006) cuya gran labor sólo integra la influencia del clima, el suelo y la topografía del territorio, sin incorporar la dinámica del agua debajo del suelo. Por otro lado, la clasificación es de un grado general y en un mismo tipo de vegetación incorpora diversas composiciones vegetales y transiciones, comparables por sus similitudes. Como es el caso de la cobertura vegetal mapeada como pastizal, que en resumen Rzedowski (2006) indica que se integra por “*Grassland*”, “*Sabana*” o pastizal de clima caliente y “*Zacatonal*” alpino. Este autor los considera comparables con la “puna” y los “páramos” andinos. El Zacatal que se presenta en el noreste de Jalisco, que se considera es el dominante en el área de estudio que corresponde de acuerdo con Rzedowski (2006), a los extensos zacatales del medio oeste norteamericano que penetran en el Altiplano Mexicano y que constituyen la mayor extensión de Pastizal Natural en México y que se compone principalmente por gramíneas (especies dominantes *Bouteloa spp.*, *Aristida*, *Hilaria*, *Acacia* y *Andropogon*), pastizales que se consideran transición entre bosques y matorrales xerófilos.

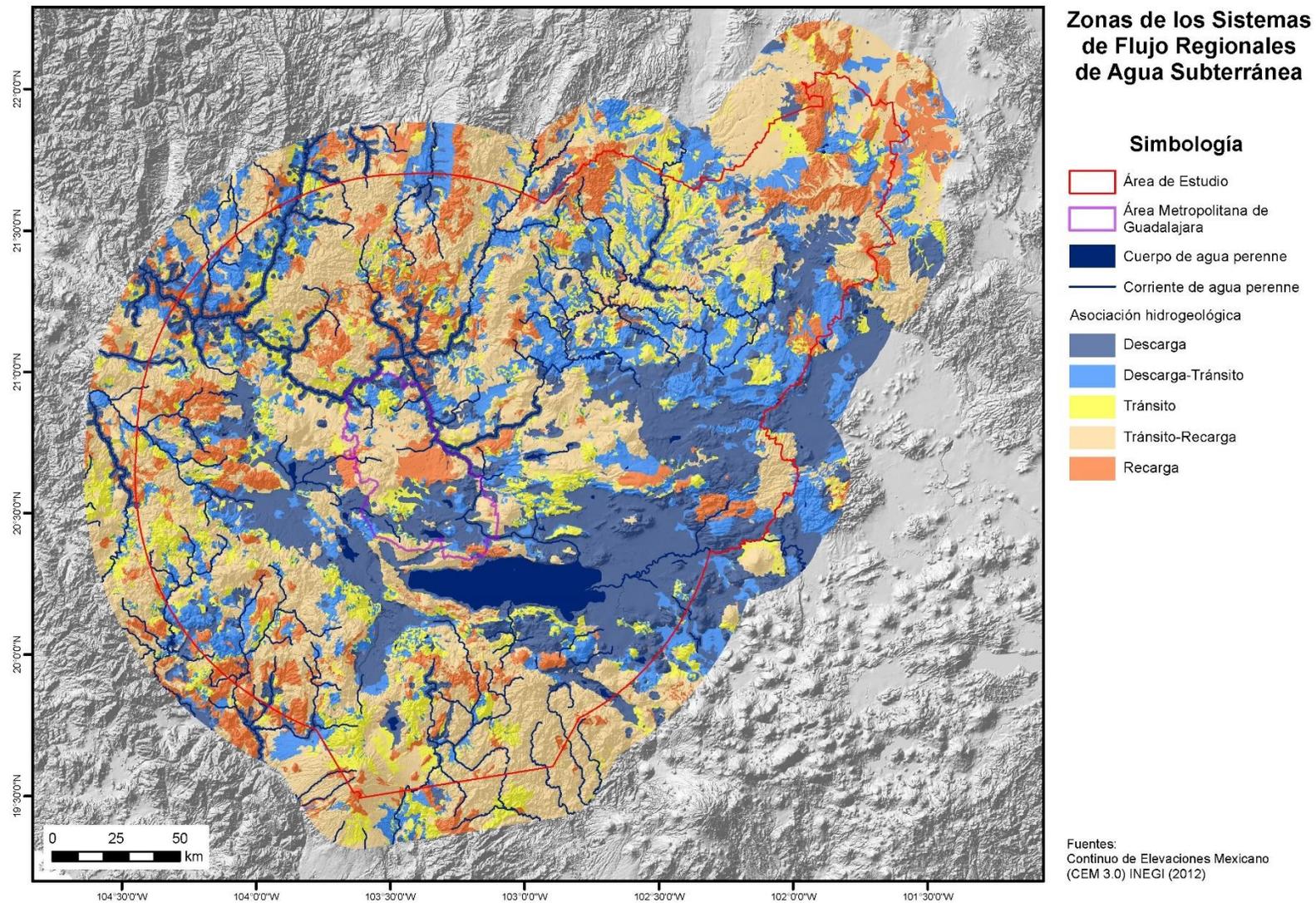
Una vez integrados los indicadores en superficie y sus mapas, con el debido análisis no línea de cada una y todas las combinaciones entre cada tipo de indicador en superficie, se generaron nuevas clasificaciones a partir de las cuales se generó el siguiente mapa que expresa el resultado final del análisis hidrogeológico de los indicadores en superficie, visualizable en el Sistema de Información Geográfica del cual se obtiene el siguiente mapa titulado *Evidencia en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos regionales del agua* (Mapa 14).

Del SIG generado para obtener este mapa final, se obtiene:

- ✓ El 99% fue asociado a un tipo de zona de sistemas de flujo regionales
- ✓ El 26% se asocia a zonas de descarga, es decir, en que predominan los mecanismos y/o manifestaciones del afloramiento de agua
- ✓ El 17% clasificado como zona de descarga-tránsito, en que prevalecen las manifestaciones directas o indirecta de los mecanismos de descarga
- ✓ Al menos, el 11% presenta rasgos típicos de ambientes dominados por procesos de recarga. Superficie que seguramente será mayor, al considerar que el 32% clasificó como zonas de tránsito-recarga
- ✓ El 12%, se clasificó como zonas de tránsito, dado que, en su conjunto, de todos los indicadores en superficie, no registra características exclusivas de recarga o descarga.

Zonas de sistemas de flujo		Área de estudio
	Descarga	26.3%
	Descarga-tránsito	17.0%
	Tránsito	12.1%
	Tránsito-recarga	32.1%
	Recarga	11.6%

Tabla 38 Asociación final de las evidencias en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos del agua.



Mapa 14 Evidencia en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos regionales del agua.

Las zonas de descarga y descarga-tránsito tienen el mayor grado de confianza del análisis de los indicadores en superficie, seguido por las zonas de recarga. En las zonas de recarga, hay que tener mucho mayor cuidado en la asociación regional de las evidencias en superficie, por ejemplo, en el mapa 14 se observa que la mancha urbana municipal de Guadalajara en la década de los setenta y ochenta, provoca que dicha superficie sólo cuente con data vectorial de topofomas como indicador en superficie para el análisis de las evidencias en superficie, clasificando como supuesta zona de “recarga”; esta situación que no es exclusiva de las zonas urbanas, ocurre en el 4.35% del total del área de estudio indicado en la Tabla 40 en la que se presenta la correspondencia entre indicadores para dichas zonas de sistemas de flujo:

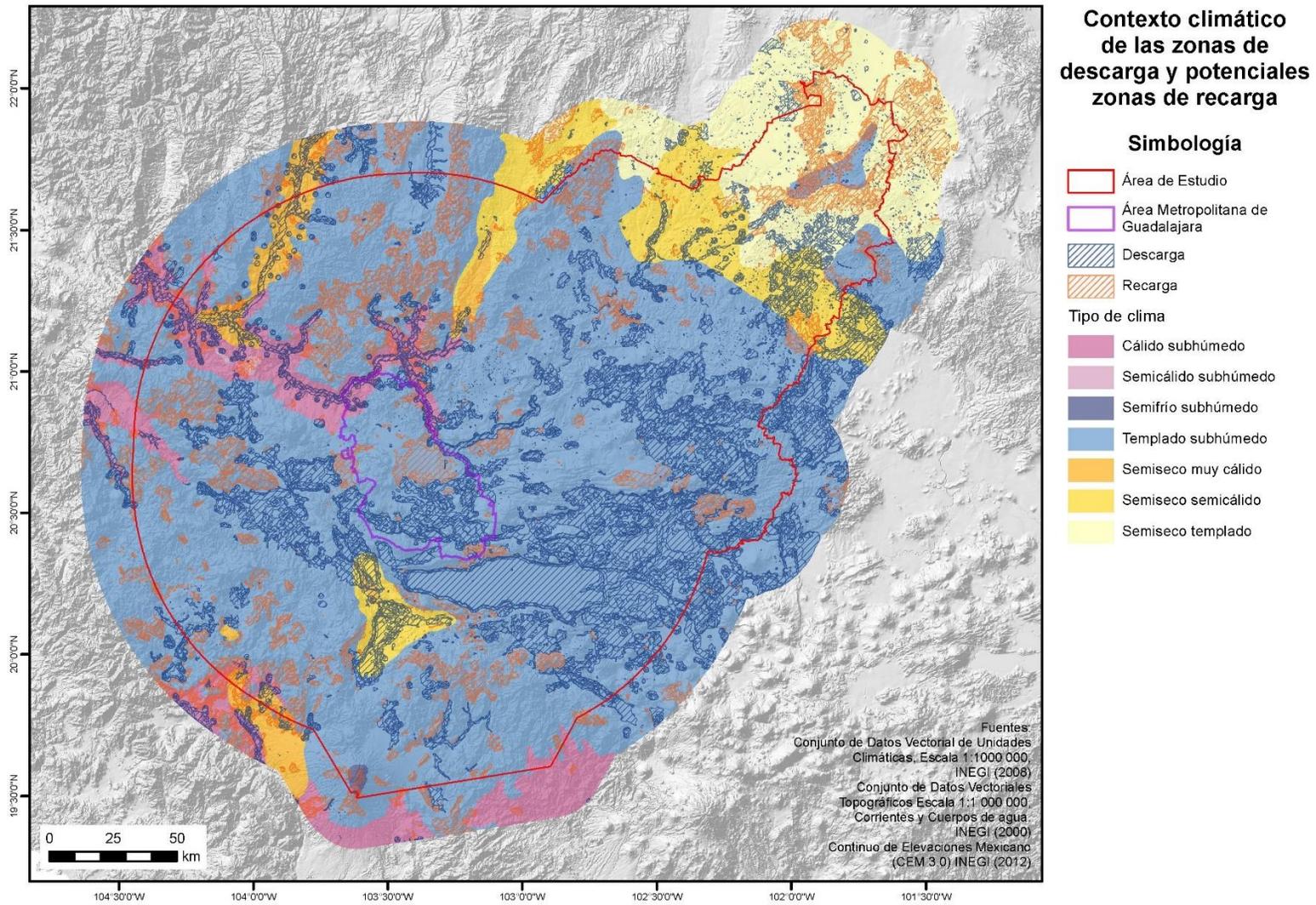
Correspondencia de indicadores					
Zona de asociación final	Indicador				
	Agua en superficie	Suelo	Vegetación	Topofomas	Área de estudio
Descarga	Descarga				14%
	Descarga	Descarga			4.29%
	Descarga	Descarga-Tránsito			2.49%
	Descarga	Descarga + Descarga-Tránsito			6.78%
	Descarga	Descarga + Descarga-Tránsito	Descarga	Descarga	0.40%
	Descarga		Descarga		3.32%
	Descarga		Descarga	Descarga	3.00%
	Descarga	Descarga	Descarga		0.46%
	Descarga	Descarga	Descarga	Descarga	0.40%
	Descarga	Descarga	Descarga	Descarga + Descarga Tránsito	0.43%
				Descarga	15.35%
		Descarga+Descarga-tránsito		Descarga	7%
			Descarga	Descarga + Descarga Tránsito	6%
				Descarga + Descarga Tránsito	11.42%
Recarga	No Aplica	Recarga			9.02%
		Recarga	Recarga		4.24%
		Recarga		Recarga	2.50%
		Recarga	Recarga	Recarga	1.39%
		Recarga	Recarga	Recarga + Tránsito-Recarga	3.66%
				Recarga	4.35%
		Recarga+ Recarga-Tránsito	Recarga		4.24%
		Recarga		Recarga + Tránsito-Recarga	8.67%

Tabla 39 Correspondencia entre indicadores de las zonas descarga y recarga de los sistemas de flujo en el área estudio.

Al observar el contexto climático de las zonas de descarga, destaca la presencia de agua perenne en superficie en una zona dominada por clima subhúmedo templado y cálido, al igual que las zonas de recarga. Lo anterior, permite plantear la hipótesis de que los sistemas de flujo que circulan y/o afloran en el área de estudio, también se originan en zonas de recarga localizadas fuera del polígono de interés. De acuerdo con el siguiente mapa, resulta que el 80% de las zonas de descarga de los sistemas de flujo regionales subterráneos del agua identificadas están en un clima Templado Subhúmedo; el 7% de las zonas descarga en un clima semiseco semicálido; 6.6%, en cálido subhúmedo; 3% Semiseco muy cálido y 3% en Semiseco templado. Que se tengan zonas de descarga en climas subhúmedos templados y cálidos, cuyas temporadas de lluvia son en verano, indica que la presencia perenne de agua en superficie se sustenta en la descarga de sistemas de flujo subterráneos regionales. En la siguiente tabla se observa que la distribución climática local (de una zona de estudio en específica) no determina la presencia de procesos de recarga y/o descarga subterránea del agua.

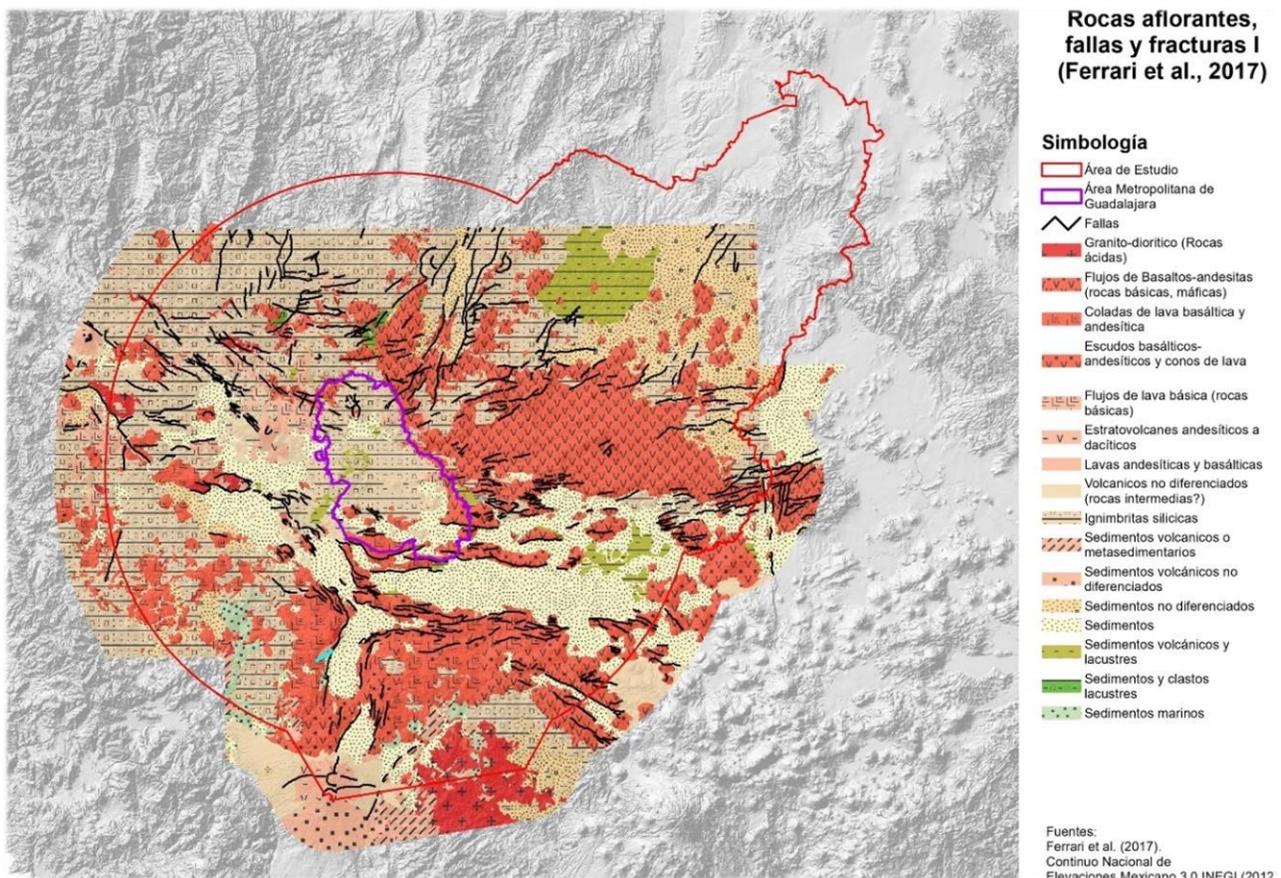
Zonas de descarga	26.497%	Zonas de recarga	12%
Templado subhúmedo	21.141%	Templado subhúmedo	9.2%
Semiseco semicálido	2.008%	Semiseco templado	1.4%
Cálido subhúmedo	1.765%	Cálido subhúmedo	0.5%
Semiseco muy cálido	0.820%	Semiseco semicálido	0.3%
Semiseco templado	0.758%	Semiseco muy cálido	0.2%

Tabla 40 Distribución climáticas de las zonas de descarga y recarga en el área de estudio.



Mapa 15 Zonas de descarga y recarga de sistemas de flujo subterráneos del agua y su contexto climático.

Como parte del ejercicio de interpretación hidrogeológica, a pesar de que sólo son las rocas aflorantes, se generó el siguiente mapa modificado de Ferrari *et al.* (2018), con el fin de resaltar las características útiles hidrogeológicamente hablando, aun cuando se reconoce que la data disponible sobre la composición mineralógica del contexto geológico en el área de estudio es muy escasa. El siguiente mapa permite observar que las zonas de descarga, tránsito y recarga es indiferente al contexto geológico, y que la cobertura geológica es insuficiente para una correcta interpretación hidrogeológica.

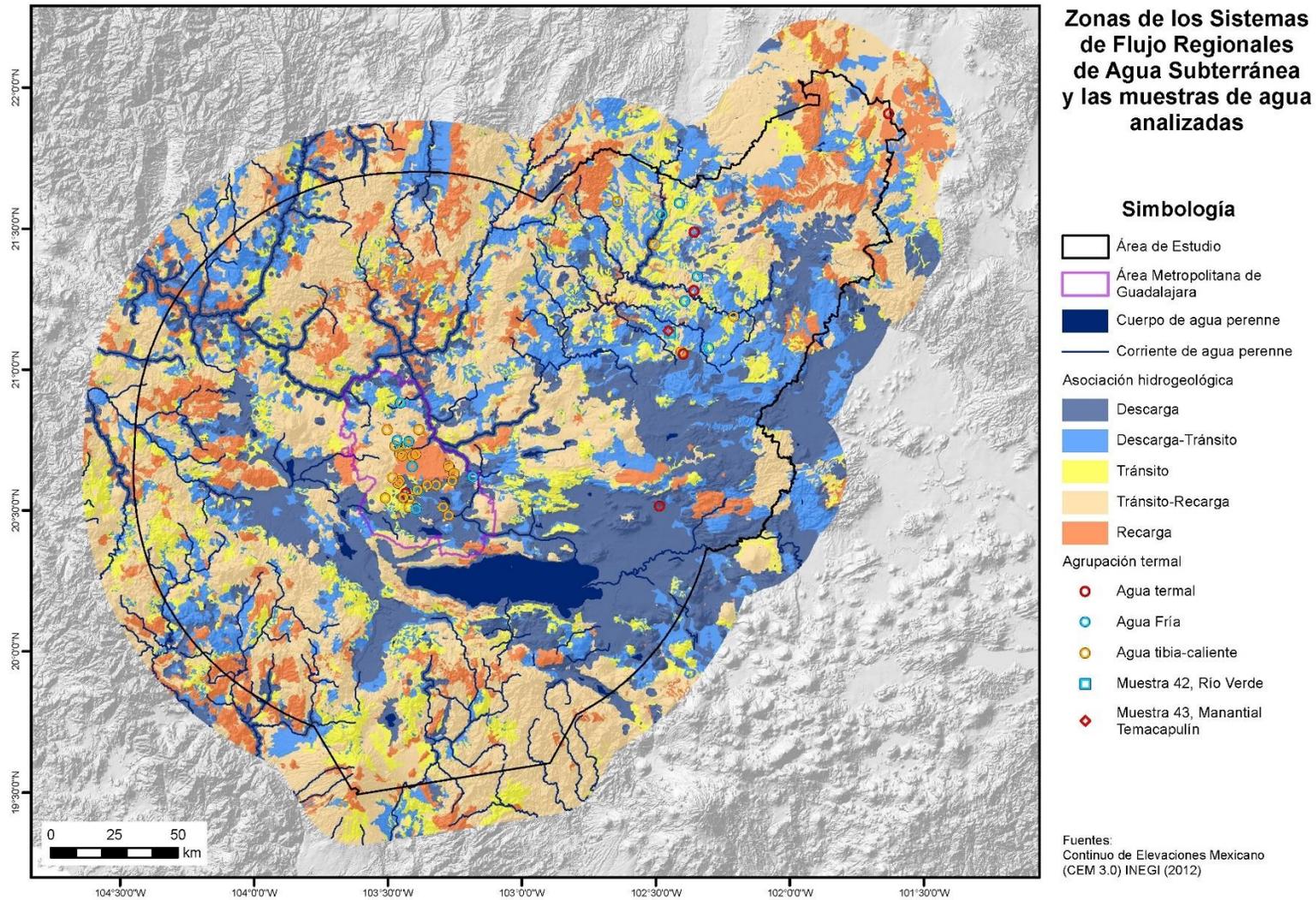


Mapa 16 Rocas aflorantes en el área de estudio, modificado de Ferrari *et al.*, 2018.

Con base en el SIG de los indicadores en superficie, se identifican las características hidrogeológicas en superficie de las muestras analizadas (Mapa 17 y Tabla 42). Se destacan los siguientes hallazgos:

1. De las 7 muestras de agua termal, cuatro se localizan en contextos regionales de zonas de descarga o descarga-tránsito.
2. El manantial (muestra 43, temperatura 40°C), cuyos rasgos en superficie son armónicos con la composición geoquímica de la muestra, previamente clasificada como un punto de descarga, que al analizarse con los indicadores en superficie resulta que es una muestra de una zona de descarga-tránsito regional.
3. La muestra del Río Verde (42), se localiza en un paisaje cuyas manifestaciones hidrogeológicas en superficie, también son coherentes: en términos de la cobertura edáfica, se asocia como tránsito-recarga, recordando que un río se constituye por zonas de descarga, tránsito y recarga de los sistemas de flujo (regionales) subterráneos del agua; localizada en una topoforma (escala 1:1 000 000) clasificada como zona de tránsito (meseta). Debido a la escala espacial, las coordenadas de la muestra no coinciden con el trazado del Río Verde en las cartas oficiales que integran el indicador “agua perenne en superficie”, que le darían el atributo de descarga.

Los rasgos hidrogeológicos del resto de las muestras, no se analizan a detalle porque son de pozos, de los cuales se ignora la profundidad del nivel estático. En la tabla 42, las celdas vacías indican que en ese punto no hay atributos espaciales para los indicadores en superficie analizados.



Mapa 17 Relación espacial de las muestras con la evidencia en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos regionales del agua en el área de estudio.

8.2 Sistemas de Flujo y secciones esquemáticas hidrogeológicas regionales

Como resultado de la clasificación de los tipos de sistemas de flujo de agua subterránea, se obtiene que, de las 51 muestras, 7 muestras corresponden a sistemas de flujo de tipo regional, siendo una de ellas, la muestra 43 uno de los manantiales localizados en Temacapulín y recordando que el significado de Temacapulín es “Baño Termal” (Temaxcalli, en Nahuatl). Son 16 muestras asociadas a sistemas de flujo de tipo local, siendo una de ellas la muestra 42 registrada en una parte del Río Verde, lo cual sugiere que en dicha sección del río hay afloramiento de flujos locales, lo que no excluye que en otras secciones del río hay descargas de sistemas de flujo de tipo regional o de otra jerarquía que en conjunto conformen el flujo base del Río Verde. La muestra 37 (pozo en Zona Metropolitana de Guadalajara), se asoció a un sistema de tipo regional pero superficial, es decir de largo recorrido, pero con una componente importante en el plano horizontal y cercana a la superficie. El resto de las muestras (23 muestras), se asociaron a sistemas de flujo de tipo intermedio, al presentar características fisicoquímicas, diferentes a los sistemas locales y regionales. Dichas muestras se extrajeron de pozos en operación, condición importante a señalar en el método de muestreo, ya que refleja que la muestra contiene la mezcla en diferente proporción de agua de flujo local y regional. A continuación, se describen los componentes a integrar en las secciones hidrogeológicas propuestas:

Límite inferior_. En términos del contexto hidrogeológico el basamento significa el límite inferior al cual pueden llegar a circular los sistemas regionales de flujos de agua subterránea. Para ambas secciones, actualmente no hay un basamento definido y acordado (secciones occidental y central de la Faja). Sin embargo, desde un punto de vista hidrogeológico es posible insinuar que el límite inferior del medio por el que circulan los sistemas de flujo lo constituye una unidad de granito-granodiorita, localizado a una profundidad de entre 2 y 4 km.

Límite superior_. El límite superior es la superficie del relieve natural.

Límites laterales_. Se indican con una línea discontinua y signos de interrogación, ya que todavía falta confirmar las zonas de recarga con sus respectivas zonas de descarga.

Temperatura de recarga. - Para estimar la temperatura de recarga de los sistemas de flujo de agua subterránea captados en las muestras con un $IM > 2$, se obtuvo un valor promedio de temperatura con base en el registro de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (SMN-CONAGUA) con una elevación mayor a la altitud de las muestras 41, 43 y 44 (1 610 msnm, 1 827 msnm y 1 795 msnm, respectivamente), es decir, $\geq 1\ 610$ msnm. En el área de estudio existen 50 estaciones climatológicas a una altitud $\geq 1\ 610$ msnm operando, cuyos valores normales promedio histórico (1951-2010) global, son (SMN, s.f.):

Data climatológica en estaciones a una altitud ≥ 1610 msnm (50 estaciones)						
Global	Altitud (msnm)	Temperatura máxima normal (°C)	Temperatura media normal (°C)	Temperatura mínima normal (°C)	Precipitación normal anual (mm)	Evaporación total normal anual (mm)
Promedio	1903.94	26.20	17.70	9.18	739.50	1835.84

Tabla 42 Temperatura de recarga estimada a una altitud ≥ 1610 msnm para los últimos 60 años de medición

Temperatura mínima de equilibrio. – A las muestras “termales” (26, 39, 41, 43, 44, 46 y 51), se les aplicó el cálculo de Índice de Madurez (IM). Resultando en que las muestras 41, 43 y 44 alcanzan una madurez parcial con un valor de IM= 2.1, 2.3 y 2.2, respectivamente. Dichas muestras, arrojan que los cálculos de geotermómetros más afines son los de la relación Na/K y Na-K-Ca (geotermómetros catiónicos) que estiman valores de *temperatura mínima de equilibrio* coherentes. Es decir, valores mayores a la temperatura de la muestra de agua y menores a la temperatura de evaporación del agua (100°C): TEPA1, a 97°C; TMCA1, a 81 y 82°C; Pozo 4, a 75 y 79 °C. Los geotermómetros seleccionados son identificados en PHREEQC como: Na/K FOUR79 y Na-K-Ca FOUR79, refiriéndose a las fórmulas utilizadas por el software. Se descartó el geotermómetro Na/K FP79 porque sólo registra un valor de temperatura mínima de equilibrio $< 100^\circ\text{C}$ (muestra 44, 98°C) y es muy cercana al punto de ebullición.

Muestras de agua con IM >2				Temperatura mínima de equilibrio (°C, geotermómetros de solutos catiónicos)					
ID	agua °C	ambiente °C	K/Mg G83	Na/K	Na/K	Na/K	Na/K	Na-K-Ca	
				FOUR73	TR76	FP79	FOUR79	FOUR79	
TEPA1	41	54	26.5	13	215	186	118	97	103
TMCA1	43	40	25	11	188	161	100	81	82
Pozo 4	44	46.3	32	15	185	159	98	79	75

Tabla 43 Temperatura mínima de equilibrio agua-roca por cálculos de geotermómetros.

Temperatura y profundidad de recorrido subterráneo. – Para aumentar el grado de confianza de los cálculos, se presentan tres escenarios posibles de la temperatura y profundidad máxima alcanzada por el agua en su recorrido subterráneo, con base en los tres valores normales (máxima, 26.20 °C; media, 17.7°C; mínima, 9.18°C) del rango de temperatura de recarga (ver Tabla 43):

- Escenario A: si se considera la temperatura de recarga a 9.18 °C, los sistemas de flujo posiblemente alcanzan una temperatura entre 65 y 87°C, y recorren profundidades de entre 1.7 y 2.4 km:

Escenario subterráneo A, con temperatura mínima de recarga					
Muestra de agua		Temperatura máxima durante el recorrido (°C)		Profundidad máxima alcanzada (m)	
		Na/K FOUR79	Na-K-Ca FOUR79	Na/K FOUR79	Na-K-Ca FOUR79
TEPA1	41	87.82		2379.9	
TMCA1	43	71.82	72.82	1946.3	1973.4
Pozo 4	44	69.82	65.82	1892.1	1783.7

Tabla 44 Temperatura y profundidad de recorrido de los sistemas de flujo subterráneos, escenario A.

- Escenario B: si se estima la temperatura de recarga a 17.7 °C, los sistemas de flujo probablemente alcanzan una temperatura entre 63 y 79°C, y recorren profundidades de entre 1.5 y 2.1 km:

Escenario subterráneo B, con temperatura media de recarga					
Muestra de agua		Temperatura máxima durante el recorrido (°C)		Profundidad máxima alcanzada (m)	
		Na/K FOUR79	Na-K-Ca FOUR79	Na/K FOUR79	Na-K-Ca FOUR79
TEPA1	41	79.3		2149.1	
TMCA1	43	63.3	64.3	1715.4	1742.5
Pozo 4	44	61.3	57.3	1661.2	1552.8

Tabla 45 Temperatura y profundidad de recorrido de los sistemas de flujo subterráneos, escenario B.

- Escenario C: con una temperatura de recarga a 26.2°C, los sistemas de flujo probablemente alcanzan una temperatura entre 48 y 70°C, y recorren profundidades de entre 1.3 y 1.9 km:

Escenario subterráneo C, con temperatura máxima de recarga					
Muestra de agua		Temperatura máxima durante el recorrido (°C)		Profundidad máxima alcanzada (m)	
		Na/K FOUR79	Na-K-Ca FOUR79	Na/K FOUR79	Na-K-Ca FOUR79
TEPA1	41	70.8		1918.7	
TMCA1	43	54.8	55.8	1485.1	1512.2
Pozo 4	44	52.8	48.8	1430.9	1322.5

Tabla 46 Temperatura y profundidad de recorrido de los sistemas de flujo subterráneos, escenario C.

Para el cálculo de la profundidad se utilizó el valor de gradiente geotérmico en 3.69°C/100 m, promedio de los tres gradientes geotérmicos documentados previamente para territorios vecinos al área de estudio:

Gradientes Geotérmicos	
°C/100 m	Referencia
4	CFE (2000)
3.14	Cardona, 1990; Carrillo-Rivera, 1992; Molina-Maldonado, 1996;
3.93	Cardona, 2007, Peñuela Arévalo, 2013).
3.69	Promedio

Tabla 47 Gradientes geotérmicos considerados para el cálculo de la profundidad del recorrido.

Si se hace un promedio aritmético de los valores, posiblemente de forma genérica, el agua (subterráneamente) alcanza una temperatura entre 50°C y 87°C, en profundidades de entre 1.3 y 2.3 km.

Muestra de agua				Temperatura promedio del recorrido (°C)			Profundidad de recorrido (metros)		
ID		Ambiente °C	Agua °C	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima
TEPA1	41	26.5	54	87.82 *	79.3	70.8	2379.9*	2149.1	1918.7
TMCA1	43	25	40	72.32	63.8	55.3	1959.9	1729.0	1498.6
Pozo 4	44	32	46.3	67.82	59.3	50.8	1837.9	1607.0	1376.7
Promedio		27.8	46.8	67.5			1828.5		

Tabla 48 Valores promedio global de los tres escenarios previstos.⁹

⁹ El * es en los valores únicos originales (no promedios), en color azul el valor menor y en color naranja el máximo valor.

A continuación, se describen las secciones hidrogeológicas que esquematizan los principales resultados del presente estudio. El contexto geológico de las secciones propuestas se construyó con base en la descripción del referente geológico. En cada sección propuesta se observa que:

- Se indican en color azul los ID de las muestras agrupadas como “agua fría”; en color negro, agua “tibia-caliente” y en color rojo, muestras del grupo “agua termal”
- Las muestras en azul están asociadas a flujos de tipo local relativo, excepto la muestra 37 la cual se caracteriza como un flujo regional somero o superficial (Sección A) las muestras en rojo clasifican en sistemas de tipo regional, y las marcadas en negro son muestras con características de un tipo de flujo intermedio relativo
- Las líneas guía de cada muestra tienen el color indicativo al tipo de zonas de los sistemas de flujos con base en los indicadores en superficie en la que se localiza dicha muestra y al funcionamiento inferido en relación con el Mapa 14 “Evidencia en superficie de las zonas de los sistemas de flujo subterráneos regionales del agua en el área de estudio”.

Sección hidrogeológica A-A'. – Esta sección se orienta del noreste-suroeste con una longitud de 320 km, alineada con las muestras 26 y 43, proyectadas: 1, 3, 6, 7, 13, 14, 23, 24, 25, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 44, 45. De las muestras con un $IM > 2$ (41, 43 y 44), se proyectó sólo la 44 por localizarse a 1 km de distancia en línea recta, mientras que la 41 se localiza a 59 km lineales. El esquema de la sección propuesta busca expresar que la muestra 43 asociada a un flujo de tipo regional (extraída de un manantial termal, componente de un sistema de flujo regional) tiene su línea guía en color azul claro, indicando que se localiza en una zona de descarga-tránsito de acuerdo con la zonificación con base en los indicadores en superficie (Ver Tabla 43); la muestra 44 (muestra de un flujo de tipo regional extraída por medio de un pozo), en una zona de tránsito-recarga; 26 (muestra de un flujo de tipo regional extraída por medio de un pozo) en una zona de tránsito, y la 39 es una muestra de un flujo de tipo regional extraída en una zona de descarga, las muestras 3, 13 (flujo de tipo local) y 31 se localizan en una zona asociada preliminarmente como de recarga. Sin embargo, al revisar la Tabla 40, es necesario resaltar que la asociación a recarga sólo se da por el indicador de topografía, el uso de suelo es “zona urbana” y el resto de los indicadores carecen de contenido. Esto señala que, para el caso de tales muestras y dicha zona del área de estudio (“zona urbana”), debe ser revisada con información en campo y registros locales más antiguos, en los que se pueda apreciar el tipo de suelo, vegetaciones naturales, ecosistemas, la presencia de manantiales, cuerpos de agua, así como la profundidad piezométrica.

Sección hidrogeológica B-B'. – Esta sección tiene 238 km de longitud y una orientación noroeste-sureste alineada con las muestras 26 (muestra asociada a un flujo de tipo regional extraída por medio de un pozo) y 25 (muestra de agua asociada a un tipo de flujo intermedio relativo), y con las siguientes muestras proyectadas: 1, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 19, 20, 21, 24, 28, 29, 30, 34 y 35. Los tipos de flujo se representan con formas cuyo esbozado es punteado, con el fin de indicar que el posible origen de dichos flujos se desconoce ya que para esto no se cuenta con la data isotópica de la lluvia en el área de estudio. Se esquematiza el flujo base de los ríos perennes por sistemas de flujo regionales; la orientación de los sistemas de flujo puede ser esa u otras, tomando en cuenta que la orientación del movimiento del agua puede ser radial, es decir, no sólo noreste-suroeste.

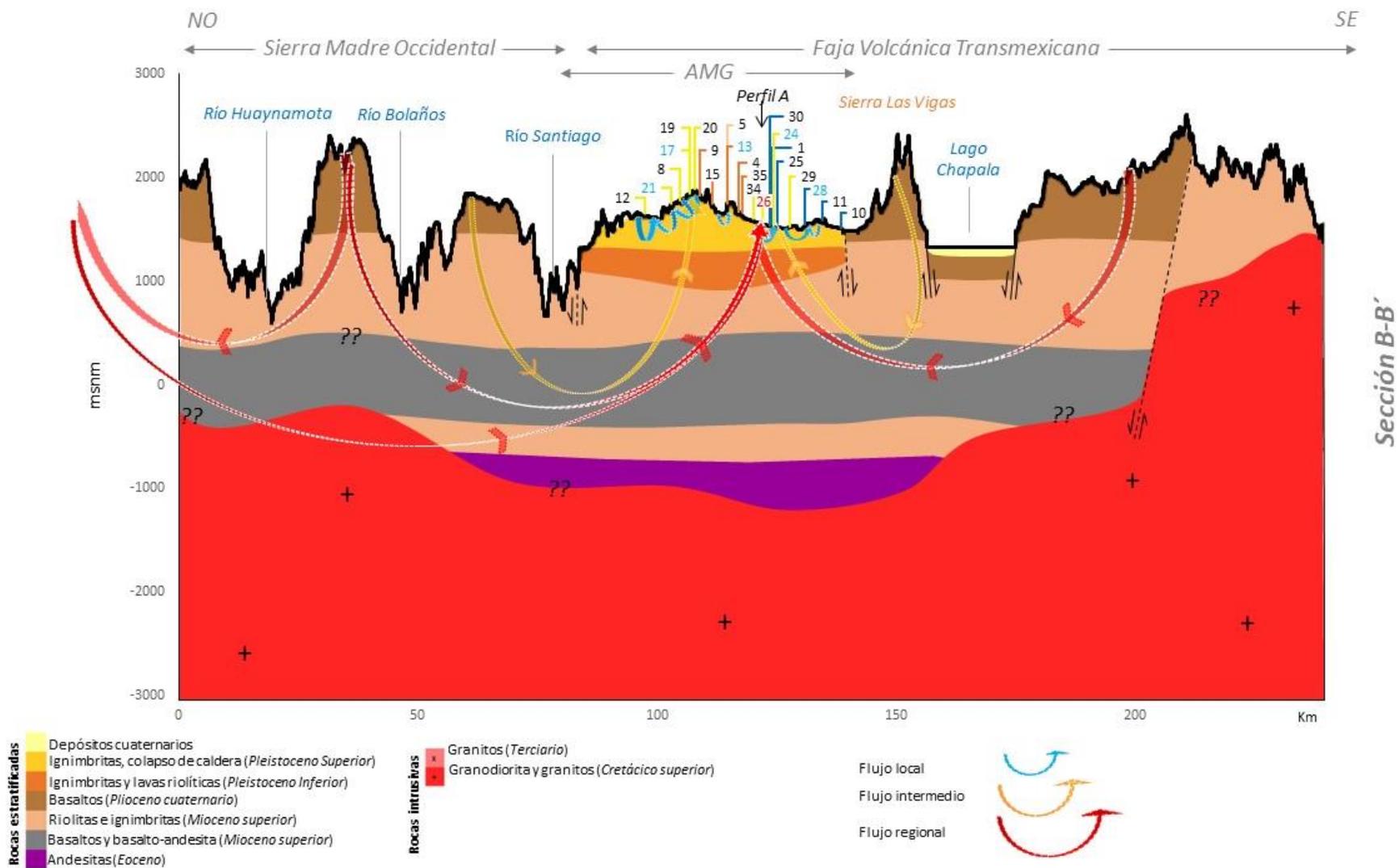


Imagen 20 Imagen 19 Esquema de la sección hidrogeológica B-B' propuesta para el área de estudio.

9 Discusión de resultados y conclusiones

El presente estudio logra resulta en la integración del contexto hidrogeológico regional del Área Metropolitana de Guadalajara y Los Altos de Jalisco, sugiriendo que:

- Ocurren sistemas de flujo subterráneos de tipo regional, siendo los manantiales termales una evidencia directa
- La recarga de los sistemas de flujo es de tipo regional y local
- El recorrido subterráneo del agua alcanza profundidades de ~2.3 km y temperaturas entre ~40-87 °C
- El basamento, como límite inferior de la fase subterránea, se localiza entre 2 y 4 km de profundidad
- Las zonas de recarga regionales se localizan en altitudes $\geq 1\ 610$ msnm
- La concentración de fluoruros es directamente proporcional con la temperatura

El presente estudio siguió el modelo hidrogeológico establecido por la Teoría Tóthiana, cuyo paradigma científico se ha venido aplicando en México desde hace 30 años, como ya se documentó en la introducción. La aplicación y desarrollo de la Teoría Tóthiana en México se ha centrado en la identificación de los sistemas de flujo subterráneos del agua mediante el análisis hidrogeoquímico y el referente geológico (estructura geológica, posición del basamento y estratigrafía), que son los métodos directos para la identificación de los sistemas de flujo subterráneos. San Luis Potosí, es el territorio mexicano en el que más se han estudiado los sistemas de flujo subterráneos del agua aplicando la Teoría Tóthiana; comparando los alcances y resultados del presente estudio con los principales estudios realizados en San Luis Potosí (Peñuela Arévalo, 2013; Carrillo Rivera, Cardona Benavides, & Moss, 1996; Cardona Benavides, y otros, 2018; Cardona Benavides, 1990; Cardona Benavides, 2007), se identifica que la metodología desarrollada para esta tesis cumplió con las componentes hidrogeológicas esenciales y básicas de la Teoría Tóthiana, comprobadas en dichos estudios en la región de San Luis Potosí: *i)* esquematizar el contexto regional hidrogeológico y la posición del basamento; *ii)* identificar los sistemas de flujo relevantes aplicando las básicas y clásicas técnicas hidrogeoquímicas; *iii)* integrar el análisis piezométrico para la comprobación de las zonas de descarga; *iv)* diferenciar el aporte natural de aniones potencialmente tóxicos para la salud humana por medio de los flujos regionales; *v)* identificar las zonas de descarga y potenciales zonas de recarga regionales de los sistemas de flujo.

La presente tesis robustece el método para facilitar la visualización en superficie de la fase subterránea del ciclo del agua y el análisis sistémico de la data de los indicadores en superficie con la data hidrogeoquímica directa, siendo ambos tipos de data de los procesos y/o manifestaciones-causa y efecto hidrogeológicos del ciclo del agua como unidad indivisible.

La presente tesis aporta a la metodología para la aplicación de la Teoría Tóthiana: *i)* se obtiene más información de una misma data hidrogeoquímica cuando ésta es analizada en conjunto con los indicadores en superficie; *ii)* en el caso de contar con poca o nula data subterránea (hidrogeoquímica, geológica, geofísica, piezométrica) pero con una descripción y análisis hidrogeológico integral de los indicadores en superficie es posible identificar las zonas de descarga y las potenciales zonas de recarga del ambiente hidrogeológico-hidrológico, a partir de lo que es posible planear la generación de la data hidrogeoquímica, geológica, geofísica necesaria de forma estratégica y eficiente; *iii)* se genera más información del suelo, la vegetación, los ecosistemas, el relieve y del clima. Pero sobre todo se facilita el entendimiento respecto al origen, desarrollo y funcionamiento sistémico del relieve, los suelos, la vegetación, los ecosistemas y de los derivados servicios ambientales; *iv)* el análisis integral de la data hidrogeoquímica y los indicadores en superficie, facilitan la comprensión del funcionamiento sistémico del contexto geológico, el relieve y el clima; *v)* el estudio, comprensión y empleo de la Teoría Tóthiana no es exclusivo de la especialización hidrogeológica, y su íntegra comprensión requiere del ejercicio inter-multi-y transdisciplinario.

Este estudio resultó en la primera caracterización moderna del contexto hidrogeológico regional de uno de los tres centros urbanos más grandes e importantes del país y de una de las regiones de producción agropecuaria más importantes de México, comprobando la relevante y eficiente utilidad de la evaluación hidrológica de los indicadores en superficie como primer paso para la definición y comprensión de un ambiente hidrogeológico-hidrológico, tal como se propone en Kachadourian-Marras *et al.*, 2020. Se identificaron las zonas de descarga y sus potenciales zonas de recarga de los sistemas regionales de flujo subterráneos del agua circulantes en el área de estudio, incorporando el análisis hidrogeoquímico con el análisis integral de las manifestaciones hidro(geo)lógicas en superficie. Se constató la utilidad y eficiencia de iniciar cualquier estudio hidrogeológico desde la superficie del territorio, partiendo de la observación directa del paisaje y las pistas directas de lo que está ocurriendo subterráneamente en el sistema hidrológico, independientemente de contar o no con data subterránea.

También en este estudio se cotejó que los manantiales y cuerpos de agua perennes naturales recogen la original y clara información del ambiente hidro(geo)lógico, siendo las manifestaciones más evidentes de la ocurrencia de los sistemas de flujo subterráneos del agua y que la actual delimitación superficial de los acuíferos en el área de estudio y en México es incorrecta. Debido a que las zonas (*descarga, recarga*) al ser el “inicio” y “fin” de flujos o sistemas de flujo subterráneos del ciclo hidrológico, demuestran que el funcionamiento hidráulico subterráneo es mucho más extenso que lo indicado por los polígonos “acuíferos” actualmente vigentes, usualmente incorporados como el polígono de investigación en los

estudios hidrogeológicos-hidrológicos, así como el polígono para la planeación territorial y la toma de decisiones respecto al uso del agua. Los ocho nuevos mapas generados, son únicos en su tipo para esta área de estudio, convirtiéndose en el primer insumo de información para la planeación estratégica del ordenamiento ecológico territorial, así como para planeación de generación eficiente de nuevos datos e información hidrológica (hidrogeoquímicos, edafológicos, ecosistémicos, pruebas de bombeo, meteorológicos, modelación computacional del movimiento subterráneo del agua en espacio y tiempo, entre otros).

Si bien se cumplieron los objetivos, los resultados de esta tesis requieren ser continuados con más investigación para confirmar el esquema propuesto de los sistemas de flujo subterráneos del agua en el área de estudio; la presente tesis debe continuarse desarrollando: *i)* modelo hidráulico del movimiento subterráneo de los flujos, con base en data obtenida por pruebas de bombeo; *ii)* análisis isotópico ampliado para vincular las zonas descarga y recarga; *iii)* detallar el análisis hidrogeoquímico para confirmar las principales reacción geoquímicas de control de la composición del agua; *iv)* evaluación hidrogeológica e hidráulica de los pozos de donde se obtiene la data directa.

A pesar de que exista una grave carencia en cantidad y calidad de data e información hidrológica, esto no es una limitante para adoptar el paradigma moderno de la hidrogeología; la información pública disponible y asequible es suficiente para una interpretación inicial y robusta del ambiente hidrogeológico-hidrológico, siempre y cuando sea desde la comprensión y aplicación de las directrices de la Teoría Tóthiana.

Este estudio, ha sido un entrenamiento científico que confirma que el desarrollo científico en pro de un mayor bienestar colectivo implica adoptar nuevos paradigmas científicos y desechar otros tantos, rectificando las directrices científicas y técnicas, cuya evolución resulte en la implementación o mejoramiento de los proyectos técnicos hidráulicos con un sustancioso menor impacto ambiental.

10 Referencias y bibliografía

- Alatorre-Zamora, M. Á., Campos-Enríquez, J. O., Rosas-Elguera, J. G., Peña-García, L., Maciel-Flores, R., & Fregoso-Becerra, E. (2015). Chapala half-graben structure inferred. A magnetometric study. *Geofísica Internacional*, 54(4), 323-342.
- Alconada Magliano, M., & Damiano, F. (2017). XX Congreso Geológico Argentino. *Caracterización de suelos y del agua subterránea para definir intervenciones sustentables*. Tucuman, Argentina.
- Alconada-Magliano, M., & Lanfranco, J. W. (2020). *Suelo en el paisaje. Parte II: Condiciones de abastecimiento*. Buenos Aires, Argentina: Editoria Universidad Nacional de La Plata. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/65742> -
- Alconada-Magliano, M., Damiano, F., & Fagundo-Castillo, J. (2016). Estudio del suelo en el paisaje regional como base para definir su manejo agropecuario-forestal. *XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rio Cuarto, Argentina.
- Alconada-Magliano, M., Damiano, F., Carrillo Rivera, J., & Fagundo-Castillo, J. (2017). Arsenic & fluoride in water in water in northwestern Buenos Aires: their association with natural landscape elements. *Journal of Geography and Regional Planning*. 10, 8-27. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/313666343_Journal_of_Geography_and_Regional_Planning_Arsenic_and_fluoride_in_water_in_northwestern_Buenos_Aires_their_association_with_natural_landscape_elements
- Alconada-Magliano, M., Lanfranco, J. W., & Pellegrini, A. (2018). *Suelo en el paisaje: Parte I: condiciones de dotación*. Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. Obtenido de <https://doi.org/10.35537/10915/65742> -
- Allan, J. F. (1986). Geology of the Northern Colima and Zacoalco Grabens, southwest Mexico: Late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America*, 97(4), 473-485. doi:[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1986\)97<473:GOTNCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1986)97<473:GOTNCA>2.0.CO;2)
- Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, L. O. (1999). *Sustainability of Ground-Water Resources*. Denver, Colorado: U.S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF);. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition*.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. (Vol. 2nd Edition). Rotterdam: Balkema.
- Campos Enríquez, J., & Alatorre Zamora, M. (1998). Shallow crustal structure of the junction of the grabens of Chapala, Tepic-Zacoalco and Colima, Mexico. *Geofísica Internacional*, 263-282.
- Cardona Benavides, A. (1990). CARACTERIZACION FISICO-QUIMICA Y ORIGEN DE LOS SOLIDOS DISUELTOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ: SU RELACION CON EL SISTEMA DE FLUJO. Universidad Autónoma de Nuevo León .

- Cardona Benavides, A. (2007). Hidrogeoquímica de sistemas de flujo, regional, intermedio y local. Resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación. Tesis Doctorado. Ciudad de México, México: Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma de México.
- Cardona Benavides, A., Carrillo Rivera, J. J., Aguillón Robles, A., Banning, A., Thomas, R. R., & Aceves de Alba, J. (2018). Natural controls validation for handling elevated fluoride concentrations in extraction activated Tothian groundwater flow systems: San Luis Potosí, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77-121.
- Carrillo Rivera, J. J. (1985). *Agua subterránea para plantas termoeléctricas*. Distrito Federal, México: Comisión Federal de Electricidad.
- Carrillo Rivera, J. J. (1992). The Hydrogeology of the San Luis Potosi Area, Mexico. *PhD Thesis*. Great Britain: London University.
- Carrillo Rivera, J. J. (2000). Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 1-33.
- Carrillo Rivera, J. J. (2003). Lack of a conceptual system view of groundwater resources in Mexico. *Hydrogeology*.
- Carrillo Rivera, J. J., & Ortega G., M. A. (2008). Groundwater flow understanding from local to regional scale. *SERIES IAH-Selected Papers*.
- Carrillo Rivera, J. J., & Ouysee, S. (2011). Enhancement in Salinity of Extracted Groundwater. *Geoenvironmental*.
- Carrillo Rivera, J. J., & Ouysee, S. (2011). Enhancement in Salinity of Extracted Groundwater . *Geoenvironmental Section of the upcoming 10-volume* .
- Carrillo Rivera, J. J., Cardona Benavides, A., & Edmunds, W. (2002). Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, México. *Journal of Hydrology* 261, 24-47.
- Carrillo Rivera, J. J., Cardona Benavides, A., & Moss, D. (1996). Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosi, Mexico. *Hydrology*, 23-44.
- Carrillo Rivera, J. J., Cardona Benavides, A., Huizar Alvarez, R., & Graniel, E. (2007). Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environment Geology*.
- Carrillo Rivera, J. J., Cardona Benavides, A., Varsányi, I., & Kovács, L. (2007). Tracing Groundwater Flow Systems with Hydrogeochemistry in Contrasting Geological Environments. *Springer. Water, Air, and Soil Pollution.*, 77-103.
- Castillo, M., Muñoz-Salinas, E., & Ferrari, L. (2014). Response of a landscape to tectonics using channel steepness indices (ksn) and OSL: A case of study from the Jalisco Block, Western Mexico. *Geomorphology*, 204-214.

- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press.
- CONAGUA. (2016). *Humedales de la República Mexicana Inventario Nacional de Humedales INH*. Obtenido de Comisión Nacional del Agua: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/visualizador-de-humedales-de-la-republica-mexicana-inventario-nacional-de-humedales>
- CONAGUA. (2019). Registro Público de Derechos de Agua 1979-2018. *Red de monitoreo de Aguas Subterráneas. Base de datos inédita*.
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Guadalupe, estado de Jalisco*. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, México.
- Edmunds, W., Cardona Benavides, A., & Carrillo Rivera, J. J. (2002). Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *Hydrology Journal*, 1-24.
- Electricidad, C. F. (2000). *Geotermia*. . Gerencia de Geotermia.
- Fagundo Castillo, J. R. (1990). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. I. Estudio mediante simulación química del efecto de la litología. *Voluntad Hidráulica No.82*.
- Fagundo Castillo, J. R., & González, H. P. (2005). *Hidrogeoquímica*. (M. d. Pública, Ed.) La Habana, Cuba: Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional.
- Fagundo-Castillo, J. R., Alconada-Magliano, M. M., Carrillo Rivera, J. J., & González-Hernández, P. (2014). Caracterización de los flujos de agua subterránea a partir de su salinidad. *Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. V. Num.3*, 63-80.
- FAO. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103*. Roma: IUSS Grupo de Trabajo WRB.
- FAO. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106*. Roma: IUSS Working Group WRB.
- Farvolden, R. (1961). *A farmwater supply from quicksand. Preliminary Report (61)3*. Alberta: Research Council of Alberta.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *BOLETIN DE LA SOCIEDAD GEOLOGICA MEXICANA*, 84-92.
doi:10.18268/BSGM2000v53n1a5
- Ferrari, L., & Rosas Elguera, J. (2000). Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: the Tepic-Zacoalco rift revised. *Geological Society of America*, 334.
- Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C. M., & Manetti, P. (2000). Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*(318), 161-185.

- Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C. M., & Manetti, P. (2000). Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 161-185. doi:10.1016/S0040-1951(99)00310-8
- Ferrari, L., Garduno, V., Innoncenti, F., Manetti, P., Pasquare, G., & Vaggelli, G. (1994). A widespread mafic volcanic unit at the base of the Mexican Volcanic Belt between Guadalajara and Queretaro. *Geofisica Internacional*, 33(1), 107-123. doi:10.22201/igeof.00167169p.1994.33.1.543
- Ferrari, L., Orozco Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (5 de febrero de 2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 122-149. doi:https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018
- Ferrari, L., Orozco Esquivel, T., Navarro, M., López-Quiroz, P., & Luna, L. (2018). Digital geologic cartography of the Trans-Mexican Volcanic Belt and adjoining areas. *Terra Digitalis*, 1-8. doi:10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.34.95
- Ferrari, L., Petrone, C., Francalanci, L., Tagami, T., Eguchi, M., Conticelli, S., . . . Venegas-Salgado, S. (2003). Geology of the San Pedro – Ceboruco Graben, western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3), 165-181.
- Fournier, R. (1981). Application of Water Chemistry to Geothermal Exploration and Reservoir Engineering. En *Geothermal System : Principles and CaseHistories*. John Willey & Sons.
- Freeze , R., & Whitherspoon , P. (1967). Theoretical analysis of regional groundwater flow. 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variation. *Water Resources Research*, 623-634.
- Freeze, A. R., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J. 07632: Prentice-Hall. Inc.
- Freeze, R., & Witherspoon, P. (1966). Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resources Research*, 641-656.
- Frey, H., Lange, R., Hall, C., Delgado-Granados, H., & Carmichael, I. (2007). A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America:. *Geological Society of America Bulletin*, 119, 49-64. doi:10.1130/B25950.1
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- GEOEX S.A de C.V. (2003). *Estudio de actualización geohidrológica integral de las cuencas Atemajac-Toluquilla, estado de Jalisco, México*.
- Giggenbach, W. (1989). The chemical and isotopic position of Ohaaki field within the Taupo Volcanic Zone. *Proc. Eleventh N.Z. Geothermal Workshop*. Auckland.

- Gilbert, C. M., Carmichael, E., & Mahood, G. (1985). Volcanic Stratigraphy of the Guadalajara area, México. *Geofísica Internacional*, 24(1), 169-191.
- Gleick, P. (1993). *Earth Observatory*. Obtenido de <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water>
- Gómez Tuena, A., Orozco Esquivel, M., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2007). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America*, 129-181. doi: 10.1130/2007.2422(05)
- Gutiérrez Negrín, L. (1988). La Primavera, Jalisco, México, Geothermal Field. *Geothermal Resources Council Transactions*, 161-165.
- Hergt, T., Larragoitia Castro, J., Cardona Benavides, A., & Carrillo Rivera, J. J. (2009). Análisis multivariado en la definición de sistemas de flujo de agua subterránea en San Luis Potosí. *Análisis multivariado en la definición de sistemas de flujo de agua subterránea en San Luis Potosí, México*, 37-54.
- Hernández, A., Mahlknecht, J., Tamez Meléndez, C., Ramos Leal, J., Ramirez Orozco, A., Parra, R., . . . Eastoe, C. (2015). Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: The case of Guadalajara (Mexico). *Hydrology and Earth System Sciences*, 3937-3950. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-19-3937-2015>, 2015.
- Huizar Álvarez, R. (1998). *Definición del control de la calidad del agua subterránea extraída en la subcuenca de México (Delegación Ixtapalapa)*. Secretaría del Medio Ambiente, Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental (CONSERVA), Distrito Federal.
- Huizar Álvarez, R., Carrillo Rivera, J. J., Ángeles-Serrano, G., Hergt, T., & Cardona Benavides, A. (2004). Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City. *Hidrogeology Journal*, 12(4), 436-450. doi: 10.1007/s10040-004-0343-3
- Huizar Álvarez, R., Ouysse2, S., Espinoza-Jaramillo, M., Carrillo Rivera, J. J., & Mendoza-Archundia, E. (2016). The effects of water use on Tothian flow systems in the Mexico City conurbation determined from the geochemical and isotopic characteristics of groundwater. *Environmental Earth Science*. doi:10.1007/s12665-016-5843-7
- Huizar Álvarez, R., Varela-González, G. G., & Espinoza Jaramillo, M. (2014). Sistemas de flujo subterráneo y contenido de fluoruro en el agua de Tenextepango, Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 238-247.
- IAIA. (2009). *International Association of Impact Assessment*. Obtenido de https://www.iaia.org/pdf/special-publications/What%20is%20IA_spa.pdf
- Ibáñez, J. J., & Manríquez Cosío, F. J. (15 de junio de 2011). *Cambisoles, Geografía, Ambiente y Paisaje*. Recuperado el 2022, de Un universo invisible bajo nuestros pies. Los suelos y la vida.: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/06/15/139402>
- Ihrig, D. (1966). *Danube flood of 1965*. Budapest: Vizugyi Kozlemények.

- IMTA. (2014). *Red de Monitoreo Automática del acuífero Cuatrociénegas, Coahuila*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI. (1980). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación Escala 1:250 000 Continuo Nacional Serie I. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
- INEGI. (1992). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie I. Continuo Nacional. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825007020>
- INEGI. (1995). *Conjunto de Datos Vectoriales Topográficos. Escala 1:250,000; Serie II*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2000). *Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica. Escala 1:1 000 000. Corriente agua*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267698>
- INEGI. (2000). *Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica. Escala 1:1 000 000. Cuerpos agua*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía : <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267704>
- INEGI. (2000). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía* . Obtenido de Diccionario de Datos Climáticos (Vectorial) 1:1 000 000.
- INEGI. (2001). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas. Escala 1:1 000 000*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- INEGI. (2001). Diccionario de Datos Edafológicos. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
- INEGI. (2001). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Sistema topoformas*. México. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267582>
- INEGI. (2001). *Instituto Nacional Estadística Geografía e Informática*. Obtenido de Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- INEGI. (2005). Conjunto de Datos Vectoriales Climatológicos Escala 1:1,000,000; Humedad de Suelo. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía. Climatológica*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825231781>
- INEGI. (2005). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Guía para la interpretación de la cartografía. Información cartográfica impresa y digital. Uso de Suelo y Vegetación*. México.

- INEGI. (2006). *RED HIDROGRAFICA DIGITAL DE MEXICO ESCALA 1:250 000 EDICIÓN 1.0*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía:
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598428>
- INEGI. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía :
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI. (2008). Continuo Nacional de Aguas Subterráneas Escala 1:250,000; Serie II. *Instituto Nacional Estadística y Geografía*.
- INEGI. (2009). Cuerpos de Agua Escala 1:50,000. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
- INEGI. (2009). Diccionario de Datos Edafológicos Escala 1:250 000 Versión 2. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México.
- INEGI. (2012). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Humedales potenciales. Escala 1:250 000*. Obtenido de Instituto Nacional Estadística y Geografía:
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825006728>
- INEGI. (2012). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Humedales potenciales. Escala 1:250 000. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México. Obtenido de
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825006728>
- INEGI. (2013). Obtenido de Conjunto de datos de Perfiles de suelos. Escala 1:250 000. Serie II (Continuo Nacional): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- INEGI. (2013). *Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática*. Obtenido de Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM): <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/index.jsp>
- INEGI. (2013). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Carta edafológica escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional*.
- INEGI. (2014). Diccionario de Datos Edafológicos. Escala 1:250 000 Versión 3. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250 000 Serie V*.
- IUSS, ISRIC, & FAO. (2007). *Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional*. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103., FAO, Roma.
- IUSS, ISRIC, & FAO. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo*. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos, Roma. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i3794es/i3794es.pdf>
- Jalisco, I. d. (29 de 07 de 2021). *Indicador Trimestral de la Actividad Económica Estatal (ITAEE) en el primer trimestre de*. Obtenido de Gobierno del Estado de Jalisco:
<https://jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/129752>

- Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation*. NY, USA; London, UK: McGraw-Hill: New York.
- Kachadourian Marras, A., Alconada Magliano, M. M., Carrillo Rivera, J. J., Mendoza, E., Herrerías Azcue, F., & Silva, R. (2020). Characterization of Surface Evidence of Groundwater Flow Systems in Continental Mexico. *Water*. doi:<https://doi.org/10.3390/w12092459>
- Kachadourian Marras, A., Carrillo Rivera, J. J., & Llano Vázquez Prada, M. (2015). El Zapotillo: herencia de conocimiento obsoleto sobre el agua. En W.-G. R. Network, *Imposition, resistance, and alternatives in the face of an inter-regional water crisis in Mexico: El Zapotillo project* (págs. 170-191). Newcastle upon Tyne and Guadalajara, Mexico: Ochoa-García, Heliodoro.
- Kazemi, G., Lehr, J. H., & Perrochet, P. (2006). *Groundwater age*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kharaka, Y., & Mariner, R. H. (1989). *Chemical Geothermometers and their Application to formation waters from sedimentary basins. Thermal History of Sedimentary Basins*. (N. a. Naeser, Ed.) Hoboken: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0_6
- King Hubbert, M. (1940). The Theory of Ground-Water Motion. *The Journal of Geology*, 785-944.
- Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M., Ahrens, R. J., Cruz-Gaistardo, C. O., Sergey, S., & Solleiro-Rebolledo, E. (2013). *World Soils Book Series*. (S. S. America, Ed.) Springer Science & Business Media.
- Lugo-Hubp, J. (1990). El Relieve de la República Mexicana. (I. d. Geografía, Ed.) *Número especial: Centenario del Instituto de Geología*, 9(1), 82-111.
- Lugo-Hubp, J. (2011). *Diccionario geomorfológico* (Vol. Geografía para el siglo XXI). (I. d. Geografía, Ed.) Ciudad Universitaria, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maciel Flores, R., & Rosas-Elguera, J. (1992). Modelo geológico y evaluación del campo geotérmico La Primavera, Jal., México. *Geofísica Internacional*, 31(4), 359-370.
- Maciel-Flores, R., & Rosas-Elguera, J. (1992). Modelo geológico y evaluación del campo geotérmico La Primavera, Jal., México. *Geofísica Internacional*, 31(4), 359-370.
- Maderey Rascón, L. E., & Carrillo Rivera, J. J. (2005). *El recurso agua en México*. Ciudad de México: Instituto de Geografía UNAM.
- Mahlknecht, J., Hernández, A., Eastoe, C., Tamez Meléndez, C., Ledesma Ruiz, R., Ramos Leal, J., & Ornelas Soto, N. (2017). Understanding the dynamics and contamination of an urban aquifer system using groundwater age (^{14}C , ^3H , CFCs) and chemistry. *Hydrological Processes*. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.11182>
- Mazor, E. (2004). *Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. 3rd edition*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Meinzer, O. E. (1927). *Plants as Indicators of Groundwater*. (U. S. Office, Ed.) Obtenido de [usgs.gov: https://pubs.usgs.gov/wsp/0577/report.pdf](https://pubs.usgs.gov/wsp/0577/report.pdf)

- Michaud, F., Bourgois, J., Parrot, J., Taud, H., & Kesser, M. (1994). Le point triple de Jalisco (Mexique); évolution tectonique à partir du traitement de données MNT-SPOT. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 318 (II), 1513-1520.
- Michaud, F., Gasse, F., Bourgois, J., & Quintero, O. (2000). Tectonic controls on lake distribution in the Jalisco Block area (western Mexico) from Pliocene to Present. *Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G.J., Stock, J.M. (eds.), Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico: Geological Society of America, Special paper*, 99-100.
- Molina Maldonado, A. (Noviembre de 1997). Diferenciación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en la zona sur-centro del estado de Aguascalientes, México. *Tesis que para obtener el título de Ingeniero Geólogo*. (F. d. Ingeniería, Ed.) Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Molina Maldonado, A. (Noviembre de 1997). Diferenciación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en la zona sur-centro del estado de Aguascalientes, México. *Tesis de Licenciatura. Ingeniera Geóloga*. Ciudad Universitaria, México: Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Montero García, I. A. (2004). *Atlas Arqueológico de la Alta Montaña Mexicana*. (G. d. Mexicanos, Ed.) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional Forestal.
- Moore, G., Marone, C., Carmichael, I. S., & Renne, P. (1994). Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and The Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America Bulletin*, 106, 383-394.
- Nieto, J., Delgado A., I., & Damon, P. (1985). Geochronologic, petrologic, and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and The Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 24(4), 623-663.
- NMX-AA-079-SCFI-2001. (2001). *ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y*. México: Secretaría de Economía.
- Ortega Guerrero, A. (2001). *Estudio del acuífero del Río La Laja, municipios de Dolores Hidalgo, San Miguel de Allende, y San Felipe*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Distrito Federal.
- Ortega Guerrero, A. (2003). Origin and geochemical evolution of groundwater in a closed-basin clayey aquitard, Northern Mexico. *Hidrology Journal*(284), 26-44. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00239-7
- Ortega Guerrero, A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143-161.
- Ortega Guerrero, M. A. (s.f.). *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*. Recuperado el 2022, de https://conacyt.mx/sistemas-gravitacionales-de-flujo-de-agua-subterránea-un-paradigma/?fbclid=IwAR0iU1YRumamnbhq0yM28RkDxwzU2hvm6af-w-vuqcPOSmLxXxaO_kLopM

- Ortega Guerrero, M. A., Castellanos, J., Aguilar, R., Vázquez Alarcón, A., Alanís R., E., Vargas C., C., & Urrutia E., F. (2002). A conceptual model for increases of sodium, SAR, alkalinity and pH at the independence aquifer in Guanajuato. *Terra Latinoamericana*, 20(2), 199-207. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57320213.pdf>
- Ouyse, S., Wehncke, E., & Carrillo Rivera, J. J. (2018). Investigating regional groundwater flow systems in baja california central desert region. *International Journal of Hydrology*, 83-93.
- Peñuela Arévalo, L. A. (2013). Caracterización del funcionamiento de los Sistemas de Flujo de agua subterránea en la porción Centro-Sur de la Mesa Central, México. . *Tesis que para optar por el grado de Doctora en Geografía*. Ciudad Universitaria, México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Porta, J., López Acevedo, M., & Roquero, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España: Mundi Prensa.
- Price, M. (2011). *Agua Subterránea*. LIMUSA.
- RAE. (Diciembre de 2021). *REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <<https://dle.rae.es>>
- Rankama, K., & Sahama, T. (1954). *Geoquímica*. Madrid: Aguilar S.A.
- Robin, C., Mossand, P., Camus, G., Cantagrel, J., Gourgaud, A., & Vincent, P. M. (1987). Eruptive history of the Colima volcanic complex (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 99-113.
- Robinson, T. W. (1958). Phreatophytes. (U. S. Office, Ed.) *Geological Survey Water Supply* (1423).
- Rosas Elguera, J., & Urrutia Fucugauchi, J. (1998). Tectonic Control of the Volcano-Sedimentary Sequence of the Chapala Graben, Western Mexico. *International Geology Review*, 40, 350-362.
- Rosas Elguera, J., Ferrari, L., López Martínez, M., & Urrutia Fucugauchi, J. (1997). Stratigraphy and Tectonics of the Guadalajara Region and Triple-Junction Area, Western México. *International Geology Review*, 125-140.
- Rosas Elguera, J., Ferrari, L., Delgado, M., Uribe, A., Alva Valdivia, L., & Castillo, R. (2003). Active Extensional Faulting at the Southern Half-Graben Belt of the Tepic-Zacoalco Rift, Western Mexico.
- Rossotti, A., Ferrari, L., López Martínez, M., & Rosas Elguera, J. (2002). Geology of the boundary between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt in the Guadalajara region, western Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 1-15.
- Rounds, S. (2012). *Alkalinity and acid neutralizing capacity*. (Vols. Techniques of Water-Resources Investigations). U.S. Geological Survey . doi: <https://doi.org/10.3133/twri09A6.6>.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México. 1ra. Edición Digital*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México: Limusa.

- Sánchez Díaz, L. F. (2007). Origen, transporte, distribución y concentraciones de los fluoruros en el sistema hidrogeológico Atemajac-Toluquilla, Jalisco, México. . *Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Tierra. Opción en Aguas Subterráneas*. Ciudad Universitaria, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- SARH. (1976). Atlas del agua de la República Mexicana. Cincuentenario de la creación de la Comisión Nacional de Irrigación. *Secretaría de Recursos Hidráulicos*.
- Schaaf, P., Morán-Zenteno, D., Hernández Bernal, M., Solís Pichardo, G., Tolson, G., & Kohler, H. (1995). Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence. *Tectonics*, 14(6), 1339-1350.
- Segura-Castruita, M., & Ortiz-Solorio, C. A. (2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 93-110. Obtenido de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1321/pdf>
- SEMADET. (2010). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) Presa La Vega*. Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. Gobierno del Estado de Jalisco.
- SEMARNAT. (2003). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Conjunto de datos vectoriales de la carta de vegetación primaria, escala 1: 1 000 000 (nivel I y II)* .
- SMN. (Sin fecha). *Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)*. Obtenido de Servicio Meteorológico Nacional: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi#:~:text=De%20los%20%ADndices%20que%20actualmente%20se%20utilizan%20para,los%20m%C3%A1s%20utilizados%20en%20m%C3%A1s%20de%2070%20pa%C3%ADses>.
- SMN. (Sin fecha). *Información de Estaciones Climatológicas*. (C. N. Agua, Productor) Obtenido de Servicio Meteorológico Nacional: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Tiner, R. W. (1991). The Concept of a Hydrophyte for Wetland Identification. *BioScience Vol. 41 No. 4*, 236-247. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/1311413> .
- Tóth, J. (1962). A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 4375- 4383.
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 4795-4812.
- Tóth, J. (1970). A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeological environment. *Journal of Hydrology*, 164-176.
- Tóth, J. (1972). Properties and manifestations of regional groundwater movement . *Proc 24th International Geological Congress*, (págs. 153-163). Montreal .
- Tóth, J. (1984). First Canadian/American Conference on Hydrogeology. *The Role of Regional Gravity Flow in the Chemical and Thermal Evolution of Groundwater*. Alberta Canada.

- Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Journal of Hydrogeology*, 1-14.
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero* , 111(4):9-26.
- Tóth, J. (2009). *GRAVITATIONAL SYSTEMS OF GROUNDWATER FLOW Theory, Evaluation, Utilization*. University of Alberta, Canada; Eotv ́ os Loránd University, Hungary: Cambridge University Press.
- Tóth, J. (2016). The Evolutionary Concepts and Practical Utilization of the Tothian Theory . *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, 1-11.
- USDA. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos, Soil Taxonomy*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
- USDA, & NRCS. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. (Vol. Décima segunda Edición).
- Watkins, N. D., Gunn, B. M., Baksi, A. K., & Ade-Hall, J. (1971). Paleomagnetism, Geochemistry, and Potassium-Argon Ages of the Rio Grande de Santiago Volcanics, Central Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 1955-1968. doi:[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[1955:PGAPAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[1955:PGAPAO]2.0.CO;2)
- WDA Consultants Inc. (2006). Hydrogeology of shallow and deep seated . Calgary, Canada.
- Weyer, K. U. (enero de 1978). Hydraulic forces in permeable media. Orleans, France: Mémoires du B.R.G.M.
- Weyer, K. U., & Ellis, J. C. (12-13 de Junio de 2013). Yellowstone National Park: Regional Groundwater Dynamics in High Temperature Geothermal Area. *International Symposium on Regional Groundwater Flow: Theory, Applications and Future Development* . Xi'an, China.
- Zapata Hernández, R. D. (2004). *Química de la acidez del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3280>
- Zárate-del Valle, P. F., & Simoneit, B. R. (2005). La generación de petróleo hidrotermal en sedimentos del Lago de Chapala y su relación con la actividad geotérmica del rift Citala en el estado de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 358-370.

11 Anexos

Localización de las muestras de agua analizadas. Sistema Geográfico de Referencia (SGR), Datum: WGS84 Proyección: UTM 14N

Muestra de agua	Lugar	Fuente	UTM_X	UTM_Y	Referencia	ID original
1	BALNEARIO RANCHO ALEGRE	Pozo	663959.9954	2271615	03_GEOEX-SIAPA	288
2	BOSQUES DE SN ISIDRO 1	Pozo	669970.0048	2298539	03_GEOEX-SIAPA	324
3	BOSQUES DE TONALA	Pozo	681574.997	2284239	03_GEOEX-SIAPA	2098
4	BUGAMBILIAS 3	Pozo	662314.0043	2278444	03_GEOEX-SIAPA	333
5	BUGAMBILIAS 7	Pozo	659743.0028	2279639.001	03_GEOEX-SIAPA	336
6	CLUB DE GOLF ATLAS 1	Pozo	676793.001	2276694	03_GEOEX-SIAPA	239
7	CLUB WEMBLEY CAMPO FUTBOL	Pozo	670016.0009	2274679.999	03_GEOEX-SIAPA	460
8	COCA COLA -2	Pozo	660590.0011	2292000.001	03_GEOEX-SIAPA	462
9	INGLATERRA	Pozo	663555.9948	2288226	03_GEOEX-SIAPA	2138
10	RANCHO ALEGRE 1	Pozo	681606.0039	2264798	03_GEOEX-SIAPA	1867
11	SCI INDUSTRIAS	Pozo	679551.0035	2268118	03_GEOEX-SIAPA	2037
12	TESISTAN 03 E	Pozo	657637.9998	2298358.999	03_GEOEX-SIAPA	2202
13	Atemajac	Pozo	667341.9964	2284032	11_ITESM	Topacio
14	Atemajac	Pozo	682060.9948	2283256	11_ITESM	Educadores Jaliscienses
15	Atemajac	Pozo	667551.9966	2288046	11_ITESM	Tanque Tesistán
16	Atemajac	Pozo	668827.0012	2288716	11_ITESM	Fray Pedro
17	Atemajac	Pozo	662745.9972	2291073.999	11_ITESM	San Juan de Ocotán 1
18	Atemajac	Pozo	666141.9973	2293815	11_ITESM	Fovisste
19	Atemajac	Pozo	665384.0023	2292395	11_ITESM	Power Center
20	Atemajac	Pozo	662419.0048	2288910.001	11_ITESM	Virreyes
21	Atemajac	Pozo	661553.0048	2294229	11_ITESM	Tesistan 61
22	Atemajac	Pozo	662815.0022	2308845	11_ITESM	El Taray
23	Toluquilla	Pozo	669483.9985	2274761	11_ITESM	Toluquilla 6
24	Toluquilla	Pozo	667094.001	2273622	11_ITESM	Toluquilla 17
25	Toluquilla	Pozo	666213.0036	2271258	11_ITESM	Toluquilla 22
26	Toluquilla	Pozo	664822.0051	2273557	11_ITESM	Toluquilla 7
27	Toluquilla	Pozo	673314.0025	2276712.001	11_ITESM	Las Pintas
28	Toluquilla	Pozo	669024.001	2267140	11_ITESM	La Estancia 4
29	Toluquilla	Pozo	666143.0025	2267987	11_ITESM	La Loma de San Juan
30	Toluquilla	Pozo	663914	2271817.001	11_ITESM	Rancho Alegre
31	Toluquilla	Pozo	683776	2281209.001	11_ITESM	Unidad Deportiva Tonalá
32	Toluquilla	Pozo	691151.9962	2280004	11_ITESM	San Ismael
33	Toluquilla	Pozo	683207.0045	2278572	11_ITESM	Tateposco 2
34	Toluquilla	Pozo	656837.0036	2271626	11_ITESM	El Lindero
35	Toluquilla	Pozo	661843.9973	2277592	11_ITESM	Viveros del Sur
36	San Juan de los Lagos 1	Pozo	793528.2638	2342898.019	1508_AKM	SJL1
37	San Juan de los Lagos 2	Pozo	779270.7112	2358503.663	1508_AKM	SJL2
38	Jalostotitlan	Pozo	783885.4193	2330447.906	1508_AKM	JALOS
39	Valle de Guadalupe 1	Pozo	773790.1591	2328169.595	1508_AKM	VG1
40	Valle de Guadalupe 2	Pozo	772917.515	2328962.867	1508_AKM	VG2
41	Tepatitlan 1	Pozo	764471.7808	2268412.407	1508_AKM	TEPA1
42	Rio Verde 1	Río	768508.1486	2336807.016	1508_AKM	RV1
43	Temacapulin 1	Manantial	767783.4193	2337367.572	1508_AKM	TMCA1
44	San Juan de Los Lagos, Los Altos J	Pozo	777862.8951	2353090.011	10_Peñuela-Arévalo	Pozo 4
45	San Juan de Los Lagos, Los Altos J	Pozo	774358.5028	2348998.051	10_Peñuela-Arévalo	Pozo 9
46	Encarnación de Díaz, Los Altos Ja	Pozo	778114.2198	2376085.159	10_Peñuela-Arévalo	Acosta
47	Los Yañez, Los Altos Jalisco	Pozo	747969.8057	2387886.318	10_Peñuela-Arévalo	Los Yañez
48	Corral Blanco, Los Altos Jalisco	Pozo	772252.8229	2387252.219	10_Peñuela-Arévalo	Corral Blanco
49	Belén del Refugio, Los Altos Jalisco	Pozo	765415.2751	2382747.467	10_Peñuela-Arévalo	Belen del Refugio
50	Villa de Ornelas, Los Altos Jalisco	Pozo	762449.0574	2371225.605	10_Peñuela-Arévalo	Ornelas
51	Ojuelos, Los Altos Jalisco	Pozo	854318.7652	2422542.681	10_Peñuela-Arévalo	Ojuelos

Tabla 49 Localización de las muestras analizadas.

Concentraciones en meq/l

Muestra	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Na	K	Ca	Mg	Σ Aniones	Σ Cationes	% Error
1	8.508	1.057	0.146	0.071	3.826	0.537	1.4	3.539	9.783	9.302	2.5
2	0.918	0.200	0.042	0.071	0.652	0.128	0.25	0.165	1.231	1.195	1.5
3	1.672	0.229	0.000	0.143	0.565	0.128	0.8	0.412	2.044	1.905	3.5
4	0.934	0.257	0.000	0.071	1.087	0.026	0.1	0.000	1.263	1.213	2.0
5	0.902	0.629	0.000	0.143	0.043	0.026	0.15	1.317	1.673	1.536	4.3
6	4.311	0.457	0.125	0.000	2.348	0.384	0.85	1.152	4.894	4.734	1.7
7	1.377	0.371	0.979	0.071	1.783	0.102	0.45	0.329	2.799	2.664	2.5
8	1.656	0.886	0.021	0.071	2.000	0.205	0.15	0.165	2.634	2.519	2.2
9	3.541	1.457	0.125	0.071	1.261	0.230	2.9	0.823	5.195	5.214	-0.2
10	3.098	0.543	0.229	0.000	3.826	0.102	0.1	0.000	3.870	4.028	-2.0
11	3.098	0.286	0.146	0.143	1.696	0.256	0.9	0.658	3.673	3.510	2.3
12	0.607	3.543	0.313	0.071	1.478	0.307	1.5	1.152	4.533	4.437	1.1
13	3.970	0.148	0.185	0.030	2.774	0.537	0.715	0.519	4.334	4.545	-2.4
14	1.680	0.038	0.022	0.031	0.635	0.161	0.84	0.395	1.771	2.031	-6.8
15	0.961	0.137	0.149	0.080	1.013	0.153	0.255	0.214	1.326	1.635	-10.4
16	1.120	0.160	0.177	0.102	0.913	0.166	0.23	0.181	1.559	1.490	2.2
17	1.439	0.056	0.031	0.004	1.178	0.217	0.225	0.346	1.530	1.966	-12.5
18	0.720	0.053	0.139	0.149	0.800	0.199	0.155	0.140	1.060	1.294	-10.0
19	1.864	0.059	0.179	0.113	1.535	0.156	0.375	0.222	2.215	2.288	-1.6
20	2.400	0.031	0.030	0.052	1.909	0.184	0.25	0.263	2.514	2.606	-1.8
21	1.361	0.039	0.072	0.148	1.174	0.113	0.2	0.132	1.619	1.618	0.0
22	1.680	0.013	0.005	0.009	0.500	0.199	0.465	0.387	1.707	1.551	4.8
23	17.521	2.003	0.135	0.003	6.609	1.483	1.445	8.477	19.662	18.014	4.4
24	16.907	2.354	0.104	0.005	4.957	0.921	2.935	7.646	19.370	16.458	8.1
25	23.200	2.440	0.136	0.004	6.391	1.046	4.485	9.300	25.780	21.223	9.7
26	11.436	6.543	0.467	0.003	7.565	1.238	4.035	8.560	18.448	21.398	-7.4
27	7.134	0.414	0.122	0.002	4.435	0.867	1.56	1.317	7.673	8.179	-3.2
28	2.667	0.093	0.052	0.029	1.700	0.240	0.665	0.708	2.841	3.313	-7.7
29	2.823	0.206	0.128	0.068	1.665	0.220	0.835	1.062	3.225	3.782	-7.9
30	7.670	1.186	0.408	0.057	4.026	0.729	1.865	3.934	9.322	10.554	-6.2
31	2.980	0.096	0.036	0.076	1.752	0.325	0.665	0.626	3.188	3.367	-2.7
32	2.167	0.007	0.004	0.004	0.878	0.192	0.79	0.642	2.182	2.502	-6.8
33	2.728	0.180	0.050	0.050	1.935	0.343	0.63	0.658	3.008	3.566	-8.5
34	1.600	0.034	0.126	0.144	0.965	0.189	0.425	0.453	1.905	2.032	-3.2
35	0.480	0.060	0.043	0.085	0.613	0.015	0.095	0.025	0.669	0.748	-5.6
36	3.667	0.000	0.133	0.081	5.300	0.069	0.095	0.033	3.881	5.497	-17.2
37	1.844	0.000	17.704	0.081	0.948	0.164	16.495	1.827	19.629	19.434	0.5
38	2.595	0.046	0.069	0.081	2.513	0.113	0.32	0.115	2.790	3.061	-4.6
39	2.474	0.146	0.694	0.081	2.378	0.072	0.65	0.354	3.394	3.454	-0.9
40	2.361	0.149	0.656	0.081	2.361	0.082	0.63	0.346	3.246	3.418	-2.6
41	1.713	0.323	1.679	0.081	3.891	0.041	0.3	0.008	3.796	4.240	-5.5
42	2.913	0.603	0.796	0.153	2.070	0.412	1.73	0.486	4.465	4.697	-2.5
43	2.333	0.709	2.473	0.081	6.109	0.046	0.195	0.008	5.595	6.358	-6.4
44	2.144	0.720	3.688	0.060	6.696	0.049	0.31	0.015	6.611	7.070	-3.4
45	3.920	0.041	0.020	0.062	1.322	0.042	2.52	0.337	4.042	4.220	-2.2
46	3.264	0.258	0.838	0.079	4.196	0.071	0.62	0.097	4.438	4.983	-5.8
47	0.774	0.030	0.036	0.031	0.609	0.067	0.16	0.010	0.871	0.846	1.4
48	3.264	0.075	0.096	0.066	0.917	0.327	2.09	0.359	3.501	3.694	-2.7
49	3.424	0.150	0.304	0.091	2.235	0.281	1.185	0.458	3.969	4.160	-2.3
50	3.008	0.371	10.458	0.003	10.739	0.132	1.78	0.033	13.841	12.685	4.4
51	2.784	0.471	0.815	0.115	2.578	0.437	1.805	0.165	4.185	4.985	-8.7

Tabla 50 Total de muestras con sus concentraciones iónicas en meq/l y su % Error.

Toma de muestras de agua. - A continuación, se describe el procedimiento realizado para la toma de las 8 muestras en los Altos de Jalisco en agosto del 2015.

Equipo: GPS portátil, medidores de la marca CONDUCTRONIC para los parámetros de temperatura, pH, ORP, OD y CE (equipo # 1565, # 1564 # 1632 del Instituto de Geografía UNAM), reloj-cronómetro, celda de calibración pH y titulador digital Hach.

Material y reactivos: termómetro de vidrio manual ambiental, cinta canela, cinta gris aislante, cinta de teflón (también puede ser útil), mesa, sombrilla, hielera, hielo, bolsas ziplock, marcadores indelebles, etiquetas adhesivas, servilletas, trapos, navaja, mangueras de diferentes diámetros, adaptador para grifos, jeringas, filtros para jeringas (membrana de acetato de celulosa de 0.45 μm), portafiltros, pipeta 10 ml, vaso de precipitado 50 ml, matraz Erlenmeyer 150 ml, ácido nítrico de alta pureza, cartuchos de ácido sulfúrico (0.16 y 1.6 N), fenolftaleína, agua destilada, buffer pH 4, 7 y 10, y soluciones de calibración para cada uno de los medidores (C.E, OD, ORP).

Procedimiento. –

1. Realizar un registro fotográfico del lugar y muestreo
2. Colocar el termómetro ambiental en una zona con sombra y registrar T
3. Registrar coordenadas y altitud
4. Sacar los medidores (potenciómetros), no sacar los aparatos de sus estuches para protegerlos de la intemperie, y enchufar su medidor de temperatura y su electrodo
5. Se realiza la instalación de la(s) manguera (s) desde la salida de agua más cercana a la boca del pozo, antes de la cloración y sin contacto con la atmósfera
6. Instalar la celda de aislamiento
7. Tratar de evitar o disminuir la presencia de burbujeo y/o turbulencia en las mangueras, caja de calibración y celda de aislamiento.
8. ¡Encender el medidor de temperatura (T) y medir sólo con el termómetro del medidor! No sacar el electrodo.
9. Dependiendo del rango de T del agua es que se elige el pH para calibrar el medidor (Temperaturas altas, pH 10; temperaturas bajas, pH 4).
10. Colocar la caja de calibración de pH en una posición estable y firme para llenarla del agua a muestrear procurando que no se estanque el agua, sino que haya flujo continuo. Dejar por unos 5 minutos que se llene y se estabilice la T del agua dentro de la caja. Revisar que los botes con buffer

de pH estén bien cerrados pero fáciles de abrir. Se debe tener cuidado al abrir los frascos para que no entre agua y altere las propiedades del buffer, asimismo tener precaución de dónde poner las tapas de los frascos al momento de hacer la calibración, para evitar que se ensucien

11. Ya seleccionado el pH de referencia para calibrar el potenciómetro (#1565), entonces se coloca el termómetro del medidor del pH (pHmetro) dentro de la caja de calibración
12. Se enjuaga perfectamente el electrodo de pH con agua destilada, se seca y se sumerge en la solución de pH 7, ajustando la lectura del aparato con el botón de calibración correspondiente
13. Lavar con agua destilada nuevamente, secar y colocar en otra solución "buffer" que puede ser de 4 o 10 de acuerdo con la temperatura del agua
14. Con ayuda del pequeño desarmador ajustar el pHmetro hasta que en la pantalla aparezca el valor exacto del pH de referencia. Ya listo esto, cerrar la tapa del pH de referencia. Enjuagar con agua destilada el electrodo, secarlo y colocarlo en la celda o directamente sobre el agua objetivo
15. La calibración del equipo de OD (OXI25) depende de la altitud del sitio de muestreo, varía cada 100 msnm, así que si las elevaciones presentan elevaciones similares no es necesario calibrar en cada sitio, lo cual fue el caso en el presente muestreo
16. La calibración del medidor de CE no es necesaria en todos los sitios de muestreo, sin embargo, si se tiene duda se puede realizar con su respectivo buffer y verificar en el manual
17. La calibración del equipo de Eh, se realiza siguiendo el manual del medidor
18. Colocar los termómetros del resto de los medidores, insertándolos en la tapa de la celda de calibración de pH
19. Colocar sus respectivos electrodos en la celda de aislamiento. Permitir que se estabilicen las lecturas de los medidores; la estabilización del potencial redox es muy variable, pero en general la experiencia indica que en promedio se requieren de 15-20 minutos
20. Realizar la primera lectura de datos (T, Eh, OD, CE y pH)
21. Dependiendo de la variación que están presentando los datos, establecer realizar las lecturas con cronómetro cada 5-10 minutos, dependiendo el caso; realizar lecturas hasta que se estabilicen las lecturas.
22. Enjuagar con el agua objetivo los 4 frascos de polietileno junto con sus tapas y contratapas. Dependiendo si el lugar tiene mucho sedimento es recomendable filtrar todas las muestras.

23. Llenar tres frascos con el agua sin ninguna burbuja. No llenar hasta el tope, cerrarlo moverlo, cazar las burbujas, abrir, llenar hasta el tope con ayuda de una jeringa, colocar contratapa, revisar que no haya ninguna burbuja.
24. Para la 4ta botella llenar con el agua la jeringa para filtrar y colocarle su filtro
25. Llenar esta 4ta botella, sin burbujas, agregarle 13 gotas de ácido nítrico (se supone que es hasta aproximadamente un pH de 2)
26. Entre los componentes que prácticamente no se afectan por el almacenamiento de la muestra se encuentran el sulfato (siempre que no haya H_2S pues es ese caso éste, al oxidarse, incrementaría el contenido de SO_4^{2-}), litio, sodio, potasio, fluoruro, bromuro, yoduro y boro. Otros microconstituyentes, sin embargo, tienden al cabo del tiempo a adherirse a las paredes del frasco acusando una concentración menor a la real. Por tal razón se suele preservar parte de la muestra, mediante tratamiento con un ácido mineral, como el ácido nítrico, y conservación en frío antes de enviar al laboratorio. Etiquetarla inmediatamente para diferenciarla.
27. Etiquetar las botellas, guardar en bolsa de plástico y colocar en refrigeración

Para la alcalinidad, se utilizó H_2SO_4 a una concentración de 0.16 N, en una muestra (30 ml) de agua filtrada (membrana de poros $\leq 0.45 \mu m$). El ácido sulfúrico es añadido a la muestra con un titulador digital (Hach) para controlar su volumen, y se va midiendo periódicamente temperatura y pH:

28. Aforar y filtrar 30 ml del agua (pipeta de 10 ml, membrana de poros $\leq 0.45 \mu m$) y colocarlos en vaso de precipitado
29. Medir con el electrodo y termómetro del pHmetro y anotar el pH del volumen aforado
30. Enjuagar con agua destilada y secar electrodo y termómetro del pHmetro
31. Colocar muestra sobre una superficie blanca
32. Agregar al volumen aforado, 13 -15 gotas de fenoftaleína o menor cantidad de gotas en caso de que adquiriera un color rosa-lila antes de las 15 gotas. Si el pH inicial es > 7 , generalmente se inició agregando entre 5 y 10 gotas, dependiendo del valor inicial del pH y su variación
33. Agitar suavemente, introducir el electrodo y termómetro de pHmetro, medir el pH
34. Preparar el titulador para agregar el H_2SO_4
35. Introducir el electrodo y termómetro de pHmetro, agitar suavemente, medir el pH, enjuagar con agua destilada, secar electrodo y termómetro
36. Registrar en qué pH desaparece el color de la muestra

37. Lo ideal es tener una lectura mínima del pH por cada número entero que va registrado (7,6,5, etc.), conforme se acerca al pH 4, disminuir la cantidad de ácido y titular hasta alcanzar el pH 3.5
38. La prueba de alcalinidad se realizó paralelamente a la lectura de los otros datos en campo por lo que cuando era el momento de registro (cada 10 minutos), se enjuagó el termómetro y electrodo con agua destilada. En caso de tener el tiempo suficiente durante el recorrido de muestreo, se recomienda realizar la prueba de alcalinidad hasta el final para no estar moviendo el termómetro y el electrodo o en caso de contar con otro equipo es deseable realizar la prueba de alcalinidad simultáneamente.
39. Una vez terminadas las lecturas de los parámetros se desconectan las mangueras
40. Enjuagar los electrodos con agua destilada, secar con papel y guardar equipos. El correcto almacenamiento y transporte de los diferentes electrodos consiste en mantenerlos (generalmente húmedos) sumergidos en solución de humectación o en su defecto, en agua destilada
41. Enjuagar y secar las celdas
42. Registrar T ambiental a la sombra (final) y guardar termómetro
43. Guardar absolutamente todo y dejar limpio el lugar



Imagen 21 Muestreo en Los Altos de Jalisco, agosto 2015.

Alcalinidad

Datos de la titulación para calcular la alcalinidad de las muestras Los Altos, Ingresados en USGS_Alkalinty Calculator en <https://or.water.usgs.gov/aik/>

Muestra	SJL2	Muestra	JALOS	Muestra	TMCA1	Muestra	RV1	Muestra	TEPA1	Muestra	SJL1-1	Muestra	VG2	Muestra	VG1		
T (°C)	22.9	T (°C)	24.1	T (°C)	39.7	T (°C)	24	T (°C)	54	T (°C)	31.9	T (°C)	33.7	T (°C)	36.1		
CE (mS/cm)	1462	CE (mS/cm)	299	CE (mS/cm)	743	CE (mS/cm)	481	CE (mS/cm)	480	CE (mS/cm)	542	CE (mS/cm)	366	CE (mS/cm)	359		
Digitos	pH	Digitos	pH	Digitos	pH	Digitos	pH	Digitos	pH	Digitos	pH	Digitos	pH	Digitos	pH		
0	7.35	0	8.52	0	9.13	0	8.18	0	8.53	0	9.27	0	8.13	0	8.11		
50	6.96	5	8.45	5	8.96	5	8.07	10	8.14	5	9.21	30	7.56	5	8.06		
100	6.53	15	8.22	15	8.85	10	7.95	30	7.41	10	9.15	60	7.26	25	8.08		
150	6.21	20	8	25	8.64	13	7.97	50	7.13	20	9.06	100	6.95	80	7.55		
250	5.28	40	7.46	30	8.61	20	7.87	80	6.82	30	8.99	150	6.7	150	6.48		
280	4.4	60	7.17	35	8.5	30	7.68	110	6.64	50	8.84	250	6.12	180	6.55		
290	4.01	80	6.92	40	8.33	50	7.45	161	6.19	60	8.73	350	5.05	210	6.43		
300	3.79	110	6.73	45	8.24	70	7.28	201	5.8	70	8.59	450	3.05	260	6.18		
305	3.72	150	6.46	100	7.19	100	7.08	231	5.47	80	8.38	II Medición (VG2-2)					
310	3.64	190	6.26	150	6.8	150	6.82	261	4.75	90	8.15	330	5.69	330	5.69		
315	3.51	230	6.07	175	6.67	200	6.58	271	4.48	120	7.55	360	5.13	360	5.13		
320	3.51	260	5.93	200	6.59	250	6.39	281	3.86	150	7.23	380	4.26	380	4.26		
		280	5.97	225	6.47	300	6.2	283	3.76	180	6.97	400	3.6	400	3.6		
		290	5.92	275	6.25	350	5.95	287	3.61	220	6.8	415	3.4	415	3.4		
		310	5.77	325	5.99	400	5.51	292	3.44	270	6.7	II Medición (SJL1-2)					
		330	5.63	375	5.63	450	4.27				350	6.39	T (°C)				
		360	5.33	425	4.14	475	3.7				450	6.06	T (°C)				
		400	4.29	475	3.24	485	3.59				550	5.72	CE (mS/cm)				
		410	3.73				495	3.49				650	5.03	Digitos			
		412	3.63										750	3.02	pH		
		415	3.55										II Medición (SJL1-2)				
		417	3.5										T (°C)				
		420	3.4										T (°C)				
													CE (mS/cm)				
													Digitos				
													pH				
													0				
													9.27				
													650				
													5.07				
													680				
													4.79				
													700				
													4.41				
													720				
													3.76				
													725				
													3.62				
													730				
													3.49				

valor de pH no registrado en prueba de alcalinidad, extraído de última medición de parámetros fisicoquímicos

Ácido (N)	0.16
Vol. muestra (ml)	30

