



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA
DEL SISTEMA DE MANANTIALES
TERMALES DE IXTAPAN DE LA SAL-
TONATICO, ESTADO DE MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:

Lic. C. A. Teresa Ana Karen Martínez Florentino

TUTORES ACADÉMICOS:

Dra. María Vicenta Esteller Alberich

Dr. Guillermo Pedro Morales Reyes



Toluca, México, diciembre de 2015

RESUMEN

A través del estudio hidrogeoquímico de las aguas termales y no termales, así como de pozos y aguas superficiales en el área de Ixtapan de la Sal y Tonalico, Estado de México, se pudo caracterizar las propiedades fisicoquímicas del agua e identificar algunos procesos geoquímicos.

La caracterización del agua se realizó con los datos obtenidos durante tres muestreos realizados en mayo (estiaje) y agosto (lluvia) de 2014, así como una muestra del mes de enero (intermedio) de 2015. En donde se determinaron parámetros in situ como alcalinidad, temperatura, pH, CE, Salinidad y SDT. En laboratorio se analizaron cationes (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+), y aniones (SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^-) mayoritarios y algunos elementos traza (As, Li, B, Sr).

Los resultados muestran que existen tres tipos de agua:

- Agua termal con temperaturas que oscilan entre 30 y 40 °C, que se caracterizan por ser aguas cloruradas sódicas y presentar altos contenidos en As, Li y B.
- Agua de pozo, con temperatura que varían desde los 22 hasta 24°C, temperatura similar es similar a la temperatura promedio del ambiente, y con características de un agua bicarbonatada cálcica.
- Agua no termal, con temperatura similar a la temperatura ambiente, con altos contenidos en Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ , así como de HCO_3^- y Cl^- , además de arsénico y litio, siendo esta agua del tipo bicarbonatada clorurada sódico cálcica.

También se llevó a cabo un estudio de la evolución temporal de la alcalinidad, temperatura, pH y CE de los manantiales termales a nivel quincenal durante un año, pudiéndose comprobar que las variaciones de estos parámetros no son de gran intensidad, ya que como máximo los valores oscilan entorno al 10%.

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se estableció un esquema de comportamiento hidrogeoquímico del sistema termal de Ixtapan de la Sal - Tonicato, en donde se identificaron los procesos que ocurren en el mismo y controlan las características fisicoquímicas del agua. Destacan los procesos de la interacción agua-roca, la mezcla de agua meteórica con agua termal y un flujo regional cuya elevada temperatura estaría relacionada con la presencia de una cámara magmática.

ABSTRACT

Through the hydrogeochemical study of the thermal waters and non-thermal in the area of Ixtapan de la Sal and Tonatico, State of Mexico, it was possible to characterize the physicochemical properties of water and identify some geochemical processes.

The hydrochemical characterization of the Ixtapan de Sal-Tonatico made with the data obtained through the one year may 2014 to may 2015, on the dry and rain seasons. The alkalinity, temperature, CE, pH, Eh, TDS were determined in situ and in the laboratory the anions (SO_4^{2-} , Cl^- and NO_3^-), the cations (Ca^{2+} , Fe, K^+ , Mg^{2+} , Mn, Na^+), and some trace elements.

The results show that there are three types of water:

- Thermal water with temperatures between 30 and 40°C, which was characterized as chlorinated water and have high sodium contents in As, Li and B.
- Well water with temperature ranging from 22 to 24°C and the characteristics calcium bicarbonate water.
- No thermal water, with temperature between 23 and 25°C, with high content of Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} and Na^+ and HCO_3^- and Cl^- , addition of As, Li and B. Is a water chlorinated sodium calcium bicarbonate type.

The study of the temporal evolution of alkalinity, temperature, pH and EC of the thermal springs of fortnightly level for a year, being able to check variations of these parameters with any kind of great intensity, and Values that at most 10% range environment.

Tonatico, where the processes occurring in it and control the physicochemical characteristics of the water were identified - the basis of the results obtained in this study, hydrogeologic model of hydrogeochemical system thermal behavior of Ixtapan de la Sal was established. Processes emphasize the water-rock interaction, mixing of meteoric water with thermal water flow and regional whose high temperature would be related to the presence of a magma chamber.

ÍNDICE

Índice General

1. INTRODUCCIÓN.	1
2. MARCO TEÓRICO.	4
2.1. Manantiales termales.	4
2.2. Hidrogeoquímica de los manantiales termales.	6
2.3. Manantiales termales en México.	8
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	16
3.1. Clima.	18
3.2. Hidrología.	19
3.3. Geología.	21
3.3.1 Geología Regional.	21
3.3.2 Geología Local.	22
3.3.3 Estratigrafía.	25
3.4. Tectónica.	29
3.5. Hidrogeología.	33
3.5.1. Unidades Geohidrológicas.	35
3.5.2. Acuíferos en materiales granulares.	39
3.5.3. Acuíferos en rocas fracturadas o fisuradas.	39
3.5.4. Acuíferos y acuitardos en materiales granulares o rocas fracturadas.	40
4. METODOLOGÍA.	43
4.1. Revisión bibliográfica y cartográfica.	45
4.2. Trabajo de campo.	45
4.2.1 Inventario de pozos y manantiales.	45
4.2.2 Muestreo.	55
4.2.3 Medición de parámetros in situ	57
4.3 Análisis en laboratorio de muestras.	59

4.4 Tratamiento de datos.	60
4.4.1 Electroneutralidad	60
4.4.2 Representaciones gráficas.	61
4.4.3 Tratamiento estadístico.	63
4.4.4 Identificación de procesos de mezclas.	65
4.5 Evaluación de la calidad del agua.	66
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	67
5.1 Caracterización de los puntos de muestreo.	67
5.2 Caracterización hidrodinámica	71
5.2.1 Validación de datos químicos.	71
5.2.2 Características fisicoquímicas generales.	73
5.2.3 Elementos minoritarios: As, B, Ba, Li, Si y Sr.	78
5.2.4 Representaciones graficas de las características químicas.	80
5.2.5 Relaciones entre las características físico/químicas.	87
5.2.6 Evolución temporal de las características fisicoquímicas.	97
5.2.7 Procesos de mezclas.	100
5.3 Caracterización temporal de caudales y parámetros fisicoquímicos.	103
5.3.1 Evolución temporal de parámetros en los manantiales termales	103
5.3.2 Relaciones entre los parámetros.	111
5.4 Idoneidad para uso y consumo humano	114
5.5 Esquema hidrogeológico.	117
6. CONCLUSIONES.	120
7. BIBLIOGRAFÍA.	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación del agua termal.	5
Tabla 2.2. Composición química de manantiales termales en la zona del volcán Chichón. . .	11
Tabla 2.3. Composición química de manantiales y pozos en la zona de Los Azufres.	13
Tabla 4.1 Normatividad mexicana para la determinación de parámetros químicos del agua.	60
Tabla 5.1 Relación de los puntos de muestreo.	68
Tabla 5.2 Errores de Electroneutralidad para las muestras colectadas en las diferentes campañas.	72
Tabla 5.3. Características físico químicas (parámetros de campo y elementos mayoritarios) en las muestras de agua.	79
Tabla 5.4. Contenido de iones minoritarios en las muestras de agua.	79
Tabla 5.5. Facies hidroquímicas correspondientes a los manantiales, pozos y agua superficial para las diferentes campañas de muestreo.	83
Tabla 5.6. Matriz con los coeficientes de correlación para las muestras de agua termal, no termal, superficial y de pozo.	89
Tabla 5.7. Matriz con los coeficientes de correlación para las muestras del mes de mayo de 2014 del agua termal, no termal y de pozo.	90
Tabla 5.8. Matriz con los coeficientes de correlación para las muestras del mes de agosto de 2014 del agua termal, no termal y de pozo.	91
Tabla 5.9. Matriz con los coeficientes de correlación para las muestras del mes de enero 2015 del agua termal, no termal, superficial y de pozo.	92
Tabla 5.10. Concentraciones mínimas y máximas de Li para los miembros extremos. . .	101
Tabla 5.11. Porcentaje de mezcla para los manantiales no termales.	101
Tabla 5.12. Estadísticos descriptivos de los valores de temperatura.	105
Tabla 5.13 Estadísticos descriptivos de los valores de conductividad eléctrica.	106
Tabla 5.14. Estadísticos descriptivos de los valores de pH.	108
Tabla 5.15. Estadísticos descriptivos de los valores de la concentración de cloruros.	110
Tabla 5.16. Valores obtenidos en las muestras de agua para parámetros incluidos en la NOM127-SSA1.	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Distribución geográfica de los depósitos epitermales en México.	9
Figura 2.2 Distribución geográfica de las manifestaciones geotérmicas superficiales identificadas por Iglesias.	10
Figura 3.1 Ubicación geográfica de la zona de estudio: Ixtapan de la Sal –Tonatico.	17
Figura 3.2 Variación de la precipitación media mensual en el período 1931 a 1990.	19
Figura 3.3 Red Hidrográfica de la zona de estudio: Ixtapan de la Sal -Tonatico.	20
Figura 3.4 Mapa geológico de la zona de estudio: Ixtapan de la Sal –Tonatico.	24
Figura 3.5 Principales sistemas de fallas Mioceno-Holoceno del CVTM y distribución de volcanes poligenéticos.	31
Figura 3.6 Modelo tectónico que dio origen a la evolución del Nevado de Toluca.	32
Figura 3.7 Elevación del nivel estático en msnm para el año 2010.	34
Figura 3.8 Unidades hidrogeológicas en la zona de estudio: Ixtapan de la Sal-Tonatico.	38
Figura 3.9 Corte geológico de la zona de estudio: Ixtapan de la Sal - Tonatico.	42
Figura 4. 1 Diagrama de flujo del proceso metodológico.	44
Figura 4. 2 Laguna Verde.	46
Figura 4. 3 Balneario Municipal de Ixtapan de la Sal.	47
Figura 4. 4 Balneario Municipal de Tonatico.	48
Figura 4. 5 Baños del Obispado.	49
Figura 4. 6 Manantial El Olincallí.	50
Figura 4. 7 Manantial El Ixtamil.	51
Figura 4. 8 Manantiales no termales.	52
Figura 4. 9 Pozos.	53
Figura 4.10 Localización de los puntos de muestreo en la zona de estudio.	54
Figura 4.11 Materiales de filtración para y botellas para el almacenamiento de muestras de agua	57
Figura 4.12 Determinación de parámetros in situ.	58
Figura 4.13 Determinación de alcalinidad en campo.	59
Figura 4.14 Diagrama de Piper.	62
Figura 4.15 Clasificación de las Facies hidrogeoquímicas.	62
Figura 4. 16 Diagrama de Schoeller-Berkaloff.	63
Figura 5.1 Localización de los puntos de monitoreo en el área de estudio.	69
Figura 5.2 Diagramas de Piper general (con todos los datos de todas las campañas), y los correspondientes a los muestreos de mayo y agosto 2014 y enero 2015.	82
Figura 5.3 Diagramas de Schoeller Berkaloff (con todos los datos de todas las campañas), y los correspondientes a los muestreos de mayo y agosto 2014 y enero 2015.	86
Figura 5.4 Relación CE/Cl.	94
Figura 5.5 Relación Cl/Na.	94
Figura 5.6 Relación CE/HCO ₃	95
Figura 5.7 Relación Ca/HCO ₃	95
Figura 5.8 Relación Cl/B, Cl/Li y Cl/Sr.	96
Figura 5.9 Relación entre CE y la temperatura del agua en las campañas de mayo, agosto de 2014 y enero 2015	97
Figura 5.10 Relación entre CE y concentración de cloruros del agua en las campañas de	98

mayo, agosto 2014 y enero 2015.	
Figura 5.11 Relación Li/B para las distintas muestras de agua en las campañas de mayo y agosto 2014 y enero 2015.	99
Figura 5.12 Porcentajes de mezcla de agua termal en los manantiales no termales	102
Figura 5.13 Evolución temporal de la temperatura del agua en los manantiales termales. . .	104
Figura 5.14 Evolución temporal de la conductividad eléctrica en los manantiales termales. .	106
Figura 5.15 Evolución temporal del pH en los manantiales termales.	108
Figura 5.16 Relación de cloruros /temperatura de los manantiales termales monitoreados. .	112
Figura 5.17 Esquema hidrogeológico del sistema termal de Ixtapan de la Sal – Tonicato. . .	120

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 4.1 Alcalinidad.	58
Ecuación 4.2 Alcalinidad (pH).	59
Ecuación 4.3 Error de electroneutralidad	60
Ecuación 4.4 Media Aritmética	64
Ecuación 4.5 Desviación estándar	64
Ecuación 4.6 Coeficiente de variación.	64
Ecuación 4.7 Coeficiente de asimetría de Karl Pearson.	64
Ecuación 4.8 Ecuación general de mezcla.	65
Ecuación 4.9 Porcentaje de mezcla.	65

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La composición química del agua subterránea es el resultado de continuos procesos de interacción, entre el agua de precipitación que se infiltra en el suelo y los minerales presentes en los materiales geológicos por donde circula. Parte de las características químicas del agua son adquiridas en la zona no saturada y otras más, a lo largo de su recorrido dentro de la zona saturada, de donde puede ser captada con pozos o bien emerger a través de manantiales.

Los estudios hidrogeoquímicos de manantiales termales han permitido ampliar el conocimiento del origen, edad y composición físico-química de las aguas, de las condiciones de recarga y posibles mezclas de aguas, así como identificar los procesos que tienen lugar en el acuífero y por lo tanto, permiten obtener una visión más completa del funcionamiento del acuífero. También sirven de base para deducir las características de la roca, composición mineralógica, textura, porosidad, grado de alteración, fracturación y compactación, tiempo de residencia o de contacto, así como la temperatura y presión a la que está sometida el agua. Con toda esta información es posible tener un panorama más amplio del origen y composición del agua termal.

El agua de los manantiales, según sus características, puede ser empleada para consumo humano, como generadora de energía o bien para fines recreativos, como es el caso de los manantiales termales de Ixtapan de la Sal y Tonicaco, en el Estado de México; los cuales han sido poco estudiados.

En la zona de estudio, la presencia de agua termal juega un papel importante para el desarrollo económico de la región; sin embargo, también puede funcionar como un limitante, por lo que esta investigación se enfocó en conocer y describir las características físico-químicas del agua termal así como de otras fuentes de agua como son manantiales de agua no termal, agua procedentes de pozos y aguas superficiales con el fin de identificar los patrones hidroquímicos de cada una de estas aguas.

JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA

Los estudios hidrogeológicos de manantiales de temperatura intermedia a baja que han sido publicados en México son escasos y, en el caso de la zona de estudio, sólo se dispone de un dato referente a un manantial termal reportado en el trabajo de Juan-Pérez (1994).

Ante esta falta de investigaciones sobre el tema, en este trabajo se realizó un estudio sobre la distribución espacial y las características físico-químicas de las aguas subterráneas y, en especial, de las aguas termales en el sistema de manantiales de los municipios de Ixtapan de la Sal y Tonicato,

Hay que tener presente que el conocer las características de este sistema termal permitirá tener las bases para definir estrategias de explotación y protección del agua tanto en lo referente a su cantidad como a su calidad.

Es necesario resaltar que estas aguas termales son el motor económico y de desarrollo de la región de Ixtapan de la Sal-Tonicato, por lo que es de gran interés disponer de información que ayude a un desarrollo sustentable de la región, con énfasis en los recursos hídricos.

HIPÓTESIS

El estudio hidroquímico de los manantiales termales así como de manantiales no termales y pozos en la región de Ixtapan de la Sal-Tonatico, permitirá determinar los principales patrones hidroquímicos de cada uno de los aprovechamientos hídricos.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio hidroquímico, de las aguas termales y no termales presentes en la región de Ixtapan de la Sal - Tonatico, con el fin de establecer los patrones hidroquímicos de los diferentes tipos de agua.

Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica del origen de las aguas termales y los procesos que ocurren para que esta agua adquiera sus características químicas y físicas.
- Recopilar y analizar la información sobre las características hidrológicas e hidrogeológicas de la región en estudio.
- Realizar una revisión cartográfica de las fuentes de agua (termales, no termales, pozos, y agua superficial), con el fin de conocer su ubicación y características, y la factibilidad de realizar muestreos.
- Llevar a cabo muestreos en los manantiales termales y no termales así como en los pozos y arroyos, para conocer las características físico-químicas de los diferentes tipos de agua.
- Realizar una caracterización hidroquímica de los manantiales termales, manantiales no termales y del agua de pozos, así como del agua superficial, en la zona de estudio.
- Efectuar una evaluación de los análisis fisicoquímicos realizados en al agua de los manantiales para determinar similitudes y diferencias entre manantiales con el fin de definir patrones de comportamiento a través de una interpretación hidrogeoquímica.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

El agua subterránea constituye sólo una parte del conjunto de eventos que describen la circulación del agua en la Tierra. El agua infiltrada, no permanece estática, una parte de ella queda almacenada y circula en los acuíferos, los cuales son formaciones geológicas o estratos constituidos por poros y/o fisuras interconectados capaces de almacenar agua y cederla con facilidad.

2.1. Manantiales termales

Las aguas naturales adquieren sus características mediante un proceso complejo, donde intervienen factores de tipo geológico, hidrogeológico, geomorfológico, pedológico, climático, antrópico y fisicoquímico; entre otros factores (Peña, 2000). Dentro de las aguas naturales, se encuentran aquellas denominadas aguas termales, las cuales se distinguen del resto de las aguas por sus características en cuanto a temperatura, composición química y origen (Sánchez, 2000).

La temperatura del agua subterránea es un parámetro fácilmente medible, además brinda información sobre el medio por el cual se desplaza el agua, los procesos químicos que ocurren durante su desplazamiento y la distancia recorrida. En general, las aguas subterráneas tienen una temperatura poco variable, que es igual o superior a la temperatura ambiente media anual de la región; sin embargo, las aguas termales no cumplen con este principio (Custodio y Llamas, 1983).

Según Morell (1995), la temperatura de las aguas subterráneas depende de las condiciones climáticas y geotérmicas de la región dentro de los límites en la cual se forman. En la parte superior de la corteza terrestre (por donde circulan las aguas subterráneas), la temperatura del agua está influenciada por la temperatura promedio del día, mientras que a cierta profundidad, a la cual no existe influencia de la temperatura superficial, la temperatura del agua se hace constante y depende del gradiente geotérmico local (Fagundo et al., 2004). El gradiente geotérmico, en la mayor parte de la superficie terrestre, oscila de 2.5 °C a 3°C por cada cien metros de profundidad (IGME, 2008).

Por lo general, el agua subterránea se considera termal o no termal en relación con la temperatura que poseen al momento de emerger. Esta diferencia entre temperatura del agua y temperatura ambiente deber ser superior a 4 ó 5 °C. Con base en este principio, Schoeller (1962), clasificó a las aguas según su temperatura, considerando parámetros externos como la temperatura media anual del ambiente (T_{ma}) o la temperatura del suelo (T_s) en que brota el manantial. Esta clasificación se detalla en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación del agua termal (Schoeller, 1962)

NOMBRE	TEMPERATURA DEL AGUA	
Hipotermiales	$T < T_{ma} - 4\text{ °C}$	$T < T_s - 2\text{ °C}$.
Ortotermiales	$T = T_{ma} + 4\text{ °C}$	$T = T_s + 2\text{ °C}$.
Hipertermiales	$T > T_{ma} + 4\text{ °C}$	$T > T_s + 2\text{ °C}$

El agua de un manantial termal puede ser meteórica, es decir, proveniente de la superficie terrestre (lluvia, ríos y lagos) o magmática, la cual se libera junto con otros fluidos y volátiles de un magma ascendente por disminución de presión y temperatura. Los sistemas hidrotermales se generan, en la gran mayoría de los casos, por fuentes magmáticas de calor. Hay que tener presente que la variación en la temperatura y la densidad de los fluidos magmáticos produce una transferencia de calor y minerales a gran escala hacia el agua subterránea (Pantoja y Gómez, 2004).

Las zonas de la superficie terrestre que presentan altas temperaturas se describen a continuación:

a) Zonas de convergencia

En la zona de convergencia está relacionada con el ascenso del magma y se puede dar por tres factores a) hundimiento de placa oceánica por debajo de otra placa oceánica, b) hundimiento de placa oceánica por debajo de una placa continental y c) hundimiento de placa continental bajo otra placa continental (Quijano, 2007). Ejemplo de este caso es el Cinturón Volcánico Transmexicano.

b) Zonas de divergencia

Los manantiales que se presentan en esta zona emergen a lo largo de grandes fallas, como es el caso de las aguas termales presentes en la fosa tectónica o *graben* del valle del río Bravo, en Chihuahua (Pantoja y Gómez, 2000).

c) Zonas de contacto de placas tectónicas

Un tercer tipo es el de contacto de placas tectónicas o fallas transformantes (Camprubí y Albison, 2006; Pantoja y Gómez, 2000). Las placas se encuentran en movimiento relativo entre sí, este movimiento da lugar a la formación de “cuencas de dispersión o divergencia”, como es el caso del Golfo de California. En estas cuencas el flujo de calor es elevado y pueden formarse reservorios geotérmicos importantes, por ejemplo, el de Cerro Prieto (Quijano, 2007).

2.2. Hidrogeoquímica de manantiales termales

La hidrogeoquímica de un agua termal se puede utilizar para estudiar el origen de la recarga y los procesos de mezcla entre agua de diferente origen (termal y no termal) (Capasso et al., 2001; Vengosh et al., 2002). Este enfoque hidrogeoquímico puede ayudar a caracterizar los procesos de interacción agua-roca, y la evolución geoquímica de las aguas subterráneas bajo diferentes condiciones de flujo (Mutlu y Gulec, 1998; Larsen et al., 2001). El establecimiento de un modelo conceptual hidrogeológico regional puede ayudar aún más para determinar la trayectoria de flujo, incluyendo los procesos de recarga, tránsito y

descarga, así como el comportamiento de las mezclas entre aguas de diferente origen (Ahmad et al., 2002).

Un ejemplo de estos estudios es el realizado por Han et al. (2010) sobre los orígenes del agua termal (con temperatura que oscila entre los 44°C y 57°C) y los procesos hidrogeoquímicos que ocurren. Este estudio examina las características hidroquímicas originadas por la mezcla del agua subterránea termal y no termal. Se observa que las propiedades del agua termal son distintas a las del agua no termal. El agua termal es principalmente clorurada y/o sulfatada sódica (Cl-SO₄-Na), con altos valores de sólidos disueltos totales, mientras que el agua subterránea no termal es bicarbonatada cálcica y/o magnésica (HCO₃-Ca-Mg) y bicarbonatada cálcica (HCO₃-Ca). Además, las concentraciones de algunos elementos menores en las aguas termales, tales como F, Si, B y Sr, son elevadas. La presencia de estos elementos probablemente se deriva de la interacción agua-roca y pueden ser considerados como indicadores de trayectorias de flujo y tiempos de residencia.

En un estudio efectuado en el Archipiélago de los Azores (Portugal), en donde existe actividad volcánica, los resultados de los análisis de las aguas mostraron una gran variedad en las características químicas y físicas: la temperatura de descarga oscila entre 15°C y 99.5°C (T. media 35°C), la conductividad eléctrica varía entre 139 a 43 100 µS/cm y el pH entre 2.2 y 7.82. Los tipos de agua dominantes son bicarbonatada sódica (HCO₃-Na) y clorurada sódica (Cl-Na), lo que representa dos principales orígenes del agua, termal y marino, a pesar de que algunas muestras son del tipo sulfatada sódica (SO₄-Na). Los principales procesos hidrogeoquímicos identificados fueron: la evolución de los fluidos hidrotermales profundos, la adsorción de compuestos volátiles magmáticos y la mezcla de fluidos profundos con fluidos hidrotermales, la cual a su vez está afectada por la mezcla con agua de mar (Virgílio et al., 2009).

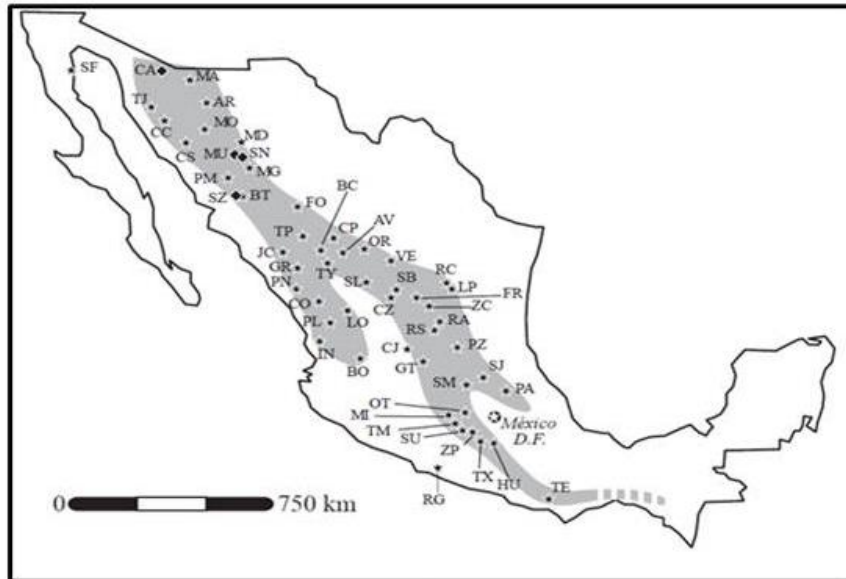
En el estudio realizado por Skopljak y Vlahovic (2012), en Bosnia-Herzegovina, se describe una zona que se caracteriza por la presencia de agua mineral enriquecida con CO₂. El objetivo de este estudio fue establecer el origen del agua mineral realizando un análisis de las características geológicas, estructurales, tectónicas e hidrogeológicas en la zona y estudiar el efecto de la presencia de una gran falla. Los resultados muestran que ocurre una

mezcla entre aguas con diferente grado de mineralización, así como con agua meteórica. El agua de origen meteórico, desciende a través del acuífero principal enriqueciéndose con CO₂ y minerales. Debido a la alta presión, el agua mineral del acuífero principal asciende a lo largo de la falla, pasa a un acuífero secundario y surge en forma de manantiales. La mezcla de aguas se produce en el acuífero secundario, a mayor profundidad, sin la influencia de los factores climáticos superficiales.

2.3. Manantiales termales en México

En un amplio sentido, los sistemas hidrotermales han sido asociados a los depósitos epitermales, que según Lindgren (1922) son definidos como “depósitos metalíferos formados cerca de la superficie por aguas termales en ascenso y conectados genéticamente con rocas ígneas”. Así mismo, se estima un rango de temperatura de 50 a 200 °C y una profundidad máxima de 1000 m para éstos depósitos (González, 2000).

La mayoría de los depósitos epitermales conocidos hoy en día están situados alrededor del margen Circum-Pacífico (Figura 2.1), asociados al termalismo tardío de los sistemas volcánicos operantes en dicho margen desde el Terciario (White et al., 1995). En su totalidad, los depósitos epitermales están asociados directamente a márgenes de subducción activos en diferentes épocas geológicas (Silberman et al., 1976). En el caso de los depósitos epitermales mexicanos (todos ellos netamente pertenecientes al Terciarios) su edad disminuye, a grandes rasgos, hacia el sur y hacia el este, en relación con la migración general del vulcanismo ácido de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur (Damon et al., 1981; Clark, 1990; Camprubí et al., 2003).



AR) Arizpe, Sonora.	(OT) El Oro – Talpujahuá, Estado de México/Michoacán.
(AV) Avino, Durango.	(PA) Pachuca – Real del Monte, Hidalgo.
(BC) Bacis, Durango.	(PL) Plomosas, Sinaloa.
(BO) Bolaños y San Martín de Bolaños, Jalisco.	(PM) Palmarejo, Chihuahua.
(BT) Batopilas, Chihuahua.	(PN) Pánuco, Sinaloa.
(CC) Cerro Colorado, Sonora.	(PZ) Pozos, Guanajuato.
(CJ) Comanja de Corona, Jalisco.	(RA) Real de Ángeles, Aguascalientes.
(CO) Copala, Sinaloa.	(RC) Real de Catorce, San Luis Potosí.
(CP) Cerro Prieto y Mantos, Durango.	(RG) Real de Guadalupe, Guerrero.
(CS) Colorada, Sonora.	(RS) Real de Asientos, Aguascalientes.
(CZ) Colorada, Zacatecas.	(SB) Sombrerete, Zacatecas.
(FO) San Francisco del Oro y Santa Bárbara, Chihuahua.	(SF) San Felipe, Baja California Norte.
(FR) Fresnillo, Zacatecas.	(SJ) San Joaquín, Querétaro.
(GR) Guadalupe de los.	(SL) Saladillo, Durango.
(HU) Huautla, Morelos. Reyes, Sinaloa.	(SM) San Martín, Querétaro.
(GT) Guanajuato, Guanajuato	(SN) Santo Niño, Chihuahua.
(IN) El Indio, Nayarit.	(SU) Sultepec y Amatepec, Estado de México.
(JC) San José del Cobre, Durango/Sinaloa.	(SZ) El Sauzal, Chihuahua.
(LO) Lluvia de Oro, Durango.	(TE) Tejomulco, Oaxaca.
(LP) La Paz, San Luis Potosí.	(TJ) Tajitos, Sonora.
(MA) Magallanes, Sonora.	(TM) Temascaltepec, Estado de México.
(MD) Mineral de Dolores, Chihuahua.	(TP) Topia, Durango.
(MG) Maguarichic, Chihuahua.	(TX) Taxco, Guerrero.
(MI) Miahuatlán e Ixtapan del Oro, Estado de México.	(TY) Tayoltita, Durango.
(MO) Moctezuma, Sonora.	(VE) Velardeña, Durango.
(MU) Mulatos, Sonora.	(ZC) Zacatecas, Zacatecas.
(OR) Orito, Durango.	(ZP) Zacualpan, Estado de México

Figura 2.1. Distribución geográfica de algunos depósitos epitermales en México. (Camprubí et al., 2006).

La presencia de estos depósitos epitermales, son un primer indicio de la existencia de zonas con aguas termales. Un estudio más detallado sobre este tema, son los elaborados por Iglesias et al. (2003, 2011), Martínez-Estrella et al. (2005) y Torres et al. (2005) quienes presentan un inventario sobre los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja ($T \leq 200^{\circ}\text{C}$). Se definieron un total de 918 sistemas geotérmicos, que incluyen 1797 manifestaciones superficiales (manantiales), localizados en 26 de los 32 estados del país (Figura 2.2). La distribución estadística de las temperaturas de yacimiento inferidas (conservadoramente) indica que el 5% de los sistemas tienen temperaturas entre 151 y 208°C , 40% de los sistemas tienen temperaturas entre 102 y 151°C , 50% de los sistemas tienen temperaturas entre 60 y 102°C y el 5% de los sistemas tienen temperaturas entre 36 y 60°C . Dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano, se señala la existencia de 3 sistemas termales en el estado de Colima, 6 en Morelos, 9 en el Estado de México, 89 en Guanajuato, 10 en Guerrero, 32 en Querétaro, 37 en Hidalgo y 69 en Michoacán.

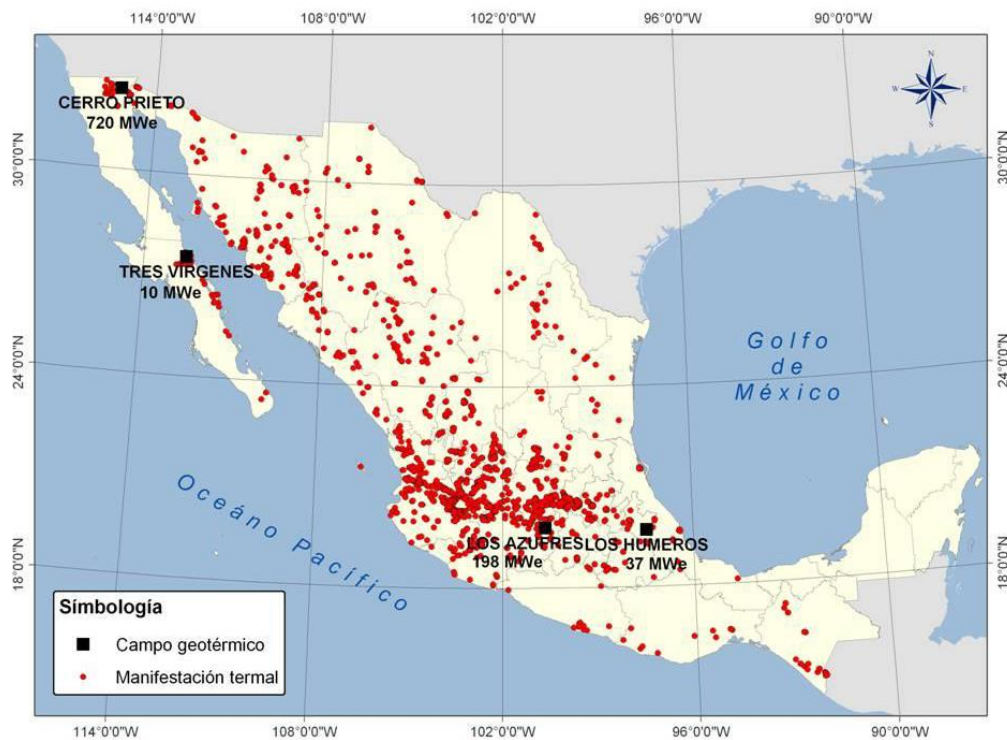


Figura 2.2 Distribución geográfica de las manifestaciones geotérmicas superficiales identificadas por Iglesias et al. (2011).

Estos recursos contienen cantidades masivas de energía térmica con temperaturas apropiadas para una variedad de aplicaciones directas de calor como son el secado de frutas, cereales y bloques de cemento; evaporación de leche; calor de proceso para las industrias textil, papelera, azucarera, cervecera, etc.; invernaderos; cría de peces; y balnearios (Iglesias, 2011).

Dentro de los estudios enfocados en la caracterización de aguas termales en México, hay que destacar los relacionados con el sistema termal del Volcán Chichón (Chiapas) ya que es uno de los sistemas más estudiados en relación a la hidrogeoquímica de sus aguas. Con base en los resultados obtenidos, se han identificado cinco grupos de aguas termales (Tabla 2.2), de las cuales cuatro son aguas con un pH neutro, una composición Na–Ca–Cl–SO₄, y temperatura que oscila entre 50 y 74°C, mientras que el quinto grupo corresponde a aguas ácidas con un pH de 2.2-2.7 y una salinidad mayor de 15g/L (Taran y Peiffer, 2009).

Tabla 2.2. Composición química de manantiales termales y aguas superficiales en la zona del volcán Chichón (Taran y Peiffer, 2009).

Muestras	T °C	pH	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	B	Cl ⁺	SO ₄ ³⁻	HCO ₃ ²⁻
ACn	57	7.45	159	656	60	368	48	13	1504	456	196
AT1n	50	7.74	191	704	90	514	49	16	1827	525	103
AC	74	6.42	172	816	109	623	70	31	2230	451	228
AT1	68	5.56	152	828	120	517	77	15.2	1762	781	229
AT2	49	5.98	107	702	55	666	61	16	1556	900	185
AS2	75	2.76	157	198	33	95	14	0.5	213	546	0
AS3	58	2.18	225	4830	488	1181	40	38	10003	580	0
Río AS	24.3	8.3	40.6	238	26	113	11	21	446	145	129
Río AT1	26.6	8.25	89.9	206	33	177	27	5.8	440	390	135
Río AT2	32	8.22	63.1	122	13	202	16	4.5	258	388	103
Río ACn	27.4	8.18	70.1	264	31	306	38	5.8	563	637	101
Río AC	27.5	7.82	55.6	140	26	302	24	4.0	278	725	82

Valores en mg/L.

Otro ejemplo, son los manantiales termales localizados alrededor del campo geotérmico de Los Azufres. Las aguas de estos manantiales están caracterizadas por la presencia de Cl^- y Na^+ . La concentración de Cl^- varía entre 1485 y 7297 mg/L y la concentración de Na^+ oscila desde 914 hasta 4442 mg/L (Tabla 2.3). Así mismo, se reportaron altas concentraciones de SiO_2 disuelto y K^+ . Como conclusión de la investigación, se expone que el sistema geotérmico de Los Azufres está gobernado por la presencia de aguas neutras clorurado-sódicas a profundidad (zonas productoras) y su origen se relaciona con la existencia a profundidad de un líquido que evoluciona a vapor en la parte más somera. El cambio gradual de la fase líquida a vapor se da por ebullición a profundidades del orden de los 1200-1500 m, y está acompañado por cambios en la mineralogía de la alteración hidrotermal (González-Partida, 2000; González-Partida et al., 2005).

Tabla 2.3. Composición química de manantiales y pozos en la zona de Los Azufres (González-Partida, 2005). CE: Conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Valores en mg/L ; n.d.: no detectado

Muestras	T °C	pH	CE	Cl	B	HCO ₃	SiO ₂	SO ₄	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	As
Agua Fría II	83	6.6	890	2.8	0.59	0.4	172.3	373.0	27.6	53.4	4.4	0.30	0.10
Agua Fría III	70	2.9	1335	4.3	1.87	nd	323.4	732.0	26.8	29.6	18.6	2.20	0.0
Agua Fría IV	90	2.2	3300	9.8	0.59	nd	464.6	866.5	34.3	29.50	2.1	0.00	0.55
Azufres I	29	2.5	1760	13.7	1.42	nd	365.2	498.4	72.8	30.3	12.9	1.10	nd
Casa Lázaro C.	44	8.4	705	7.3	0.94	324.7	455.0	45.2	68.0	16.5	26.4	25.40	0.1
Cumbres I	85	1.9	6580	10.0	47.28	nd	456.0	4472.0	20.28	5.66	3.57	0.59	0.1
Cumbres II	90	2.0	5650	52.7	39.20	nd	377.0	843.3	8.10	5.3	4.4	1.70	0.1
Currutaco	50	2.0	6800	30.1	8.30	nd	496.7	2598.3	8.3	6.6	0.90	0.30	0.1
Chiflador	91	2.2	7500	19.6	70.40	nd	489.8	1140.3	27.30	34.8	8.2	0.30	nd
El Bosque Sta. Rosa	23	8.0	380	6.3	0.10	228.0	187.6	9.7	23.70	4.4	25.10	22.50	nd
El Carcamo	25	6.12	398	2.43	0.09	234.0	134.0	7.8	11.27	6.07	13.78	30.53	nd
Fabrica la Virgen	18	8.3	370	17.2	0.08	124.6	118.5	25.7	19.5	6.70	30.0	15.40	0.1
Jaripeo	25	8.4	960	7.4	0.31	600.2	180.5	10.4	60.30	9.30	7.3	74.70	nd
Las adjuntas	40	6.9	338	2.07	0.34	165.0	190.0	27.5	39.05	12.36	8.93	6.24	0.01
La Herradura	26	8.4	350	18.6	46.40	147.7	93.2	28.7	65.90	2.8	21.0	4.00	0.1
La trasquilla	20	6.9	178	2.3	65.80	45.95	95.3	23.2	9.13	4.31	8.89	5.92	nd
Laguna Verde	22	2.4	2950	491.4	2.96	0.0	223.8	444.8	247.50	60.70	22.4	2.60	0.5
Los Hervideros	80	7.09	3850	1058.1	3.19	152.0	342.0	150.0	721.50	10.66	21.6	0.33	3.0
Maritaro	91	3.9	1205	23.2	2.96	nd	606.7	708.7	32.8	10.80	82.8	29.0	nd
Napolito I	78	2.31	3770	3.22	3.19	nd	327.3	1363.0	23.22	16.0	53.33	49.29	nd
Pozo AZ24	90	7.4	1185	55.4	9.27	16.20	554.5	602.0	208.5	31.9	3.3	0.20	nd
Puentecillas	63	6.6	947	33.8	4.91	91.5	266.9	324.5	173.15	20.80	11.00	0.13	nd
Santa Rosa I	18	8.0	1380	9.8	0.38	886.9	189.2	11.4	78.40	11.6	4.9	112.5	nd
Tejamaniles II	68	8.3	790	2.6	4.60	136.5	310.8	161.5	144.80	36.3	3.4	0.10	nd
Zimirao	40	8.0	3600	1067.0	76.90	109.3	386.4	147.4	689.90	45.5	54.8	0.40	3.0

Siebe et al. (2007) en Jungapeo (Michoacán), caracterizaron varios manantiales con temperaturas que oscilaron entre 28 y 32°C, las cuales se distinguen por la presencia de CO₂ y la existencia de precipitados de hierro, sílice y carbonatos en los puntos de descarga. Estos autores concluyen que estos manantiales son manifestaciones de un sistema geotermal de baja temperatura que se origina por el efecto combinado de un flujo regional de calor y de un magma remanente que constituyen el basamento de esta región. Por su parte, Ramírez-Guzmán et al. (2005) estudiaron cuatro manantiales en Acapulco (Guerrero) en relación con las variaciones en las concentraciones de cloruro y sulfato, así como en su contenido isotópico (D y ¹⁸O), como consecuencia de actividad sísmica, comprobando que dos de estos manantiales pueden ser objeto de monitoreo continuo ya que son sensibles a esta actividad sísmica.

En cuanto a los estudios que se basan en aguas termales de baja temperatura (entre 30 y 50 °C) destinadas a usos recreativos y balneológicos, estos son escasos. Entre los estudios realizados sobre balnearios de aguas termales se encuentra el de Gabriel (2006) desarrollado en el municipio de Santa María Amajac, Hidalgo, en donde se analizó el impacto al ambiente de las aguas termales. En dicho estudio se clasificaron los manantiales de acuerdo a su estructura geológica y sus usos. Se encontraron aguas de tipo sulfatada-bicarbonatada-clorurada con una conductividad eléctrica en torno a los 1939 µohms/cm y elevados valores de cloruro, sulfatos, bicarbonatos, alcalinidad y sílice, que resultaron excesivos respecto de los límites permitidos para uso y consumo humano.

Otro de los estudios es el realizado en Chignahuapan, Puebla (Gutiérrez-Cirlos, 2010). En este estudio se analizaron variables termogeoquímicas estacionales para el periodo 2002-2009, contrastando la temperatura del manantial vs precipitación local, con el fin de identificar en que periodos se presentan fluctuaciones termales, aplicando el método de correlación cruzada. También, se calculó la temperatura del reservorio por medio de un geotermómetro de sílice, lo cual dio un valor de 128.31°C. El análisis químico arrojó concentraciones anómalas de cloruro, boro y litio que indican la presencia de fluidos magmáticos en las aguas termales. Durante la época de secas, el manantial presentó una temperatura casi constante de 50°C, sin embargo durante la época de lluvias (Julio a Octubre) se presentan variaciones térmicas y químicas en las aguas.

En el Estado de México, destacan los manantiales termales pertenecientes a los municipios de Ixtapan de la Sal y Tonicaco que son empleados con fines recreativos, lo cual ha dado lugar a un importante desarrollo turístico y comercial en los últimos años (Sánchez et al., 2010), que a su vez ha generado una creciente demanda de recursos hídricos. Solo se cuenta como antecedente sobre la geología, hidrogeología e hidroquímica del área el trabajo de Juan-Pérez (1994) en el marco del cual sólo se analizó un manantial termal. Este manantial presenta un agua clorurada sódica, mientras que los otros puntos de muestreo de la zona (norias) presentan un agua bicarbonatada cálcica. En la zona de Tonicaco, se identificó una muestra clasificada como clorurada sódica y cinco muestras de aguas pertenecientes a la familia bicarbonatada cálcica.

En este trabajo, y con base en la interpretación de los análisis fisicoquímicos y su relación con el medio geológico, se señala que la circulación del agua podría estar controlada por las fallas normales que limitan a Ixtapan de la Sal al Oriente y Poniente y que estas, a su vez, se encuentran ligadas al sistema de fallas de San Miguel de Allende-Taxco. Por otro lado, este autor considera posible que el aporte principal de agua proceda de un sistema de flujo regional profundo desde el norte de la zona, es decir de las faldas del Nevado de Toluca, y que el agua de este flujo profundo puede salir a superficie a través de las fallas normales que existen en la región. También se propone la existencia de un cuerpo emisor de calor que podría ser una cámara magmática (de tipo ácido) ya que el agua termal tiene elevadas concentraciones de Na^+ , K^+ y Li^+ . Así mismo, se indica que la gran cantidad de bicarbonatos y la presencia de travertinos, son indicios de que la temperatura del subsuelo es baja y que la zona caliente o cuerpo emisor de altas temperaturas está a gran profundidad.

CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los municipios Ixtapan de la Sal y Tonalico, se localizan en la zona sur del estado de México, en la Región Hidrológica No. 18 “Cuenca del Balsas” y forman parte del acuífero 1504 “Tenancingo” (CONAGUA, 2009). Estos municipios limitan al norte con los municipios de Coatepec Harinas y Villa Guerrero, al sur con el estado de Guerrero, al este con el municipio de Zumpahucan y al oeste con el municipio Zacualpan (Figura 3.1).

Fisiográficamente, la zona se ubica en el límite entre el Cinturón Volcánico Transmexicano y la Sierra Madre del Sur, en la subprovincia denominada cuenca del Balsas-Mexcala. Litológicamente, el Cinturón Volcánico está constituido por emisiones volcánicas del Pliocuatnario, y la subprovincia Balsas-Mexcala está conformada por rocas metamórficas del Mesozoico y volcánicas del Terciario (SGM, 2011).

En general, el relieve montañoso es variado, forma sierras complejas, lomeríos y mesetas alargadas, que son disectadas por cañones profundos en forma de “V”, y en algunos casos con pendientes acantiladas. Las geoformas están en función de la litología y las estructuras tectónicas que afectaron la región (SGM, 2011).

En la parte norte se ubica el volcán Nevado de Toluca (Xinantécatl), con su flanco sur que se prolonga hacia la región Ixtapan de la Sal y Tonalico, y está representado por aisladas mesas de basalto con alturas máximas entre 2700 msnm y 2900 msnm. Las mesetas están delimitadas por zonas escarpadas con desniveles de 300 a 350 m de altitud.

Geomorfológicamente el área denota dos etapas erosivas. La primera relacionada a paisajes seniles, con algunos levantamientos que dan la apariencia de rejuvenecimiento por

neotectonismo, y la segunda, a paisajes erosivos juveniles relacionado a una tectónica distensiva que dio lugar el Cinturo Volcánico Transmexicano.

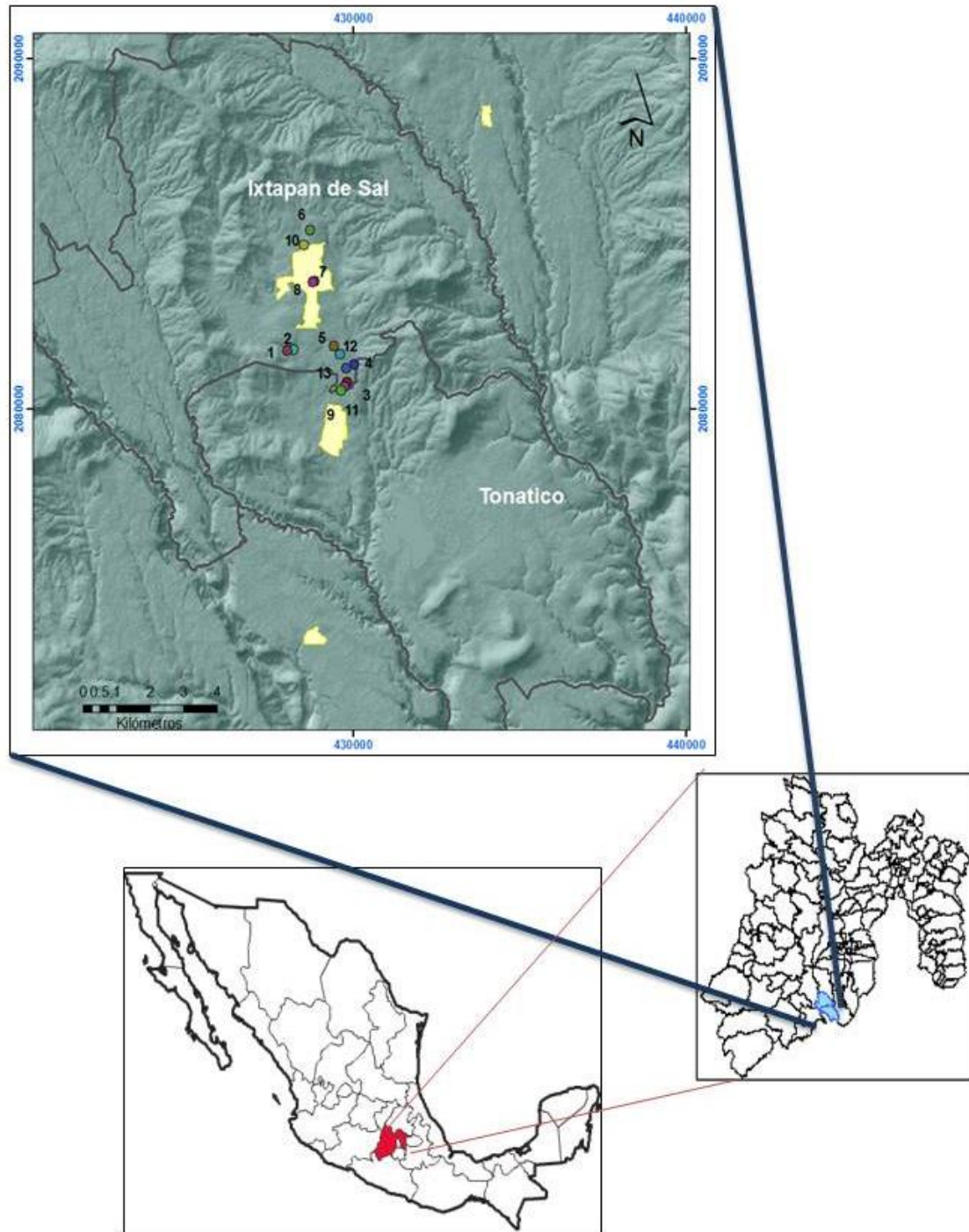


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio: Ixtapan de la Sal –Tonatico

3.1. Clima

En el municipio de Ixtapan de la Sal predomina el clima A(C)w(W)(I')g, clima semicalido, subhúmedo (humedad moderada), con lluvia invernal inferior al 5 %; oscilación térmica reducida y con una temperatura más elevada antes del solsticio de verano. La temperatura media anual oscila entre 18 °C y 20 °C. Al sur del municipio, el clima varía a Aw(w)(i')g, clima cálido, subhúmedo, con humedad moderada y con lluvia invernal inferior al 5%; la oscilación térmica es reducida y la temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano (GEM, 2003).

El municipio de Tonatico presenta dos tipos de clima, el primero, el cual abarca prácticamente todo su territorio, es semicálido subhúmedo con lluvias en verano de humedad media; mientras que en el extremo sur se presenta una pequeña porción con clima cálido subhúmedo con lluvias de verano de humedad media. El promedio de temperatura en la zona varía entre 18 y 24°C; con una oscilación térmica reducida. La temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano, durante los meses de Abril y Mayo, mientras que las temperaturas más bajas se registran en los meses de Noviembre, Diciembre y Enero. Los vientos dominantes provienen del sureste y salvo raras excepciones sus velocidades no superan los 50 kilómetros por hora (SIIMA, 2001).

En relación con la precipitación pluvial, se cuenta con información de la Gerencia del Servicio Meteorológico Nacional a nivel mensual de 19 estaciones climatológicas ubicadas en la región y en sus inmediaciones para el periodo 1931 – 1990. Con base en el análisis de las estaciones, y para este periodo de tiempo, la precipitación media anual es de 1136 mm con una concentración del 75% entre los meses de junio a septiembre (Figura 3.2). No se cuenta con datos más recientes procedentes de alguna estación meteorológica que se localice en la región de Ixtapan de la Sal-Tonatico, ya que las que había han sido discontinuadas.

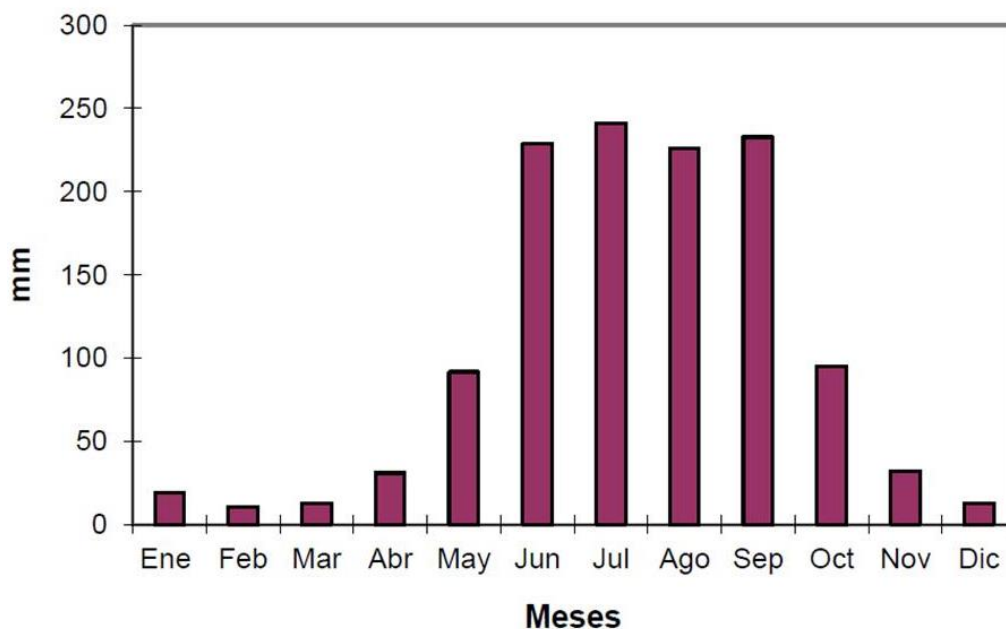


Figura 3.2. Variación de la precipitación media mensual en el período 1931 a 1990 (SIIMA, 2001)

3.2 Hidrología

La distribución hidrográfica está relacionada con el patrón estructural y litológico que afloran en la zona, enmarcándose drenajes de tipo dendrítico con variante a subparalelo. La red hidrológica está orientada NNW y SSE, y está controlada por fosas tectónicas distensivas.

La red hidrográfica (Figura 3.3) proviene de la falda del flanco sur de volcán Nevado de Toluca, excepto el río Sultepec, y los arroyos los Chirimoyos y Cruz Negra, que provienen de lo alto de las serranías que forman parte de la sierra La Goleta. Los arroyos principales son Calderón, San Mateo, San Gaspar, Los Tizantes, Salosto, Tecolotepec, El Chiquihitero, Culebrillas, Chiltepec, Florido, Arroyo Seco, Arroyo Salado, La soledad, Los Encantos, Hacienda Guadalupe, Los Chirimoyos y Cruz Negra. Estos arroyos vienen a formar parte de las cuencas de los ríos Sultepec, Almoloya, Río de las Flores y Tlapala, y a su vez estos desembocan en el río Amacuzac, que es afluente del río Balsas (CONAGUA, 2015).

Se distinguen los ríos Calderón y Nenetzingo que corren de norte a sur y al unirse dan lugar al río San Jerónimo, que atraviesa al municipio de Tonatico desembocando en el río

Amacuzac. Al poniente y al sur de la cabecera municipal de Ixtapan de la Sal, corre el arroyo El Salado que nace en San Gaspar y se prolonga hasta unirse con el arroyo El Salitre y con el nombre de Salado pasa al estado de Guerrero (CONAGUA, 2015).

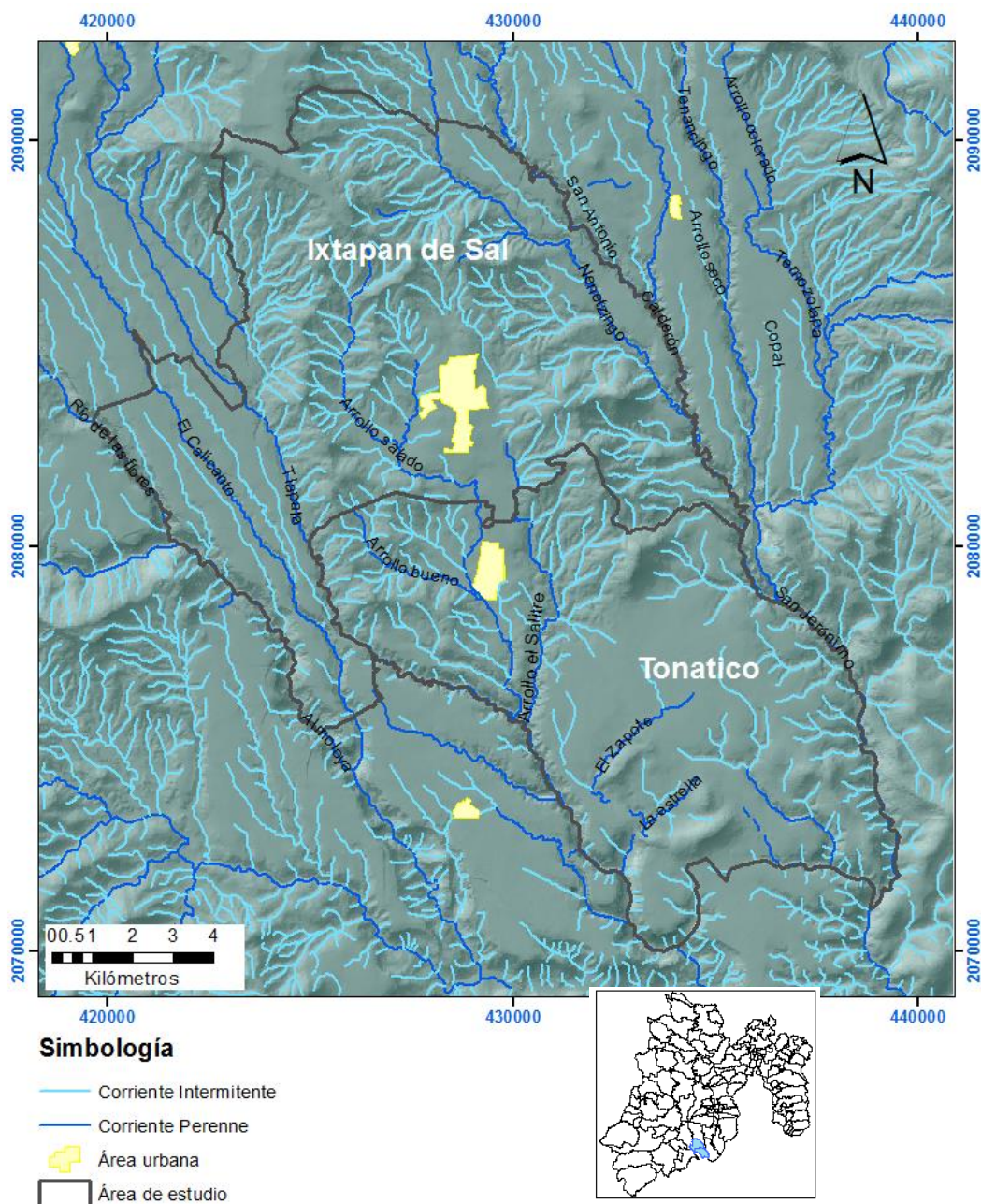


Figura 3.3. Red hidrográfica de la zona de estudio: Ixtapan de la Sal –Tonicco

3.3 Geología

3.3.1 Geología regional

De acuerdo a la clasificación de los terrenos tectonoestratigráficos, la zona de estudio se ubica en el límite de las provincias fisiográficas del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y la Sierra Madre del Sur, subprovincia Cuenca del Balsas-Mexcala; y en el Terreno Guerrero. En el contexto geodinámico, el CVTM se encuentra construido sobre la parte sur de la placa de Norteamérica, la cual es subducida por la parte occidental de la placa de Cocos y por la microplaca de Rivera. El CVTM presenta varias peculiaridades: 1) su parte central y oriental no son paralelas a la Trinchera Mesoamericana; 2) sus principales estratovolcanes están alineados transversalmente (N-S) con respecto a la orientación del arco; 3) presenta una gran variabilidad geoquímica al tener no sólo productos típicos de ambientes de subducción sino también de tipo intraplaca; 4) las placas en subducción son relativamente jóvenes (10 Millones de años (Ma)) para Rivera y entre 11 y 23 Ma para Cocos), hechos que en otros casos dan lugar a un escaso volcanismo; y 5) hay ausencia de sismicidad por debajo de la zona volcánica (Ferrati, 2011).

El basamento del CVTM es heterogéneo y consta de dos regiones con edad e historia geológica distinta. Bajo la mitad oriental, al este de la longitud 101° W, se encuentran terrenos antiguos de edad Precámbrico (>542 Ma) y Paleozoico (entre 542 y 251 Ma). La parte occidental, está subyacida por el llamado superterreno Guerrero, un conjunto de arcos volcánicos marinos y depósitos sedimentario del Triásico-Cretácico (251 a 65 Ma). En la parte occidental, además, el volcanismo asociado a subducción ha estado activo de manera casi ininterrumpida desde el Cretácico Inferior (135 Ma), mientras que en la parte oriental no hubo volcanismo entre el Jurásico y el Mioceno Medio (~165 y 15 Ma) (Ferrati, 2011).

El Terreno Guerrero es definido como una secuencia de arcos insulares desarrollado en el Cretácico (Campa et al., 1978), cuyo basamento es controversial y discutido (De Cserna y Fries, 1981).

3.3.2 Geología local

Para la descripción de la geología local se tomó en cuenta la clasificación de provincias fisiográficas de De Cserna, (1981) con base en la cual la zona de estudio queda ubicada dentro de la provincia de la Cuenca Morelos-Guerrero, la cual tiene como límites en sus porciones Este-Oeste y Sur a la Sierra Madre del Sur y como límite Norte al Sistema Volcánico Transversal (que equivaldría a la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano, CVTM).

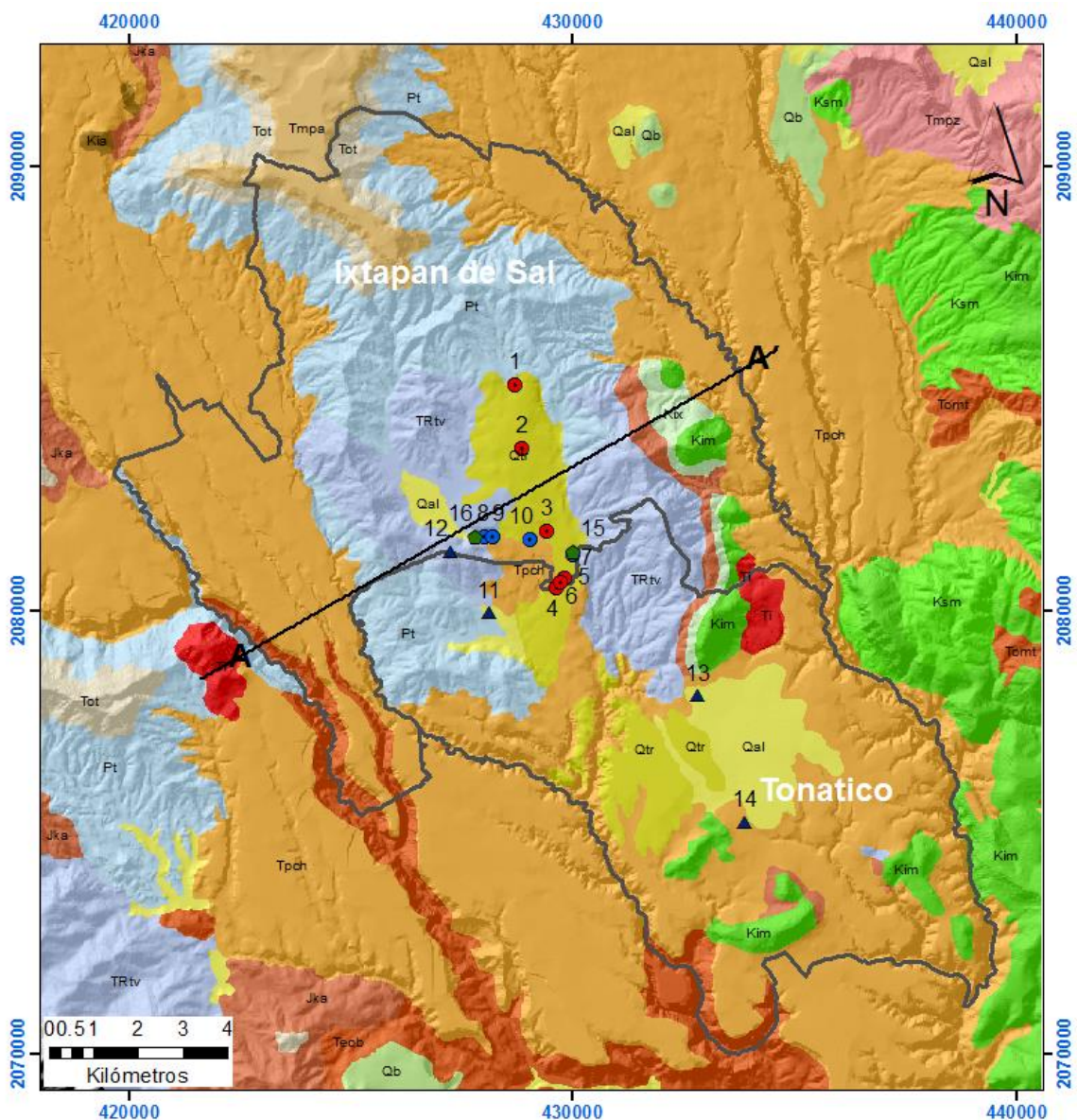
La provincia de la Cuenca Morelos-Guerrero, se ubica dentro de una región con alta complejidad estructural, que presenta tres dominios tectónicos yuxtapuestos, como son el Complejo Mazateco del Paleozoico-Mesozoico, el Complejo Xolapa del Paleozoico-Mesozoico y el Complejo Teloloapa-Ixtapan del Mesozoico. Este último se localiza en la porción occidental de la zona de estudio. Algunos de los afloramientos que constituyen esta provincia están formados por secuencias de rocas mesozoicas, tanto sedimentarias de plataforma como volcánico-sedimentarias de tipo arco insular volcánico-mar marginal (Campa, 1978).

El elemento más antiguo lo compone el complejo volcánico y sedimentario Teloloapan-Ixtapan que se desarrolla durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior; este elemento se considera como un complejo parcialmente metamorfizado constituido principalmente por una alternancia de rocas sedimentarias y volcánicas; muestra efectos de metamorfismo de bajo grado, en facies de esquistos verdes, con la presencia de clorita, calcita, epidota y cuarzo (Campa, 1978).

El segundo elemento, sobrepuesto de manera discordante al conjunto anterior, consiste de un espesor considerable de rocas carbonatadas y clásticas desarrolladas durante el Cretácico; este paquete se inicia con una secuencia de calizas delgadas, de aguas profundas que corresponden a las Formaciones Acuitlapán y Xochicalc (Campa, 1978).

Después de un periodo de transgresión, sobreviene el depósito de un paquete de rocas clásticas en un ambiente tectónico tipo flysch, definido por la Formación Mexcala. Este conjunto se encuentra deformado y da lugar a pliegues amplios que conforman sierras altas,

resultado de la competencia de las calizas a la deformación, mientras que las rocas clásticas se encuentran profundamente deformadas en pliegues fuertes y cerrados. Estas rocas se encuentran ampliamente expuestas en la porción sur y sureste del área (Campa et al., 2012). Superpuesto a los dos anteriores, se encuentra el tercer elemento constituido por un complejo volcánico heterogéneo, compuesto por las riolitas de la Formación Tilzapotla, y rocas piroclásticas y lahares de la Formación Tepoztlán. Las rocas volcánicas de la Formación Tilzapotla, se han relacionado con las manifestaciones más alejadas hacia el sur de la Sierra Madre Occidental; las otras unidades tienen sus orígenes en diversos centros eruptivos. Posterior al volcanismo, predominan procesos exógenos donde las rocas antes mencionadas, fueron la fuente de aporte para acumular un gran espesor de roca clástica, como la Formación Chontalcoatlán, que modificó el paisaje con una morfología de planicies (Figura 3.4).



Simbología

Claves geológicas

Qal Aluvión	Tmpa Lahares y Tobas	Ti Rocas Igneas	Kia Caliza
Qtr Travertino	Tmpz Derrames de lava	Jka Lutita-arenisca	TRtv Metamórfica
Qb Brecha volcanica	Tot Derrames de lava y piroclasto	Ksm Caliza-lutita	Pt Metamórfica
Tpch Lahares y Tobas	Teob Conglomerados	Kim Caliza-dolomía	Área de estudio
		Kix Caliza	

Figura 3.4. Mapa geológico de la zona de estudio: Ixtapan de la Sal –Tonicato (SIIMA, 2001)

3.3.3 Estratigrafía

En la región de estudio como se ha mencionado, afloran rocas que fueron emplazadas y depositadas por una parte, en una zona interna o de arco de islas y por la otra, una secuencia que fue depositada en zona o ambiente de plataforma, cuyos límites paleogeográficos actualmente son complejos, muy discutidos y discutibles, por lo que se dividirá la descripción estratigráfica para esta secuencia en dos bloques.

El primer bloque está constituido por rocas vulcanosedimentarias, volcánicas y sedimentarias calcáreas y clásticas intercaladas en la secuencia, las cuales observan actualmente metamorfismo en facies esquistos verdes, las cuales se consideran como las más antiguas y asignadas a las formaciones: Esquisto Taxco, Ayotusco, Roca Verde Taxco Viejo y Acuitlapán, las cuales se definirán individualmente pero que se agruparon como ***Rocas Metamórficas Pre-Cretácicas***.

El segundo bloque conformado por las formaciones sedimentarias calcáreas: Xochicalco y Morelos, descritas individualmente pero se denominan como ***Rocas del Cretácico***

La secuencia sedimentaria que continúa sobre uno o sobre cualquiera de los dos terrenos anteriores es la Formación Mexcala, y continua con las **Rocas del Cenozoico**: materiales sedimentarios clásticos, volcanoclásticos y rocas volcánicas que coronan la secuencia sedimentaria y que pertenecen en parte al evento que ha dado origen al Cinturón Volcánico Transmexicano (SIIMA, 2001).

A continuación se hace una descripción de la geología de la zona de estudio (Figura 3.4), con base en lo expuesto por Juan- Pérez (1994) y SIIMA, (2001).

I. Rocas Metamórficas Pre-Cretácicas.

Complejo Metamórfico (Pt y TRtv), este complejo, comprende dos unidades definidas aisladamente pero con similitud en sus características físicas. Las unidades involucradas son Esquisto Taxco y la Roca Verde Taxco Viejo, definidas originalmente por Fries (1960); estas mismas unidades fueron estudiadas por Campa (1978) asignándoles el nombre de Complejo Volcánico Teloloapan-Ixtapan.

Este complejo está constituido por una alternancia de metalavas, metatobas, metareniscas y metalutitas, que fueron sometidas a presiones y temperaturas que corresponden a la facies de esquistos verdes. Su mineralogía corresponde a feldespatos, clorita, sericita y epidota, que constituyen una textura porfidoblástica con abundantes segregaciones de cuarzo lechoso. Las metalavas son de color verde, con una mineralogía compuesta principalmente por feldespatos y epidota.

El intemperismo presente es bajo y se manifiesta en tonos verdes y pardos; el fracturamiento es moderado en las rocas metavolcánicas y escaso en las metasedimentarias, en ambas es discontinuo y se encuentra relleno por material derivado de la misma roca.

El área de distribución es principalmente en los alrededores de Ixtapan de la Sal, en los poblados conocidos como El Refugio, Yautepec, Tlacoachaca y al oeste de Salinas.

Esta unidad es la más antigua del área de estudio y se le considera como el basamento sobre el que evolucionó la secuencia mesozoica con la que se relaciona por un límite discordante. Su edad es la considerada por Campa et al. (1974) y abarca un lapso comprendido del Jurásico Superior (Tithoniano) al Cretácico Inferior.

II. Rocas del Cretácico

a) Formación Xochicalco (Kix)

Formación definida por Fries (1960), constituida por una serie de calizas densas, finamente laminadas, de color gris oscuro, con intercalaciones delgadas de capas y bandas de pedernal de color negro, alcanza un promedio de 150 metros.

Aflora al oriente de Ixtapan de la Sal y suroeste de Tonatico. De acuerdo con la posición estratigráfica que guarda con las unidades que le sobreyacen y subyacen y por su contenido faunístico, se le considera de edad Aptiana.

b) Formación Morelos (Kim)

Fries (1960), propone este nombre para designar una secuencia de calizas y dolomías, que afloran en los Estados de Morelos, México y Guerrero.

La unidad consiste de calizas y dolomías interestratificadas, con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos y lentes; es de color beige a gris oscuro, manifiesta algunos

horizontes ligeramente marmolizados, de color rosado. Las capas varían de 20 a 60 centímetros de espesor, aunque también se manifiestan gruesos paquetes y bancos masivos. Por su posición estratigráfica y por su contenido microfaunístico se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano.

III. Rocas del Cenozoico

a) Granodiorita (Ti)

González-Partida, (2000), definió geoquímicamente como un intrusivo de tipo granodiorítico con algunas diferenciaciones adamelita que corta a rocas del arco de Teloloapan con alcance a la base de la Formación Tilzapotla.

El afloramiento principal, se localiza en el sector sureste, a 7 km al oriente de la población Tonicaco conformando el cerro Piedra Parada, tectónicamente está emplazado en el cruce de la falla Meyuca y el sistema de fallas Tres Cruces.

En general se describe como un intrusivo de color gris claro en sano, intemperiza a ocre, textura porfídica, estructura muy masiva y compacta, presenta abundante fenocristal de plagioclasas, cuarzo y en menor proporción clorita y minerales oscuros.

b) Formación Chontalcoatlán (Tpch)

De Cserna, (1981), cartografió y definió con el nombre de Formación Chontalcoatlán a una secuencia de depósitos clásticos, formados exclusivamente por fragmentos derivados de rocas volcánicas del Sistema Volcánico Zinacantépetl, asentados en la cuenca criptorreica de los ríos Chontalcoatlán y San Jerónimo

Esta unidad consiste de horizontes de conglomerados mal clasificados, cuyos fragmentos varían en tamaño desde gravas hasta grandes bloques de más de 1 m de diámetro, su grado de redondez es variable, de anguloso hasta redondeado; normalmente se encuentran mal consolidados pero bien compactados. Alternando con estos se observan paquetes de areniscas de grano medio a grueso bien clasificadas, desde angulosas a subredondeadas, bien compactadas y sin cementante, en algunos sitios se les aprecia estratificación cruzada, aunque en general es paralela. En esta formación también existen capas de tobas líticas y cristalinas, con piroclastos que varían en tamaño de cenizas a lapilli, medianamente

compactados. Además de la litología mencionada hay depósitos laháricos constituidos por clastos de rocas ígneas, cuyo tamaño varía de 5 cm hasta bloques de más de 1 m, empacados en una matriz limo-arenosa que les proporciona una gran compactación; en general la composición de los clastos ígneos es básica e intermedia.

Los contactos entre lahares, tobas ácidas y la secuencia detrítica son discordantes. El intemperismo observado es muy bajo, lo que entre otros factores da una morfología de amplias mesetas, en las que se ha desarrollado una gran disección, que da lugar a profundos barrancos de paredes totalmente verticales, algunos con más de 150 m de profundidad.

Esta formación sobreyace discordantemente al Complejo metamórfico y a las Formaciones Acuitlapán, Balsas y Tilzapotla, y subyace aparentemente en forma concordante a la unidad de travertino, como se observa en el sitio conocido como El Salto, al sur de Tonicato. También es cubierto por los materiales volcánicos del Cuaternario, pero en relación discordante. Aflora ampliamente en toda la zona de estudio. Su edad corresponde al Plioceno Superior-Pleistoceno inferior, inferida por posición estratigráfica y por restos de fósiles de elefantes del género *Cuvieronus*.

c) Travertino (Qtr)

Esta unidad no ha sido definida formalmente y sólo es mencionada en forma muy breve por De Cserna (1981). La unidad está formada por un paquete de rocas evaporíticas carbonatadas, depositadas en una antigua cuenca endorreica de reducida extensión, lo cual puede comprobarse al observar el área escasa en que se encuentran sus afloramientos y el tipo de drenaje que desarrolla. El color de estas rocas es café claro e intemperiza a blanco. En general, el travertino es muy poroso y no presenta fracturamiento pero sí huellas de disolución.

Los depósitos de manantiales anteriores, se han acumulado como travertinos depositados sobre la Formación Chontalcoatlán, observados principalmente en el valle que se extiende entre Ixtapan de la Sal y Tonicato.

La extensión de estos afloramientos es reducida a unos 15 km², en los alrededores de las poblaciones de Ixtapan de la Sal y Tonicato. Se encuentran descansando discordantemente

sobre el Complejo Metamórfico. A sí mismo, están en contacto con la Formación Chontalcoatlán, esta última formación es muy regular y aparentemente concordante. Por su relación estratigráfica con la Formación Chontalcoatlán fechada del Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior, se ha asignado al travertino una edad Holocénica.

d) Aluvión (Qal)

Esta unidad se encuentra constituida por depósitos recientes derivados del intemperismo y erosión de unidades más antiguas; los clastos así originados fueron posteriormente acumulados en pequeñas cuencas, en donde ocurrió la sedimentación debido al bloqueo del drenaje de los valles preexistentes por episodios volcánicos cuaternarios. La granulometría de estos materiales varía de lugar a lugar, en algunos sitios se compone de gravas y arenas y en otros principalmente de arcillas, pero en todos los casos se encuentran mal consolidados y con espesores reducidos, que de acuerdo a información de la exploración geofísica, no sobrepasan los 20 m. Sus afloramientos son en general escasos.

3.4 Tectónica

Los trabajos geológicos estructurales indican que el CVTM cubre diferentes estructuras antiguas que han sido parcialmente reactivadas en diferentes momentos de su historia (SGM, 2011). En particular, desde el final del Eoceno, el estilo de la deformación al norte y al sur del CVTM ha sido distinto, lo que implica la existencia de una zona de deformación transtensiva distribuida en la franja actualmente ocupada por el CVTM. En su mayoría se trata de sistemas de fallas extensionales que provocan fosas tectónicas rellenas por productos volcánicos (Figura 3.5). La geometría, cinemática y edad de los principales sistemas de fallas dibujan un panorama complejo que sugiere que diferentes causas concurren en controlar su deformación (Ferrati, 2011).

El área de estudio se localiza en una región de afloramientos volcanosedimentarios del Jurásico-Cretácico, con deformaciones diferentes que demuestran una historia compleja (INEGI, 2001). Según Campa (1978) en la región noroccidental de Guerrero y regiones colindantes con otros estados, incluyendo la zona de Ixtapan de la Sal-Tonatico, se

reconocen cinco fases de deformación que actúan en el Mesozoico y Cenozoico. De la última fase de deformación (Pliocuaternaria), cabe destacar los dos sistemas de fallas regionales, uno con orientación NE-SW y otro con orientación NW-SE; siendo el sistema más antiguo el de orientación NW-SE.

- *Sistema de fallas NW-SE*

Está relacionado por los eventos de los sistemas de fallas Taxco-San Miguel de Allende (Figura 3.5). Esta falla se extiende desde San Miguel de Allende, Guanajuato, hasta la Ciudad de Taxco, Guerrero, cuyas trazas se observan hacia el poniente de las ciudades de Querétaro y Toluca, siguiendo una orientación casi N-S. Inició su actividad de acotamiento y extensión con la Orogenia Laramide, desde el Oligoceno, extendiéndose al menos en 4 eventos de deformación hasta el Mioceno que originaron la formación de la Sierra Madre Occidental y los inicios del Cinturón Volcánico Transmexicano (Alaniz-Álvarez et al., 2002).

- *Sistema de fallas NE-SW*

García-Palomo en 1998, en su trabajo de maestría interpreta una serie de lineamientos de rumbo NE-SW (Figura 3.6), a los que denominó como sistema de fallas San Antonio que inicia desde el Mioceno al reciente. Se considera el causante de la actividad volcánica del Nevado de Toluca y con los volcanes monogenéticos localizados en las cartas Tejupilco, Pilcaya e Ixtapan de la Sal. El sistema es visible entre los volcanes Nevado de Toluca y San Antonio, donde alcanza una longitud de 60 km y un ancho de 17 km y con una orientación general N 40° E.

Las fallas normales cartografiadas en el área de estudio que están asociadas al sistema de fallas NW-SE son: la localizada al occidente de Zumpahuacán y otras dos más, las cuales pueden tener una posible relación con manantiales termales, localizadas al oriente y poniente de Ixtapan de la Sal. Las extensiones de estas fallas parece ser que son de muchos kilómetros, pero en las imágenes satelitales no es posible continuarlas. El rumbo de las tres estructuras es, en términos generales, NNW-SSE (Juan- Pérez, 1994).

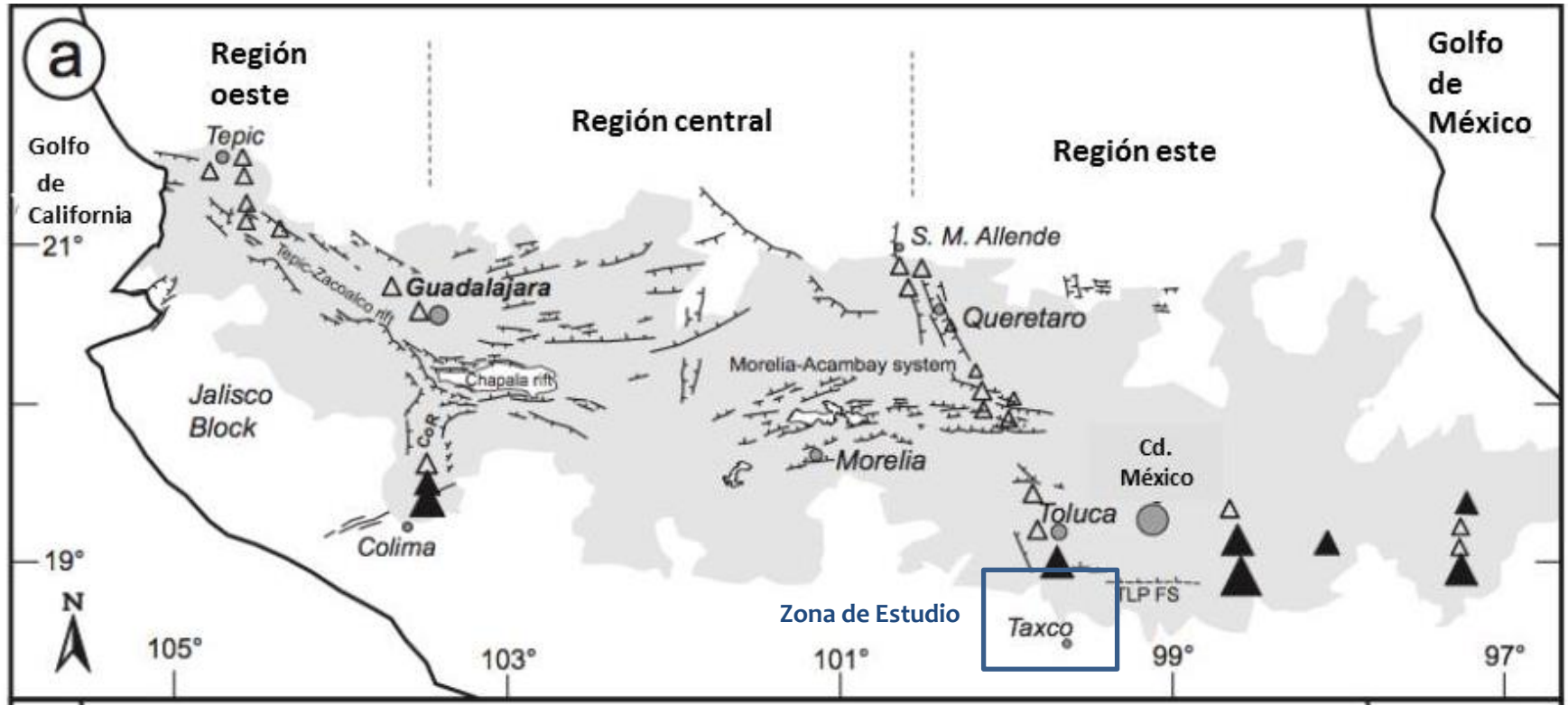


Figura 3.5. Principales sistemas de fallas Mioceno-Holoceno del CVTM y distribución de volcanes poligenéticos (triángulos blancos: $< 200 \text{ km}^3$; triángulos negros $> 200 \text{ km}^3$) (Ferrati, 2011).

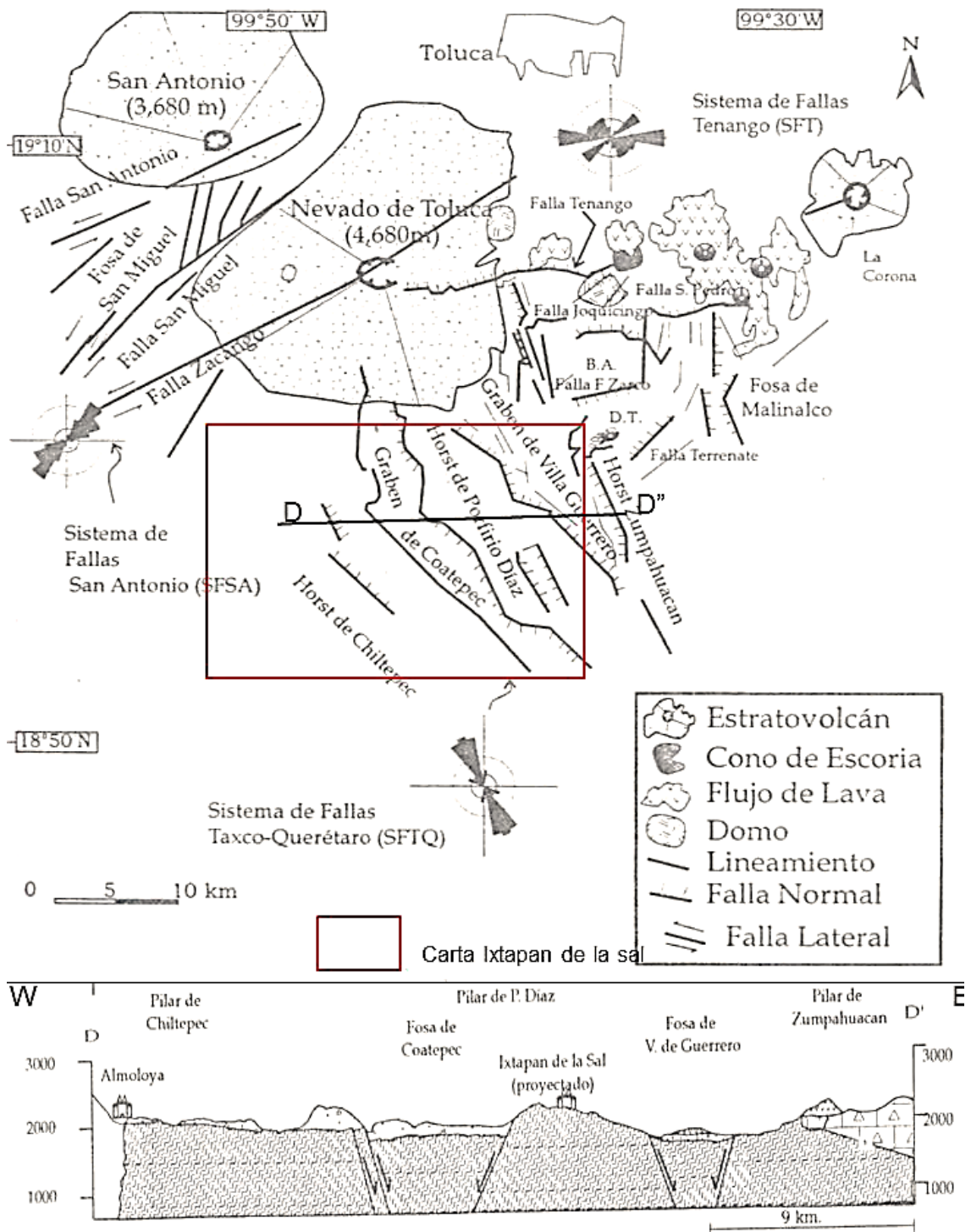


Figura 3.6. Modelo tectónico que dio origen a la evolución del Nevado de Toluca (García-Palomo, 1998).

3.5 Hidrogeología

Con base en las características geológicas, geofísicas e hidrogeológicas en el acuífero de Tenancingo, en el que se enmarca la región de Ixtapan de la Sal-Tonatico, es posible distinguir por una lado las secuencias volcánicas del Plio-Cuaternario, consistentes en andesitas y basaltos que conforman las principales unidades hidrogeológicas con capacidad para almacenar y transmitir importantes volúmenes de agua subterránea, y por otro lado, las calizas del Cretácico de la Formación Morelos que funcionan como zonas de transmisión de agua a otros materiales (lateralmente en contacto). Los materiales granulares no consolidados no presentan espesores importantes pero generan horizontes saturados dando lugar a manantiales (Figura 3.7). En el acuífero, se ha identificado una componente de flujo subterráneo regional caracterizado por aguas termales que afloran en la zona de Ixtapan de la Sal con temperaturas del agua superiores a los 33 °C (CONAGUA, 2015).

La dirección predominante del flujo subterráneo del acuífero de Tenancingo es del norte al sur, siguiendo el comportamiento general de la topografía del terreno y de las corrientes de agua superficial, indicando una recarga por flujo subterráneo proveniente principalmente de la zona del Nevado de Toluca (Figura 3.7).

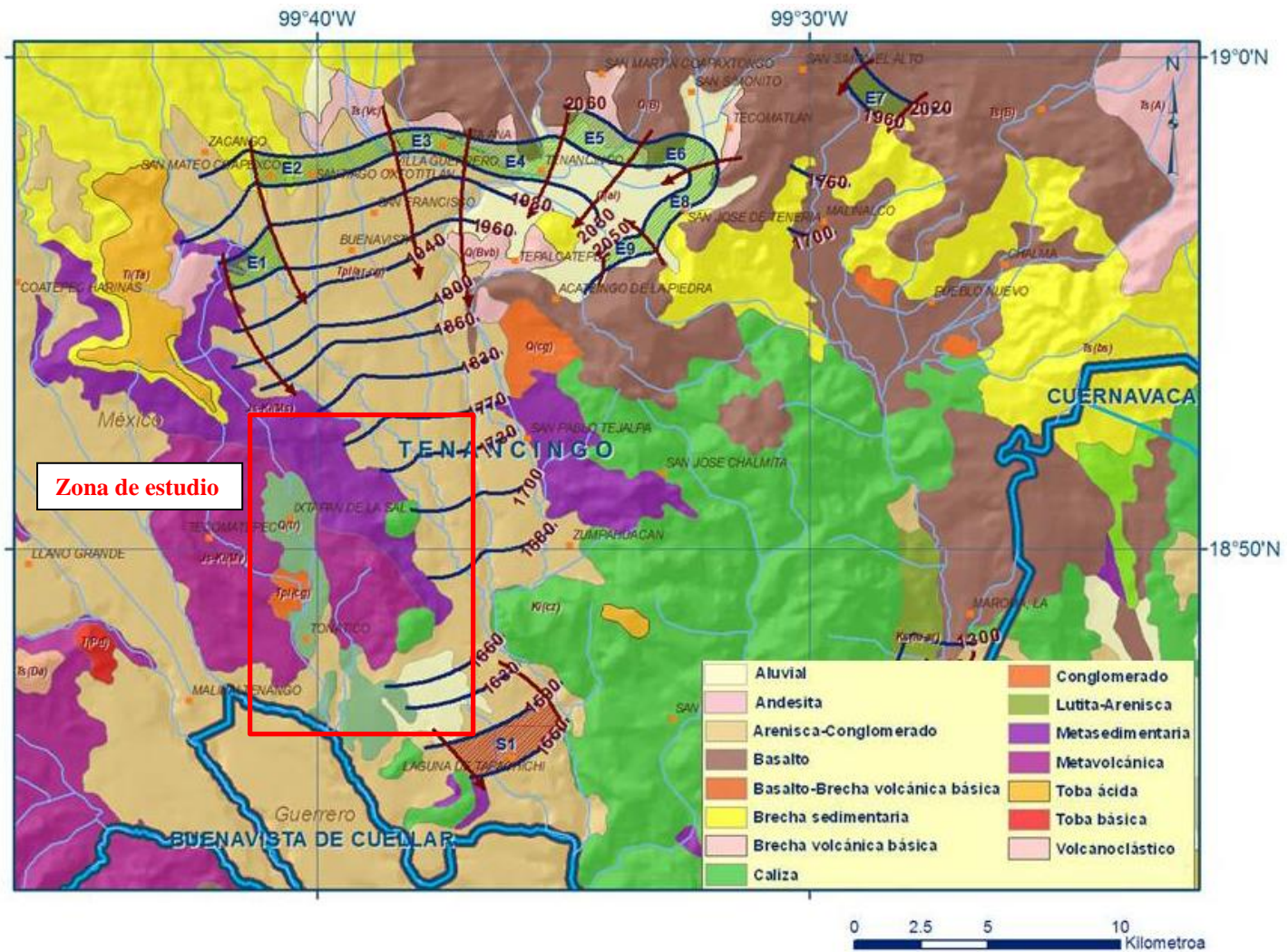


Figura 3.7. Elevación del nivel estático en msnm para el año 2010 del Acuífero de Tenancingo (CONAGUA, 2015).

3.5.1 Unidades hidrogeológicas

A nivel local, Paredes (2014), elaboró un mapa hidrogeológico aplicando la metodología de la UNESCO, la cual se basa en la “Leyenda Internacional para los Mapas Hidrogeológicos” publicado conjuntamente en 1970 por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH por sus siglas en inglés), la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS por sus siglas en inglés), UNESCO y el Instituto de Ciencias Geológicas de Londres, la cual fue revisada en 1983 (SIIMA, 2001). Esta metodología considera los siguientes tipos de acuíferos:

a) En materiales granulares con importancia hidrogeológica relativa grande y pequeña.

1. Acuíferos continuos de extensión variable, de tipo “libre”. Constituidos por sedimentos clásticos no consolidados. Permeabilidad variable. Calidad química generalmente buena. Posibilidades de explotación a través de pozos someros.
2. Acuíferos continuos de extensión regional o regional limitada. Libres y/o confinados, en sedimentos clásticos no consolidados y consolidados. Permeabilidad generalmente alta a media. Calidad química de las aguas generalmente buena.
3. Acuíferos continuos generalmente de extensión regional a regional limitada. Libres y/o confinados, constituidos por sedimentos clásticos no consolidados y consolidados. Permeabilidad generalmente media a baja. Calidad química de las aguas generalmente buena.
4. Acuíferos locales limitados en capas delgadas o lentes arenosos, libres y/o confinados. Incluyen también acuíferos profundos de difícil explotación debido a la gran profundidad de los niveles de agua. Consisten de sedimentos clásticos no consolidados y consolidados. Permeabilidad generalmente baja. Calidad química de las aguas generalmente buena.

b) En rocas fracturadas o fisuradas con importancia hidrogeológica relativa media a pequeña.

1. Acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas, libres y/o confinados. Compuestos de rocas ígneas extrusivas. Permeabilidad generalmente alta a media y con agua de buena calidad química.
2. Acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas ampliados en ciertos trechos debido a la asociación con rocas granulares o zonas de alteración o intemperismo, libres y/ confinados. Constituidos por rocas sedimentarias, metaclásticas y/o carbonáticas. Permeabilidad generalmente media a baja. Calidad química generalmente buena.
3. Acuíferos de extensión variable restringidos a zonas fracturadas, ampliados en ciertos tramos por la disolución cárstica; libre y/o confinada. Formados por rocas calcáreas con permeabilidad variable, generalmente alta, con aguas químicamente duras.
4. Acuíferos locales de extensión variable, restringidos a zonas fracturadas, libres y/o confinados. Constituidos por rocas volcánicas y mixtas vulcanosedimentarias. Permeabilidad baja. Calidad química de sus aguas de buena a regular.

c) En materiales granulares o rocas fracturadas con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula.

1. Acuíferos locales a muy locales limitados a capas delgadas o lentes arenosos o limo-arenosos, libres. Constituidos por sedimentos clásticos no consolidados o consolidados. Permeabilidad muy baja. Calidad generalmente buena.
2. Acuíferos muy locales restringidos a zonas fracturadas, ampliadas en ciertos tramos asociados a zonas de alteración o intemperismo, de tipo libre. Constituidos de rocas metamórficas. Permeabilidad generalmente baja. Calidad química de las aguas generalmente buena.
3. Acuíferos muy locales en zonas fracturadas, libres y/o confinados en rocas volcánicas y mixtas (vulcanosedimentarias), eventualmente con cobertura discontinua

de sedimentos no consolidados. Permeabilidad muy baja a nula. Calidad química generalmente buena de reciente infiltración

4. Acuíferos prácticamente ausentes. Consisten de rocas ígneas y metamórficas muy compactas y algunas sedimentarias de grano fino (arcillas)

De lo anterior se desprenden una serie de unidades litológicas asociadas a diferentes ambientes geológicos, las cuales pueden integrarse en tres grandes unidades hidrogeológicas (Figura 3.8):

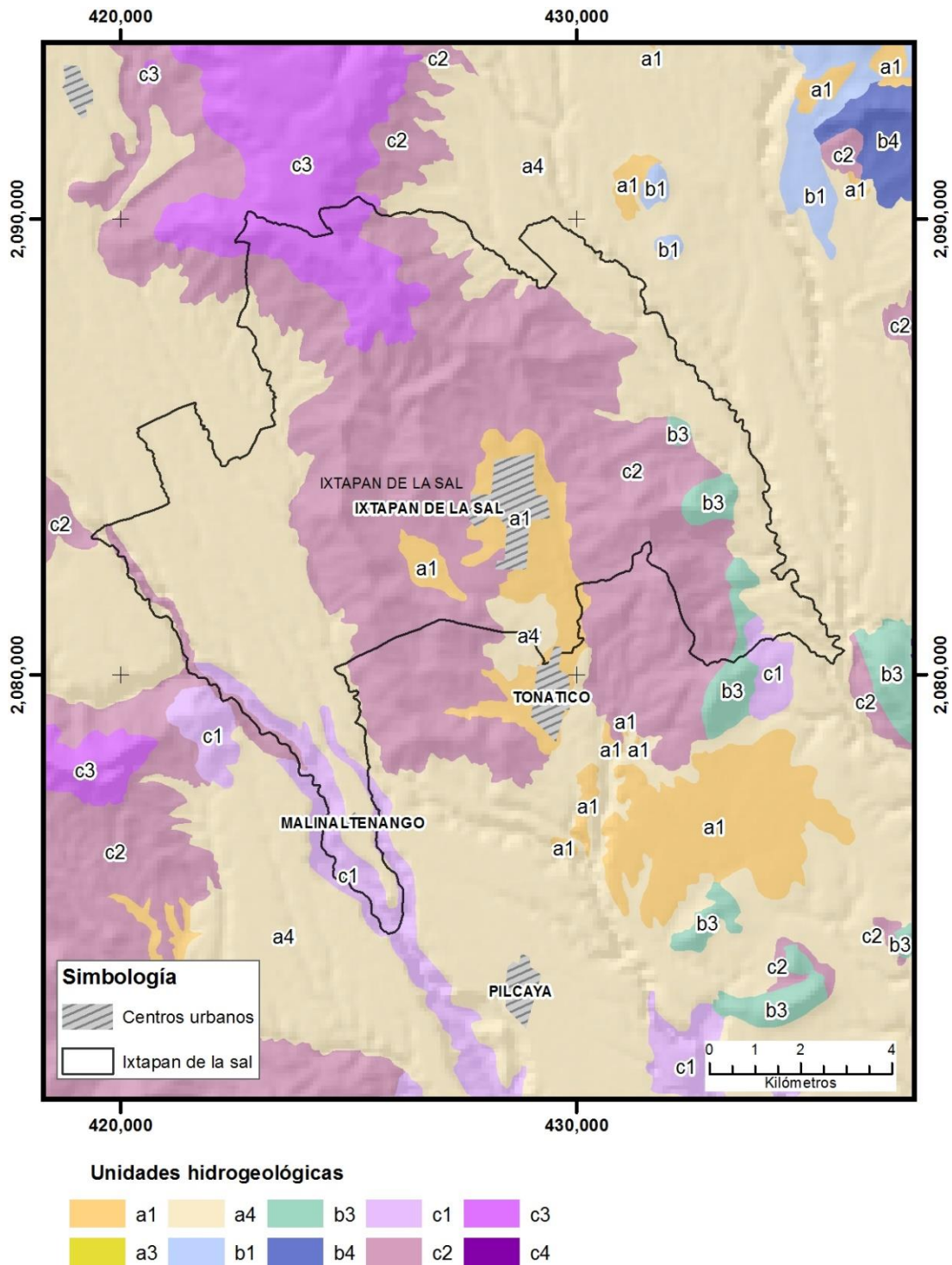


Figura 3.8. Unidades hidrogeológicas en la zona de estudio: Ixtapan de la Sal-Tonatico (SIIMA, 2001; Paredes, 2014).

3.5.2. Acuíferos en materiales granulares

Se incluyen todos los sedimentos clásticos no consolidados o consolidados de la columna geológica de la región independientemente de su forma de depósito, ya sean de origen sedimentario o vulcano – sedimentario y que por sus características litológicas y posición topográfica constituyen acuíferos de variado potencial de explotación.

De esta manera se integran en esta categoría, de la más reciente a la más antigua, las siguientes unidades litológicas (Paredes, 2014):

- los depósitos continentales cuaternarios (aluviales: Qal; Talud: Qtv y el Travertino: Qtr);
- los productos piroclásticos de la Formación Zinacantepetl (Qzl)
- la secuencia de depósitos clásticos formados exclusivamente por fragmentos derivados de rocas volcánicas del Nevado de Toluca, denominados Formación Chontalcoatlán (Tpch).

Estas unidades, con base en la metodología de la UNESCO (presentada anteriormente), se clasifican como a.1, a.3 y a.4, respectivamente (Figura 3.8).

Dos de estas formaciones se encuentran íntimamente ligadas ya que una, la Formación Zinacantepetl (Qzl), al ubicarse hacia las porciones topográficamente altas constituye la principal zona de recarga, principalmente de los materiales vulcanoclásticos de la Formación Chontalcoatlán (Tpch), aunque también alimenta a la Andesita Zempoala.

3.5.3. Acuíferos en rocas fracturadas o fisuradas

Se incluyen a todas las rocas que por sus características geológicas – estructurales, como fracturamiento y disolución (carsticidad) forman acuíferos de relativa importancia.

De esta manera se integran en esta categoría, de la más reciente a la más antigua, las siguientes unidades litológicas (Paredes, 2014):

- Los basaltos cuaternarios (Qb);
- La andesita Zempoala (Tmpz) y
- Las calizas cretácicas de la Formación Morelos (Kim).

Estas unidades con base en la metodología de la UNESCO (presentada anteriormente) se clasifican como b.1, b.4 y b.3, respectivamente (Figura 3.8)

3.5.4. Acuíferos y acuitardos en materiales granulares o rocas fracturadas

Se incluyen los materiales granulares que por su litología (materiales clásticos finos) y las rocas con poco y discontinuo fracturamiento y alta compacidad forman acuíferos y/o acuitardos de importancia mínima (Paredes, 2014).

De esta manera se integran en esta categoría, de la más reciente a la más antigua, las siguientes unidades litológicas:

- Las andesitas miocénicas de la Formación Tepoztlán (Tomt), clasificadas como c.3;
- La secuencia volcánica del Oligoceno – Mioceno (F. Tilzapotla (Tot) y Buenavista), clasificada como c.3;
- Los materiales continentales del Grupo Balsas (Teob), clasificados como c.1;
- La secuencia lutitas, areniscas y calizas cretácicas de la Formación Mexcala (Ksm), clasificada como c.2;
- Las rocas calcáreas y arcillo calcáreas del Jurásico Superior – Cretácico Inferior de las formaciones Xochicalco (Kix) y Acuitlapán (J-Ka);, clasificadas como c.2;
- El complejo de rocas metavolcánicas y metasedimentarias del Jurásico Tardío – Cretácico Temprano asociado con el Terreno Guerrero, y que Ortega (1981) define como “Complejo Tierra Caliente” (Jski); clasificado como c.2.

En la zona de estudio las calizas de la Formación Morelos, no presentan una homogeneidad estructural ya que se encuentra fuertemente cortadas y dislocadas por la tectónica de la región, por ende la discontinuidad de las estructuras no permite una continuidad hidráulica por lo que es de esperarse que formen sistemas hidrogeológicos locales a muy locales.

Con base en estas consideraciones se puede definir que en la región existe un basamento metamórfico sobre el cual se sobreponen materiales granulares de tipo aluvial; que en el área de Ixtapan de la Sal tiene escaso espesor lo cual limita que esta formación geológica

sea explotada con pozos, mientras que en Tonatico si existe un mayor espesor que permite su explotación con pozos someros. Los travertinos, por su escasa extensión y espesor, no conforman un acuífero productivo.

Tomando en consideración esta situación, en el municipio de Ixtapan de la Sal, las únicas fuentes de agua son los manantiales termales y los manantiales no termales, así como algunas norias y pozos de escasa profundidad. El abastecimiento se cubre con el agua que es transportada por un canal desde las faldas del Nevado de Toluca. En Tonatico, si es posible localizar pozos que se utilizan para el aprovechamiento y riego, además de algunos manantiales termales.

Basándose en el análisis de las unidades hidrogeológicas, y de los eventos estructurales que han predominado en la zona; Paredes (2014) generó una nueva sección geológica (A – A', Figura 3.4.) con base en la propuesta por SIIMA (2001), la cual atraviesa la zona urbana de Ixtapan de la Sal y ayuda a entender el comportamiento hidrogeológico de la zona (Figura 3.9).

La sección muestra el cabalgamiento de las formaciones metamórficas del Jurásico sobre las formaciones sedimentarias del Cretácico. Otro aspecto que se observa es que las unidades aluviales del Cuaternario (acuífero en materiales granulares) tienen un espesor menor a los 100 metros, lo que acota su explotación a pozos someros con un caudal limitado.

A partir de esta información se generó un esquema conceptual del flujo del agua termal (Paredes, 2014), desde la línea de contacto del basamento andesítico con las formaciones sedimentarias, pasando por el sistema de fallas y por las rocas calcáreas y arcillo-calcáreas del Jurásico Superior – Cretácico Inferior de la Formación Xochicalco (Kix), la cual presenta porosidad secundaria debido a la disolución de las rocas carbonatadas, así como también por las calizas de la Formación Morelos (Kim) y de la Formación Mexcala (Ksm). Posteriormente, este flujo de agua termal llega a las zonas de fracturas de la roca metamórfica por donde asciende rápidamente y aflora en la superficie dando lugar a los manantiales termales y a la deposición de travertinos que indican que en profundidad las

temperaturas son poco elevadas y que es posible la disolución de calizas por el CO₂ añadido (Custodio y Llamas, 1983).

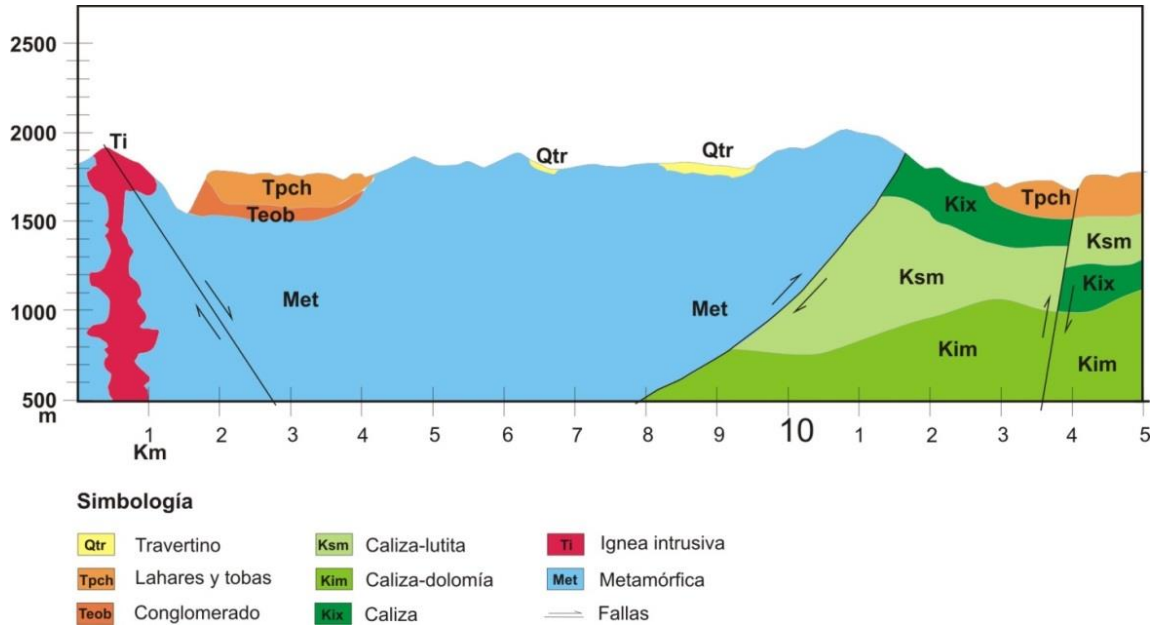


Figura 3.9. Corte geológico de la zona de estudio: Ixtapan de la Sal –Tonatico (SIIMA, 2001)

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

En la figura 4.1, se muestra el esquema de trabajo, en el cual se basa este proyecto de investigación.

Las actividades que se describen a continuación, se han desarrollado con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos de la presente investigación

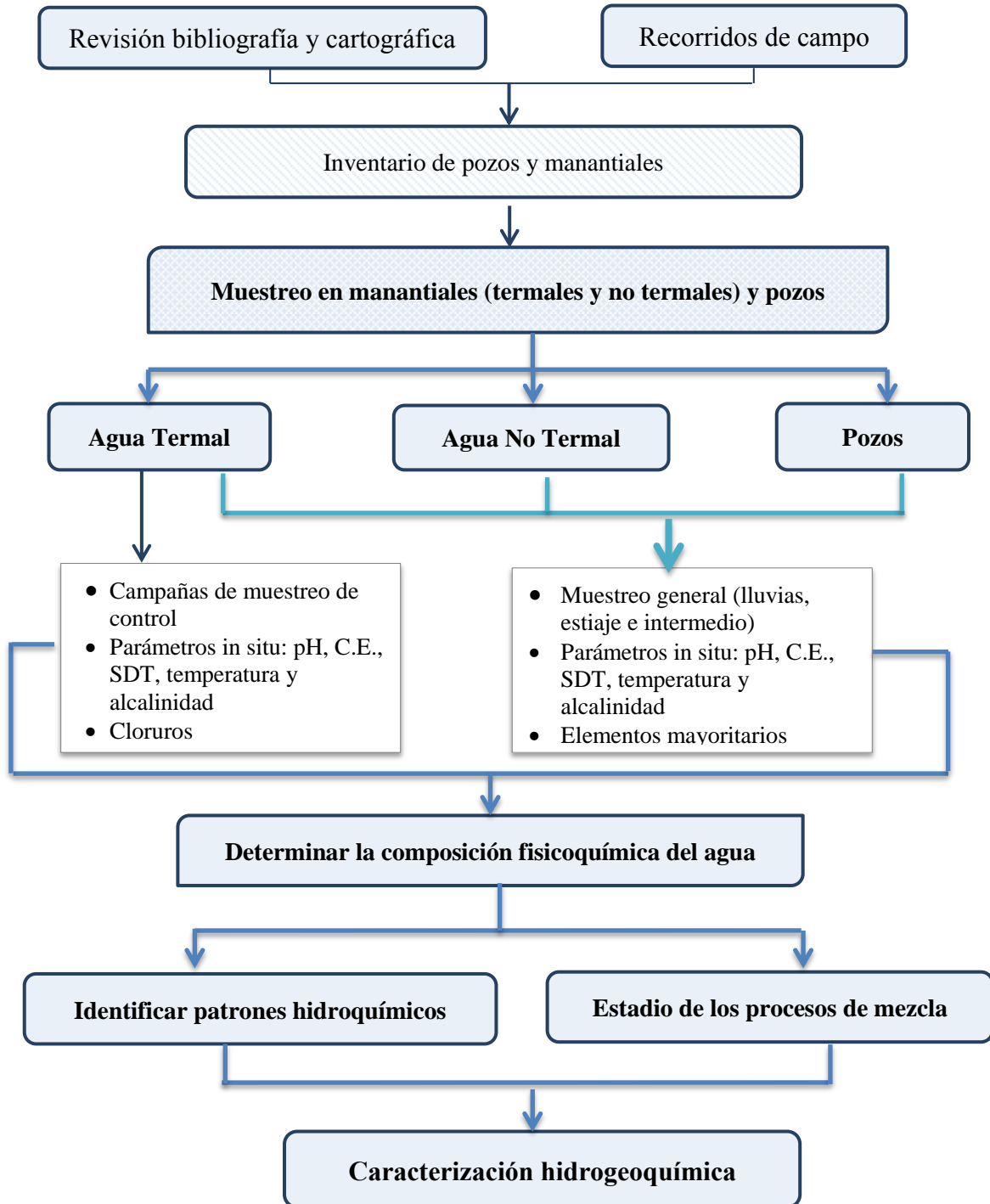


Figura 4.1. Diagrama de flujo del proceso metodológico

4.1. Revisión bibliográfica y cartográfica

La revisión de información disponible sobre climatología, geología, hidrología, usos de suelo, fisicoquímica de agua, características de acuífero, usos en torno al agua termal y no termal en los municipios de Ixtapan de la Sal y Tonalico, se realizó mediante la consulta de documentos en los acervos de los ayuntamientos, CAEM, CONAGUA, INEGI y en las bibliotecas, hemerotecas y mapotecas de la UAEM y de la UNAM.

También se efectuó búsquedas en bases de datos de revistas y libros para obtener información sobre el tema en estudio.

4.2. Trabajo de campo

4.2.1. Inventario de pozos y manantiales

El inventario de pozos y manantiales termales y no termales se efectuó durante los recorridos de campo. Los manantiales termales que son explotados para fines recreativos, están bajo supervisión y control de las empresas concesionarias, mientras que los manantiales no termales son explotados para actividades de uso diario, sin embargo en la actualidad su agua no es empleada para consumo humano, aunque si ha sido utilizada para tal fin anteriormente.

Entre los manantiales termales destacan:

- a) *Manantial Nueva Ixtapa*: Es el manantial que abastece al Parque Acuático Ixtapan, es el que presenta mayor caudal, sin embargo este manantial es de uso privado y no se permite el acceso para tomar muestras del agua.

b) *Manantial Laguna Verde*: Se localiza a un costado del Parque Acuático Ixtapan sobre la carretera Colonia Juárez–Los Naranjos. La temperatura del agua oscila entre 25 y 27 °C. Es un manantial difuso y el agua que emana da lugar a una laguna con coloración verdosa (Figura 4.2).



Figura 4.2. Fotos del manantial Laguna Verde.

- a) Foto tomada el 13 de mayo de 2014 (seca)
- b) Foto tomada el 21 de agosto de 2014 (lluvia)
- c) Vista de las surgencias dentro de la laguna
- d) Foto tomada desde la parte alta donde se denota el anuncio de precaución y el cercado de protección

c) *Balneario Municipal de Ixtapan de la Sal*: El manantial aporta agua para las albercas termales, las cuales son destinadas para uso recreativo. La temperatura de este manantial oscila de 36 a 39 °C. Es posible medir parámetros in situ, en el punto de surgencia. De ahí el agua es transportada por un canal a las albercas (Figura 4.3). En este balneario hay otro manantial termal que también aporta agua a las albercas pero cuyo acceso no es posible ya que se encuentra bajo una losa.



Figura 4.3. Fotos del Balneario Municipal de Ixtapan de la Sal.

- a) Túnel para llegar al manantial, al fondo la surgencia
- b) Manantial y formación de precipitados.
- c) Albercas de agua caliente alimentadas por agua el termal.
- d) Instalaciones y albercas de agua fría.

- d) *Balneario Municipal de Tonatico*: El agua que emana del manantial es utilizada para las distintas albercas que se encuentran en las instalaciones. La temperatura del agua oscila entre los 35 y los 37 °C (Figura 4.4). Existen además otros dos manantiales con caudales menores que se encuentran ubicados en otras albercas.



Figura 4.4. Fotos del Balneario Municipal de Tonatico.

- a) Alberca del balneario municipal
- b) Desagüe de la alberca principal
- c) Albercas de agua caliente alimentadas por agua el termal.
- d) Instalaciones y albercas el centro turístico

e) *El Obispado*: Se localiza dentro del recinto conocido como los Baños del Obispado, sobre la carretera Ixtapan de la Sal-Tonatico. Posee una temperatura entre 34 y 35°C. Al principio del periodo de muestreo fue posible medir los parámetros in situ y obtener muestras para ser analizadas en laboratorio. Sin embargo, a partir del mes de agosto de 2014 el lugar quedó abandonado, lo que imposibilitó la obtención de datos del manantial (Figura 4.5).



Figura 4.5. Fotos del manantial del Obispado

- a) Alberca en donde surge el manantial
- b) Laguna externa donde se vierte el agua termal.
- c) Instalaciones
- d) Canal de desagüe

- f) *Olincalli*: Este manantial es de uso privado y se localiza a un costado del manantial del Obispado. La temperatura es de 34 a 36°C (Figura 4.6). Solo se pudo acceder en contadas ocasiones, ya que no siempre se obtuvo permiso de los propietarios.



Figura 4.6. Fotos del manantial Olincalli

- a) Alberca en cuyo fondo se aprecia la salida del manantial
- b) Formaciones de precipitado alrededor de la alberca
- c) Vista general de la alberca termal
- d) Alberca exterior donde se recoge el agua y de ahí se vierte al exterior a través de un canal.

- e) *Ixtamil*: Este manantial se encuentra dentro del Centro Vacacional Ixtamil del SMSEM. El agua emana con temperaturas entre 33 y 36°C y es empleada para una alberca termal la cual se denomina “Temazcal”. Esta piscina es lavada semanalmente con ácido clorhídrico, comúnmente conocido como ácido muriático (Figura 4.7). Se trata de un punto de muestreo que se localiza a la salida de la alberca, encontrándose el manantial en el fondo de la alberca, al cual solo es posible acceder cuando se vacía dicha alberca.



Figura 4.7. Fotos del manantial del Ixtamil

- a) Se observa la alberca en donde nace el manantial
- b) Limpieza de la alberca con ácido clorhídrico
- c) Toma de datos in situ con el equipo multiparamétrico
- d) Instalaciones

Adicionalmente, se tuvo conocimiento de otros manantiales termales en casas particulares, pero no se tuvo acceso a ellos (Particular I y II).

Así mismo, dentro de esta región se encuentran varios manantiales no termales, los cuales se describen a continuación (Figura 4.8):

- a) *Ixtamil abastecimiento*: este manantial se localiza afuera de las instalaciones del Centro Vacacional Ixtamil del SMSEM. Es empleado para riego y en las albercas.
- b) *El Carrizal*: se ubica en el límite municipal de Ixtapan de la Sal con Tonalico; en el margen derecha del Arroyo El Salitre. Su agua es empleada en época de estiaje para consumo humano, así mismo para cubrir necesidades de limpieza como baño y lavado de ropa y trastes de pobladores que habitan en viviendas próximas.
- c) *Agua Amarga I y II*; ambos manantiales se ubican al margen derecho del Arroyo El Salado. Estos manantiales se han utilizado para el abastecimiento público de los habitantes de Ixtapan de la Sal.



Figura 4.8. Fotos de los manantiales no termales. a) Manantial Ixtamil abastecimiento, b) Manantial El Carrizal. c) Manantial Agua Amarga I y d) Camino a Agua Amarga I y II

De igual manera dentro de la zona de estudio se identificaron algunos pozos como son:

- a) *Pozo Ixtapan*: Este pozo se localiza al borde de la carretera Ixtapan-Coatepec Harinas. Es empleado para consumo privado y en épocas de estiaje provee de agua al sistema de agua potable del municipio de Ixtapan de la Sal.
- b) *Pozo de Salinas*: Es un pozo ubicado en la localidad de Salinas, municipio de Tonatico. Sobre su diseño de construcción y profundidad no se tiene datos. Funciona 12 horas al día ya que se destina al abastecimiento urbano con un caudal de 14L/s.
- c) *Pozo el Rincón de los Mangos*: Este pozo se encuentra dentro de la comunidad del Rincón, en el municipio de Tonatico. Parte del caudal de agua de este pozo es destinada al uso agrícola y el restante para abastecimiento público. Funciona 12 horas al día siendo el agua almacenada en tanques de rebombeo y posteriormente, distribuida a la población de esa misma comunidad. El caudal estimado de este pozo es de 14 L/s. No se dispone de más información.
- d) *Pozo Zapote*: Se localiza en el municipio de Tonatico, el agua de este pozo abastece a las comunidades del Zapote, el Terrero y la Puerta de Santiago. Generalmente funciona 12 horas al día, sin embargo cuando la bomba de alguno de los pozos del municipio deja de funcionar, este pozo entra en operación las 24 horas del día. El caudal de extracción estimado es de 16 L/s.



Figura 4.9. Fotos de pozos. a) Pozo Ixtapa y b) Muestreo en el pozo Salinas

En la figura 4.10 se localizan todos los puntos inventariados de manantiales termales y no termales en la presente investigación.

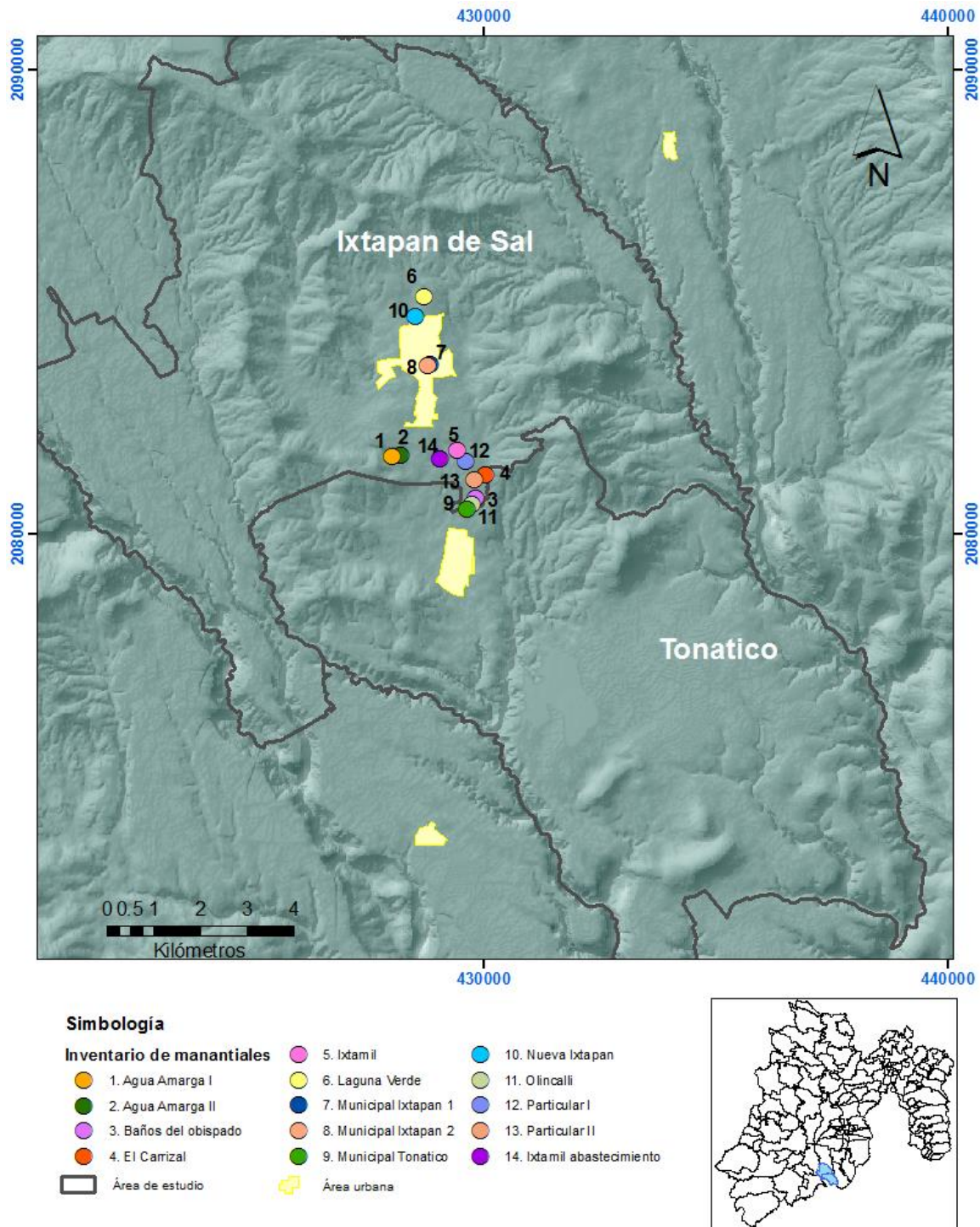


Figura 4.10. Localización de los puntos inventariados de manantiales termales y no termales en la zona de estudio. Ixtapa de la Sal-Tonatico

4.2.2. Muestreo

Con la información recopilada se conformó una base de datos conteniendo las características de los puntos a muestrear. Se realizaron distintas campañas de muestreo, en donde se llevó a cabo un seguimiento de las características físico-químicas de seis manantiales termales, tres manantiales de agua no termal y cuatro pozos de abastecimiento público, para identificar si existen cambios en las propiedades fisicoquímicas de las aguas en la época de estiaje y de lluvia. En la última campaña de muestreo también se consideró el agua superficial, recogiendo muestras de agua en los arroyos El Salado y El Salitre.

a) Calendarización de campañas de muestreo

El objetivo de las campañas de muestreo es comprobar la existencia de variaciones en las propiedades del agua termal con relación a la temporada de lluvias y de estiaje, así como en los manantiales no termales y pozos para de este modo identificar sus rasgos hidroquímicos.

Para ello, las campañas de muestreo se dividieron en dos tipos: las campañas de muestreo general y las campañas de control que implican la toma de muestra de agua y determinación de parámetros a una escala temporal.

Las campañas de muestreo general se realizaron en los meses de mayo y agosto de 2014 y enero de 2015. Se tomaron muestras de agua de la totalidad de los manantiales termales, además de pozos y manantiales no termales, todos ellos contemplados en el inventario de fuentes de agua. En la primera campaña general de muestreo (5 y 13 de mayo de 2014), se recolectaron cinco muestras de agua termal (Laguna Verde, Centro Vacacional Ixtamil, Balneario Municipal de Tonatico, Balneario Municipal de Ixtapan de la Sal y el Obispado), cuatro muestras de manantiales no termales (Agua Amarga I, Agua Amarga II, Centro Vacacional Ixtamil y El Carrizal), así como un pozo particular (Pozo Ixtapan). El segundo muestreo general que se realizó en el mes de agosto 2014 (días 21 y 27), se obtuvieron muestras de aguas de las fuentes termales y no termales entes mencionados, además de contar con acceso a los pozos de Salinas y del Rincón de los Mangos, ambos ubicados en el municipio de Tonatico. En el tercer muestreo general que se realizó en el mes de enero de 2015 (días 13 y 21), se obtuvieron muestras de aguas de las manantiales termales y no

termales antes mencionados, además de contar con acceso a los pozos de Salinas y Zapote, ambos ubicados en el municipio de Tonicaco. También se muestrearon los arroyos Salado y Salitre

Para el seguimiento de los parámetros, se estableció llevar a cabo las campañas de control de los manantiales termales, en donde se obtuvieron datos in situ de pH, conductividad eléctrica, SDT, temperatura del agua, temperatura ambiente y alcalinidad. Adicionalmente, en laboratorio se determinó la concentración del ion cloruro con el objetivo de identificar variaciones durante el periodo de muestreo. Las campañas se realizaron de junio a diciembre de 2014 y de enero a julio de 2015, cada 15 días.

b) Equipos y materiales de campo

Para medición de parámetros fisicoquímicos in situ se empleó:

- i) Equipo multiparamétrico OrionStar A329 con termómetro, pHmetro y conductivímetro. Cada uno de los electrodos fue calibrado (en campo y laboratorio) con estándares preestablecidos. En el caso del conductivímetro, la calibración se efectuó con soluciones estándar (NaCl) de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 12.9 mS/cm . El pHmetro fue calibrado con soluciones tampón de pH 4, 7 y 9 (a 20 °C). La precisión en las medidas de temperatura es de ± 0.5 °C, en la conductividad eléctrica es de ± 1 % del fondo de escala (a 25°C) y en el pH de ± 0.01 unidades de pH.
- ii) Termómetro de mercurio (0 a 100° C) para medir la temperatura ambiente.

c) Toma de muestras

El muestreo *in situ* consiste en tomar una muestra representativa del agua de manantial termal o de fuente no termal. Para los muestreos generales, se tomó agua con un recipiente de polietileno previamente lavado y enjuagado tres veces con la misma agua, el cual se llenó hasta desbordar y sin dejar burbujas en el recipiente. Después fue sellado con papel parafilm y etiquetado.

En el proceso de recolección de muestras se emplearon dos tipos de recipientes de polietileno (PE). Una botella de 1000 mL, para el análisis de aniones, mientras que para la determinación de cationes se utilizaron frascos de 250 mL previamente acidificados (0.5 mL de HNO_3 concentrado) según lo señalado por APHA-AWWA-WFPC (2005).

El equipo de filtración consistió en jeringas de 60 mL acopladas a un filtro, las cuales son lavadas previamente en laboratorio con agua potable, acto seguido son sumergidas en HCl al 5%, ahí se dejan reposar por un lapso de tiempo mayor a 3 horas y finalmente se enjuagan con agua destilada dejándolas secar. Los filtros que se emplearon son de nitrato de celulosa de 0.45 μm marca WHATMAN (Figura 4.11).



Figura 4.11. Materiales de filtración y botellas para el almacenamiento de muestras de agua.

4.2.3. Medición de parámetros in situ

a) Determinación de parámetros físico-químicos in situ

El procedimiento del muestreo fue el siguiente (Figura 4.12): del sitio de muestreo tomar en un recipiente cantidad suficiente de agua, y sumergir las sondas del equipo multiparamétrico previamente calibradas. Se midió pH, temperatura del agua, SDT y conductividad eléctrica. Después de cada medición se enjuagaron los electrodos con agua destilada y se secaron con papel absorbente.



Figura 4.12. Determinación de parámetros in situ

b) Alcalinidad

La determinación de alcalinidad se realizó según la NMX-AA-036-SCFI-2001 (Figura 4.13), en donde se emplearon 50 mL de agua de muestra y se añadió 2 gotas de fenolftaleína (alcalinidad a la fenolftaleína). Al no observarse algún cambio, se agregaron 5 gotas de naranja de metilo y se tituló con ácido sulfúrico (H_2SO_4 a 0.1N) (alcalinidad al naranja de metilo).

Posteriormente se obtuvo el valor de la alcalinidad como mg/L de $CaCO_3$, mediante el uso de la ecuación 4.1

$$\text{Alcalinidad (mg/L)} = A * N * 50,000 / V \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Dónde: A= Volumen gastado de la solución de H_2SO_4

N= Normalidad de la solución

V= Volumen de la muestra empleado

Una vez obtenida la alcalinidad, y tomando en cuenta que los valores de pH son inferiores a 8.3, se procedió al cálculo de HCO_3^- , mediante el uso de la ecuación 4.2 (Deutsh, 1997).

$$\text{HCO}_3^- = \frac{\text{Alcalinidad (mg/LCaCO}_3\text{)}}{\left(1 + \frac{2 \times 10^{-10.3}}{10^{-\text{pH}}}\right)} \times 50 \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Los datos obtenidos fueron registrados en cuadernos de campo, en cadenas de custodia y en una base de datos en Excel para el tratamiento de datos.



Figura 4.13. Determinación de alcalinidad en campo

4.3 Análisis en laboratorio de muestras

a) Cationes

El análisis de cationes, se realizó en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental, Campus UNAM-Juriquilla, Querétaro. El contenido de cationes se determinó mediante **Espectrometría de Emisión Óptica con plasma acoplado por inducción (ICP-OES)**. **Los elementos analizados fueron:** Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, Sr, Ti y Zn.

b) Aniones

La determinación de aniones fue realizada en el Laboratorio de Calidad del Agua del CIRA, empleando los métodos establecidos por norma (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Normatividad mexicana para la determinación de aniones en agua.

Parámetro	Método	Unidades
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	mg/L Cl ⁻
Sulfatos	HACH	mg/L SO ₄ ²⁻
Nitratos	NMX-AA-074-SCFI-2001	mg/L N-NO ₃

4.4. Tratamiento de datos

Los estudios hidroquímicos permiten conocer la composición físico-química del agua subterránea, las condiciones de recarga, el grado de conexión que existe con flujos, el origen, y las posibles mezclas de agua, así como identificar otros procesos que tienen lugar en el acuífero y que permiten obtener una visión más completa del origen de la misma (Capasso et al., 2001; Herrera et al. 2006; Marrero, 2010).

Los resultados obtenidos en las campañas quincenales fueron almacenados en hojas EXCEL y posteriormente empleados para efectuar gráficas de evolución temporal. Los datos de las campañas generales se capturaron en hoja EXCEL, así como en el software AQUACHEM, para con ello efectuar diversas representaciones gráficas, calcular relaciones hidroquímicas, estimar procesos de mezcla y definir familias de aguas (Custodio y Llamas, 1983; Cardona y Hernández, 1995; Han et al., 2010; Srinivasamoorthy et al., 2012).

4.4.1. Electroneutralidad

Para la validación de los resultados de los análisis químicos, se cuentan con algunas herramientas, una de ellas, y la más empleada, es la condición de electroneutralidad (Custodio y Llamas, 1983) y es representada por la siguiente ecuación, expresada en meq/L (Custodio y Llamas, 1983):

$$\text{Error } \% = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{aniones} + \sum \text{cationes}} \times 100 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Suelen admitirse errores <10% en aguas poco salinas y entre 1 y 2% en aguas con más de 1000 mg/L de sales. Sin embargo, es frecuente considerar el análisis como aceptable con un error ≤ 5% (Appelo y Postma, 2006). Si el error es mayor, puede ser debido a errores

analíticos o a la presencia excepcional de alguna sustancia no analizada (en el caso de las aguas termales pudiera ser debido a las altas concentraciones de elementos minoritarios).

4.4.2 Representaciones gráficas

Con el fin de realizar la evaluación hidrogeoquímica de los manantiales termales, no termales, pozos y agua superficial, se graficaron los valores de concentraciones de los componentes en el diagrama de Piper. Este diagrama se utiliza ampliamente en estudios hidrogeológicos, ya que es una herramienta útil para clasificar los tipos de aguas y realizar comparaciones entre varias muestras.

El diagrama de Piper contiene dos gráficos triangulares para representar las proporciones de cationes y aniones, expresada en meq / L (Figura 4.14). El triángulo de cationes tiene 100% de Ca^{2+} en la esquina izquierda, 100% $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ hacia la derecha y 100% Mg^{2+} hacia arriba (tradicionalmente, Na^+ y K^+ se combinan). La suma de las concentraciones de los tres iones, en miliequivalentes por litro, se vuelve a calcular a 100% y la composición relativa se representa en el triángulo. Para aniones, el triángulo tiene 100% de bicarbonato, a la izquierda, Cl^- a la derecha y SO_4^{2-} en la parte superior.

Las clases o tipos de agua también se conocen como facies químicas (Kehew, 2001; Appelo y Postma, 2006). Ejemplos de nombres de facies químicas son aguas bicarbonatadas cálcicas o cloruradas sódicas, así como facies mixtas (Figura 4.15). De igual manera estos diagramas permiten reflejar las variaciones causadas por mezclas de aguas, precipitaciones debidas a un proceso de precipitación - disolución, y procesos de intercambio iónico, entre otros (Custodio y Llamas, 1983), es por ello que estos diagramas permiten ilustrar la evolución hidroquímica de las aguas.

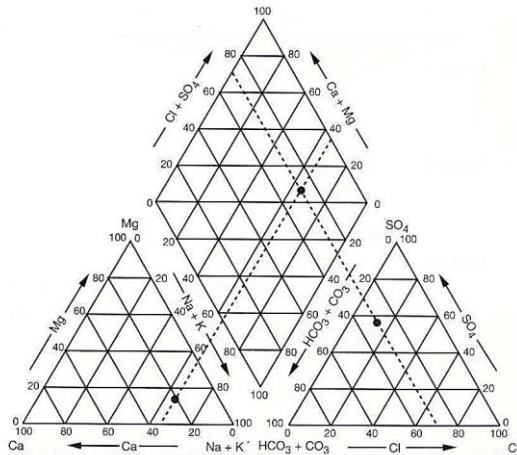


Figura 4.14. Diagrama de Piper

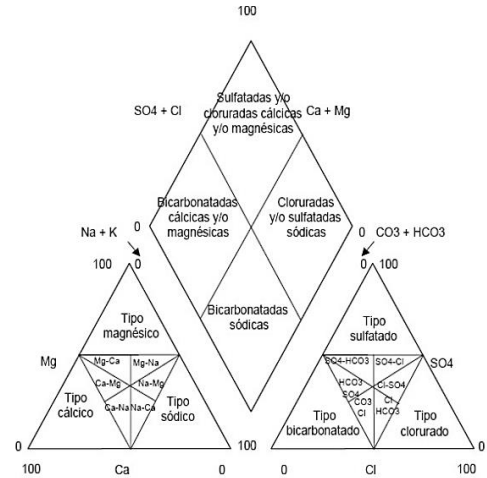


Figura 4.15. Facies hidroquímicas

La clasificación del tipo de agua y la evolución temporal de agua en un mismo punto se también se puede confirmar con el diagrama de Schoeller-Berkaloff (Custodio y Llamas, 1983). Este diagrama consiste en columnas verticales paralelas, igualmente espaciadas y divididas en escala logarítmica y con el mismo módulo. A cada semirrecta se le asocia ion (anión o catión), excepto la primera columna que no tiene asociada ningún ión y su unidad de medida es en meq/L, mientras que las demás tienen como unidad de medida mg/L (Figura 4.16).

El orden de las columnas es el siguiente: Columna 1: sin ión, unidad de medida meq/L, columna 2: Ca, unidad de medida mg/L, columna 3: Mg, unidad de medida mg/L, columna 4: Na, unidad de medida mg/L, columna 5: Cl, unidad de medida mg/, columna 6: SO4, unidad de medida mg/L, columna 7: HCO3, unidad de medida mg/L, columna 8: NO3, unidad de medida mgL

La columna No. 1 puede estar dividida de 0.1 hasta 1000 (meq/L), y las demás se deben configurar y colocar de tal manera que el peso del equivalente de cada ion coincida con el 1 de la primera columna, cuya escala es en meq/L (esto hace que las divisiones queden desplazadas). Los diferentes puntos obtenidos se unen dando una línea quebrada. Se pueden representar varios análisis simultáneamente.

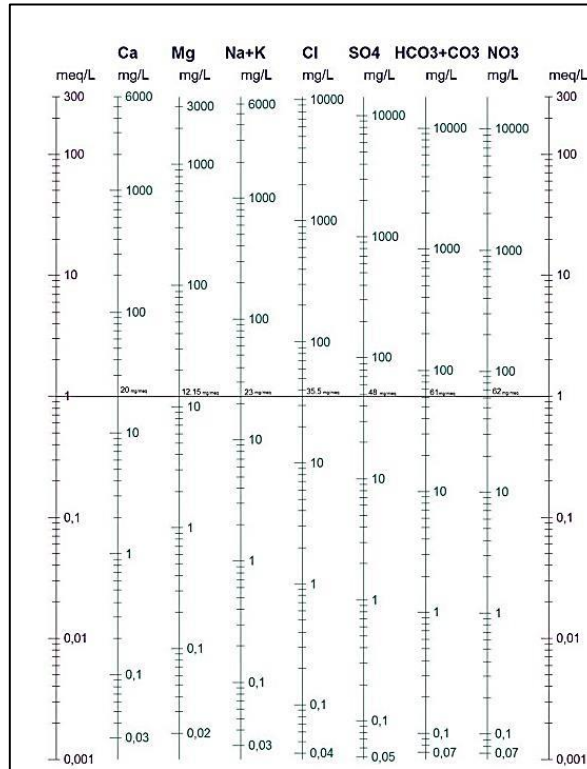


Figura 4.16. Diagrama de Schoeller- Berkaloff

Así mismo, también se representaron gráficamente series temporales donde se estudió la evaluación temporal de los parámetros que se midieron en las campañas quincenales. También se graficaron las relaciones entre diferentes parámetros (gráficas X-Y), las cuales permiten el estudio de los índices hidrogeoquímicos (Custodio y Llamas, 1983).

4.4.3. Tratamiento estadístico

Con los datos obtenidos se hizo un estudio de estadística descriptiva con objeto de calcular valores medios, moda, máximo, mínimo, desviación estándar y coeficiente de variación. Estos cálculos se llevaron a cabo en el paquete AQUACHEM.

Los estadísticos descriptivos fueron:

- a) Media aritmética (x_m): es la suma de todos los valores observados, dividida por el número total de observaciones definido por la ecuación 4.4:

$$x_m = \frac{n_i x_i + n_j x_j + \dots + n_k x_k}{n_i + n_j + \dots + n_k} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

- b) Mediana: es el valor tal que la frecuencia de los valores que la superan es igual a la frecuencia de valores inferiores a él.
- c) Desviación estándar (σ): es la desviación cuadrática respecto a la media aritmética, la cual se puede calcular con la ecuación 4.5.

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_i(x_i - x_m)^2 + n_j(x_j - x_j)^2 + \dots + n_k(x_k - x_k)^2}{n_i + n_j + \dots + n_k}} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

- d) Coeficiente de variación (Cv): Es una medida adimensional de la variación, cuya expresión es:

$$Cv = \frac{\sigma}{x_m} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

También se calculó la matriz de correlación entre los diferentes parámetros considerados con base el coeficiente de asimetría de Karl Pearson o coeficiente de correlación (S_k), el cual es la diferencia entre la media y la moda dividida por la desviación tipo o estándar.

Este coeficiente es la expresión numérica que indica el grado de relación existente entre 2 variables y en qué medida se relacionan. Son números que varían entre Ecuación 4.6 y -1. Su magnitud indica el grado de asociación entre las variables; el valor $r = 0$ indica que no existe relación entre las variables; los valores +1 son indicadores de una correlación perfecta positiva (al crecer o decrecer X, crece o decrece Y) o negativa (al crecer o decrecer X, decrece o crece Y). Su ecuación es (Custodio y Llamas, 1983):

$$S_k = \frac{x_m - \text{moda}}{\sigma} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

4.4.4. Identificación de procesos de mezclas

En los sistemas de agua subterránea, que tienen más de un acuífero y que se da la interacción con las aguas superficiales, es común que se produzca la mezcla de aguas de diferente edad, temperatura y origen. Entre los modelos más comunes que describen como se da el proceso se encuentra el modelo de “mezcla de miembros extremos” (Mook, 2002), siendo los miembros extremos aquellas muestras que contenga mayor y menor concentración de un determinado elemento. Así mismo, es necesario tener en cuenta que existen mezclas conservativas y no conservativas (Cardona, 2015).

- Mezclas conservativas: los resultados dependen de los valores iniciales y los porcentajes de mezcla de cada miembro extremo.
- Mezclas no conservativas: además de los porcentajes de mezcla, se toman en cuenta reacciones (disolución, precipitación, intercambio iónico).

El objeto de realizar estudios de mezcla es establecer qué componentes químicos son aportados por el agua termal (contenidos elevados de Na, Li, Cl, B y As, entre otros) y cuales son aportados por las aguas no termales perturbadoras del sistema (Ca^{2+} , Mg^{2+}). Empleando las ecuaciones 4.8 y 4.9 es posible establecer el porcentaje de agua 1 (C_1) y agua 2 (C_2) que existe en una muestra de agua 3 (C_{mix}) (Cardona, 2015).

Ecuación 4.8

$$C_1(1 - n) + C_2n = C_{mix}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones en n:

$$n = \frac{C_{mix} - C_1}{C_2 - C_1} \times 100$$

Ecuación 4.9

Este tipo de estudios se ha aplicado por ejemplo en Irán, en donde se analizaron manantiales de agua termal (40 - 45 °C) y de manantiales no termales (temperatura alrededor de 22 °C) y se determinó la evolución del agua termal incluye procesos de interacción agua-roca y mezcla entre agua de reciente infiltración y agua geotermal (Rafighdoust et al., 2015).

4.5. Evaluación de la calidad del agua

La calidad del agua para uso y consumo humano de los manantiales no termales y pozos fue evaluada mediante la comparación de los valores de las variables estudiadas con los valores especificados como límites permisibles, definidos en la normatividad aplicable al uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994; OMS, 2006).

CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del trabajo del campo y de los análisis de laboratorio, así como del tratamiento de datos.

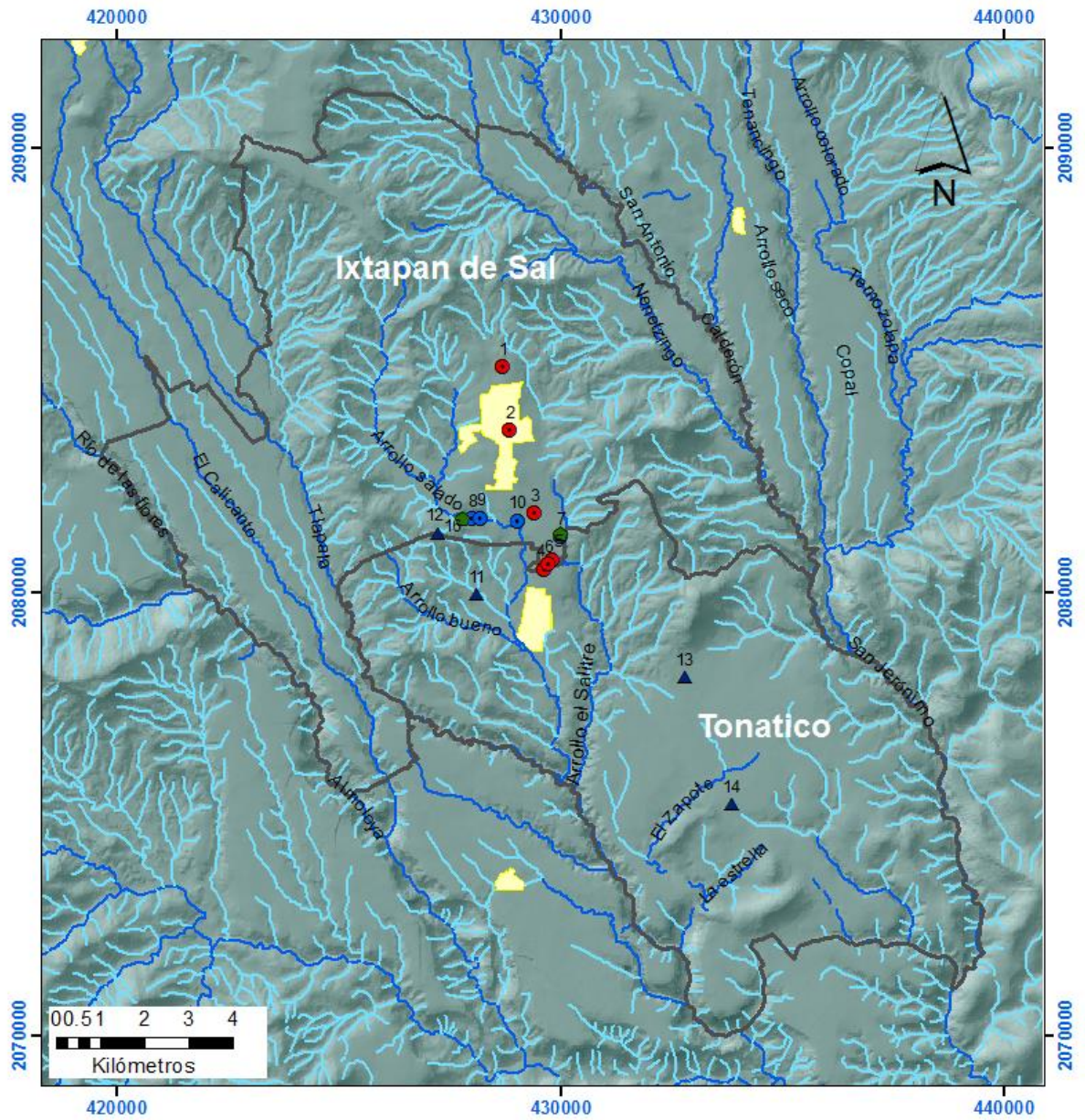
5.1 Caracterización de los puntos de muestreo

Con base en los recorridos de campo efectuados para el reconocimiento de fuentes y su localización se elaboró una cartografía que representa únicamente los puntos monitoreados a lo largo de investigación. Este mapa, que se presenta en la Figura 5.1, contiene la ubicación geográfica de los manantiales termales y no termales, pozos y puntos de muestreo en arroyos. En esta Figura 5.1 se observa que los manantiales termales se encuentran cercanos entre sí y con una alineación NW-SE, en concordancia con el sistema de fallas predominante en la zona (Juan Pérez, 1993).

En la Tabla 5.1 se enlistan los puntos muestreados, con su denominación, coordenadas y altitud, así como tipo de manifestación.

Tabla 5.1. Relación de puntos de muestreo

ID	Nombre	Localidad/ municipio	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)	Altitud (msnm)	Tipo
M1	Laguna Verde	Ixtapan de la Sal	428,706	2,085,096	1954	Termal
M2	Ixtamil	Ixtapan de la Sal	429,407	2,081,795	1775	Termal
M3	Balneario Municipal de Tonicato	Tonicato	429,635	2,080,538	1720	Termal
M4	Balneario Municipal de Ixtapan de la Sal	Ixtapan de la Sal	428,852	2,083,667	1886	Termal
M5	Baños del Obispado	Tonicato	429,815	2,080,755	1733	Termal
M6	Olincalli	El Salitre	429,740	2,080,638	1722	Termal
NT1	Agua Amarga I	Ixtapan de la Sal	428,015	2,081,675	1775	No termal
NT2	Agua Amarga II	Ixtapan de la Sal	428,206	2,081,686	1779	No termal
NT3	Ixtamil abastecimiento	Ixtapan de la Sal	429,041	2,081,625	1762	No termal
NT4	El Carrizal	Ixtapan de la Sal	430,010	2,081,263	1741	No termal
P1	Pozo Ixtapan	Tonicato	427,246	2,081,340	1859	Pozo
P2	Rincón de Los Mangos	Tonicato	428,104	2,079,953	1675	Pozo
P3	Salinas	Tonicato	432,796	2,078,084	1644	Pozo
P4	El Zapote	Tonicato	433,857	2,075,225	1615	Pozo
R1	Arroyo El Salado	Ixtapan//Tonicato	427,787	2,081,681	1805	Arroyo
R2	Arroyo El Salitre	Ixtapan//Tonicato	430,015	2,081,331	1751	Arroyo



Simbología

- | | | |
|---|------------------------------|--------------------------|
| ● 1. Laguna Verde | ● 7. El Carrizal | ▲ 13. Salinas |
| ● 2. Balneario Municipal de Ixtapan de la Sal | ● 8. Agua Amarga I | ▲ 14. El Zapote |
| ● 3. Ixtamil | ● 9. Agua Amarga II | ▲ 15. Arroyo El Salitre |
| ● 4. Balneario Municipal de Tonatico | ● 10. Ixtamil Abastecimiento | ▲ 16. Arroyo El Salado |
| ● 5. Baños del Obispado | ▲ 11. Los Mangos | — Corriente Intermitente |
| ● 6. Olincalli | ▲ 12. Pozo Ixtapan | — Corriente Perenne |

Figura 5.1 Localización de los puntos de muestreo en la zona de estudio Ixtapan de la Sal-Tonatico

Dadas las características de cada uno de los puntos de monitoreo, el muestreo se llevó a cabo de la siguiente manera:

- a) *Manantial Laguna Verde*: La toma de muestra se hace en la laguna, justo a uno de los borbollones.
- b) *Balneario Municipal de Ixtapan de la Sal*: El punto de muestreo se encuentra protegido bajo una edificación, y partir de este punto hay instalada una tubería que vierte el agua en las albercas.
- c) *Balneario Municipal de Tonatico*: El muestreo se realizó en la alberca principal, accediendo a la toma de muestra por medio de una tubería plástica.
- d) *Ixtamil*: Se trata de un punto de muestreo que se localiza a la salida de la alberca, encontrándose el manantial en el fondo de la alberca, al cual sólo es posible acceder cuando se vacía dicha alberca.
- e) *El Obispado*: Se muestrea en la propia alberca, ubicándose en el manantial en el fondo de la alberca.
- f) *Ollincali*: Como en el caso anterior, se muestrea en la propia alberca, ubicándose en el manantial en el fondo de la alberca.
- g) *Ixtamil abastecimiento*: El agua es almacenada en una cisterna, en el fondo de la cual se encuentra el manantial, por lo que la muestra de agua proviene de la cisterna.
- h) *El Carrizal*: este manantial se ubica dentro de un tanque de almacenamiento, el cual tiene una salida, en donde se toma la muestra.
- i) *Agua Amarga I y II*: Estos manantiales se han utilizado para el abastecimiento público, por lo que cuentan con tanques de almacenamiento de los cuales mediante un tomamuestras se extrajo el agua.

De igual manera dentro de la zona de estudio se identificaron varios pozos, cuyas características son:

- a) *Pozo Ixtapan*: Este pozo se localiza al borde de la carretera Ixtapan-Coatepec Harinas. Es empleado para consumo privado y en épocas de estiaje provee de agua al sistema de agua potable del municipio de Ixtapan de la Sal.

- b) *Pozo de Salinas*: Es un pozo localizado en la localidad de Salinas, municipio de Tonatico. Sobre su diseño de construcción y profundidad no se tiene datos. Funciona 12 horas al día ya que se destina al abastecimiento urbano con un caudal de 14L/s.
- c) *Pozo el Rincón de los Mangos*: Este pozo se encuentra dentro de la comunidad del Rincón, en el municipio de Tonatico. Parte del caudal de agua de este pozo es destinada al uso agrícola y el restante para abastecimiento público. Funciona 12 horas al día siendo el agua almacenada en tanques de rebombeo y posteriormente, distribuida a la población de esa misma comunidad. El caudal estimado de este pozo es de 14 L/s. No se dispone de más información.
- d) *Pozo Zapote*: Se localiza en el municipio de Tonatico, el agua de este pozo abastece a las comunidades del Zapote, el Terrero y la puerta de Santiago. Generalmente funciona 12 horas al día, sin embargo cuando la bomba de alguno de los pozos del municipio deja de funcionar, este pozo entre en operación las 24 horas del día. El caudal de extracción estimado es de 16 L/s.

De los pozos mencionados no se dispone de columnas litológicas ni datos de parámetros hidráulicos.

5.2 Caracterización hidroquímica

Los resultados del estudio hidroquímico se exponen en varios epígrafes, en los cuales se presentan los resultados obtenidos de los tres muestreos generales realizados, así como los datos de los muestreos de control.

5.2.1 Validación de datos químicos

Como primer paso para el tratamiento de datos, la información sobre la concentración de cationes y aniones arrojada por los análisis de laboratorio fue sometida a un análisis de error de electroneutralidad (o balance iónico), tal y como se comentó en el apartado 4.4.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla. 5.2. Errores de electroneutralidad para las muestras de agua colectadas en las diferentes campañas

ID	Muestra	Mayo 2014			Agosto 2014			Enero 2015		
		Aniones	Cationes	E.N.	Aniones	Cationes	E.N.	Aniones	Cationes	E.N.
		meq/l	meq/l	%	meq/l	meq/l	%	meq/l	meq/l	%
M1	Laguna verde	105.39	89.64	-2.84	89.09	77.99	-1.08	94.08	82.46	-0.85
M2	Ixtamil	99.97	83.54	-4.04	89.91	82.10	1.25	91.75	89.31	4.73
M3	B.M. Tonatico	105.03	85.16	-5.30	88.63	77.86	-1.65	86.40	82.51	3.92
M4	B.M. Ixtapan	101.34	86.45	-2.81	100.56	86.95	-1.31	92.45	83.39	0.78
M5	Obispado	99.15	83.40	-3.44	sm	sm	sm	sm	sm	sm
M6	Olincalli	sm	sm	sm	sm	sm	sm	97.53	93.69	3.58
NT1	Agua amarga I	17.93	14.93	2.04	17.12	15.13	3.69	17.07	14.76	4.78
NT2	Agua amarga II	sm	sm	sm	14.59	12.65	1.19	16.84	14.54	4.66
NT3	Ixtamil Abast.	13.46	11.72	5.35	13.08	11.08	4.88	13.19	10.66	3.54
NT4	El carrizal	16.71	16.82	4.41	17.79	17.35	4.40	17.62	16.68	3.56
P1	Pozo Ixtapan	5.76	3.76	3.53	5.83	3.75	3.36	6.19	3.88	2.28
P2	Los Mangos	sm	sm	Sm	5.40	3.64	4.37	sm	sm	sm
P3	Pozo Salinas	sm	sm	Sm	5.68	3.68	4.64	5.89	3.63	2.07
P4	Pozo Zapote	sm	sm	sm	sm	sm	sm	6.16	3.93	3.83
R1	Arroyo Salado	sm	sm	sm	sm	sm	sm	32.08	28.36	-1.31
R2	Arroyo Salitre	sm	sm	sm	sm	sm	sm	8.16	6.59	4.45

*sm: sin muestra

Estos resultados sirvieron para validar los análisis del laboratorio ya que un error inferior a $\pm 5\%$ es aceptable (Appelo y Postma, 2006), por lo que los análisis de las muestras de agua se consideran como confiables. Los errores máximos se detectaron en el manantial no termal Ixtamil Abastecimiento para el mes de mayo con un error del 5.83%. Hay que tener en cuenta, como indica Gutiérrez y Cirlos (2010), que en algunas ocasiones es posible

obtener errores más grandes debido a la presencia de elementos minoritarios en concentraciones importantes que no hayan sido determinadas.

5.2.2 Características fisicoquímicas generales

Los resultados de las campañas de muestreo general de las fuentes de aguas termales y no termales, así como de pozos y arroyos, se reportan en la Tabla 5.3. En líneas generales, las temperaturas del agua oscilaron desde 22 °C hasta 36 °C, y la conductividad eléctrica (CE) presentó valores comprendidos entre los 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 11,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; observándose, en general, que cuando la temperatura del agua aumenta, ocurre lo mismo con la CE. El valor de pH varió de 5.8 a 7.9, siendo los pozos los que presentaron un pH más elevado ($\text{pH} > 7.0$) y las muestras de agua termal, el pH más bajo ($\text{pH} < 6.7$).

Las aguas termales tienen una temperatura que oscila desde los 27 °C del manantial difuso Laguna Verde hasta los 36 °C que presentan los manantiales de los Balnearios Municipales de Tonicato e Ixtapan. Con lo que respecta al pH, presenta variaciones estacionales ya que el pH en estiaje (mayo) varía de 5.8 a 6.3, mientras que en la temporada de lluvia (agosto) estos valores ascienden ligeramente en un rango de 6.1 a 6.5. En el muestreo de enero, el pH presentó valores similares a la anterior campaña, con un valor de pH que osciló entre 6.2 y 6.6.

Asimismo, hay que notar que a los valores más bajos del pH que presentan en los manantiales termales (Tabla 5.2), corresponden los valores más altos de alcalinidad, lo cual podría sugerir un aumento en el contenido de CO_2 (el cual no se evaluó en este estudio), por efecto de la temperatura y por ser un agua con un prolongado tiempo de residencia y, por lo tanto, con mayor mineralización (Custodio y Llamas, 1983; Marrero, 2010).

Este mismo comportamiento se observó en la CE, pues en el primer muestreo (mayo) los valores oscilan entre 9.5 y 10.2 mS/cm , en el segundo (agosto) de 9.6 a 10.4 mS/cm y en el tercero de 10.1 a 12.9 mS/cm .

El agua de los pozos representan un agua de menor salinidad con CE entre 500 y 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El anión más abundante es el bicarbonato y el catión es el calcio. La temperatura del agua se encuentra en un rango comprendido entre 22 y 23 °C y el pH oscila desde un

valor de 7.3 hasta un valor de 7.5, es decir un pH neutro. Estas características representarían aguas de un flujo local con poco tiempo de residencia y por tanto se podría considerar como de reciente infiltración.

En el caso de los manantiales de agua no termal, la CE oscila de 600 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en temporada de estiaje (mayo) y en temporada de lluvia (agosto) de 1300 a 2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en enero varía entre 1250 y 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se observa que estos manantiales presentan valores de CE mayores en comparación con los pozos y menores en comparación con el agua termal, por lo cual se puede suponer que se está presentando una mezcla entre aguas de reciente infiltración y aguas termales.

5.2.3 Elementos mayoritarios

Los resultados de las determinaciones de los iones mayoritarios presentes en el agua obtenidos a partir de los análisis en los laboratorios analíticos, se detallan en la Tabla 5.3.

Los manantiales termales se caracterizan por altos contenidos de cloruros y bicarbonatos, con valores máximos de 2500 y 1700 mg/L, respectivamente. En el caso de los sulfatos, todas las concentraciones superan los 700 mg/L. En los estudios de Zhang (2008) y Sepúlveda (2004) sobre aguas termales, se ha podido asociar un pH bajo con altas concentraciones de sulfatos disueltos, lo cual también se observa en el presente estudio de caso. Con respecto a los cationes, el catión dominante es el sodio, y a continuación el calcio, con valores superiores a 1300 y 550 mg/L, respectivamente. En menores concentraciones se presenta el potasio, pero siempre con valores superiores a 120 mg/L; y a continuación el magnesio con una concentración máxima que llegan a alcanzar los 97 mg/L.

En las aguas no termales, el anión dominante es el HCO_3^- con concentraciones que oscilan desde 1900 a 600 mg/L, a continuación se presenta el cloruro con valores entre 150 y 300 mg/L y finalmente el SO_4^{2-} con concentraciones que varían de 260 a 80 mg/L. En el caso de los cationes el orden de abundancia es $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$.

En pozos, el anión con mayor abundancia también es el HCO_3^- con valores que oscilan entorno a los 250 mg/L, seguido del SO_4^{2-} (con valores inferiores a 50 mg/L) y finalmente

del cloruro; este último ión con una concentración máxima de 20 mg/L. Los cationes presentan todos ellos valores por debajo de los 75 mg/L, siendo el ión con menor concentración el K^+ seguido del Na^+ .

Así mismo, se observa que en las aguas termales no se reporta la presencia de nitratos (NO_3^-), mientras que en las aguas no termales (pozos y manantiales) si se registran concentraciones de este anión que oscilan desde los 12 mg/L hasta los 43 mg/L. También se aprecia que existen variaciones en los manantiales no termales de acuerdo a la temporada en que se realizó el muestreo ya que los valores más altos de nitratos reportados fueron en la época de lluvia, lo que podría indicar un proceso de lavado de terrenos por lo que existe un sistema local y somero de infiltración con afectación por actividades antrópicas (Sanliyüksel y Baba, 2011; Schäffer y Sass 2014).

Estas fuentes antrópicas de contaminación en la zona de estudio están fundamentalmente relacionadas con las actividades agrícolas, las cuales se basan en el cultivo de maíz que implica el uso de fertilizantes. Adicionalmente, puede haber afectaciones por el vertido e infiltración desde las fosas sépticas que existen en las áreas rurales, lo que representaría una contaminación puntual. Así por ejemplo, Agua Amarga I, Agua Amarga II e Ixtamil Abastecimiento se encuentran en un área agrícola y en el caso del Carrizal, este manantial se localiza dentro de la mancha urbana de Tonatico.

Tabla 5.3. Características físico químicas (parámetros de campo y elementos mayoritarios) en las muestras de agua

ID	NOMBRE	Naturaleza	Temp °C	pH	CE μS/cm	SDT mg/L	Ca ²⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ⁻² mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L
MAYO 2014														
M1	Laguna Verde	Termal	27.8	5.9	9600	4.71	628	146.4	91.4	1499	2349.22	1.36	976.84	1633.50
M2	Ixtamil Termal	Termal	34.4	6.0	9520	4.67	582	134.4	84.0	1398	2219.47	1.36	976.69	1532.66
M3	B.M. Tonatico	Termal	35.0	5.9	9520	4.67	596	137.8	79.8	1429	2358.72	1.36	957.02	1613.58
M4	B.M. Ixtapan	Termal	35.4	6.1	10170	4.99	598	139.5	86.5	1451	2277.48	1.36	939.43	1540.28
M5	Obispado	Termal	34.9	6.3	9680	4.75	581	137.9	81.6	1398	2256.95	1.36	903.44	1460.40
NT1	Agua Amarga I	No Termal	24.2	6.1	1830	0.90	182	25.8	16.1	203	235.50	29.14	136.16	556.15
NT3	Ixtamil Abastecimiento	No Termal	24.0	6.3	1420	0.70	156	26.4	12.9	151	159.80	37.73	101.25	433.22
NT4	Carrizal	No Termal	23.3	7.5	1609	0.79	145	38.4	19.2	256	309.00	56.88	263.69	244.72
P1	Pozo Ixtapan	Pozo	23.3	7.5	609	0.30	78	1.74	23.2	18.5	17.12	18.73	42.80	276.37
AGOSTO 2014														
M1	Laguna Verde	Termal	28.3	6.1	10220	5.01	538	126.7	77.8	1308	1980.00	1.36	735.98	1435.94
M2	Ixtamil Termal	Termal	34.3	6.3	10190	5.00	578	132.0	74.9	1379	2059.63	1.36	702.67	1376.24
M3	B.M. Tonatico	Termal	35.9	6.2	9740	4.77	553	123.6	78.5	1300	1943.01	1.36	916.06	1369.12
M4	B.M. Ixtapan	Termal	35.8	6.2	10380	5.09	610	137.3	82.8	1462	2294.64	1.36	761.52	1413.77
NT1	Agua Amaraga I	No Termal	23.3	6.7	1992	0.98	182	28.3	16.7	208	240.12	24.49	166.22	478.97
NT2	Agua Amarga II	No Termal	22.3	7.2	1616	0.79	119	21.4	17.4	189	227.48	1.63	133.64	395.02
NT3	Ixtamil Abastecimiento	No Termal	24.2	6.8	1363	0.67	151	22.4	13.1	139	151.87	34.85	82.81	4288.91
NT4	Carrizal	No Termal	21.2	7.1	2126	1.04	155	38.6	20.8	260	300.18	43.68	234.80	354.91
P1	Pozo Ixtapan	Pozo	23.6	7.3	590	0.29	77	1.88	23.1	18.8	13.57	16.30	34.84	293.87
P2	Los Mangos	Pozo	23.0	7.3	552	0.27	75	1.10	13.2	27.5	20.31	18.73	15.06	266.36
P3	Pozo Salinas	Pozo	24.7	7.6	609	0.30	71	1.89	22.9	21.0	12.84	55.50	15.37	259.74

Tabla 5.3. Características físico químicas (parámetros de campo y elementos mayoritarios) en las muestras de agua (continuación)

ID	NOMBRE	Naturaleza	Temp °C	pH	CE μS/cm	SDT mg/L	Ca ²⁺ Mg/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ⁻² mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L
ENERO 2015														
M1	Laguna verde	Termal	25.7	6.2	10550	5.17	622	160.3	89.86	1328	2271.19	1.36	904.75	1126.69
M2	Ixtamil	Termal	33.1	6.6	10810	5.30	675	144.60	96.04	1463	2232.26	1.36	814.42	1107.58
M3	Municipal Tonicato	Termal	35.6	6.3	10190	5.00	621	136.6	88.96	1348	2070.64	1.36	739.85	1110.21
M4	B.M. Ixtapan	Termal	34.3	6.2	12930	6.34	646	137.6	97.36	1343	2319.64	1.36	918.39	1533.02
M6	Olincalli	Termal	36.6	6.4	10630	5.21	687	151.0	91.10	1557	2403.98	1.36	887.15	1118.30
NT1	Agua amarga I	No Termal	22.6	6.8	1710	0.84	202	25.55	17.51	192	277.70	28.52	124.87	437.36
NT2	Agua amarga II	No Termal	22.3	6.7	1772	0.87	186	28.60	17.50	188	292.55	30.82	124.92	395.34
NT3	Ixtamil Abastecimiento	No Termal	23.1	6.8	1320	0.65	159	21.09	13.10	125	158.99	33.60	92.44	426.55
NT4	El carrizal	No Termal	20.5	7.2	1723	0.84	148	37.68	20.57	249	301.17	52.61	207.06	352.16
P1	Pozo Ixtapan	Pozo	21.0	7.0	528	0.26	78	2.025	25.70	19	15.45	18.02	37.17	309.41
P3	Pozo Salinas	Pozo	21.8	7.3	476	0.23	70	1.627	22.77	21	12.60	54.55	16.05	272.88
P4	Pozo Zapote	Pozo	26.2	7.3	470	0.23	80	1.401	26.261	18	13.11	83.26	21.97	246.75
R1	Arroyo Salado	Superficial	17.7	7.1	388	1.90	208	68.98	40.14	438	741.97	1.36	391.18	401.35
R2	Arroyo Salitre	Superficial	17.5	7.8	886	0.43	105	10.41	14.57	69	79.71	7.04	75.53	289.92

5.2.3. Elementos minoritarios: As, B, Ba, Li, Si y Sr

Entre los elementos minoritarios presentes en cantidades elevadas cabe destacar por sus altas concentraciones, así como su papel en la hidroquímica de estas aguas (Custodio y Llamas, 1983) los iones As, B, Li, Si y Sr (Tabla 5.4). Las altas concentraciones de As han sido reportadas en distintos reservorios geotermales de México como es el caso de los Azufres con 8 mg/L, los Humeros con concentraciones que varían desde 49.6 mg/L hasta 73.6 mg/L (Birkle, et al., 2000; Birkle et al., 2010). En el caso de los manantiales termales objeto de este estudio las concentraciones de As oscilan 0.30 mg/L y 1.97 mg/L, así mismo, se observa que los manantiales no termales presentan concentraciones de As que varían desde 0.36 mg/L hasta 0.21 mg/L y las muestras procedentes de los arroyos registran valores comprendidos entre 0.38 y 0.06 mg/L. En los pozos, los valores que se reportan se encuentran por debajo del límite de detección. Estos valores de As permiten una clara diferenciación entre los diversos tipos de muestras del agua.

La concentración de B presenta mayores valores en los muestreos de mayo de 2014 y enero de 2015 con concentraciones máximas de 23.6 mg/L para el caso de los manantiales termales y de 3.7 mg/L en manantiales no termales; mientras que los valores más bajos reportados son en el muestreo del mes de agosto 2014, ya que en los manantiales termales se registra una máxima concentración de 22 mg/L y en los manantiales no termales valores de 3.3 mg/L. En los arroyos las concentraciones de B oscilan entre 1.19 y 5.24 mg/L y en los pozos la concentración de este elemento siempre está por debajo del límite de detección de 0.01 mg/L. Estas concentraciones tan elevadas de boro en las aguas termales se reportan también en otras áreas geotermales en México, así por ejemplo en el área geotermal del Volcán el Chinchón las concentraciones de B oscilan entre 1 y 13 mg/L con concentraciones de Cl^- que varían desde 1500 a 2000 mg/L (Taran y Peiffer, 2009); mientras que en el área de Jungapeo, Michoacán, el B se presenta en concentraciones que oscilan entre 20 y 30 mg/L de B en muestras con valores de Cl^- entre 500 y 700 mg/L (Siebe et al., 2007).

Tabla 5.4. Contenido de iones minoritarios en las muestras de agua

ID	Nombre	As mg/L	B mg/L	Ba mg/L	Li mg/L	Si mg/L	Sr mg/L
MAYO 2014 (ESTIAJE)							
M1	Laguna Verde	1.48	23.33	0.042	7.28	12.13	5.72
M2	Ixtamil	0.48	22.18	0.039	7.67	12.10	5.83
M3	B.M. Tonatico	1.97	22.34	0.041	7.58	12.14	5.81
M4	B.M. Ixtapan	1.67	22.08	0.039	7.42	11.53	5.70
M5	Obispado	0.55	22.87	0.040	7.08	12.44	5.31
NT1	Agua Amarga I	0.23	3.12	0.043	1.37	10.98	1.17
NT3	Ixtamil Abastecimiento	0.29	2.06	0.054	1.06	9.85	1.01
NT4	El Carrizal	0.31	3.50	0.046	1.73	11.37	1.27
P1	Pozo Ixtapan	0.01	0.04	0.010	0.04	10.21	0.24
AGOSTO 2014 (LLUVIAS)							
M1	Laguna Verde	0.45	21.75	0.037	7.20	11.86	5.32
M2	Ixtamil	0.49	20.65	0.039	7.23	11.36	5.51
M3	B.M. Tonatico	1.72	19.69	0.037	6.48	10.59	4.80
M4	B.M.Ixtapan	1.90	22.09	0.040	6.98	11.41	5.45
NT1	Agua Amarga I	0.24	3.26	0.041	1.42	10.57	1.16
NT1	Agua Amarga I	0.25	3.30	0.041	1.41	10.60	1.17
NT2	Agua Amarga II	0.23	3.01	0.083	1.10	13.15	0.67
NT3	Ixtamil Abastecimiento	0.34	2.01	0.053	0.98	9.97	0.98
NT4	El Carrizal	0.29	3.76	0.041	1.90	10.81	1.48
P1	Pozo Ixtapan	0.01	0.04	0.010	0.04	9.60	0.24
P2	Los Mangos	0.01	0.02	0.029	0.01	12.65	0.19
P3	Pozo Salinas	0.01	0.01	0.090	0.01	15.01	0.42
ENERO 2015 (INTERMEDIO)							
M1	Laguna verde	0.30	22.80	0.032	8.06	12.53	6.35
M2	Ixtamil	0.64	23.15	0.032	6.90	12.47	5.32
M3	Municipal Tonatico	1.66	22.56	0.032	7.07	12.10	5.42
M4	Municipal de Ixtapan	1.53	23.58	0.030	7.68	12.34	5.91
M6	Olincalli	1.74	23.21	0.032	6.93	12.76	5.57
NT1	Agua amarga I	0.22	3.36	0.031	1.87	12.41	0.90
NT2	Agua amarga II	0.21	3.36	0.030	1.60	11.00	0.84
NT3	Ixtamil Abastecimiento	0.30	2.23	0.046	1.04	10.66	0.71
NT4	El Carrizal	0.29	3.77	0.028	2.05	11.85	0.90
P1	Pozo Ixtapan	<0.0123	0.05	0.004	0.03	12.34	0.21
P3	Pozo Salinas	<0.0123	0.04	0.076	0.03	15.94	0.33
P4	Pozo Zapote	<0.0123	0.13	0.017	0.08	13.58	0.20
R1	Arroyo Salado	0.38	5.24	0.070	4.22	12.17	0.78
R2	Arroyo Salitre	0.06	1.19	0.064	0.59	10.01	0.42

El Litio se detecta en altas concentraciones tanto en aguas termales como en las no termales, mientras que en los pozos no se detecta. La concentración de litio del agua termal oscila dentro de un intervalo comprendido entre 6.48 mg/L (valor reportado en el muestreo de agosto de 2014) y 8.1 mg/L (reporte del muestreo de enero de 2015); en los manantiales no termales los valores varían desde 0.98 mg/L (agosto 2014) hasta 2.05 mg/L (enero 2015), para los pozos las concentraciones oscilan entre 0.01 a 0.08 mg/L y en los arroyos se reportaron valores comprendidos entre 0.56 y 4.22 mg/L.

El Ba, Si y Sr se han podido cuantificar tanto en los manantiales termales, como en los no termales y en pozos. Estos iones presentan los valores más bajos en el muestreo de agosto de 2014 y los más elevados en el muestreo de mayo de 2014 y enero de 2015. Para el Sr, el valor más alto reportado fue de 6.35 mg/L en el manantial Laguna Verde para el mes de enero y el valor más bajo de 4.8 mg/L en el manantial del B. M. Tonicico para el muestreo de agosto. Para el caso del Si, los valores oscilaron entre 9.6 mg/L y 13.05 mg/L, y no existen diferencias significativas entre los manantiales termales, no termales y pozos. El Bario se encuentra en menor cantidad en los pozos con concentraciones mínimas de 0.004 mg/L y máximas de 0.09 mg/L, seguido por el agua de los arroyos (0.07 a 0.64 mg/L), y a continuación el agua de los manantiales no termales (0.030 a 0.083 mg/L).

Al igual que se observa en los iones mayoritarios, existe una variación en las concentraciones de los iones minoritarios que permite diferenciar cada tipo de agua.

5.2.4. Representaciones graficas de las características químicas

a) Diagrama de Piper

Los resultados hidroquímicos de las muestras de agua (Tabla 5.2), fueron graficados en diagramas que representan las relaciones entre cationes y aniones como es el caso del diagrama de Piper. El diagrama de Piper es útil para clasificar los tipos de agua en familias o facies y realizar comparaciones entre las muestras (Custodio y Llamas, 1983; Appelo y Postma, 2006).

En la Figura 5.2 se presentan los diagramas de Piper correspondientes a todos los muestreos, así como el diagrama que engloba todos los datos químicos de todos los muestreos. Se puede apreciar que los cuatro tipos de muestras (agua termal, no termal, muestras de pozos y arroyos) corresponden a diferentes familias hidroquímicas, lo que indica diversos orígenes y procesos de interacción agua-roca.

Las familias identificadas son las siguientes:

- i) Ca-Mg-HCO₃, familia a la que pertenece las muestras del pozo Ixtapan en los tres muestreos (P1), al pozo de Salinas (P3). en el mes de agosto y enero y el pozo El Zapote (P4) en el mes de enero.
- ii) Ca-Na-Cl-HCO₃, a este tipo de agua pertenece la muestra de los manantiales Agua Amarga I y II (NT1 y NT2), del mes de enero.
- iii) Ca-Na-HCO₃-Cl, esta familia está integrada por los manantiales no termales: Agua Amarga I (NT1) de los meses de mayo y agosto, así como del Ixtamil Abastecimiento (NT3) y Arroyo el Salitre (R2).
- iv) Na-Ca-Cl, que corresponde a las muestras de los manantiales termales (M1, M2, M3, M6) para el mes de enero.
- v) Na-Ca-Cl-HCO₃, familia conformada por las muestras de los manantiales termales M1, M2, M3 de los meses de mayo y agosto, así como del manantial termal M4 durante los tres muestreos realizados. También se incluye el manantial M5 (Baños del Obispado) en el mes de mayo, cabe señalar que fue el único muestreo que se realizó en ese manantial.
- vi) Ca-Na-HCO₃-Cl-SO₄, que corresponde a dos muestras, una es la del Arroyo el Salitre (R2) y una segunda muestra es el agua del manantial Ixtamil Abastecimiento (NT3).
- vii) Na-Ca-Cl-HCO₃-SO₄, las muestras de esta familia sódica son las del manantial no termal El Carrizal (NT4).
- viii) Na-Ca-Cl-SO₄, este grupo está representado por el agua del manantial El Carrizal (NT4) en el mes de mayo y por la muestra del Arroyo el Salado (R1).
- ix) Na-Ca-HCO₃-Cl, familia a la cual pertenece el manantial no termal agua Amarga II (NT2) en el muestreo del mes de agosto

Observando el diagrama de Piper se aprecia claramente en todos los casos (Figura 5.2) que el agua no termal tiene una composición intermedia entre el agua termal y el agua de pozos, siendo estos tipos de agua (termal y la del pozo) los miembros extremos, cuya mezcla dará lugar a las características químicas del agua no termal. Un proceso similar se ha podido comprobar en el caso de los Archipiélagos de los Azores, donde los miembros extremos son el agua termal y el agua de mar (Freire et al., 2015) o bien el estudio llevado a cabo en los Pirineos (Asta et al., 2012) en donde los miembros extremos son el agua termal de manantial Tiberio y el agua no termal de la surgencia de un lago.

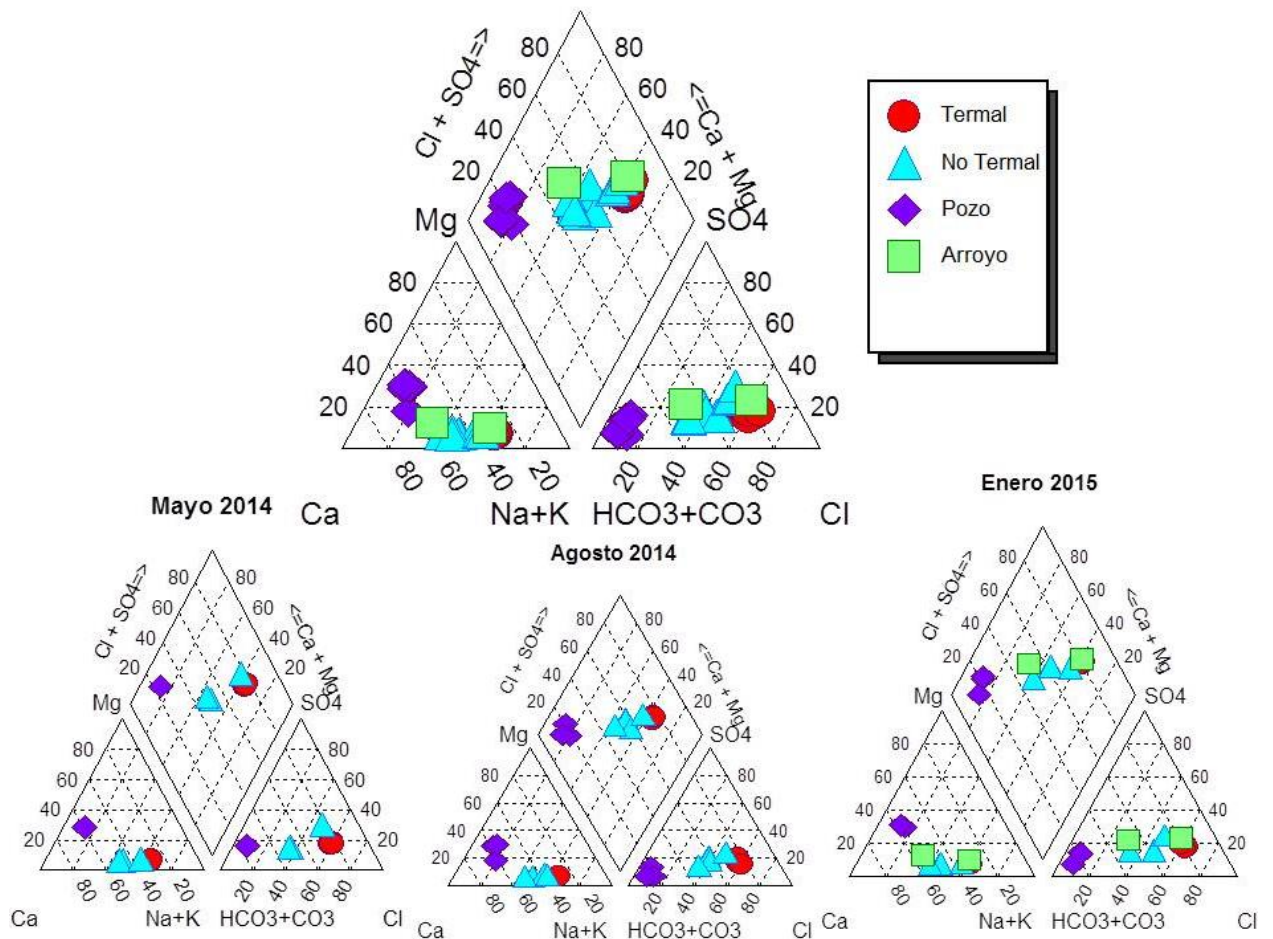


Figura 5.2. Diagramas de Piper global (con todos los datos de todas las campañas), y los correspondientes a los muestreos de mayo y agosto de 2014 y enero de 2015

En resumen (Tabla 5.5), las muestras de los pozos se encuentra claramente identificadas en el diagrama de Piper en la región bicarbonatada cálcica y los manantiales termales tienen una tendencia a la familia clorurada sódica, mientras que los manantiales no termales tienen características de una familia mixta. Cabe destacar que el agua de la muestra del arroyo El Salitre, presenta mayor afinidad con las aguas termales en el mes de enero de 2015.

Tabla 5.5. Facies hidroquímicas correspondientes a los manantiales, pozos y agua superficial para las diferentes campañas de muestreo

FACIES	MAYO 2014	AGOSTO 2014	ENERO 2015
Ca-Mg-HCO ₃	P1	P1 P3	P1 P3 P4
Ca-Na-Cl-HCO ₃			NT1 NT2
Ca-Na-HCO ₃		P2	
Ca-Na-HCO ₃ -Cl	NT1 T3	NT1 NT3	NT3 R2
Na-Ca-Cl			M1 M2 M3 M6
Na-Ca-Cl-HCO ₃	M1 M2 M3 M4 M5	M1 M2 M3 M4	M4
Na-Ca-Cl-HCO ₃ -SO ₄		NT4	NT4
Na-Ca-Cl-SO ₄	NT4		R1
Na-Ca-HCO ₃ -Cl		NT2	

b) Diagrama de Schoeller-Berkaloff

Los diagramas de Schoeller-Berkaloff (Figura 5.3) confirman la clasificación de agua señalada con el diagrama de Piper y las variaciones que existen entre las diferentes aguas.

En el diagrama se observan las diferencias que existen entre el agua termal y no termal, así como las altas concentraciones del ion cloruro y sodio en las aguas termales. Con este diagrama se comprueba también lo señalado en el diagrama de Piper sobre el hecho de que el agua no termal tiene una composición intermedia.

También destaca la diferencia que existe entre el agua de los arroyos El Salado y El Salitre; ya que el arroyo El Salitre tiene características similares al agua termal, mientras que el arroyo El Salado tiene similitud tanto con el agua no termal y como con el agua de pozo.

Con base en lo discutido en los anteriores apartados, se puede definir 4 tipos de agua; que representaría los patrones hidroquímicos, con las siguientes características:

Patrón 1: Agua termal

- Temperatura que oscila de los 27 °C a 37 °C.
- Agua clorurada sódica, con variación altos contenidos de SO_4^{-2} .
- Conductividad eléctrica entre 10400 y 9500 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Concentraciones de Cl^- entre 2500 y 2000 mg/L
- Presencia de As con concentraciones que varían de 0.3 mg/L a 1.90 mg/L, de Boro entre 19 y 24 mg/L y Li entre 6.48 mg/L y 8.1 mg/L

Patrón 2: Agua no termal

- Temperatura que varía de los 21 °C a 24 °C.
- Agua bicarbonatada-clorurada, así como cálcico-sódica
- Conductividad eléctrica entre 2000 y 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Concentraciones de Cl^- entre 300 y 200 mg/L

- Presencia de As en concentraciones que oscilan desde 0.3 mg/L hasta 0.2 mg/L de B con valores entorno a 3.0 mg/L y Li con concentraciones que varían alrededor de 2.0 mg/L.

Patrón 3: Agua de pozo

- Temperatura que oscila desde 21 °C a 24 °C.
- Agua bicarbonatada cálcico-magnésica
- Conductividad eléctrica entre 600 y 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Concentraciones de Cl^- inferiores a los 50 mg/L
- Presencia de As, B y Li en concentraciones por debajo del límite de detección.

Patrón 4: Agua superficial

- Temperatura que oscila en torno a los 17 °C
- Agua bicarbonatada clorurada sódico cálcica,
- Conductividad eléctrica entre 3800 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Concentraciones de Cl^- entre 100 y 200 mg/L
- Presencia de As en concentraciones que varían desde 0.38 a 0.06 mg/L, de B que oscilan entre 1.19 y 5.24 mg/L y de Li con valores comprendidos entre 0.56 y 4.22 mg/L.

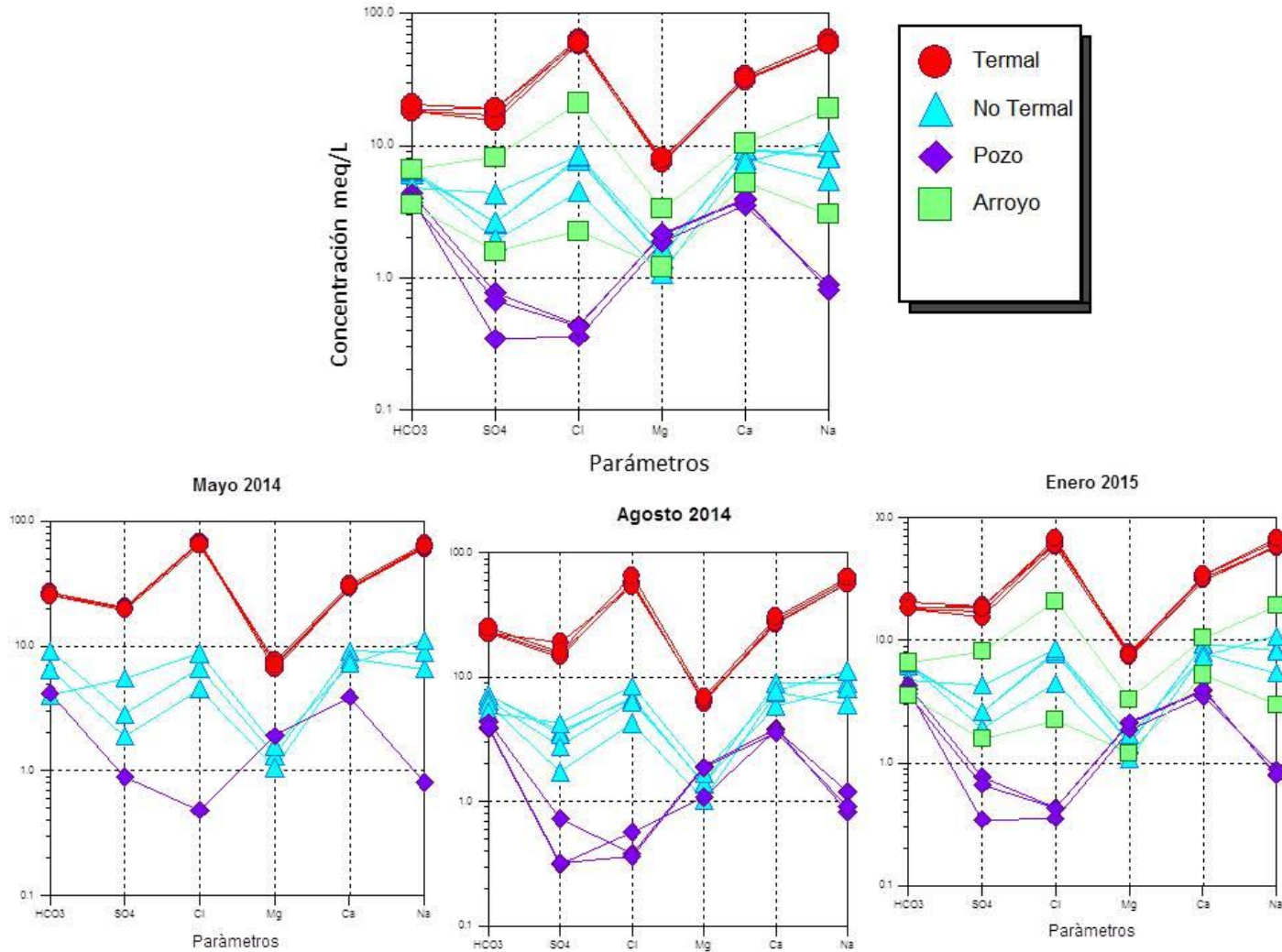


Figura 5.3. Diagramas de Schoeller Berkloff (con todos los datos de todas las campañas), y los correspondientes a los muestreos de mayo y agosto 2014 y enero 2015

5.2.5. Relaciones entre las características físico-químicas

Con el fin de conocer cómo se relacionan los parámetros determinados en campo y en laboratorio, se recurrió al cálculo de la matriz de correlación (Tablas 5.6, 5.7 y 5.8), en donde los elementos considerados son:

- a) Parámetros de campo: pH, conductividad eléctrica y temperatura del agua.
- b) Elementos mayoritarios: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-
- c) Elementos minoritarios: As, B, Ba, Li, Si, Sr.

Para analizar esta matriz se consideró que una correlación elevada era aquella con un $r = \pm 0.75$, una correlación moderada para $\pm 0.75 > r > \pm 0.5$, y una baja correlación para $r < \pm 0.5$. Si la correlación es positiva indica que ambos parámetros tiene un comportamiento similar, mientras que si es negativo se relaciona con un comportamiento opuesto, de forma que si el valor de uno aumenta el otro disminuye.

El estudio de estas correlaciones daría indicios sobre el origen similar o diferente de los iones ya que por ejemplo Zhang (2008), con base en la matriz de correlación deduce que el As y Sb de las aguas termales están controlados por el mismo proceso geoquímico que controla la presencia de Cl^- , SiO_2 , Na^+ y F^- , ya que existe una correlación positiva entre ellos, mientras que cuando hay una correlación negativa, que en este caso fue entre As y Sb con SO_4^{2-} , Mn y Fe, se puede sugerir un proceso diferente para estos últimos iones.

A grandes rasgos, se comprueba que existe una elevada correlación entre la mayoría de los elementos mayoritarios, a excepción del NO_3^- , ya que su correlación fue negativa e inferior a 0.6 para todos los parámetros, lo cual es indicativo de su origen antrópico. Así, existe una correlación elevada ($r > 0.9$) entre:

- Conductividad eléctrica y los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}
- El ión Ca^{2+} con Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-}
- El ión Mg^{2+} con Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}
- El ión Na^+ con K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}
- El K^+ con Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}
- El ión Cl^- con HCO_3^- , SO_4^{2-}

Estas correlaciones positivas indican que estos iones tienen un origen común y los procesos geoquímicos que dan lugar a su presencia son los mismos.

Una primera aproximación sobre el origen de estos iones estaría basada en el hecho de que al flujo regional del agua se podría incorporar una gran cantidad de sales por efecto de la alta temperatura y presión al circular el agua cerca de un foco de calor (una cámara magmática) y al mezclarse con algún fluido geotermal. Por ejemplo, si estas aguas termales circulan por formaciones de calizas se enriquecerían con bicarbonato, calcio y magnesio. Otro aporte externo serían las sales alcalinas (NaCl, KCl, LiCl, NaBr, NaF, etc) que procederían de la volatilización y descomposición de haluros por efecto de la elevada temperatura y presión, los cuales estarían presentes en el fluido geotermal (Custodio y Llamas 1986). La incorporación de estas sales alcalinas implica que exista una alta correlación entre Cl y Li o Cl y B, por ejemplo. Este es el caso que se presenta en el área termal de Tengchong, China, en donde se comprobó la correlación positiva entre Cl, B, Li, Rb y Cs, que indicaría la existencia de un fluido geotermal que daría origen a todos estos elementos, los cuales son conservativos durante el procesos de enfriamiento y mezcla (Guo y Wang, 2012).

Cuando se estudia la correlación con los iones minoritarios, es posible comprobar como:

- La CE y los iones B, Li y Sr presentan valores de $r = 0.99$, mientras que con el As es de 0.78, no existiendo correlación con el Ba y Si.
- El As presentó una correlación elevada con un $r > 0.75$ con todos los iones mayoritarios, en especial con Ca^{2+} y Na^+ ($r = 0.8$), y con los elementos minoritarios una correlación negativa moderada con B, Li y Sr (r entre -0.67 y -0.63).
- El B con todos los iones mayoritarios presentó una correlación elevada con un $r > 0.75$, al igual que el Sr y el Li. También se estimó una correlación elevada entre el B y Li, así como con el Sr.
- El Ba y Si presentaron muy baja o nula correlación con los demás elementos analizados.

Tabla.5.6. Matriz con los coeficientes de correlación para las muestras de agua termal, no termal, superficial y de pozo

	Temp	pH	Cond	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	As	B	Ba	Li	Si	Sr
Temp	1	-0.73	0.87	0.88	0.86	0.88	0.83	0.87	0.87	0.84	-0.53	0.80	0.87	-0.21	0.82	0.01	0.87
pH		1	-0.79	-0.81	-0.73	-0.80	-0.80	-0.79	-0.86	-0.79	0.55	-0.68	-0.79	0.19	-0.80	0.11	-0.82
Cond			1	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.95	0.98	-0.72	0.78	0.99	-0.15	0.99	0.09	0.99
Ca				1	0.97	0.99	0.99	0.99	0.95	0.98	-0.71	0.80	1.00	-0.17	0.98	0.07	0.99
Mg					1	0.98	0.97	0.98	0.93	0.97	-0.70	0.77	0.98	-0.19	0.96	0.18	0.97
Na						1	0.99	0.99	0.97	0.99	-0.71	0.80	1.00	-0.14	0.99	0.09	0.99
K							1	0.99	0.94	0.99	-0.71	0.78	0.99	-0.13	0.99	0.08	0.99
Cl								1	0.97	0.99	-0.72	0.79	1.00	-0.14	0.99	0.11	0.99
HCO ₃									1	0.96	-0.70	0.79	0.96	-0.13	0.95	0.05	0.96
SO ₄										1	-0.71	0.79	0.98	-0.13	0.99	0.08	0.98
NO ₃											1	-0.55	-0.73	0.10	-0.72	0.16	-0.69
As												1	0.78	-0.09	0.77	-0.01	0.77
B													1	-0.18	0.99	0.12	0.99
Ba														1	-0.12	0.34	-0.15
Li															1	0.07	0.98
Si																1	0.08
Sr																	1

Tabla 5.7. Matriz con los coeficientes de correlación para las muestras del mes de mayo de 2014 en agua termal, no termal y de pozo

		<i>Temp</i>	<i>pH</i>	<i>Cond</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Cl</i>	<i>HCO₃</i>	<i>SO₄</i>	<i>NO₃</i>	<i>As</i>	<i>B</i>	<i>Ba</i>	<i>Li</i>	<i>Si</i>	<i>Sr</i>	
Temp	°C	1	-0.62	0.92	0.89	0.88	0.90	0.89	0.91	0.89	0.89	-0.81	0.65	0.90	0.08	0.91	0.74	0.91	
pH			1	-0.70	-0.74	-0.63	-0.69	-0.69	-0.69	-0.77	-0.65	0.65	-0.60	-0.69	-0.48	-0.70	-0.46	-0.71	
Cond	uS/cm			1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	-0.85	0.75	0.99	0.14	0.99	0.84	0.99	
Ca	meq/L				1	0.98	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	-0.85	0.77	0.99	0.18	0.99	0.84	0.99	
Mg	meq/L					1	0.99	0.98	0.99	0.98	0.98	-0.88	0.74	0.99	0.02	0.98	0.83	0.98	
Na	meq/L						1	0.99	0.99	0.99	0.99	-0.84	0.77	0.99	0.16	0.99	0.86	0.99	
K	meq/L							1	0.99	0.98	0.99	-0.80	0.76	0.99	0.22	0.99	0.86	0.99	
Cl	meq/L								1	0.99	0.99	-0.85	0.74	0.99	0.13	0.99	0.86	0.99	
HCO₃	meq/L									1	0.98	-0.88	0.77	0.99	0.14	0.98	0.82	0.99	
SO₄	meq/L										1	-0.81	0.75	0.99	0.15	0.99	0.88	1.00	
NO₃	meq/L											1	-0.60	-0.84	0.26	-0.82	-0.60	-0.83	
As	meq/L												1	0.75	0.20	0.76	0.55	0.77	
B	meq/L													1	0.15	0.99	0.86	0.99	
Ba	meq/L														1	0.19	0.15	0.18	
Li	meq/L															1	0.86	0.99	
Si	meq/L																1	0.85	
Sr	meq/L																		1

Tabla 5.8. Matriz con los coeficientes de correlación para las muestras del mes de agosto 2014 en agua termal, no termal y de pozo

		Temp	pH	Cond	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	As	B	Ba	Li	Si	Sr	
Temp	°C	1	-0.73	0.89	0.91	0.92	0.91	0.88	0.92	0.91	0.87	-0.55	0.78	0.88	-0.13	0.865	-0.04	0.89	
pH			1.00	-0.90	-0.92	-0.83	-0.90	-0.91	-0.89	-0.91	-0.92	0.63	-0.67	-0.90	0.33	-0.916	0.38	-0.91	
Cond	uS/cm			1.00	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	-0.64	0.72	1.00	-0.18	0.996	-0.12	0.99	
Ca	meq/L				1.00	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	-0.63	0.76	0.99	-0.20	0.992	-0.16	0.99	
Mg	meq/L					1.00	0.98	0.97	0.99	0.98	0.97	-0.60	0.72	0.98	-0.18	0.965	-0.07	0.98	
Na	meq/L						1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	-0.64	0.75	0.99	-0.17	0.994	-0.12	0.99	
K	meq/L							1.00	0.99	0.99	0.99	-0.62	0.74	0.99	-0.18	0.998	-0.16	0.99	
Cl	meq/L								1.00	0.99	0.99	-0.64	0.77	0.99	-0.18	0.989	-0.11	0.99	
HCO ₃	meq/L									1.00	0.99	-0.67	0.75	0.99	-0.18	0.986	-0.12	0.99	
SO ₄	meq/L										1.00	-0.63	0.74	0.99	-0.19	0.998	-0.16	0.99	
NO ₃	meq/L											1.00	-0.46	-0.67	0.32	-0.623	0.27	-0.59	
As	meq/L												1.00	0.71	-0.09	0.702	-0.15	0.72	
B	meq/L													1.00	-0.26	0.996	-0.06	0.99	
Ba	meq/L														1.00	-0.18	0.83	-0.18	
Li	meq/L															1	-0.15	0.99	
Si	meq/L																1	-0.14	
Sr	meq/L																		1

Tabla 5.9. Matriz con los coeficientes de correlación para las muestras del mes de enero 2015 de agua termal, no termal, superficial y de pozo

	Temp	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	As	B	Ba	Li	Si	Sr		
Temp	°C	1	0.29	0.25	0.29	0.33	0.27	-0.99	-0.84	0.24	-0.56	-0.97	0.85	0.20	-0.32	-0.74	-0.76	-0.80	
pH			1	-0.24	0.84	0.39	0.99	-0.16	0.24	-0.39	-0.42	-0.46	-0.25	0.09	0.38	-0.79	0.19	-0.75	
Cond	uS/cm			1	0.30	0.79	-0.15	-0.35	-0.18	0.99	0.67	-0.31	0.35	0.93	-0.98	0.30	0.11	0.22	
Ca	meq/L				1	0.82	0.90	-0.21	0.28	0.13	0.05	-0.50	-0.19	0.61	-0.13	-0.52	0.39	-0.51	
Mg	meq/L					1	0.49	-0.34	0.07	0.68	0.44	-0.50	0.08	0.95	-0.67	-0.15	0.31	-0.19	
Na	meq/L						1	-0.14	0.28	-0.30	-0.32	-0.46	-0.27	0.20	0.30	-0.74	0.26	-0.70	
K	meq/L							1	0.88	-0.36	0.46	0.95	-0.91	-0.25	0.44	0.62	0.78	0.70	
Cl	meq/L								1	-0.27	0.49	0.69	-0.99	0.06	0.35	0.37	0.96	0.45	
HCO ₃	meq/L									1	0.66	-0.27	0.43	0.85	-0.997	0.37	0.01	0.29	
SO ₄	meq/L										1	0.48	-0.37	0.65	-0.59	0.82	0.68	0.80	
NO ₃	meq/L											1	-0.73	-0.33	0.33	0.78	0.60	0.84	
As	meq/L												1	0.11	-0.50	-0.33	-0.90	-0.41	
B	meq/L													1	-0.84	0.14	0.34	0.09	
Ba	meq/L														1	-0.31	0.07	-0.23	
Li	meq/L															1	0.45	0.99	
Si	meq/L																1	0.50	
Sr	meq/L																		1

Se observa que los parámetros de campo de pH y temperatura presentaron correlaciones opuestas, de modo que el pH presenta una correlación negativa con el resto de parámetros mientras que la temperatura tiene valores de r positivos y superiores a 0.7 con el resto de parámetros (pero se obtiene valores bajos de r para el Ba, Si y nitratos).

Como resumen se puede señalar que la CE está relacionada con todos los iones analizados, e incluso con los elementos minoritarios a excepción del Ba y Si, y lo mismo se puede señalar con respecto a la temperatura. Por lo tanto a mayor temperatura mayor conductividad eléctrica y mayor salinidad de las aguas. También hay que destacar como los iones Cl^- y HCO_3^- , están estrechamente correlacionados con los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , lo cual también está reflejado en las facies hidroquímicas que se definieron en el diagrama de Piper. Entre los iones minoritarios hay que señalar la correlación positiva del As con B, Sr y Li, así como B con Li y Sr.

Para un estudio más detallado de estas correlaciones se representó gráficamente las que se consideran que pueden explicar las diferencias hidroquímicas entre los diferentes tipos de agua. En las Figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 se observan los gráficos de aquellos parámetros más representativos y con una correlación elevada, es decir $r > 0.95$

En la figura 5.4 donde se relaciona CE y Cl^- se puede apreciar los tres patrones hidroquímicos que se han podido identificar, correspondientes al agua termal, no termal y pozos. En el caso de las muestras de los arroyos se apreció que el mayor contenido de sales corresponde al arroyo El Salitre (el punto que lo representa está más próximo a los puntos del agua termal) en comparación con el arroyo El Salado, lo cual sería consecuencia de que este punto de muestreo del arroyo El Salitre representa la salida de la cuenca donde se localizan todos los manantiales termales, cuya agua son vertidas a los arroyos que discurren por la región, por lo tanto se podría considerar como un punto donde se suman todos los excedentes de los manantiales termales.

Semejante distribución de las muestras se observa en la gráfica Cl^- vs Na^+ (Figura 5.5). Esta diferenciación de facies de aguas en zonas donde coexisten aguas termales y no termales se ha podido comprobar con estos mismos diagramas por Guo y Wang (2012), Rafighdoust et al. (2015), Oyuntsetseg et al. (2015) y Freire (2015).

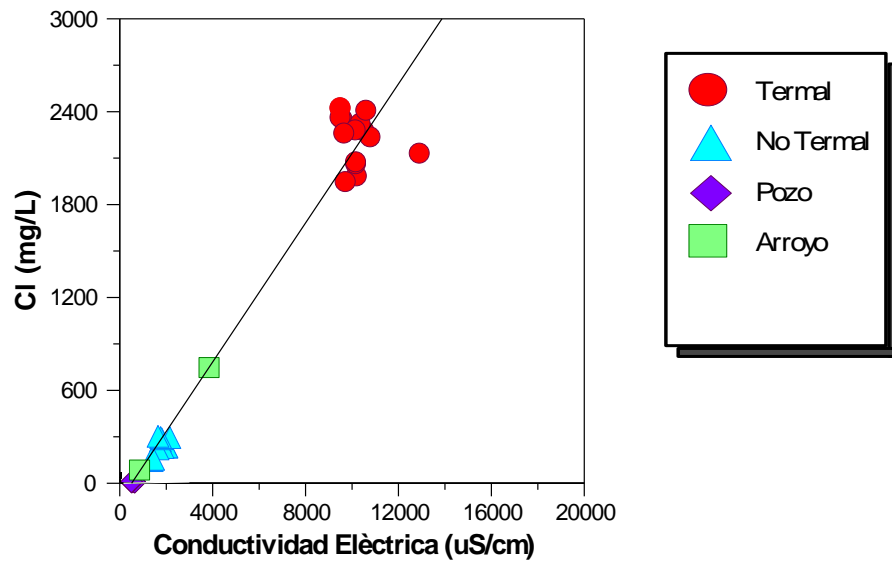


Figura 5.4 Relación CE/Cl para las muestras estudiadas

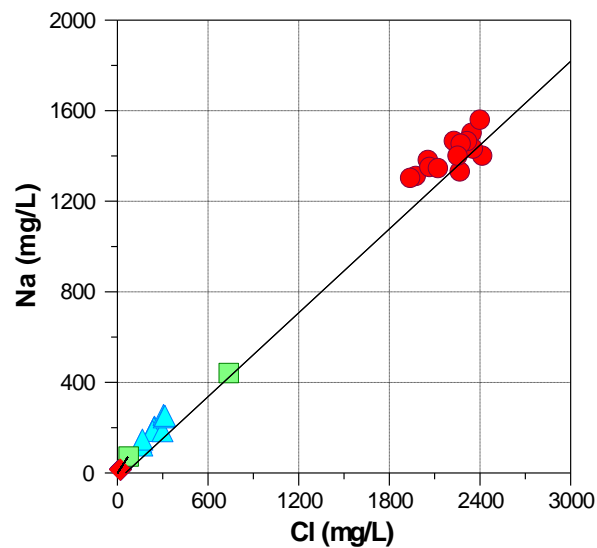


Figura 5.5 Relación Cl/Na para las muestras estudiadas

Con respecto a la relación entre HCO_3^- y CE también se aprecia su elevada correlación (Figura 5.6), así como la diferenciación de las facies identificadas. Con respecto a la relación HCO_3^- y Ca^{2+} hay que resaltar su alta correlación en la gráfica de la Figura 5.7, aunque en esta gráfica no se aprecian claramente la diferenciación entre manantiales no

termales, pozos y arroyos, lo que indicaría la similitud química en cuanto a estos iones. Teniendo en cuenta la geología del área, (aluvial y travertinos), la presencia de estos iones en el agua de pozos estaría relacionada con la disolución de estos materiales. En el caso del agua termal, podría estar vinculado por el hecho de que el flujo del agua circulase en profundidad por las calizas como también lo propone Juan-Pérez (1994).

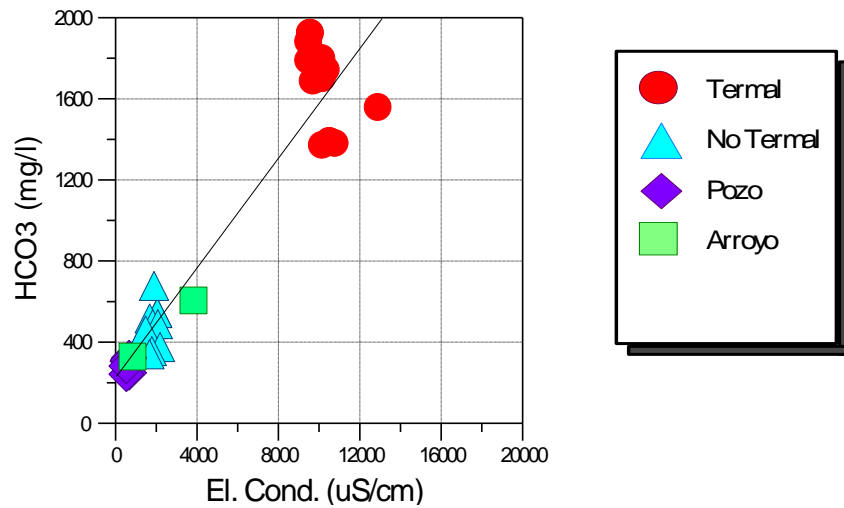


Figura 5.6 Relación CE/HCO₃⁻ para las muestras estudiadas

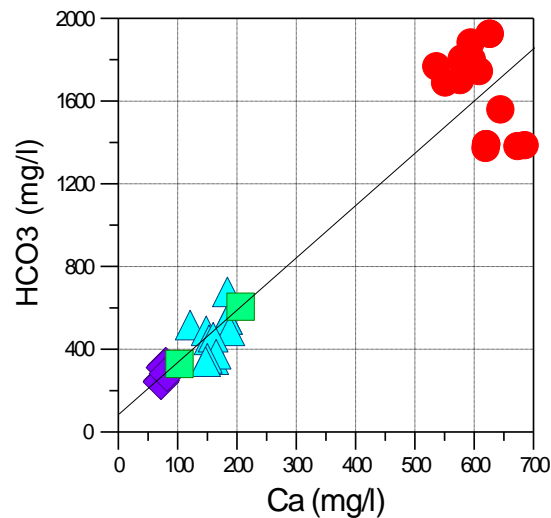


Figura 5.7 Relación Ca/HCO₃⁻ para las muestras estudiadas

Como se reportó en la matriz de correlación, los elementos como el Boro, Litio y Estroncio están estrechamente correlacionadas con el cloruro, lo que indica que todos estos elementos están controlados por un mismo proceso de interacción agua-roca. En la Figura 5.8 se presenta gráficamente esta relación; lo cual es similar a la obtenida por otros autores como Millot et al. (2012) que también señala la existencia de una correlación positiva entre B y Li con el Na^+ en una zona termal de Nueva Zelanda. Relaciones similares entre Cl^- y B, Cl^- y Li, también se reportaron en áreas termales de Tenchong, China, por Guo y Wang (2012) y en Jungapeo, Michoacán por Siebe et al. (2007).

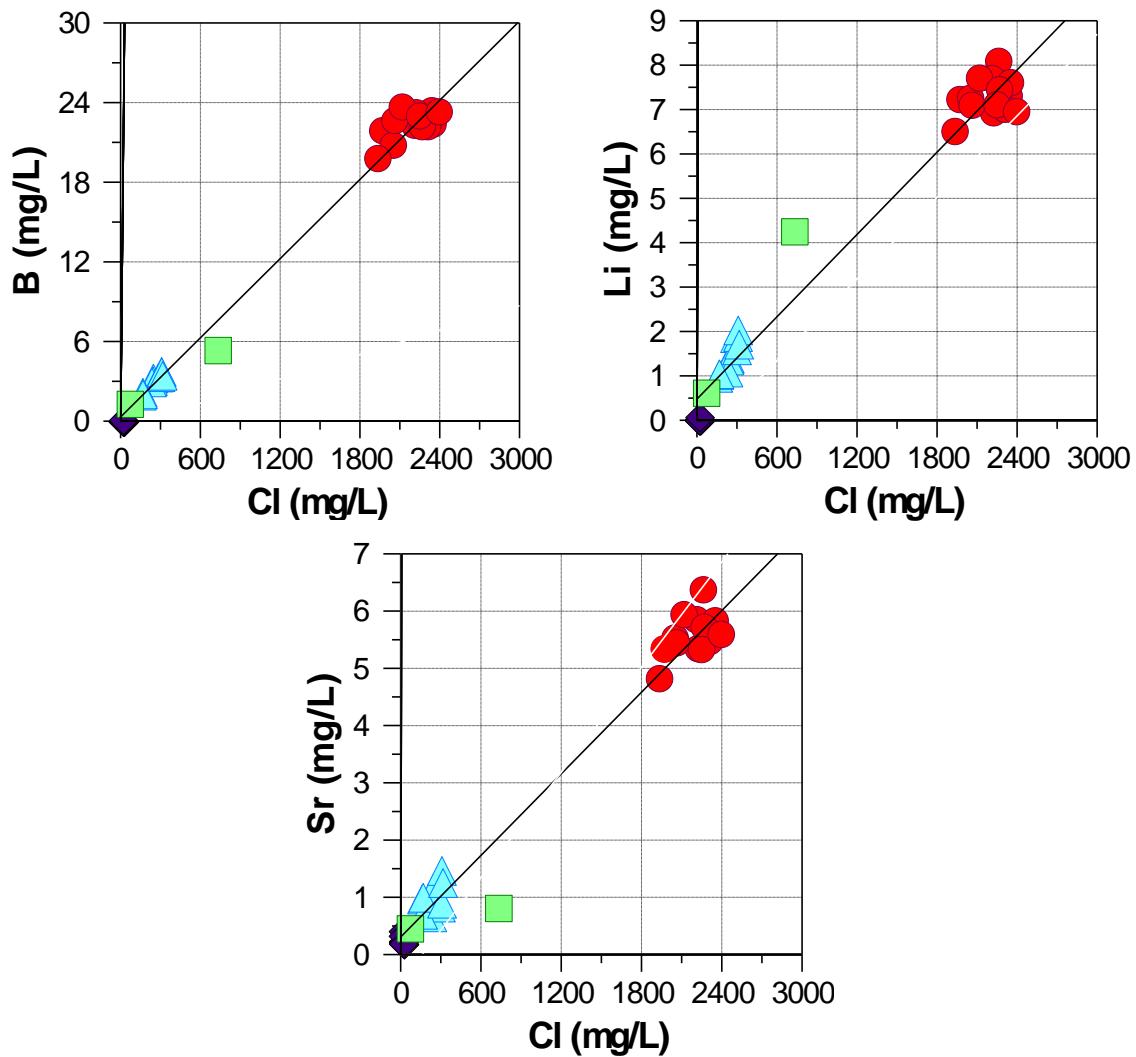


Figura 5.8. Relación Cl/B, Cl/Li, Cl/Sr para las muestras estudiadas

5.2.6 Evolución temporal de las características físico-químicas

En los resultados anteriores se ha mencionado que existe una posible influencia estacional en las características de las aguas termales, como se señala en el caso de los manantiales termales de Chignahuapan, Puebla, (González, 2006), y también en las de las aguas no termales. En este apartado se analizarán los cambios estacionales en las aguas con base en los datos obtenidos en los muestreos generales.

Para ello se graficó los valores de CE vs Temperatura, tal y como se representan en la Figura 5.9, en la cual se observa que los manantiales de agua no termal presentan un comportamiento irregular; mientras que en los pozos se observa un comportamiento lineal entre ambos parámetros.

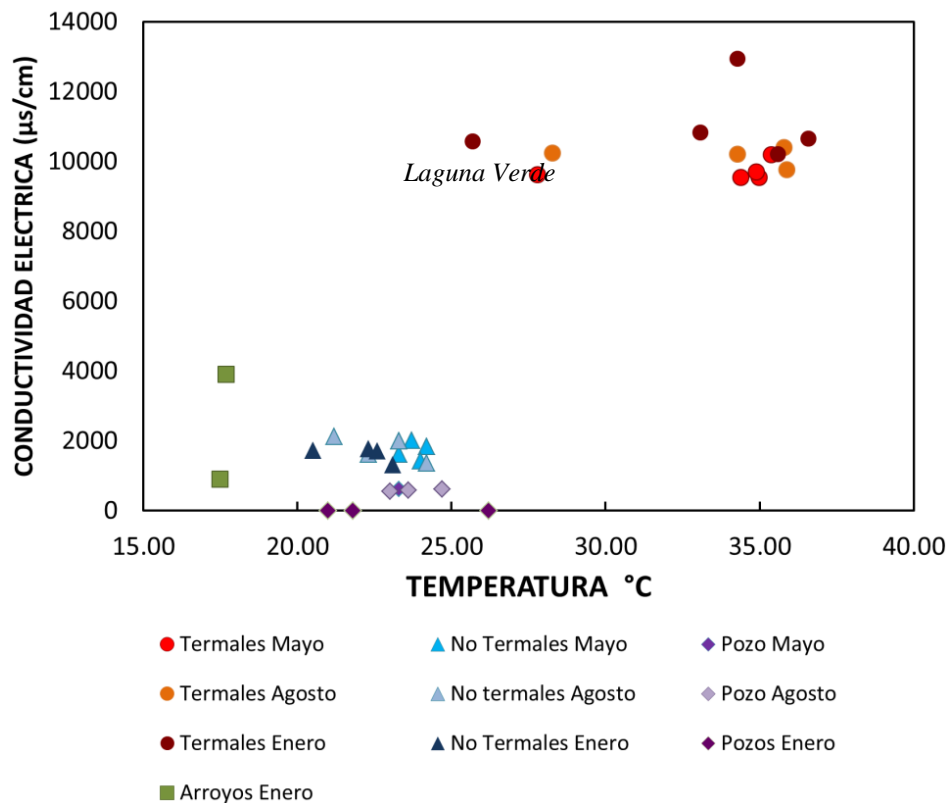


Figura 5.9. Relación entre CE y la temperatura del agua en las campañas de mayo 2014, agosto 2014 y enero 2015

En esta misma Figura 5.9 y para el caso de los manantiales termales, la CE no presenta linealidad con la temperatura; aunque sí parece definirse una tendencia de a mayor temperatura mayor CE. Cabe destacar el manantial Laguna Verde, el cual presenta valores que se separan del resto de manantiales termales (menor temperatura aunque similar CE), lo cual es debido a que este punto de muestreo está muy influenciado por la temperatura ambiente por sus características (la muestra de agua se toma en la misma laguna).

En la Figura 5.10 se contrastan la CE y la concentración cloruros tanto para manantiales termales, manantiales no termales como para pozos en los tres muestreos, donde se aprecia como en el caso de los manantiales termales existen valores más bajos en las concentraciones del ion cloruro en la época de lluvia (agosto) con respecto a la temporada de estiaje (mayo-enero), lo que daría indicio de un proceso de dilución con una mayor mezcla con aguas de menor salinidad.

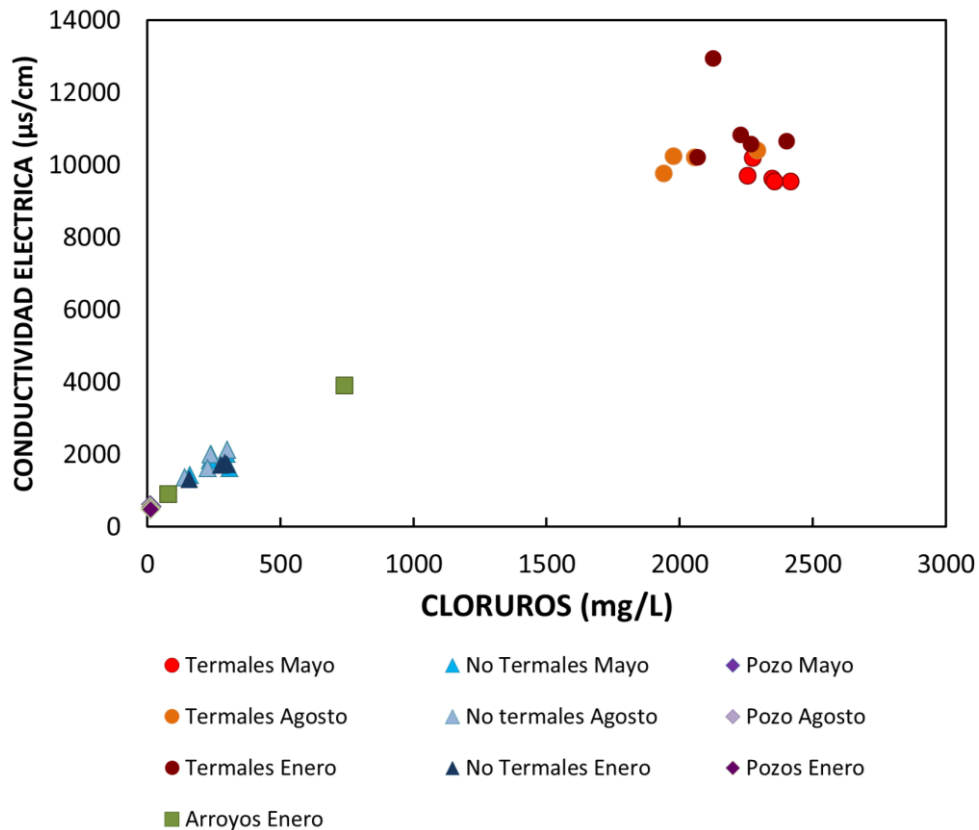


Figura 5.10. Relación entre CE y concentración de cloruros del agua en las campañas de mayo 2014, agosto 2014 y enero 2015

En la Figura 5.11, donde se presenta el Li vs B, se aprecia con mayor claridad la variabilidad de las características del agua termal en función de la época de estiaje y lluvia, ya que existen valores más bajos en las concentraciones de los iones B y Li en la época de lluvia (agosto) con respecto a la temporada de estiaje (mayo-enero).

Ante lo señalada en las figuras 5.10 y 5.11, es de gran importancia hacer un estudio detallado de series temporales como las que se elaboraron con base en los muestreos de control y las cuales se discutirán en el apartado 5.3.

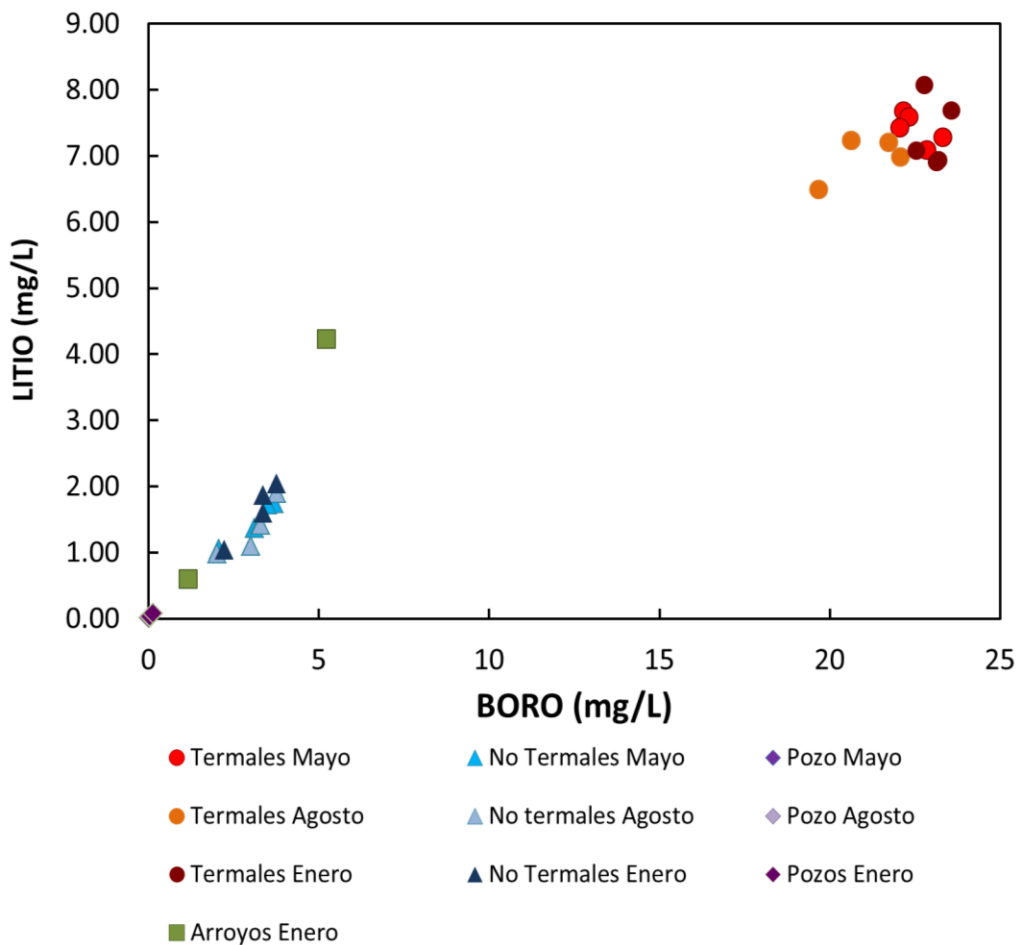


Figura 5.11. Relación Li/B para las distintas muestras de agua en las campañas de mayo 2014, agosto 2014 y enero 2015

5.2.7. Procesos de mezcla

Para poder definir con mayor detalle el proceso de mezcla que parece tener lugar entre el agua termal y el agua de pozo, que representan un agua de reciente infiltración, se consideró el estudio de elementos traza cuya presencia en aguas termales es elevada mientras que en aguas no termales, es muy baja o inexistente. Este es el caso de elementos traza como Li y B, para los cuales en la matriz de correlación se presenta un valor de r de 0.99. En la literatura (Bebout, 2007; Bebout et al., 1999; Konrad-Schmolke et al., 2011; Marschall et al., 2009^a; Marschall et al., 2009^b) se reporta que son buenos trazadores durante la migración y la interacción fluido-roca que incluye alteración hidrotermal en las cortezas oceánicas y las reacciones de deshidratación/hidratación en las zonas de subducción. Estos elementos tienden a ser relativamente muy concentradas en las cortezas oceánicas alteradas (Donnelly et al., 1980) debido al proceso hidrotermal de alta temperatura (Yoshida et al., 2015). Además de ser conservativos en este tipo de sistemas termales (Guo y Wang, 2012).

Como ejemplo se tomó el Li como ion conservativo. Los valores considerados para el cálculo de la mezcla de los miembros extremos con respecto al Li se presentan en la Tabla 5.10. Los miembros extremos que se definieron fueron: a) las muestras de pozo para las cuales se consideró una concentración definida por el límite de detección (<l.d.) en el caso de que no se reportase un valor medido, y b) los valores del agua termal y sus valores máximos.

En la tabla 5.11, se detallan los porcentajes de mezcla (en función del porcentaje de agua termal) calculados para los manantiales no termales y en la Figura 5.12 se presenta gráficamente.

Para el caso en que las mezclas que se calcularon con el ión Li, se puede comprobar que:

- a) En el manantial Agua Amarga I, el porcentaje de mezcla en el muestreo de mayo es de 17.5 % de agua termal y el 82.5 % de agua no termal. En la época de lluvia este porcentaje cambia, ya que disminuye a 6.5 % y con agua no termal aumenta a 93.5%. En el mes de enero, se incrementa otra vez, con un valor de mezcla de agua no termal de 7.8%.

Tabla 5.10. Concentraciones mínimas y máximas de Li para los miembros extremos

MIEMBROS EXTREMOS		
Mes de muestreo	Pozo	Termal
	Li (mg/L)	Li (mg/L)
Mayo	0.04	7.67
Agosto	0.01	7.20
Enero	0.01	15.36

Tabla 5.11. Porcentaje de mezcla para los manantiales no termales

FECHA	Manantial	Li (mg/L)	% mezcla de agua termal con base en Li
Mayo 2014	NT1 Agua Amarga I	1.37	17.5
	NT3 Ixtamil Abastecimiento	1.06	4.7
	NT4 Carrizal	1.73	7.9
Agosto 2014	NT1 Agua Amarga I	1.42	6.5
	NT2 Agua Amarga II	1.10	5.1
	NT3 Ixtamil Abastecimiento	0.98	4.5
	NT4 Carrizal	1.90	8.7
Enero 2015	NT1 Agua Amarga I	1.9	7.8
	NT2 Agua Amarga II	1.8	7.4
	NT3 Ixtamil Abastecimiento	1.2	4.8
	NT4 Carrizal	2.3	9.5

- b) Para Agua Amarga II, el porcentaje de agua termal que se mezcla en la época de estiaje es del 12.4% y de agua no termal es 87.6%, mientras que en la época de lluvias esta relación disminuyó a 5.1 % para la mezcla con agua termal y aumentó a 94.9 % para el agua de no termal, incrementando por tanto el aporte de agua no termal. Al igual que en el manantial Agua Amarga I, en el mes de enero, se incrementa el porcentaje de mezcla de agua no termal, con un valor de 7.4%
- c) En el caso del manantial Ixtamil abastecimiento, se estimó para la temporada de estiaje, un porcentaje de mezcla del 4.7 % con agua termal y del 95.3% con agua de

reciente infiltración; porcentajes que casi se mantuvieron idénticos en los otros dos muestreos (en agosto el porcentaje fue 4.5% y en enero de 4.8%).

- d) En el manantial el Carrizal, en temporada de estiaje se estima un porcentaje de mezcla del 7.9 % con agua termal y un 92.1% con agua de reciente infiltración, y esta proporción cambia en la temporada de lluvia con 8.9 % de agua termal, lo que significa un mayor aporte de agua termal, y vuelve a cambiar en el mes de enero con un porcentaje de agua termal de mezcla de 9.5 %.

Con base en estos resultados, se puede indicar que a excepción del manantial del Ixtamil abastecimiento (con porcentajes de mezcla casi constantes en el año), el resto de manantiales si presentan diferentes grados de mezcla a lo largo del año (Figura 5.12), así considerando el Li hay una tendencia tal que existe un menor porcentaje de mezcla con agua termal en el mes de agosto (lluvias) y por tanto una mayor porcentaje de mezcla con agua de reciente infiltración.

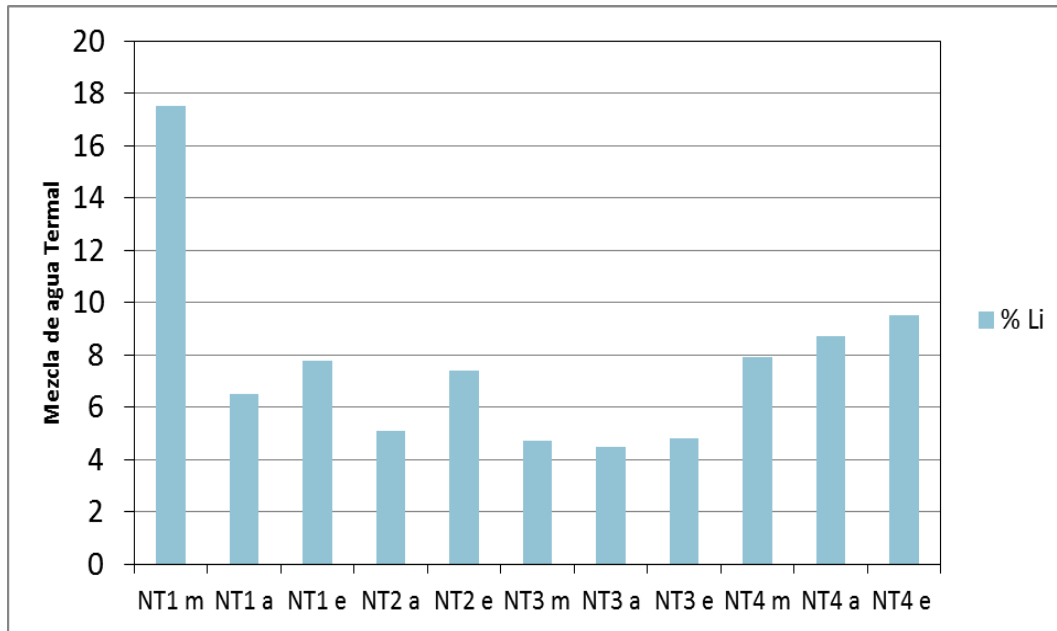


Figura 5.12. Porcentajes de mezcla con agua termal en los manantiales no termales (m: mayo 2015, a: agosto 2014, y e: enero 2015)

5.3 Caracterización temporal de parámetros físico-químicos

En esta etapa del estudio se realizó una medición de los parámetros de campo y cloruros a escala quincenal, para poder determinar si existe alguna tendencia temporal en la variación de estos parámetros.

5.3.1. Evolución temporal de parámetros en los manantiales termales

a) Temperatura

En cuanto a la relación de la temperatura de las muestras y la temperatura ambiente (Figura 5.13, Tabla 5.12) se observa que los manantiales termales se dividen en dos grupos, uno al que solamente pertenece el manantial Laguna Verde y para el cual se observa una temperatura ligeramente superior a la temperatura ambiente, sin sobrepasar los 30°C, siendo las temperaturas más altas las registradas en los meses de mayo y junio, para posteriormente presentarse oscilaciones en la temperatura.

Por otro lado, se tiene un segundo grupo donde están incluidos el resto de manantiales, con temperaturas que oscilan entre los 34°C y 38°C. Hay que señalar que en el caso de los manantiales del B. M. de Ixtapan, B. M. de Tonicico e Ixtamil, durante los recorridos y muestreos, se observó que todos están protegidos y resguardados por lo que la pérdida de temperatura al entrar en contacto con el ambiente es menor y, por lo tanto, su temperatura presenta menores oscilaciones.

El manantial Ixtamil es el que reporta una mayor oscilación en su temperatura de tal modo que en el periodo de lluvias y en la época invernal la temperatura es menor en comparación con el resto del periodo estudiado.

En el manantial del B. M. de Tonicico, después de la época de lluvia se observan oscilaciones en la temperatura del agua, y a partir del mes de noviembre se aprecia un aumento paulatino en la temperatura.

En el manantial del B. M. Ixtapan de la Sal se observa una disminución progresiva en la temperatura desde el mes de mayo, siendo la temperatura más baja la registrada en el mes de octubre, apreciándose en los muestreos subsecuentes un incremento.

En el caso del manantial Olincalli, los muestreos se iniciaron en el mes de noviembre; observándose que la temperatura más alta registrada es de 37°C y la más baja es 34°C, con un promedio de 35°C.

En general, se observa que en el grupo de manantiales calientes (mayores a 35°C) presenta oscilaciones de temperatura, lo que podría reflejar que existe un sistema de infiltración local, que podría aportar agua fría a los manantiales termales en determinadas épocas de año, aunque estas oscilaciones no son de gran envergadura, ya que como se parecía en la Tabla 5.13, el coeficiente de variación no supera el 0.03, a excepción del manantial del Olincalli (cabe recordar que en este manantial no se tiene un registro continuo).

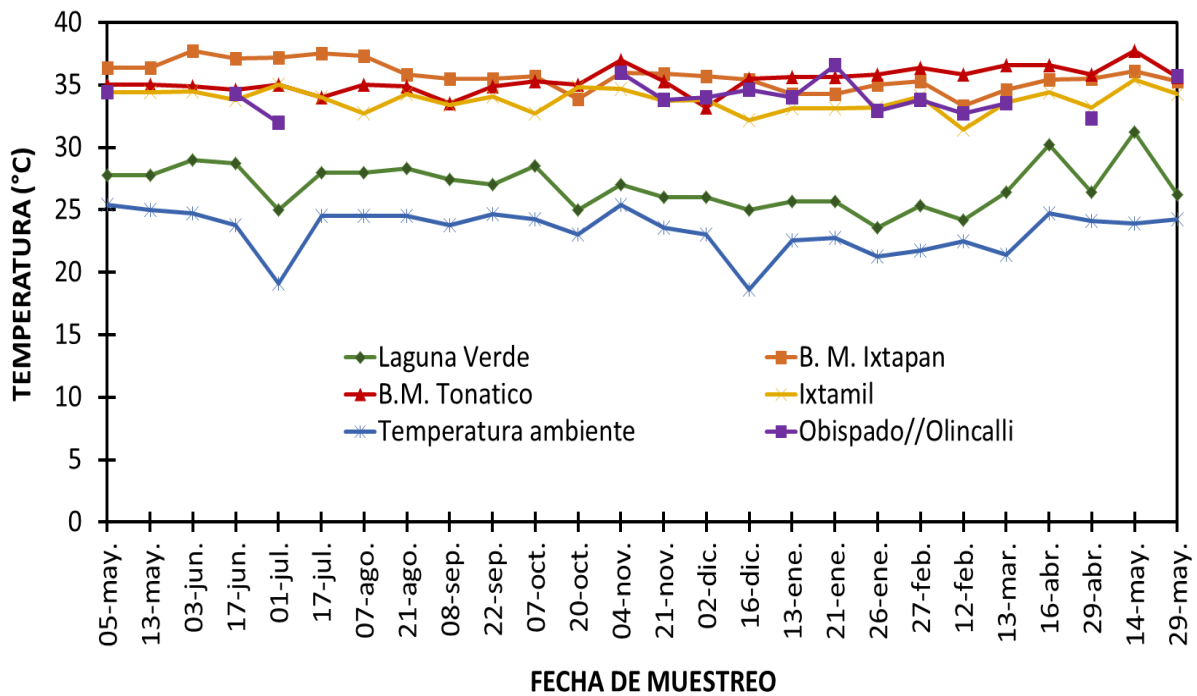


Figura 5.13. Evolución temporal de la temperatura del agua en los manantiales termales

Tabla 5.12. Estadísticos descriptivos de los valores de temperatura

	Ambiente	Laguna Verde	B. M. de Ixtapan de la Sal	B. M. de Tonicato	Ixtamil	Obispado// Olincalli
Máximo	25.40	31.20	35.40	37.70	37.70	36.60
Mínimo	18.60	23.60	31.40	33.20	33.30	32.00
Media	23.35	26.90	33.78	35.37	35.70	34.04
Mediana	23.84	26.70	33.90	35.30	35.60	34.00
Desviación standard	1.75	1.82	0.91	1.00	1.11	1.32
Coefficiente de variación	0.07	0.06	0.02	0.02	0.03	0.41
%	7%	6%	2%	2%	3%	

b) Conductividad eléctrica

En el caso de la evolución de la conductividad eléctrica a lo largo del muestreo (Figura 5.14, Tabla 5.13) se observa que el máximo valor reportado es de 12.93 mS/cm y corresponde al Balneario Municipal de Ixtapan de la Sal y el valor más bajo es de 8.46 mS/cm y lo reporta el manantial Laguna Verde.

En el caso del manantial Laguna Verde, la C.E. presenta los valores más bajos en los meses de noviembre a enero, es decir posterior a la época de lluvia.

El manantial del B. M. de Tonicato presentó una menor oscilación en su comportamiento a lo largo del periodo de muestreo en comparación con el resto de manantiales, en donde el valor máximo reportado fue de 11.79 mS/cm y el más bajo de 9.28 mS/cm. Mientras que el manantial que mayor oscilación presentó a lo largo de los muestreos fue el B. M. de Ixtapan con valores que oscilan desde 8.48 mS/cm hasta 12.93 mS/cm.

En general, las mayores oscilaciones en la CE, se presentan de los meses de octubre 2014 a enero 2015, mientras que en los meses de mayo 2014 a septiembre 2014 la variación de la C.E. es mínima, con valores que oscilan entre 9.5 y 10 mS/cm.

Estas oscilaciones se reflejan en los coeficientes de variación de la Tabla 5.13, en donde se constata que Laguna Verde es el manantial con mayor coeficiente de variación con un valor de 0.10; siendo el menor valor el del manantial del B.M. de Tonicato con 0.09.

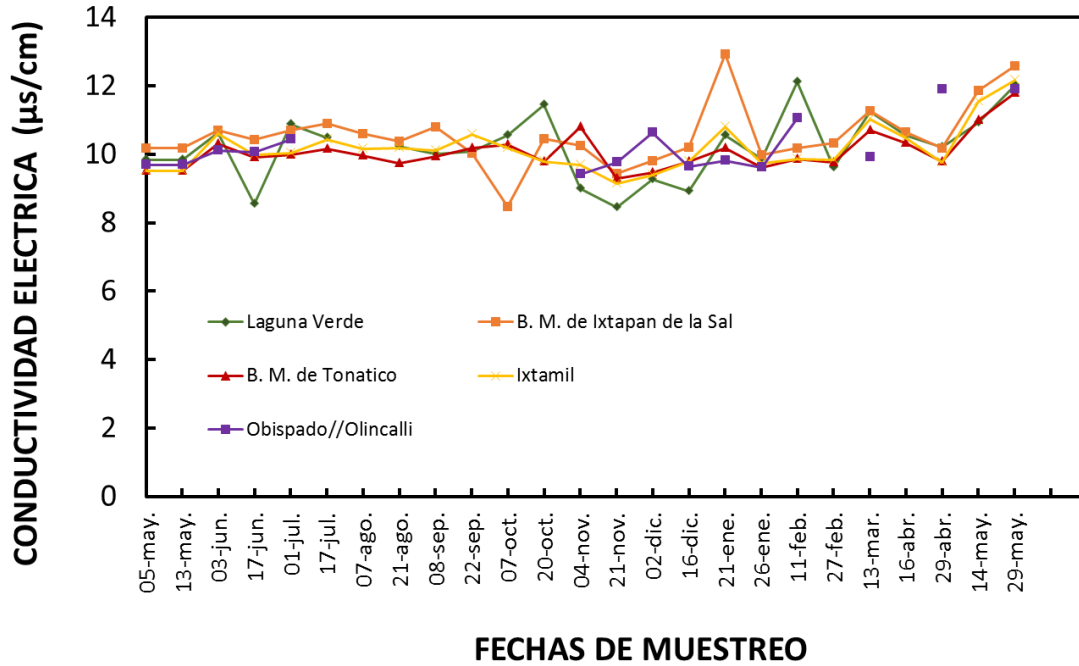


Figura 5.14. Evolución temporal de la conductividad eléctrica en los manantiales termales

Tabla 5.13. Estadísticos descriptivos de los valores de conductividad eléctrica

	Laguna Verde	B. M. de Ixtapan de la Sal	B. M. de Tonicato	Ixtamil	Obispado//Olinalli
Máximo	12.10	12.93	11.79	12.16	11.89
Mínimo	8.46	8.48	9.28	9.14	9.42
Media	10.22	10.54	10.07	10.17	10.24
Mediana	10.22	10.38	9.94	10.04	9.90
Desviación standard	0.97	0.91	0.55	0.68	0.80
Coeficiente de variación	0.10	0.09	0.05	0.07	0.08
%	10%	9%	5%	7%	8%

c) pH

Como se puede observar en la Figura 5.15 y Tabla 5.14, los valores del pH, a lo largo de los muestreos, fueron variables oscilando de 5.5 a 7.5, aunque todos los manantiales presentan un comportamiento similar y con valores que oscilan dentro de un mismo rango.

El manantial Laguna Verde registra valores de pH entre 5.8 y 7.5 y con un pH promedio de 6.3, lo que indica que es un agua con tendencia a la acidez. Las oscilaciones en el pH ocurren después de la temporada de lluvia, lo cual podría reflejar el efecto de la mezcla con agua de escorrentía que llega a almacenarse en la laguna.

En el B.M. de Ixtapan de la Sal, se observó un comportamiento muy estable y con mínimos cambios a lo largo del muestreo (pH mínimo 6.1, máximo 6.5, promedio de 6.2), siendo los meses de agosto a noviembre cuando se presentaron los mayores variaciones y en el mes de enero cuando se registró el pH más elevado de 6.5.

El pH en el B. M. de Tonicato, refleja un comportamiento muy estable, con aumentos paulatinos y descensos poco marcados, de modo que el pH oscila de 5.9 a 6.3.

El manantial Ixtamil es en donde el pH presenta varios máximos en los meses de septiembre, octubre, noviembre, enero y febrero. El valor máximo fue de 6.7 y el mínimo de 5.8.

Los coeficientes de variación de la Tabla 5.14, indican que estas oscilaciones no son muy amplias en cuanto a sus valores, ya que este coeficiente no supera para ninguno de los manantiales el valor de 0.04. Por otro lado, este parámetro es el que presenta menor coeficiente de variación en comparación con el resto de parámetros hasta este momento evaluados (Tablas 5.12 y 5.13).

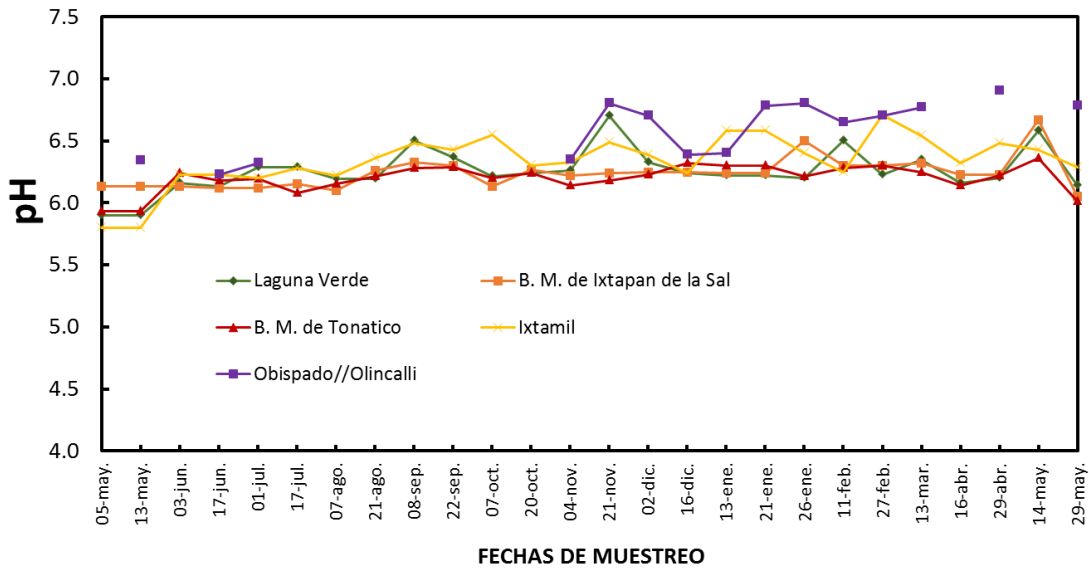


Figura 5.15. Evolución temporal del pH en los manantiales termales

Tabla 5.14. Estadísticos descriptivos de los valores de pH

	Laguna Verde	B. M. de Ixtapan de la Sal	B. M. de Tonatico	Ixtamil	Obispado//Olinalli
Máximo	6.70	6.67	6.36	6.71	6.90
Mínimo	5.90	6.05	5.93	5.80	6.23
Media	6.26	6.24	6.20	6.34	6.61
Mediana	6.23	6.24	6.22	6.35	6.70
Desviación standard	0.18	0.13	0.11	0.21	0.24
Coefficiente de variación	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04
%	3%	2%	2%	3%	4%

d) Cloruros

Se seleccionó el ion cloruro como un ion trazador, puesto que es un elemento muy estable en solución y difícilmente precipita, es decir es un elemento conservativo en el agua (Duarte, 2005).

Se analizaron la concentración de cloruros a lo largo de todo el periodo de muestreo dada su naturaleza de trazador, además de que es un elemento abundante en las aguas subterráneas y sobre todo en las aguas termales con concentraciones que oscilan en los 1500 a 2500 mg/L. Los resultados de la evaluación temporal se observan en la Figura 5.16 y Tabla 5.15.

En todos los manantiales monitoreados, los meses que menores concentraciones de cloruros reportaron son septiembre 2014 a diciembre 2014; mientras que los meses de mayo - junio 2014 y abril-mayo 2015, son los más estables ya que no presentan grandes variaciones en las concentraciones de cloruros.

El manantial que a lo largo de todo el muestreo presentó la menor concentración de cloruros es el manantial Laguna Verde con valores que oscilan desde 1667 mg/L hasta 2200 mg/L. El B. M. de Tonicico fue el manantial que presentó las mayores concentraciones del ion Cl⁻ con valores que están comprendidos en un intervalo que varía entre un valor mínimo de 1702 mg/L y máximo de 2443 mg/L.

Los coeficientes de variación expuestos en la Tabla 5.14, señalan que estas oscilaciones no son muy amplias en cuanto a sus valores extremos, pues este coeficiente presenta un valor máximo de 0.11 y un mínimo de 0.07. También hay que resaltar que estos valores son muy similares a los reportados como coeficientes de variación para la conductividad eléctrica (Tabla 5.13), lo cual señala la ya sabida estrecha relación entre estos dos parámetros. Ambos parámetros son los que presentan los valores de coeficiente de variación más elevados.

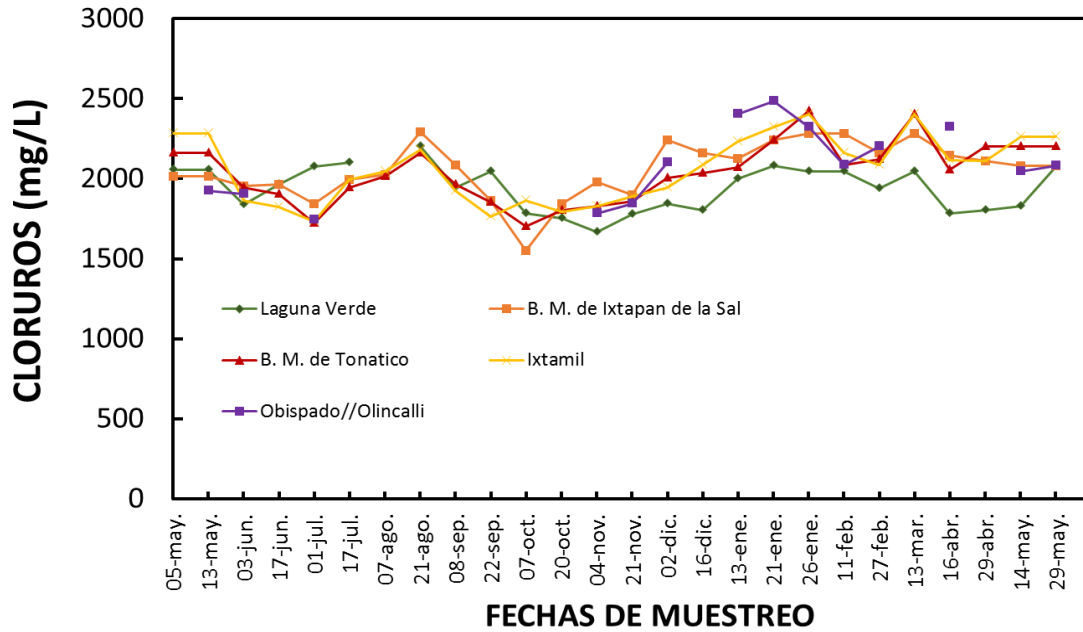


Figura 5.16. Evolución temporal de la concentración de cloruros en los manantiales termales

Tabla 5.15. Estadísticos descriptivos de los valores de la concentración de cloruros

	Laguna Verde	B. M. de Ixtapan de la Sal	B. M. de Tonicato	Ixtamil	Obispo//Olincalli
Máximo	2200.00	2294.64	2424.78	2403.51	2483.63
Mínimo	1667.04	1552.27	1702.49	1732.53	1742.54
Media	1941.90	2058.38	2040.86	2063.26	2088.60
Mediana	1962.80	2078.63	2044.95	2083.04	2080.84
Desviación standard	141.37	174.73	188.02	206.88	235.05
Coefficiente de variación	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11
%	7%	8%	9%	10%	11%

5.3.2. Relaciones entre los parámetros

a) Conductividad eléctrica y cloruros

En cuanto a la relación de conductividad con cloruros, y estos a su vez con el tiempo, lo cual podría permitir comprobar las variaciones temporales en los manantiales (Gunawardhana et al., 2012), esta se representó de forma gráfica en la Figura 5.16, donde se observa que el manantial que mantiene una correlación mayor entre estos parámetros es el manantial **Laguna Verde** (Figura 5.16a), puesto que la tendencia de cloruros y CE es similar, ya que ambos valores aumentan o disminuyen a la vez. En el periodo de lluvias, la CE es estable y no presenta grandes variaciones, sin embargo a partir del mes de octubre, cuando ha finalizado la época de lluvias la CE tiende a ser irregular presentando altibajos, de forma que en el mes de febrero se registró el máximo valor de CE. Para el caso de cloruros, las mayores concentraciones se reportan en los meses de enero y febrero, con valores que oscilan de los 2350 a 2200 mg/L, y que superan a los registrados en el mes de mayo, época del fin de estiaje. Los meses en que se reportan las menores concentraciones de cloruros son octubre y noviembre con valores que varían de 1700 a 1800 mg/L, época de fin de periodo de lluvias.

El **B. M. de Ixtapan** presenta un comportamiento similar entre CE y la concentración de cloruros (Figura 5.16b). Se observa que para el caso de los cloruros, el valor máximo se presenta en el mes de septiembre (2550 mg/L) y el valor más bajo en el mes de octubre (1552.2 mg/L), mientras que en los muestreos posteriores se observa un aumento gradual, hasta llegar a 2200 mg/L reportado en el mes de marzo. En lo que respecta de la CE, el valor mínimo corresponde al muestreo del 7 de octubre (8.48 mS/cm) y el valor máximo al del mes de enero (12.93 mS/cm). En este manantial, los valores mínimos en las concentraciones tanto CE como de cloruros, se registraron después de la temporada de lluvias, lo que representa que el manantial del BM de Ixtapan tiene influencia de la precipitación y que este cambio en las concentraciones se refleja meses después del periodo de lluvias (mayo-octubre, Figura 5.16b).

En el **manantial Ixtamil** se aprecia también una relación entre la conductividad y la concentración de cloruros (Figura 5.16c). Con respecto a los cloruros, el máximo valor registrado fue en el mes de enero con 2450 mg/L y los valores mínimos se detectan en el

mes de junio cuando se registraron las primeras lluvias, para posteriormente observarse un aumento gradual y, finalmente, en los meses de septiembre, octubre y noviembre registrarse los menores valores, lo que representaría una respuesta a la temporada de lluvias. Posteriormente, vuelve a incrementarse gradualmente hasta el mes de febrero, mes en el cual se da un máximo. La CE no varía mucho durante el periodo de muestreo, detectándose los valores mínimos en los meses de septiembre, octubre y noviembre.

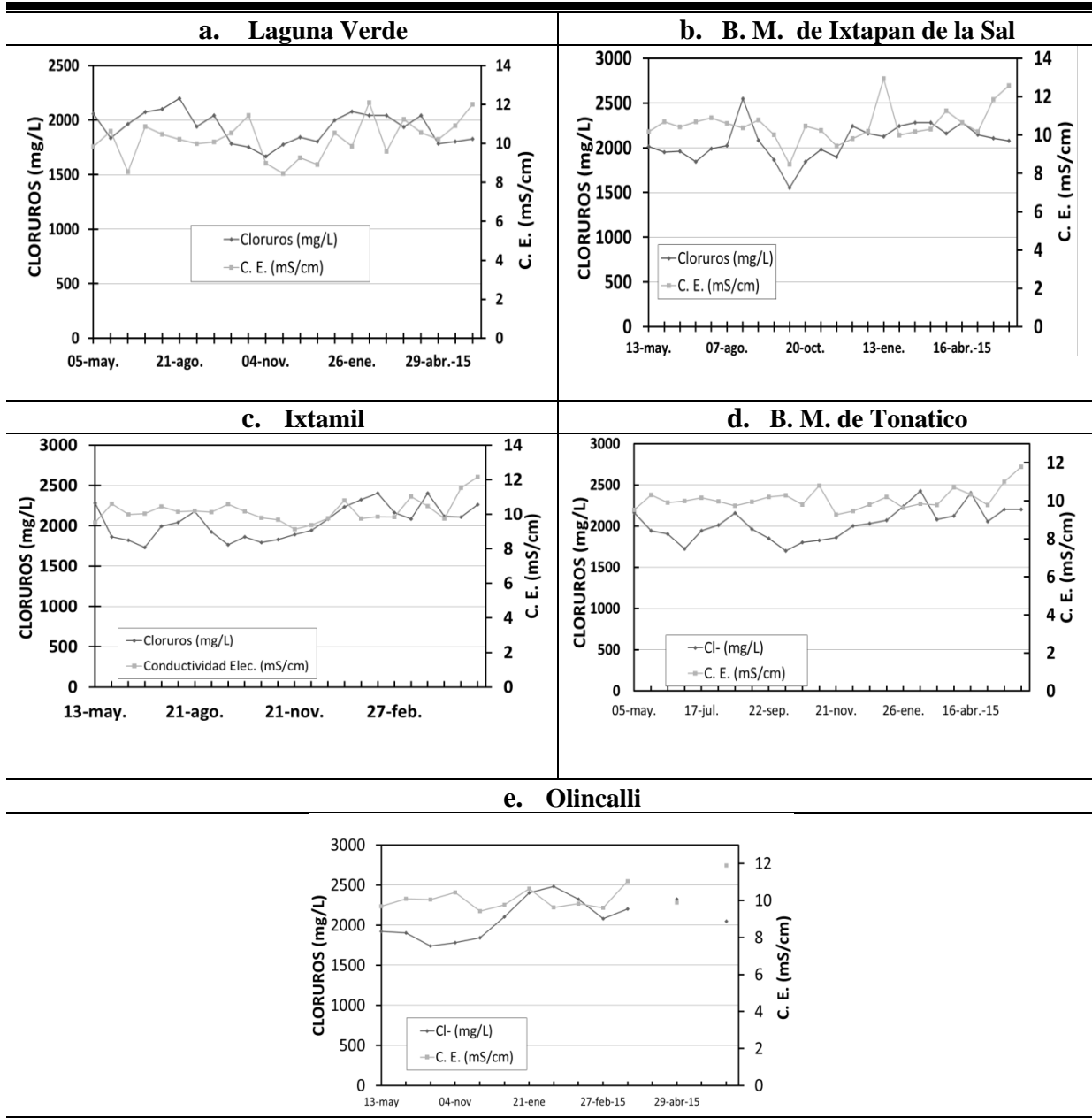


Figura 5.16. Relación de cloruros vs temperatura de los manantiales termales monitoreados

En el **B. M. de Tonatico** se observó que la concentración de cloruros es mínima en el muestreo de octubre (1702 mg/L) y el valor máximo reportado fue en el mes de febrero (2424 mg/L). En cuanto a la CE, sus valores más elevados corresponde a los muestreos de 20 de octubre 2014 (10.80 mS/cm) y 13 de marzo de 2015 (10.71 mS/cm) (Figura 5.17d).

En el caso del **manantial del Olincallí** los muestreos se iniciaron a partir del mes de noviembre, por lo que los datos recolectados corresponden al periodo de estiaje (Figura 5.17e). En el mes de marzo se registró el valor máximo de CE con 11.04 mS/cm y valor mínimo en el muestreo del 21 de noviembre con 8.91 mS/cm. Los cloruros presentan una concentración que oscila desde 1780.4 mg/L a 2483.6 mg/L, lo que representa un aumento gradual de la concentración del ion cloruro conforme la época de estiaje avanza.

En líneas generales, si parece definirse la diferencia entre los periodos de lluvias y estiaje aunque esta diferenciación no es muy marcada. Este hecho está en consonancia con lo señalado de que los manantiales termales no presentan grandes variaciones en sus características físico-químicas ni tampoco en sus caudales siempre que se mantenga la fuente de alimentación de esta manifestación hidrotermal (Custodio y Llamas, 1983).

5.4. Idoneidad para uso y consumo humano

Para determinar la idoneidad para uso y consumo humano del agua termal, no termal, de pozos y superficial se recurrió a la información generada a partir de los análisis de las muestras de agua obtenidas en esta investigación.

En la Tabla 5.16, se ilustran los valores de los parámetros medidos contrastados con los valores de los límites definidos en la normatividad mexicana aplicable al uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994). Los datos resaltados indican que se sobrepasa el límite permisible para el parámetro en medición (LP).

Hay que destacar que en este estudio no se han evaluado todos los valores de características fisicoquímicas del agua definidos en la norma NOM-127-SSA1-1994, y que el carácter del muestreo fue puntual, limitado por el período estacional de un año de observación y en tres épocas que corresponde a estiaje (Mayo 2014), lluvias (agosto 2014) e intermedio (enero 2015).

a) Agua termal

- Se observa en cuanto al parámetro pH, que los valores obtenidos están por debajo del límite establecido, al ser aguas ligeramente ácidas, por lo que no son aptas para el consumo humano.
- En cuanto al límite de SDT, se establece un valor de 1000 mg/L y en estas aguas se reportaron valores entre 4000 y 6000 mg/L.
- Las concentraciones de los parámetros Cl^- , Na^+ y SO_4^{2-} , también sobrepasan los límites definidos.
- En el caso del arsénico la norma establece un valor límite de 25 $\mu\text{g/L}$ y en las aguas termales se encuentra presente en concentraciones que oscilan desde 500 a 2000 $\mu\text{g/L}$.

Por lo establecido anteriormente, el agua termal resultó ser no apta para el consumo humano.

b) Agua no termal

El agua de los manantiales no termales es empleada en época de estiaje para actividades relacionadas con la higiene personal y en ocasiones para consumo humano.

- Para el caso del parámetro pH, éste se encuentra dentro del LP, excepto en el caso de los manantiales NT1 (Agua Amarga I) y NT3 (Ixtamil abastecimiento) que en el muestreo de mayo registraron valores de 6.1 y 6.3, respectivamente.
- En el caso de los SDT, estos se reportan dentro del LP, ya que los valores no sobrepasan los 1000 mg/L.
- Para el caso de Na^+ , el manantial NT1(Agua Amarga I) y NT4 (El Carrizal) en el mes de mayo 2014 sobrepasan el LP (200 mg/L), ya que se presentan concentraciones de 203 mg/L en el manantial NT1 y 256 mg/L en NT4. Así mismo, en el muestreo de agosto 2014 y enero 2015, el manantial NT4 volvió a sobrepasar el valor establecido por la Normatividad.
- En relación al ion Cl^- , el límite establecido por es 250 mg/L, y las muestras que sobrepasaron este valor fueron las del manantial NT4 en los tres muestreos realizados (mayo 2014, agosto 2014 y enero 2015).
- En el caso del arsénico, en todos los manantiales no termales se reportaron valores que varían de 300 a 200 $\mu\text{g/L}$, por lo tanto el agua no es apta para consumo humano.
- En el caso del NO_3^- el manantial NT4, sobrepasa el límite de 44.2 mg/L, en los tres muestreos, así como también el manantial NT3 (Ixtamil abastecimiento) en los muestreos de mayo 2014 y agosto 2014.

c) Agua de pozos

Estas aguas por ser producto de la reciente infiltración no prestan problemas con respecto al pH, SDT y concentraciones de Cl^- , Na^+ y SO_4^{2-} y As, sin embargo debido a las actividades de la región (agricultura), si se detecta presencia de agentes contaminantes como el nitrato.

El pozo Salinas (P3) presentó altos contenidos de NO_3^- , en torno a 55 mg/L en los muestreos de agosto de 2014 y enero de 2015 (en mayo 2005 no se obtuvo muestra). Cabe señalar que este pozo se encuentra en una zona agrícola.

El pozo del Zapote (P4) fue el que presentó concentraciones más elevadas, con 83 mg/L. En este caso, el pozo se encuentra dentro de un área rural, en donde se ubican casas

dispersas y terrenos agrícolas, por lo que el aporte de este elemento podría ser producto tanto de las actividades agrícolas como de las urbanas (aguas residuales).

d) Agua superficial

Solo se detectaron valores superiores a los establecidos en la norma para Cl^- , Na^+ y SO_4^{2-} y As en el caso del arroyo El Salado.

Tabla 5.16. Valores obtenidos en las muestras de agua de parámetros incluidos en la NOM 127-SSA1

ID	Nombre	pH	TDS	Na ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	As µg/L
NOM- 127-SSA1-1994		6.5 - 8.5	1000	200	250	400	44.2	25
Mayo 2014								
M1	Laguna verde	5.9	4705.9	1499	2349.2	976.8	<1.36	1479.0
M2	Ixtamil	6.0	4666.7	1398	2419.5	976.7	<1.36	481.0
M3	Municipal Tonatico	5.9	4666.7	1429	2358.7	957.0	<1.36	1973.0
M3	Municipal Tonatico	6.2	4774.5	1300	1943.0	916.1	<1.36	1719.0
M4	Municipal de Ixtapan	6.1	4985.3	1451	2277.5	939.4	<1.36	1670.0
M5	Obispado	6.3	4745.1	1398	2257.0	903.4	<1.36	548.2
NT1	Agua Amarga I	6.1	897.1	203	235.5	136.2	29.1	231.7
NT3	Ixtamil abastecimiento	6.3	696.1	151	159.8	91.3	37.7	294.8
NT4	El Carrizal	7.5	788.7	256	309.0	263.7	56.9	306.3
P1	Pozo Ixtapan	7.5	298.5	18.5	17.1	42.8	18.7	<14.6
Agosto 2014								
M1	Laguna verde	6.1	5009.8	1308	1980.0	736.0	<1.36	451.6
M2	Ixtamil	6.3	4995.1	1379	2059.6	702.7	<1.36	488.7
M3	Municipal Tonatico	6.2	4774.5	1300	1943.0	916.1	<1.36	1719.0
M4	Municipal de Ixtapan	6.2	5088.2	1462	2319.6	761.5	<1.36	1898.0
NT1	Agua Amarga I	6.7	976.5	206	238.9	174.5	25.2	250.7
NT2	Agua Amarga II	7.23	792.2	189	227.9	133.6	1.6	226.6
NT3	Ixtamil abastecimiento	6.79	668.1	139	151.9	82.8	44.9	337.3
NT4	El Carrizal	7.07	1042.2	260	300.2	204.8	43.7	286.0
P1	Pozo Ixtapan	7.32	289.2	18.8	13.6	34.8	16.3	<14.6
P2	Los Mangos	7.3	270.6	27.5	20.3	15.1	18.7	<14.6
P3	Pozo Salinas	7.58	298.5	21	12.8	15.4	55.5	<14.6

Tabla 5.16. Valores obtenidos en las muestras de agua de parámetros incluidos en la NOM 127-SSA1 (Continuación)

ID	Nombre	pH	TDS	Na ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	As µg/L
NOM- 127-SSA1-1994		6.5 - 8.5	1000	200	250	400	44.2	25
Enero 2015								
M1	Laguna verde	6.22	5171.6	1328	2271.2	904.7	<1.36	303
M2	Ixtamil	6.58	5299.0	1463	2232.3	814.4	<1.36	638
M3	Municipal Tonicico	6.3	4995.1	1348	2070.6	739.8	<1.36	1663
M4	Municipal de Ixtapan	6.24	6338.2	1343	2127.1	918.4	<1.36	1529
M6	Olincalli	6.4	5210.8	1557	2403.9	887.1	<1.36	1739
NT1	Agua amarga I	6.78	838.2	192	277.7	124.9	28.5	218
NT2	Agua amarga II	6.72	868.6	188	292.5	124.9	30.8	214
NT3	Ixtamil frio	6.81	647.1	125	158.9	92.4	33.6	303
NT4	El carrizal	7.2	844.6	249	301.2	207.1	52.6	293
P1	Pozo Ixtapan	7.03	258.8	18.73	15.4	37.2	18.0	<12.3
P3	Pozo Salinas	7.31	233.3	20.55	12.6	16.5	54.8	<12.3
P4	Pozo Zapote	7.25	230.4	18.37	15.1	31.9	83.3	<12.3
R1	Arroyo Salado	7.12	1902.0	438	741.9	391.2	<1.36	380
R2	Arroyo Salitre	7.84	434.3	68.97	81.7	78.5	11.0	61

Esquema hidrogeológico

Finalmente, se presenta lo que pudiera ser un esquema hidrogeológico (Figura 5.17) del Sistema Termal Ixtapan de la Sal-Tonatico, en el cual se puede observar:

- La distribución de diferentes tipos de agua, donde se sugiere que el agua termal proviene de un flujo profundo, el agua no termal de un flujo local mezclado con agua termal y el agua extraída a través de pozos como producto del agua de reciente infiltración que queda almacenada en un acuífero somero.
- Un flujo regional que circula a través de las fracturas, que permite que el agua se enriquezca en sales, hasta llegar a un punto en el subsuelo en donde la temperatura es elevada, por ejemplo un foco de calor de origen ígneo, el cual puede liberar iones como litio, boro, arsénico y azufre. Desde este punto, el agua asciende a la superficie a través de las fracturas que presenta el material metamórfico. El ascenso a la superficie del agua provoca que durante su trayectoria el calor se disipe y que el agua termal emane con una temperatura entre 35 y 39 °C. En el agua termal químicamente predominan los iones Cl^- , Na^+ , SO_4^{-2} y Mg^{2+} ; así como elementos traza tales como arsénico y boro.
- Un flujo local, producto de la precipitación en la región, el cual durante su recorrido por el subsuelo se mezcla con el agua termal. Los porcentajes de mezcla del agua termal con respecto al agua no termal oscila entre el 4.5 % a 17.5%. El agua no termal posee características, por tanto de ambos grupos de agua, es decir es una agua bicarbonatada clorurada sódico cálcica o bien clorurada bicarbonatada sulfatada sódico cálcica.
- Fuera del área de los manantiales termales, existe un flujo local originado por la infiltración de agua de lluvia que representa la recarga de un acuífero aluvial somero, el cual es explotado a través de pozos ubicados en el municipio de Tonatico. La composición química del agua de los pozos es bicarbonatada cálcica o bicarbonatada cálcico magnésica.

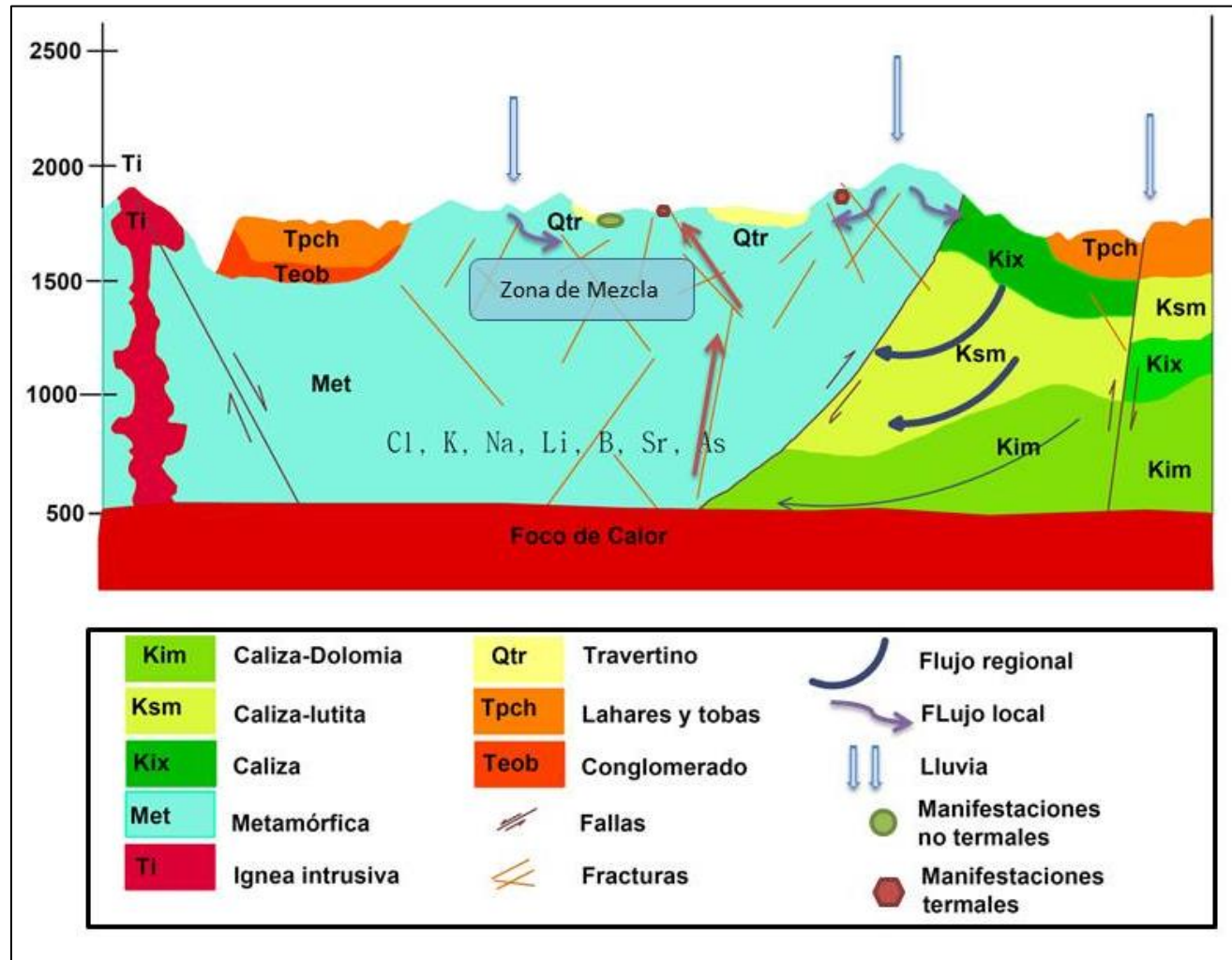


Figura 5.17 Esquema hidrogeológico del sistema termal de Ixtapan de la Sal – Tonicaco

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la zona de estudio de Ixtapan de la Sal-Tonatico se identificaron 10 manantiales termales, 4 manantiales no termales, y 5 pozos. El monitoreo se pudo llevar a cabo en todas estos puntos, excepto en 3 manantiales termales al no ser posible su acceso.

Los muestreos generales permitieron identificar los patrones hidroquímicos de los diversos tipos de agua. En el caso de los manantiales termales, este patrón está caracterizado por un agua clorurada sódico-cálcica o bien bicarbonatada-clorurada sódica-cálcica. En los manantiales no termales este patrón está representado por una agua bicarbonatada cálcica. El agua de pozos representa un agua de reciente infiltración de ahí su caracterización como un agua bicarbonatada cálcica o bicarbonatada cálcico-magnésica. En el caso del agua superficial, el agua del arroyo El Salado tiene características de Na-Ca-Cl-SO₄ y el agua del arroyo el Salitre de Ca-Na-HCO₃-Cl, que indican un afectación por el vertido de las aguas termales, ya que los caudales de los manantiales termales se vierten a cauces superficiales. Estos patrones se aprecian claramente en las representaciones gráficas de los diagramas de Piper y Scholler-Berkaloff.

En cuanto a los iones minoritarios, los manantiales termales se caracterizan por las altas concentraciones de As (0.5 a 2.0 mg/L), B (20 a 24 mg/L), Li (6 a 8 mg/L) y Sr (4 a 7mg/L). En el caso de los manantiales no termales, las concentraciones fueron menores, así el As presentó concentraciones entre 0.2 y 0.4 mg/L, B entre 2 y 4 mg/L, Li desde 1.0 a 2.0

mg/L y Sr entre 1 y 1.5 mg/L. En el agua superficial, estos elementos se presentaron en concentraciones muy similares a las de los manantiales no termales. La presencia de estos elementos en el agua muestreada en pozos fue mínima e incluso, en ocasiones, por debajo del límite de detección del equipo analítico empleado.

El estudio de correlaciones entre parámetros y su representación gráfica identificó que los manantiales no termales representan un agua con características intermedias entre agua termal y agua de pozo (de reciente infiltración) por lo que es posible identificar un proceso de mezcla.

La estimación del porcentaje de mezcla entre agua termal (miembro extremo 1) y agua de pozo (miembro extremo 2) en los manantiales no termales con base en el ion Li permitió estimar valores de mezcla con agua termal que oscilan entre el 4.7 y 17.5% en el mes de mayo 2014, entre 4.7 y 8.7% en el mes de agosto 2014 y, finalmente, en enero 2015 el porcentaje de mezcla con agua termal osciló entre 4.8 y 9.5%. Estos valores permitieron comprobar como en el periodo de lluvias (agosto) el porcentaje de mezcla con agua termal fue menor en comparación con los otros dos periodos de muestreo.

Los muestreos de control llevados a cabo en los manantiales termales entre mayo 2014 y mayo 2015 con base en la temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH y cloruros, denoto la escasa variabilidad de los valores de estos parámetros ya que en el caso de la temperatura el coeficiente de variación osciló del 2 a 6%, para la conductividad eléctrica presentó un rango de valores comprendidos entre el 10% y 5%, el pH entre el 2 al 4% y la concentración de cloruros entre 7% y 11%. Esta escasa variabilidad de las características físico-químicas evaluadas está en concordancia con el comportamiento de un manantial termal, el cual no presenta una gran variabilidad.

Las características fisicoquímicas de las aguas termales con alto contenido en Cl^- , Na^+ , HCO_3^- y Ca^{2+} , son consecuencia de un flujo profundo que circula próximo a focos de calor (cámaras magmáticas), que atraviesa materiales carbonatados y que después asciende rápidamente a través de las fallas, dando lugar a la aparición de los manantiales termales. Los elementos como Boro o Litio, que se presentan en altas concentraciones, estarían

relacionados con la volatilización y descomposición de sales alcalinas procedentes del fluido geotermal.

En el caso de los pozos, su hidrogeoquímica indica un agua de reciente infiltración que quedaría almacenada en el acuífero aluvial somero, el cual es explotado en el municipio de Tonicato como fuente de agua para uso y consumo humano, así como para la agricultura.

Se llevó a cabo una evaluación considerando la NOM-127-SSA1-1994, ya que los pozos que existen en la región se emplean para abastecimiento humano y los manantiales no termales también tienen el mismo uso cuando hay problemas de abastecimiento en el municipio. Esta evaluación permitió identificar en los manantiales no termales que los valores de As, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ y NO₃⁻, no cumplía con el límite establecido. En el caso de los pozos, en líneas generales el agua estaba dentro de los límites, sin embargo en el pozo de Salinas y el pozo el Zapote se encontró que el nitrato sobrepasa el valor de la norma.

La presencia de nitratos en los manantiales no termales y algunos pozos, indican el efecto de actividades antrópicas como puede ser la agricultura, así como vertidos de aguas residuales (fosas sépticas).

Como recomendaciones cabe señalar la necesidad de realizar estudios más allá de la zona de Ixtapan de la Sal-Tonicato, para poder reconocer el flujo regional de las aguas termales.

También se deberían llevar a cabo estudios isotópicos para una caracterización de mayor profundidad de las aguas termales y no termales.

Por otro lado, el uso de modelos hidroquímicos permitiría el estudio más detallado de los procesos de mezcla, así como la identificación de los procesos hidrogeoquímicos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abiye, T. (2010). Groundwater dynamics in the East African Rift system. In "Sustainable groundwater resources in Africa". Xu, Y and Braune E (Editors) CRC Press, Taylor and Francis. 93-106
- Ahmad, M., Akram, W., Ahmad, N., Tasneem, M., Rafiq, M., y Latif, Z. (2002). Assessment of reservoir temperatures of thermal springs of the northern areas of Pakistan by chemical and isotope geothermometry. *Geothermics*, 31, 613–631.
- Ahmed, M. y Hafidah A. (2012). Hydrochemistry and thermal activity of damt region, Yemen. *Environmental Earth Sciences*, 65, 2111-2124.
- Alaniz-Álvarez, S. y Nieto-Samaniego, A. (2005) El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 1(57), 65–82.
- Appelo, C.A.J. y Postma D. (2006). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Segunda ed. CRC Press
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) y WFPC (Water Pollution Control Federation). (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA, AWWA, WFPC, 21th edn. Washington, D.C.
- Asta, M., Gimeno, M., Auqué, L., Gómez, J., Acero, P. y Lapuente, P. (2012). Hydrochemetry and geothermometrical modeling of low-temperature Panticosa geothermal system (Spain). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 235-236, 84-95.
- Bebout, G., Agard, P., Kobayashi, K., Moriguti, T., Nakamura, E. (2013). Devolatilization history and trace element mobility in deeply subducted sedimentary rocks: evidence from Western Alps HP/UHP suites. *Chemical Geology*, (342) 1–20
- Betancur, T., Mejia, O., y Palacio, C. (2009). Modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño: un sistema acuífero tropical. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 48, 107-118.
- Birkle, P. Merkel, B., Portugal, E. y Torres-Alvarado, I. (2000). The origin of reservoir fluids in the geothermal field of Los Azufres, Mexico — isotopical and hydrological indications. *Applied Geochemistry* 16, 1595–1610

- Campa, M., Campos, M., Flores, R., y Oviedo, R.A., 1974, La secuencia mesozoica volcano sedimentaria metamorfozada de Ixtapan de la Sal, México-Teloloapan, Guerrero. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 35 7-28.
- Campa, M.(1978). La evolución Tectónica de Tierra Caliente, Guerrero. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, XXXIX(2), 52–64.
- Campa, M., de León, R. T., Iriando, A., y Premo, W. (2012) Caracterización geológica de los ensambles metamórficos de Taxco y Taxco el Viejo, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 369–385.
- Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J, Carrillo- Chávez, A., 2003a, Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*,56, 10-18.
- Camprubí, A., & Albison, T. (2006). Depositos epitermales en México: Actualizacion de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletin de la sociedad Geologica Mexicana*, 58(1), 27-81.
- Capasso, G., D'Alessandro, W., Favara, R., Inguaggiato, S., y Parello, F. (2001). Interaction between the deep fluids and the shallow groundwaters on Vulcano island (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 273, 70-80.
- Cardona, A., Hernández, N. (1995). Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el Valle de México. *Ingeniería Hidráulica en México*, X (3), 71-90.
- Cardona, A. (2015). Apuntes de Hidrogeoquímica. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Clark, K.F., (1990). Geology and mineral deposits of the Taxco mining district. *Society of Economic Geologists*, 6, 281-291.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2009). Atlas del Agua en México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Actualizacion de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero de Tenancingo (1504). Estado de México
- Custodio, E., y Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea*. Barcelona, España: Omega.
- D’Cserna, Z. (1965). Reconocimiento geológico en la Sierra Madre del Sur de México, entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero. *Instituto de Geología*, 62, 77.

- D' Cserna Z. y Fries Jr.C., (1981). Hoja Taxco 14Q-h(7), Resumen de la Geología de la hoja Taxco, Estados de Guerrero, México y Morelos. Carta Geológica de México serie 1:1000000, Instituto de Geología, U.N.A.M.
- Damon, P, Shafi qullah, M., Clark, K. (1981). Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis: *Revista del Instituto de Geología*, 5, 131-139.
- Donnelly, T., Thompson, G. y Salisbury M.H. (1980). The chemistry of altered basalts at site 417, Deep Sea Drilling Project Leg 75. Institute Report of DSPS, 51–53.
- Duarte, M. P y Sanchez, C. (2005). Uso de trazadores ambientales y estudio de recarga. Tesis. Universidad industrial de Santander.
- Fagundo, J., Cima, A., & González, P. (2004). *Revision bibliografica sobre clasificación de las aguas minerales y mineromedicinales*. Recuperado el 26 de enero de 2014, de: http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacionbal/clasificacion_aguas_minerales.pdf
- Febles-Patrón, J., & Hoogesteijn, A. (2008). Análisis del Marco Legal para la Protección. *Ingeniería Revista Académica*, 71-79.
- Ferrari, L. (2011). Tectonica y vulcanismo en el cinturón colcanico Trans-Mexicano. *Centro de Geociencias del Instituto de Geologia de la UNA*.
- Flores, E. L., Jiménez, G., Martínez, R. G., Chávez, R. E., & Pérez, D. (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 14 (7), 1216–1230.
- Fries, Carl, Jr., 1960, Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. Instituto de Geología, 60 236
- Gabriel, L., Vega, M. Contreras, R., Canto, C. y Valera. H. (2006). Las aguas termales y sus efectos al medio ambiente que los circundan en el municipio de Santa María Amajac, en el Estado de Hidalgo. *V Congreso Internacional y XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales*. Oaxtepec, Morelos, México.
- García-Palomo, A. (1998). Evolución estructural en las inmediaciones del volcán nevado de Toluca, Estado de Mexico. Posgrado en Ciencias de la Tierra, instituto de Geofísica.
- Gobierno Municipal de Ixtapan de la Sal. (2003). Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Ixtapan de la Sal, Estado de México.

- González-Partida, E. (2000). Evidencias de evolución de un fluido básico a ácido a partir del análisis de la alteración hidrotermal del campo geotérmico de los azufres, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 1 (17) 76-82.
- González-Partida, E., Carrillo-Chávez, A., Levresse, G., Tello-Hinojosa, E., Venegas-Salgado, S., Ramírez-Silva, G., Pal-Verma, M., Tritlla, J. y Camprubí, A. (2005). Hydro-geochemical and isotopic fluid evolution of the Los Azufres geothermal field, Central México. *Applied Geochemistry* 20, 23–39
- Gunawardhana, L., Kazama, S. & Kawagoe, S. (2011). Impact of Urbanization and Climate Change on Aquifer Thermal Regimes. *Water Resources Management*, 25, 3247-3276.
- Gou, Q., y Wang, Y. (2012). Geochemistry of hot springs un the Tegchong hydrothermal areas, Southwestern, China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 215, 61-73.
- Gutiérrez-Cirlos Maraña, A. (2010). Análisis de las variaciones termo-geoquímicas estacionales y resiliencia del manantial Chignahuapan, Puebla. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Haile T., Abiye T.A. (2012). The interference of deep thermal system with the shallow aquifer: the case of Sodere and Gergedi thermal springs, Main Ethiopian Rift, Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, (20) 561-574
- Han, D., Liang, X., Jin, M., Currell, M., Song, X. y Liu, C. (2010). Evaluation of groundwater hydrochemical characteristics and mixing behavior in the Daying and Qicun geothermal systems, Xinzhou Basin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 92-104.
- Herrera, C., Pueyo, J., Sáez, A. y Valero-Garcés, B. (2006). Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. *Andean Geology*, 299-325.
- Iglesias, R.E. Torres, F.J. (2003) Low to medium temperature geothermal reserves in Mexico: a first assessment. *Geothermics* 32, 711-719
- Iglesias, E. R., Torres, R. J., Ignacio Martínez-Estrella J. y Reyes-Picasso Neftalí, (2011). Resumen de la evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja. *Geotermia*, 2(24), 39-48.
- Instituto Geologico y Minero de España, (IGME). (2008). Manual de Geotermia. España: Instituto para la Diversificcion y Ahorro de la Energia IDAE.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2001). Síntesis de Información Geográfica del Estado de México .
- Juan- Perez, J. (1994). La hidrogeoquímica y su aplicación en la región de Ixtapan de la Sal - Tenancingo, Estado de México. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Kehew, A. (2001) *Applied Chemical Hydrogeology*. Prentice Hall, 368
- Konrad-Schmolke, M., O'Brien, P.J., y Zack, T. (2011). Fluid migration above a subducted slab—constraints on amount, pathways and major element mobility from partially overprinted eclogite-facies rocks (Sesia Zone, Western Alps). *Journal of Petrology*, (52), 457–486
- Larsen, D., Swihartb, G., y Xiaoc, Y. (2001). Hydrochemistry and isotope composition of springs in the Tecopa basin, southeastern California, USA. *Chemical Geology*, 179, 17–35.
- Lindgren, W., (1922) A suggestion for the terminology of certain mineral deposits. *Economic Geology*, 17, 202-294.
- Martínez-Estrella, I., Torres, R.J., Iglesias, E.R., (2005) A GIS based information system for moderate-to low temperature Mexican geothermal resources, *Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April 24 – 29*.
- Marschall, H., Altherr, R., Gmélíng, K., y Kasztovszky, Z. (2009),. Lithium, boron and chlorine as tracers for metasomatism in high-pressure metamorphic rocks: a case study from Syros (Greece) *Mineralogy and Petrology*, (95) 291–302
- Marschall, H.R., Korsakov, A.V., Luvizotto, G.L., Nasdala, L., Ludwig, T. (2009b). On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra) high-pressure metamorphic rocks. *Journal of the Geological Society*, (166).811–823
- Marrero, R. (2010). Modelo hidrogeológico del acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias. Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Energías Renovables, Tenerife. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Millot, R., Hegan, A., & Négrel, P. (2012). Geothermal waters from the Taupo Volcanic Zone, New Zealand: Li, B and Sr isotopes characterization. *Applied Geochemistry*, 27, 677-688.
- Mook, W. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y aplicaciones. Instituto geológico y minero de España. Guías y manuales 1

- Morell, I. O. (1995). Origen del termalismo. Geotermómetros. Algunas peculiaridades hidrogeoquímicas de las aguas termales. *Terceras Jornadas sobre Termalismo*.
- Mutlu, H., & Güleç, N. (1998). Hydrogeochemical outline of thermal waters and geothermometry applications in Anatolia (Turkey). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 495–515.
- Ormachea, M., Bhattacharya, P., Sracek, O., Ramos, O., Quintanilla, J. y Bundschuh, J. (2015). Arsenic and other trace elements in the thermal springs and in cold waters from drinking water wells on the Bolivian Altiplano. *Journal of South American Earth Sciences*, 60, 10-20.
- Pantoja, J., & Gómez, A. (2000). Géiseres y manantiales termales de México. *Ciencias*, 59, 23–25.
- Pantoja, J., & Gómez, A. (2004). Los sistemas hidrotermales y el origen de la vida. *Ciencias*, 14-22.
- Paredes, T. J. (2014). Gestión de recursos hídricos termales aplicando lógica difusa. Tesis doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA).
- Pasvanog˘lu, S. & Gu˘ltekin, F. (2012). Hydrogeochemical study of the Terme and Karakurt termal and mineralized waters from Kirs,ehir Area, central Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 66, 169-182.
- Peña, B. (2000). Caracterización de Sistemas Hidrominerales en el Distrito Físico Geográfico Pinar del Río. Universidad de la Habana, Facultad de Geografía.
- Quijano, J. (2007). Manual de Geotermia. *Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorios*.
- Rafighdoust, Y., Eckstein, Y., Moussavi-Haramia, R. Mahmudy-Gharaie, M., Griffith, E. M. y Mahboubi, A. (2015). Isotopic analysis, hydrogeochemistry and geothermometry of Tang-Bijar oilfield springs, Zagros region, Iran. *Geothermics* 55 24–30
- Ramirez-Guzman A., Taran Y.A., Bernard R., Cienfuegos E., Morales P. (2005). Variations in the Cl, SO₄, δD and δ¹⁸O in water from thermal springs near Acapulco, Guerrero, México, related to seismic activity. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*. 16(4), 731-743.
- Sánchez, L. (2000). *Hidrogeoquímica del sistema hidrotermal "San Diego de los Baños - Bermejales", Pinar del Río*. La Habana, Cuba.

- Sánchez, R. M., Mendoza, E., y Orozco, M. E. (2010) Impacto de las reservas territoriales en la zona conurbada de Ixtapan de la Sal y Totonaco, Estado de México. *Revista del CESLA*, 2(13), 555–577.
- Sanliyüksel, D., y Baba, A. (2011). Hydrogeochemical and isotopic composition of a low-temperature geothermal source in northwest Turkey: Case study of Kirkgecit geothermal area. *Environmental Earth Sciences*, 62, 529-540.
- Schäffer, R. y Sass, I. (2014). The thermal springs of Jordan. *Environmental Earth Sciences*, 72, 171-187.
- Schoeller, H. (1962). *Les eaux souterraines*. . Paris: Ed. Masson, .
- Servicio Geológico Mexicano, (SGM). (2011). Texto explicativo de la carta geológico-minera y geoquímica Ixtapan de la Sal E14-A52, Escala 1:50,000 Estado de México y Guerrero. Subdirección de geología, Gerencia de Geología y Geoquímica.
- Siebe, C., Goff, F., Armienta, M., Counce, D., Poreda, R., & Chipera, S. (2007). Geology and hydrogeochemistry of the Jungapeo CO₂-rich thermal springs State of Michoacán, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 163, 1-33.
- SIIMA (2001) *Estudio de evaluación geohidrológica en el acuífero de Tenancingo, Edo. de México.*, Toluca, México., CONAGUA.
- Silberman, M.L., Stewart, J.H., McKee, E.H. (1976) Igneous activity, tectonics and hydrothermal precious-metal mineralization in the Great Basin during Cenozoic time. *AIME Transactions*, 260, 253-263.
- Skopljak, F., & Vlahovic, T. (2012). The origin of mineral waters in Kiseljak near Sarajevo, Bosnia. *Environ Earth Sci*, 66, 809–822.
- Srinivasamoorthy, K.; Vasanthavigar, M.; Chidambaram, S.; Anandhan, P.; Manivannan, R.; Rajivgandhi, R. (2012). Hydrochemistry of groundwater from Sarabanga Minor Basin, Tamilnadu, India. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2(3):193-203.
- Taran, Y. A., & Peiffer, L. (2009). Hydrology, hydrochemistry y geothermal potential of El Chichón volcano-hydrothermal system, Mexico. *Geothermics*, 38(4), 370–378.
- Torres, R.J., Martínez-Estrella, J.I. and Iglesias E.R. (2005) Database of Mexican medium-to low-temperature geothermal resources. *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, April 24 – 29
- UNESCO (1970). *Leyenda internacional para mapas hidrogeológicos*. 101

- Vengosh, A., Helvacı, C., & Karamanderesi, I. (2002). Geochemical constraints for the origin of thermal waters from western Turkey. *Applied Geochemistry*(17), 163-183.
- Virgílio Cruz, J., Freire, P., & Costa, A. (2010). Mineral waters characterization in the Azores archipelago (Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190(3), 353–364.
- Wen, Y., Wang, N. & Hu, Z. (2012). Hydrochemistry of geothermal water in Tianshui and adjacent area, Gansu province, China. *Environmental Earth Sciences*, 67, 1281-1290.
- White, N.C., Leake, M.J., McCaughey, S.N., Parris, B.W. (1995). Epithermal gold deposits of the southwest Pacific: *Journal of Geochemical Exploration*, 54, 87-136.
- Yoshida, K., Hirajima, T., Ohsawa, S., Kobayashi,T., Mishima,T. y Sengen,Y.(2015). Geochemical features and relative B–Li–Cl compositions of deep-origin fluids trapped in high-pressure metamorphic rocks. *Lithos*, (226) 50-64.
- Zhang, G., K., Liu, C. Liu, H., Jin, Z., Han G. y Li, L.(2008). Geochemistry of the Rehai an Ridaian geothermal water, Yunnan Province, China. *Geotermics*, 37, 50-64.