

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias de la Tierra  
con orientación en Geociencias Ambientales**

---

**Hidrología e hidroquímica de tres zonas con potencial  
geotérmico**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Eliana Rosas Verdugo**

Ensenada, Baja California, México  
2017

Tesis defendida por  
**Eliana Rosas Verdugo**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dra. Zayre Ivonne González Acevedo**  
Director de tesis

**Miembros del comité**

**Dr. Edgardo Cañón Tapia**

**M.C. Alejandro Hinojosa Corona**

**Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson**



---

**Dr. Juan García Abdeslem**  
*Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra*

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

*Eliana Rosas Verdugo © 2017*

*Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.*

Resumen de la tesis que presenta **Eliana Rosas Verdugo** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

### **Hidrología e hidroquímica de tres zonas con potencial geotérmico.**

Resumen aprobado por:

---

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo  
**Director de tesis**

La generación de energía eléctrica a través de los recursos geotérmicos se considera una energía alternativa, sin embargo, los procesos magmáticos permiten la existencia de elementos tóxicos. La evaluación de una línea base ambiental permite determinar las condiciones actuales e identificar contaminantes naturales o de origen antropogénico. El objetivo general de esta tesis fue evaluar la hidrología e hidroquímica en tres manifestaciones geotérmicas de distinta naturaleza: roca seca caliente (MRS), lodo caliente (MLC) y asociada a vulcanismo (MAV), para contribuir a establecer su línea base ambiental. En este trabajo, se realizó un análisis hidrológico de las cuencas, se diseñó y ejecutó un muestreo hidrológico. Posteriormente, se hizo un análisis de los resultados de concentraciones de aniones, isótopos estables y parámetros físico-químicos de cuatro campañas de muestreo, finalmente se realizó una interpretación de la concordancia de los resultados hidrológicos e hidroquímicos en las tres zonas de estudio. Los resultados más importantes de este trabajo fueron que no hubo una relación directa de la hidrología y la precipitación. En las tres zonas de estudio se identificaron los cloruros y sulfatos como los aniones más abundantes, asociados principalmente a las manifestaciones geotérmicas. Los nitritos se encontraron en bajas concentraciones en las tres zonas. En Los Negritos y en Aocolco la concentración de nitratos sobrepasó la normatividad de calidad de agua en cinco sitios. El diseño del muestreo hidrológico permitió visualizar concentraciones de aniones y parámetros en la red de escorrentías. En las zonas de estudio, al tener muestras de agua de origen natural y de origen antropogénico e incluso mezcla de ambas, evaluar la concordancia con respecto a la estacionalidad resultó complejo. La evaluación de la hidrología en este estudio para el establecimiento de la línea base ambiental determinó la influencia de las actividades antropogénicas en cada zona y de cada manifestación geotérmica estudiada. Finalmente, este trabajo reveló que la hidrología superficial, la geología, el origen de la actividad geotérmica, así como las condiciones climáticas y las actividades antropogénicas, tienen un efecto directo en la química del agua.

**Palabras clave:** geotermia, línea base ambiental, aniones, isótopos estables

Abstract of the thesis presented **by Eliana Rosas Verdugo** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences

### **Hydrology and hydrochemistry of three zones with geothermal potential.**

Abstract approved by:

---

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo  
**Thesis Director**

The generation of electricity through geothermal resources have been considered as an alternative source of energy. However, magmatic processes may liberate toxic elements to the environment. The environmental baseline evaluation allow to identify natural and anthropogenic pollutants. The general objective of this thesis was to evaluate hydrology and hydrochemistry of three geothermal zones. These zones had geothermal manifestations of different origin: hot dry rock (MRS) Acozulco, Puebla; hot mud (MLC) Los Negritos, Michoacán and associated to volcanism (MAV) El Chichonal, Chiapas. This study was done to contribute with the environmental baseline of each zone. In this thesis, a hydrological analysis of the watersheds was done, a hydrologic sampling was design and executed. Subsequently, result analyses were done for anion concentrations, stable isotopes and physicochemical parameters of four sampling campaigns. Finally, the concordance between hydrology and hydrochemistry results was performed in the three zones of study. The most important results of this study were that there was not direct relation between hydrology and precipitation. In the three zones of study, concentrations of chloride and sulfate were the most abundant, related to each geothermal activity. Nitrites were found at low concentrations in all study zones. In Los Negritos and Acozulco, the nitrate concentration exceeded the norms of water quality in five sites. The hydrological sampling design permitted visualize anion concentrations and parameters in the net of runoff. In the studied zones, the presence of waters of natural and anthropogenic origin or a mixture of both, made difficult the evaluation of seasonality concordance. The hydrological evaluation in this research to establish environmental baseline, determined the influence of anthropogenic influence in each zone and of each geothermal activity. Finally, this work revealed that the superficial hydrology, geology, the origin of each studied geothermal activity, climatic conditions and the anthropogenic activities have a direct effect in the water chemistry.

**Keywords: geothermal, environmental baseline, anions, stable isotopes**

## Dedicatoria

A mi Gael.  
Te amo con todo mi corazón.  
Este trabajo es para ti y es por ti.



A mis padres.  
Todo lo que he conseguido en la vida ha sido por ustedes.  
Se los agradezco infinitamente.  
Los amo.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otórgame el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por admitirme en el programa de posgrado.

A la división de Ciencias de la Tierra por brindarme las facilidades necesarias para mi desempeño profesional.

A la orientación de Geociencias Ambientales por la oportunidad de ampliar los conocimientos en temas ambientales con investigadores de otras divisiones.

Al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo) soportado por recursos del Fondo Sectorial SENER-CONACYT de sustentabilidad energética. Por el apoyo recibido durante mi año de tesis y para el procesamiento y análisis de los parámetros estudiados en este trabajo.

Al proyecto P-25 Desarrollo Sostenible y Evaluación del Impacto Ambiental de tres Yacimientos Geotérmicos con Potencial de Explotación en México por el apoyo durante la salida de campo, los recursos para el análisis de laboratorio y la asistencia al Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana.

Al Comité de Apoyos para estudiantes del CeMIE Geo por otorgarme el soporte económico de tres meses para concluir mi trabajo de tesis.

A la Dra. Zayre González por sus enseñanzas, paciencia y la confianza que deposito en mí. Así como su apoyo para la realización de este trabajo de tesis.

A los miembros del comité: Dr. Edgardo Cañón, M.C. Alejandro Hinojosa, Dr. Cuauhtémoc Turrent por todo su apoyo, consejos, paciencia para mejorar el trabajo de tesis.

A la M.C. Ana Karina Espinoza por el apoyo en el procesamiento de las muestras en el laboratorio.

A Disraely y Francisco por su apoyo y compañía en la salida de campo.

A Estrella por su buena compañía y apoyo durante esta etapa de mi vida.

A mis padres por su apoyo durante esta etapa de mi vida. A mi hermana Lupita porque siempre será un gran ejemplo a seguir. A mi hermana Alma Rosa porque siempre me ha dado buenos consejos.

A la familia que hice Gera, Yessi y Abel. Los guardo en mi corazón y les agradezco enormemente ser parte de mi vida. En especial a los tortolos por sus consejos para mejorar la tesis, además de apoyarme siempre que podían, los quiero mucho chamacos.

A mis amigos de la maestría: Laura, Fernando, Jonathan, Omar, Hugo, Osvaldo, Erik, Iván, Juve, Javier, Karina, Claudia, Dany, Rocío, Leydi, Mayra, Marianggy, Thalía, Martín, Sergio, Hebert y German, los momentos que pase con ustedes los llevo en el alma.

# Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xi
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo general .....	3
1.1.2 Objetivos particulares.....	3
1.2 Antecedentes.....	4
1.2.1 Hidrología.....	4
1.2.2 Hidroquímica.....	4
1.3 Áreas de estudio.....	12
1.3.1 Roca seca caliente, Acoculco, Puebla.....	14
1.3.2 Asociada a vulcanismo, El Chichonal, Chiapas .....	21
1.3.3 Lodo caliente, Los Negritos, Michoacán.....	26
<b>Capítulo 2. Metodología</b>	
2.1 Análisis hidrológico.....	33
2.1.1 Análisis geomorfológico.....	33
2.1.2 Curva hipsométrica.....	35
2.1.3 Pendiente de la cuenca.....	36
2.1.4 Análisis de precipitación .....	36
2.2 Muestreo.....	41
2.2.1 Metodología de muestreo.....	41
2.2.2 Parámetros de campo.....	42
2.2.3 Isótopos estables y aniones.....	
2.3 Mapas de concentración.....	43

**Capítulo 3. Resultados**

3.1 Roca seca caliente, Acozulco, Puebla .....	45
3.1.1 Análisis hidrológico.....	45
3.1.2 Análisis hidroquímico.....	52
3.2 Asociada a vulcanismo, El Chichonal, Chiapas.....	68
3.2.1 Análisis hidrológico.....	68
3.2.2 Análisis hidroquímico .....	74
3.3 Lodo caliente, Los Negritos, Michoacán .....	87
3.3.1 Análisis hidrológico.....	87
3.3.2 Análisis hidroquímico .....	87

**Capítulo 4. Discusión**

4.1 Hidrología superficial .....	106
4.2 Hidroquímica hidrotermal .....	107
4.3 Hidroquímica de actividades antropogénicas.....	109
4.3 Concordancia.....	111

**Capítulo 5. Conclusiones**

<b>Recomendaciones</b> .....	115
	116
<b>Literatura citada</b> .....	116

## Lista de figuras

Figura		Página
1	Esquema de la línea meteórica mundial y factores que modifican la relación $\delta D$ - $\delta 18O$ (McGuirre y McDonnell, 2006) .....	7
2	Desviaciones en composiciones isotópicas comparadas con la Línea Meteórica Mundial y los procesos relacionados (Domenico y Schwartz, 1998) .....	8
3	Composiciones de $\delta D$ y $\delta 18O$ de aguas termales, fumarolas, pozos termales (símbolos no rellenos); y agua meteórica local (símbolos rellenos) (tomado de Kharaka y Mariner, 2005).....	9
4	Localización de las tres zonas con potencial geotérmico estudiadas en esta tesis. En donde se muestran en color gris los límites municipales y el recuadro azul representa la delimitación de las zonas de estudio, (der arriba) Zona Geotérmica Acoculco, Puebla, (izq abajo) Zona Geotérmica Chichonal, Chiapas y (der abajo) Zona Geotérmica de Los Negritos, Michoacán .....	14
5	Mapa geológico de la zona de la caldera Tulancingo-Acoculco (López-Hernández, et al., 2009), donde el recuadro azul marca la zona de estudio en Acoculco .....	15
6	Modelo esquemático del sistema geotérmico del complejo de calderas Tulancingo-Acoculco (López- Hernández, et al., 2009).....	16
7	Escorrentías dentro de la zona de exploración.....	18
8	Tipo de suelo y vegetación en Acoculco (Elaboración propia con datos de INEGI, 2013) .....	20
9	Letrero observado en campo en donde se exhibe el programa PSA. ....	21
10	Geología presente en la zona de influencia de El Chichonal (Peiffer, 2011), el recuadro azul indica la zona de estudio.....	22
11	Efluentes en la zona de estudio. ....	24
12	Usos de suelo y vegetación en la zona de estudio en Chiapas (Elaboración propia con datos de INEGI, 2013).....	26
13	Geología en Los Negritos, Michoacán (Elaboración propia con datos de INEGI. 1982a, INEGI. 1982b).....	28
14	Escorrentías y canales dentro del área de estudio de Los Negritos, Michoacán.....	30
15	Tipos de usos de suelo y vegetación en la zona de estudio en Los Negritos, Michoacán (Elaboración propia con datos de INEGI, 2013).....	32
16	Partes del análisis hipsométrico (izquierda), Curvas hipsométricas (derecha): (1) representa una etapa de desequilibrio, geológicamente joven, (2) representa una etapa de equilibrio, cuencas maduras de pie de montaña y (3) cuenca de valle o erosionada (tomada de Campos-Aranda, 1992). ....	35
17	Localización estaciones climatológicas en operación y suspendidas en la zona de estudio, así como de la estación número 13082 (Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2016).....	37

18	Localización de estaciones en operación y suspendidas, cercanas a la zona de estudio, así como de la estación 7365 (Elaboración propia con datos de CONAGUA e INEGI) .....	38
19	Localización de estaciones en operación y suspendidas, así como de la estación utilizada para realizar análisis de precipitación (16141) (Elaboración propia con datos de CONAGUA e INEGI).....	39
20	Hidrología de la cuenca 26Dv y 27Bc en la zona de estudio de Acoculco.....	45
21	Curva hipsométrica cuenca 27Bc (Puebla).....	46
22	Curva hipsométrica cuenca 26Dv (Puebla) .....	46
23	Pendientes en la cuenca 26Dv y 27Bc de la zona de estudio en Acoculco, Puebla, donde se muestra el acercamiento 1 que se encuentra en la parte superior derecha.	47
24	Perfil topográfico del cauce principal de la cuenca 26Dv (arriba) y de la cuenca 27Bc (abajo) (tomado del portal de SIATL), donde el recuadro rojo indica la localización aproximada del cauce dentro de la zona de estudio. ....	48
25	Gráfica de lluvia anual acumulada en la zona de Acoculco datos correspondientes a la estación de CONAGUA 13082.....	49
26	Precipitación promedio mensual registrada en la estación 13082 periodo 1996-2016.....	50
27	Precipitación mensual acumulada (CONAGUA estación 13082) durante el año 2015 y 2016, en donde las flechas indican el mes en donde se efectuaron los muestreos.	51
28	Precipitación diaria durante los meses de muestreo.....	52
29	Relación isotópica de $\delta D$ y $\delta^{18}O$ en las cuatro campañas de muestreo en Acoculco	54
30	Foto donde se muestra la laguna donde se localiza el punto 5. ....	55
31	Foto en donde se observa la poza café.....	57
32	Vista del punto 14, al Este de la manifestación hidrotermal de Acoculco.....	57
33	Valores de pH durante los cuatro campañas de muestreo en Acoculco, Puebla .....	58
34	Valores de conductividad eléctrica en los muestreos de Acoculco, Puebla .....	59
35	Valores de potencial óxido-reducción (ORP) en los muestreos de Acoculco, Puebla	60
36	Foto en donde se observa la poza azul. ....	62
37	Nitratos de las cuatro campañas de muestreo en la zona de estudio Acoculco, Puebla	63
38	Fosfatos en los muestreos en la zona de estudio de Acoculco, Puebla.....	64
39	Concentración de cloruros en la zona de estudio de Acoculco, Puebla .....	65
40	Concentración de fluoruros en la zona de estudio de Acoculco, Puebla.....	66
41	Concentración de sulfatos en la zona de estudio de Acoculco, Puebla. ....	67
42	Hidrología de la cuenca 30De en la zona de estudio de El Chichonal, Chiapas .....	68
43	Curva hipsométrica cuenca 30De (Chiapas).....	69
44	Pendientes en la cuenca 30De de la zona de estudio en El Chichonal, Chiapas. ....	69

45	Perfil topográfico del cauce principal de la cuenca 30De (tomado del portal de SIATL), donde el recuadro rojo indica la localización aproximada del cauce dentro de la zona de estudio .....	70
46	Gráfica de lluvia anual en la zona de Chiapas con datos de la estación 7365. ....	71
47	Precipitación promedio mensual del periodo 1996-2016 de la estación 7365. ....	72
48	Precipitación mensual acumulada durante el año 2015 y 2016 en la zona de estudio El Chichonal, donde las flechas marcadas representan la fecha de muestreo con datos de la estación 7365.....	73
49	Precipitación diaria durante los meses de muestreo en El Chichonal, Chiapas, las flechas indican los días cuando se realizaron los muestreos con datos de la estación 7365.....	74
50	Escorrentía conocida como agua amarilla presente en El Chichonal, Chiapas.....	76
51	Relación isotópica de $\delta D$ y $\delta 18O$ en las muestras durante las 4 campañas de campo en El Chichonal, Chiapas.....	77
52	Valores de pH durante las cuatro campañas de muestreo en El Chichonal, Chiapas	79
53	Valores de conductividad eléctrica en los muestreos de El Chichonal, Chiapas.....	80
54	Valores de Potencial Óxido-Reducción (ORP) en los muestreos de El Chichonal, Chiapas. ....	81
55	Nutrientes durante la campaña de marzo de 2016 en la zona de estudio El Chichonal, Chiapas .....	83
56	Concentración de cloruros en la zona de estudio de El Chichonal, Chiapas.....	84
57	Concentración de fluoruros en la zona de estudio de El Chichonal, Chiapas. ....	85
58	Concentración de sulfatos en la zona de estudio de El Chichonal, Chiapas. ....	86
59	Hidrología de la cuenca 12Da en la zona de estudio de Los Negritos, Michoacán.....	87
60	Curva hipsométrica cuenca 12Da (Los Negritos, Michoacán).....	88
61	Pendientes observadas en la cuenca 12Da de la zona de estudio Los Negritos, Michoacán .....	88
62	Perfil topográfico del cauce principal de la cuenca 12Da, el recuadro rojo indica la zona de estudio, adquirido del portal SIATL. ....	89
63	Gráfica de lluvia anual acumulada con promedios móviles en la zona de Los Negritos con datos de CONAGUA de la estación Yurécuaro 16141 .....	90
64	Ciclo de precipitación anual observado en el periodo de 1990 a 2016 (estación Yurécuaro 16141).....	91
65	Precipitación mensual acumulada durante el año 2015 y 2016 (estación Yurécuaro 16141), donde las flechas indican las temporadas de muestreo.....	92
66	Precipitación diaria durante los meses de muestreo, donde las flechas indican los días de muestreo (datos de la estación Yurécuaro 16141).....	93
67	Relación isotópica de $\delta D$ y $\delta 18O$ en las muestras durante las 4 campañas de campo en Los Negritos, Michoacán. ....	95

68	Valores de pH durante las cuatro campañas de muestreo en Los Negritos, Michoacán .....	97
69	Valores de conductividad eléctrica en los muestreos de Los Negritos, Michoacán.	98
70	Valores de Potencial Óxido-Reducción (ORP) en los muestreos de Los Negritos, Michoacán .....	99
71	Concentración de nitratos en la zona de estudio Los Negritos, Michoacán. ....	101
72	Concentración de fosfatos en la zona de estudio Los Negritos, Michoacán.....	102
73	Concentración de cloruros en la zona de estudio de Los Negritos, Michoacán .....	103
74	Concentración de fluoruros en la zona de estudio de Los Negritos, Michoacán.....	104
75	Concentración de sulfatos en la zona de estudio de Los Negritos, Michoacán.....	105
76	Ciclo de precipitaciones en las tres zonas de estudio .....	106
77	Promedios con valores mínimos y máximos (en ppm) del agua característica de las zonas hidrotermales (Chiapas=MAV, Puebla=MRS y Michoacán=MLC) .....	108
78	Composiciones isotópicas de las aguas correspondientes a las manifestaciones superficiales, los círculos rojos en el punto 4, 5, 6 de la MAV (octubre 2015), los círculos azules al punto 1 de la MLC (durante todas las campañas) y los círculos amarillos a los puntos tomados en la MRS (durante todas las campañas) (Modificado de Kharaka y Mariner, 2005) .....	108
79	Estacionalidad en los puntos que se muestrearon las cuatro temporadas en la zona de la MLC (Los Negritos, Michoacán) .....	111
80	Estacionalidad en el punto correspondiente a la poza azul en la MRS (Acoculco, Puebla) .....	112

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Límites máximos permisibles de calidad de agua según la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) y valores de referencia de concentraciones según la OMS (OMS, 2006).....	10
2	Relación del tamaño de la cuenca (Campos, 1992). .....	34
3	Rango del número de secuencias (U) para un registro homogéneo (Campos-Aranda, 1992) .....	40
4	Número de muestras de agua por sitio.....	42
5	Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas en la zona de estudio Acoculco.....	49
6	Resultados de $\delta^{18}O$ y $\delta D$ en la zona de estudio Acoculco, Puebla.....	53
7	Valores de parámetros fisicoquímicos para la zona de Acoculco, Puebla .....	56
8	Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas en la zona de estudio El Chichonal, Chiapas.....	71
9	Resultados de $\delta^{18}O$ y $\delta D$ en la zona de estudio El Chichonal, Chiapas. ....	71
10	Resultados de fisicoquímicos para El Chichonal, Chiapas. ....	75
11	Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas en los datos de Michoacán.....	78
12	Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas en la zona de estudio Los Negritos, Michoacán .....	90
13	Resultados de $\delta^{18}O$ y $\delta D$ en la zona de estudio Los Negritos, Michoacán.....	94
14	Valores de parámetros fisicoquímicos para la zona de Los Negritos, Michoacán .....	96

## Capítulo 1. Introducción

---

Los recursos geotérmicos se clasifican de acuerdo a los procesos que los originan. Algunas clasificaciones de estos recursos: hidrotermales convectivos, sistemas dominados por fase de vapor, sistemas dominados por agua en fase líquida, cuencas sedimentarias, recursos geopresurizados, recursos radiogénicos, recursos de roca seca y recursos de magma (Lund, 2007). Cada uno de estos tipos presenta diferentes manifestaciones en la superficie, como manantiales, fumarolas, géiser, entre otros. Las características inherentes de los recursos geotérmicos determinan la factibilidad de los mismos para su aprovechamiento en diferentes usos, desde los directos hasta la generación de energía eléctrica. En el caso de la producción de energía eléctrica, el potencial geotérmico se basa en la cantidad de potencia derivada de parámetros naturales y del clima, que representan el límite superior de la potencia que puede producirse de un recurso en relación con sus características físicas (Hiriart, 2011).

El uso de recursos naturales para consumo propio o para actividades económicas implica afectaciones al ambiente. Las zonas con actividad hidrotermal natural no son la excepción. La producción de energía puede provocar afectaciones al ambiente. La mayoría de los impactos del desarrollo geotérmico son positivos. Aunque existen impactos ambientales negativos menores, con la aplicación y monitoreo de medidas estos se pueden minimizar. Las cuestiones ambientales que normalmente se abordan durante el desarrollo de los campos geotérmicos incluyen la calidad del aire, la calidad del agua, la eliminación de desechos, los riesgos geológicos, el ruido y los recursos biológicos y el uso del suelo (Goff et al., 2011). En particular destacan la subsidencia del terreno y sismicidad, y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Barbier, 2002).

Las características inherentes a cada sitio con potencial geotérmico, se deben a la influencia de procesos magmáticos y otros factores. Estos procesos ocasionan que existan elementos que implican una toxicidad al ser humano (Volke-Sepúlveda, et al., 2005). Al evaluar una línea base antes del inicio de las actividades de aprovechamiento se pueden determinar las condiciones actuales e identificar si existen evidencias de contaminantes con una fuente natural o una fuente antropogénica en los sitios a evaluar. En otras palabras, al realizar una evaluación previa se distinguirá entre las afectaciones en el ambiente que existían antes de iniciar una explotación, para poder tener una comparación una vez iniciada la explotación y determinar los impactos que ocasiona la actividad. La realización de un monitoreo previo puede ser entonces un impulsor para evitar o atenuar afectaciones encontradas una vez implementada una planta de aprovechamiento del recurso geotérmico.

Independientemente de la explotación de un yacimiento geotérmico, durante los procesos magmáticos que originan las aguas hidrotermales se desprenden distintos elementos que pueden ser tóxicos al ambiente y a los seres vivos. La determinación de elementos tóxicos es importante debido a que se movilizan y pueden ocasionar problemas de intoxicación (Volke-Sepúlveda, et al., 2005), o de degradación ambiental. El conocer la distribución de estos elementos en el medio, puede servir para alertar a la población acerca de las fuentes de enriquecimiento de elementos tóxicos y de esta forma evitar problemas de salud.

Debido a que existe la interacción entre el agua meteórica y el agua hidrotermal, la composición química de ambas aguas se modifica. Los elementos tóxicos que se encuentran en el agua hidrotermal pueden transportarse al agua superficial. En las zonas de estudio el agua superficial tiene gran importancia, debido a que es utilizada por la población con fines recreativos, para la producción agrícola y en actividades de ganadería. Es por lo tanto importante identificar la distribución de elementos tóxicos, para determinar otras fuentes como lo son las actividades antropogénicas.

La presente tesis se enmarca dentro del proyecto: *“Desarrollo Sostenible y Evaluación del Impacto Ambiental de tres Yacimientos Geotérmicos con Potencial de Explotación en México”* del Centro Mexicano de Innovación de Energía Geotérmica (CeMIE-Geo). Dicho proyecto pretende integrar variables ambientales, socioculturales y económicas para la planeación y diseño de plantas geotérmicas en estas tres zonas del territorio mexicano mediante un monitoreo ambiental. Esta tesis tiene como objetivo evaluar la hidrología superficial e hidroquímica de esos tres sitios con potencial geotérmico. Puesto que los recursos geotérmicos de las áreas de estudio no han sido explotados hasta el momento, los resultados de este trabajo contribuyen al establecimiento de la línea base ambiental. Otros estudios asociados al mismo proyecto general aportaran datos relevantes a otros componentes del medio, tales como suelo y vegetación.

Para cumplir con el objetivo trazado para esta tesis, el análisis hidrológico se integró por medio de la evaluación geomorfológica de la cuenca y un análisis del ciclo anual de precipitación de cada sitio de estudio. La evaluación de la hidroquímica en estos sitios es importante debido a que los sistemas se encuentran relacionados a la dinámica de su hidrología, que produce un intercambio constante de recarga de los flujos subterráneos y un aporte del flujo subterráneo a la superficie. En relación a la hidroquímica, en este estudio se evaluaron los siguientes parámetros: isótopos estables, pH, conductividad eléctrica, potencial óxido-reducción, nitratos, nitritos, fosfatos, cloruros, fluoruros y sulfatos en el agua superficial en cada sitio de estudio, para determinar su concentración y la distribución en la hidrología superficial.

Se exponen los resultados de cuatro muestreos llevados a cabo en dos años, en época de secas y de lluvia, a fin de comparar la estacionalidad correspondiente, por medio de gráficas y mapas de interpolaciones. Los tres sitios a evaluar se encuentran en diferentes entidades de la República Mexicana, el primero se encuentra en Puebla y se le conoce como Acoculco, el segundo se encuentra en el estado de Chiapas, que tendrá por nombre en este estudio como El Chichonal y el último se encuentra en Michoacán y tiene el nombre de Los Negritos.

Esta tesis está integrada por cinco capítulos. El primero presenta los antecedentes, que integra los conceptos más importantes para lograr una comprensión de las temáticas abordadas en esta investigación. Dentro de este capítulo se exponen las características particulares de cada sitio de estudio, se define la justificación del trabajo y se establecen los objetivos planteados. En el capítulo número 2 se muestran los procedimientos y métodos empleados para el análisis hidrológico, los muestreos y los mapas de concentraciones. El capítulo de resultados es el número tres, en donde se encuentran los resultados del análisis hidrológico y la caracterización hidroquímica de los tres sitios de estudio. El capítulo 4 expone las discusiones en donde se contrastan las diferencias de las tres zonas de estudio. Por último, se presentan las conclusiones del estudio y la literatura citada.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

Evaluar la hidrología e hidroquímica en tres manifestaciones geotérmicas de distinta naturaleza: roca seca caliente, lodo caliente y asociada a vulcanismo.

### **1.1.2. Objetivos particulares**

- Realizar un análisis hidrológico de las cuencas.
- Diseñar y ejecutar un muestreo hidrológico en cada zona de estudio.
- Analizar los resultados de concentraciones de aniones, isótopos estables y parámetros físico-químicos de cuatro campañas de muestreo.
- Realizar una interpretación de la concordancia entre los resultados hidrológicos e hidroquímicos obtenidos en las cuatro campañas de muestreo.

## **1.2. Antecedentes**

### **1.2.1. Hidrología**

La Hidrología es la ciencia que se enfoca al ciclo del agua y en los procesos involucrados en su parte continental, describe y predice las variaciones espaciales y temporales del agua y su movimiento sobre y debajo la superficie terrestre, incluyendo los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar a lo largo de su trayectoria (Digman, 2015). El movimiento del agua y su interacción con el medio físico y biótico que conforman el ambiente se conoce como ciclo hidrológico. El ciclo hidrológico se compone por los procesos asociados a los cambios que sufre el agua en sus características físicas, químicas y biológicas al desplazarse por diversos medios (Breña y Jacobo, 2006).

El agua, una vez precipitada tiene diferentes destinos al desplazarse. Puede ser transpirada por la vegetación, afectada por procesos de evaporación, infiltrada por el suelo, en ciertos casos de permeabilidad alta se produce un interflujo o percolar hasta el agua subterránea. En el caso que se produzca una corriente muy grande o muy rápida para la infiltración, el agua se mueve en la superficie del suelo formando escorrentía superficial (Drever, 1997).

El movimiento de la escorrentía superficial ocurre sobre cuencas, mismas que corresponden al área geográfica que se delimita por una línea divisoria conocida como el parteaguas, la cual capta la precipitación y la conduce a través de escurrimientos hacia un mismo punto de salida (Hansen y Corzo, 2011). Las características de la cuenca son las que condicionan el transporte del flujo a través de los escurrimientos (Aparicio, 2001). Es decir, que los rasgos geomorfológicos como: pendiente, elevación media, características de drenaje, características del cauce principal, tipo de suelo, vegetación presente, usos de suelo y red hidrográfica, influyen directamente en el comportamiento del agua superficial.

### **1.2.2. Hidroquímica**

La hidroquímica estudia la composición química del agua y los procesos en los ambientes terrestres y acuáticos que la controlan. La composición del agua es adquirida en respuesta a la integración de reacciones químicas, físicas y biológicas dentro de los ecosistemas, así como los ocasionados por factores antropogénicos, como el cambio de uso de suelo y el cambio climático, (Christophersen, et al., 1994). La química de muchos ríos, se encuentra fuertemente influenciada por descargas domésticas y de residuos industriales (Drever, 1997). Los cambios naturales que generalmente se presentan en la química del agua

superficial se ocasionan por procesos biológicos y afectan a los nutrientes, el contenido de sílice y a algunos elementos traza (Drever, 1997).

La composición química de la hidrología superficial se relaciona a sistemas geológicos profundos, como el hidrotermalismo. Estos sistemas se alimentan de la recarga del flujo subterráneo y del flujo subsuperficial, gracias a la infiltración y percolación del agua superficial (Breña y Jacobo, 2006). Además existe un aporte del flujo subterráneo hacia la superficie que se da a través de los poros del perfil litológico y de las fallas y fracturas presentes. Los cambios que sufre la química del agua en un flujo río abajo, son relativamente pequeños respecto a los cambios que se dan en la zona del suelo o en el acuífero. Esto es debido a que el tiempo de residencia del agua en el río es relativamente corta, en comparación con el tiempo de residencia en el acuífero.

Los depósitos hidrotermales se originan a partir de fluidos calientes ricos en metales que resultan de procesos magmáticos en estadios tardíos. Durante la solidificación del magma se acumulan líquidos e iones metálicos cerca de la parte superior de la cámara magmática. Debido a su movilidad, estas soluciones ricas en iones pueden transportarse grandes distancias a través de las rocas para finalmente depositarse, generalmente como sulfuros de varios metales (Tarbuck y Lutgens, 2005). Los fluidos disueltos y el agua contenida en el magma pueden transportarse durante las etapas tardías de cristalización y enfriamiento del magma, ocupando espacios en las rocas, como grietas y poros. La composición de estos fluidos se caracteriza por presentar sales disueltas, gases y metales. Los fluidos hidrotermales no necesariamente se originan en su totalidad dentro del magma. Algunas veces la circulación del agua sub-superficial es calentada lo suficiente por un magma cercano, el cual disuelve, concentra y re-deposita metales (Montgomery, 2011).

### ***Relaciones isotópicas***

Los isótopos estables del agua son añadidos naturalmente en la cuenca por la lluvia y eventos de deshielo. Éstos pueden ser utilizados para identificar diferentes masas de aire y agua que contribuyen a la formación de una cuenca. Debido a que las variaciones isotópicas cambian a través de los procesos de fraccionamiento de mezcla, misma que ocurre durante la evaporación y condensación. Esto permite la determinación del origen del agua que alimenta la cuenca (McGuire y McDonnell, 2008).

Los isótopos estables son átomos del mismo elemento con mismo número de protones y electrones pero que difieren en el número de neutrones, a diferencia de los radioactivos, no sufren decaimiento radioactivo. La fórmula que se considera la más ligera y abundante en el agua, está integrada por los

isótopos de hidrógeno 1 y oxígeno 16 ( $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ). Existen otras composiciones isotópicas del agua, que se consideran más pesadas, las que incorporan: deuterio (D,  $^2\text{H}$ ), y oxígeno 17 o 18 ( $^{17}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ ).

La abundancia de los isótopos estables de oxígeno ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ ) en la hidrósfera es de 99.759%, 0.037% y 0.204% respectivamente. En el caso del hidrógeno, el isótopo  $^1\text{H}$  presenta una abundancia de 99.985%, mientras que el D de 0.015%. La abundancia isotópica se puede expresar en función a las relaciones isotópicas (Mook, 2002). Las relaciones isotópicas sirven para describir las composiciones isotópicas y se utilizan valores delta ( $\delta$ ), que representa desviaciones relativas respecto a un valor estándar:

$$\delta = 1000 \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} \right) - 1 \quad (1)$$

Donde R es la relación isotópica del pesado entre el ligero

$$R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \quad \text{ó} \quad R = \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \quad (2)$$

El estándar utilizado es el VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), por lo que entonces la ecuación 1 quedaría se representa por la siguiente ecuación:

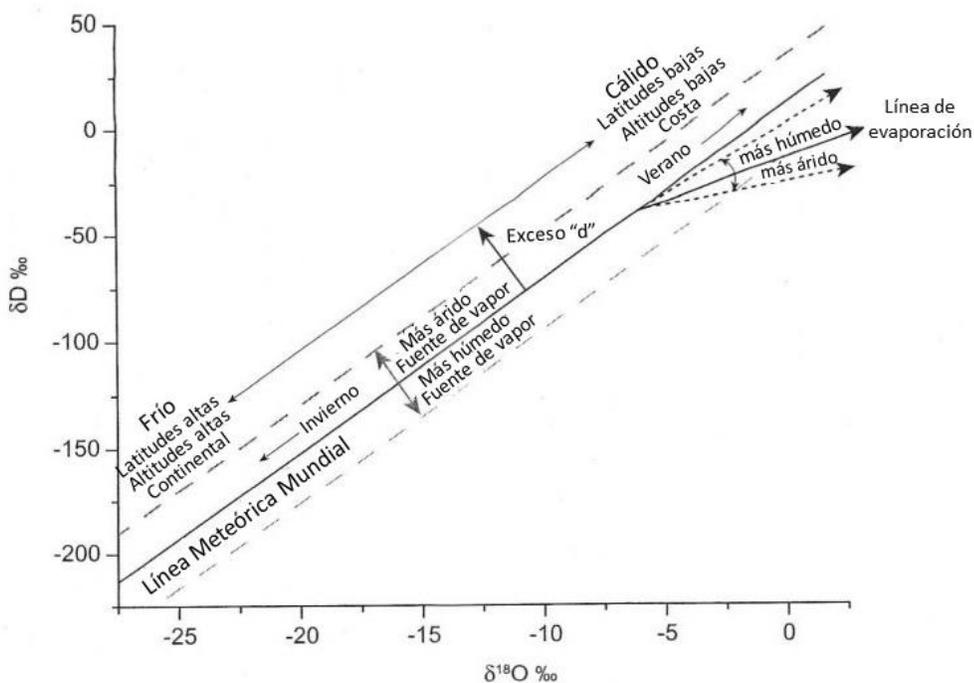
$$\delta_{\text{VSMOW}} = 1000 \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{VSMOW}}} \right) - 1 \quad (3)$$

Generalmente  $\delta$  es un valor pequeño, que se expresa en ‰ (por mil,  $10^{-3}$ ). Las notaciones para estas ecuaciones son: hidrógeno ( $\delta\text{D}$ ) y en el caso del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ). Los rangos de variabilidad de las relaciones isotópicas del agua aplicando el estándar mencionado anteriormente son:  $-450\text{‰} < \delta\text{D} < +100\text{‰}$  y  $-50\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < +50\text{‰}$  (Mook, 2002).

Los cambios en las concentraciones del  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  en las aguas meteóricas se encuentran correlacionadas (Dansgaard, 1964). Craig (1961), recopiló los datos de las relaciones isotópicas de aproximadamente 400 muestras de agua de ríos, lagos, lluvia y nieve en varios países, observando una correlación lineal entre el  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , conocida como la Línea Meteórica Mundial (LMM). La ecuación de la recta esta expresada como:

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + d \quad (4)$$

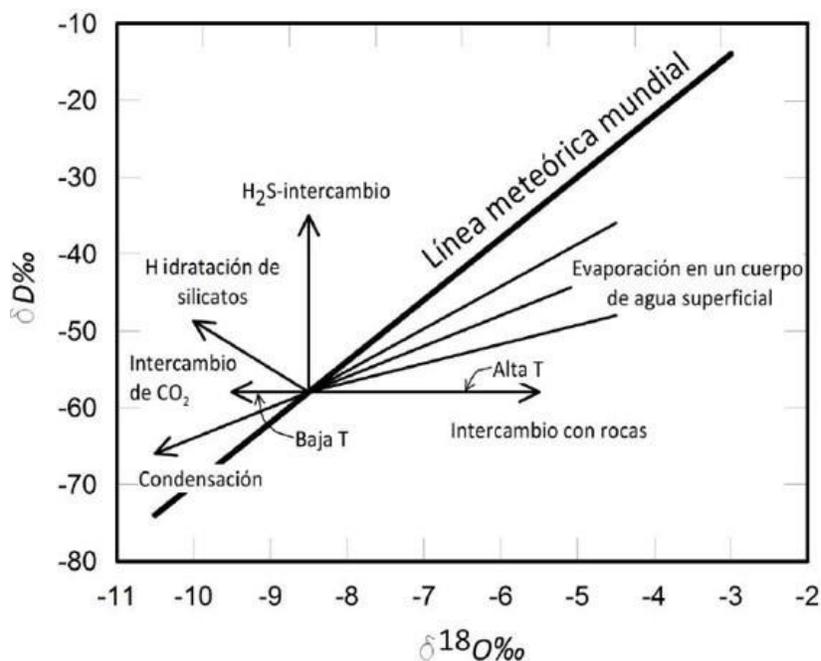
Donde “d” expresa el exceso de deuterio. En la Figura 1, se muestran las condiciones por las cuales el exceso de deuterio puede ser alterado, se observa que la condición de vapor es la limitante principal. Esta a su vez, se ve afectada por condiciones climáticas que están relacionadas con cambios de altitud, latitud y cambios estacionales (McGuire y McDonnell, 2008).



**Figura 1.** Esquema de la línea meteórica mundial y factores que modifican la relación  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  (McGuire y McDonnell, 2006).

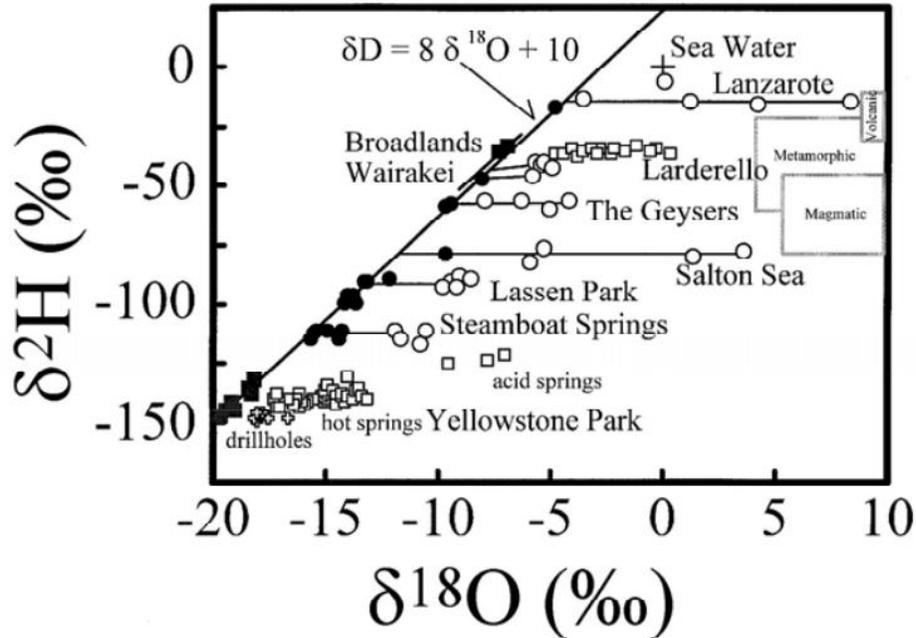
Cabe resaltar que la LMM se considera la base de la interpretación de datos isotópicos, aunque se recomienda que para mayor detalle, se establezca una línea meteórica regional. Una muestra de agua que tenga una composición isotópica que cae sobre la LMM se asume que su origen es principalmente atmosférico y no ha sido afectada por otros procesos. En la mayoría de los casos, estos procesos se pueden determinar por la distribución espacial de los datos.

En la Figura 2, se muestran algunos procesos que ocurren en el agua y que pueden alterar las relaciones isotópicas como pueden ser: intercambio de  $CO_2$ , intercambio de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), hidratación de silicatos, condensación, evaporación e intercambio con rocas (Domenico y Schwartz, 1998).



**Figura 2.** Desviaciones en composiciones isotópicas comparadas con la Línea Meteórica Mundial y los procesos relacionados (Domenico y Schwartz, 1998).

Los valores de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  son herramientas útiles para determinar el origen, naturaleza, distribución e interacciones de fluidos en sistemas geotérmicos (Kharaka y Mariner, 2005). El agua en sistemas geotérmicos de alta temperatura, tiene un valor de  $\delta D$  igual al de la precipitación; fuente dominante que alimenta los sistemas geotérmicos (White, 1974), pero presenta distintas cantidades de enriquecimiento de  $\delta^{18}O$ , debido al intercambio de oxígeno en la molécula del agua con minerales de silicato y carbonato en las rocas confinantes (Craig, 1961). Esto se puede observar en la Figura 3, en donde se aprecia una distribución distinta al agua meteórica local teniendo un componente horizontal que indica una variación de  $\delta^{18}O$ .



**Figura 3.** Composiciones de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  de aguas termales, fumarolas, pozos termales (símbolos no rellenos); y agua meteórica local (símbolos rellenos) (tomado de Kharaka y Mariner, 2005).

### **Calidad de agua**

La calidad de agua se expresa en términos cuantificables y normativos en la composición, la cual se modifica por su interacción con la naturaleza y las actividades humanas (Novotony, 2003). Según los términos cuantificables y los parámetros que se miden, se determinan los usos que se le pueden dar. La Organización Mundial de la Salud (OMS), a través de las *Guías para la calidad del agua potable*, explica los requisitos necesarios para garantizar la inocuidad del agua, incluidos los procedimientos mínimos y valores de referencia específicos (OMS, 2006). Los valores de referencia expresan la concentración de un componente que no ocasiona un riesgo para la salud superior al tolerable, cuando se consume durante toda una vida (OMS, 2006), por lo tanto al superar estos valores se considera tóxica.

En México, existe normatividad relacionada con el agua en donde se especifican distintos parámetros de calidad dependiendo su uso y su destino del agua. En particular destacan:

- a) La normatividad referente a los límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales, la protección ambiental para prevenir contaminación en mantos acuíferos y agua superficial.
- b) La conservación del recurso, a los límites de calidad para usos del agua.
- c) Al manejo del recurso en redes, así como la calidad de agua en playas.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece los límites máximos permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, y se especifica que el agua para uso y consumo humano es aquella que no contiene contaminantes químicos o agentes infecciosos y no causa efectos nocivos al ser humano (DOF, 1994).

En la Tabla 1 se muestran los límites máximos permisibles para uso potable según esta Norma y los que recomienda la OMS (2006). En el caso del pH no suele afectar directamente a los consumidores, sin embargo es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua, siendo su valor óptimo generalmente de 6,5 a 9,5. La OMS no recomienda un límite para las concentraciones de cloruros y sulfatos, por lo que se consideran que no son elementos dañinos para la salud.

**Tabla 1.** Límites máximos permisibles de calidad de agua según la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1994) y valores de referencia de concentraciones según la OMS (OMS, 2006).

EPT	Uso potable del agua		Manejo post cosecha
	NOM-127-SSA1-1994 (mg/L)	OMS (mg/L)	NOM-EM-034-FITO-2000
Fluoruros	1.5	1.5	1.5
Cloruros	250	-	250
Sulfatos	400	-	400
Nitratos	10	50	10
Nitritos	1	3	1
pH	6.5-8.5	6.5-9.5*	

\*Valor óptimo en este rango.

En el caso del uso del agua para la agricultura, estos límites suelen ser menos estrictos y dependen del tipo de cultivo en donde se usará. El agua de uso agrícola es definida por la FDA (por sus siglas en inglés *Food and Drug Administration*), como: “... el agua que se utiliza en los cultivos (campo, viñedos, huerto, etc.) para fines agrícolas, como pueden ser el riego, el control de la transpiración (enfriamiento), para proteger a la planta contra las heladas o para administrar fertilizantes o plaguicidas” (1998).

Dentro de la Norma Oficial Mexicana (con carácter de emergencia) NOM-EM-034-FITO-2000 “Requisitos y especificaciones para la aplicación y certificación de buenas prácticas agrícolas en los procesos de producción de frutas y hortalizas frescas”, se especifican los niveles máximos permisibles de contaminantes básicos, metales pesados, coliformes fecales y huevos de helminto para el agua de riego y el agua para el manejo postcosecha (Tabla 1).

Algunos componentes contaminantes en agua superficial provienen de la actividad agrícola. En su mayoría provienen de los plaguicidas, sin embargo los nitratos liberados por las plantas en descomposición y la

aplicación de fertilizantes pueden originar exceso de nitratos (OMS, 2006). Los nitratos y nitritos son iones del ciclo del nitrógeno, el ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es una forma estable de nitrógeno, que regularmente proviene de sistemas oxigenados, mismos que pueden ser reducidos por acción microbiana. El ion nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) contiene nitrógeno en un estado relativamente inestable. Los procesos químicos y biológicos pueden reducir el nitrito a varios componentes u oxidarlo a nitrato (WHO, 2011). Los nitratos son utilizados para muchos procesos productivos, entre los cuales destaca su uso para fertilizantes inorgánicos, como agentes oxidantes en la producción de explosivos y en la creación de vidrios. Los nitratos se presentan naturalmente en las plantas como un nutriente. Los nitratos pueden estar en el agua superficial y en el agua subterránea como consecuencia de la actividad agrícola, descarga de agua tratada y de la oxidación del nitrógeno presente en aguas residuales domésticas (WHO, 2011).

Los fosfatos han sido reportados como un factor limitante del crecimiento bacteriano en agua potable (Miettinen et al., 1997; Sathasivan et al., 1997), por lo que un aumento en la concentración de fosfatos en el agua, produce un incremento en el crecimiento de bacterias heterotróficas (Miettinen et al., 1997). La concentración de fosfatos en agua superficial no contaminada generalmente se encuentra entre 10 a 50  $\mu\text{g/L}$  (Miettinen et al., 1997).

Los sulfatos se presentan naturalmente en numerosos minerales incluyendo la barita ( $\text{BaSO}_4$ ), epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Greenwood y Earnshaw, 1984). Éstos contribuyen al contenido mineral de agua potable (WHO, 2004). Los sulfatos que se originan de residuos industriales se introducen al ambiente mediante precipitación desde la atmósfera, sin embargo, las concentraciones mayores de sulfatos en el agua se encuentran en aguas subterráneas y provienen de fuentes naturales. La ingesta diaria media de sulfato procedente del agua que se consume, el aire y los alimentos es de 500 mg aproximadamente. A pesar de esto, los datos existentes no permiten determinar la concentración de sulfato en agua de consumo que produzca efectos adversos para la salud de las personas (OMS, 2006).

Los cloruros están distribuidos en la naturaleza como sal de sodio ( $\text{NaCl}$ ), potasio ( $\text{KCl}$ ) y calcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Las fuentes principales de cloruros en el agua superficial son principalmente antropogénicas como el uso de fertilizantes inorgánicos, efluentes de tanques sépticos, efluentes industriales, irrigación e intrusión salina. La OMS no considera un valor de referencia para efectos adversos para la salud de los cloruros, debido a que la toxicidad no ha sido observada en los humanos (WHO, 2003b).

Los fluoruros son encontrados en todos los cuerpos de agua naturales. En ríos y lagos generalmente se encuentran en concentraciones menores a 0.5 mg/L. Aguas con altas concentraciones de fluoruros se

presentan en grandes extensiones geográficas y se asocian a: sedimentos de origen marino en áreas montañosas, rocas volcánicas, graníticas y gneis, así como a actividad volcánica (Fawell et al., 2006).

Además de los aniones, cloruro, fluoruro, sulfato y nutrientes (nitratos, nitritos y fosfatos), en esta tesis también se consideraron los resultados de: potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, temperatura y potencial óxido reducción (ORP). En este apartado se describen sus principales características y la importancia de cada uno.

El pH de una solución es el logaritmo negativo de la actividad del ion hidrógeno:  $\text{pH} = -\log (\text{H}^+)$ . En soluciones diluidas la actividad del ion hidrógeno es aproximadamente igual a la concentración del mismo. En la mayoría de las aguas naturales el pH se controla por el sistema de equilibrio dióxido de carbono-bicarbonato-carbonato, el incremento de  $\text{CO}_2$  disminuye el pH. Una exposición a valores extremos de pH puede ocasionar irritación en ojos, piel y membranas mucosas (WHO, 2003a). El pH de la precipitación pluvial no contaminada suele estar entre 5.5 a 6.5 unidades significativamente menor que el pH que se presenta en el mar (7.5-8.4) (Snoeyink y Jenkins, 2010).

La conductividad eléctrica se refiere a la capacidad de un líquido para conducir la electricidad y es un indicador de la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua. La presencia de compuestos inorgánicos produce una mayor conductividad. Asimismo, permite identificar la salinidad del agua, en el caso del agua de mar la conductividad varía de 50000 a 60000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que un agua doméstica va de 500 a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

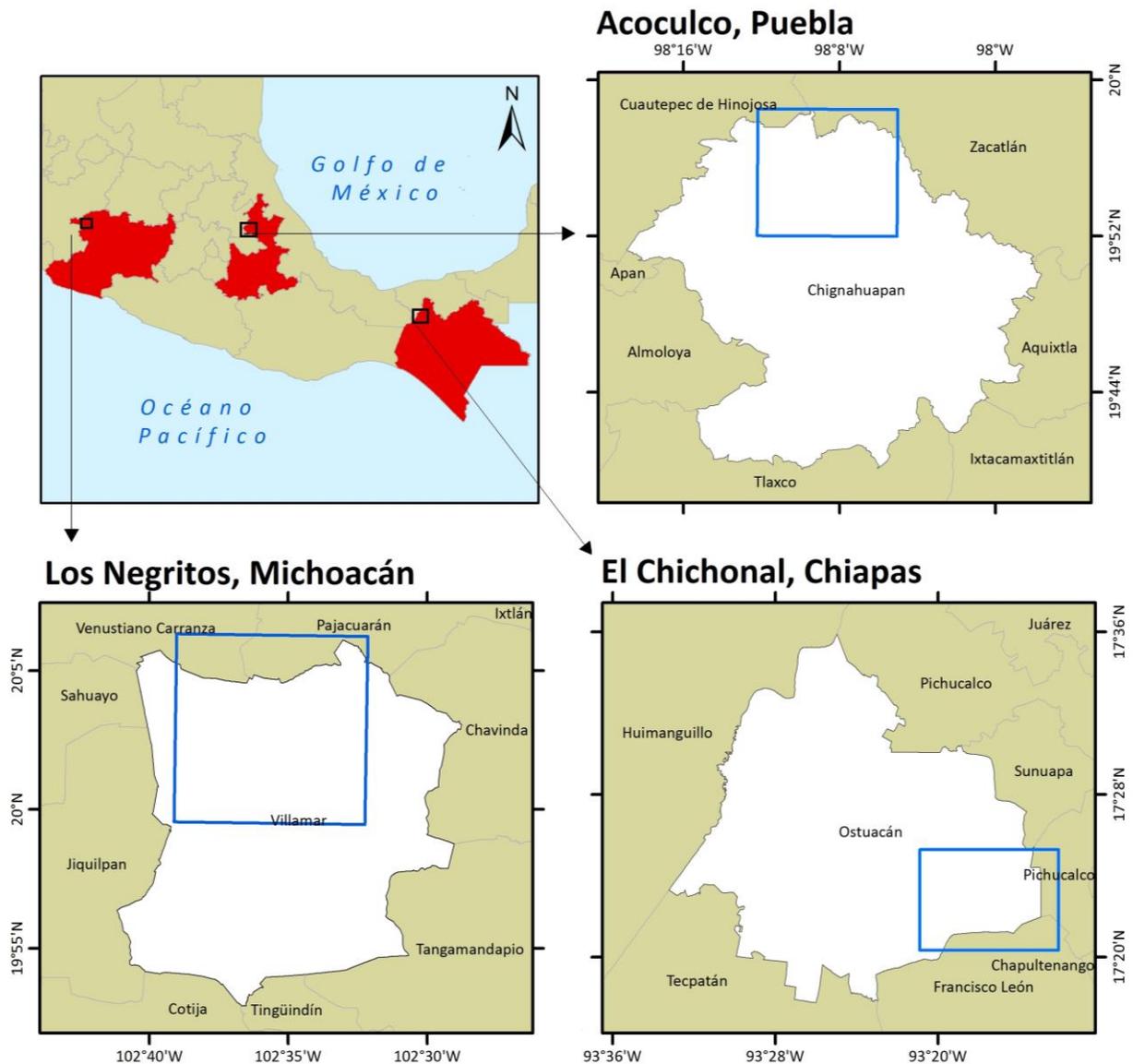
Las reacciones de oxidación-reducción desempeñan una función importante en muchas reacciones producidas en aguas naturales, como en el comportamiento de compuestos que contienen carbono, nitrógeno, azufre, hierro y manganeso (Snoeyink y Jenkins, 2010). El ORP (por sus siglas en inglés *Oxydo Reduction Potential*) permite cuantificar la actividad de electrones o el potencial electroquímico del agua. Un sistema que acepte electrones de un electrodo normal de hidrógeno es una media celda con un potencial redox positivo, por lo que un ORP positivo y de alta magnitud indica un ambiente que favorece las reacciones de oxidación y un valor de ORP negativo y de baja magnitud indica un ambiente reductor (Drever, 1997).

### **1.3. Áreas de estudio**

La exploración geotérmica, según la Ley de Energía Geotérmica (DOF, 2014), es el conjunto de actividades que contribuyen al conocimiento geológico, geofísico y geoquímico del área explorada. También incluye las obras y trabajos realizados en superficie y en el subsuelo, con el fin de corroborar la existencia del recurso geotérmico. El conjunto de actividades que permiten obtener energía eléctrica y otros

aprovechamientos por medio del calor del subsuelo, se le conoce como explotación geotérmica (DOF, 2014). En el año 2008, México ocupaba el tercer lugar mundial en explotación de la geotermia para generar electricidad. La capacidad instalada era de 953 mega watts, lo cual significaba 3% de la generación eléctrica del país. Este tipo de energía se producía en 4 campos geotérmicos operados por la Comisión Federal de Electricidad (Mercado et al., 2008). A partir de julio del 2015, se otorgaron los permisos de exploración de 14 sitios más que pueden servir como fuentes de energía geotérmica en México. Tres de ellos son objeto de esta investigación.

En esta tesis se analizan tres zonas de estudio, las cuales presentan potencial geotérmico en los estados de Puebla, Michoacán y Chiapas (Figura 4). Cada una tiene características particulares, por lo que en este apartado serán tratadas por separado.



**Figura 4.** Localización de las tres zonas con potencial geotérmico estudiadas en esta tesis. En donde se muestran en color gris los límites municipales y el recuadro azul representa la delimitación de las zonas de estudio, (der arriba) Zona Geotérmica Acozulco, Puebla, (izq abajo) Zona Geotérmica Chichonal, Chiapas y (der abajo) Zona Geotérmica de Los Negritos, Michoacán.

### 1.3.1. Roca seca caliente, Acozulco, Puebla.

#### LOCALIZACIÓN

Se localiza en la zona noroeste del estado de Puebla en el municipio de Chignahuapan, Puebla. Este municipio colinda al norte con el municipio de Zacatlán y el estado de Hidalgo, al sur con el municipio Ixtacamaxtitlán y los estados de Tlaxcala e Hidalgo. Se ubica en la porción oriental de la Faja Volcánica Mexicana. La delimitación de la zona de estudio se determinó con base en el cuadrante de exploración de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) el cual mide aproximadamente 145 km<sup>2</sup>.

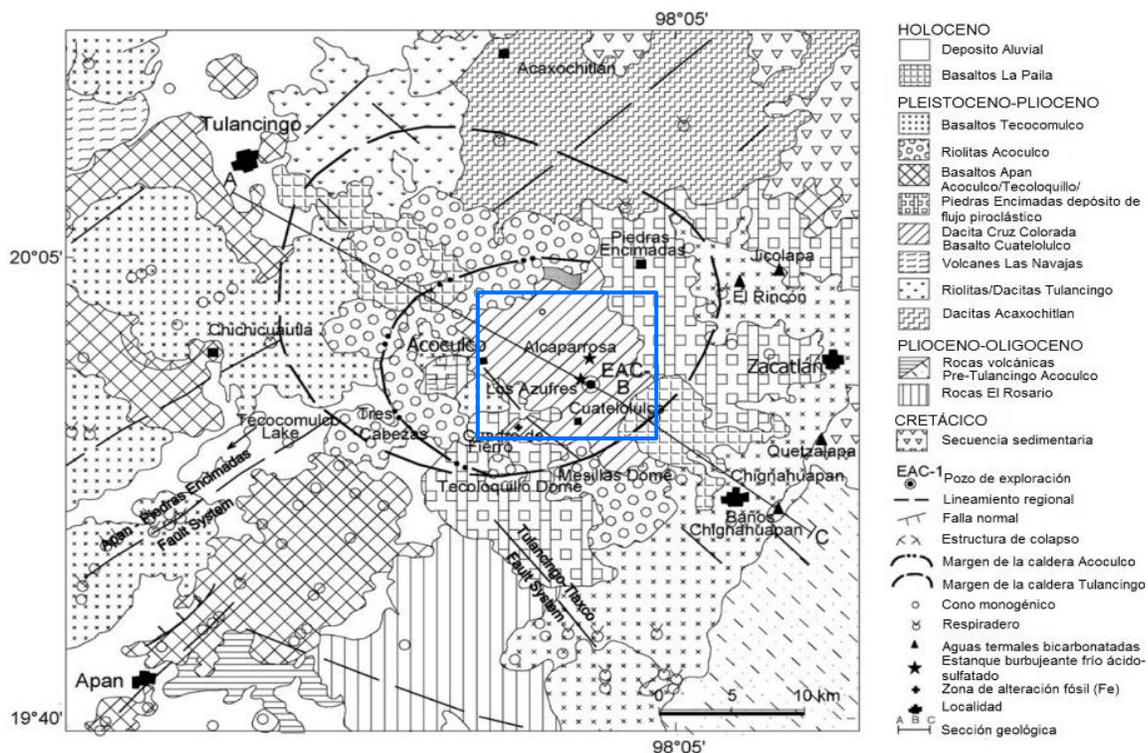
#### GEOLOGÍA

En esta región se documentan tres periodos de actividad volcánica. En los primeros dos periodos surgieron colapsos de caldera, provocando la creación de la Caldera Tulancingo y la Caldera Acozulco, las cuales fueron creadas a partir del ascenso del magma a través de la intersección de dos fallas regionales con dirección Noroeste y Noreste (López-Hernández y Castillo-Hernández, 1997). La Caldera Acozulco se encuentra dentro de la Caldera Tulancingo de 32 km de diámetro, la cual se encontraba activa hace 2.7 a 3 millones de años. La Caldera Acozulco tiene un diámetro de 18 km con un vulcanismo de hace 1.7 a 0.24 millones de años (López-Hernández, et al., 2009).

Los grupos litológicos y unidades de suelo descritas por López-Hernández y colaboradores (2009) dentro de la zona de interés, son los siguientes (Figura 5):

- **Dacita Cruz Colorada, Basalto Cuautelolulco.** Unidad pre-calera de textura porfídica con cristales de plagioclasa hasta de 1 cm, contenidos en una matriz afanítica.
- **Riolitas Acozulco.** Unidad a la cual corresponden siete domos de composición riolítica que se emplazaron siguiendo una traza anular en forma de semicorona.
- **Basaltos La Paila.** Formación constituida por conos de escoria y flujos de lava de composición basáltica y basalto andesítica, ubicada en las porciones Noroeste y Sureste de la caldera Acozulco.
- **Basaltos Tecocomulco.** Conos de escoria y algunos volcanes en escudo y flujos de lava que conforman extensas mesetas volcánicas.

- **Depósito de flujo piroclástico Piedras Encimadas.** Ignimbrita que aflora en la porción este de la zona de estudio que conforman depósitos de flujos piroclásticos viscosos que contienen alto contenido de cristales de cuarzo y feldespatos.

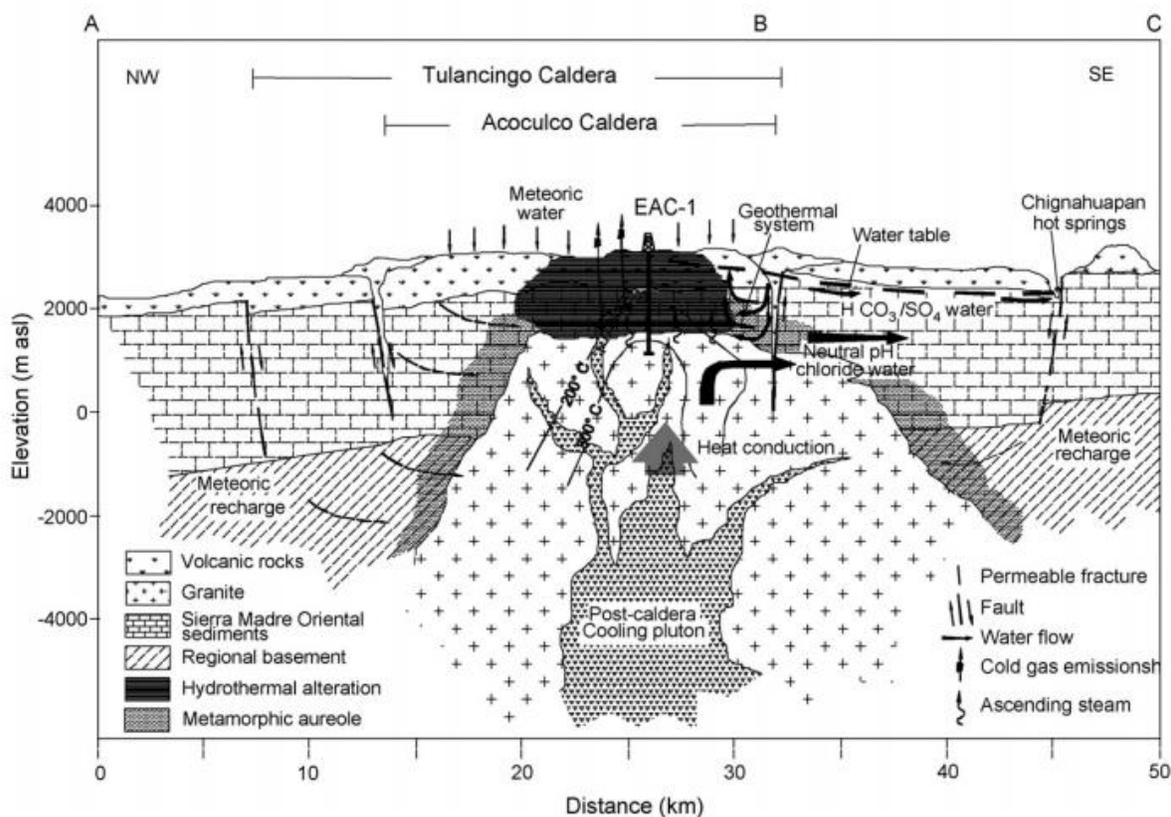


**Figura 5.** Mapa geológico de la zona de la caldera Tulancingo-Acozulco (López-Hernández, et al., 2009), donde el recuadro azul marca la zona de estudio en Acozulco.

La caldera Acozulco se encuentra dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano determinado por actividad volcánica que va desde mediados del Mioceno al Cuaternario. Este cinturón se caracteriza por presentar numerosos sistemas hidrotermales (López-Hernández, et al., 2009). El cinturón volcánico fue formado en respuesta de la subducción hacia el Norte de las placas Cocos y Rivera, por debajo de la placa norteamericana (Nixon, 1982; Pardo y Suárez, 1995; Aguirre-Díaz, 2003). La actividad volcánica en Acozulco cesó hace  $0.24 \pm 0.04$  millones de años (De la Cruz y Castillo-Hernández, 1986) con la formación “La Paila”, la cual está constituida por conos de escoria y flujos de lava (López-Hernández y Martínez, 1996).

Acozulco es una zona en donde se presentan muchas fallas. Sin embargo, la ausencia de alteración hidrotermal a lo largo de éstas sugiere que no tienen conexión directa con el sistema hidrotermal profundo (López-Hernández et al., 2009). El tipo de roca presente en el área de la Caldera de Acozulco es de baja

permeabilidad debido a la ausencia de actividad volcánica y al decremento de la permeabilidad de las fallas con el tiempo por el autosellado que se efectúa por la deposición de minerales ocasionados por la misma actividad hidrotermal (López-Hernández et al., 2009). La fuente del recurso geotérmico es de tipo vulcano-tectónico. Las temperaturas varían entre 264 y 307 °C en profundidades de 1900 a 2000 m respectivamente. Presenta un potencial de 107 MW (Hiriart, 2011; Lorenzo et al., 2011). Dentro de esta zona se encuentran 2 pozos ya perforados y uno en prospección.



**Figura 6.** Modelo esquemático del sistema geotérmico del complejo de calderas Tulancingo-Acozulco (López-Hernández, et al., 2009).

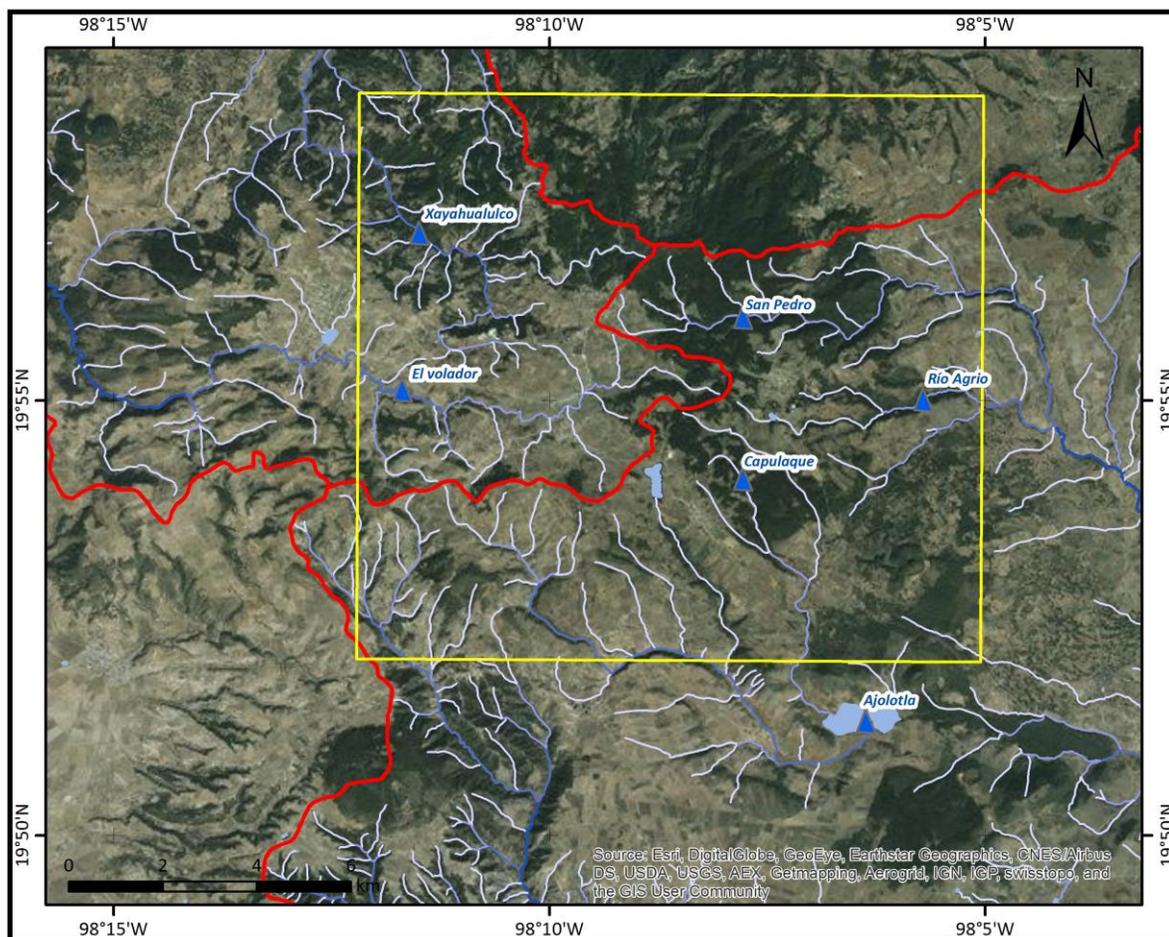
El sistema hidrotermal es asociado a la evolución de las calderas. En el presente no es muy activo debido a que no existen fuentes termales dentro del complejo de calderas y existen áreas de alteración argílica, sin embargo existen manifestaciones las cuales sugieren un sistema hidrotermal oculto. Estas manifestaciones constan de emisiones de gas superficiales, registros de temperaturas por arriba de los 300 °C en el pozo de exploración 1 y a la existencia de aguas termales a 19 km en Chignahuapan (López-Hernández et al., 2009). En la Figura 6 se muestra el esquema del sistema hidrotermal que se encuentra en la zona de estudio, en donde podemos observar la formación. La interacción del agua meteórica con el

fluido geotérmico, el cual asciende a través de las fracturas asociadas con viejas fallas y se mezclan con agua subterránea poco profundas de origen meteórico. La recarga del sistema, a través de zonas de fallas o fracturadas, debe ser significativa debido a que la precipitación media anual es significativa y puede comunicarse a través de las zonas fracturadas. En lo que respecta al flujo de calor, éste es transportado al sureste, a través de fracturas en calizas para poder llegar a las aguas termales localizadas en Chignahuapan (López-Hernández, 2009).

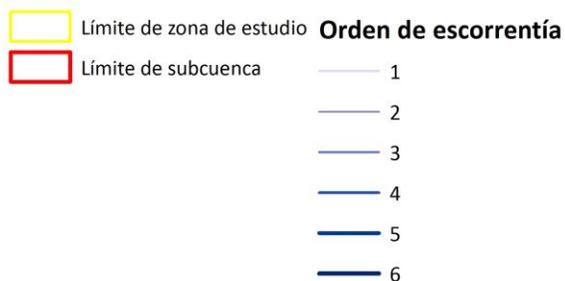
Los fluidos en la zona de Aocolco son de tipo sulfatado-ácido originados por la mezcla de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) de origen geotérmico con  $H_2O$  superficial (Tello-Hinojosa, 1994). En un estudio efectuado por Peiffer y colaboradores (2014) se asocia la acidez y el enriquecimiento de sulfatos por la oxidación de  $H_2S$  del gas hidrotermal después de la disolución en acuíferos meteóricos superficiales o en agua superficial. Dentro del área de estudio se encuentra una manifestación superficial en una laguna de extensión pequeña (350 metros lineales aproximadamente) de coloración verde-azulosa, en donde se observa evaporación de gases y burbujes.

#### HIDROLOGÍA

La zona de estudio se encuentra en un parteaguas de dos subcuencas hidrológicas, que forman parte de dos regiones hidrológicas distintas (Figura 7). La subcuenca que se encuentra en la parte Noroeste de la zona de estudio, se conoce como Río Metztlán (RH26Dv), la cual forma parte de la Región hidrológica Pánuco y de la cuenca Río Moctezuma. Es de tipo cerrada con un área de  $2821.42 \text{ km}^2$  y un máximo de orden de magnitud de 6. La dirección de la escorrentía desde la zona de estudio es hacia el Noroeste. La subcuenca Laxaxalpan (RH27Bc) es la segunda del sitio de estudio, con una superficie de  $1608.95 \text{ km}^2$ . Es de tipo abierta con un máximo de orden de magnitud de 6. Forma parte de la región hidrológica Tuxpan-Nautla y de la cuenca Río Tecolutla. Desde la zona de estudio se aprecia una dirección de escorrentía de Noreste. Dentro de la zona de estudio no existen efluentes permanentes, sino más bien son temporales y dependen de la precipitación. Asimismo, dentro de la zona de estudio se presentan dos lagunas, que se pueden observar en la Figura 7.



#### Simbología



**Figura 7.** Escorrentías dentro de la zona de exploración.

#### CLIMA

En la zona de estudio prevalece el tipo de clima templado subhúmedo, con precipitaciones en verano y otoño. Los meses con mayor precipitación son septiembre y octubre, con una precipitación promedio anual de 727 mm, calculada en base a datos mensuales de precipitación de la estación meteorológica

número 13082 “Presa Esperanza” durante el periodo de 1996 a 2016 (CONAGUA, 2016). Las temperaturas promedio oscilan entre los 12 a 17°C.

#### USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN

Los principales grupos de vegetación presentes en el área son: bosque de coníferas y bosque de encino, presentando una vegetación alta y arbustiva. Existe un parche de vegetación inducida de tipo herbácea. A continuación se presentan algunas características de la vegetación presente en esta área de estudio (INEGI, 2015; Figura 8):

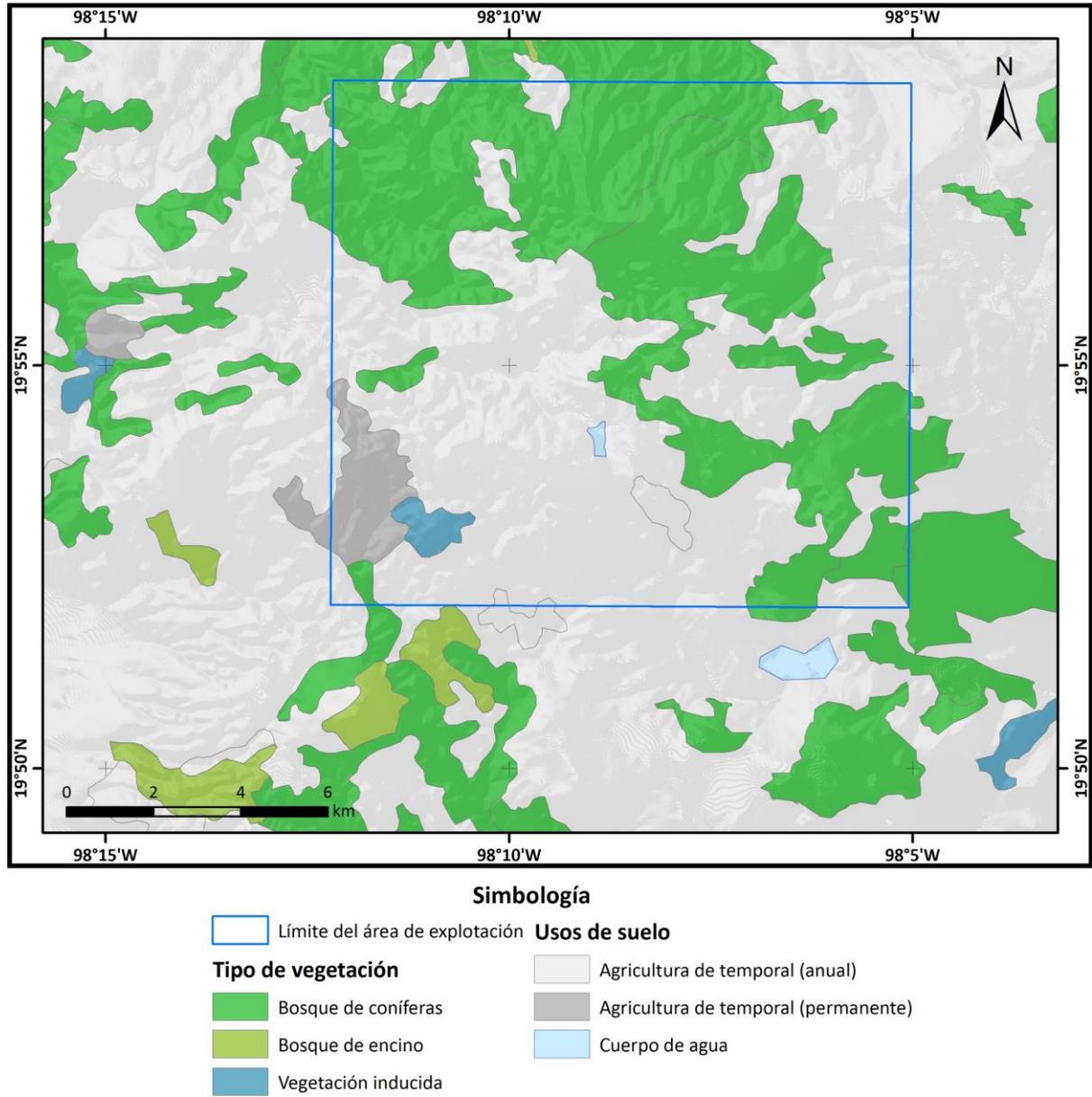
**Bosque de coníferas:** Son comunidades arbóreas que se encuentra en regiones templadas y semifrías con diferentes grados de humedad. En esta área de estudio el bosque de coníferas representa la superficie donde existe bosque de pinos y se presenta vegetación alta (mayor a 30 m).

**Bosque de encino:** Comunidades arbóreas, subarbóreas o arbustivas integradas por múltiples especies del género *Quercus*. Se asocia a bosques de pinos y regularmente se presentan bosques mixtos.

**Vegetación inducida:** Es una agrupación de comunidades vegetales que ocupa el territorio por sucesión vegetal favorecida por afectaciones relacionadas a actividades humanas.

Los usos de suelo presentes en la zona de estudio son: agricultura de temporal. La agricultura de temporal es la técnica en donde el cultivo depende del ciclo de precipitaciones y de la capacidad de retención de agua del suelo, por lo que no requiere riego. La duración de los cultivos es variable debido a que se pueden presentar cultivos desde anuales hasta permanentes (INEGI, 2015). La zona de exploración se compone principalmente por áreas dedicadas a la agricultura de temporal de cultivos anuales. La principal actividad económica es la agricultura, sin embargo, también existen otras actividades primarias tales como: ganadería bovina, porcina y ovina.

Aunque no se observan superficies con tipo de uso de suelo forestal, con información recolectada en entrevistas en campo una de las principales actividades de las comunidades dentro del área de exploración es la tala de árboles controlada. Asimismo, la comunidad de Cruz Colorada registró a CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) parte del bosque de coníferas en el programa “Pago por servicios ambientales” (Figura 9).



**Figura 8.** Tipo de suelo y vegetación en Acozulco (Elaboración propia con datos de INEGI, 2013).



**Figura 9.** Letrero observado en campo en donde se exhibe el programa PSA.

### 1.3.2. Asociada a vulcanismo, El Chichonal, Chiapas.

#### LOCALIZACIÓN

La zona se localiza entre los límites de Veracruz, Tabasco y Chiapas, en los municipios de Ostuacán, Pichucalco, Chapultenango y Francisco León al noroeste del estado de Chiapas. La delimitación de la zona de estudio se realizó con base en las escorrentías en la zona Norte del volcán Chichonal y en las zonas en donde se encontraban actividades antropogénicas. La superficie de la zona de estudio es de aproximadamente 110 km<sup>2</sup>.

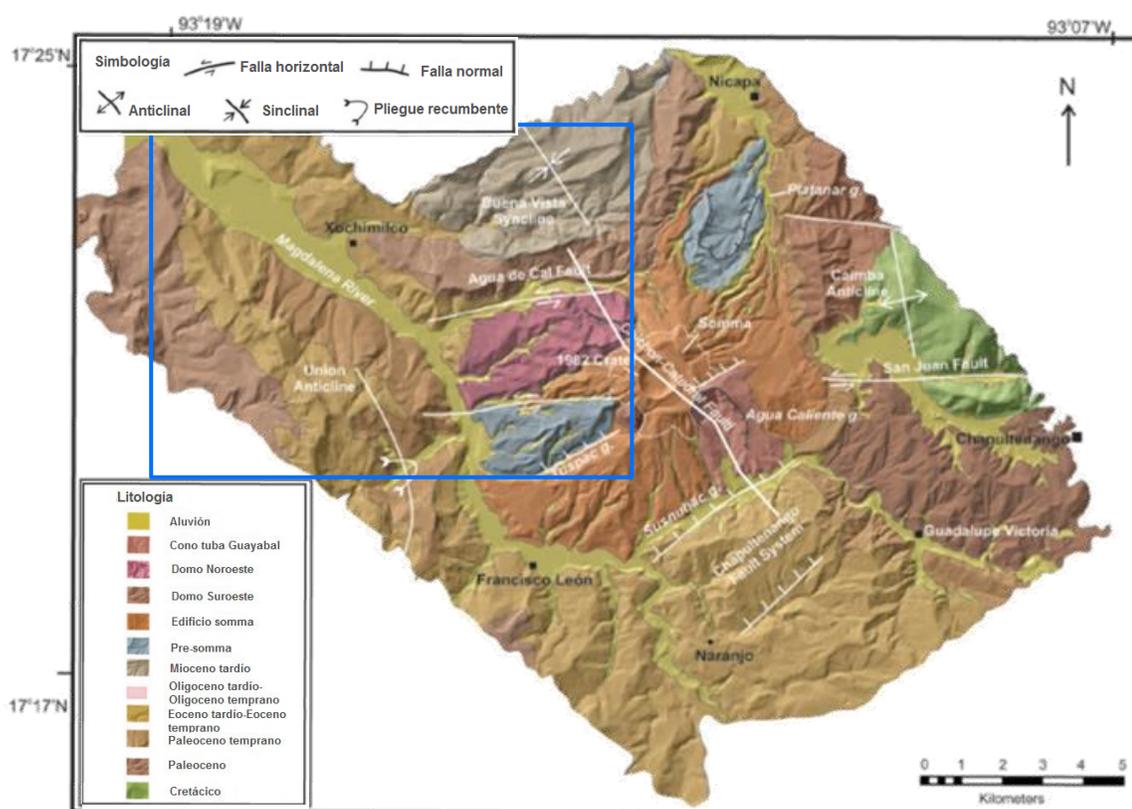
#### GEOLOGÍA

El Chichonal (también conocido como El Chichón) es un complejo volcánico compuesto por domos y una cobertura piroclástica de composición traquiandésitica (Taran y Peiffer, 2009). Es el volcán activo y más joven del arco volcánico Chiapaneco (Damon y Montesinos, 1978). Se han presentado al menos 11 erupciones explosivas durante los últimos 8,000 años por lo que El Chichonal es uno de los volcanes más activos del mundo durante el Holoceno (Espíndola et al., 2000).

Las unidades litológicas de El Chichonal corresponden a seis periodos de actividades distintas: Pre-Somma, Somma, el domo Suroeste, el domo Noroeste, el cono de tobas Guayabal y el cráter de 1982, en orden

cronológico (Duffield et al., 1984, Layer et al., 2009). Estas unidades se componen principalmente por composición traquiandesítica enriquecida por potasio (Figura 10).

La composición del magma de El Chichonal es de tipo traquiandesítica (Duffield et al., 1984; Rose et al., 1984; McGee et al., 1987; Espíndola et al., 2000; Macías et al., 2003). Actualmente, el cráter de El Chichonal tiene 1.5x2 km de diámetro denominado Somma, el cual tiene una elevación de 1150 msnm. Este cráter es un anillo de domos que tiene paredes internas subverticales y pendientes externas suaves. La elevación relativa del Somma, con respecto a la topografía circundante es de 700 m con respecto a la parte oriental y de 900 m de la parte occidental (Macías, 2005).



**Figura 10.** Geología presente en la zona de influencia de El Chichonal (Peiffer, 2011), el recuadro azul indica la zona de estudio.

Durante la erupción más reciente de El Chichonal que se dio lugar en 1982, los flujos hiperconcentrados tenían una temperatura de 82 °C y alcanzaron el pueblo conocido como Ostucán (a 10 km de distancia) el cual fue inundado junto con sembradíos de cacao y café. El flujo alcanzó el río Grijalva y avanzó 7 km

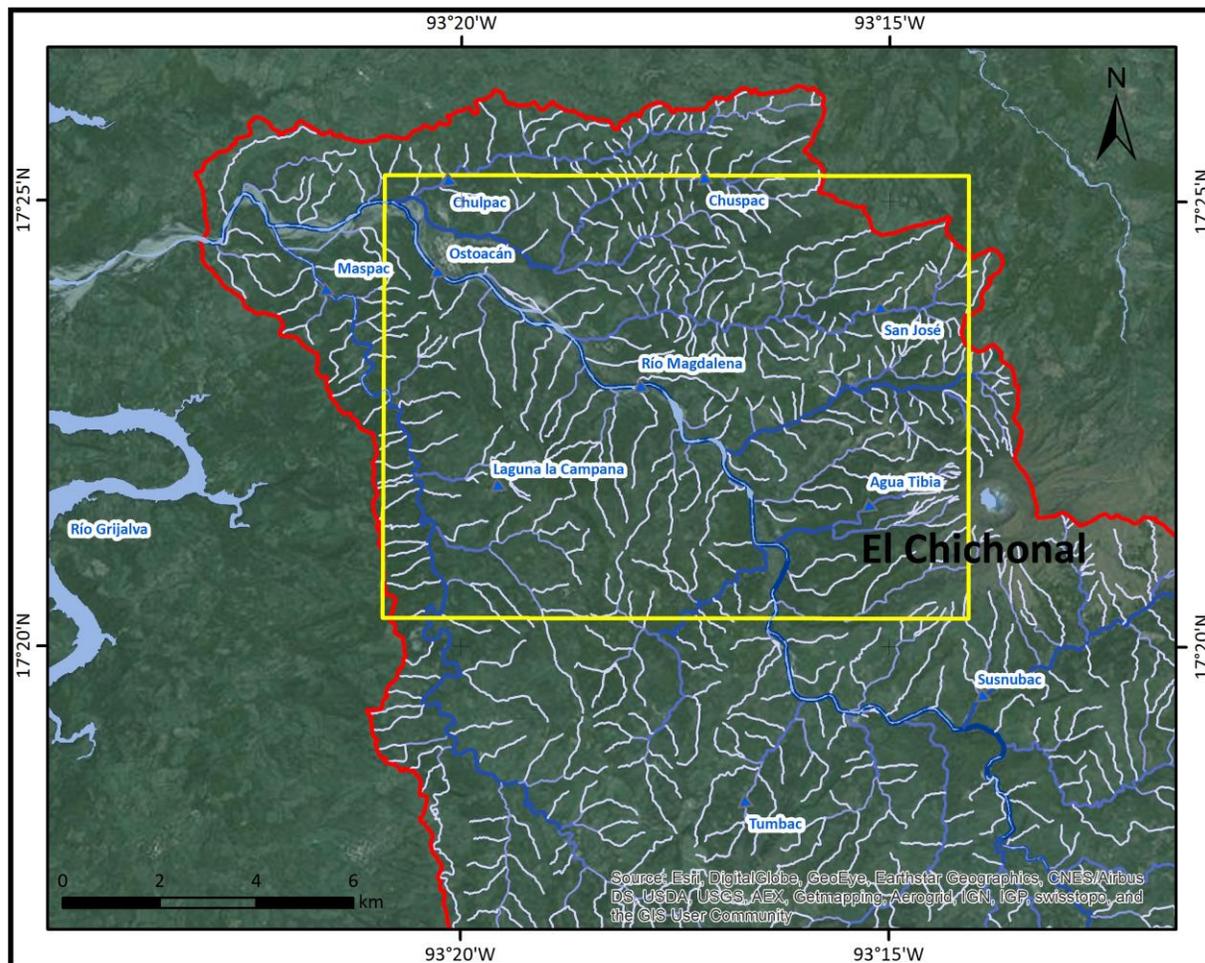
más, hasta llegar a la presa hidroeléctrica Peñitas (CFE) la cual se encontraba en construcción. A esta distancia el agua tenía una temperatura de 50 °C y se elevó el nivel del río 7 m (Macías, 2005).

El depósito hidrotermal se encuentra en el cráter principal del volcán. También existen manantiales termales sobre los flancos del volcán, a una distancia aproximada de 2 km en línea recta de la cima (Peiffer, 2011). En las partes superiores de los cañones se mezcla el agua superficial con las aguas termales y éstos forman arroyos que fluyen hacia el Río Magdalena. El cráter reactivado tiene un lago de color azul turquesa, que tiene una temperatura en promedio de 32 °C (Armienta et al., 2000), pozas de lodo hirviendo y fumarolas con temperaturas cercanas a los 100 °C (Taran et al., 1998; Tassi et al., 2003).

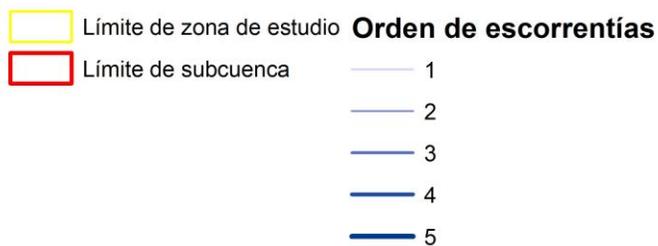
Existen manifestaciones geotérmicas superficiales anteriores a los eventos de 1982 y hasta la fecha (Molina-Berbeyer, 1974; Templos, et al. 1981), las aguas termales en las pendientes al Sur del volcán y salidas de vapor en la base de la formación central del domo de lava son evidencias de un sistema hidrotermal hirviendo debajo del volcán (Taran y Peiffer, 2009). La fuente de calor es la cámara magmática que alimenta al volcán y presenta un potencial eléctrico de 46 MW con método Volumétrico-Montecarlo (Hiriart, 2011).

#### HIDROLOGÍA

La zona de estudio se encuentra dentro de la subcuenca Río Zayula (RH30De) dentro de la Región hidrológica Grijalva-Usumancita en la cuenca Río Grijalva-Villahermosa, con una superficie de 419 km<sup>2</sup>. La cuenca es de tipo abierta con descarga al Río Grijalva (Figura 11). El efluente principal y de tipo permanente es el Río Magdalena, el cual tiene una longitud aproximada de 20 km y su dirección es hacia el Noroeste. En la zona Norte de la cuenca el Río Magdalena se une con el Río Grijalva.



### Simbología



**Figura 11.** Efluentes en la zona de estudio.

### CLIMA

El tipo de clima presente en la zona de estudio es húmedo con lluvias todo el año. La precipitación promedio anual es de 3622 mm. Los meses con mayor precipitación son septiembre y octubre, con precipitaciones desde 468 a 550 mm. Las temperaturas mensuales promedio registradas van de los 16 a

los 21 °C, siendo el mes de mayo el más cálido y el mes de enero el más frío, datos reportados en la estación meteorológica de CONAGUA 7365 Ocotepc-Ocotepc durante el periodo de 1996 al 2016.

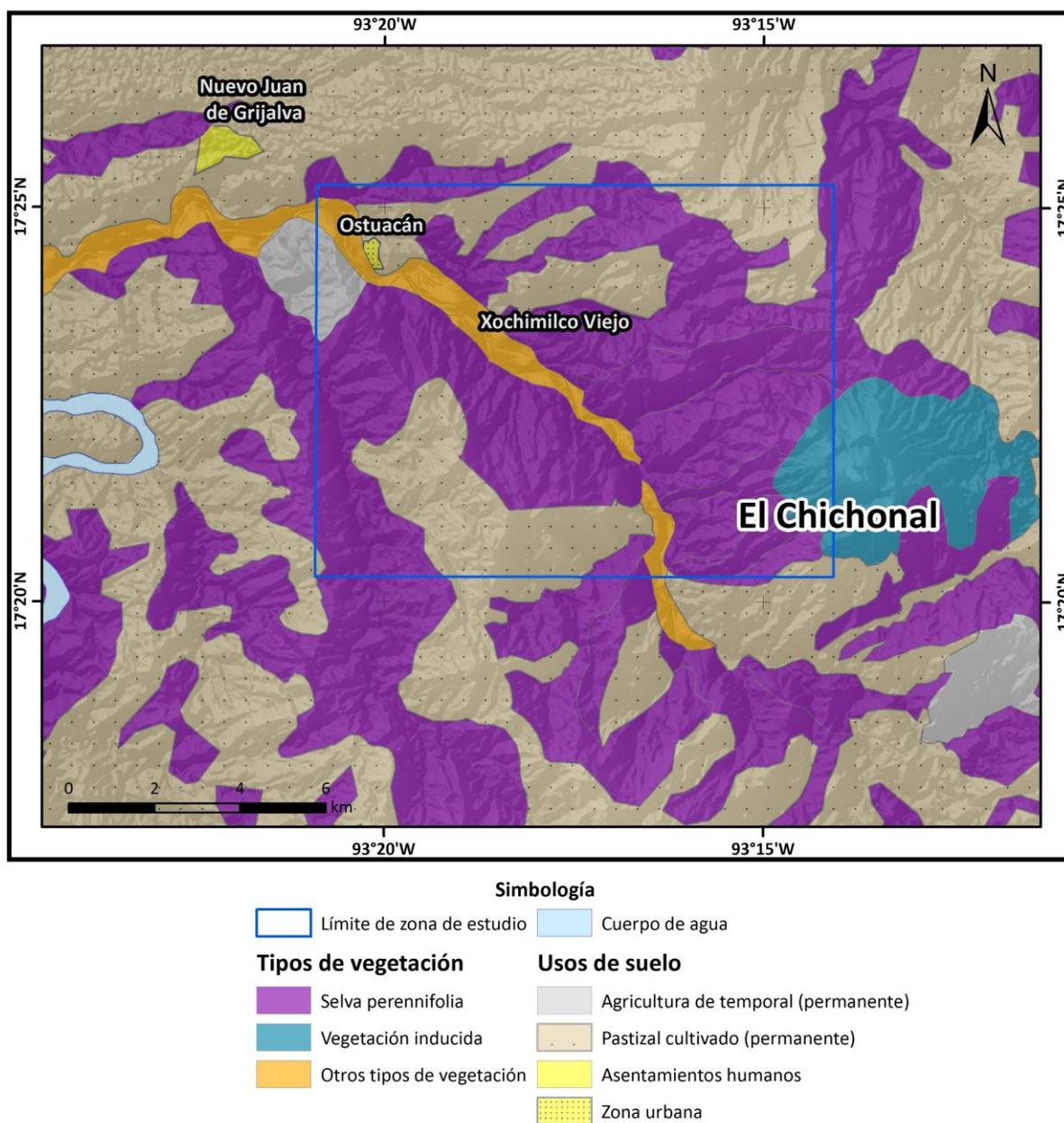
#### USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN

Los tipos de vegetación presentes en el área de estudio son selva perinnofila, vegetación inducida y otros tipos de vegetación. A lo largo del cauce del Río Magdalena se observan otros tipos de vegetación. Debido a su localización se puede clasificar como vegetación riparia. El mapa de vegetación y uso del suelo se muestra en la Figura 12 y se compone por las siguientes unidades:

**Selva perennifolia:** Son comunidades arbóreas de origen tropical que crecen en lugares con alta precipitación y cuyos componentes vegetales mantienen su follaje la mayor parte del año. La vegetación de selva es de tipo mediana (entre 15 y 30 m).

**Vegetación inducida:** Vegetación producto de sucesión vegetal que es favorecida por actividades antropogénicas. Este tipo de vegetación se localiza en El Chichonal y es de tipo herbácea con alturas de menos de 2 m).

Los tipos de uso de suelo que se presentan en la zona de estudio son agricultura de temporal, pastizal cultivado y asentamientos humanos. Las actividades principales de esta zona son la agricultura y la ganadería bovina.



**Figura 12.** Usos de suelo y vegetación en la zona de estudio en Chiapas (Elaboración propia con datos de INEGI, 2013).

### 1.3.3. Lodo caliente, Los Negritos, Michoacán.

#### LOCALIZACIÓN

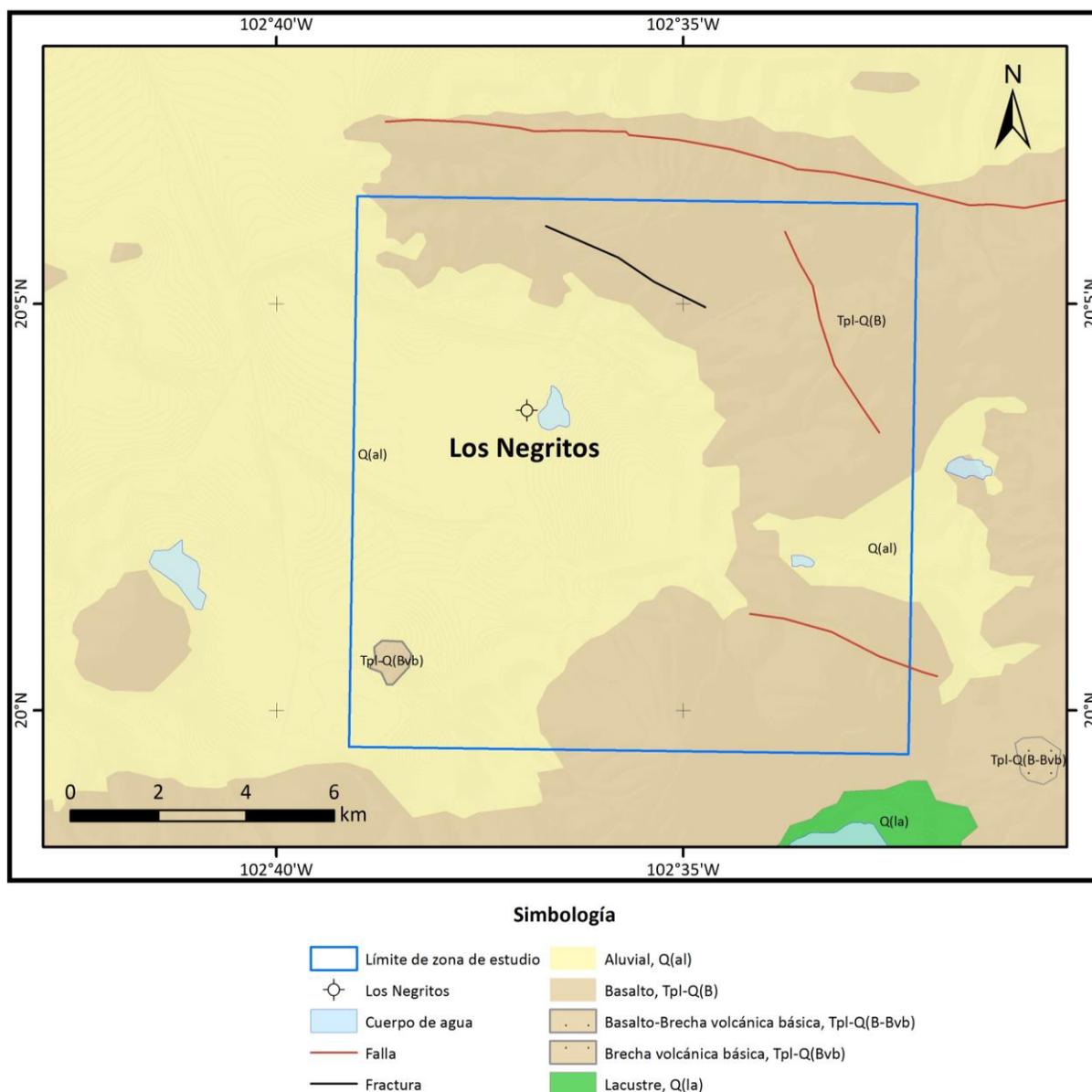
La zona de Los Negritos se ubica en el estado de Michoacán dentro del municipio de Villamar, a una distancia aproximada de 10 km al oriente de la ciudad de Sahuayo, entre los 1500 y 1600 metros sobre el

nivel del mar (msnm). Para definir los límites de la zona de estudio se utilizó al cuadrante de exploración la Comisión Federal de Electricidad (CFE) el cual suma una superficie de 150 km<sup>2</sup>.

#### GEOLOGÍA

La geología en esta área se compone por rocas ígneas máficas, el basalto y la brecha volcánica básica, pertenecientes al periodo Plioceno-Cuaternario. En el mapa geológico se observa que la mayor parte de la superficie del área de exploración es ocupada por el basalto y por la unidad de suelo: aluvión (INEGI. 1982a, INEGI. 1982b). El basalto se compone principalmente de piroxenos y plagioclasas, con cantidades menores de olivino y anfíbol, rico en calcio, hierro y magnesio (Tarbuck y Lutgens, 2005). Basalto-Brecha volcánica básica (B-Bvb). Rocas piroclásticas compuestas por partículas de tamaño menor que la ceniza. El término de composición básica o máfica se refiere a que contiene un elevado porcentaje de minerales ferromagnesianos y bajo porcentaje de sílice, son normalmente más oscuras y densas que otras rocas ígneas (Tarbuck y Lutgens, 2005).

En la zona se reconocen dos tipos de suelo, el aluvial y el lacustre. Estos se definen así debido al proceso geológico que les dio origen. El suelo aluvial es formado por procesos de transporte asociados a una corriente fluvial y el suelo de origen lacustre es aquel que se ha formado por procesos de depositación (Figura 13).



**Figura 13.** Geología en Los Negritos, Michoacán (Elaboración propia con datos de INEGI. 1982a, INEGI. 1982b).

El sitio de Los Negritos se encuentra en la porción centro-oriental del Valle de Sahuayo. El valle se encuentra sobre sedimentos lacustres como limolitas calcáreas, en donde afloran las manifestaciones termales. Es cercano a la confluencia de dos provincias tectónicas conocidas como el Graben de Chapala y la Meseta Tarasca, específicamente al sur de la Ciénaga de Chapala (Hiriart, 2011).

Al Noreste de Los Negritos se encuentra otro sitio con potencial geotérmico, el cual se conoce como Ixtlán de los Hervores. Este sitio se ubica en la prolongación oriental del Graben de Chapala (25 km al Noreste de Los Negritos), en donde se observan una serie de fallas normales de dirección Noroeste-Sureste a Este-Oeste, las cuales parecen actuar como conductoras de fluidos hidrotermales. Las manifestaciones en Ixtlán

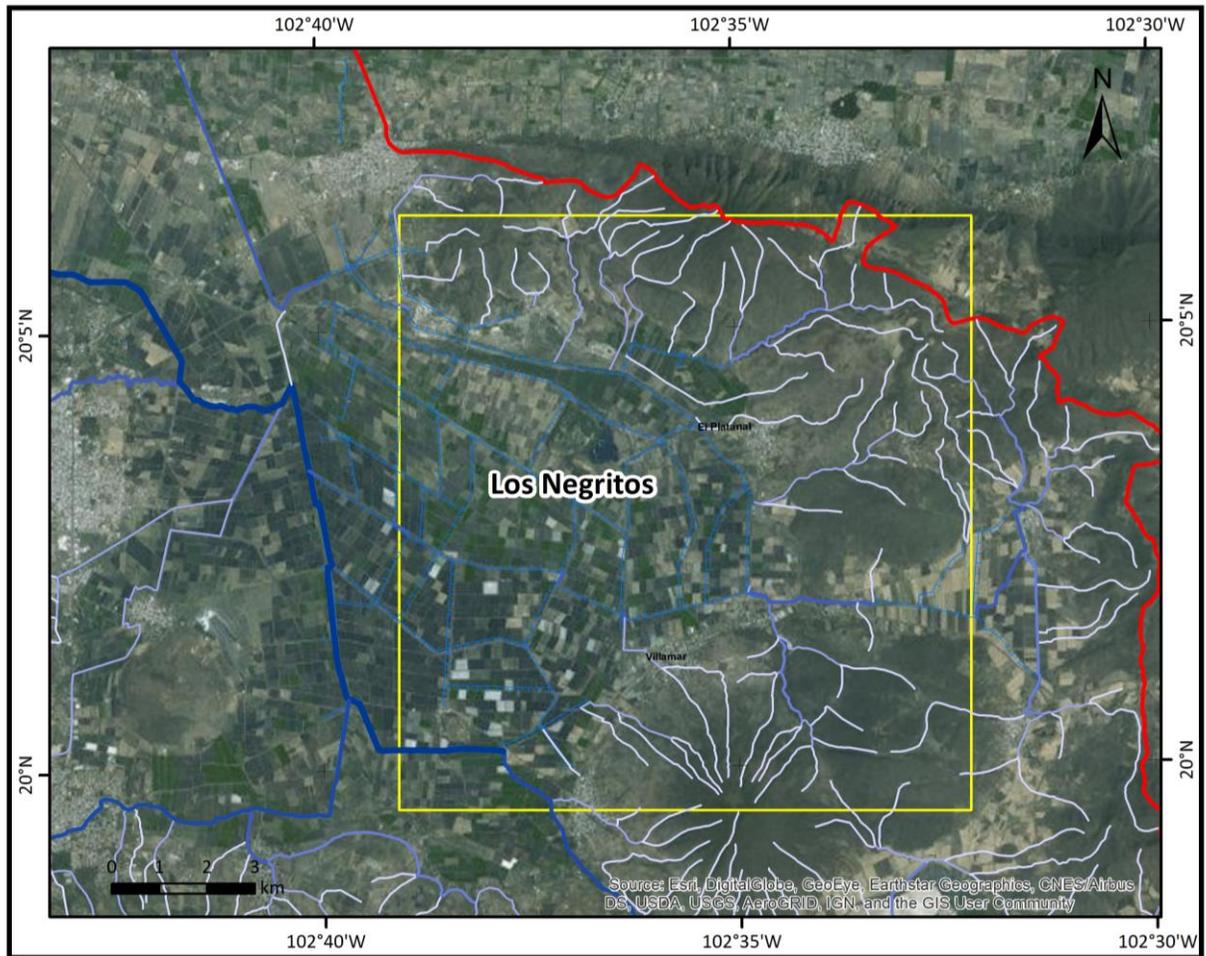
de los Hervores consisten en manantiales termales, pozos de agua caliente y volcanes de lodo de temperaturas entre los 48 y 94 °C (Hiriart, 2011). Estas manifestaciones también se presentan en la zona de Los Negritos.

En la región de Ixtlán de los Hervores y Los Negritos existe un conjunto de fallas normales que han servido para el ascenso de los fluidos geotérmicos. Una de las fallas más importantes es la falla Pajacuarán de 18 km, la cual limita la Ciénega de Chapala en su porción Sur (Rosas y Fucugauchi, 1992) (al Norte de Los Negritos, Figura 13). Es probable que el fallamiento presente en la zona se prolongue hacia el oriente donde quizá actuó como conducto para el desarrollo de una serie de volcanes, así como el ascenso de fluidos hidrotermales (Rosas y Fucugauchi, 1992).

El depósito hidrotermal se compone por un conjunto de manantiales, fumarolas y volcanes de lodo, que parecen relacionarse con el cruce de dos fallas, la Falla El Platanal con una dirección este-oeste (paralela a la falla Pajacuarán) y la Falla Los Negritos con dirección noreste-suroeste (Hiriart, 2011). La fuente de calor estaría relacionada con una cámara magmática profunda alimentadora del vulcanismo más reciente. Con el método Volumétrico-Montecarlo presenta un potencial de 24 MW y con el método de descompresión gradual potencial de 20 MW (Hiriart, 2011).

#### HIDROLOGÍA

La zona de estudio se encuentra en una red de canales conectados a la subcuenca Río Sahuayo (RH12Da) en la región hidrológica Río Lerma- Río Santiago dentro de la cuenca del Lago Chapala. La subcuenca tiene una superficie de 947 km<sup>2</sup> de tipo abierta con su descarga al Lago Chapala, las escorrentías tienen un orden máximo de 6. La dirección del efluente principal conocido como Río Sahuayo es hacia el Noroeste. En la Figura 14 se observan las escorrentías en la zona de estudio.



#### Simbología

	Límite de zona de estudio	<b>Orden</b>
	Límite de subcuenca	 1
	Canales	 2
		 3
		 4
		 5
		 6

**Figura 14.** Escorrentías y canales dentro del área de estudio de Los Negritos, Michoacán.

#### CLIMA

En la zona de estudio se presenta un clima de tipo semicálido subhúmedo con lluvias en verano, donde el mes con mayor precipitación es julio y el de menor precipitación es diciembre. Con información de la estación meteorológica 16141 Yurécuaro de CONAGUA, se calculó que al año se precipita en promedio 799.10 mm. Las temperaturas promedio oscilan desde los 16 a 24°C, siendo el mes de enero el más frío y el más cálido el mes de mayo.

## USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN

En la zona de estudio se encuentran diferentes agrupaciones vegetales entre las cuales destacan el bosque de encino y la selva caducifolia. Además, existe reporte de vegetación hidrófila. Algunas características de cada grupo encontrado en la zona de estudio se enlistan a continuación (INEGI, 2015, Figura 15):

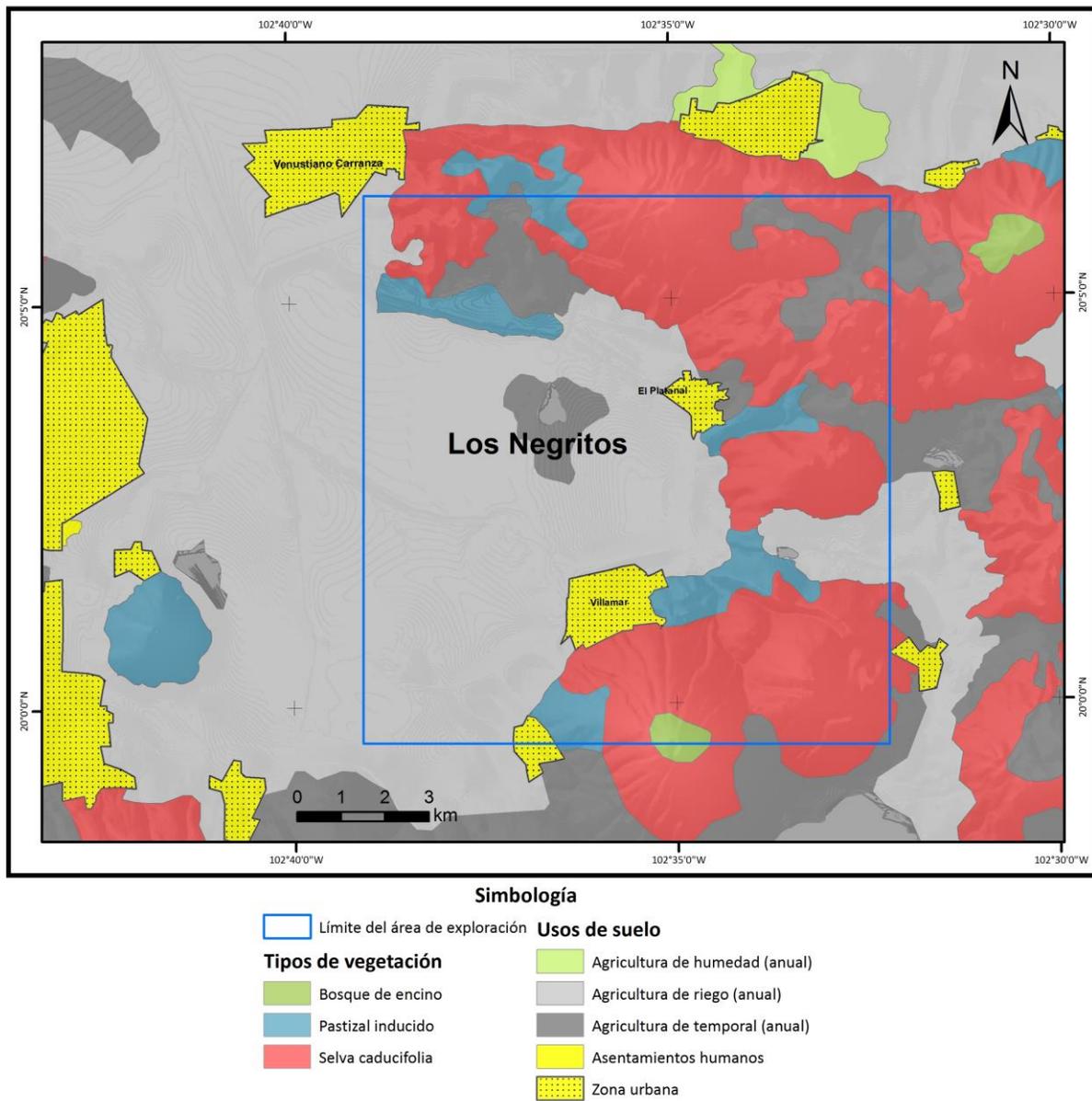
**Bosque de encino:** Son comunidades arbóreas, subarbóreas o arbustivas integradas por múltiples especies del género *Quercus*.

**Selva caducifolia:** Comunidades arbóreas de origen tropical que crecen en lugar con precipitación estacional, las cuales más del 75 % de sus componentes vegetales pierden las hojas durante la época seca del año.

**Vegetación hidrófila:** comunidades arbóreas, arbustivas o herbáceas que habitan en suelos pantanosos o zonas inundables de aguas salobres o dulces poco profundas, son comunidades muy diversas.

**Vegetación inducida:** Comunidades originadas cuando la vegetación primaria es eliminada o alterada por factores antropogénicos o naturales. Son de estructura heterogénea.

Los usos de suelo presentes en el área de estudio son: agricultura de humedad, de riego y de temporal.



**Figura 15.** Tipos de usos de suelo y vegetación en la zona de estudio en Los Negritos, Michoacán (Elaboración propia con datos de INEGI, 2013).

## Capítulo 2. Metodología

---

### 2.1. Análisis hidrológico

El movimiento del agua a través de las escorrentías depende de las formaciones que caracterizan el relieve en la cuenca. En este apartado se describe como se determinaron las características geomorfológicas de cada cuenca. Al analizar la hidrología se pueden determinar los destinos a los cuales los elementos químicos de interés se pueden mover (Meays et al., 2006).

Para determinar las características que condicionan el transporte del agua se determinaron los siguientes atributos de cada cuenca:

- a) Área.
- b) Perímetro.
- c) Coeficientes de forma de cuenca.
- d) Pendientes.
- e) Análisis de precipitación.

Los escurrimientos superficiales y los límites geográficos de las cuencas se obtuvieron desde el portal de internet “Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas” (SIATL) de INEGI, que es una plataforma en línea en donde se puede visualizar y descargar en formato vectorial las cuencas de todo el país a una escala de 1:50,000. Para realizar el análisis geomorfológico de la cuenca se utilizaron como guía los procedimientos propuestos por Campos-Aranda (1992), con apoyo de técnicas de Sistemas de Información Geográfica y la información vectorial disponible del INEGI. Para el cálculo de la curva hipsométrica, pendientes y pendientes del cauce principal se efectuaron análisis de análisis espacial al Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0), el cual presenta una resolución de 15m x 15m, disponible en línea por INEGI con año de publicación en 2013.

#### 2.1.1. Análisis geomorfológico

El área de una cuenca se refiere a la superficie delimitada por su línea divisoria y puede indicar qué factores alteran el flujo de agua. Por ejemplo, en cuencas pequeñas el tipo de coberturas de suelo es un factor determinante en el movimiento del flujo y en cuencas grandes influye más la hidrología del cauce principal. Por lo que se definió en que categoría de cuenca se encuentra cada una para su comparación.

**Tabla 2.** Relación del tamaño de la cuenca (Campos-Aranda, 1992).

Tamaño de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2,500	Intermedia-grande
2,500 a 5,000	Grande
>5,000	Muy grande

La forma de la cuenca afecta la descarga de la corriente, que a su vez afecta a los flujos máximos. La forma de la cuenca se describe con el coeficiente de compacidad y el de elongación.

- El coeficiente de compacidad ( $C_c$ ) indica si una cuenca es circular lo que se asocia a las velocidades que pueden tener los cauces. Este parámetro tiene como límite inferior la unidad. Entre más cercano sea a uno, indica que la cuenca es circular; conforme aumenta indica una forma alargada o asimétrica (Campos-Aranda, 1992). Este coeficiente fue propuesto por H. Gravelius y se expresa como:

$$C_c = \frac{0.282 P}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

Dónde:

$C_c$  = Coeficiente de compacidad (adimensional).

$P$  = Perímetro de la cuenca (km).

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

- La relación de elongación ( $Re$ ) definida por Schumm (1956) indica si existen fuertes relieves y pendientes pronunciadas del terreno. Varía de 0.60 a 1. Entre más cercano sea a 1 indica relieves bajos (Campos-Aranda, 1992). La longitud del cauce se define como la dimensión más grande de la cuenca, a lo largo de una línea recta desde la salida hasta la divisoria paralela al cauce principal. Esta relación se encuentra expresada en la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{1.1284\sqrt{A}}{L_c} \quad (6)$$

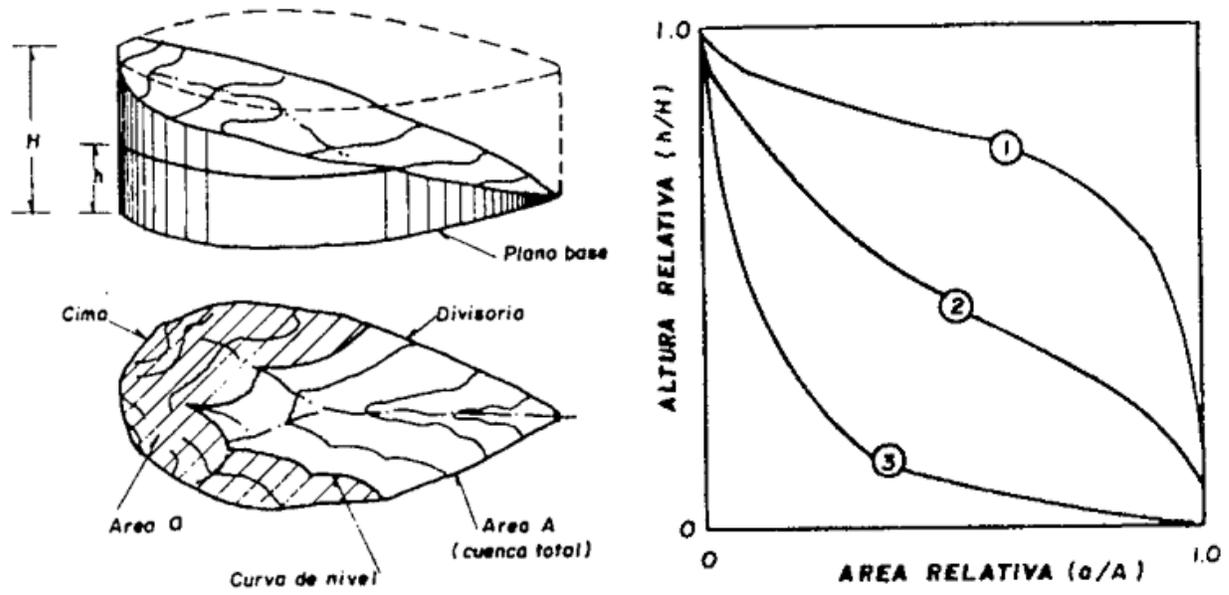
Dónde:

$Re$  = Relación de elongación (adimensional).

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

$L_c$  = Longitud de la cuenca (km).

El relieve o topografía tiene más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma de la misma. Para la definición del relieve se construye la curva hipsométrica, la cual representa gráficamente las elevaciones del terreno en función a las superficies correspondientes, lo que permite calcular la elevación media de la cuenca y sirve como referencia para comparar distintas cuencas.



**Figura 16.** Partes del análisis hipsométrico (izquierda), Curvas hipsométricas (derecha): (1) representa una etapa de desequilibrio, geológicamente joven, (2) representa una etapa de equilibrio, cuencas maduras de pie de montaña y (3) cuenca de valle o erosionada (tomada de Campos-Aranda, 1992).

### 2.1.2. Curva hipsométrica

El procedimiento para llevar a cabo el análisis hipsométrico se realizó en el programa informático ArcMap con el uso del raster Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) (resolución de 15m x 15m). El procedimiento efectuado fue el siguiente:

- Dentro de la caja de herramientas de "Análisis espacial" del programa ArcMap®, se clasificó el *raster* por medio de la herramienta "Reclasificar". Las áreas reclasificadas indican la superficie entre curvas de nivel de la microcuenca.
- Para elegir el número de secciones o tramos, depende de que tan representativas sean las áreas respecto a la superficie total de la cuenca. En este caso se eligieron 20 secciones, que representan curvas de nivel cada 30 metros.
- En la misma caja de herramientas (*Análisis espacial*) se utiliza la herramienta "Zonal" en donde se realizó una estadística zonal como tabla. Los datos de la zona de entidad son el *raster*

reclasificado. El campo de zona fue la información referente al valor de cada pixel.

- Posteriormente se realizó un análisis estadístico en Excel para obtener la gráfica correspondiente.

### **2.1.3. Pendiente de la cuenca**

Para el cálculo de la pendiente se utilizó el grupo de herramientas de “*Análisis espacial*” del programa ArcMap®. La herramienta de geoprocésamiento en específico se llama “*Pendiente*”; esta herramienta calcula el valor de la pendiente para cada celda de un *raster* que contiene las elevaciones. Se utilizó el *raster* Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0), con resolución de 15m x 15m.

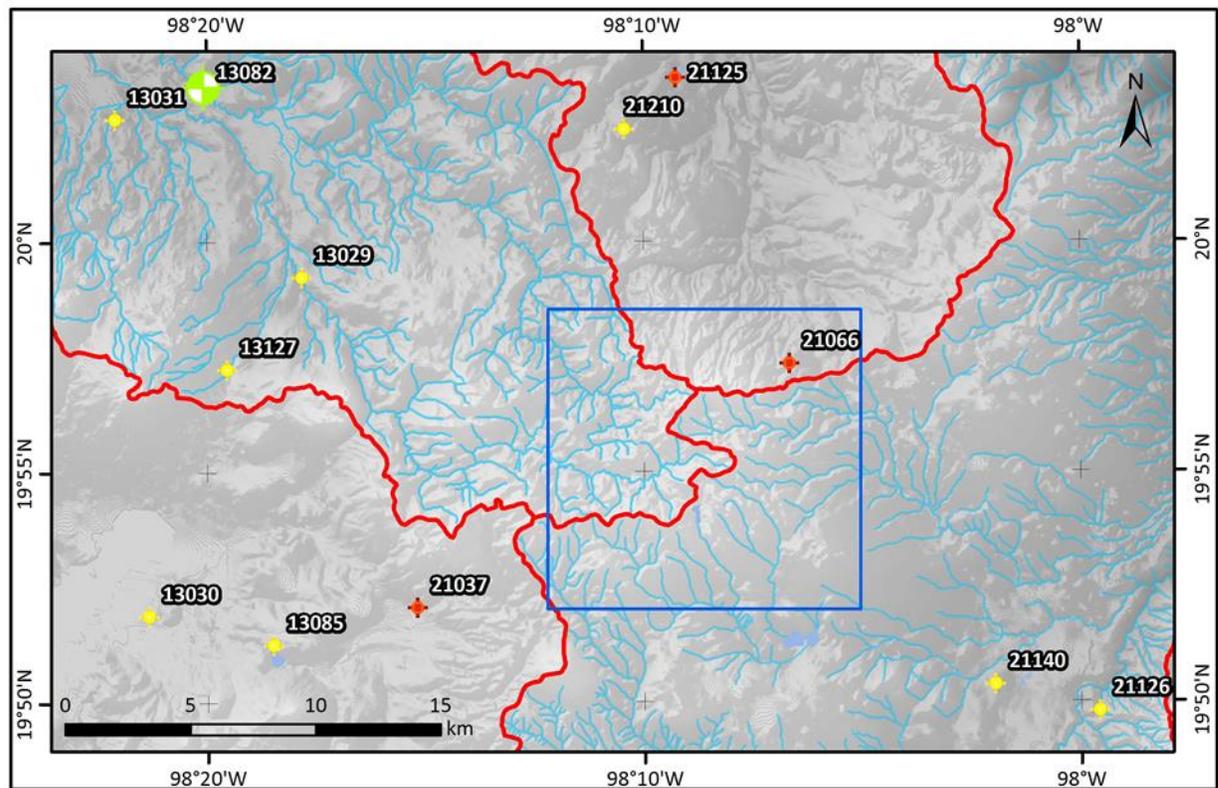
### **2.1.4. Análisis de precipitación**

Los muestreos se realizaron en dos temporadas del año. El primer muestreo del año se realiza durante la época de secas y el segundo fue durante la época de lluvias. Sin embargo, la precipitación tiene una variabilidad al ciclo anual, por lo que en este apartado se reportan las condiciones de precipitación durante las épocas de muestreo.

Para evaluar el ciclo de precipitaciones se obtuvieron datos de las estaciones climatológicas 16141, 13082 y 7365 de la Red de CONAGUA (Figura 17, Figura 18, Figura 19). En Acozulco, Puebla se utilizó la estación meteorológica No. 13082 que se encuentra a 25 km aproximadamente de la zona de estudio, con una altitud de 2218 msnm. En El Chichonal, Chiapas la estación N. 7365 se localiza a 20 km al Suroeste de la zona de estudio con una altitud de 1460 msnm. La estación utilizada en Los Negritos, Michoacán se localiza a 50 km de distancia de la zona de estudio y se encuentra sobre los 1575 msnm (No. 16141).

Debido a las restricciones en el acceso a la información, no se obtuvieron datos de estaciones dentro de las cuencas estudiadas (excepto en la zona de estudio de Acozulco, Puebla), por lo que se eligió alguna que se encontrara cercana y en la misma altitud. El periodo de observación para el que se analizaron las mediciones de precipitación en las zonas de estudio fue: 2000 a 2016.

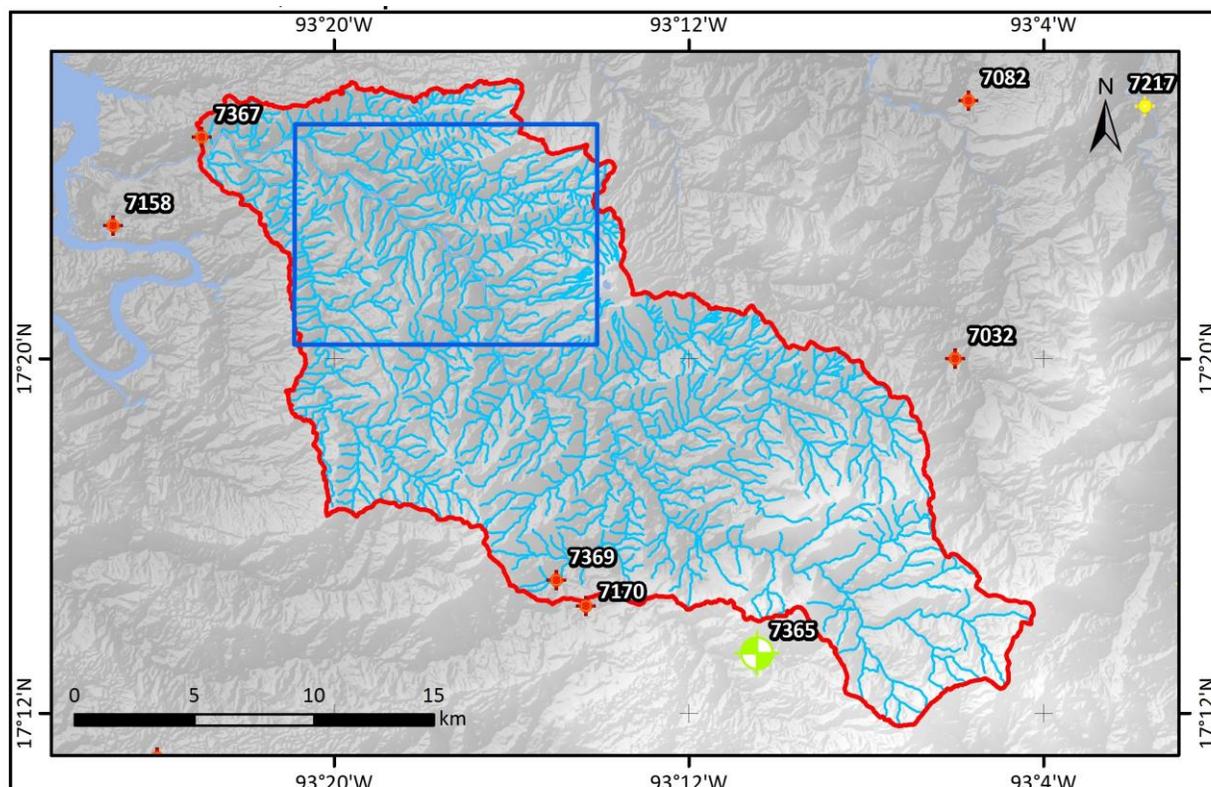
La obtención de la información de precipitación se obtuvo a través de la solicitud directa en CONAGUA Baja California a través del Jefe de Proyecto del Servicio Meteorológico Nacional. Los datos de precipitación del año 2016 son valores preliminares, debido a que se informó que no están debidamente validados. La información validada en los tres sitios es hasta el 2015.



### Simbología

- |   |                    |   |                              |
|---|--------------------|---|------------------------------|
|  | Estación utilizada |  | Escorrentías                 |
|  | En operación       |  | Límite de la zona de estudio |
|  | Suspendidas        |  | Límite de cuencas            |

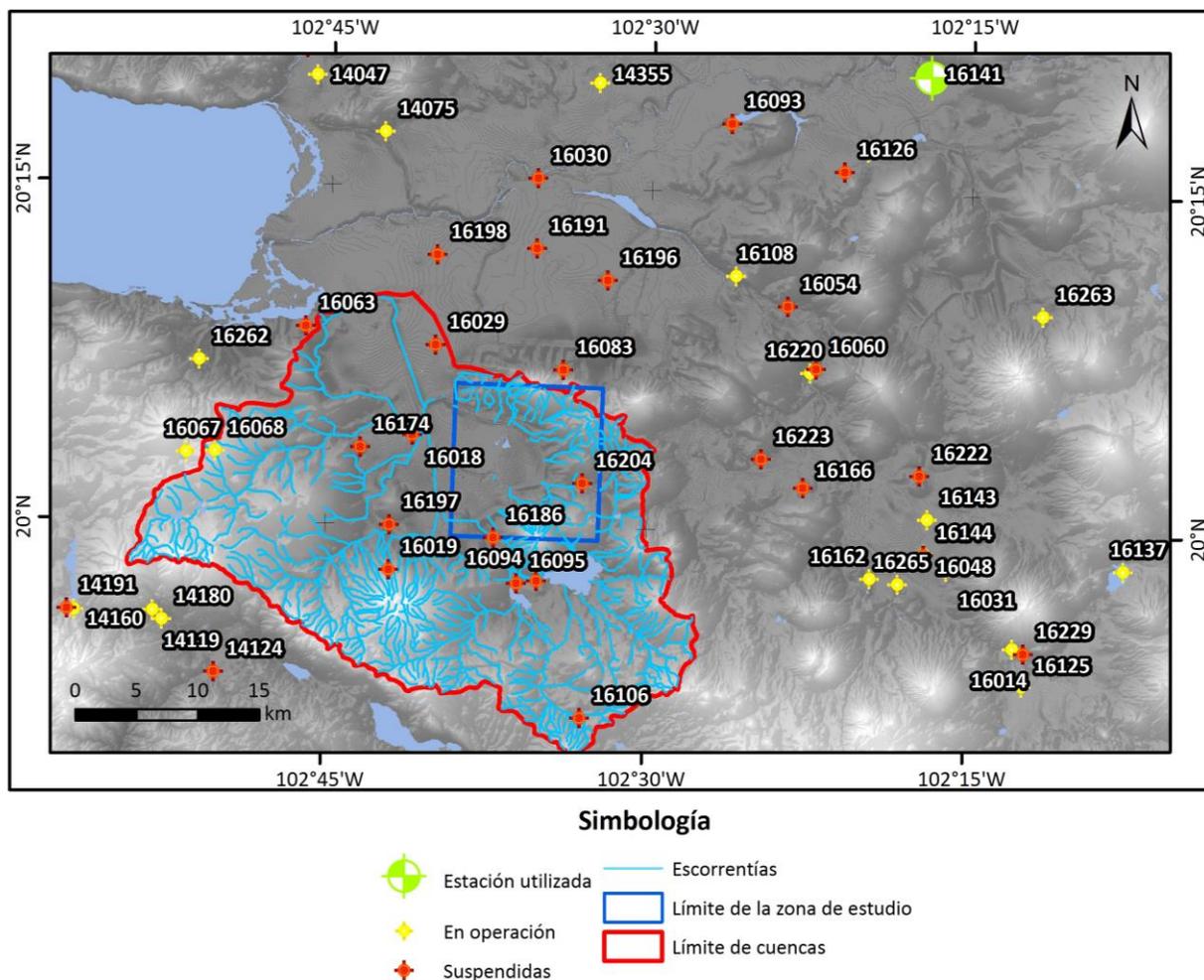
**Figura 17.** Localización estaciones climatológicas en operación y suspendidas en la zona de estudio, así como de la estación número 13082 (Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2016).



### Simbología

- |   |                    |   |                              |
|---|--------------------|---|------------------------------|
|  | Estación utilizada |  | Esorrentías                  |
|  | En operación       |  | Límite de la zona de estudio |
|  | Suspendidas        |  | Límite de cuencas            |

**Figura 18.** Localización de estaciones en operación y suspendidas, cercanas a la zona de estudio, así como de la estación 7365 (Elaboración propia con datos de CONAGUA e INEGI).



**Figura 19.** Localización de estaciones en operación y suspendidas, así como de la estación utilizada para realizar análisis de precipitación (16141) (Elaboración propia con datos de CONAGUA e INEGI).

Debido a la lejanía de las estaciones utilizadas y a que los datos en 2016 no se encuentran validados, se realizaron análisis estadísticos para comparar la distribución de los datos y comprobar si existen procesos que puedan ocasionar errores en la medición. La serie de datos considerada como homogénea representa una muestra de una única población, o bien que los datos sean del mismo origen o con procedimientos similares. La homogeneidad en una serie de datos puede verse afectada por cambios físicos en estaciones meteorológicas u originada por modificaciones en el ambiente, como: construcción de embalses, deforestaciones, forestaciones, desecación de pantanos, apertura de áreas de cultivo, industrialización de áreas circundantes, entre otras (Campos-Aranda, 1992).

Para el análisis de los datos se realizó un graficado del ciclo anual de precipitación con la desviación estándar, realizando las siguientes pruebas estadísticas: Helmert, De secuencias, *t-Student* y Cramer (dos no paramétricas y dos paramétricas). La metodología utilizada para realizar cada una de estas pruebas fue

por medio de las especificaciones de Campos-Aranda (1992) y el uso de una hoja electrónica de cálculo. A continuación, se sintetizan los procedimientos utilizados:

- Lluvia anual acumulada: Se graficaron los totales anuales, el promedio y los valores de la desviación estándar. Comparando la línea de promedios con los datos del registro se pueden detectar años lluviosos o secos.
- Prueba estadística de Helmert: Consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, una secuencia (S) es creada. Por otro lado, si una desviación es seguida por otra de signo contrario, un cambio (C) es registrado. Para que la serie sea homogénea la diferencia entre las secuencias y los cambios debe ser cero, con una dependencia de la longitud del registro (n), expresada como:

$$S - C = 0 \pm \sqrt{n - 1} \quad (7)$$

- Prueba estadística de las secuencias: Se cuentan las secuencias (U) que estén por arriba o debajo de la mediana de la serie. Si el valor es mayor que la mediana se marca "A"; si es menor se marca como "B". La serie es homogénea si el número de secuencias se encuentra entre los rangos especificados en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Rango del número de secuencias (U) para un registro homogéneo (Campos-Aranda, 1992).

Número de datos (n)	Rango de U
12	5 – 8
14	5 – 10
16	6 – 11
18	7 – 12
20	8 – 13
22	9 – 14
24	9 – 16
26	10 – 17
28	11 – 18
30	12 – 19
40	16 – 25
50	22 – 30

- Prueba estadística de la t de Student: la homogeneidad en una serie de datos puede ser ocasionada por un cambio abrupto en la media, por lo que esta prueba es especialmente útil, debido a que detecta la inconsistencia en la media. La prueba se aplicó para  $n_1$  (2001-2008) y  $n_2$  (2009-2016), la prueba está dada por la siguiente relación:

$$t_c = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left( \left( \frac{n_1 S_1^2 - n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) (1/n_1 + 1/n_2) \right)^{1/2}} \quad (8)$$

Donde:

$\bar{x}_1 \bar{x}_2$  = Media de  $n_1$  y  $n_2$ .

$S_1 S_2$  = Varianza de  $n_1$  y  $n_2$ .

El valor resultante se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas y con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y 0.05 de nivel de significancia. Si el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que el de  $t$  se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de una distribución no homogénea. Esta prueba se realizó por medio del análisis de datos de una hoja de cálculo electrónica.

- Prueba estadística de Cramer: La prueba de t Student no es muy recomendada cuando  $n_1$  y  $n_2$  no son similares, por lo que se utiliza la prueba de Cramer como complementaria. La media  $\bar{x}$  y la desviación  $S$  son del registro total de valores, se utilizaron las mismas  $n_1$  y  $n_2$  de la prueba de t Student para el promedio utilizado en el cálculo de  $\tau_{k1}$  y  $\tau_{k2}$  respectivamente. La prueba se obtiene con las siguientes relaciones :

$$\tau_k = \frac{(\bar{x}_{n_1} - \bar{X})}{S} \quad (9)$$

$$t_k = \left\{ \frac{n^1(n-2)}{n - n^1[1+(\tau_k)^2]} \right\}^{1/2} (\tau_k) \quad (10)$$

## 2.2. Muestreo

### 2.2.1. Metodología de muestreo

Los muestreos de agua superficial para caracterizar la hidroquímica se realizaron durante un periodo que abarca dos ciclos anuales de precipitación consecutivos (2015-2016). Se hicieron un total de cuatro muestreos, dos en época de secas y dos en época de lluvia.

La metodología para la ubicación de los sitios de muestreo varió cada año. Durante el 2015 se utilizó una estrategia sistemática tipo polar, con la recolección de muestras simples en las escorrentías superficiales, los sitios de muestreo se eligieron en la dirección de los vientos. El muestreo partió de la zona en donde se localiza la manifestación hidrotermal, abarcando un área de 5 km de diámetro, dividido cada kilómetro.

Para la realización de los muestreos del año 2016, se aplicó una estrategia de muestreo de tipo hidrológico en las zonas de estudio. En este caso los criterios para elegir los sitios de muestreo fueron los siguientes:

1. Accesibilidad. Las características de cada zona de estudio, como su topografía o densidad de vegetación, pueden hacer imposible el acceso a puntos de muestreo que se proponen en gabinete, por lo que se verificó en campo la accesibilidad a cada punto propuesto.
2. Dirección del flujo. Para caracterizar las concentraciones de los elementos a estudiar, se planteó seguir el curso de los efluentes a estudiar a fin de conocer que tanto varían a lo largo del escurrimiento.
3. Intersección de corrientes. Se propusieron en intersecciones para evaluar la variabilidad en las concentraciones de los aniones y los parámetros de campo.
4. Presencia de cuerpos de agua. A lo largo del cauce de una escorrentía se presentan cuerpos de agua, los cuales pueden indicar acumulación de los elementos a analizar.
5. Cercanía a asentamientos o actividades humanas.

Durante la tercera campaña de campo realizada en el año 2016 (marzo) se reubicaron algunos de los puntos preestablecidos debido a las condiciones del medio durante la visita o a la accesibilidad de los mismos. Durante la campaña correspondiente a la época de lluvias de ese mismo año, se procuró evaluar los mismos sitios que en la campaña de marzo 2016.

En este documento se reportan en total 149 muestras de agua. De estas, 44 corresponden al sitio El Chichonal, 54 corresponden al sitio de estudio de Los Negritos y 51 a la zona de estudio Acoculco (Tabla 4).

**Tabla 4. Número de muestras de agua por sitio.**

	<b>Marzo 15</b>	<b>Octubre 15</b>	<b>Marzo 16</b>	<b>Octubre 16</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Acoculco</b>	9	9	17	16	51
<b>El Chichonal</b>	7	8	15	14	44
<b>Los Negritos</b>	13	11	16	14	54
<b>TOTAL</b>					149

### **2.2.2. Parámetros de campo**

Durante los muestreos se midieron las siguientes variables fisicoquímicas: temperatura, salinidad, pH, potencial de oxidación-reducción (ORP), conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, para lo cual se utilizó el multiparamétrico Hach (HMP6P).

Una vez tomado el volumen de agua necesario en campo (150 mL), se trasladaron las muestras en refrigeración (~4°C). Al llegar al lugar de hospedaje, se filtraron las muestras con el uso de un sistema compuesto por una bomba manual de vacío y con filtros de celulosa de 0.45 µm de tamaño de poro.

En el caso de los aniones (nitratos, nitritos y fosfatos) se realizó una medición de la concentración disuelta mediante el uso del colorímetro Hach (DR 900), el mismo día del muestreo. Se preservaron las muestras en refrigeración ( $\sim 4^{\circ}\text{C}$ ), para el posterior análisis de isótopos estables ( $^2\text{H}$  o  $\text{D}$  y  $^{18}\text{O}$ ), fluoruros, cloruros y sulfatos. Dicho análisis se realizó, en el laboratorio de Fluidos Geotérmicos del CeMIE-Geo (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica), unidad CICESE.

### **2.2.3. Isótopos estables y aniones**

Para la medición de aniones disueltos en las muestras de agua se utilizó un equipo de cromatografía iónica Dionex/Thermo Scientific (ICS-5000). Para la medición de isótopos se utilizó un analizador de isótopos de alta precisión  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , Picarro (L2130-i). Todas las mediciones fueron realizadas por la M. en C. Ana Karina Espinoza, quien es responsable de los análisis en el laboratorio de Isótopos Estables del CeMIE-Geo (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica), unidad CICESE. El control de calidad de los datos fue responsabilidad del laboratorio.

## **2.3. Mapas de concentración**

Después de obtener los resultados de los análisis se generó una base de datos de los puntos de muestreo para las cuatro campañas de muestreo con su ubicación definida en el sistema coordinado WGS 1984. Para presentar los resultados se realizaron interpolaciones. La técnica presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde la ubicación de la muestra (ESRI, 2016a). Las interpolaciones se realizaron con la función de Análisis Espacial en el ArcGIS, con la técnica de interpolación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés). La técnica IDW funciona a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos, que en este caso fueron los del muestreo (Watson y Philip, 1985).

En las especificaciones para la interpolación, los datos de entrada fueron las mediciones por cada sitio. El valor de Z corresponde a los valores que se quieren representar (conductividad eléctrica, pH, nitratos, etc.) y el tamaño de la celda se estableció de 10 metros. Se utilizó el valor predeterminado del exponente de distancia (power); este exponente controla la influencia de los puntos circundantes, en donde una potencia mayor se refiere a una influencia menor de los puntos lejanos. El valor debe ser mayor a 0 y, los más razonables se encuentran entre 0.5 y 3; el valor predeterminado es 2 (ESRI, 2016a). Respecto al radio de búsqueda fijo se utilizó el valor predeterminado, para definir el radio de búsqueda fijo se requiere una

distancia de vecindad y una cantidad mínima de puntos, debido a que la distancia indica el radio del círculo de la vecindad (ESRI, 2016b).

Una vez realizados los cálculos se obtuvieron archivos tipo raster, los cuales fueron clasificados en 15 categorías de intervalos iguales. Los intervalos se definieron utilizando el valor máximo y mínimo del total de las muestras por parámetro, para poder tener una misma clasificación por zona y comparar los datos de cada campaña de muestreo.

## Capítulo 3. Resultados

### 3.1. Roca seca caliente, Aocolco, Puebla

#### 3.1.1. Análisis hidrológico

La zona de Aocolco que alberga un yacimiento de roca seca caliente, se encuentra en un parteaguas de dos cuencas. La cuenca de la zona Oeste es la del Pánuco (llamada 26Dv en lo subsiguiente) que tiene una superficie de 2819.36 km<sup>2</sup> dentro de la cuenca R. Moctezuma. En la sección Este se encuentra la cuenca Laxaxalpan (llamada 27Bc) con una superficie de 1608.16 km<sup>2</sup> dentro de la cuenca R. Tecolutla. La primera se considera “grande” y la segunda se encuentra en el rango de “intermedia—grande” según las categorías de Campos-Aranda (1992). Los coeficientes de compacidad resultaron de 1.93 (26Dv) y 2.04 (27Bc), con una relación de elongación en ambas cuencas de 0.51. Los coeficientes indican una formación alargada de la cuenca, lo que implica que el flujo pasará más rápidamente que en una circular. En el caso de la relación de elongación el valor se sale del rango especificado por el autor y se debe a que la cuenca presenta relieves y pendientes pronunciadas. De la zona de estudio la cuenca del Pánuco tiene una dirección Noroeste y la cuenca Laxaxalpan una dirección Noreste.

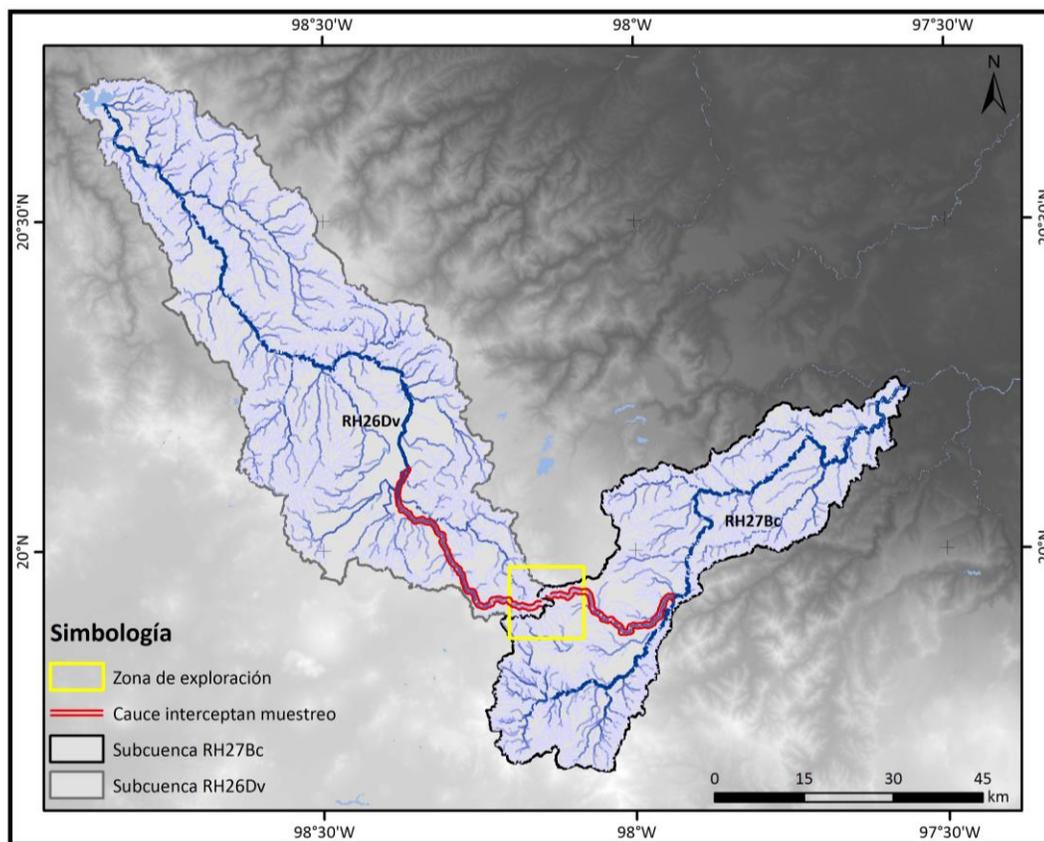
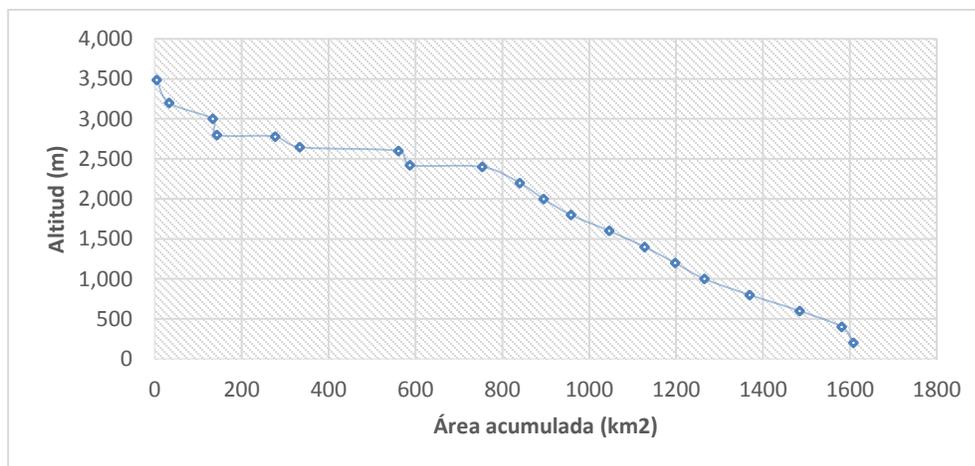
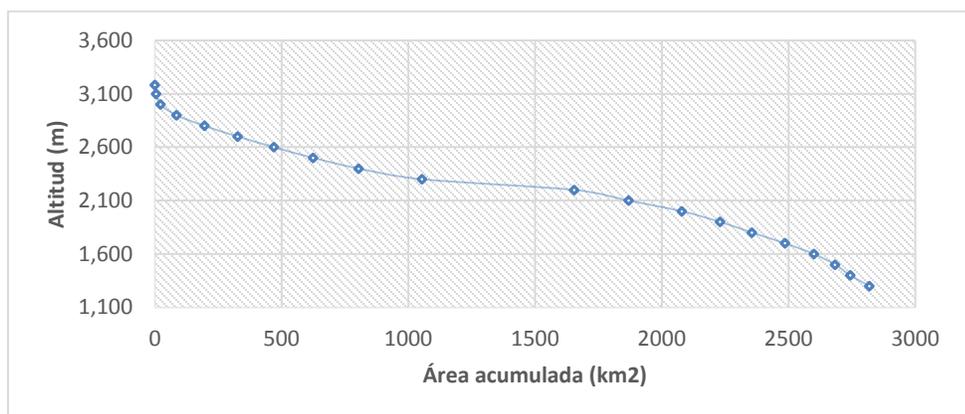


Figura 20. Hidrología de la cuenca 26Dv y 27Bc en la zona de estudio de Aocolco.

Las cuencas de esta zona de estudio son cuencas maduras o de pie de montaña, lo que significa que conforme aumenta el área acumulada, la velocidad disminuye a lo largo de las cuencas (Figura 21, Figura 22). En la cuenca 27Bc se observa que la altitud se encuentra entre los 200 y los 3489 msnm, la zona de acumulación se encuentra entre los 3000 y 2200 msnm, mientras que se observa mayor velocidad en las partes bajas. La cuenca 26Dv tiene unas altitudes entre 1300 y 3183 msnm, las áreas de acumulación de la parte central de la cuenca, está entre los 2100 y 2440 msnm. La cuenca posee velocidades parecidas cuenca arriba y cuenca abajo.



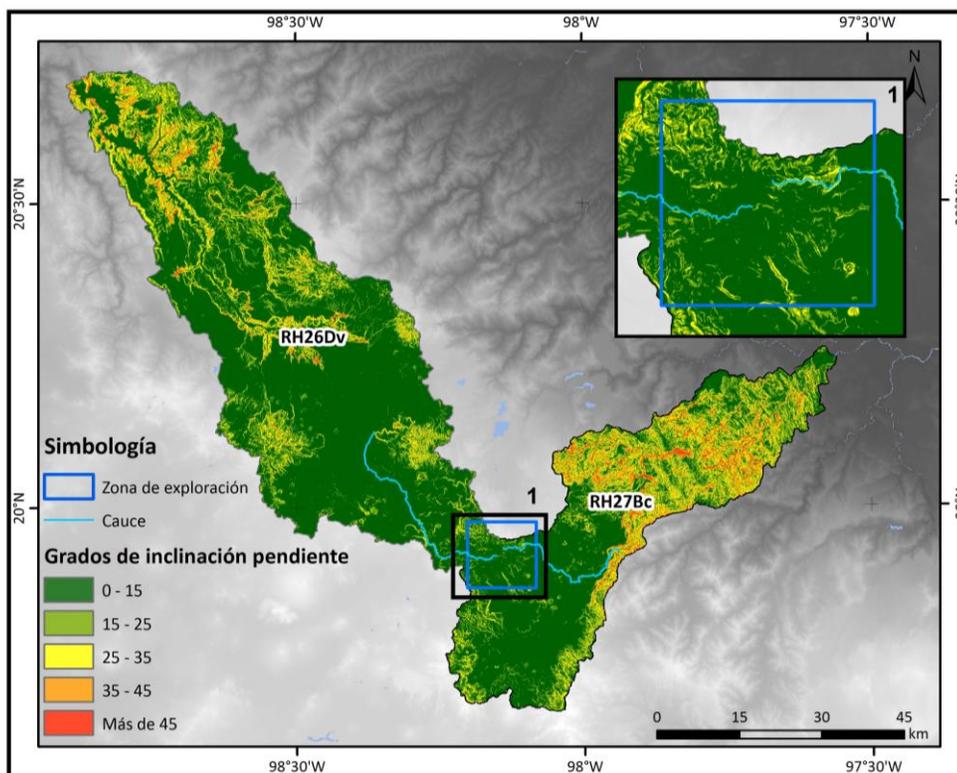
**Figura 21.** Curva hipsométrica cuenca 27Bc (Puebla).



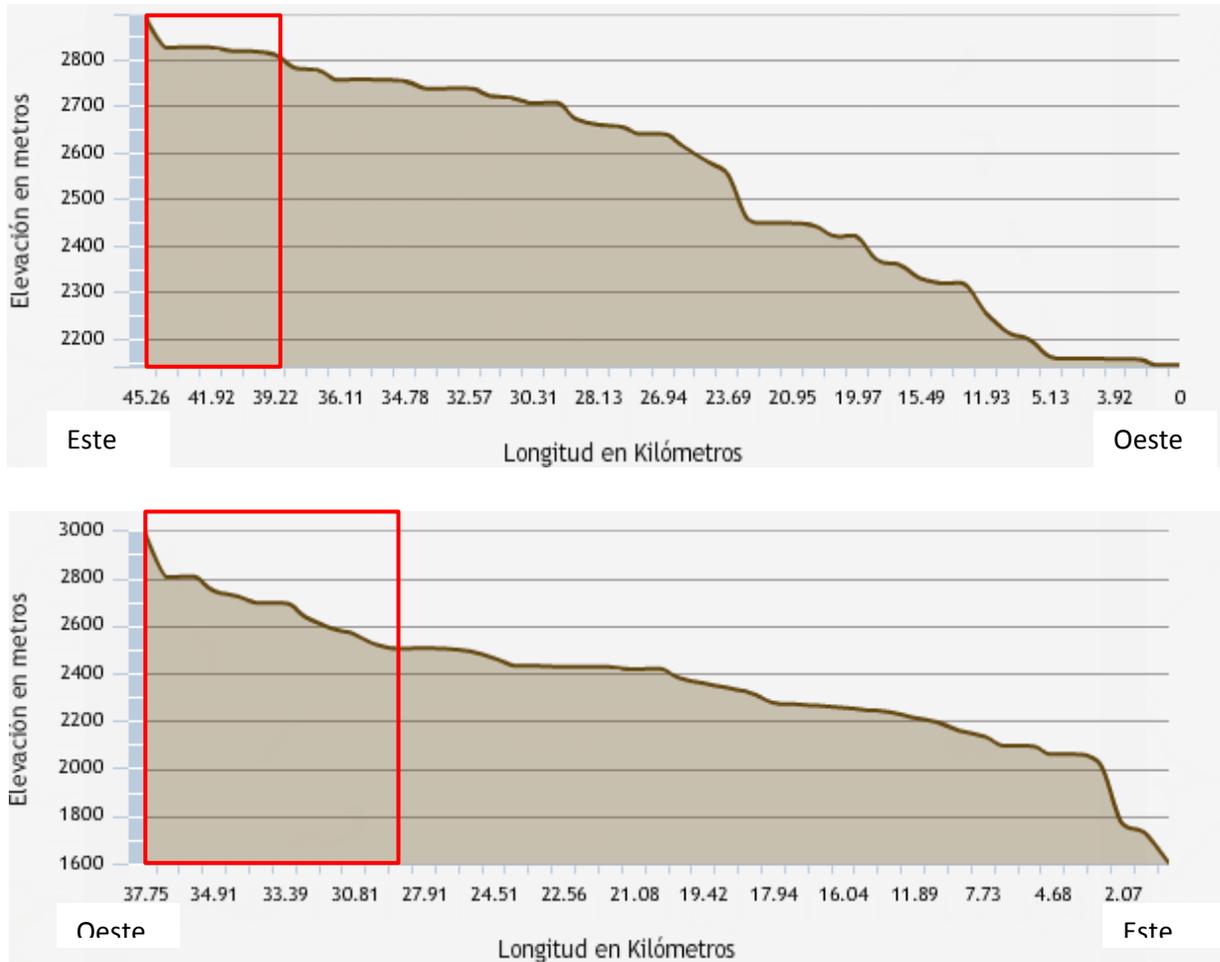
**Figura 22.** Curva hipsométrica cuenca 26Dv (Puebla).

En la Figura 23 se observa que las pendientes son mayormente abruptas en las zonas bajas de las cuencas lo que se puede relacionar a mayores velocidades en esta zona. En relación con la zona de exploración no hay pendientes abruptas, en su mayoría son pendientes de 0 a 15°.

Debido a que el cauce principal de las cuencas no se encuentra dentro de la zona de exploración, se eligieron los cauces con mayor orden dentro de la misma zona para realizar un perfil topográfico. El perfil topográfico se muestra de Oeste a Este en la cuenca 26Dv. El cauce mide 48.64 km, con una elevación entre 2121 y 2835 msnm. En la cuenca 27Bc, el cauce mide 36.58 km y se encuentra entre 2814 y 1574 msnm (Figura 24). En el perfil topográfico de la Figura 24 (arriba), se puede observar que el cauce presenta las mayores velocidades en la parte media del cauce, que está entre 2700 y 2159 msnm. En la zona de estudio el cauce tiene bajas velocidades, debido a que la pendiente no es muy abrupta. En la misma Figura 24 (abajo) se observa que existen pendientes más suaves a lo largo del cauce y dentro de la zona de estudio. Este cauce muestra una pendiente muy elevada en los últimos 5 km, cuando se une a una escorrentía principal.



**Figura 23.** Pendientes en la cuenca 26Dv y 27Bc de la zona de estudio en Acozulco, Puebla, donde se muestra el acercamiento 1 que se encuentra en la parte superior derecha.



**Figura 24.** Perfil topográfico del cauce principal de la cuenca 26Dv (arriba) y de la cuenca 27Bc (abajo) (tomado del portal de SIATL), donde el recuadro rojo indica la localización aproximada del cauce dentro de la zona de estudio.

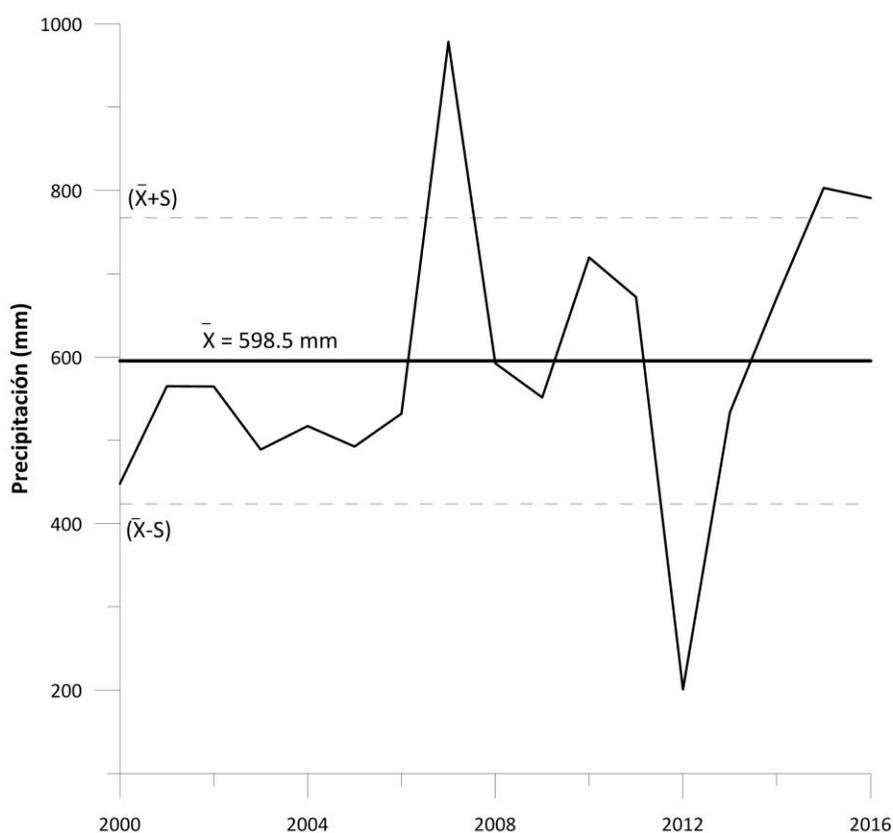
#### *Análisis de precipitación*

Los análisis estadísticos efectuados a los datos de precipitación anuales correspondientes a la estación de CONAGUA estación número 13082 mostraron una distribución homogénea. En la prueba no paramétrica Helmer se obtuvo un número de cambios  $C = 10$  y un número de secuencias  $S = 6$ , por lo tanto la diferencia de  $S - C = -4$ , lo que indica que la serie de datos es homogénea. En el caso de la prueba de secuencias se obtuvo un total de  $U = 9$ , este valor se encuentra dentro del rango de  $U$  especificado en la Tabla 3, que implica una serie de datos homogénea. En el caso de la prueba de t-Student, se obtuvo un valor crítico de  $t_c = 2.36$ , siendo  $td = -0.66$  el valor absoluto de  $td$  es menor que  $t_c$ , lo que indica que la serie de datos es homogénea. En la prueba de Cramer resultó una  $t_{kn1} = -0.44$  y  $t_{kn2} = 0.49$ . Estos valores están por debajo del valor crítico de  $t$  ( $t_c$ ) en la prueba de t-Student, lo que implica una serie de datos homogénea.

**Tabla 5.** Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas en la zona de estudio Aocolco, Puebla.

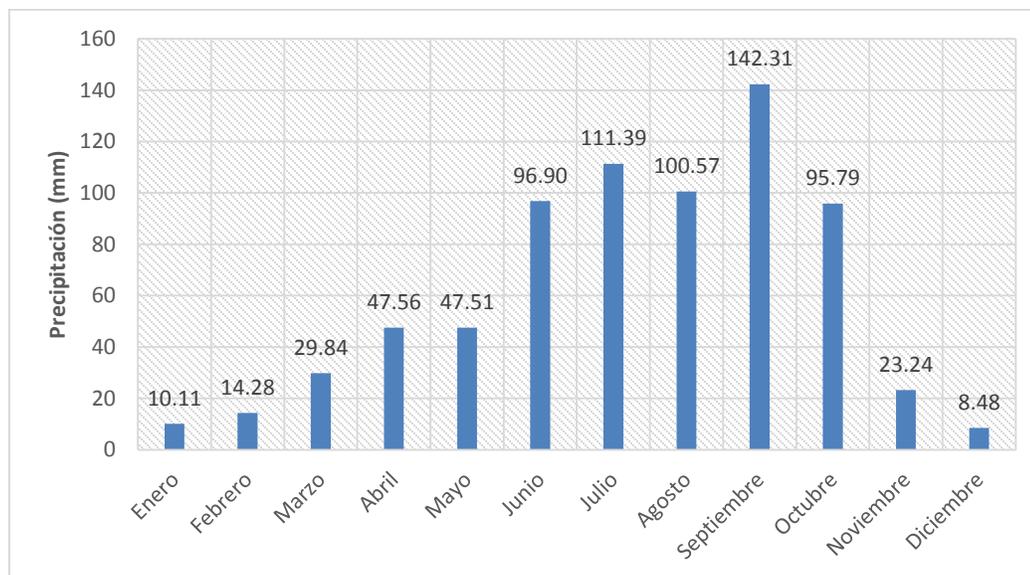
Prueba estadística	Resultado
Helmert	Homogénea
Secuencias	Homogénea
t-Student	Homogénea
Cramer	Homogénea

En la Figura 25 los datos de CONAGUA muestran un ciclo anual variable, donde el la media es de 598.5 mm, el año máximo de lluvia en el periodo analizado fue el 2007 con 978.5 mm y el año con menor precipitación fue el 2012 con 201 mm en todo el año. El año 2015 se considera como un año húmedo al igual que el 2016.

**Figura 25.** Gráfica de lluvia anual acumulada en la zona de Aocolco datos correspondientes a la estación de CONAGUA 13082.

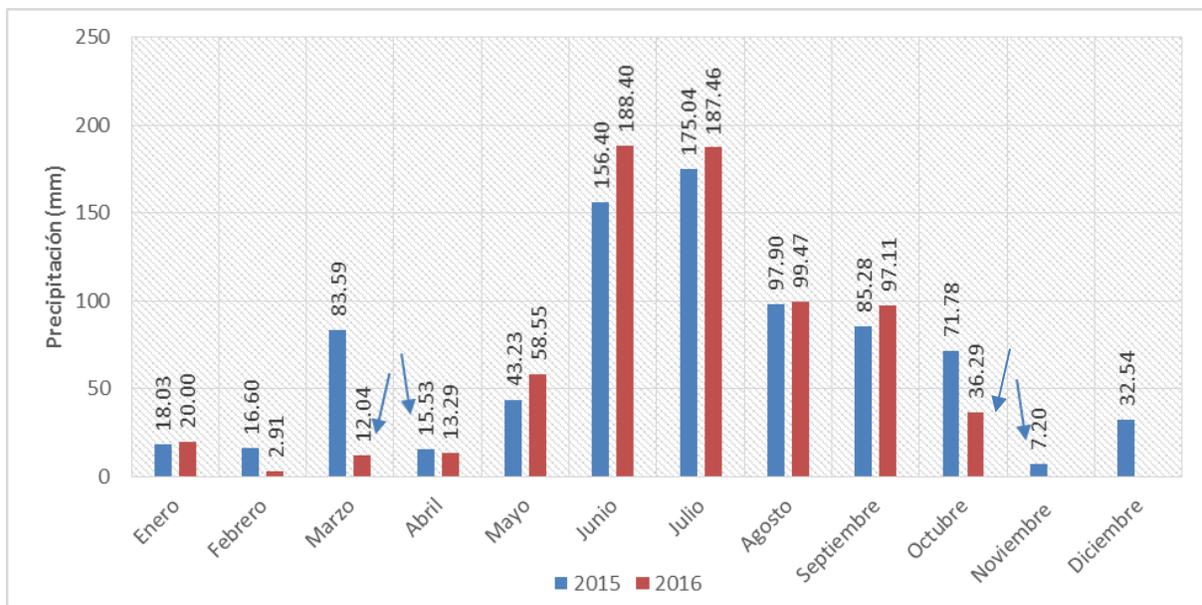
En comparación al ciclo de precipitaciones históricas encontradas (Figura 26), se puede apreciar en la Figura 27 que la precipitación durante el año 2015 tiene diferente comportamiento. Durante los meses de lluvia se suscitaron lluvias por debajo del promedio. Se presentó una condición atípica de lluvia durante los meses de marzo, con una precipitación de 83.59 mm. Las condiciones atípicas durante el mes de marzo

se deben a dos frentes fríos (41 y42) del 4 al 24 de marzo, esto provocó dos tormentas invernales, cuatro frentes fríos y la entrada de humedad desde el Océano Pacífico (CONAGUA, 2015b).



**Figura 26.** Precipitación promedio mensual registrada en la estación 13082 periodo 1996-2016.

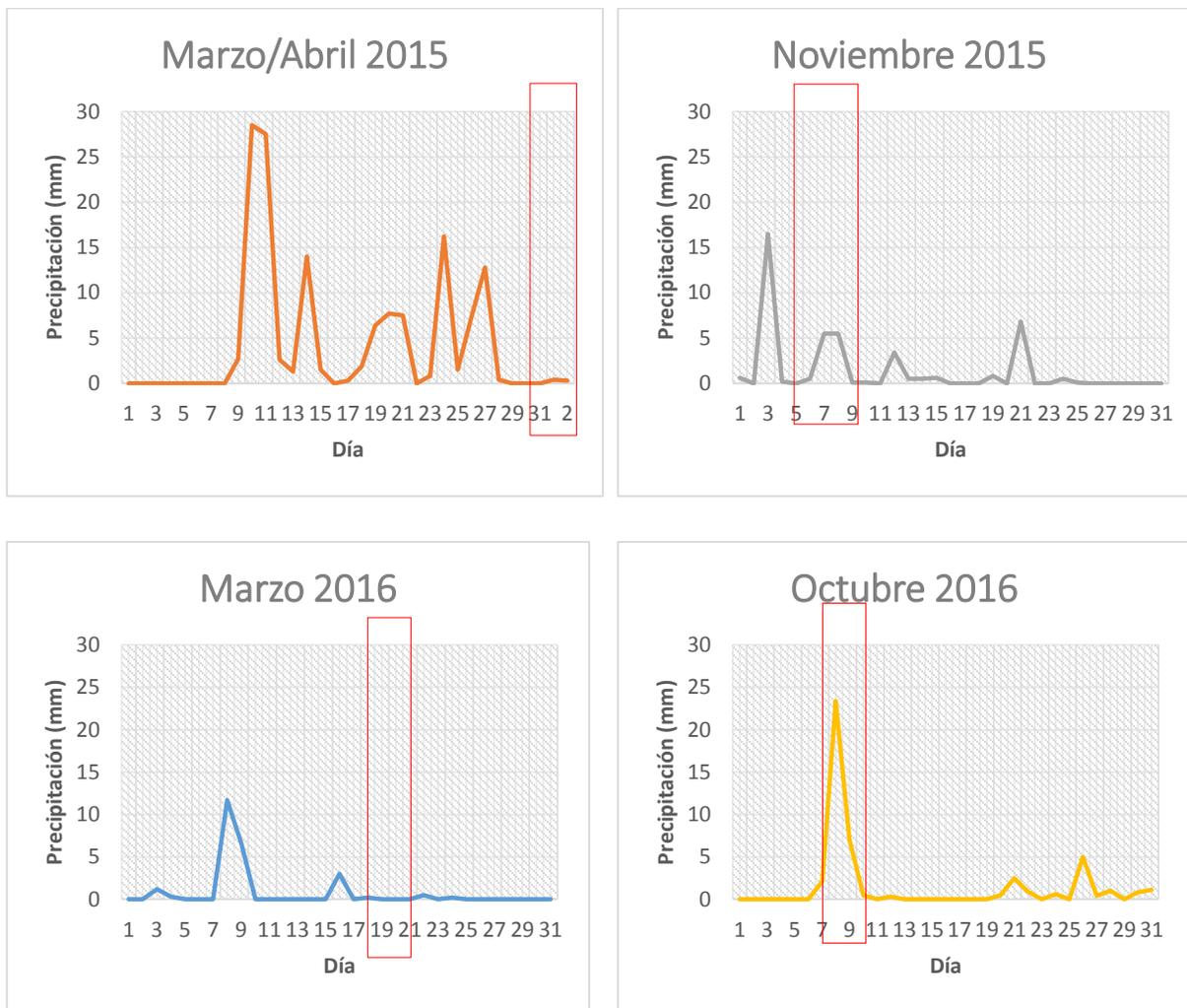
El año 2015 se clasificó como el 12° año más lluvioso desde 1941 a nivel nacional, en donde se reportan lluvias extraordinarias en el mes de marzo en Aguascalientes, Coahuila, Colima, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelia, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala y Zacatecas (CONAGUA, 2015a). A pesar de que a nivel nacional el 2015 se considerará un año lluvioso, en la Figura 25, se observa que en Puebla el 2007 fue aún más lluvioso.



**Figura 27.** Precipitación mensual acumulada (CONAGUA estación 13082) durante el año 2015 y 2016, en donde las flechas indican el mes en donde se efectuaron los muestreos.

Las condiciones de precipitación durante las temporadas de muestreos fueron variables (Figura 28). Durante la campaña de secas de marzo de 2015 se suscitaron lluvias los días anteriores al muestreo. En el muestreo de marzo de 2015, se efectuó el trabajo de campo durante los días del 31 de marzo al 2 de abril, por lo que se puede apreciar que las precipitaciones fueron bajas sin alcanzar los 5 mm diarios.

Durante las campañas de la época de lluvia se suscitaron diferentes escenarios, en 2015 ocurrió una lluvia de 5.5 mm mientras que en el 2016 alcanzó 23 mm la precipitación el día 8 de noviembre. En la época de secas durante el 2016 no se presentaron lluvias los días de muestreo, en 2015 tampoco, sin embargo, los días anteriores al muestreo se presentaron lluvias de hasta 28.5 mm.



**Figura 28.** Precipitación diaria durante los meses de muestreo.

### 3.1.2. Análisis hidroquímico

#### *Isótopos estables*

Los valores de  $\delta D$  van de -77.36 a -7.98 ‰ y de  $\delta^{18}O$  van desde -11.29 a 0.94 ‰ en las muestras de agua superficial de Acozulco (Tabla 6). En la Figura 29 se muestran las relaciones encontradas en las cuatro campañas de muestreo. En tres de las campañas de muestreo (marzo 2015, 2016 y octubre 2016) se observa que la línea de tendencia lineal cruza la LMM, este comportamiento se atribuye a un proceso de condensación. Los resultados de octubre 2015, demuestran que este proceso no tuvo una gran influencia en las aguas de la zona.

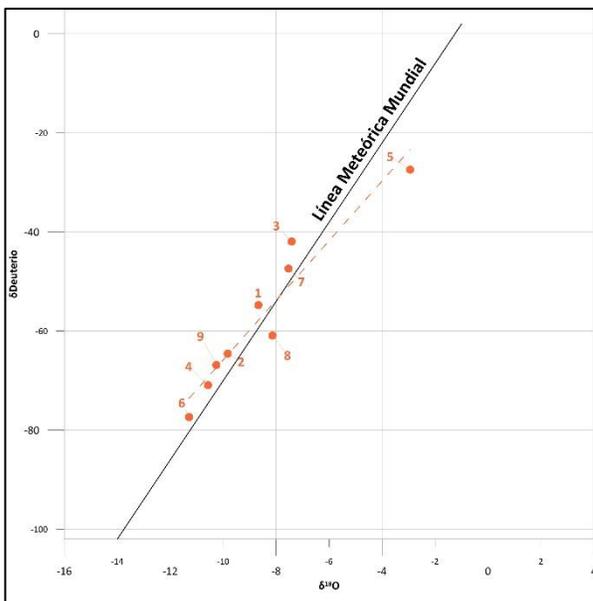
Durante el mes de marzo de 2015 se observan valores por encima de la LMM, lo que implica exceso de deuterio, promovido por las condiciones de vapor de esa temporada. En la campaña de octubre de 2016

se aprecia una distribución agrupada cerca de la LMM con valores -8.27 a -10.36 ‰ de  $\delta^{18}\text{O}$  y -71.05 a -61.51 ‰ de  $\delta\text{D}$ , exceptuando el punto 5 que presenta los valores máximos.

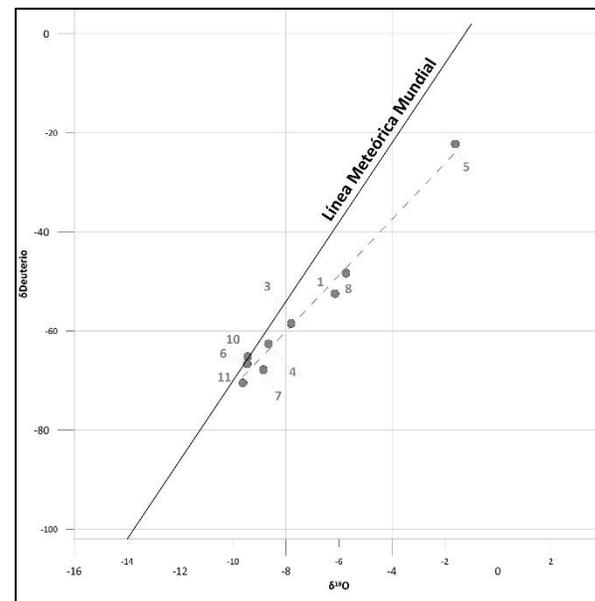
**Tabla 6.** Resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  en la zona de estudio Acoculco, Puebla.

Secas 15					Lluvias 15				
No.	$\delta^{18}\text{O}$	Desviación	$\delta\text{D}$	Desviación	No.	$\delta^{18}\text{O}$	Desviación	$\delta\text{D}$	Desviación
1	-8.67766	0.02	-54.7652	0.02	1	-6.15	0.04	-52.5	0.23
2	-9.82986	0.02	-64.549	0.14	3	-7.8	0.11	-58.49	0.76
3	-7.42	0.02	-41.93	0.05	4	-8.66	0.19	-62.59	1.09
4	-10.5778	0.01	-70.9349	0.13	5	-1.61	0.13	-22.24	1.07
5	-2.94731	0.02	-27.4022	0.15	6	-9.47	0.19	-66.6	0.93
6	-11.2946	0.02	-77.3636	0.32	7	-8.86	0.07	-67.81	0.48
7	-7.53005	0.02	-47.4191	0.09	8	-5.74	0.20	-48.31	1.04
8	-8.1466	0.03	-60.9225	0.14	10	-9.45	0.22	-65.18	1.50
9	-10.2564	0.03	-66.8537	0.05	11	-9.63	0.25	-70.43	1.55
Secas 16					Lluvias 16				
5	0.16	0.02	-12.54	0.32	2	-9.11	0.02	-66.62	0.17
11	-1.95	0.03	-29.6	0.51	4	-9.69	0.02	-66.39	0.16
12	-9.58	0.04	-67.92	0.23	5	-2.83	0.04	-30.70	0.28
13	-7.56	0.05	-57.29	0.37	11	-8.69	0.04	-61.51	0.09
14	-9.67	0.03	-68.77	0.3	13	-9.90	0.04	-66.95	0.13
15	-4.65	0.04	-39.3	0.29	13	-9.64	0.05	-66.26	0.29
16	-10.03	0.03	-68.02	0.14	14	-9.86	0.04	-68.05	0.10
17	-4.9	0.1	-47.53	0.37	17	-10.16	0.03	-68.16	0.04
18	-7.39	0.08	-57.12	0.34	18	-8.58	0.11	-63.70	0.61
19	-7.52	0.06	-56.75	0.24	21	-10.36	0.02	-71.05	0.08
20	-11.09	0.02	-77	0.18	22	-8.92	0.02	-64.36	0.14
21	-2.77	0.05	-34.48	0.31	23	-10.26	0.04	-69.81	0.27
22	0.94	0.07	-7.98	0.64	24	-9.70	0.02	-66.28	0.11
23	-10.6	0.05	-72.68	0.33	25	-8.27	0.03	-61.53	0.13
24	-10.11	0.08	-71.19	0.42	27	-10.05	0.03	-67.01	0.26
25	-4.83	0.02	-40.34	0.24	28	-9.47	0.02	-64.23	0.15
26	-9.86	0.06	-72.48	0.23					

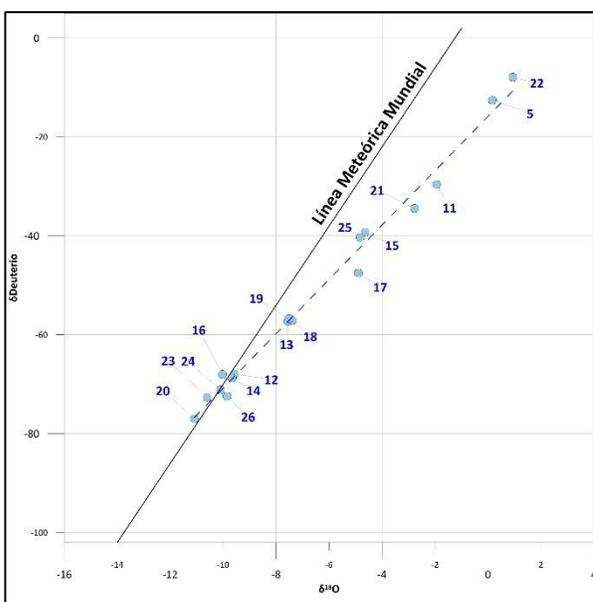
a) Marzo 2015



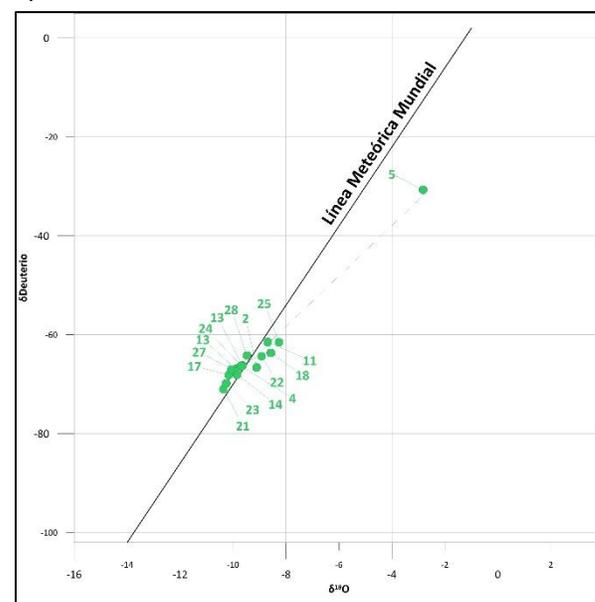
b) Octubre 2015



c) Marzo 2016



b) Octubre 2016



**Figura 29.** Relación isotópica de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  en las cuatro campañas de muestreo en Acaculco.

En todos los muestreos, la concentración del punto número 5 tiene un valor más alto que el resto, cabe resaltar que este punto corresponde al mismo sitio de muestreo en las cuatro campañas. Este sitio de muestreo se localiza en una presa a pie de carretera en la parte Sur de la zona de estudio. La presa tiene una extensión de 20 ha y se encuentra a 3 km al Sur de la manifestación hidrotermal (Figura 29). En la campaña de marzo de 2016 se observa un valor máximo en el punto 22, este sitio también se tomó en la

presa, pero en su extremo Norte. Lo que indica que esta agua es del mismo origen y que al estar estancada, en comparación con el resto de las aguas muestreadas, es distinta. Sin embargo, en octubre 2016, el punto 22 tiene una relación isotópica similar al resto de las aguas superficiales de la zona, lo que es un indicador de que en esta época hubo una mezcla de aguas de diferente origen a la del punto 5, ésta mezcla es promovida por la precipitación que ocurrió durante el muestreo.



**Figura 30.** Foto donde se muestra la presa donde se localiza el punto 5.

#### *Parámetros fisicoquímicos*

Los resultados de pH de los cuatro muestreos presentan un valor promedio de 6.19 lo que implica un ambiente básico, con valor máximo de 8.64 y mínimo de 3.54 (Tabla 7). El valor máximo se presentó durante la campaña de marzo de 2016 en el punto 5 y el mínimo en el muestreo de octubre 2015 y marzo 2016 en los puntos 3 y 14 respectivamente, estos puntos se encuentran cercanos al yacimiento de roca seca.

El punto 5 tiene valores básicos, se localiza en una laguna en el camino. El punto 3 se encuentra cerca del pozo 1 dentro de una poza de coloración café y el 14 al Este de la escorrentía de la manifestación. En las cuatro temporadas se observan valores similares en donde se aprecian valores más ácidos cercanos al pozo 1 y más básico en las zonas al Sur (Figura 33). En la Figura 31, se observa la laguna café y en la Figura 32 el punto 14.

En la Figura 33 se puede observar una distribución parecida en todas las campañas, resultando ambientes básicos en la parte Sur y ácidos en la parte Norte. Durante la campaña llevada a cabo en la temporada de lluvia en 2015 se observan mayores valores de pH. Los valores ácidos que se observan en los mapas de interpolación se asocian a la actividad del yacimiento. Resalta el punto 14 con valores de 3.54 y 3.94 en las

campañas de secas durante 2016 de lluvias de ese mismo año, respectivamente. Los valores de pH de la precipitación pluvial se encuentran en el rango de 5.5 a 6.5 unidades. Resultaron nueve puntos de muestreo dentro de este rango.

La conductividad eléctrica varía de 11.11 a 1132  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los datos de todos los muestreos, con un promedio de 347.73  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , como se observa en la Figura 34 los valores más altos se encuentran en las escorrentías cercanas al pozo 1, se presenta una distribución parecida en todas las campañas, con concentraciones mayores durante la campaña de marzo 2016.

En cuanto al ORP se encuentran valores en el intervalo de -163 a 503 mV (Figura 35). Durante la campaña de marzo de 2015 se muestran variaciones de ORP mayormente negativos, lo que contrasta los valores en las otras campañas de muestreo en donde los resultados en su mayoría son positivos asociados a los ambientes que favorecen la oxidación química.

**Tabla 7.** Valores de parámetros fisicoquímicos para la zona de Aocolco, Puebla.

Secas 15				Lluvias 15			
No.	pH	ORP (mV)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	No.	pH	ORP (mV)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	5.03	133	503	1	5.94	-71	406.9
2	4.68	-111	508	3	3.54	462	535.2
3	6.11	-163	899.5	4	3.87	95	450.8
4	7.13	-8	44.6	5	7.42	191	199.9
5	8.64	47	182.1	6	7.15	179	309.4
6	7.69	66	289.3	7	6.87	153	90.36
7	7.68	38	52.35	8	6.36	194	243.4
8	8.4	62	62	10	3.62	385	560.2
9	7.18	200	205.2	11	4.17	39	483.4
Secas 16				Lluvias 16			
5	8.63	165	233.1	2	6.38	-94	786.4
11	7.94	183	463.5	4	6.65	72	58.9
12	6.13	271	241.1	5	7.97	135	206.9
13	4.71	312	426.6	11	4.96	9	538.5
14	3.54	446	1,132.00	13	6.16	97	134.2
15	3.93	346	844.3	13	6.7	109	73.55
16	6.42	98	83.56	14	3.94	503	721.5
17	7.33	186	946.7	17	4.95	135	170.5
18	7.43	181	371.7	18	6.72	94	252.8
19	4.44	336	475.3	21	6.17	158	99.22
20	6.63	76	61.42	22	6.77	113	281
21	6.93	120	573.3	23	4.2	416	350.8
22	8.2	151	287.7	24	6.74	20	60.14
23	3.88	413	430.2	25	6.86	98	180
24	5.59	196	52.25	27	6.97	84	64.19
25	7.1	249	234.4	28	6.65	154	11.11
26	6.64	-115	861.6				



**Figura 31.** Foto en donde se observa la poza café.



**Figura 32.** Vista del punto 14, al Este de la manifestación hidrotermal de Acozulco.

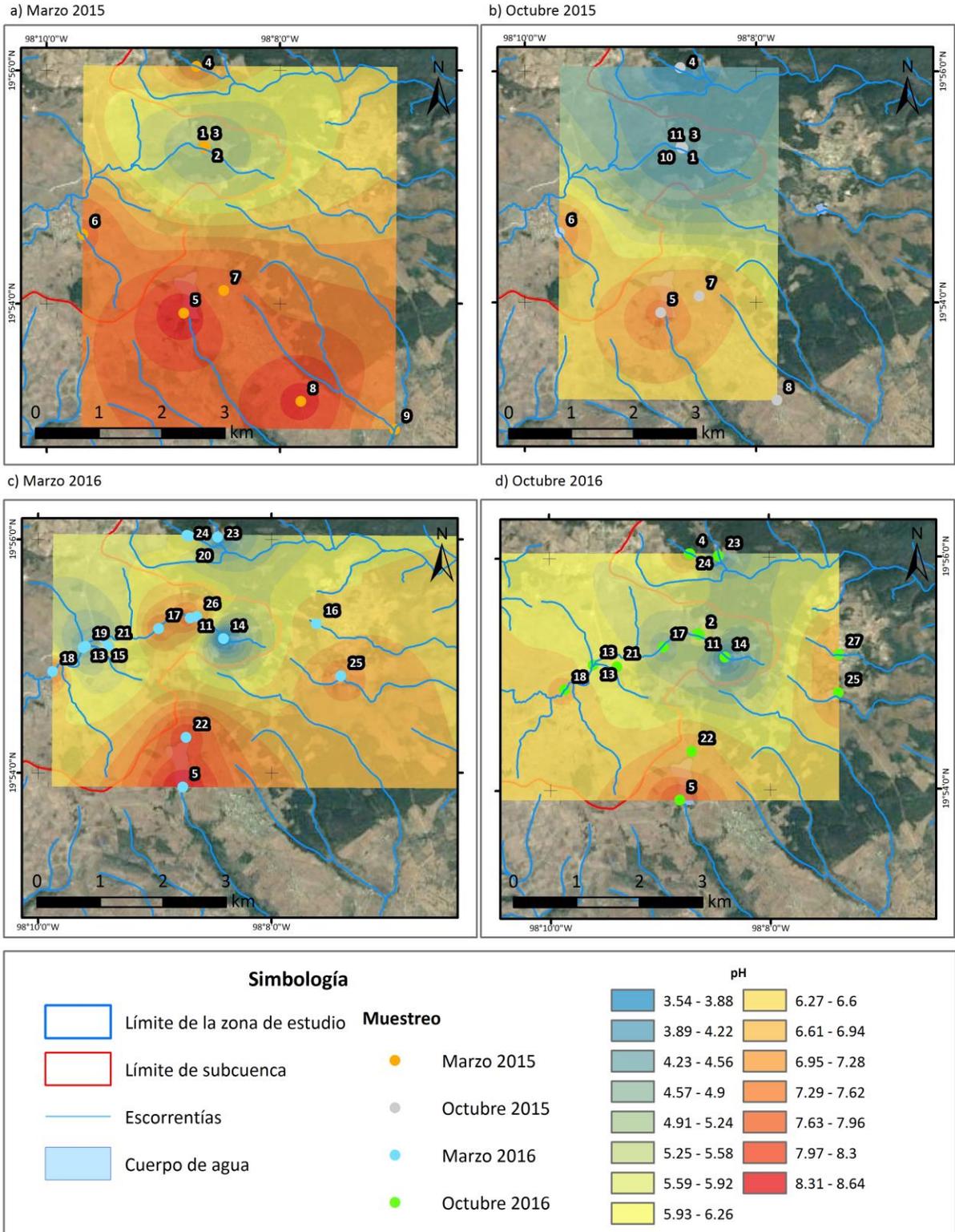
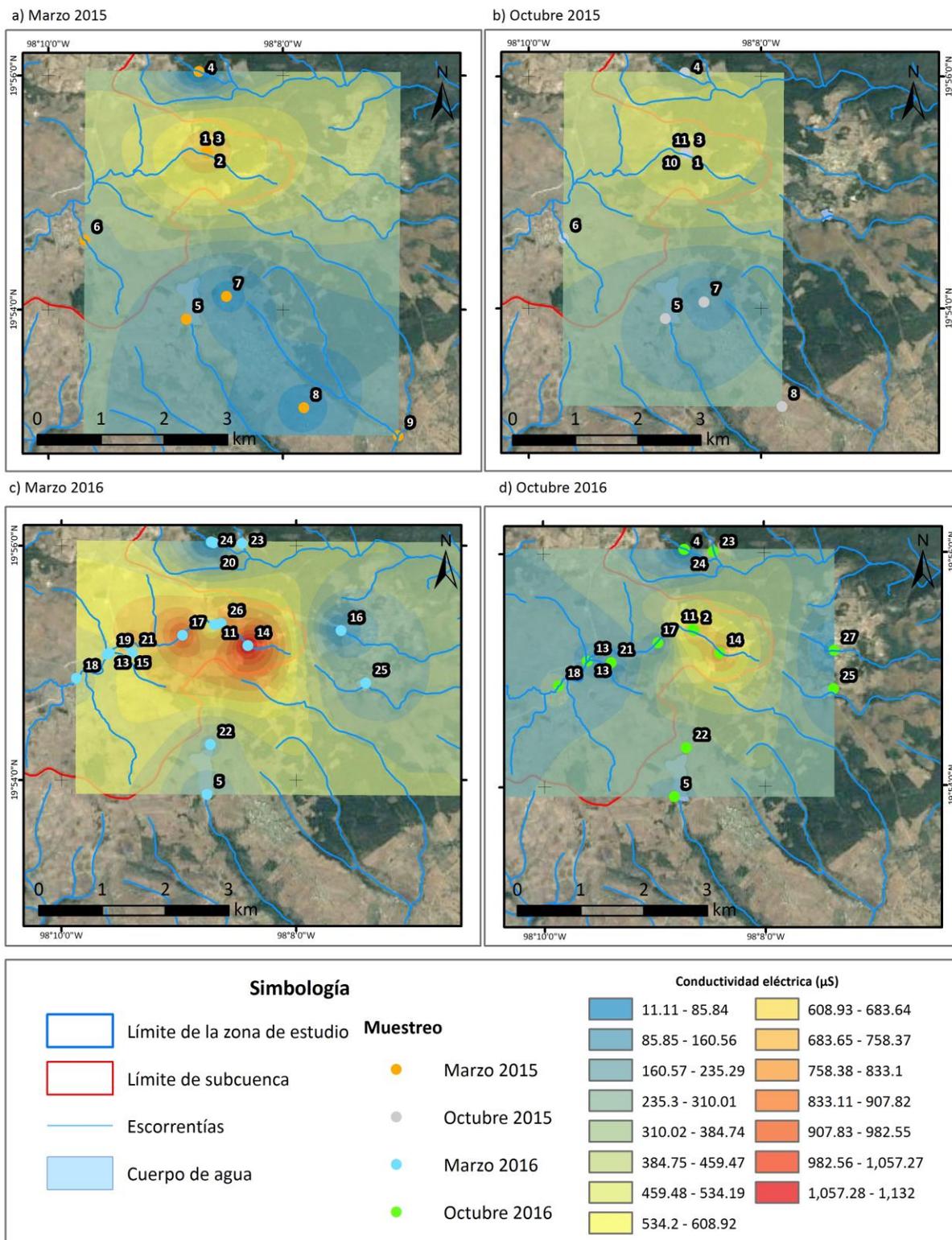


Figura 33. Valores de pH durante los cuatro campañas de muestreo en Acoaculco, Puebla.



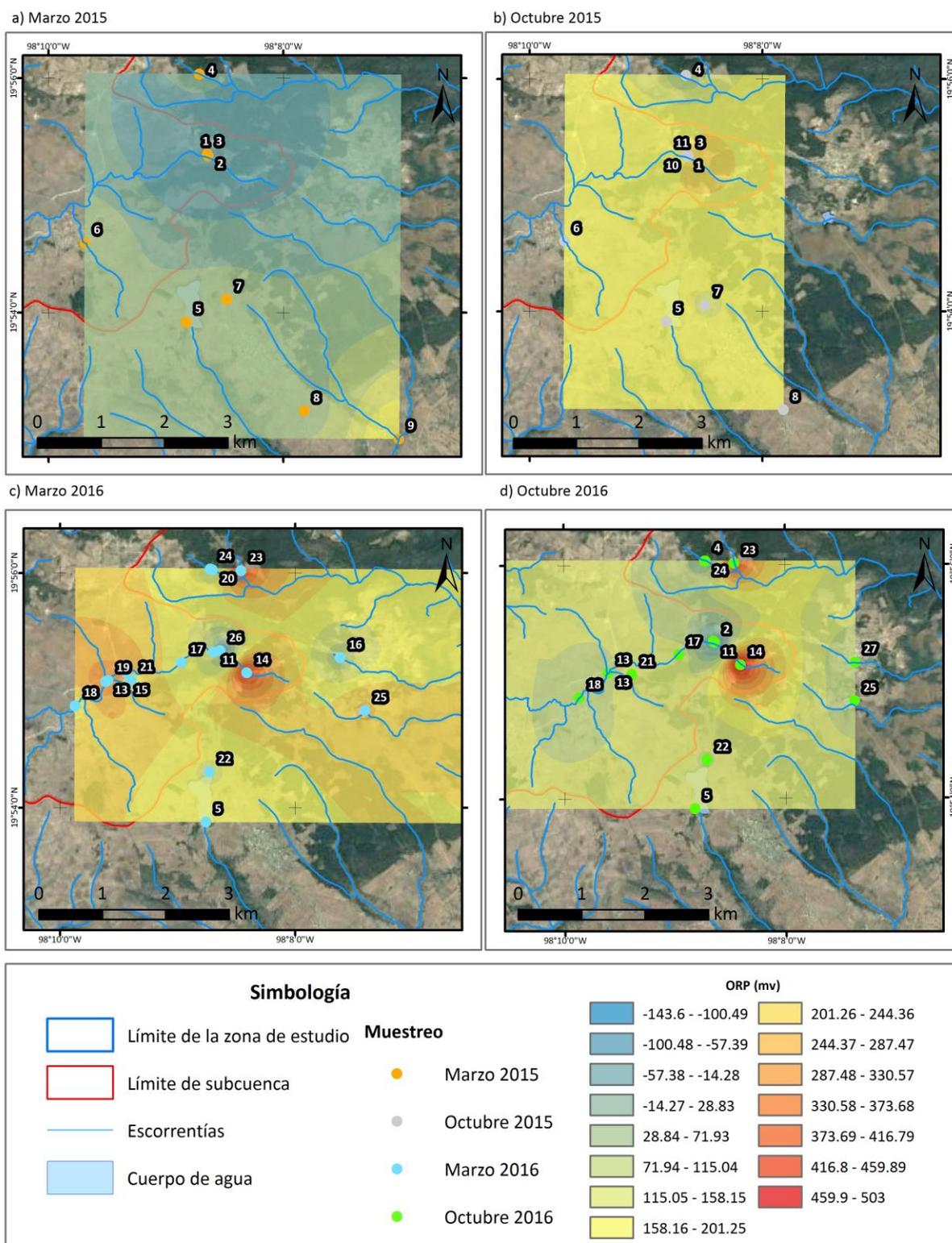


Figura 35. Valores de potencial óxido-reducción (ORP) en los muestreos de Aocolco, Puebla.

### *Aniones*

Los nitratos tienen valores por debajo de 10.5 mg/L en los primeros tres muestreos. Durante la campaña de octubre 2016 se reportan valores mayores alcanzando 57 mg/L. Este valor se presentó en el punto 11, seguido por el punto 25 con una concentración de 19.31 mg/L (Figura 37). El punto 11 se encuentra cercano a la manifestación superficial de Acoculco, dentro de la poza azul (Figura 36), y el 25 se encuentra en el límite Este de la zona del muestreo. El uso de suelo registrado en estos puntos es de agricultura de temporal, sin embargo, por observaciones en campo en estos puntos se utiliza el área para actividades de ganado.

La NOM-127-SSA1-1994 señala como límite permisible a la concentración de 10 mg/L, por lo que se observa que sólo en tres de las muestras analizadas la concentración de nitritos sobrepase esta normatividad.

Los nitritos exhiben valores por debajo de 0.043 mg/L. Los valores de nitritos en todas las muestras de agua tomadas en Acoculco, representan concentraciones muy pequeñas respecto a los límites propuestos por la OMS (2006) y de CONAGUA (DOF, 1994), que son 3 y 1 mg/L, respectivamente. El rango de valores de nitritos no es grande, por lo que no se muestra el mapa de interpolaciones.

Los fosfatos en los muestreos tienen valores que van desde 0 a 2.47 mg/L y las concentraciones mayores se encuentran cercanas al pozo 1, sin embargo, al considerarse valores por debajo de 2.47 mg/L, no se presenta mapa de interpolación (Figura 38).

Los cloruros en la zona de estudio se presentan con valores de 0 a 78.43 ppm. En la Figura 39 se puede apreciar que los valores más altos se encuentran durante la campaña de octubre de 2015 y se encuentran en los extremos Norte y Sur, cerca del sitio en donde está proyectada la perforación de un pozo 3 y en una represa casera. Los fluoruros son aún menos abundantes que los cloruros debido a que el valor máximo es de 1.4 ppm (Figura 40). Las concentraciones de fluoruros no exceden de los límites permisibles para uso de agua potable.

Las concentraciones mayores de sulfatos se presentaron en el muestreo llevado a cabo en marzo de 2016, alcanzando un valor máximo de 549.16 ppm (Figura 41). Los valores altos persisten en el punto 14 durante los muestreos llevados a cabo en 2016, en este punto se visualiza coloración roja en rocas alledañas, este punto es cercano a zonas de actividad agrícola. El valor máximo permisible para el agua potable es de 400 ppm, sólo en el punto 14 se excede. Por las características del agua del sitio se esperaban resultados más altos en todas las campañas, sin embargo, solo se dio en este punto.



**Figura 36.** Foto en donde se observa la poza azul.

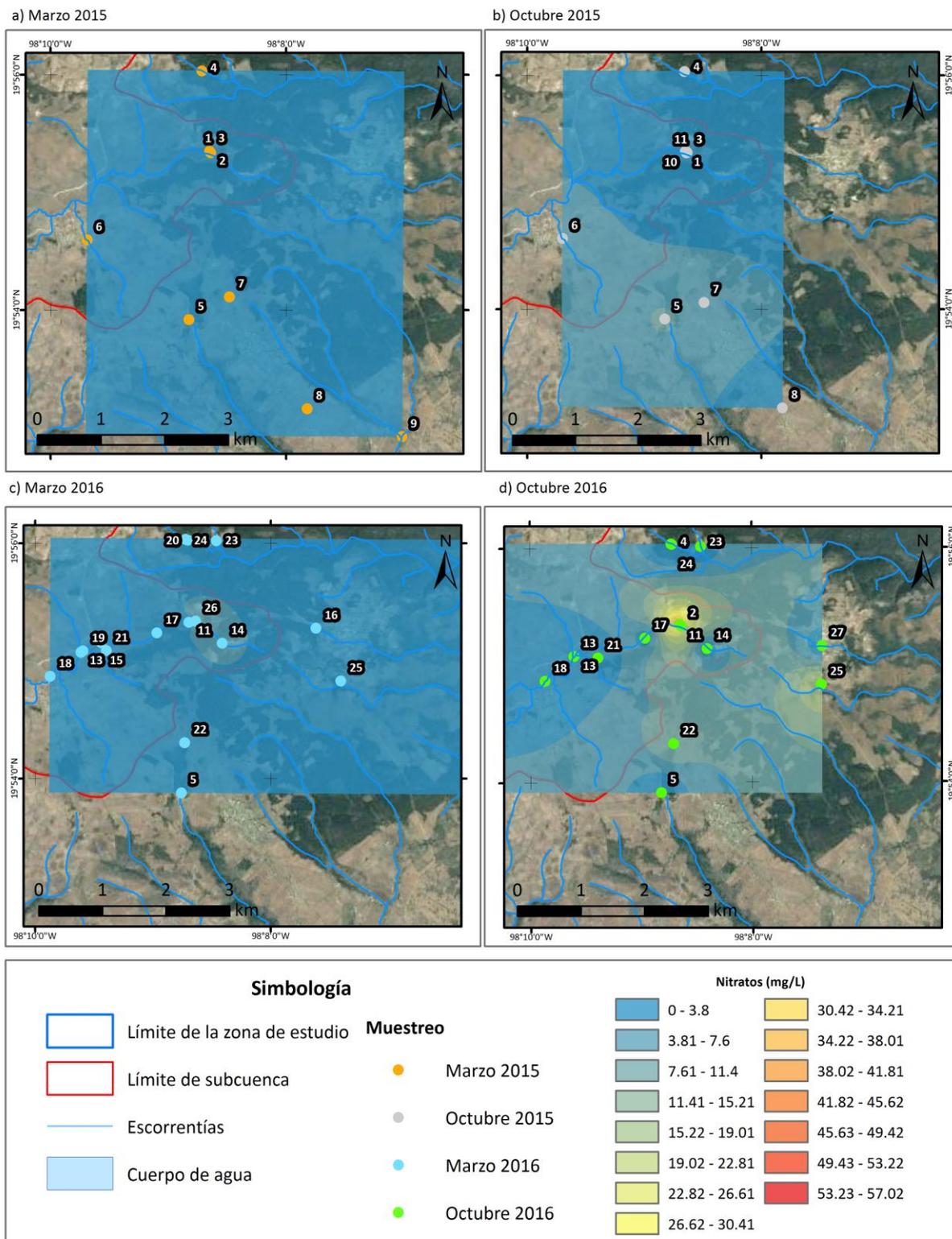


Figura 37. Nitratos de las cuatro campañas de muestreo en la zona de estudio Acapulco, Puebla.

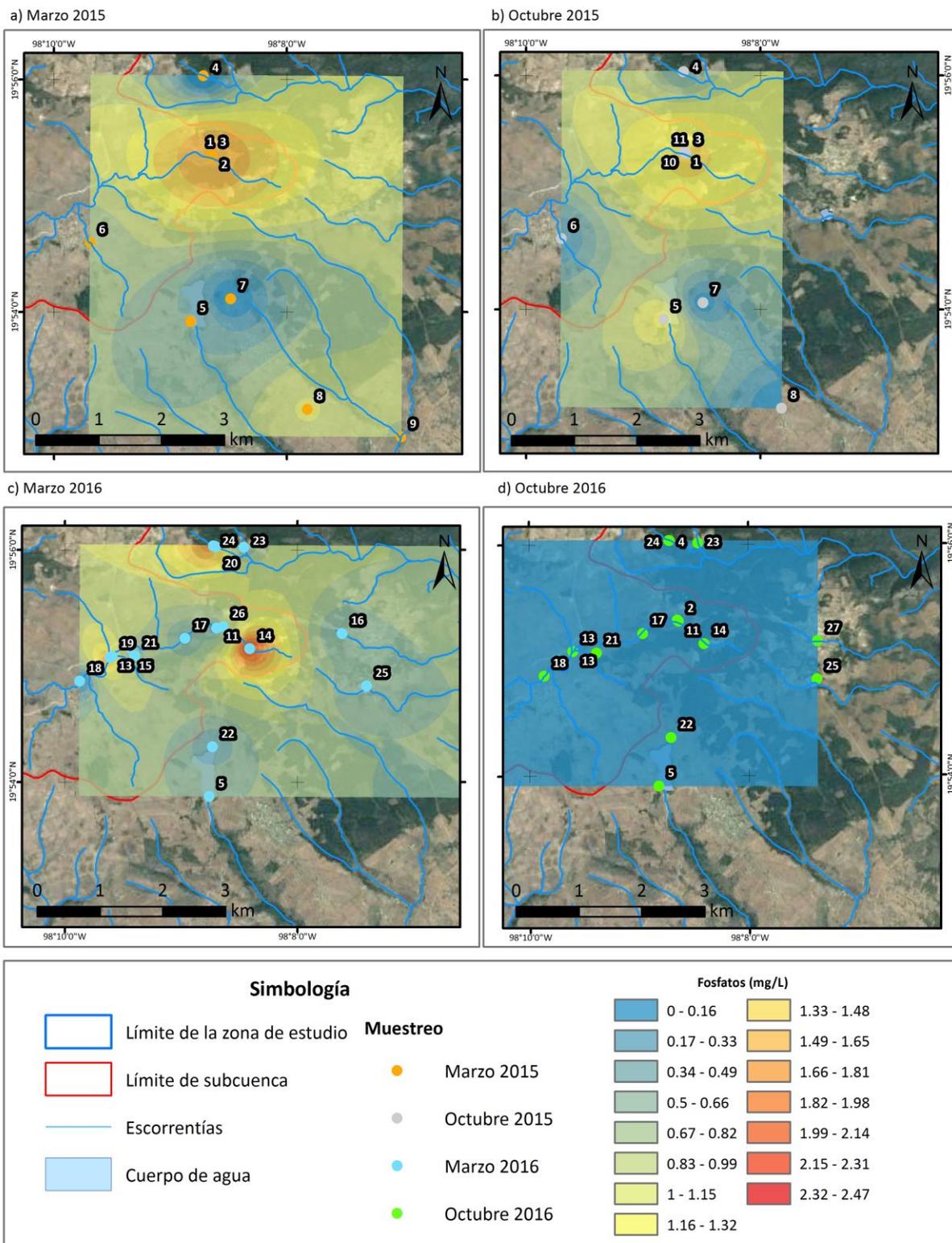


Figura 38. Fosfatos en los muestreos en la zona de estudio de Acoaculco, Puebla.

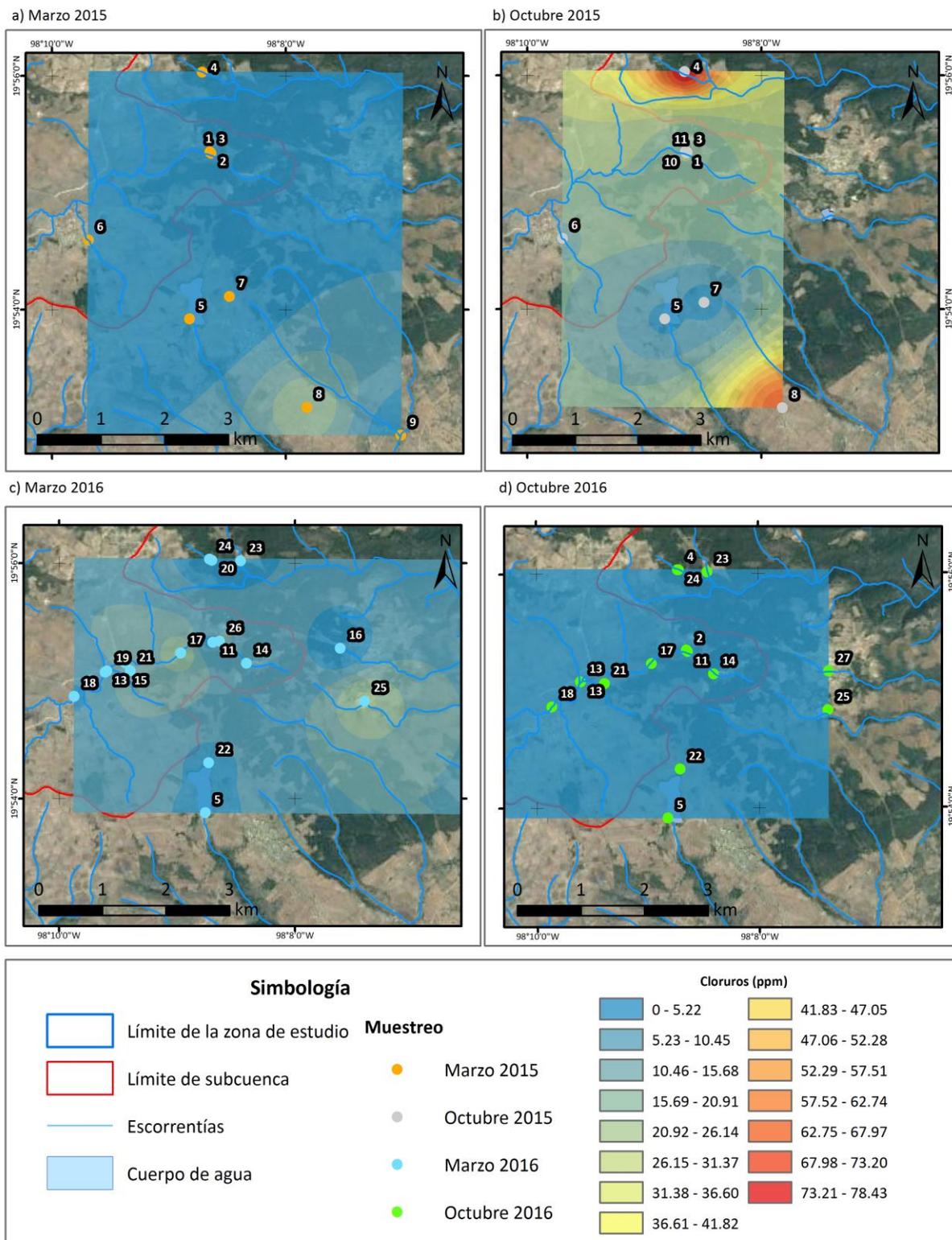
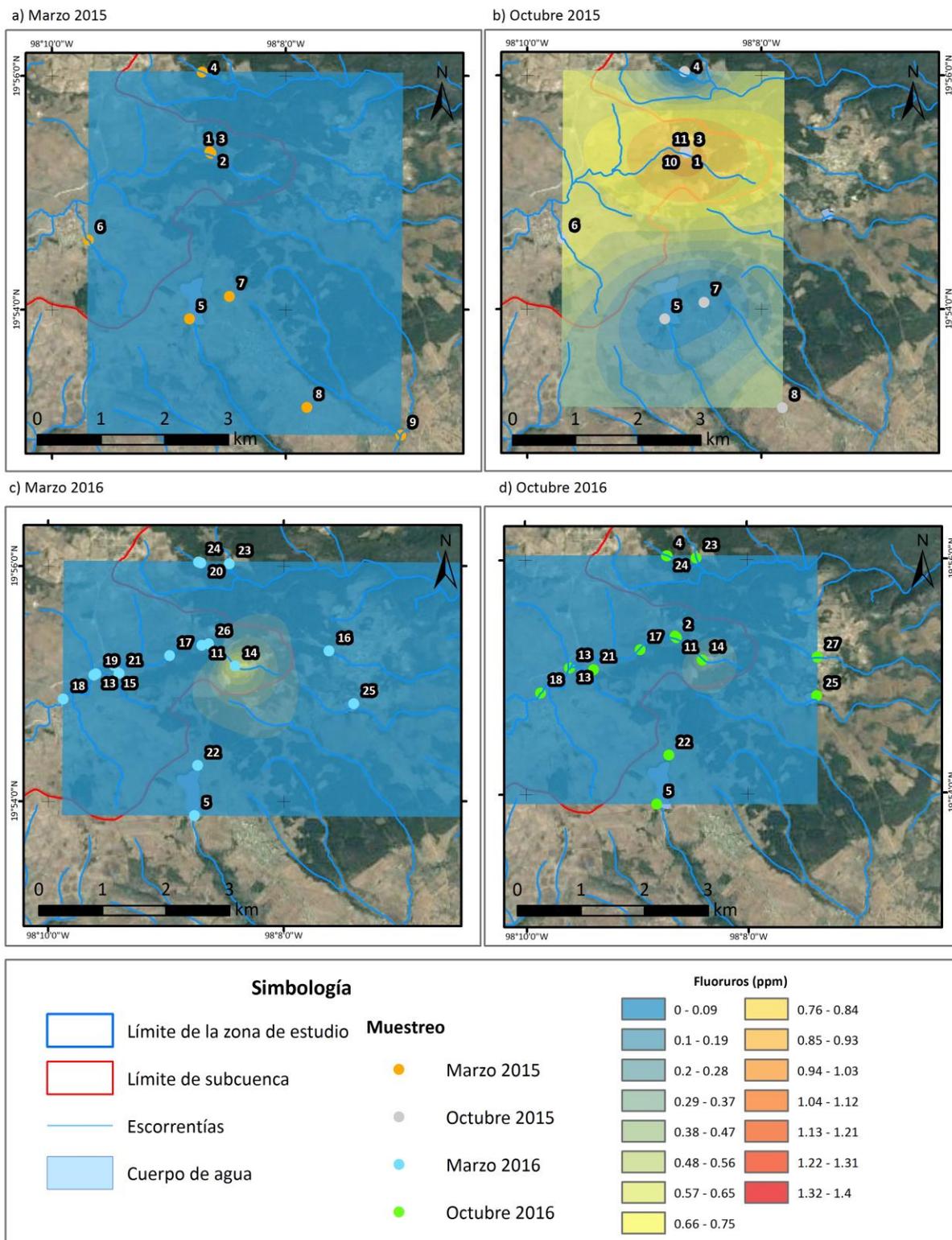


Figura 39. Concentración de cloruros en la zona de estudio de Acapulco, Puebla.



**Figura 40.** Concentración de fluoruros en la zona de estudio de Acoaculco, Puebla.

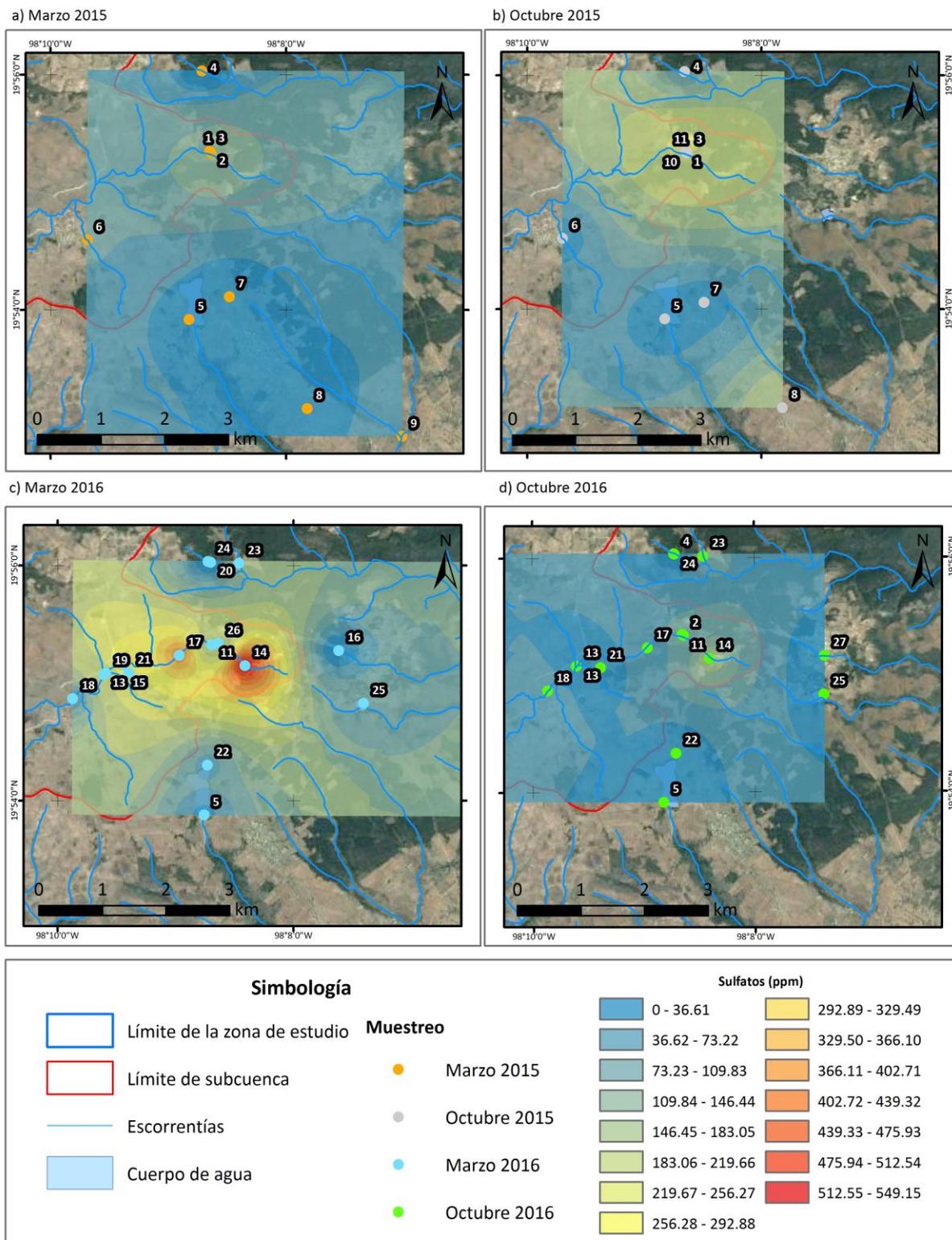
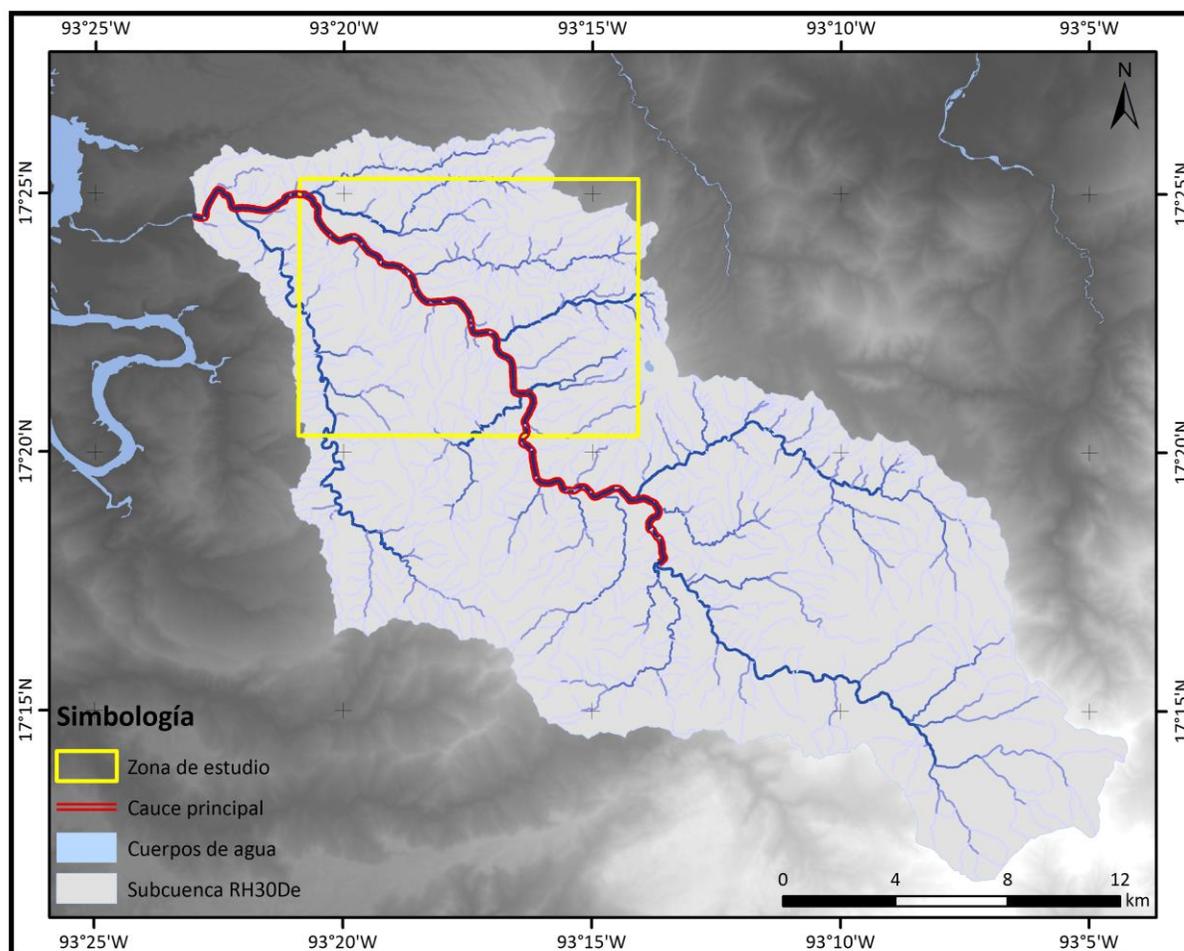


Figura 41. Concentración de sulfatos en la zona de estudio de Acoaculco, Puebla.

## 3.2. Asociada a vulcanismo, El Chichonal, Chiapas

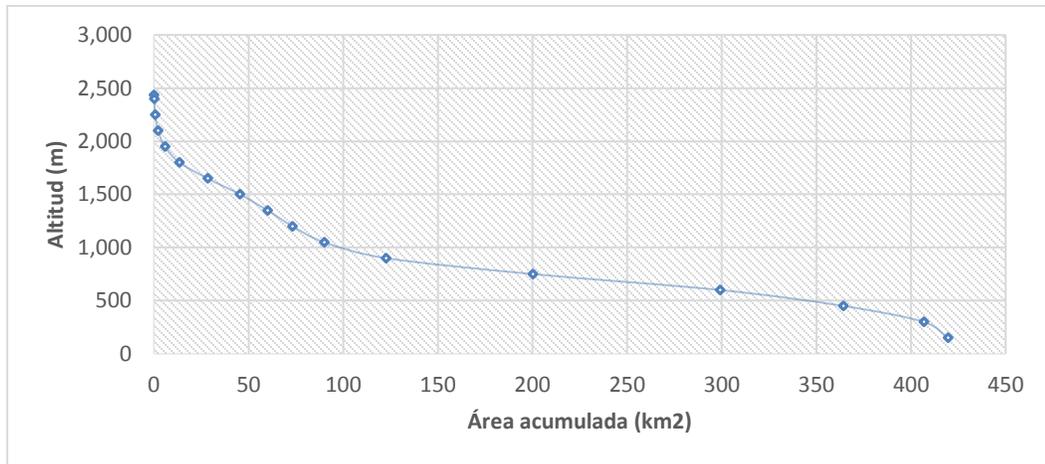
### 3.2.1. Análisis hidrológico

En la zona de El Chichonal se encuentra una cuenca de 419.59 km<sup>2</sup>, esta cuenca se considera “pequeña” según la clasificación de Campo-Aranda (1999). La cuenca está conformada por escurrimientos de cinco órdenes, donde el principal es el Río Magdalena, en donde se efectuó la toma de la mayoría de las muestras durante las campañas de marzo y octubre 2016. La cuenca se conoce como R. Zayula (RH30De) dentro de la cuenca R. Grijalva-Villahermosa en la región hidrológica Grijalva-Usumacinta, la cual recorre con dirección Noroeste hasta llegar el Río Grijalva (Figura 42). Esta cuenca presenta un coeficiente de compacidad de 1.64 lo que indica una forma circular. En cuanto a la relación de elongación se presenta un valor de 0.58, el cual no se encuentra dentro del rango, lo que se puede deber a tener pendientes y relieves fuertes.

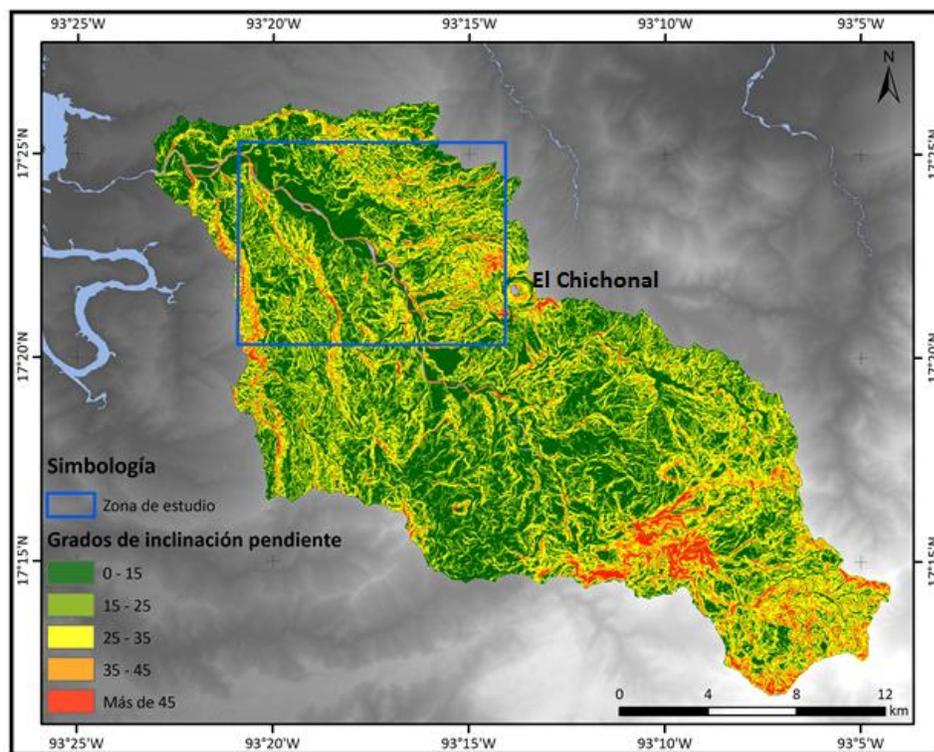


**Figura 42.** Hidrología de la cuenca 30De en la zona de estudio de El Chichonal, Chiapas.

La curva hipsométrica (Figura 43) muestra que la cuenca es de tipo de valle o erosionada, lo que indica que existe acumulación en las zonas bajas y una mayor velocidad cuenca arriba. La cuenca se encuentra en las altitudes entre los 150 y 2,473 msnm y la mayor superficie acumulada se encuentra en los 450 y 1050 msnm. Lo que se puede asociar a menores velocidades de flujo entre estas latitudes y una mayor velocidad en las altitudes mayores.



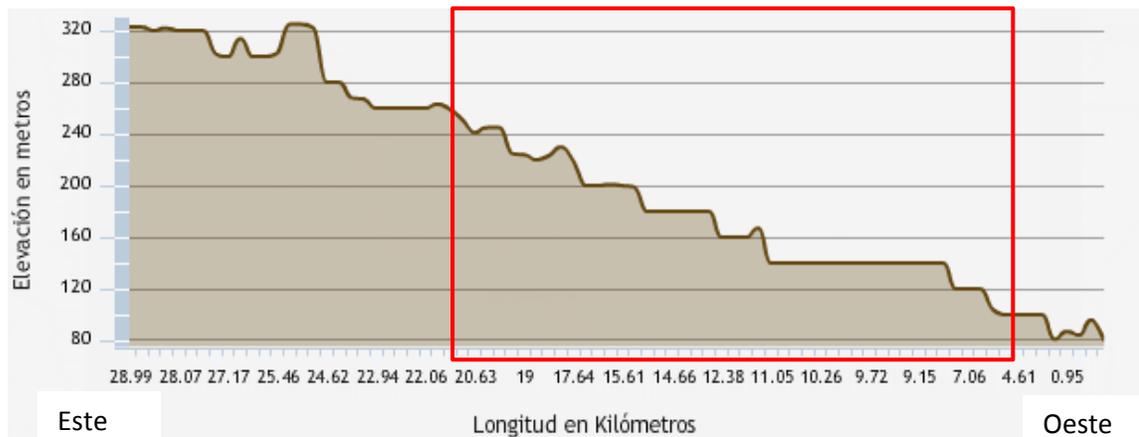
**Figura 43.** Curva hipsométrica cuenca 30De (Chiapas).



**Figura 44.** Pendientes en la cuenca 30De de la zona de estudio en El Chichonal, Chiapas.

En la Figura 44 se aprecia que la cuenca se ve influenciada por pendientes de más de 30°, en la zona de El Chichonal se observan pendientes de más de 45°. Dentro del área de estudio se presentan pendientes mayores en las elevaciones altas, en la parte central de la zona de estudio existe una superficie con pendiente de 0 a 15°, lo que implicaría velocidades de flujo menor en esta zona. Lo que puede relacionarse al periodo de acumulación observado en la curva hipsométrica.

El cauce principal corresponde al Río Magdalena el cual mide 28.98 km y este tiene una dirección de flujo de Sureste a Noroeste, se obtuvo un perfil topográfico, mismo que se observa en la Figura 45. La altitud varía desde los 323 hasta 80 msnm. El cauce presenta ondulaciones a lo largo de su longitud por lo que existen variaciones de velocidad de flujo a lo largo del cauce. Se observa una zona de acumulación. La línea marcada en rojo de esta figura indica que parte del cauce principal se encuentra dentro del área de estudio, por lo que se aprecia que el área de acumulación si corresponde al área de interés.



**Figura 45.** Perfil topográfico del cauce principal de la cuenca 30De (tomado del portal de SIATL), donde el recuadro rojo indica la localización aproximada del cauce dentro de la zona de estudio.

### *Análisis de precipitación*

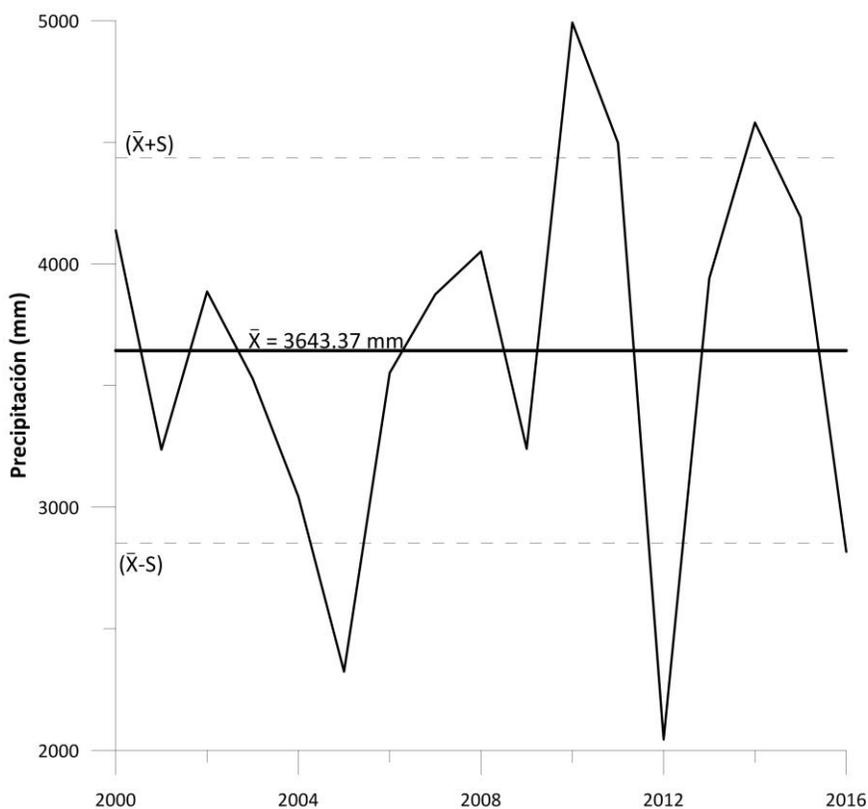
El análisis estadístico que se efectuó a los datos de CONAGUA (datos de la estación 7365) arrojaron los resultados que se especifican en la Tabla 8. En relación con las pruebas no paramétricas las series de datos resultaron homogéneas. En relación con la prueba Helmer para que la serie de datos resultaran homogéneas se considera que la diferencia entre número de secuencias (S) y el número de cambios (C), debe ser igual a 4. En este caso los datos arrojaron un total de 10 cambios y 6 secuencias por lo que representa a serie de datos homogénea. El número de secuencias (U), resultó de 9 lo que representa una serie de datos homogénea, debido a que se encuentra dentro del rango de U especificado en la Tabla 3.

Las pruebas paramétricas también mostraron que la serie de datos son homogéneas. La prueba de t-Student arrojó un valor de  $td = -0.96$  y un valor de  $tc=2.36$ , siendo el valor absoluto de  $td$  menor que  $tc$  indica que la serie de datos es homogénea. La prueba de Cramer arrojó una  $t_{kn1} = -1.01$  y  $t_{kn2} = 0.69$ , valores que están por debajo del valor crítico de t ( $tc$ ) en la prueba de t-Student, lo que implica una serie de datos homogénea.

**Tabla 8.** Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas en la zona de estudio El Chichonal, Chiapas.

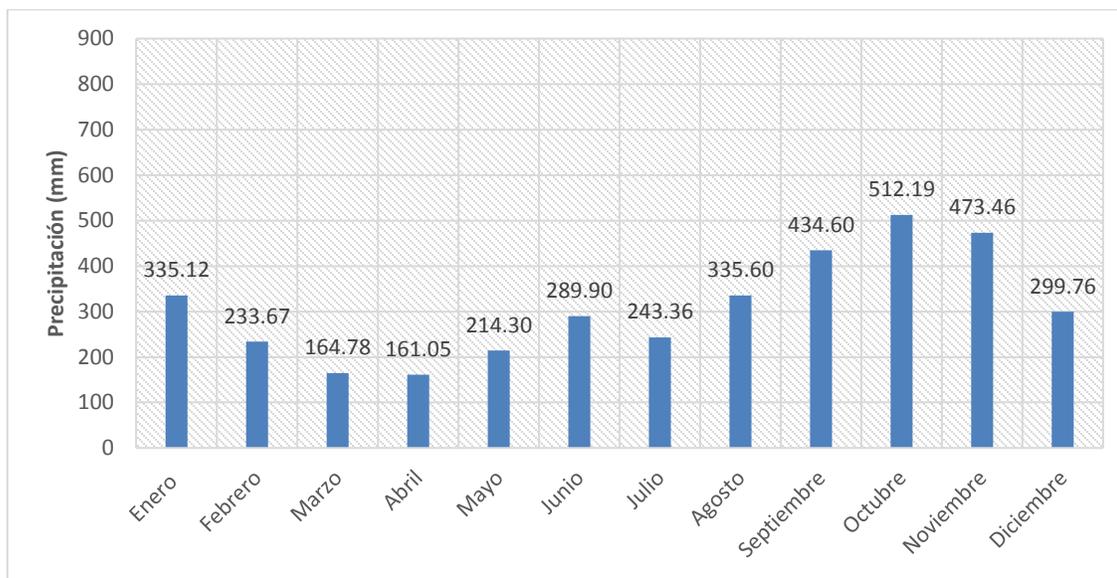
Prueba estadística	Resultado
Helmert	Homogénea
Secuencias	Homogénea
t-Student	Homogénea
Cramer	Homogénea

En la Figura 46 se exhiben los resultados de las precipitaciones acumuladas registradas en los datos de CONAGUA con lluvias acumuladas que van de 2,045.1 a 4,492 mm, con un promedio de 3,643.37 mm. Se observa que en año 2010 se suscitaron lluvias extraordinarias y para el 2012 se presentó una condición seca. En 2015 las lluvias fueron por encima del promedio y para el año 2016 se consideran condiciones secas.



**Figura 46.** Gráfica de lluvia anual en la zona de Chiapas con datos de la estación 7365.

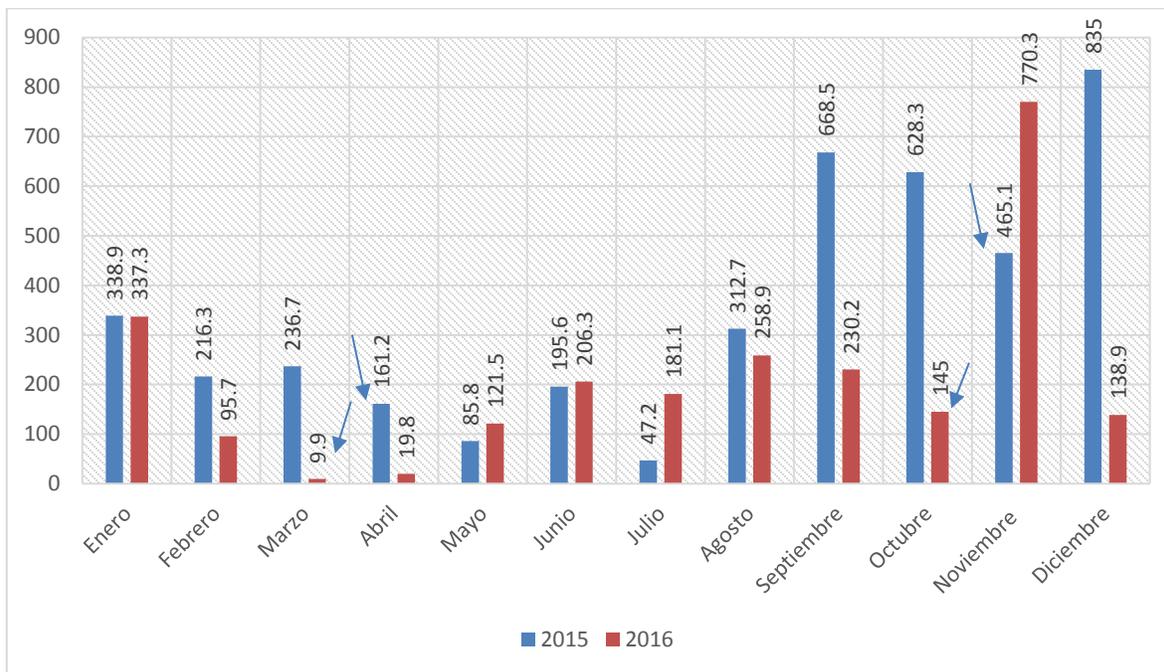
Las lluvias mensuales registradas durante el 2015 y 2016 se encuentran con la misma distribución que las reportadas históricamente (Figura 47). En Chiapas existen lluvias durante todo el año, sin embargo, son mayores durante la temporada invernal. El mes con un mayor promedio en el periodo de 1996 a 2016 es octubre con 512 mm y el más bajo corresponde al mes de abril.



**Figura 47.** Precipitación promedio mensual del periodo 1996-2016 de la estación 7365.

En lo que respecta a las lluvias mensuales de 2015 y 2016, se observa que el año 2015 fue un año con más lluvias. En el mes de diciembre se registraron lluvias totales de 835 mm. En el caso del 2016, se suscitaron lluvias de 770.3 mm en el mes de noviembre. Estas precipitaciones ocurrieron debido al avance de los sistemas frontales 5, 6 y 7, ocasionados por la tormenta tropical "Tina" y la entrada de humedad del Pacífico (CONAGUA, 2016). Durante el 2015 el mes con mayor precipitación fue noviembre con 835 mm y el más seco fue el mes de julio con 47.2 mm de precipitación.

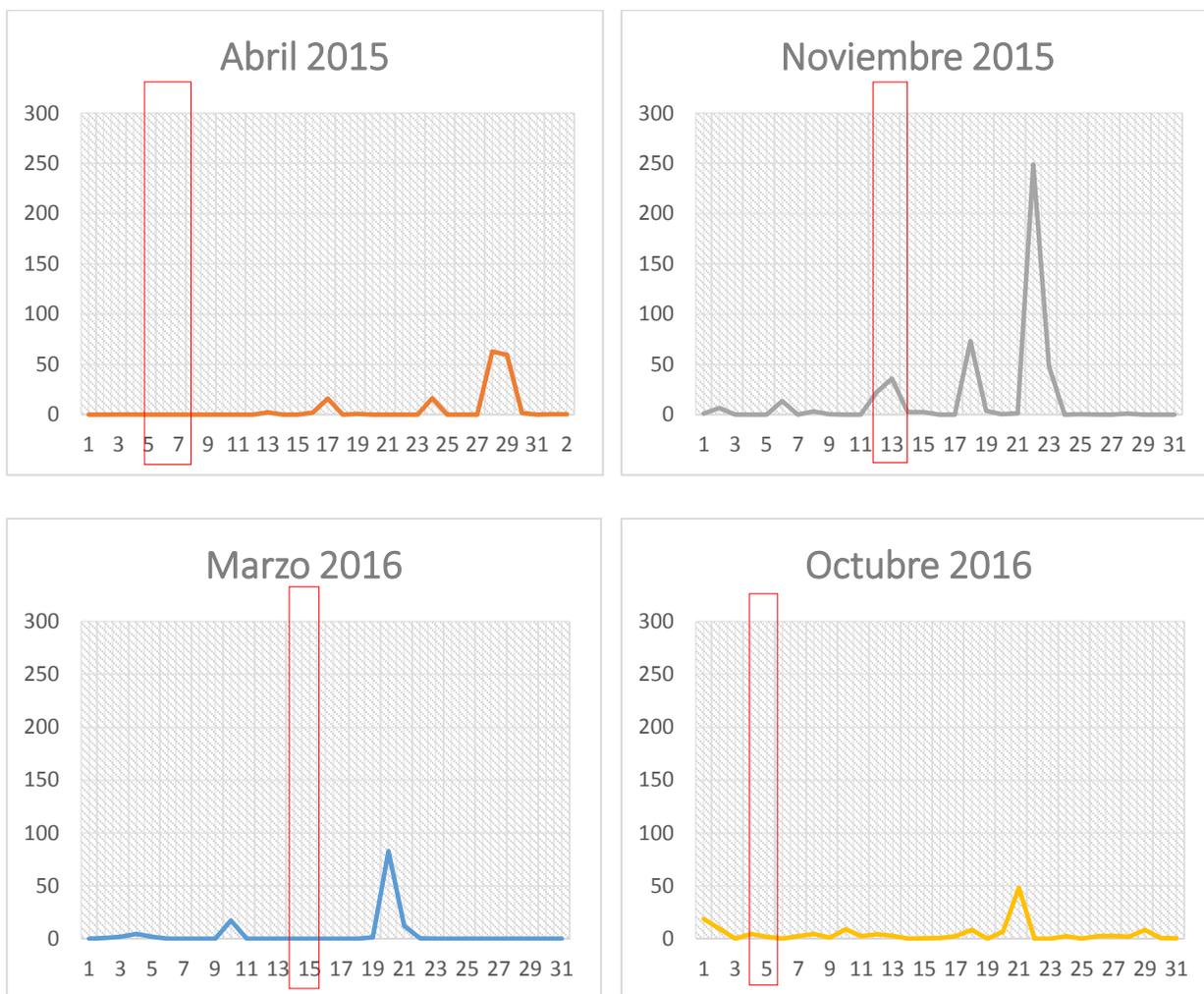
Durante las temporadas de muestreo de secas en 2015 llovió 161 mm y en 2016 un total de 9.9 mm. En 2015 los meses anteriores al muestreo se presentaron lluvias de hasta 236.7 mm. En cuanto a los muestreos en época de lluvia, durante el 2015 hubo precipitaciones de 465 mm con lluvias en los meses anteriores por arriba de 600 mm. En 2016 se suscitaron lluvias de 145 mm y en los meses anteriores de 200 mm. Con esta información se espera que los resultados de la hidroquímica en época de lluvia de 2016 y en época de seca de 2015 tengan una concentración parecida y concentraciones más diluidas en época de lluvia de 2015 (Figura 48).



**Figura 48.** Precipitación mensual acumulada durante el año 2015 y 2016 en la zona de estudio El Chichonal, donde las flechas marcadas representan la fecha de muestreo con datos de la estación 7365.

Conforme a la Figura 49 las precipitaciones se observa un máximo de 248.8 mm diarios durante el mes de noviembre de 2015, sin embargo, esta precipitación ocurre después del muestreo llevado a cabo. Las precipitaciones que se dieron durante los tres días de muestreo fueron de 21.8, 35.8, 2.6 mm, los días 12, 13 y 14 de noviembre, respectivamente.

Durante la campaña de lluvia de 2016 se registraron lluvias de apenas 0.1 a 4.6 mm. Por otro lado, las campañas realizadas en época de secas no se registraron precipitaciones diarias durante las campañas, ni los días anteriores. Por lo que, se espera que las concentraciones de los parámetros determinados en la zona de estudio, no se vean afectadas por la precipitación diaria.



**Figura 49.** Precipitación diaria durante los meses de muestreo en El Chichonal, Chiapas, las flechas indican los días cuando se realizaron los muestreos con datos de la estación 7365.

### 3.2.2. Análisis hidroquímico

#### *Isótopos estables*

Los resultados de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  presentan una distribución similar en todas las temporadas de muestreo (Figura 51, Tabla 9). El valor máximo de  $\delta D$  es de  $-12.68\text{‰}$  y el mínimo es de  $-37.89\text{‰}$ . Para el  $\delta^{18}O$  se registraron valores que van de  $-6.35$  a  $-2.27\text{‰}$ .

En la Figura 51 se observa la distribución de los resultados respecto a la LMM. Durante las cuatro campañas se observa que se localizan cercanas al origen, esto indica que las lluvias que se suscitaron en la zona durante las épocas de muestreo son originadas desde el mar. Durante los muestreos llevados a cabo durante el 2016 por encima de la LMM asociado a un exceso de deuterio promovido por las condiciones

de vapor de la zona. En la campaña de octubre de 2015 se presenta una tendencia que cruza la LMM, los procesos asociados a este comportamiento es la condensación.

En el mes de octubre de 2015 se muestra el punto 8 con valores de  $\delta D$ : -37.8939 y  $\delta^{18}O$ : -6.3516, concentraciones pesadas. Este punto se localiza en las escorrentías que bajan del volcán El Chichonal. La concentración de  $\delta^{18}O$  más alta se encuentra en el punto 6 correspondiente al muestreo 2 (octubre 2015) con un valor de -2.27‰. El punto 6 se localiza en la intersección de la escorrentía conocida como “amarilla” con el Río Magdalena, que es el principal de la cuenca.

**Tabla 9. Resultados de  $\delta^{18}O$  y  $\delta D$  en la zona de estudio El Chichonal, Chiapas.**

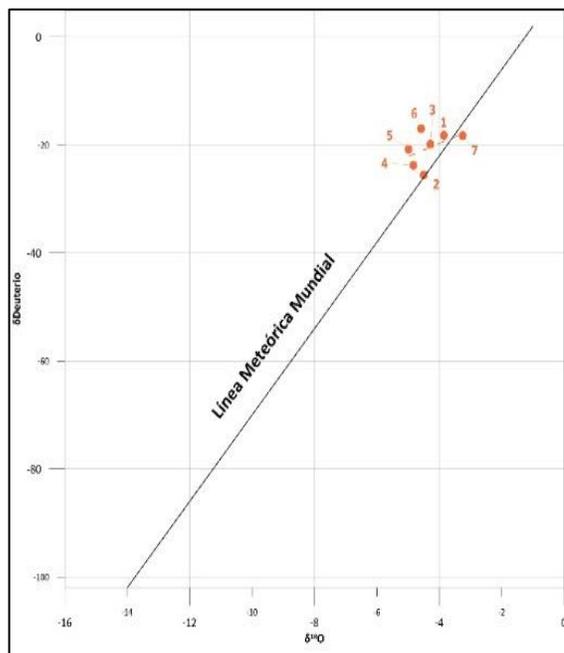
Secas 15					Lluvias 15				
No.	$\delta^{18}O$	Desviación	$\delta D$	Desviación	No.	$\delta^{18}O$	Desviación	$\delta D$	Desviación
1	-3.85	0.56	-18.24	1.27	1	-4.16	0.15	-21.67	0.59
2	-4.50	0.04	-25.57	0.13	3	-4.09	0.09	-21.58	0.34
3	-4.28	0.29	-19.84	0.86	4	-3.17	0.08	-21.57	0.27
4	-4.83	0.03	-23.77	0.20	5	-2.34	0.05	-20.50	0.23
5	-4.99	0.02	-20.80	0.08	6	-2.27	0.01	-20.36	0.02
6	-4.59	0.04	-16.97	0.07	7	-4.25	0.08	-21.97	0.27
7	-3.25	0.03	-18.28	0.08	8	-6.35	0.03	-37.89	0.11
					9	-4.47	0.09	-22.70	0.35
Secas 16					Lluvias 16				
1	-4.27	0.03	-20.1	0.06	2	-4.98	0.02	-25.70	0.20
2	-3.46	0.02	-12.68	0.15	10	-4.17	0.03	-19.58	0.27
3	-4.53	0.02	-21.03	0.1	16	-4.19	0.02	-18.57	0.07
10	-4.97	0.04	-24.85	0.59	22	-3.44	0.04	-13.70	0.23
11	-4.33	0.05	-18.74	0.24	23	-4.04	0.01	-17.04	0.06
12	-4.93	0.04	-23.48	0.34	24	-3.99	0.02	-16.80	0.10
13	-4.35	0.04	-18.63	0.26	25	-4.67	0.02	-21.85	0.10
14	-4.92	0.07	-23.37	0.35	26	-4.86	0.02	-23.23	0.07
15	-4.86	0.04	-22.84	0.15	27	-4.28	0.05	-19.61	0.29
16	-4.62	0.02	-20.27	0.13	28	-4.03	0.02	-18.87	0.11
17	-4.89	0.02	-22.93	0.15	29	-4.88	0.02	-24.15	0.16
18	-4.27	0.02	-17.9	0.04	30	-4.64	0.03	-22.09	0.07
19	-4.93	0.02	-23.62	0.06	31	-4.03	0.09	-19.18	0.55
20	-4.58	0.02	-20.35	0.17	32	-4.80	0.05	-22.83	0.17
21	-5.02	0.02	-23.56	0.22					



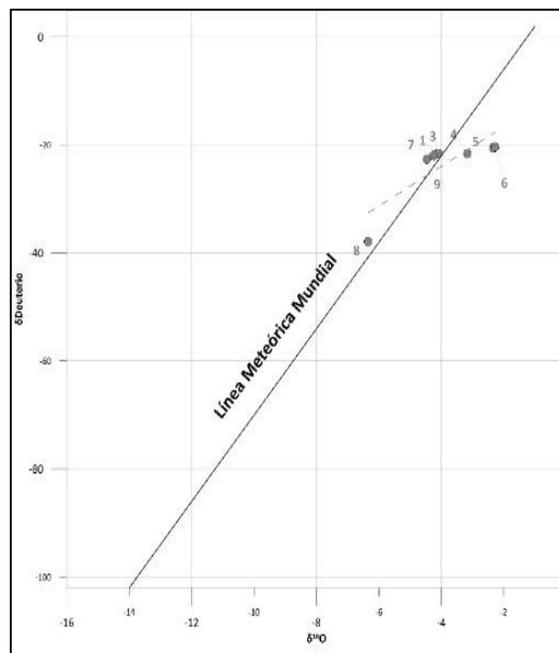
**Figura 50.** Escorrentía conocida como agua amarilla presente en El Chichonal, Chiapas.

En la figura 49 se aprecia que, en el muestreo de octubre 2015, existen tres puntos que se salen de la distribución del resto. Éstos son el 4, 5, 6 y 8. En el caso del 4, 5 y el 6, son los puntos más cercanos a la zona de escurrimiento del cráter del volcán. La distribución horizontal de estos puntos indica que la actividad hidrotermal tuvo mayor

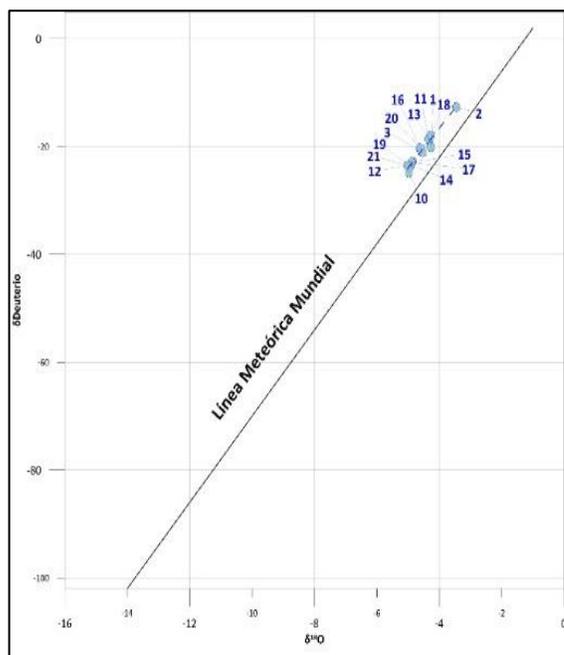
a) Marzo 2015



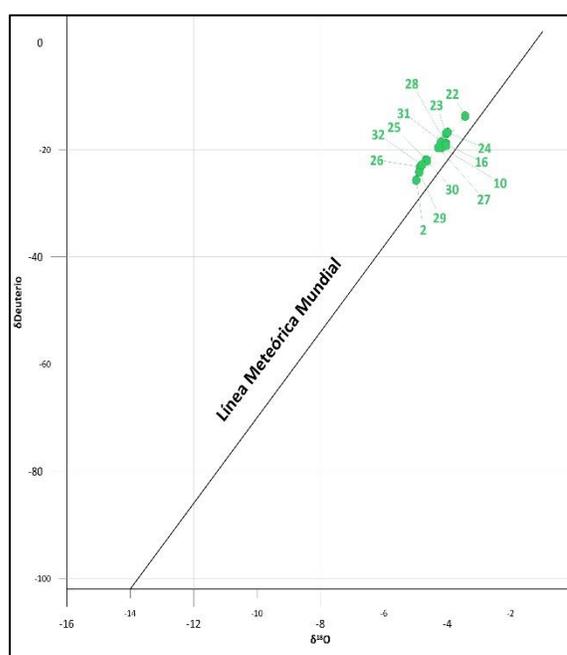
b) Octubre 2015



c) Marzo 2016



b) Octubre 2016



**Figura 51.** Relación isotópica de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  en las muestras durante las 4 campañas de campo en El Chichonal, Chiapas.

#### *Parámetros fisicoquímicos*

En relación a los resultados de pH en la zona de estudio, se observan valores en los cuatro muestreos que van de 6.36 y 8.64, con un promedio de 7.87. Los ambientes con mayor prevalencia en la zona son de neutros a básicos. El valor más alto de pH se encuentra en el muestreo número 3 (marzo 2016), el cual se

encuentra cercano a la zona urbana y se toma como referencia antes de una descarga doméstica, la cual esta reportada en el punto 18 de muestreo, el cual presenta valores de pH de 8.2. El valor más pequeño de pH, relacionado a ambientes ácidos se localiza en los puntos 4 y 5 del muestreo 2 (octubre 2015), con valores de 6.36 y 6.48 respectivamente. Estos valores se localizan en las escorrentías más cercanas a la actividad hidrotermal, sin embargo, en los otros muestreos no se reportan valores neutros en esta zona. El punto 18 se encuentra cerca de la zona urbana, en una descarga debajo de un puente, en donde se observan habitantes usando el agua con fines recreativos.

La distribución de potencial óxido-reducción (ORP) en los puntos de muestreo es parecida a los valores de pH reportados. El valor máximo de ORP es de 163 mV, mientras que el más bajo es de -96 mV. Los valores negativos de ORP que van de -96 a -7 se encuentran distribuidos en la zona cercana al Chichonal. En relación a la conductividad eléctrica los valores oscilan entre 11.25 y 20141  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores más altos se observan en el cauce principal durante los primero dos muestreos (marzo y octubre 2015). El valor máximo se encuentra en el punto 2 en el agua perteneciente a un flujo subsuperficial de coloración rojiza. Durante el 2016 no se observan valores tan altos, el valor máximo durante este año alcanza 2772  $\mu\text{S}/\text{cm}$  los valores más altos se distribuyen en los puntos cercanos al volcán, en una corriente que intersecta el río principal, conocido como agua amarilla y de nuevo en el agua de coloración rojiza de flujo subsuperficial.

**Tabla 10.** Resultados de fisicoquímicos para El Chichonal, Chiapas.

Secas 15				Lluvias 15			
No.	pH	ORP (mV)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	No.	pH	ORP (mV)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	8.37	52	1507	1	8.05	0.63	27.33
2	6.88	-94	20141	3	7.93	44	8068
3	8.44	-22	1506	4	6.36	-7	11.25
4	7.14	-21	890.2	5	6.48	-23	16.12
5	8.12	-34	325.4	6	7.74	82	19.41
6	6.97	-27	786.2	7	8.38	118	1221
7	8.54	87	1230	8	6.95	-92	2855
				9	8.08	25	3490
Secas 16				Lluvias 16			
1	8.4	120	1562	2	7	-71	2,772.00
2	7	-96	2734	10	7.99	116	431.70
3	8.4	133	790	16	8.03	101	713.4
10	8.36	159	642.1	22	7.34	140	198.1
11	8.259	154	215.2	23	7.95	122	207.9
12	8.3	-50	660	24	7.98	109	210.2
13	8.64	140	213.8	25	7.91	124	476
14	8.22	80	652	26	8.03	101	418.5
15	7.49	146	648	27	8.03	85	840
16	8.51	55	824	28	7.9	104	1,330.00
17	8.49	35	650	29	7.92	81	423.1
18	8.2	163	235.8	30	7.93	30	419.80
19	8.1	35	331.3	31	8	124	1511
20	7.66	119	1704	32	7.86	138	391.30
21	8.37	103	586				

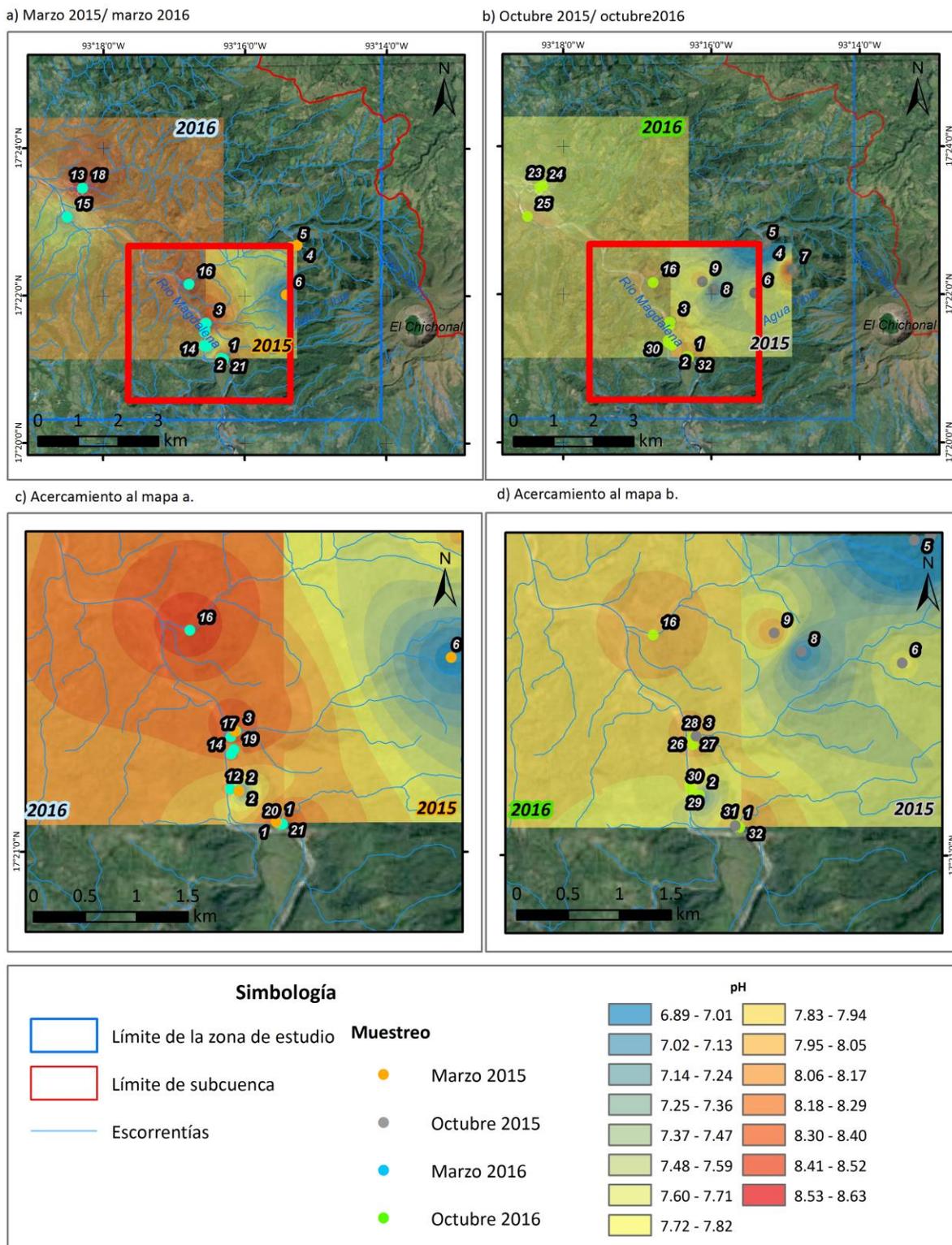


Figura 52. Valores de pH durante las cuatro campañas de muestreo en El Chichonal, Chiapas.

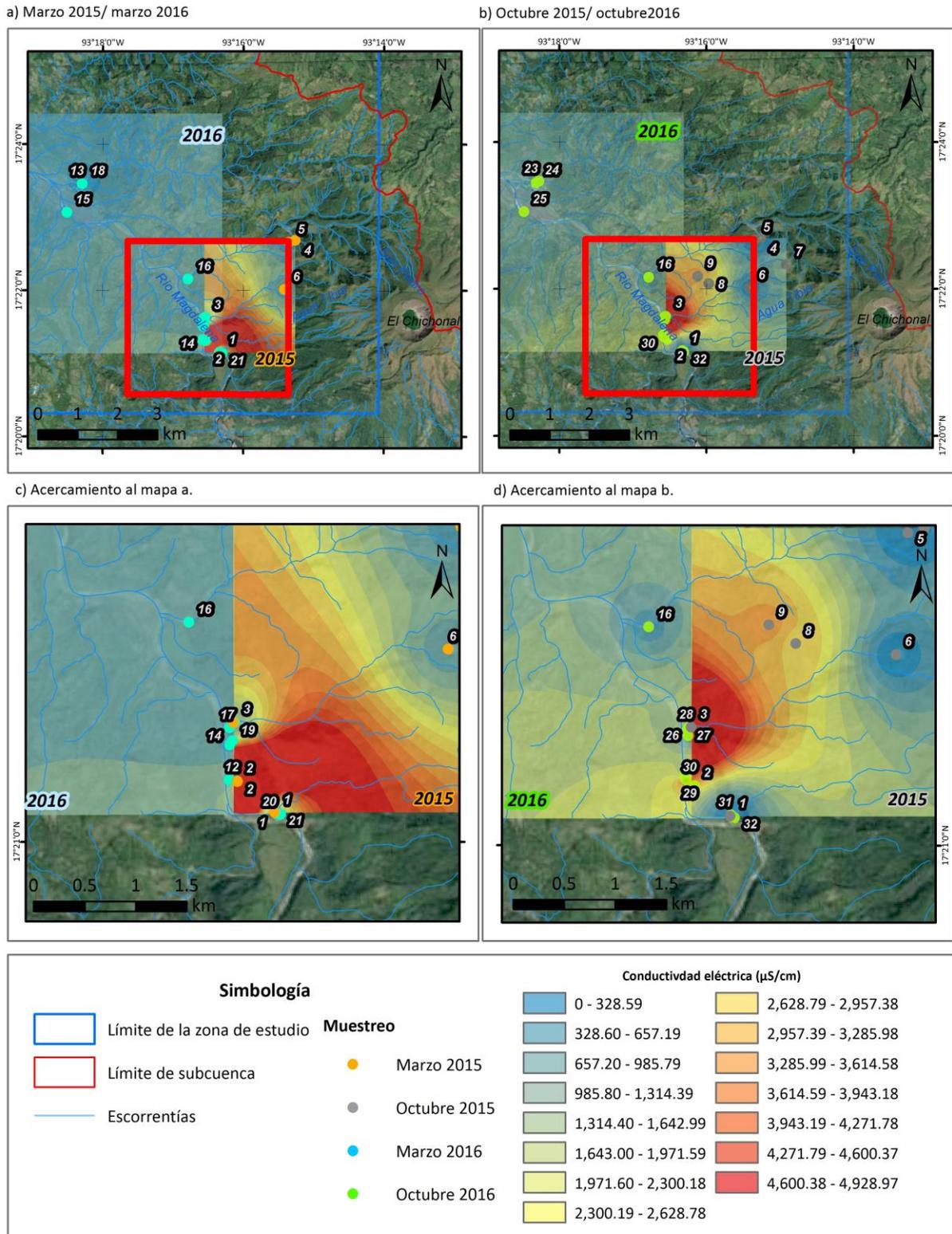
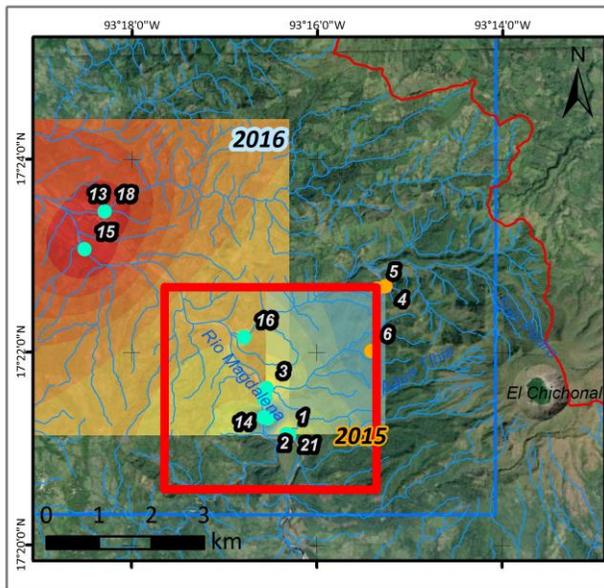
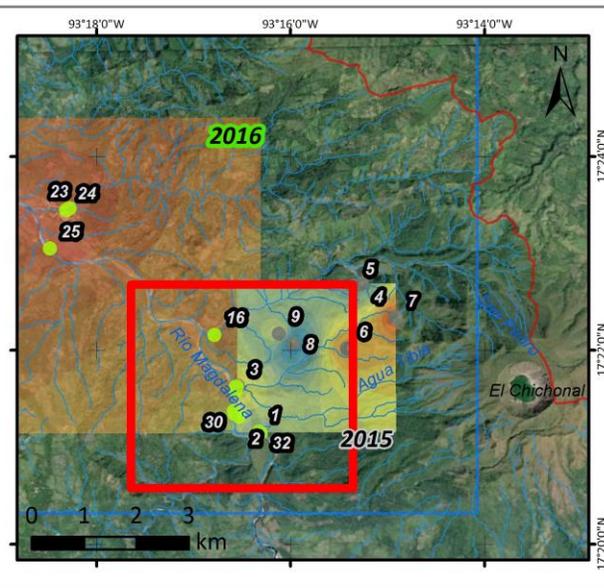


Figura 53. Valores de conductividad eléctrica en los muestreos de El Chichonal, Chiapas.

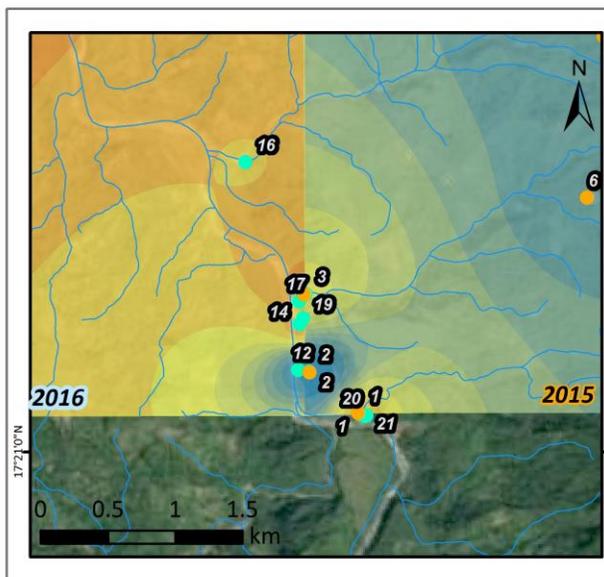
a) Marzo 2015/ marzo 2016



b) Octubre 2015/ octubre 2016



c) Acercamiento al mapa a.



d) Acercamiento al mapa b.

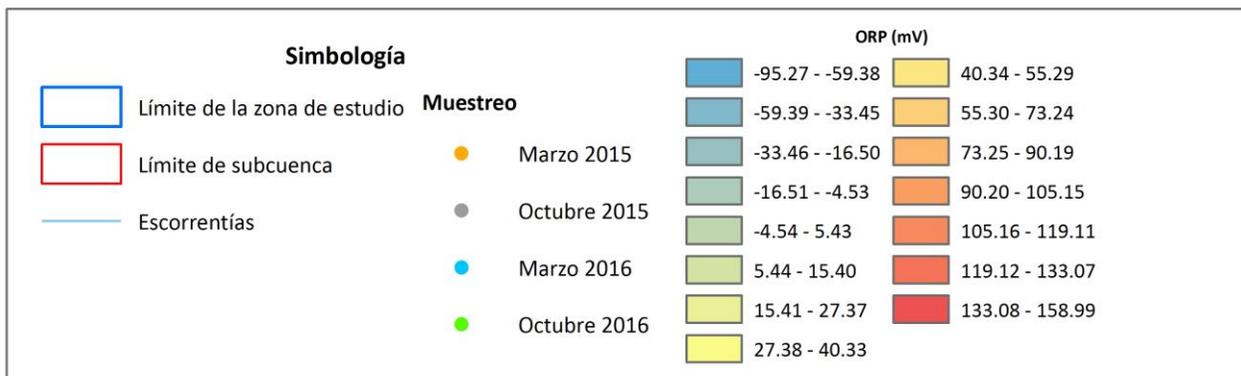
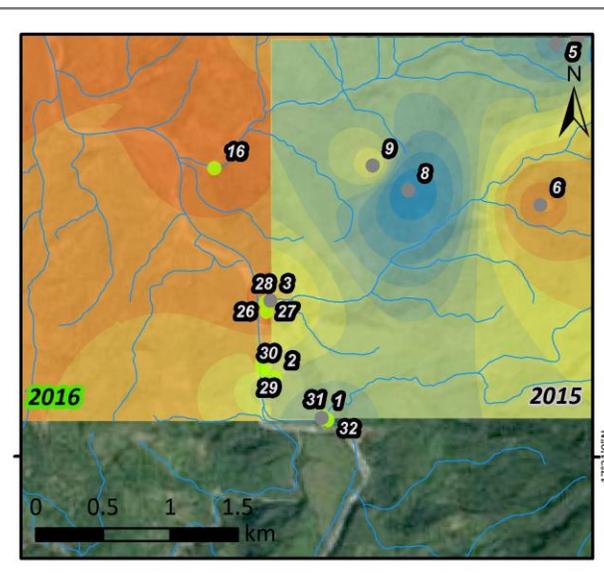


Figura 54. Valores de Potencial Óxido-Reducción (ORP) en los muestreos de El Chichonal, Chiapas.

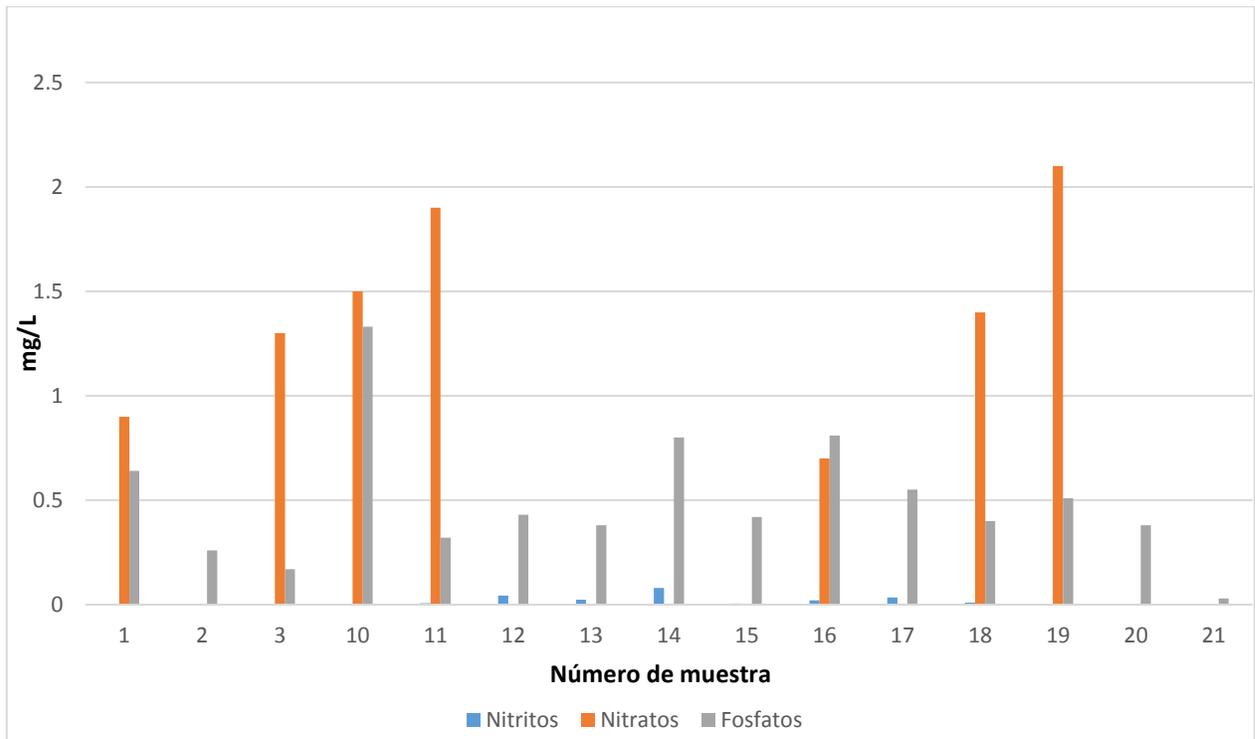
### *Aniones*

La medición de nutrientes sólo se realizó durante la campaña de marzo de 2016, siendo los nitritos los menos abundantes con valores de 0 a 0.08 mg/L. Las concentraciones de los nutrientes son muy bajas (Figura 55), los nitratos presentes también se encuentran en concentraciones alcanzando como valor máximo 2.10 mg/L, este valor se encuentra en el punto 19 cerca al Chichonal, sin embargo los datos que le siguen se encuentran en partes cercanas a las localidades cercanas con valores de 1.4 a 1.9 mg/L. Los fosfatos tienen un valor máximo de 1.33 mg/L y un mínimo de 0.03 mg/L. Las concentraciones de nitratos y nitritos no exceden los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994.

Los cloruros tienen un valor promedio de 188 ppm, siendo el mínimo de 0 ppm y el máximo de 4818.94 ppm. En la Figura 56 se muestra que los valores más altos fueron durante el primer muestreo y se encuentran más cercanos a la zona hidrotermal, los valores más altos se encuentran en el punto 7 y 4, el primero se ubica en la salida de una escorrentía de agua caliente y el 4 se encuentra cerca de actividad hidrotermal. La concentración máxima de cloruros a lo largo del río Magdalena llega a los 280.13 ppm, lo que representa una gran diferencia respecto al valor máximo.

Los fluoruros en los puntos de muestreo tiene un valor máximo es de 12.38 ppm y un promedio de 1.24 ppm (Figura 57). El valor más alto se localiza cerca de áreas urbanas durante la campaña realizada en el mes de octubre de 2016. Aunque estas concentraciones son pequeñas en comparación con otros parámetros, en el caso de los fluoruros el límite máximo permisible es de 1.5 mg/L, nueve de los puntos muestreados exceden este límite que se asocian a las zonas urbanas y a la actividad hidrotermal.

Con relación a los sulfatos las concentraciones van de 0.95 a 3204.32 ppm (Figura 58). Las concentraciones mayores se muestran durante la temporada de muestreo efectuada en octubre de 2015 y no se encuentran en el flujo principal, si no en los secundarios que se encuentran cerca del hidrotermalismo.



**Figura 55.** Nutrientes durante la campaña de marzo de 2016 en la zona de estudio El Chichonal, Chiapas.

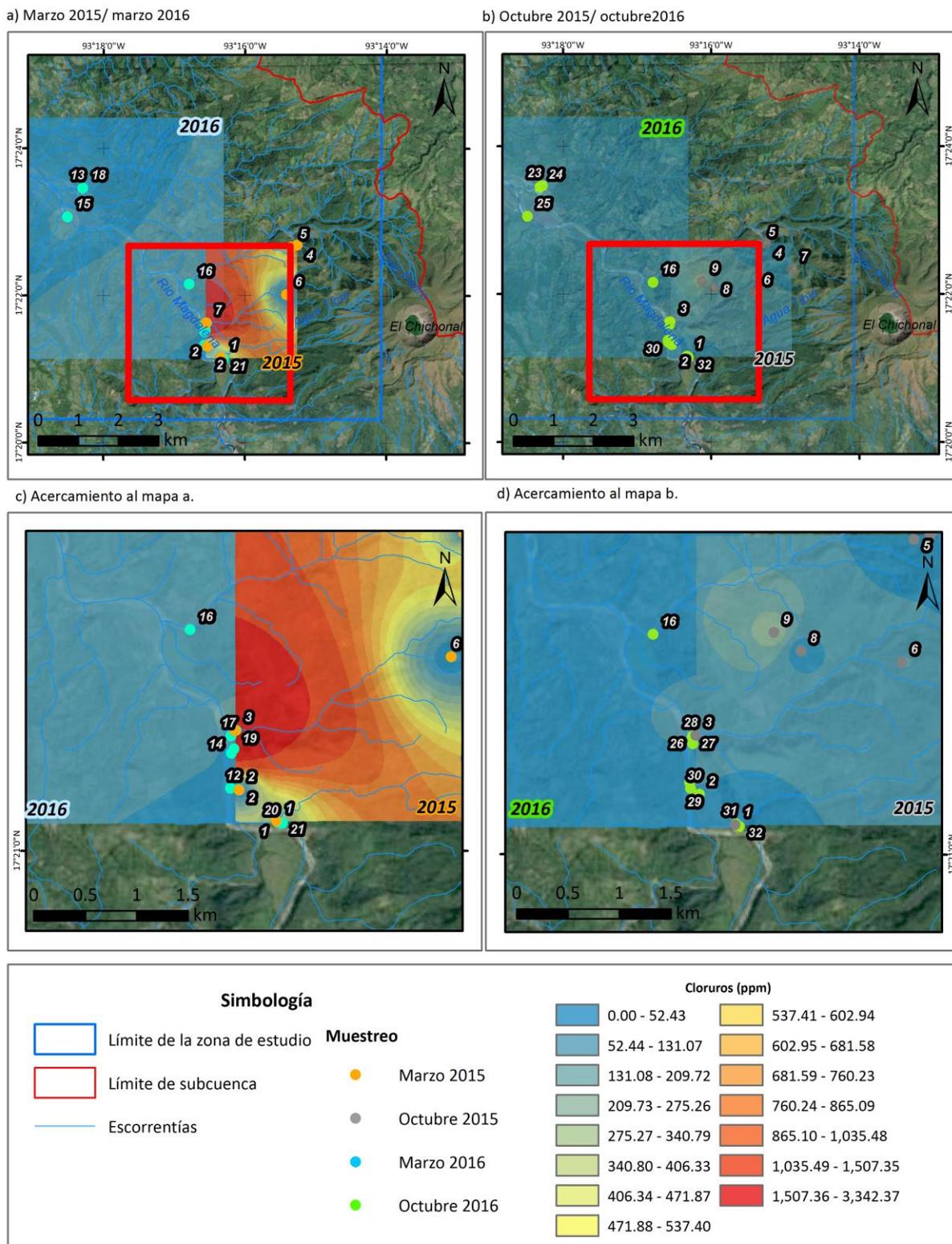


Figura 56. Concentración de cloruros en la zona de estudio de El Chichonal, Chiapas.

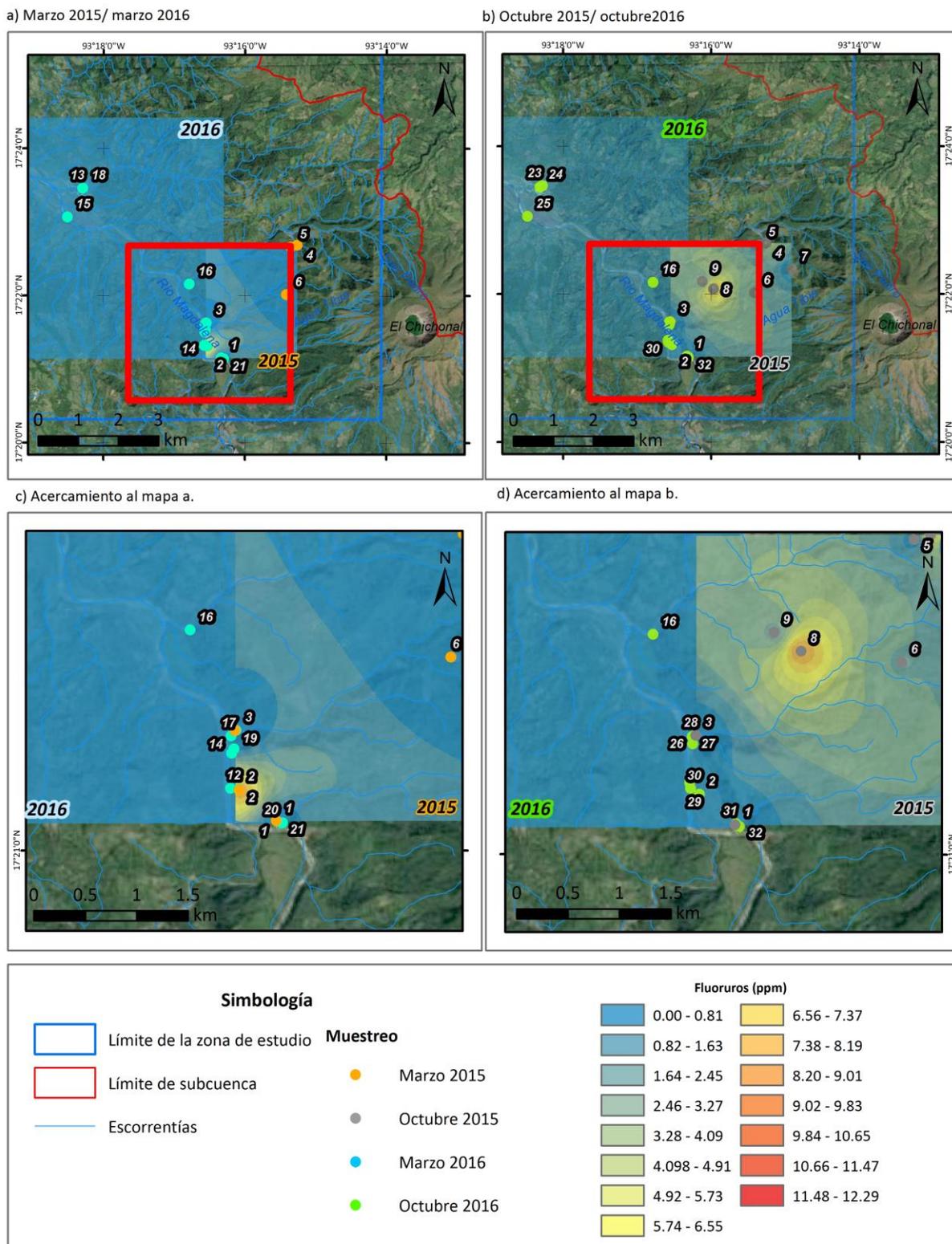


Figura 57. Concentración de fluoruros en la zona de estudio de El Chichonal, Chiapas.

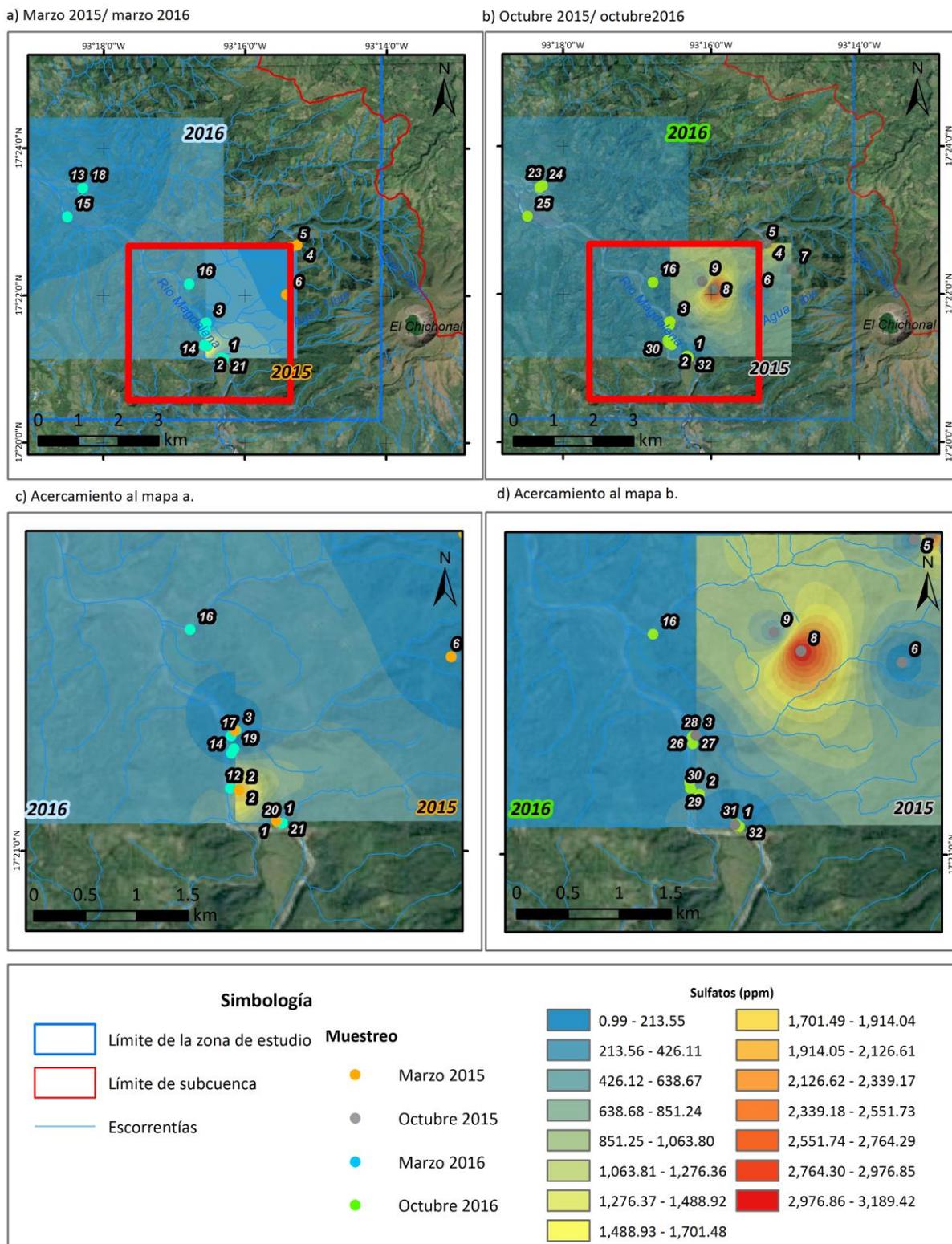


Figura 58. Concentración de sulfatos en la zona de estudio de El Chichonal, Chiapas.

### 3.3. Lodo caliente, Los Negritos, Michoacán

#### 3.3.1. Análisis hidrológico

La cuenca hidrológica en la zona de estudio de lodos calientes se le conoce como R. Sahuayo, la cual se encuentra dentro de la cuenca L. Chapala, la clave de la cuenca es RH12Da, en lo consecuente será llamada 12Da (Figura 59). La cuenca R. Sahuayo tiene un perímetro de 159.72 km, con una superficie de 968.13 km<sup>2</sup>, clasificada como “Pequeña”, lo que implica que en esta cuenca la cantidad y distribución del escurrimiento se verá influenciado por las condiciones físicas del suelo y su cobertura. La forma de la cuenca se distingue por un coeficiente de compacidad de 1.45 y la relación de elongación de 0.86, lo que representa una forma más cercana a la circular y de relieves bajos. La dirección de flujo de la cuenca es hacia el Noroeste. Las escorrentías que se encuentran en la zona de estudio se encuentran canalizadas y se utilizan para el riego de campos agrícolas. La descarga final de la cuenca es el Río Sahuayo que fluye hasta el Lago de Chapala, en el estado de Jalisco.

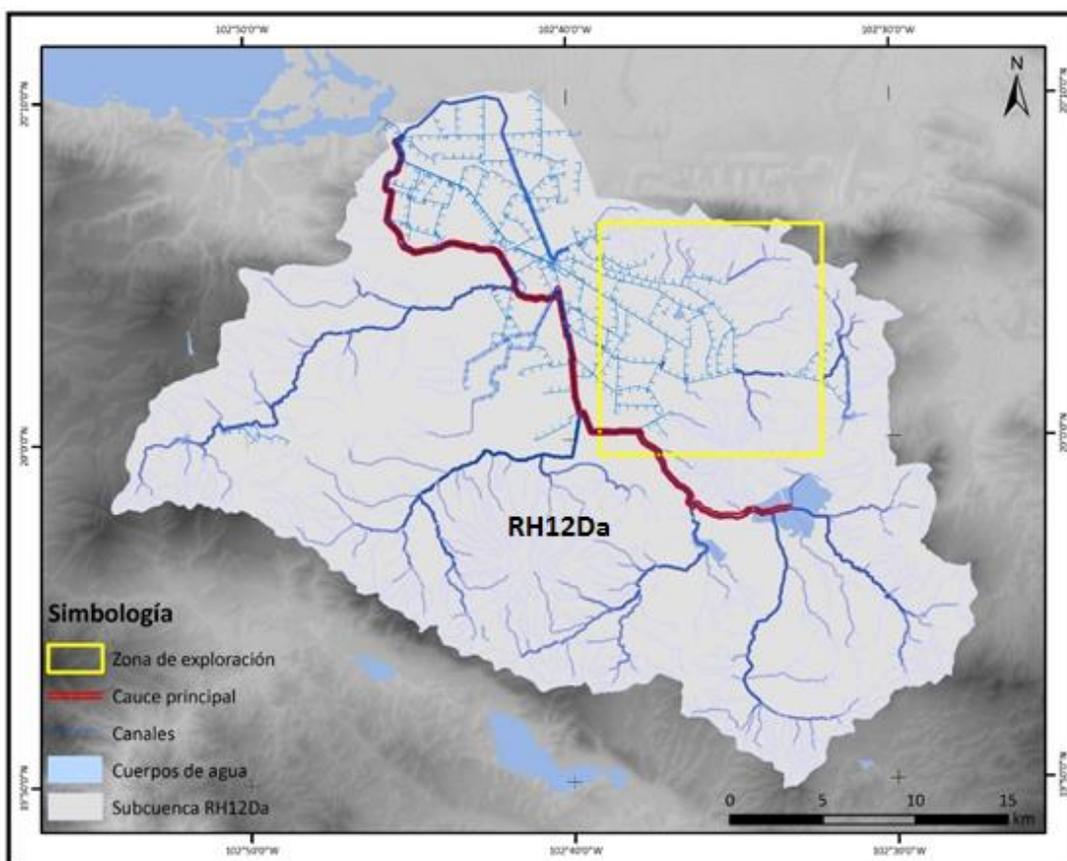


Figura 59. Hidrología de la cuenca 12Da en la zona de estudio de Los Negritos, Michoacán.

Con relación a la curva hipsométrica se puede observar que es una cuenca de valle o erosionada, dominando las partes bajas, como se puede observar en la Figura 60. Este tipo de cuenca presenta pendientes suaves en las partes bajas, lo que se aprecia en la curva hipsométrica que tiene un área de acumulación en la parte baja.

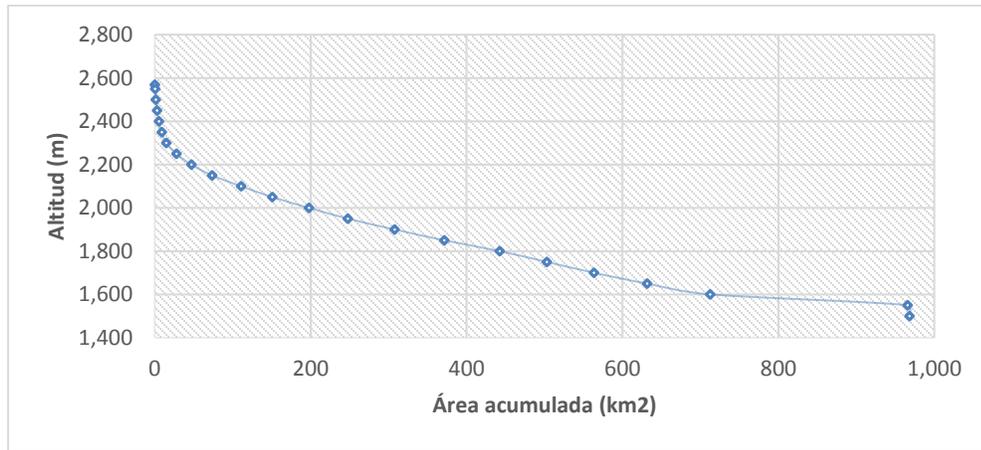


Figura 60. Curva hipsométrica cuenca 12Da (Los Negritos, Michoacan).

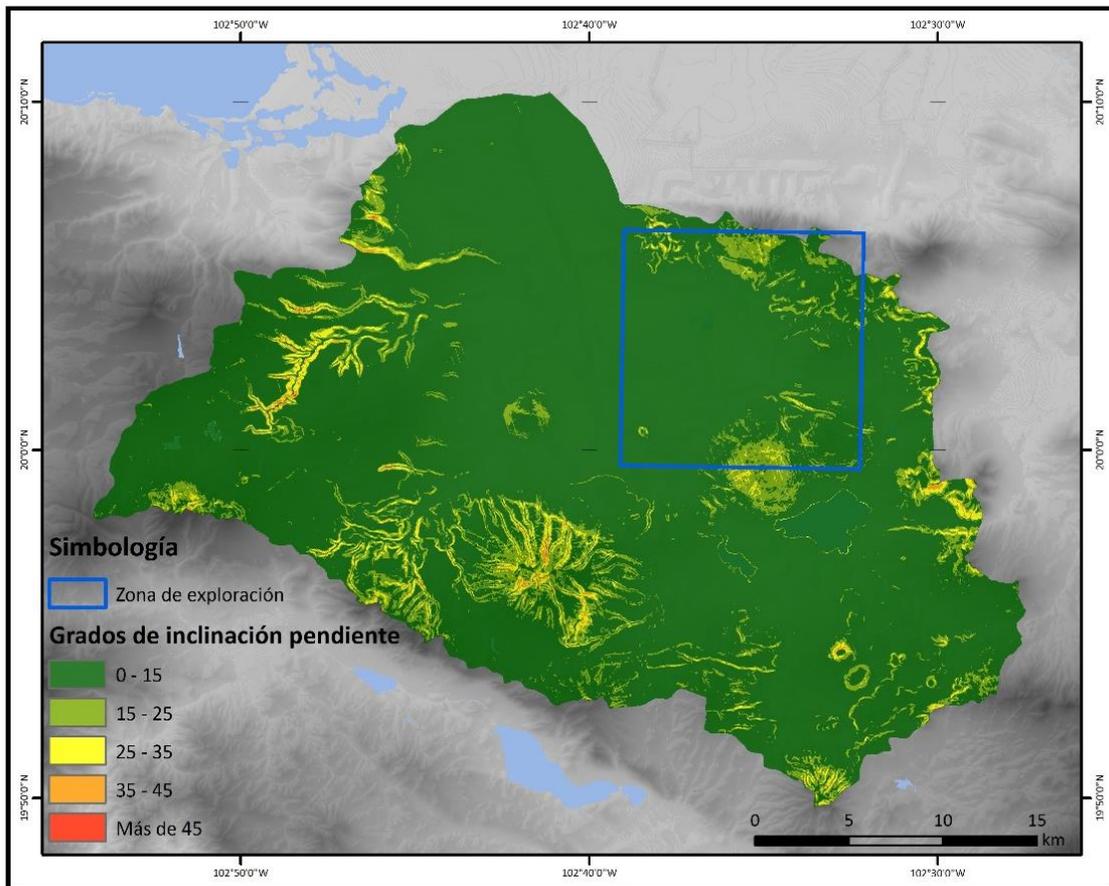
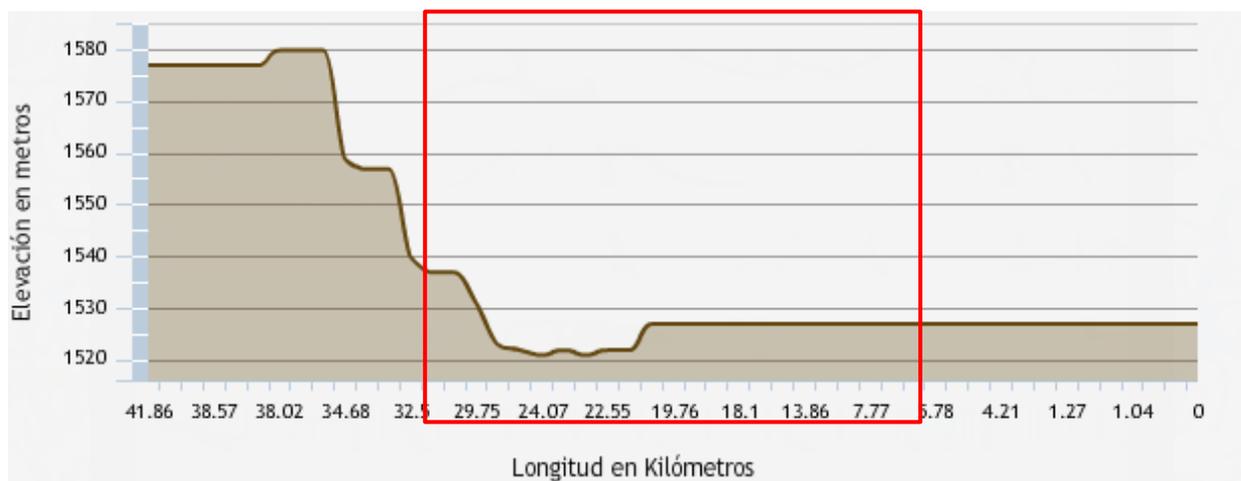


Figura 61. Pendientes observadas en la cuenca 12Da de la zona de estudio Los Negritos, Michoacán.

Las pendientes predominantes en la cuenca y en el área de estudio son de 0 a 15° (Figura 61), lo que indica velocidades bajas de flujo. Durante las salidas de campo se apreciaba que el flujo no presentaba mucho movimiento. El perfil topográfico del cauce principal señalado en la Figura 59, muestra que no existen grandes variaciones de la pendiente a lo largo del cauce, teniendo una mayor pendiente cuenca arriba, que va de los 1540 a los 1570 msnm (Figura 62). La longitud del cauce principal es de 39.69 km.

En los canales que se encuentran en la zona de estudio se observa que no existe una pendiente muy pronunciada, al mostrarse el terreno casi plano. La zona más elevada del cauce es una laguna que se encuentra en el límite Sureste el cauce. La mayor velocidad del cauce se ubica los entre 1580 a los 1520 msnm. En el perfil se indica la parte del cauce de la zona de estudio y en donde se tomaron muestras.



**Figura 62.** Perfil topográfico del cauce principal de la cuenca 12Da, el recuadro rojo indica la zona de estudio, adquirido del portal SIATL.

### *Análisis de precipitación*

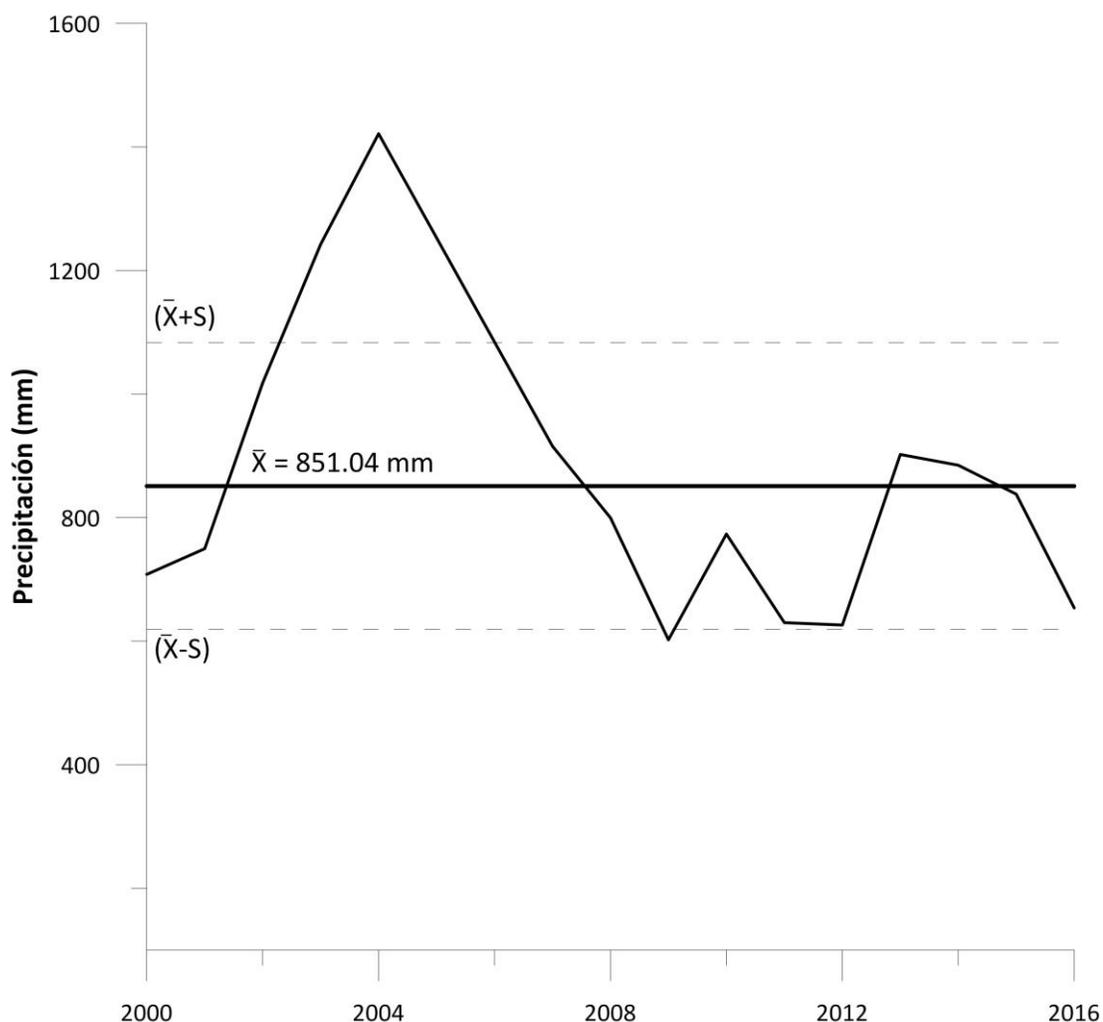
La mayoría de los análisis estadísticos efectuados a los datos de precipitación anuales correspondientes a la estación de CONAGUA número 16141 (estación Yurécuaro) mostraron una distribución homogénea. En la prueba no paramétrica Helmer se obtuvo un número de cambios  $C = 6$  y un número de secuencias  $S = 10$ , lo que resulta con una diferencia de  $S - C = -4$ , lo que indica que la serie de datos es homogénea. En el caso de la prueba de secuencias se obtuvo un total de  $U = 8$ , este valor se encuentra dentro del rango de  $U$  especificado en la Tabla 11, que implica una serie de datos homogénea. En el caso de la prueba de t Student, se obtuvo un valor crítico de  $t_{tc} = 2.44$ , siendo  $td = 0.74$  el valor absoluto de  $td$  es menor que  $tc$ , lo que indica que la serie de datos es homogénea. En la prueba de Cramer resultó una  $t_{kn1} = -0.49$  y  $t_{kn2} = -$

0.56. Estos valores están por debajo del valor crítico de  $t$  ( $t_c$ ) en la prueba de  $t$ -Student, lo que implica una serie de datos homogénea.

**Tabla 11.** Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas en la zona de estudio Los Negritos, Michoacán.

Prueba estadística	Resultado
Helmert	Homogénea
Secuencias	Homogénea
T - Student	Homogénea
Cramer	Homogénea

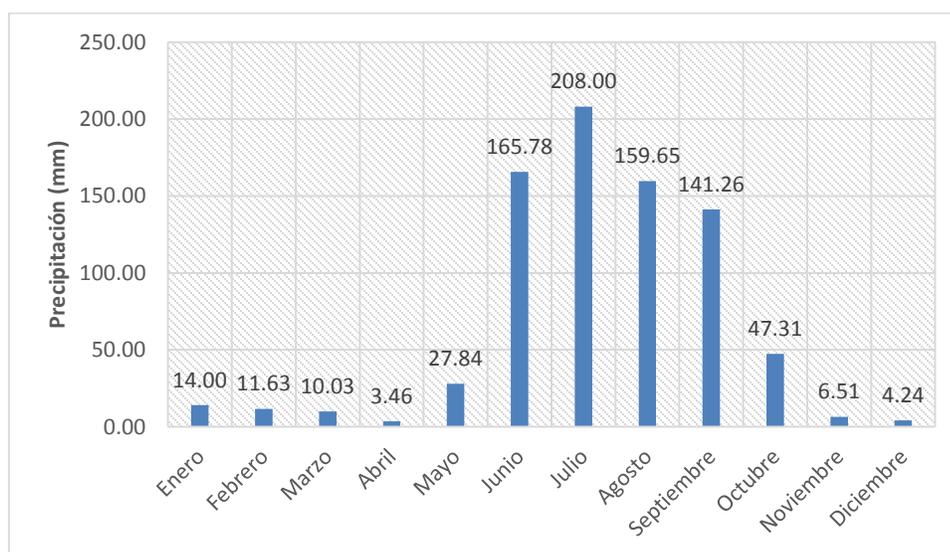
Las precipitaciones del periodo de los años 2000 a 2016 se encuentran entre 567 y 920 mm, los datos de CONAGUA tienen un ciclo más variable de 479 y 1421 mm. Para los años 2015 y 2016 se dieron precipitaciones en la serie de tiempo de CONAGUA con valores de 850.4 y 641.4 mm, respectivamente. El año 2015 se considera un año normal de lluvias y el 2016 por debajo del promedio (Figura 63).



**Figura 63.** Gráfica de lluvia anual acumulada con promedios móviles en la zona de Los Negritos con datos de CONAGUA de la estación Yurécuaro 16141.

En comparación con el ciclo de precipitaciones mensuales mostrado en la Figura 64, la precipitación mensual durante el año 2015 y 2016 presentó un comportamiento similar, con las lluvias más fuertes de junio a octubre (Figura 65). En el mes de junio de 2015 se presentó una lluvia de 232.5 mm, excediendo el promedio mensual histórico. Se presentó una condición atípica de precipitación en el mes de marzo del mismo año en donde se suscitó una lluvia de 115.5 mm, siendo una época de secas que según los promedios mensuales del periodo de 1990 a 2016 es de 10.03 mm.

El evento que ocasionó la anomalía de precipitación en marzo, fue el frente frío No. 41 el cual ingresó por el Norte del país el día cuatro de marzo, y que para el día 12 se formó la octava tormenta invernal de la temporada en las costas del Pacífico (CONAGUA, 2015b).

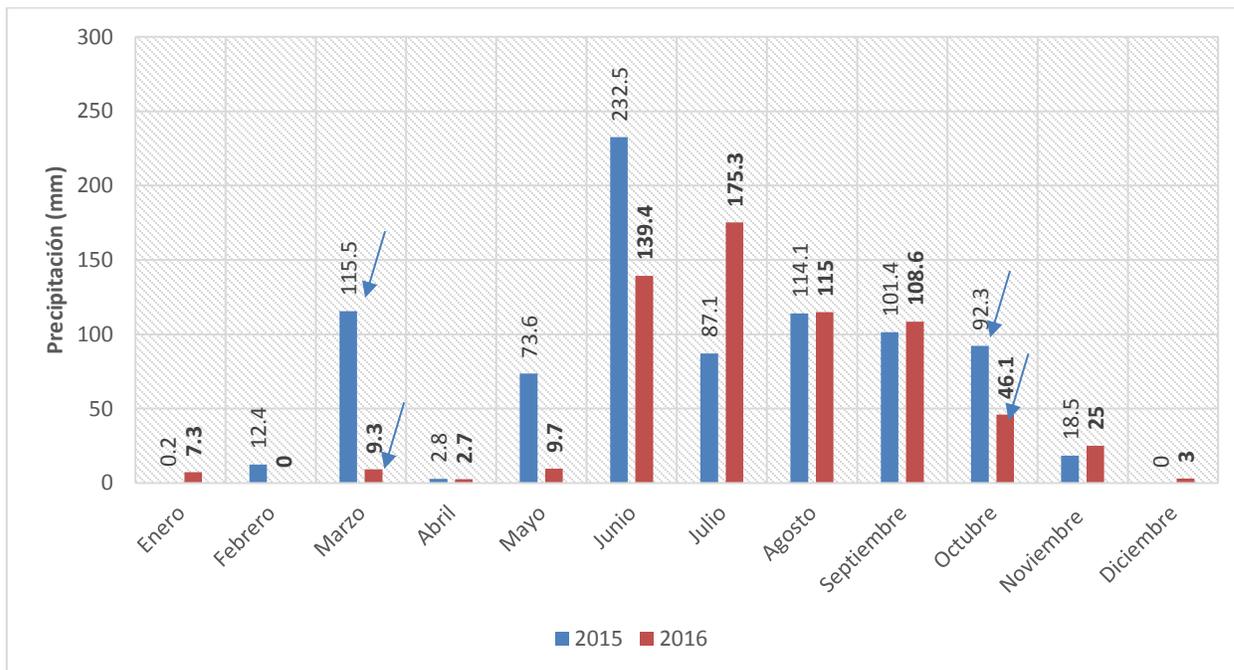


**Figura 64.** Ciclo de precipitación anual observado en el periodo de 1990 a 2016 (estación Yurécuaro 16141).

Las lluvias mensuales acumuladas del año 2016 son más bajas que la información histórica. En el mes de enero no se presentaron lluvias en ambos años, siendo el año 2016 el de mayor precipitación con 7.3 mm. En el mes de febrero de 2016 se presentó una precipitación de 12.4 mm. En la Figura 65 se puede observar que durante el mes de mayo en 2015 y 2016, una precipitación de 73.6 y 9.7 mm respectivamente lo cual representa lluvias atípicas, debido a que el promedio es de 27.84 mm según el promedio histórico.

Durante las campañas de muestreo realizadas en la temporada de lluvias, la precipitación de ambos años difiere. El mes de octubre de 2016 fue un mes con precipitación promedio. En el caso del mes de octubre de 2015 se presentaron lluvias de 92.3 mm, lo que representa casi el doble de la precipitación esperada.

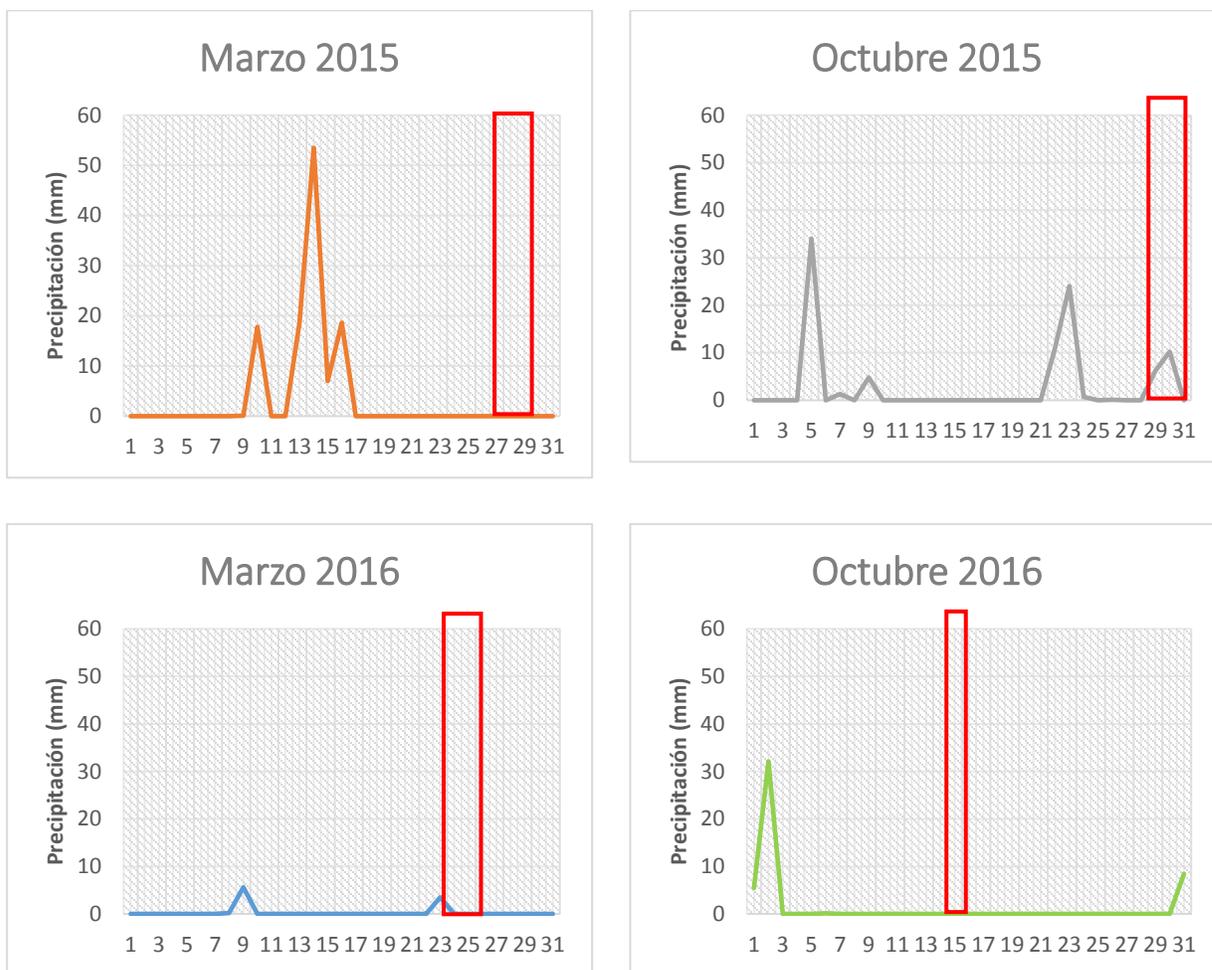
Aunque las campañas se realizaron en épocas de secas y de lluvias, las condiciones de cada muestreo fueron distintas, lo que puede implicar diferencias significativas en los resultados.



**Figura 65.** Precipitación mensual acumulada durante el año 2015 y 2016 (estación Yurécuaro 16141), donde las flechas indican las temporadas de muestreo.

Los parámetros que se midieron durante las campañas de muestreo pueden verse afectados por las precipitaciones que suceden el día de muestreo o días anteriores, por lo que se presenta en la Figura 66, las condiciones diarias durante las campañas de muestreo.

El evento que se puede visualizar con mayor precipitación es el registrado el día 14 de marzo de 2015, alcanzando 53.52 mm al día, se presentó durante la campaña llevada a cabo en marzo siendo ésta una temporada de secas.



**Figura 66.** Precipitación diaria durante los meses de muestreo, donde las flechas indican los días de muestreo (datos de la estación Yurécuaro 16141).

### 3.3.2. Análisis hidroquímico

#### *Isótopos estables*

La relación isotópica del  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  en las cuatro temporadas de muestreo (Figura 67), muestra una tendencia lineal parecida, los valores de  $\delta^{18}O$  van de -12.25 a 2.6 ‰ y de  $\delta D$  los valores van de -97.27 a -11.86 ‰ (Tabla 12).

En la Figura 67 se aprecia la distribución de las muestras de todas las campañas. La distribución de todos los puntos indica una mayor influencia a los procesos de evaporación en la zona. En el caso de la distribución más ligera observada en marzo en 2016, se atribuye al origen de la tormenta que se suscitó durante esta época del año.

Durante la temporada de marzo 2016 se observan valores de  $\delta^{18}O$  -5.89 a 2.6 ‰ y el  $\delta D$  presenta valores de -57.68 a -11.86 ‰. En esta temporada se aprecia un comportamiento de isótopos estables más

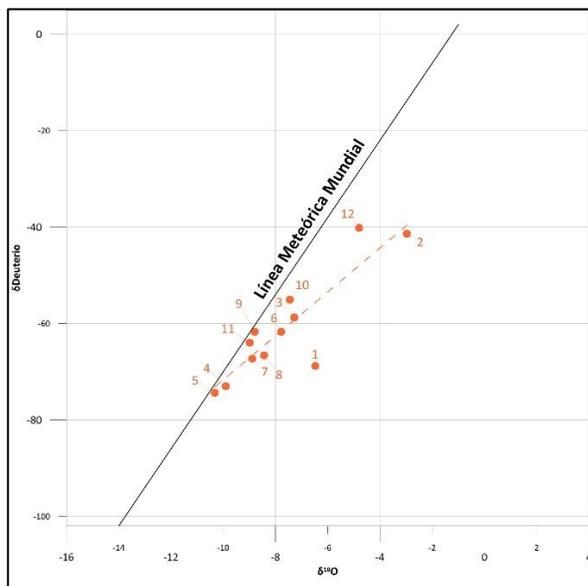
pesados, es decir se distribuyen más cercanas al origen en la gráfica que en los otros muestreos. Los valores menos negativos en esta campaña fueron las muestras con el número 3 y 27, la primera fue tomada de agua de un canal en la entrada de Los Negritos y la segunda en una corriente que llegaba al sitio donde se encuentran las manifestaciones, se apreciaba olor a ganado.

Los puntos que se tomaron en la manifestación y en las fosas de alrededor son los correspondientes al número 1 y 2. El número 1 se encuentra con valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de -6.47 a -3.78, siendo este último el correspondiente a la campaña número 4. La muestra número 2 persiste con la misma distribución en el año 2015 con valores de  $\delta^{18}\text{O}$  que va desde -2.96 a -1.5. Este punto se localiza cerca de las manifestaciones de lodos. En marzo de 2015, además de resaltar el punto número 2, también se presenta el número 12 con concentraciones más pesadas con valores de  $\delta^{18}\text{O}=-4.80$  y  $\delta\text{D}=-40.15$ . Sin embargo, para el muestreo llevado a cabo en época de lluvia del mismo año, su concentración se mostró más negativa ( $\delta^{18}\text{O}=-10.81$  y  $\delta\text{D}=-81.92$ ), por lo que su distribución en la gráfica cambio. Durante la salida a campo se apreciaban lodos y vegetación.

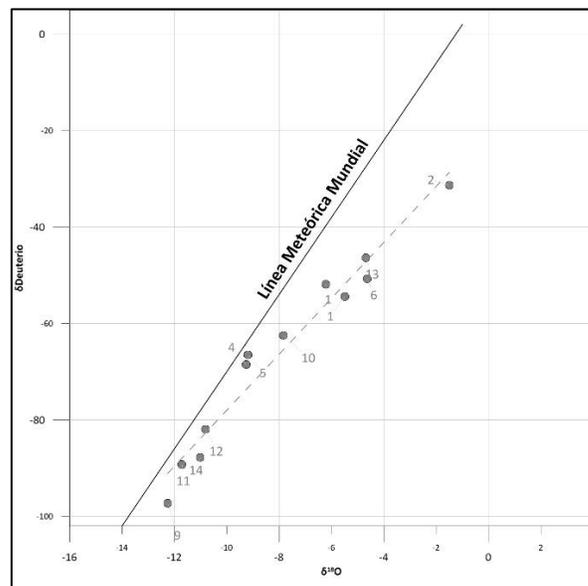
**Tabla 12.** Resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  en la zona de estudio Los Negritos, Michoacán.

Secas 15					Lluvias 15				
No.	$\delta^{18}\text{O}$	Desviación	$\delta\text{D}$	Desviación	No.	$\delta^{18}\text{O}$	Desviación	$\delta\text{D}$	Desviación
1	-6.48	0.09	-68.83	0.78	1	-5.49	0.08	-54.42	0.47
2	-2.97	0.04	-41.43	0.14	2	-1.50	0.13	-31.33	0.59
3	-7.28	0.03	-58.76	0.05	3	-6.22	0.19	-51.90	0.99
4	-9.90	0.02	-73.05	0.06	4	-9.26	0.26	-68.48	1.33
5	-10.32	0.04	-74.38	0.12	5	-9.19	0.05	-66.51	0.44
6	-7.78	0.02	-61.74	0.07	6	-4.63	0.17	-50.72	1.21
7	-8.89	0.02	-67.30	0.15	9	-12.25	0.29	-97.27	1.38
8	-8.44	0.08	-66.63	0.30	10	-7.83	0.18	-62.47	1.12
9	-8.80	0.04	-61.71	0.36	11	-11.71	0.22	-89.26	1.22
10	-7.46	0.02	-55.08	0.08	12	-10.81	0.23	-81.92	1.21
11	-8.99	0.02	-63.98	0.08	13	-4.69	0.22	-46.38	1.16
12	-4.80	0.01	-40.15	0.06	14	-11.01	0.09	-87.79	0.88
Secas 16					Lluvias 16				
1	-5.24	0.05	-57.68	0.32	1	-3.79	0.03	-50.52	0.16
3	2.03	0.11	-11.86	0.56	3	-6.16	0.01	-54.89	0.18
10	-2.01	0.04	-27.24	0.22	10	-8.16	0.08	-65.28	0.42
15	-4.56	0.05	-42.95	0.39	16	-7.63	0.09	-58.40	0.50
16	-4.43	0.10	-41.49	0.40	18	-9.65	0.01	-71.10	0.11
17	-2.53	0.05	-33.60	0.12	19	-7.13	0.02	-59.08	0.16
18	-1.68	0.07	-25.15	0.48	20	-9.14	0.04	-71.20	0.25
19	-4.34	0.03	-40.48	0.40	21	-8.03	0.04	-63.19	0.05
20	-3.80	0.33	-39.14	1.40	23	-6.77	0.02	-56.27	0.24
21	-0.93	0.02	-22.39	0.23	25	-8.54	0.02	-67.74	0.05
22	-5.89	0.12	-49.33	0.51	27	-5.92	0.03	-53.28	0.11
23	-5.50	0.07	-47.19	0.42	28	-6.38	0.01	-51.61	0.12
24	-0.80	0.06	-22.96	0.47	29	-8.13	0.02	-61.88	0.12
25	-1.40	0.04	-26.72	0.40	30	-6.94	0.04	-62.74	0.29
26	-4.06	0.10	-39.76	0.65					
27	2.60	0.08	-12.97	0.38					

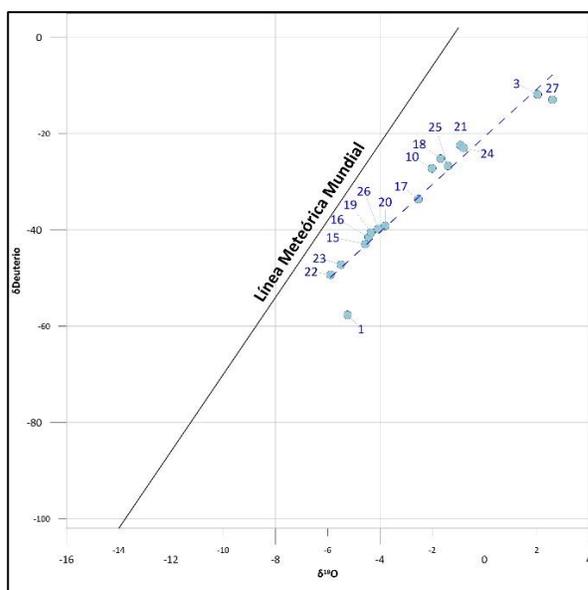
a) Marzo 2015



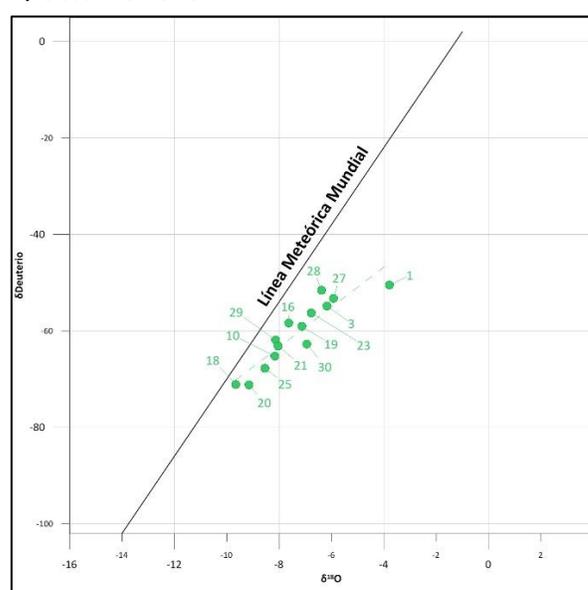
b) Octubre 2015



c) Marzo 2016



b) Octubre 2016



**Figura 67.** Relación isotópica de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  en las muestras durante las 4 campañas de campo en Los Negritos, Michoacán.

#### *Parámetros fisicoquímicos*

El pH en la zona durante las cuatro campañas permanece con valores de 6.82 a 8.84 (Tabla 13), lo que representan muestras alcalinas y neutras. Si bien durante las primeras tres campañas el pH se mantiene con valores más cercanos a concentraciones neutras, durante la campaña de octubre de 2016 se aprecian valores cercanos a concentraciones alcalinas (Figura 68). Los valores de pH cerca de la zona de las manifestaciones durante las cuatro campañas de muestreo no tienen muchas variaciones por lo que el pH que caracteriza la actividad de los volcanes de lodo es de 7.45 en promedio.

En relación a la conductividad eléctrica se puede apreciar las concentraciones mayores cerca de la manifestación durante el primer año, sin embargo, durante el segundo año se ve un comportamiento distinto debido a que se aprecian mayores concentraciones en la zona NE de los mapas de las campañas de 2016 (Figura 69). La conductividad varía entre 15.97 y 5,560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , durante las cuatro campañas los valores más altos se localizan cerca de la manifestación hidrotermal. Existió un aumento de la conductividad durante la última campaña, alcanzando 5,560  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el punto 27, mismo que durante la campaña de marzo 2016 también presentó un valor alto: 4,969  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , esto se puede deber a un aporte de sedimentos de la zona de El Platanal que se encuentra al Este en la zona de estudio.

Los ambientes de óxido-reducción en la zona de estudio se relacionan a las fluctuaciones observadas en el potencial óxido-reducción (ORP), los valores van de -263 a 255 mV (Figura 70). En las primeras dos campañas de muestreo se observan valores mayormente positivos (-263 a 255 mV, promedio: 75.42) lo que implican ambientes que favorecen a la oxidación. En el caso de las últimas dos campañas se presentaron valores de -185 a 82 mV (promedio: -25.6), lo que favorece los procesos de reducción.

**Tabla 13.** Valores de parámetros fisicoquímicos para la zona de Los Negritos, Michoacán.

Secas 15				Lluvias 15			
No.	pH	ORP (mV)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	No.	pH	ORP (mV)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	7.59	112	2510	1	7.58	190	2854
2	8.2	171	4713	2	7.6	142	15.97
3	7.55	118	1521	3	7.66	140	1258
4	7.22	-263	963	4	7.56	-216	847.1
5	7	-120	206.8	5	7.52	63	2227
6	8.01	7	373.4	6	8.84	39	374.4
7	8.17	149	852.4	9	6.99	148	138.1
8	7.68	80	387.5	10	7.66	131	324.4
9	7.38	255	1244	11	7.97	152	963.8
10	7.41	12	488.9	12	7.76	163	534.1
11	7.36	49	377.7	13	8.49	100	3990
12	7.87	74	1108	14	8.73	114	2844
Secas 16				Lluvias 16			
1	7.06	-104	2148	1	7.59	39	3349
3	8.62	72	1334	3	7.89	42	4959
10	7.71	-77	358.3	10	7.13	16	458.8
15	7.91	-1	1370	16	7.28	-128	709.6
16	7.47	-157	723.3	18	6.82	-164	653
17	8.27	-110	170.9	19	7.32	59	150.2
18	7.92	70	354.8	20	7.15	75	629.6
19	7.7	-94	1246	21	6.93	-1	528.1
20	8.21	45	1046	23	7.1	-54	1309
21	7.78	79	475	25	7.37	75	1468
22	7.65	-176	1323	27	7.89	-11	5560
23	7.7	-185	1281	28	7.34	-14	881
24	8.04	24	816.9	29	7.3	-170	872.3
25	7.73	82	565.3	30	7.02	-102	508.1
26	8.31	37	1081				
27	8.66	65	4969				

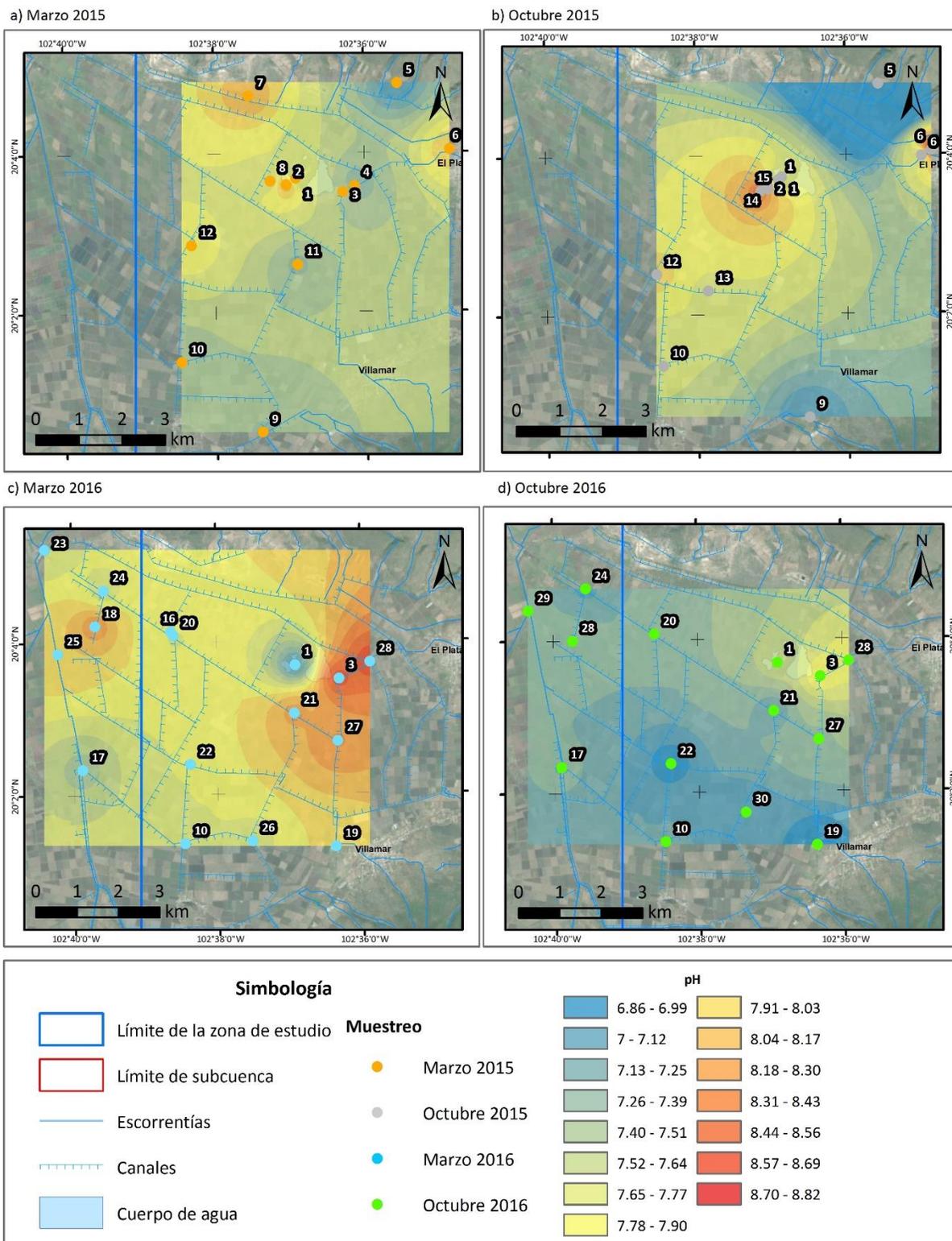


Figura 68. Valores de pH durante las cuatro campañas de muestreo en Los Negritos, Michoacán.

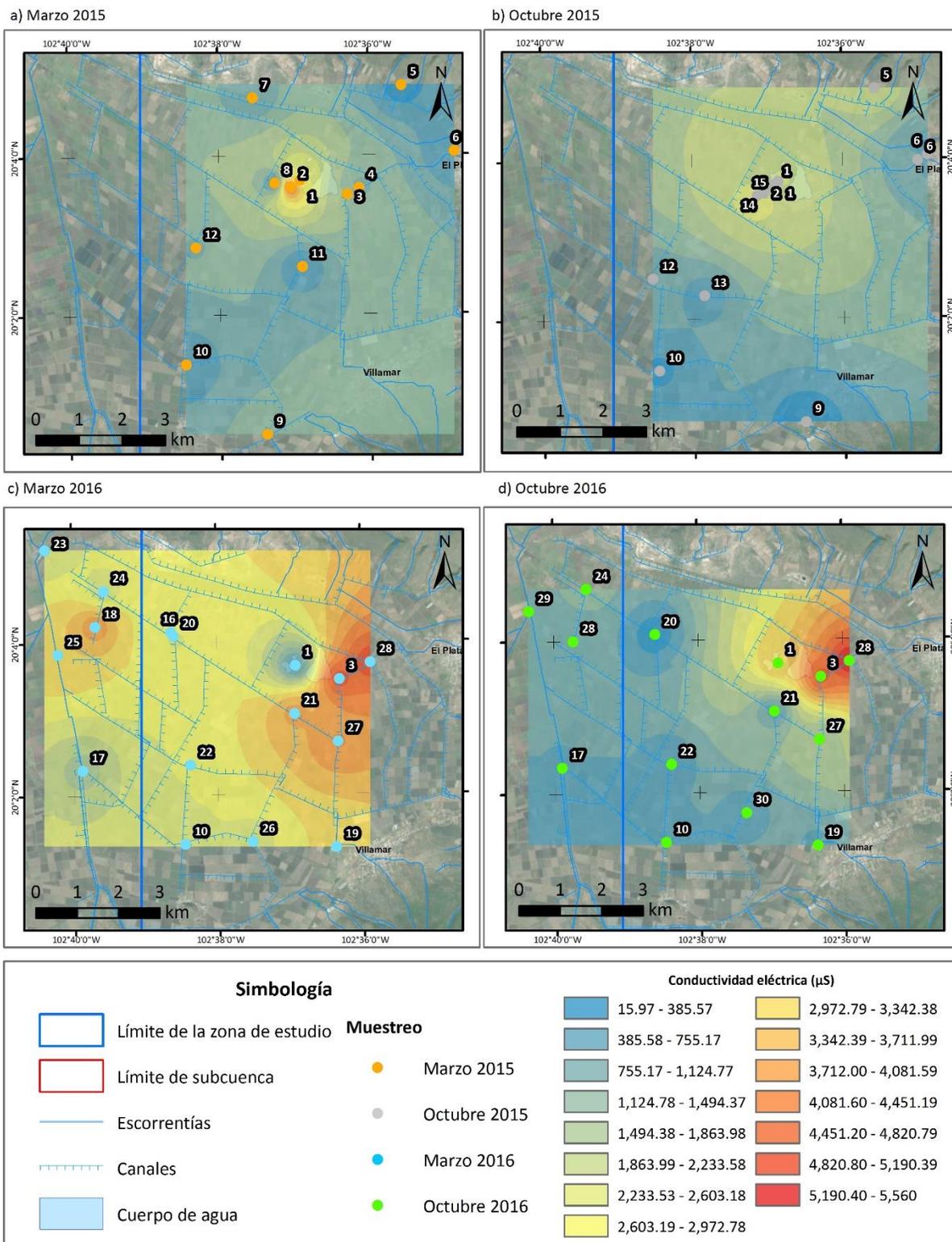


Figura 69. Valores de conductividad eléctrica en los muestreos de Los Negritos, Michoacán.

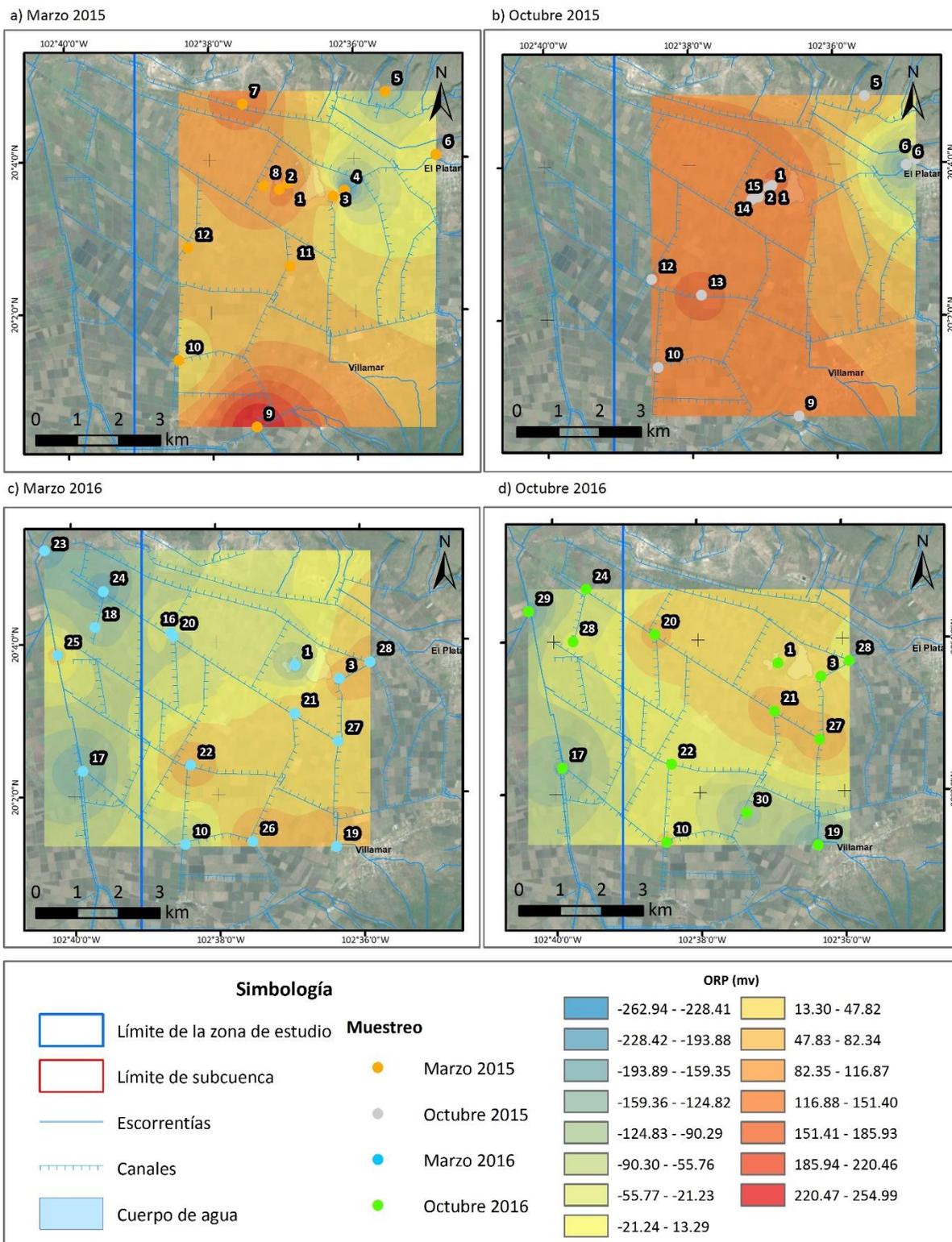


Figura 70. Valores de Potencial Óxido-Reducción (ORP) en los muestreos de Los Negritos, Michoacán.

### *Aniones*

Las concentraciones de nitritos se observan valores casi nulos con un valor promedio de 0.0081 mg/L, en relación a los nitratos tienen un promedio de 3.87 mg/L (máximo: 28 y mínimo: 0 mg/L). Esto se debe a la rápida conversión de los nitritos a nitratos. No se exhibe el mapa de interpolación de nitritos debido a que no son muy abundantes.

El valor máximo de nitratos se observó en el punto 5 de la campaña de octubre 2015, el cual se localiza en la zona Noreste una distancia de 3 km de distancia aproximadamente en un ojo de agua (Figura 71). En comparación con los límites máximos permisibles para el agua potable (DOF, 1994) los nitratos exceden en 6 muestras el límite especificado (10 mg/L), exceptuando el punto 5 que se encuentra en un ojo de agua, el resto de los puntos están influenciados por actividades antropogénicas, ya que en las salidas de campo se registró: olor a ganado, sobre canal cercano al panteón, presencia de organismos, coloración del agua café, cercana a Villamar y laguna.

Los fosfatos tienen valores que van de los 0 a 14 mg/L y en proporción a los nitratos es menos abundante (Figura 72). Se observan los valores más altos durante la campaña de marzo de 2015, tres de los puntos máximos se localizan en canales uno que esta al Norte, otro al Este y otro muy cerca de la manifestación de lodos.

La concentración de cloruros en la Figura 73 se observa que se distribuye en todas las campañas las cuales se asocian a la manifestación ya que se presentan en las zonas cercanas. Las concentraciones de cloruros van de los 0.93 a 1257.92 ppm, con un promedio de 145.74 ppm.

Los fluoruros tienen concentraciones bajas que van de 0.4 a 24.26 ppm (Figura 74). Durante la campaña de octubre de 2015 se observan las concentraciones mayores en los puntos cercanos a la manifestación geotérmica. Durante las campañas de secas se aprecian los valores más altos de fluoruros. Aunque las concentraciones sean menores a 24.26 ppm, el límite máximo permisible es de 1.5 ppm, del número de muestras en todas las campañas 10 superan el límite, algunas se localizan en las manifestaciones superficiales.

Los sulfatos presentan una concentración de entre 2.26 a 4908.22 ppm (Figura 75). La concentración mayor de sulfatos se aprecia en la campaña de octubre en el 2015 en el punto 13, si bien durante este año se pueden asociar estas concentraciones a la manifestación, durante el año 2016 se observa una concentración mayor en la zona Este cercana a la manifestación en el punto 27 y 25.

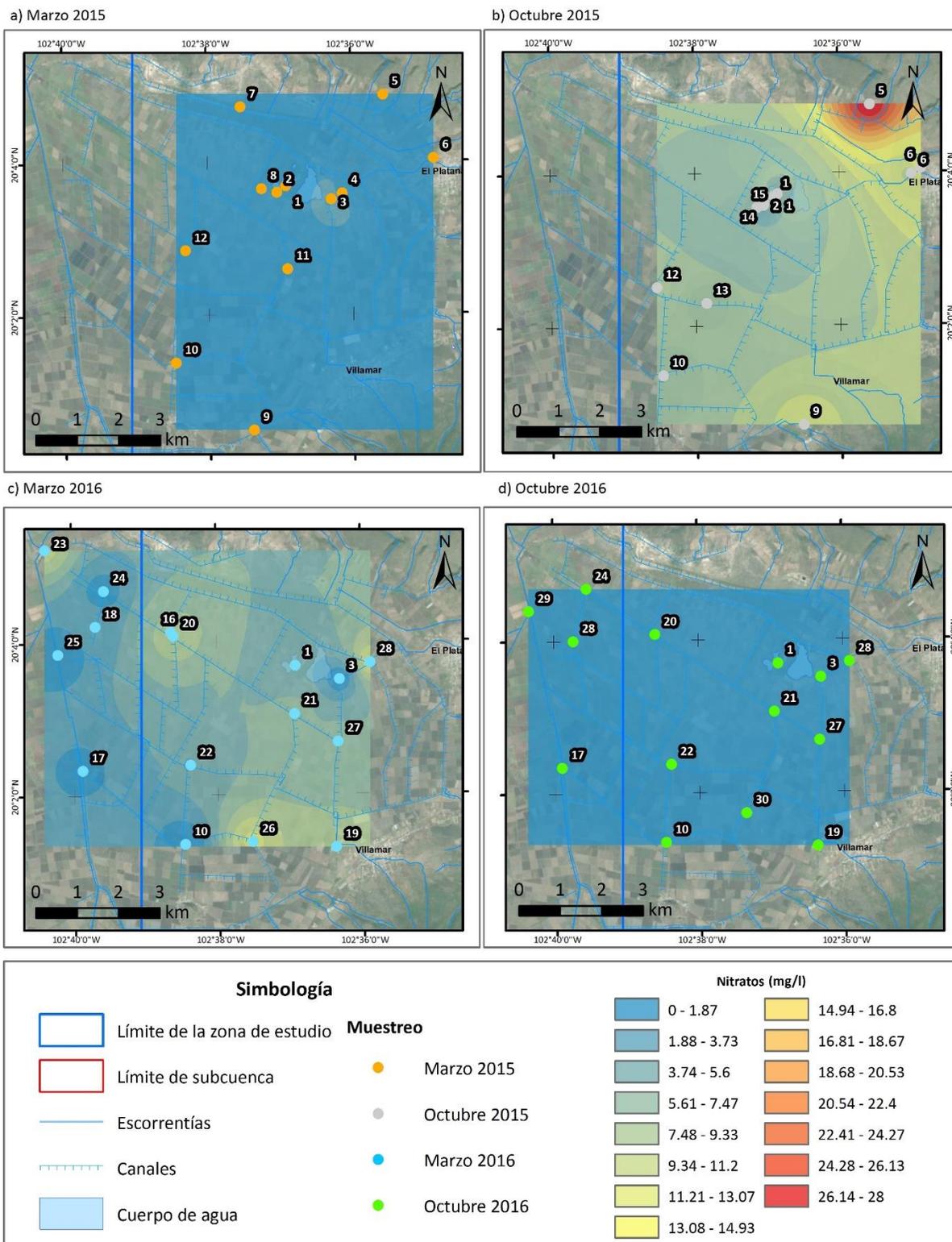


Figura 71. Concentración de nitratos en la zona de estudio Los Negritos, Michoacán.

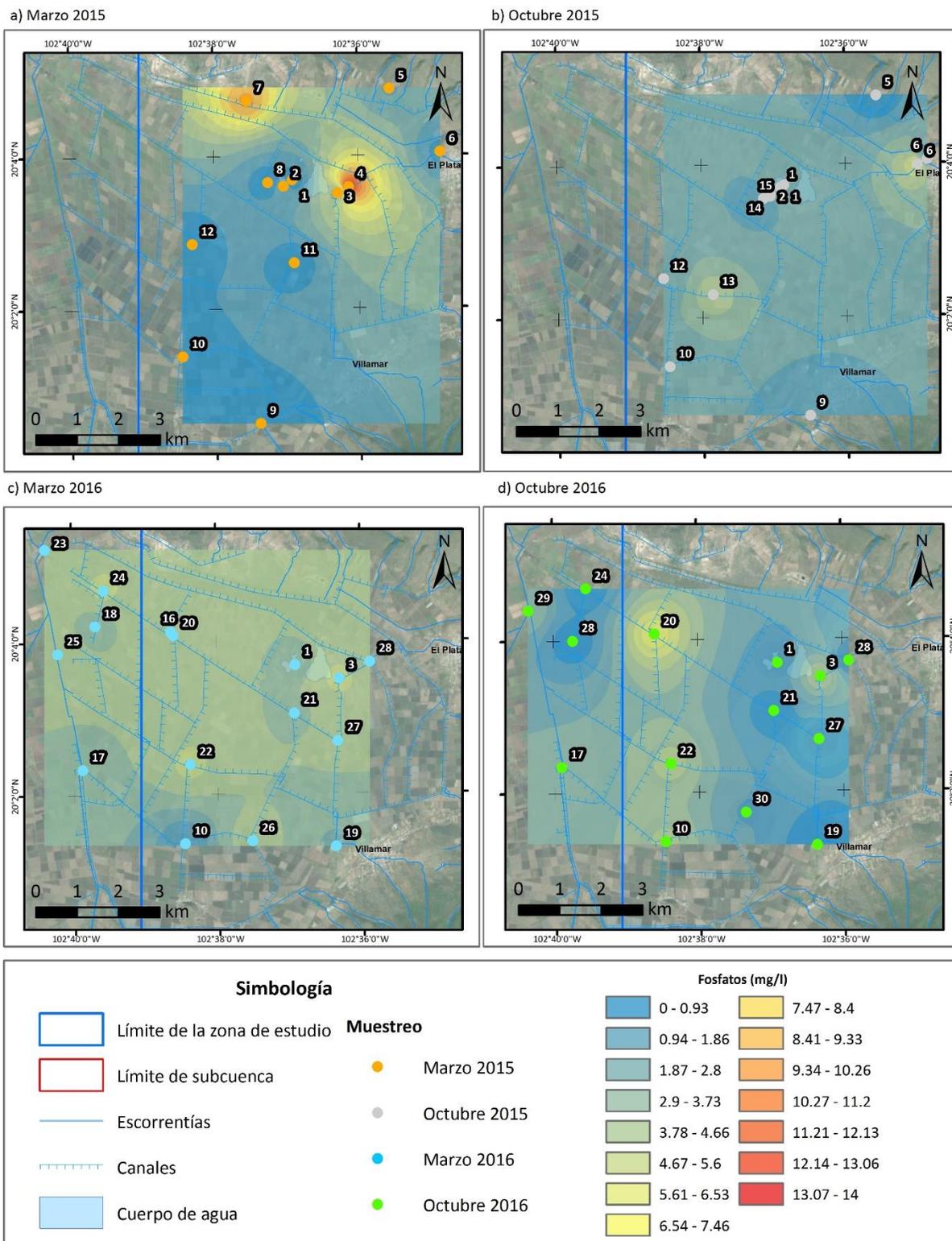


Figura 72. Concentración de fosfatos en la zona de estudio Los Negritos, Michoacán.

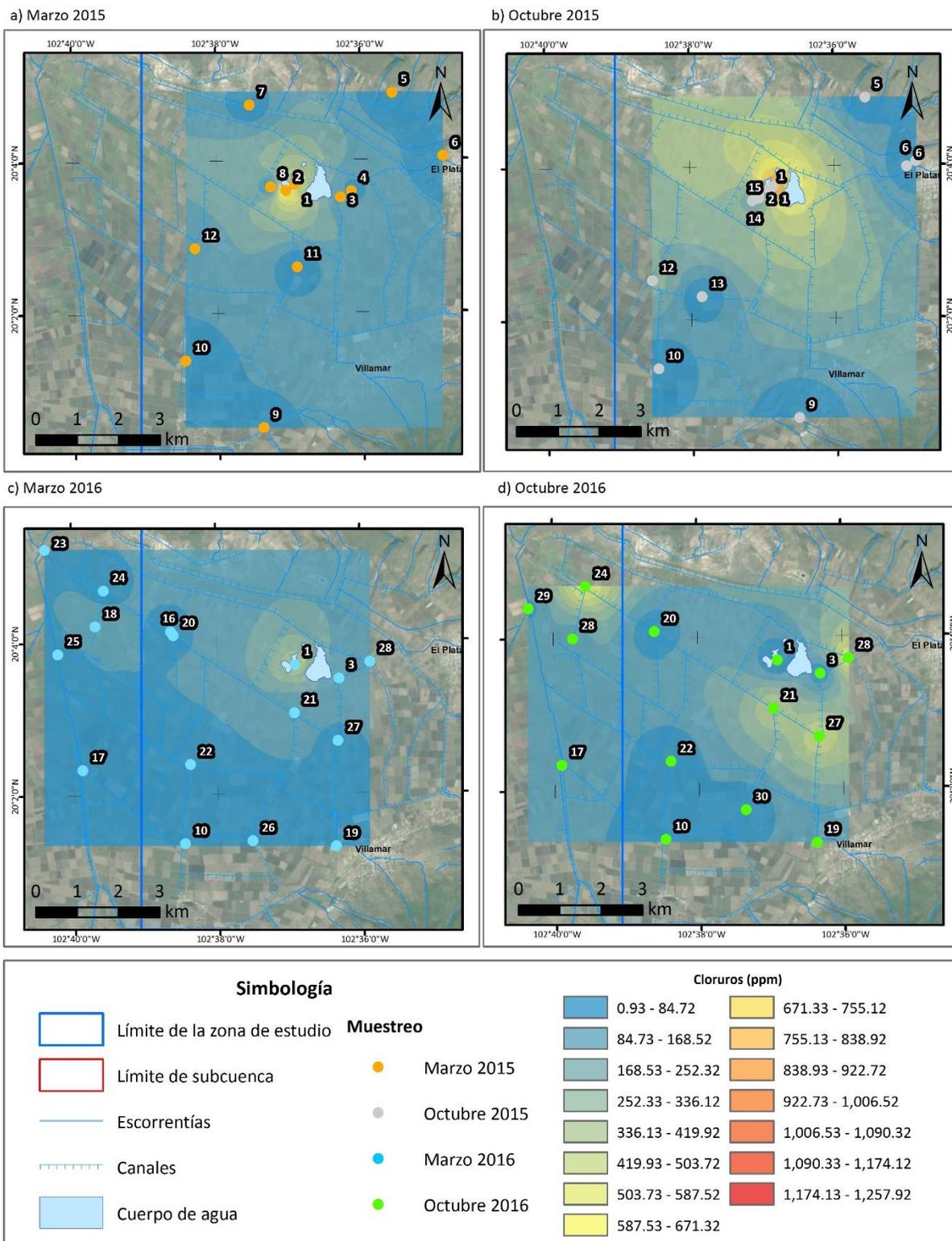


Figura 73. Concentración de cloruros en la zona de estudio de Los Negritos, Michoacán.

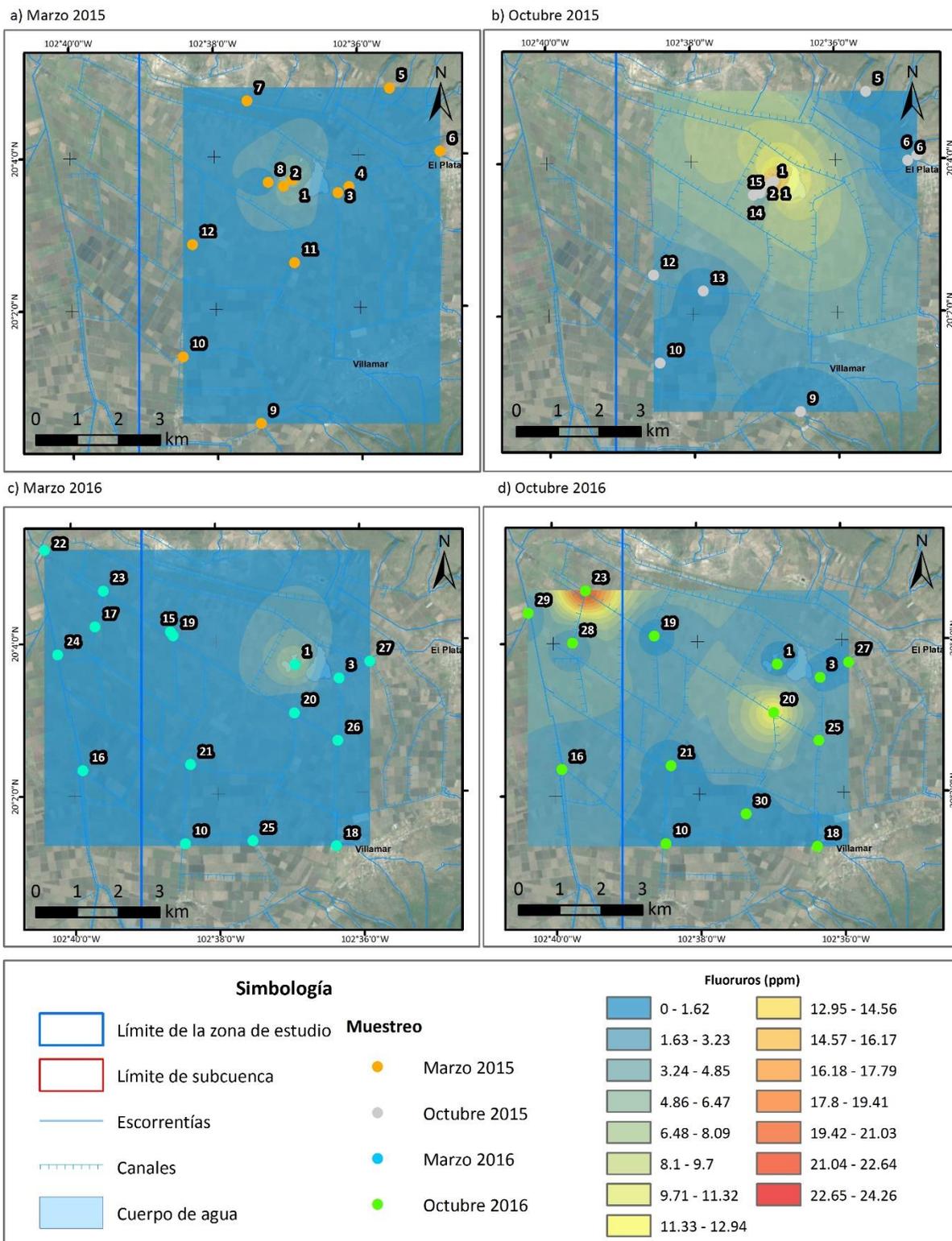


Figura 74. Concentración de fluoruros en la zona de estudio de Los Negritos, Michoacán.

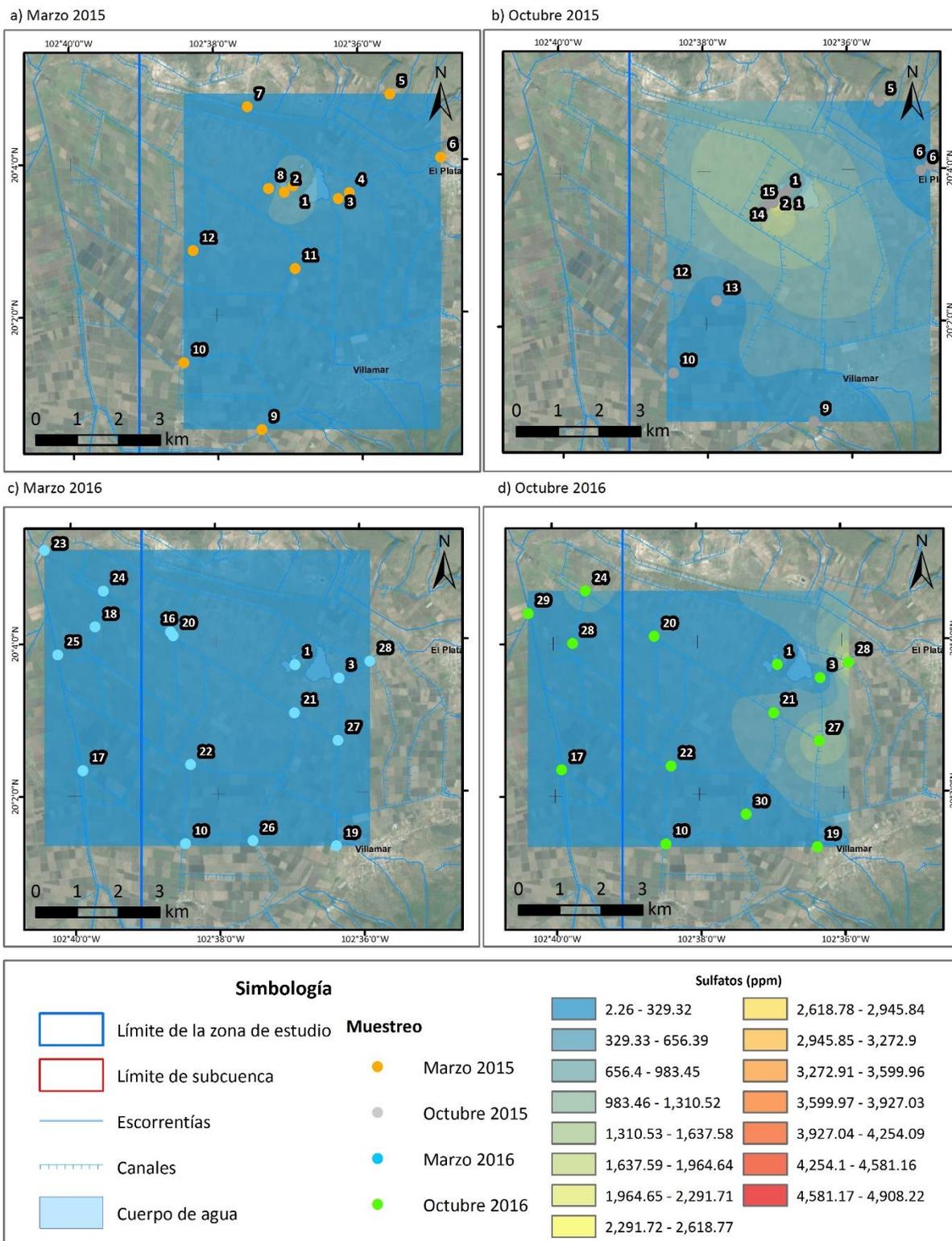


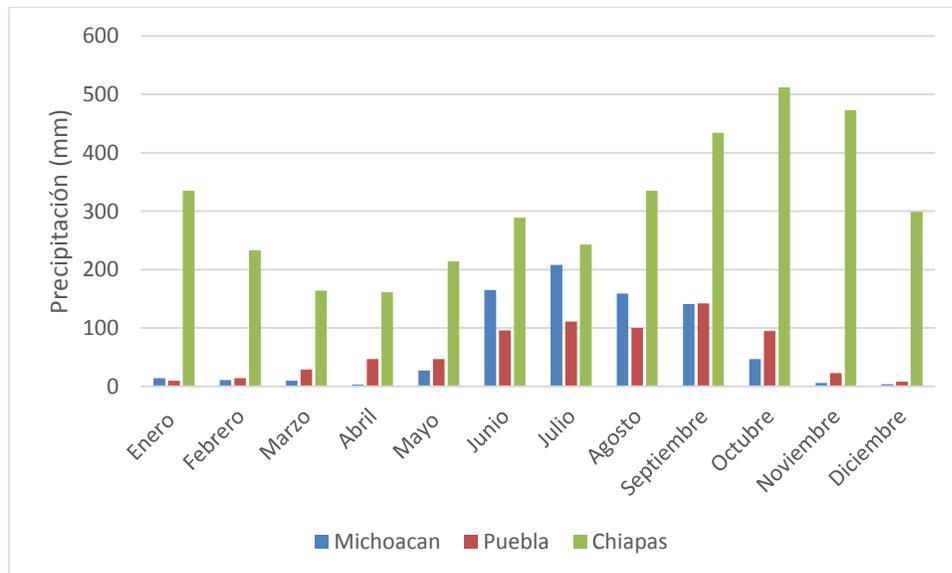
Figura 75. Concentración de sulfatos en la zona de estudio de Los Negritos, Michoacán.

## Capítulo 4. Discusión

### 4.1. Hidrología superficial

La manifestación geotérmica asociada a vulcanismo (MAV) (El Chichonal, Chiapas), y la de lodos calientes (MLC) (Los Negritos, Michoacán) son cuencas pequeñas. Las cuencas hidrológicas de la zona con manifestación de roca seca caliente (MRS) (Acoculco, Puebla) se consideran de intermedias a grandes. En la zona con MRS tienen una forma alargada con respecto a las que se localizan en la MAV y MLC, que son de forma circular. La forma de la cuenca afecta las características del flujo, el flujo de una cuenca con forma circular se transporta de una manera más lenta que en las cuencas de formas alargadas (Campos-Aranda, 1992).

El ciclo de precipitación en las tres zonas es distinta, como se observa en la Figura 76. En la MAV las precipitaciones son mayores en comparación a las otras dos zonas, en esta región hay lluvias todo el año, con precipitaciones mayores en los meses de septiembre a diciembre. En el caso de la MLC y la MRS el ciclo de precipitaciones es similar con el periodo de lluvias desde junio a septiembre, siendo la zona de Puebla la que presenta menor precipitación. Con base a este comportamiento, se esperaría que en Chiapas las concentraciones estuvieran más diluidas que en Puebla o Michoacán.



**Figura 76.** Ciclo de precipitaciones en las tres zonas de estudio.

## 4.2. Hidroquímica hidrotermal

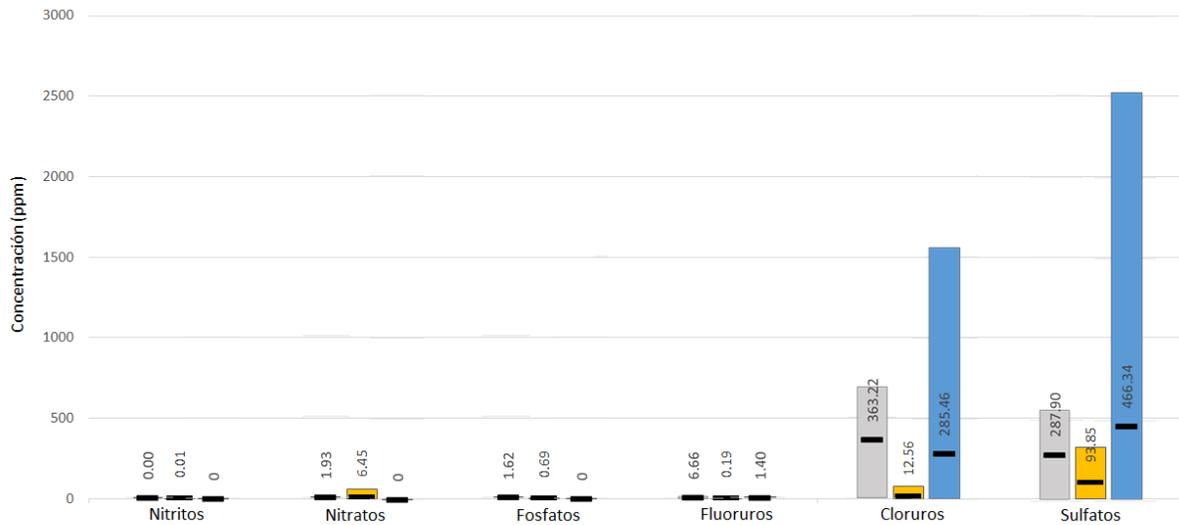
Las características del agua en cada manifestación geotérmica estudiada difieren entre sí, esto es de esperarse ya que cada una de las zonas tiene diferencias geológicas y orígenes geotérmicos específicos, además de que se realizan actividades antropogénicas distintas.

A fin de eliminar dentro de las posibilidades los efectos de la actividad antropogénica regional, en cada sitio se seleccionaron las muestras más representativas de la manifestación geotérmica superficial. En la MRS se eligieron los sitios dentro de la poza azul y sus alrededores (puntos: 1, 2, 3, 10, 11 y 26). En la MAV se optó por los sitios hidrotermales en la falda del volcán El Chichonal con temperaturas de hasta 60 °C (puntos: 4, 5 y 6). Y en la MLC se escogieron los resultados del punto 1 que corresponde a los lodos calientes.

En relación con los promedios de concentración obtenidos (Figura 77), se observa que en las tres zonas los aniones más abundantes son los cloruros y los sulfatos, en donde las mayores concentraciones de sulfatos se presentan en la MAV y cloruros en la MLC. A pesar de que en el sitio de la MLC se identificaron altas concentraciones de cloruros en la zona Este y Norte, la máxima concentración está en los lodos calientes.

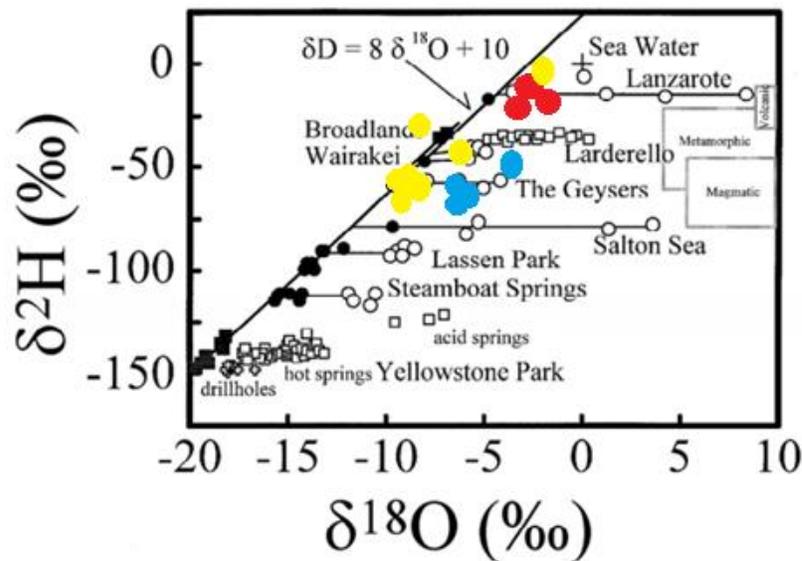
Para el caso de los sulfatos, en la zona de MAV, el punto 8 que no se consideró hidrotermal por tener una temperatura de 27 °C, es el sitio en donde se determinó la concentración más alta. Esto se puede deber al transporte de la zona hidrotermal que proviene de las faldas del volcán y que sigue su curso a través de este arroyo.

En la MRS se reportan los sulfatos como el anión más abundante, con valores de hasta 549 ppm localizado en el punto 14 al Este de las manifestaciones superficiales, además de que los valores de pH en este sitio son similares a los que se reportan en la manifestación; estas son evidencias de hidrotermalismo aunque no existan temperaturas mayores de 15 °C. Los valores de pH que se registraron en Acoculco (<5), son similares a los valores en aguas termales y dentro del cráter Mutnovsky (2.3 a 5) en el campo geotérmico localizado en la península Kamchatka en Rusia (Ilgen, et al., 2011). Los valores de pH registrados se pueden presentar en sitios con temperaturas altas que llegan al punto de ebullición, como también a temperaturas medias como ocurre en la MRS en donde se determinaron temperaturas de 15-20°C.



**Figura 77.** Valores mínimos y máximos en donde se indica el promedio del agua característica de las zonas hidrotermales (Chiapas=MAV, Puebla=MRS y Michoacán=MLC).

En relación a las composiciones isotópicas, los resultados fueron sobrepuestos en el diagrama propuesto por Kharaka y Mariner (2005), con la finalidad de visualizar su comportamiento respecto a otras aguas hidrotermales (Figura 78). En este diagrama se puede apreciar que las composiciones isotópicas de los sitios en la MAV y MLC tienen un desplazamiento positivo en la horizontal, lo que revela un hidrotermalismo similar a otros sitios. Con respecto a los resultados de la MRS no se observan estas tendencias, más bien sigue una tendencia similar a la LMM, lo que es indicador de la influencia de agua meteórica.



**Figura 78.** Composiciones isotópicas de las aguas correspondientes a las manifestaciones superficiales, los círculos rojos en el punto 4, 5, 6 de la MAV (octubre 2015), los círculos azules al punto 1 de la MLC (durante todas las campañas) y los círculos amarillos a los puntos tomados en la MRS (durante todas las campañas) (Modificado de Kharaka y Mariner, 2005).

Estudios efectuados en Nueva Zelanda y Japón muestran que la permeabilidad de la roca base puede controlar la dirección del envejecimiento del agua (Uchida, 2004). Las composiciones isotópicas del agua superficial se caracterizan por una composición del agua en el sitio y de esta forma se pueden identificar emisiones externas a las mismas, tales como aportes de agua subterránea o descarga de aguas, una vez ocurrido el evento de precipitación este aportará composiciones isotópicas distintas (Vitvar et al., 2005). El tipo de geología en Acoculco no permite mucho intercambio por la baja permeabilidad de los materiales. Las composiciones isotópicas en la MRS no mostraron la relación común a la actividad hidrotermal. En las composiciones isotópicas se puede observar claramente la influencia de los procesos de evaporación de agua.

En relación al sitio de la MAV el desplazamiento positivo de oxígeno, se pueden asociar a un intercambio entre el flujo subterráneo hidrotermal y el agua superficial, en estos puntos se registraron temperaturas durante las épocas de muestreo de hasta 61°C. En el caso específico de El Chichonal; Taran y colaboradores (2008) relacionan el desplazamiento positivo a procesos de interacción agua-roca.

En cuanto a las composiciones isotópicas, de la MLC, el sitio 1 que corresponde a la manifestación superficial de lodos calientes, muestra una tendencia en la horizontal, lo que representa condiciones parecidas a las que se encuentran en la zona hidrotermal Los Geysers en California, localizado al Norte de San Francisco, California, donde se localiza una planta geotérmica de vapor directo.

### **4.3. Hidroquímica de actividades antropogénicas**

Dentro de la zona de la MRS el sitio de muestreo 5 se localiza en una presa que se utiliza por los habitantes de las localidades cercanas para pescar y otras actividades. Con base a las relaciones isotópicas y a las concentraciones de nitratos (9.79 ppm), se observa una evidencia de mezcla de aguas superficiales con la presa en el punto 22 que aunque se encuentra cercano al punto 5 y es parte del mismo cuerpo de agua, el resultado fue distinto en octubre 2016. Esto sugiere que en esta temporada hubo un aporte extraordinario de agua, sin embargo, los parámetros de calidad de agua evaluados en este trabajo no indican este proceso, por lo que se sugiere poner especial atención en este sitio al momento de evaluar las concentraciones de cationes. Cabe resaltar que este cuerpo de agua es de gran importancia para las comunidades aledañas.

En las tres zonas de estudio, las concentraciones de nitratos se encontraron entre 0 y 75 mg/L, siendo 10 mg/L el límite máximo permisible recomendado por la NOM-027-SSA1-1994. Así entonces, Acoculco y Los Negritos tienen cinco sitios que se encuentran fuera del límite. En Acoculco, los sitios están dispersos y no

tienen relación hidrológica, lo que sugiere que sean procesos localizados que estén aportando nitratos en el agua. Para el caso de Los Negritos, las altas concentraciones fueron identificadas principalmente en los cuerpos de agua estancada, lo que es un indicador de posibles procesos de eutrofización provocados posiblemente por la agricultura.

En el cauce principal del Río Magdalena de la zona de MAV, las concentraciones de cloruros son más bajas que las reportadas en los manantiales hidrotermales por Peiffer (2011), por lo que no hay influencia directa de los manantiales hidrotermales provenientes de las faldas del volcán El Chichonal, en el Río Magdalena. Esto puede deberse a procesos de dilución asociados a las altas precipitaciones (de 2800 hasta 4000 mm anuales) de la zona.

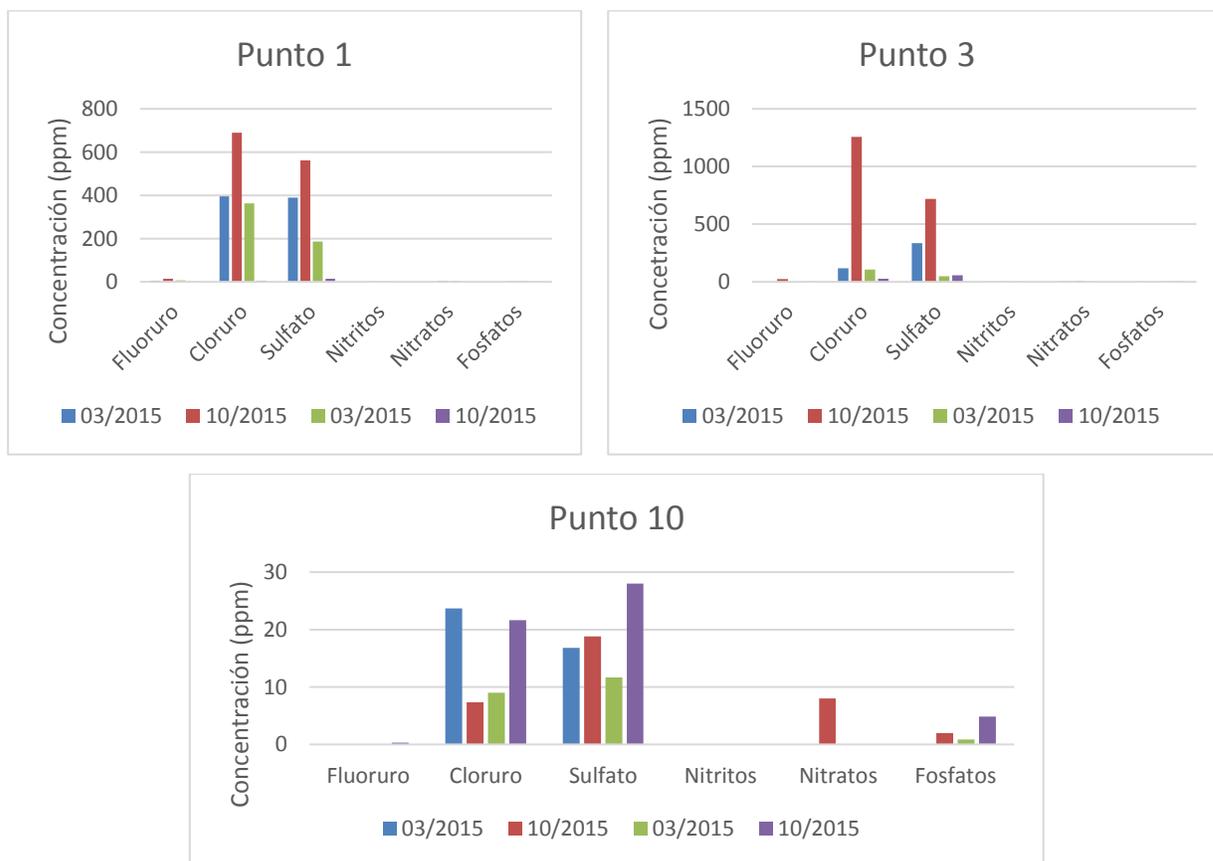
Las concentraciones de cloruros en las aguas muestreadas en la zona de estudio de la MLC indica que existe un aporte natural de cloruros por parte de la manifestación superficial, sin embargo, también se observan otras fuentes, que pueden estar relacionadas a las actividades antropogénicas cercanas, como lo es la agricultura, que tendrá que ser corroborada con las concentraciones de los cationes. Esta misma tendencia se observa con las concentraciones de sulfatos y fluoruros.

El valor más alto de fluoruros se presentó en Los Negritos, Michoacán, con una concentración de 24.26 ppm. Los valores reportados en diferentes tipos de agua provenientes del campo geotérmico de Mutnovsky presentan valores similares a los que se encontraron, con un valor mínimo de <0.01 a 28.24 ppm (Ilgen et al., 2011). Las concentraciones de fluoruros por arriba de 1.5 mg/L implican un riesgo a la salud humana según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006). Los fluoruros son naturalmente añadidos al agua debido a actividad volcánica o el tipo de geología presente en cada área, sin embargo, los fluoruros también se relacionan al uso de algunos fertilizantes y residuos industriales. Aunque se tengan antecedentes de que el fluoruro pueda estar relacionado a manifestaciones geotérmicas, en el caso de Los Negritos, la mayor concentración de fluoruro no fue detectada en los lodos calientes, por lo que su presencia se puede asociar a actividades antropogénicas.

La información de usos de suelo permite identificar si existen actividades antropogénicas que pudieran alterar las concentraciones de algunos parámetros en el agua. En las tres zonas sólo se evidenció la existencia de prácticas como la agricultura y ganadería, que pueden ser una fuente de plaguicidas, pesticidas y fertilizantes, sobre todo en la zona de MLC en donde se observaron concentraciones de fosfatos más altas que en las otras dos zonas de estudio.

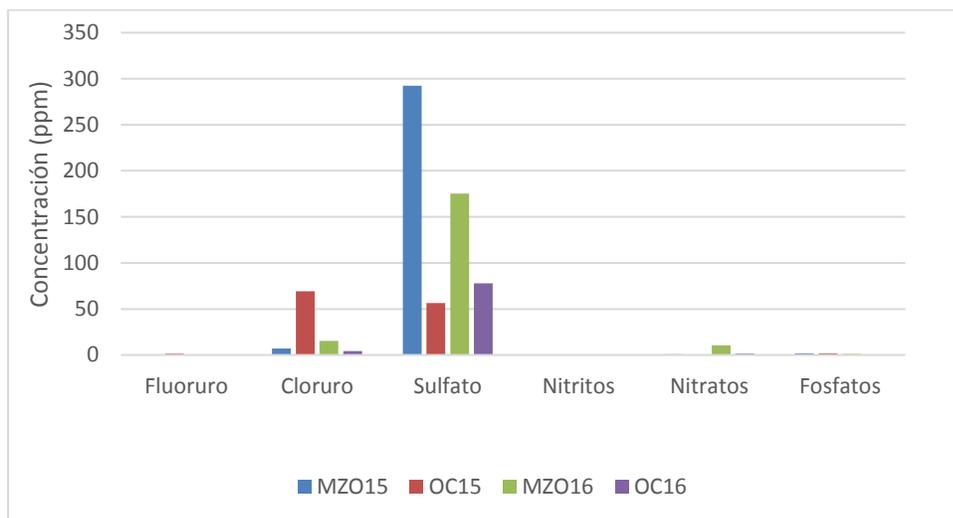
#### 4.4. Concordancia Estacional

La estacionalidad de los puntos de muestreo que se reportan en las cuatro campañas no indica un patrón en donde se puedan visualizar los efectos de la época de secas o de lluvias. Para la MLC, en la Figura 79 se presentan los resultados de tres puntos de muestreo; en el punto 1 se observa que en época de lluvias de 2015 se determinaron concentraciones de sulfatos y cloruros mayores que en época de secas, sin embargo, esto no se presenta en la época de lluvias de 2016. Esta misma tendencia se observa en el punto 3 aunque con menores concentraciones. En contraste, en el punto 10 se determinaron concentraciones mayores de sulfatos en ambas épocas de lluvia (2015 y 2016) lo que muestra una concordancia estacional en este punto. Sin embargo, los cloruros presentan concentraciones mayores durante secas 2015 y lluvias 2016, por lo que no hay una concordancia estacional en todos los datos. Cabe resaltar que el punto 1 corresponde a la manifestación de lodos calientes, el punto 3 se localiza al Este a 1 km aproximadamente de la manifestación, mientras que el punto 10 se encuentra en el extremo suroeste de la zona de estudio y que está influenciado por diversas actividades humanas (agricultura, residuos domésticos y aguas residuales mezcladas). Considerando estas diferencias, es difícil esperar una concordancia respecto a la variabilidad de concentraciones de acuerdo a su estacionalidad.



**Figura 79.** Estacionalidad en los puntos que se muestrearon las cuatro temporadas en la zona de la MLC (Los Negritos, Michoacán).

En la zona de la MRS, se aprecia en la Figura 80 que los sulfatos estuvieron más concentrados en ambos muestreos de la época de secas, lo que indica concordancia. En el caso de los cloruros, su mayor concentración fue en época de lluvias de 2015, por lo que no hay una concordancia con los sulfatos. Para explicar la falta de concordancia de los cloruros, es necesario evaluar sus concentraciones en otras matrices ambientales, así como monitorear en periodos más largos.



**Figura 80.** Estacionalidad en el punto correspondiente a la poza azul en la MRS (Acocolco, Puebla).

Para el caso de la MAV, al no tener resultados de un sitio en las cuatro campañas de muestreo, no se evaluó la concordancia estacional.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

Las características particulares como la hidrología superficial, la geología, el origen de la actividad geotérmica, así como las condiciones climáticas y las actividades antropogénicas, tienen una influencia directa en la química del agua.

La litología en cada sitio de estudio no mostró ser una fuente de los aniones determinados. Sin embargo, todas las manifestaciones geotérmicas estudiadas se caracterizan por presentar altas concentraciones de sulfatos.

No se apreció la influencia de la hidrología superficial en cada zona, debido a que no se observaron patrones respecto a la dirección de las escorrentías. A pesar de las diferencias geomorfológicas de las cuencas hidrológicas en las zonas de estudio, en los resultados hidroquímicos no se pudo identificar su influencia.

A pesar de las características diferentes de cada sitio, en las tres zonas de estudio se identificaron como los aniones más abundantes a los cloruros y sulfatos, siendo Aocolco el que presentaba menores concentraciones. En el caso de los nitritos se presentan bajas concentraciones en las tres zonas, sin embargo, en Los Negritos y en Aocolco, en cinco sitios de muestreo, la concentración de nitratos sobrepasa la normatividad de agua potable.

Respecto a las características de la zona de Aocolco, Puebla clasificada como una manifestación hidrotermal de roca seca caliente (MRS), no se observó un patrón de hidrotermalismo en las relaciones isotópicas, mayormente se asociaron a la presencia de agua meteórica y se apreció influencia de aguas superficiales en el sitio 22. La MRS, se asocia a un pH ácido y temperaturas entre 15 y 20 °C. El anión más abundante es el sulfato.

Respecto a las características de la zona de El Chichonal, Chiapas en donde existe una manifestación asociada a vulcanismo (MAV), la composición isotópica muestra un patrón de hidrotermalismo en las aguas de más de 60 °C, los resultados sugieren procesos entre flujos subterráneos en época de lluvias 2015. El anión más abundante es el sulfato.

Respecto a las características de la zona de Los Negritos, Michoacán que tiene una manifestación de lodos calientes (MLC), la composición isotópica muestra un patrón de hidrotermalismo en la zona de lodos y los alrededores. En las aguas analizadas, las concentraciones de fluoruros que rebasan la normatividad de

agua potable, se asocian a las actividades humanas. El anión más abundante son los cloruros, existe evidencia de aporte natural geotérmico, sin embargo, se identificaron aportes antropogénicos también.

La estacionalidad puede indicar escenarios esperados en las concentraciones evaluadas, ya sea de procesos de dilución o procesos de concentración por evaporación. En las zonas de estudio, al tener muestras de agua de origen natural y de origen antropogénico e incluso mezcla de ambas, evaluar la concordancia con respecto a la estacionalidad resultó complejo. Por lo que el comportamiento de los aniones evaluados en el análisis de concordancia estacional se vio afectado por las interacciones del medio con las actividades antropogénicas, especialmente en la zona de Los Negritos, Michoacán.

El diseño del muestreo hidrológico llevado a cabo durante el 2016 permitió visualizar las concentraciones de los aniones y parámetros estudiados en la red de escorrentías. Sin embargo, no se pudo apreciar la temporalidad y estacionalidad en todos los puntos debido a que no existía una reproducibilidad de los sitios de muestreo con respecto a la campaña del 2015, que se basó en la dirección de los vientos. Ambos muestreos son complementarios para el establecimiento de la línea base ambiental.

La evaluación de la hidrología en este estudio para el establecimiento de la línea base ambiental determinó la influencia de las actividades antropogénicas en cada zona y de cada manifestación geotérmica estudiada. Lo cual será de gran importancia al momento de correlacionar los aniones y parámetros estudiados en este trabajo en perfiles de suelo y la vegetación, así como complementar el estudio con análisis de cationes en las muestras de agua.

## Recomendaciones

---

En este trabajo, los aniones determinados, no representan los valores de la conductividad eléctrica, por lo que se recomienda a futuro analizar los cationes disueltos.

Sí se quiere hacer una evaluación hidrológica detallada, se recomienda seguir los cauces de la cuenca de estudio, tomando mayor número de muestras.

En futuros trabajos en donde se evalúe la hidrología se debe estimar el caudal y la velocidad de las escorrentías, para poder calcular el transporte y hacer balances de los iones disueltos.

Se recomienda que el que adquiera la concesión para desarrollar un proyecto geotérmico en cualquiera de las tres zonas de estudio de este trabajo, instale una estación meteorológica que le permita mantener un monitoreo del ciclo anual de precipitaciones. Esto permitirá monitorear la variabilidad estacional de los parámetros, así como estimar la recarga de agua en el yacimiento geotérmico.

## Literatura citada

---

- Aguirre-Díaz, G.J. 2003. Características generales del Cinturón Volcánico Mexicano. Una revisión por sectores. Unión Geofísica Mexicana. GEOS 23, 118–119.
- Aparicio, F. J. 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. México:
- Armienta, M.A., S. De-la Cruz-Reyna, J. L. Macías. 2000. Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, México: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 97, 105-125.
- Barbier, E. 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews , 6 (1-2), 3-65.
- Breña Puyol, A. F., M.A. Jacobo Villa. 2006. Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. 289 pp.
- Campos-Aranda, D.F. 1992. Procesos del Ciclo Hidrológico. (2da reimpresión). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí.
- Christophersen, T.A.C., C.T. Driscoll, D.S. Jeffries, C. Neal, R.G. Semkin 1994. Hydrochemical Studies. In: Moldan, B. and Cerny, J. (Eds). Biogeochemistry of Small Cachments. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). United Nations Environment Programme (UNEP). 419 pp.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133(3465), 1702-1703.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2016. Reporte del Clima en México. Noviembre 2016. Año 6, Número 11. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. 30 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015a. Reporte del Clima en México. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. México. 30 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015b. Reporte del Clima en México. Marzo 2015. Año 5, Número 3. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. 23 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2017. Información climatológica 2017. Recuperado 17 de Marzo 2017, de: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=chis>
- Damon, P., E. Montesinos, E. 1978. Late Cenozoic volcanism and metallogenesis over an active Benioff Zone in Chiapas, México: Arizona Geological Society Digest, 11, 155-168
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436-468.
- De la Cruz, M.V., D. Castillo-Hernández. 1986. Estudio geológico de la zona geotérmica de la caldera de Aocolco, Puebla. CFE-GPG reporte interno 36/86. 23 p.

- Drever, J. 1997. *The Geochemistry of Natural Waters. Surface and Groundwater Environmets*. 3rd Edition. Prentice Hall. USA. 436 p.
- Digman, S. L. 2015. *Physical Hydrology*. (3rd edition). Waveland. Long Grove, IL. 643 pp.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2014. *Ley de Energía Geotérmica*. México: SENER.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2000. *NORMA Oficial Mexicana (con carácter de emergencia) NOM-EM-034-FITO-2000, Requisitos y especificaciones para la aplicación y certificación de buenas prácticas agrícolas en los procesos de producción de frutas y hortalizas frescas*. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1994. *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. México: Secretaría de Salud.
- Duffield, W.A., R.I. Tilling, R. Canul. 1984. *Geology of El Chichón volcano, Chiapas, México*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 20, 117-132
- Espíndola, J.M., J.L. Macías, R.I. Tilling, M.F. Sheridan. 2000. *Volcan history of El Chichón volcano (Chiapas, México) during the Holocene, and its impact on human activity*. *Bulletin of Volcanology*, 62, 90-104.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2016a. *Como funciona IDW. Conceptos del conjunto de herramientas de Interpolación*. Recuperado enero 2017 de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm#GUID-44F162A0-273D-442C-9985-F8465350DD11>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2016b. *IDW. Conjunto de herramientas de Interpolación*. Recuperado enero 2017 de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/idw.htm>
- FDA. 1998. *Guía para Reducir al Mínimo el Riesgo Microbiano en los Alimentos, para Frutas y Hortalizas Frescas*. Departamento de Salud y Servicios Humanos. USA. 48 pp.
- Fawell, J., K. Bailey, J. Chilton, E. Dahi, L. Fewtrell, Y. Magara. 2006. *Fluoride in Drinking-water* World Health Organization (WHO) ISBN: 1900222965. IWA Publishing, London, UK. 134 pp.
- Goff, S., P. Brophy, F. Goff. 2011. *Environmental Effects of Geothermal Power*. UNESCO-EOLSS.
- Greenwood N.N., A. Earnshaw. 1984. *Chemistry of the elements*. Oxford, Pergamon Press.
- Hansen, A., C. Corzo Juárez. 2011. *Evaluación de la contaminación en cuencas hidrológicas prioridades y necesidades*. En: Oswald Spring, U. *Retos de la investigación del agua en México*. UNAM, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. Cuernavaca. pp. 303-316.
- Hiriart Le Bert, G. 2011. *Evaluación de la energía geotérmica en México*. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, Comisión Reguladora de Energía. IDB, México.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015. Guía para la interpretación de cartografía. Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie V.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000, Serie V (Conjunto Nacional).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2005. Guía para la interpretación de cartografía geológica. 3-9.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1982a. Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales F1312. Escala 1:250,000. Serie I.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1982b. Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1303. Escala 1:250,000. Serie I.
- Ilgen, A. G., S. N. Rychagov, T. P. Trainor. 2011. Arsenic speciation and transport associated with the release of spent geothermal fluids in Mutnovsky field (Kamchatka, Russia). *Chemical Geology* 288. 115-32.
- Kharaka, Y.K., R.H. Mariner. 2005. Geothermal Systems. Chapter 16 in: Aggarwal, P. K., J. R. Gat and K. F. O. Froehlich. *Isotopes in the Water Cycle Past, Present and Future of a Developing Science*. Springer. 243-270.
- Layer, P.W., A. García-Palomo, D. Jones, J.L. Arce, J.C. Mora. 2009. El Chichón volcanic complex, Chiapas, México: Stages of evolution base don field mapping and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. *Geofís. Int.* 48, 33-54.
- López-Hernández, A. 2009. Evolución Volcánica del Complejo Tulancingo-Acocolco y su Sistema Hidrotermal, Estados de Hidalgo y Puebla, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 170 pp.
- López-Hernández, A., G. García-Estrada, G. Aguirre-Díaz, E. González-Partida, H. Palma-Guzmán, J.L. Quijano-León. 2009. Hydrothermal activity in the Tulancingo–Acocolco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies. *Geothermics* 38, 279-293.
- López-Hernández, A. D. Castillo-Hernández. 1997. Exploratory drilling at Acocolco, Puebla, Mexico: a hydrothermal system with only nonthermal manifestations. *Geothermal Resources Council Transactions* 21, 429-433.
- López-Hernández, A., E.I. Martínez. 1996. Evaluación volcánológica y estructural de la zona geotérmica de Acocolco, Puebla, y su relación con la anomalía termal detectada en el pozo EAC-1. CFE-GPG reporte interno OGL-AC-11/96, 38 p
- Lund, J. W. 2007. Characteristics, development and utilization of geothermal resources. Oregon Institute of Technology. GHC bulletin, June 2007. 9 pp.
- Macías, J.L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas selectos de la Geología Mexicana. LVII (3). 379-424.
- Macías, J. L., J. L. Arce, J. C. Mora, J. M. Espíndola, R. Saucedo, P. Manetti. 2003. A 550-year-old Plinian eruption at El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico: explosive volcanism linked to reheating of the magma reservoir. *J. Geophys. Res.* 108 (B12), 2569-2581

- McGee, J.J., R. I. Tilling, W. A. Duffield, W.A. 1987. Petrologic characteristics of the 1982 and pre-1982 eruptive products of El Chichón volcano, Chiapas, México. *Geofísica Internacional*, 26, 85-108.
- McGuire, K. J. McDonnell. 2008. Stable isotope tracers in watershed hydrology. Ca In: Michener, R. K. Lajtha. (Eds.), *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. (2<sup>nd</sup> ed.). Blackwell Publishing, Australia. 334-374.
- Meays, C., K. Broersma, R. Nordin, A. Mazumder, M. Samadpour. 2006. Spatial and annual variability in concentrations and sources of *Escherichia coli* in multiple watersheds. *Environ Sci Technol.* , 42 (40), 5289-96.
- Mercado, S., V.M. Arellano, R. M. Barragán Reyes. 2008. Medio ambiente, geotermia y toma de conciencia. *Revista Ciencia y Desarrollo*, 34 (223), 8-13.
- Miettinen, I. T., T. Vartiainen and P. J. Martikainen. 1997. Phosphorus and Bacterial Growth in Drinking Water. *Applied and Environmental Microbiology*, 63 (8). 3242-3245.
- Molina-Berbeyer, R. 1974. Informe preliminar geoquímico de los flujos geotérmicos del volcán del Chichonal, Chiapas. Comisión Federal de Electricidad, Morelia, Mich. México. Reporte interno 27-73, 24 pp.
- Montgomery, C. W. 2011. *Environmental Geology* (9<sup>th</sup> ed.). New York: McGraw Hill. 511 pp.
- Mook, W.G. 2002. *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico Principios y Aplicaciones*. IGME. Madrid. 558 pp.
- Nixon, G.T. 1982. The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere. *Geological Society of America Bulletin* 93, 514–523
- Novotony, V. 2003. *Water Quality. Diffuse Pollution and Watershed Management*. (2<sup>nd</sup> ed.). John Wiley and Sons, Inc. Northeastern University. Boston, USA. 864 pp.
- OMS. 2006. *Guías para la calidad del agua potable*. I (3). Suiza.
- Pardo, M., G. Suárez. 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research* 100, 12,357–12,373.
- Peiffer, L. 2011. *Caracterización Geoquímica y Potencial Geotérmico de los Acuíferos del Volcán El Chichón, Chiapas, México*. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 182 pp.
- Peiffer, L., R. Bernard-Romero, A. Mazot, Y.A. Taran, M. Guevara, E. Santoyo. 2014. Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>S) at a promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Acoculco caldera, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 122-137
- Rosas E., J. y J. Fucugauchi. 1992. Magnetoestratigrafía volcánica de la zona geotérmica Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, México: Resultados preliminares. *Geofísica Internacional*, 31(4), 431-442

- Rose, W.I., T. J. Bornhorst, S. P. Halsor, W. A. Capaul, P. S. Plumley, R. S. De-la Cruz, M. Mena, R. Mota. 1984. Volcán El Chichón, México: pre-1982 S-rich eruptive activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23, 147-167
- Schumm S.A. 1956: Evolution of drainage systems and slopes in badlans at Perth-Amboy. New Jersey. *Geo}. Soc. Am. Bull.*, 597-646.
- Sathasivan, A., S. Ohgaki, K. Yamamoto, N. Kamiko. 1997. Role of inorganic phosphorus in controlling regrowth in water distribution system. *Water Science and Technology*, .35 (8). 37-44.
- Snoeyink, V. L., D. Jenkins. 2010. *Química del Agua*.(8a Reimpresión). Limusa. México. 508 pp.
- Taran, Y. A., L. Peiffer. 2009. Hydrology, hydrochemistry and geothermal potential of El Chichón volcano-hydrothermal system, Mexico. *Geothermics*. 38. 370-378.
- Taran, Y., D. Rouwet, S. Inguaggiato, A. Aiuppa. 2008. Major and trace element geochemistry of neutral an acidic thermal springs at El Chichón volcano, Mexico. Implications for monitoring of the volcanic activity. *J Volcanol. Geotherm*
- Taran, Y., T.P. Fischer, B. Pokrovsky, Y. Sano, M.A. Armienta, J.L. Macías. 1998. Geochemistry of the volcano-hydrothermal system of El Chichón Volcano, Chiapas, México. *Bulletin of Volcanology*, 59, 436-449
- Tarbutck, E. J., F.K. Lutgens. 2005. *Ciencias de la Tierra, Una introducción a la geología física* (8 ed.) Pearson Educación. Madrid. 736 pp.
- Tassi, F., O. Vaselli, B. Capaccioni, J. L. Macías., A. Nencetti, G. Montegrossi, G. Magro, A. Buccianti. 2003. Chemical composition of fumarolic gases and spring discharges from El Chichon volcano, México: causes and implications of the changes detected over the period 1998-2000: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2), 105-121.
- Tello-Hinojosa, E., 1994. *Química de los fluidos hidrotermales de la zona geotérmica de la caldera de Acoculco, Pue. CFE, informe interno No. GQ-013/1994, Octubre/1994. Inédito*
- Templos, L.A., F. Munguía Bracamontes, V. M. Barrera. 1981. Observaciones geoquímicas en la zona geotérmica del Chichonal, Chiapas, México. Comisión Federal de Electricidad, Morelia, Mich., Mexico. Reporte interno. 33-81. 32 pp.
- Uchida, T., J. J. McDonnell, Y. Asano. 2004. Functional intercomparison of hillslopes and small catchments constrained by water source, flowpath and mean residence time. *J. Hydrol.*
- Vitvar, T., P.K. Aggarwal, J.J. McDonnell. 2005. A Review of Isotope Applications in Catchment Hydrology. Chapter 12 in: Aggarwal, P. K., J. R. Gat and K. F. O. Froehlich. *Isotopes in the Water Cycle Past, Present and Future of a Developing Science*. Springer. 151 - 170.
- Volke-Sepúlveda, T., J. Velasco Trejo, D. de la Rosa Pérez. 2005. *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. México, D.F., México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología
- Watson, D. F., G. M. Philip. 1985. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing* 2:315–327.

- White, D. E. 1974. Diverse Origins of Hydrothermal Ore Fluids. *Economic Geology*. 69(1974), 954-973.
- World Health Organization (WHO). 2011. Nitrate and nitrite in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva. (WHO/SDE/WSH/07.01/16/Rev/1).
- World Health Organization (WHO). 2004. Sulfate in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva. (WHO/SDE/WSH/03.04/114).
- World Health Organization (WHO). 2003a. pH in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva. (WHO/SDE/WSH/03.04/12).
- World Health Organization (WHO). 2003b. Chloride in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva. (WHO/SDE/WSH/03.04/03).