



Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

“Análisis de parámetros hidrogeoquímico del Manantial El Castillo, Xalapa durante el período 2010-2012”

Que para obtener el diploma de:

ESPECIALISTA EN DIAGNÓSTICO Y GESTIÓN AMBIENTAL

Presenta:

Bonilla Portilla Fabiola Alejandra

Xalapa, Ver., 4 de julio de 2013



Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

“Análisis de parámetros hidrogeoquímico del Manantial El Castillo, Xalapa durante el período 2010-2012”

Que para obtener el diploma de:

ESPECIALISTA EN

DIAGNÓSTICO Y GESTIÓN AMBIENTAL

P r e s e n t a:

Bonilla Portilla Fabiola Alejandra

Nombre del director

M. en C. Bertha Ma. Rocío Hernández Suárez

Nombre del codirector

M. en C. Juan Pérez Quezadas

Xalapa, Ver., 4 de julio de 2013

RESUMEN

El estudio de los manantiales en los últimos años ha cobrado gran importancia debido a que son fuente de agua limpia y de fácil acceso. En Xalapa debido a su geología y topografía, existe un gran número de descargas subterráneas tipo manantial que fueron por años fuente de abasto de los ciudadanos de la región. Hoy en día, el Manantial el Castillo, el cual comprende las descargas de 4 manantiales que se encuentran a una distancia no mayor a los 500 metros entre ellos, es uno de los pocos manantiales que abastecen agua a la población de Xalapa y 8 comunidades más, de ahí su importancia de estudio.

Para el análisis de los parámetros hidrogeoquímicos del manantial EL Castillo, se concentro información de diversas fuentes acerca de los parámetros medidos en el manantial El Castillo. Se relacionaron dichos parámetros, así como la precipitación mensual acumulada de la Ciudad de Xalapa, mediante un análisis de correlación de Pearson y gráficos contra el tiempo de dichos parámetros. Se llevo a cabo un monitoreo semanal de la conductividad eléctrica del agua con la finalidad de conocer un poco más acerca del funcionamiento del manantial y determinar si existían variaciones con respecto al tiempo y época.

Se encontraron relaciones importantes entre el caudal y la precipitación mensual acumulada, así como una tendencia de aumento en general de los iones, sulfatos (SO_4^{-2}), cloruros (Cl^-) y nitratos (NO_3^-).

La presencia de coliformes fecales en el agua, indica la posible infiltración de aguas urbanas provenientes de la ciudad de Xalapa, según la microcuenca determinada. Por lo que deja entrever que se trata de un acuífero susceptible a la contaminación debido a su alta permeabilidad.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1 ANTECEDENTES.....	3
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
3 OBJETIVOS.....	8
4 JUSTIFICACIÓN.....	9
5 MARCO CONCEPTUAL.....	10
5.1 El ciclo hidrológico.....	10
5.2 Infiltración.....	11
5.3 Acuíferos.....	14
5.4 Manantiales.....	16
5.5 Composición química de las aguas naturales.....	19
5.6 Características fisicoquímicas del agua.....	23
6 ZONA DE ESTUDIO.....	26
6.1 Clima.....	26
6.2 Geología y relieve.....	28
6.3 Hidrología.....	30
6.4 Demografía.....	30
6.5 Suministro de agua en Xalapa	31
7 METODOLOGÍA.....	33
8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
8.1 Identificación de parámetros.....	38
8.2 Relación de parámetros hidrogeoquímicos	40
8.3 Monitoreo de conductividad.....	54
9 CONCLUSIONES.....	56
10 GLOSARIO.....	58
11 ANEXO 1.....	60
12 ANEXO 2.....	67
13 TRABAJOS CITADOS.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Principales constituyentes químicos presentes en el agua subterránea. Origen y características.....	21
Tabla 2	Características Geológicas de Xalapa.....	28
Tabla 3	Consumo de agua por habitante en base al clima y estilo de vida.....	31
Tabla 4	Fuentes de Abastecimiento de agua en la ciudad de Xalapa, Ver.....	32
Tabla 5	Localidades abastecidas por los Manantiales de El Castillo.....	32
Tabla 6	Ubicación de los manantiales de Xalapa. Claves con nombres y su localización Geográfica.....	38
Tabla 6	Matriz de correlación de Pearson de datos fisicoquímicos del manantial El Castillo.....	41

INTRODUCCIÓN

Según el segundo informe sobre los recursos hídricos en el mundo: “El Agua una responsabilidad compartida”, realizado por la Organización de las Naciones Unidas, ONU, se destaca que la falta de acceso al agua potable no solo es un problema de salud pública, sino de seguridad para la población, en tanto que la falta de este líquido impide y dificulta el desarrollo de la sociedad e incluso, puede llegar a poner en peligro la vida misma de la población (ONU, 2007).

Para poder satisfacer las necesidades hídricas, el ser humano consume agua de diferentes fuentes como son ríos, lagos, lagunas, manantiales, pozos, presas, incluso llega a desalar al agua de mar en lugares donde las fuentes hídricas no son suficientes. El agua natural contiene sustancias disueltas y no disueltas, partículas y organismos vivos que son componentes necesarios del agua de buena calidad, permitiendo y ayudando al mantenimiento de ciclos biogeoquímicos vitales (UN WATER, 2013). Las aguas tanto superficiales como subterráneas, se ven influenciadas en su calidad tanto por los procesos naturales como por las actividades humanas.

El estudio de los manantiales es un tema que ha tomado relevancia en los últimos años. Éstos han sido social, cultural y económicamente importantes en la historia de la humanidad. Las principales ciudades de Grecia, Egipto, Mesopotamia, India y China se establecieron cerca de un manantial (Flores, 2009). En la actualidad forman parte de las principales fuentes de abastecimiento de agua en algunos lugares del mundo y en otros incluso llega a ser la única fuente de agua.

Xalapa, proviene del Nahuatl Xallapam, que significa “Manantial en la arena”, se le da ese nombre debido a que en los barrios originarios brotaba abundante agua entre los declives arenosos del suelo, esos brotes de agua son los que hoy conocemos como manantiales (Azcoitia, 1943; González de Cossio, 1957; Nelly, 2009).

En este trabajo se hará alusión a un sistema de descargas de agua subterránea localizados al oriente del municipio de Xalapa. Entre las fuentes hay una distancia no mayor a 500 metros entre ellas. A tal descarga le llamaremos manantial El Castillo, debido a que se localiza en la localidad El Castillo y a que desde el punto de vista

regional e hidrogeológico, se considera como una zona de descarga. El Manantial El Castillo, es uno de los pocos manantiales que aún se utilizan para suministrar agua potable a la población de Xalapa y 8 comunidades aledañas a esta fuente de agua.

Se analizará algunos parámetros fisicoquímicos del agua, buscando relaciones entre ellos, considerando al manantial como un sistema de carga y descarga de agua en donde al atravesar por las rocas que forman y conducen el agua a través del acuífero, adquieren ciertas características y sustancias disueltas que le darán la calidad para ser usada como abasto de agua para consumo humano.

1. ANTECEDENTES

El estudio de los manantiales, ha tomado gran interés en las zonas altas del estado de Veracruz en los últimos años. Esto debido, en parte, al acceso inmediato y barato que implica el agua de manantial para el consumo humano. En la región de Xalapa se encontraron diversos estudios relacionados con manantiales, en los cuales se realizan mediciones fisicoquímicos y biológicos con la finalidad de emitir un diagnóstico sobre la calidad del agua para consumo humano, a través de la comparación de los resultados con la NOM-127-SSA-1994, la cual contiene los límites máximos permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano. Cada uno se realizó en diferentes años, entre estos trabajos se destacan los siguientes:

Clemente y Paredes (1997), en la tesis *Calidad de agua en los manantiales de la ciudad de Xalapa*, estudiaron algunos parámetros fisicoquímicos y biológicos de los manantiales: Techacapan, Tecajetes, Parque Juárez, Xallitic y Murillo Vidal. En dicho estudio se realizó una campana de muestreo para cada estación del año, en donde se analizaron los parámetros de pH, temperatura, olor, sabor, conductividad, sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST) y disueltos totales disueltos (STD), oxígeno disuelto (OD), coliformes totales y fecales, DBO₅, alcalinidad, dureza, calcio (Ca⁺²), magnesio (Mg⁺²), sodio(Na⁺), potasio(K⁺), bicarbonatos(CO₃H⁻), cloruros(Cl⁻), sulfatos (SO₄⁻²) y nitratos(NO₃⁻). Los resultados obtenidos indicaron contaminación biológica en la mayoría de los puntos muestreados.

Hernández *et al.* (2006), en la tesis titulada *Diagnóstico de la Microcuenca del Manantial de "Las Animas" en Xalapa, Veracruz, México.*, evaluaron la calidad del agua del manantial ubicado en la zona residencial Las Ánimas mediante análisis de calidad de agua (OD, pH, amonio, temperatura potencial Redox, nitritos (NO₂⁻), fósforo y coliformes fecales y totales). Concluyeron que el agua del manantial, tiene buena calidad para ser usada como fuente alterna de abasto de agua potable antes de integrarse a los lagos de las Ánimas, en donde pierde su calidad debido a descargas de aguas residuales.

En la tesis *Análisis de los manantiales de Xalapa para su posible uso público urbano*, efectuado por Contreras *et al.* (2007), se llevó a cabo un estudio de localización y análisis fisicoquímicos y biológicos de los manantiales: Tecajetes, Murillo Vidal, Tecuanapa, Xallitic, El Chorro, Techacapan, Casa Blanca, Parque Juárez e Independencia. Se realizó una campaña de muestreo en estos aprovechamientos, analizando la cantidad de coliformes totales y fecales, pH, SD, dureza, color, olor, sabor y turbiedad. Los resultados indican que los manantiales El Chorro y Techacapan, se encuentran afectados por contaminación biológica, sobrepasando los límites máximos permisibles de bacterias coliformes totales y fecales de acuerdo a la NOM-127-SSA-1994.

González (2009), en su tesis: *Descripción espacial de los manantiales con mayor descarga en los municipios de Coatepec, Xalapa y Xico, Ver. México.*, realizó mapas cartográficos de la región de Xalapa en donde ubicó los manantiales, su microcuenca y sus zonas de recarga. La herramienta que utilizó fue el programa de manejo de información geográfica ARCGIS 9.3.

En la tesis realizada por Salas (2010), *Estudio geológico e hidrogeoquímico de un sistema de Manantiales en la región de Xalapa, Veracruz*, se aportaron bases para entender el funcionamiento generalizado del sistema hidrodinámico de los manantiales en la región de Xalapa, utilizando herramientas hidrogeoquímicas y geológicas. Llevo a cabo un muestreo para conocer las características físicas y química del agua de los manantiales. Midió iones mayores y menores (temperatura, conductividad pH, Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2} , NO_3^- , STD). El resultado correspondiente al manantial El Castillo, indicó que el agua es de tipo bicarbonatada cálcica con una tendencia a clorurada sódica. En los análisis realizados, se observa una concentración elevada de Cl^- y NO_3^- en comparación con los otros manantiales pertenecientes al grupo de agua bicarbonatada cálcica. De acuerdo al análisis hidrogeoquímico del agua y a las características geológicas de la zona, Salas, asocia al manantial El Castillo con un flujo local de reciente infiltración, resaltando la mayor vulnerabilidad del agua a contaminarse.

En el 2012 en el 5° simposio internacional sobre recursos naturales celebrado en Campeche, Pérez Quezadas *et al* (2012), presentaron un estudio titulado: *Características hidrogeoquímicas de los manantiales cercanos a Xalapa Veracruz y su relación con el agua meteórica local*. En él se presentan características hidrogeoquímicas de algunos manantiales que afloran en la ciudad de Xalapa, incluyendo el De El Castillo, así como valores isotópicos medidos en el agua meteórica y de dichos manantiales. Los resultados muestran que en el Manantial El Castillo, la firma isotópica y las características químicas, corresponde a dos componentes meteóricas, cada una con diferente altitud, por lo que hablan de un flujo local y regional.

Los anteriores trabajos locales consultados, ponen en evidencia la necesidad de profundizar en el conocimiento del comportamiento de la calidad y cantidad de agua que se descarga a través de los manantiales, y que se utilizan para consumo humano. De esta manera, en la Universidad Veracruzana, UV, específicamente en la Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas (FIECA), se lleva a cabo un Proyecto de Colaboración Técnica, con el Organismo Internacional de Energía Atómica, (OIEA), el cual lleva por nombre: “Caracterización de las fuentes de abastecimiento en la parte central del estado de Veracruz”. Dentro de sus objetivos se contempla: conocer el estado actual de las principales fuentes de suministro de agua a la población de Xalapa y sus alrededores inmediatos, a través del registro de características hidrogeoquímicas e isotópicas principalmente. De esta manera, los objetivos del presente trabajo se vinculan de forma importante al proyecto.

Es importante mencionar que, el objetivo de estos proyectos sería muy difícil o prácticamente inalcanzable a corto plazo sin, la colaboración de la Comisión Municipal de Agua y Saneamiento de Xalapa (CMAS), a la cual agradecemos las facilidades que nos proporciona para la obtención de datos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En Xalapa y la región, la problemática del agua comienza a ser evidente, sobre todo en época de secas, las fuentes de abastecimiento superficiales bajan considerablemente su nivel aportando menos caudal de agua para su aprovechamiento. El posible deterioro de la calidad del agua utilizada para consumo humano, se suma a la problemática. Esta situación, plantea la necesidad de conocer el funcionamiento hidrológico de los aprovechamientos del recurso hídrico.

La mayor parte de la información disponible sobre la calidad de agua para consumo humano de los manantiales de Xalapa, son datos que se basan en un muestreo que determinan la calidad del agua en ese momento, sin embargo, es necesario conocer y entender las características y factores que le dan su origen, calidad y cantidad a estas fuentes, principalmente en épocas de escasez.

Las rocas aflorantes y su uso en la superficie, puede aumentar o disminuir la cantidad de infiltración que de forma natural, mediante la precipitación, permite recargar agua en determinadas áreas hacia el subsuelo (agua subterránea), estas rocas también permiten la circulación del agua hacia zonas de descarga natural como lo es un manantial.

La zona urbana de Xalapa, ampliamente tapizada de concreto, se encuentra asentada sobre lavas emitidas, 40,000 años atrás aproximadamente, por el volcán Macuiltépetl. Se presume que estas rocas poseen una alta permeabilidad, la cual permite suponer que juegan un papel importante en la descarga de agua a través del manantial el Castillo, debido a que se encuentran sobreyaciendo a unas de menor permeabilidad.

Las fugas del drenaje así como de conductos de agua potable, la presencia de fosas sépticas, ríos con agua gris, desechos industriales etc., interaccionando con este tipo de rocas, plantean una antropización importante sobre el sistema hidrogeológico que pudiera impactar la calidad del manantial El Castillo.

El deterioro ambiental del manantial El Castillo causado por la antropización puede llegar a ser un problema crítico para la población beneficiada por esta fuente, los

problemas de salud como las enfermedades gastrointestinales, que se originan por el agua contaminada pueden aumentar en gran medida con el tiempo, adicionalmente se tiene un crecimiento de la población, la cual demanda mayor cantidad de agua para su consumo y beneficio , este crecimiento no contempla que el recurso hídrico tiene un límite finito de abasto. Esta problemática podría llegar a desencadenar una situación de estrés hídrico y de salud importante para la población de la región de Xalapa.

3. OBJETIVOS

Objetivo General

- Analizar el comportamiento hidrológico del manantial “El Castillo” a través del registro de parámetros hidrogeoquímicos, caudales y presencia de lluvia; durante el período de enero 2010-diciembre 2012.

Objetivos Particulares

- Identificar los datos hidrogeoquímicos y de calidad de agua para conformar un historial de análisis del manantial “El Castillo”.
- Relacionar los parámetros fisicoquímicos con la precipitación ocurrida en la ciudad de Xalapa durante el período enero 2010-diciembre 2012.
- Registrar semanalmente la conductividad eléctrica durante la época de sequía durante el período de enero-junio 2013.

4. JUSTIFICACIÓN

En México los manantiales han jugado un importante papel en el desarrollo de comunidades enteras como proveedores de agua natural para el uso y consumo humano; tan solo en la región de Valle de Bravo, 75 comunidades son abastecidas de agua por 103 manantiales (SEMARNAT *et al.*, 2005). Esta situación también se presenta en algunas poblaciones del estado de Veracruz, en donde los manantiales son la fuente de abastecimiento de agua. El manantial El Castillo es la única fuente de agua que abastece a 8 comunidades y aporta 3.4% del agua que se consume en la Capital Veracruzana.

Para los lugares en donde la única fuente de abastecimiento de agua son los manantiales, el cuidado del recurso tanto en calidad como en cantidad se vuelve una prioridad. La correcta caracterización espacial y temporal de parámetros de calidad y cantidad de un determinado manantial, tiene gran relevancia debido a que con ellas es posible tomar decisiones de manejo, distribución y prevenir la contaminación que pudiera afectar directamente a las comunidades dependientes de este.

En un estudio detallado de manantiales, es importante conocer la variación que presenta la composición natural del agua a través del tiempo (monitoreo) y su relación con las condiciones meteorológicas, para así comprender los potenciales efectos que ciertas actividades y acciones pueden o están ejerciendo sobre ella. El análisis de los muestreos permitirá conocer la composición del agua en etapas distintas y conocer su posible evolución en cuanto a niveles de contaminantes eventuales.

El presente trabajo aborda parte de la problemática hidrogeoquímica asociada con el manantial El Castillo, debido a la importancia que tiene para las 8 comunidades que se abastecen de él y su aportación para abastecer a la ciudad de Xalapa. Se busca analizar la relación de los parámetros hidrogeoquímicos del manantial con los cambios estacionales mediante la lluvia durante el período de enero 2010-diciembre 2012 y las relaciones entre los mismos parámetros.

5. MARCO CONCEPTUAL

El agua es uno de los recursos naturales más importantes con los que cuenta el hombre para su supervivencia. Es un elemento indispensable tanto para su desarrollo biológico como para su progreso y es un indicador indirecto del desarrollo de ciudades; está presente en la historia de la humanidad como común denominador de todos los lugares en donde se asentaron las grandes civilizaciones.

El aumento de su demanda por parte de las crecientes poblaciones, ha hecho necesaria la exploración y la búsqueda de nuevas fuentes de agua más allá de la superficial, por lo que la alternativa del agua subterránea se ha desarrollado en los últimos años. Esta situación dio origen a la hidrogeoquímica, ciencia encargada del estudio exclusivo del agua subterránea, sus orígenes, su evolución química, sus características, su comportamiento, su explotación y su conservación.

5.1. El ciclo hidrológico.

El ciclo del agua, también conocido como ciclo hidrológico describe el movimiento continuo y cíclico del agua por arriba, sobre y dentro de la superficie terrestre. Durante este ciclo, el agua cambia su estado entre líquido, vapor y hielo; y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años.

Como se observa en la Figura 1, el mar es un iniciador importante del ciclo, en donde el sol calienta al agua y por medio de la evaporación y las corrientes de aire, el vapor de agua asciende a la atmósfera; la menor temperatura causa que el vapor condense y forme nubes. Las nubes al crecer y saturarse de agua generan la precipitación, parte de esta precipitación cae en forma de nieve, acumulando capas de hielo y glaciares, los cuales pueden acumular agua congelada por millones de años.

Otra parte de la precipitación corre sobre la superficie como escorrentía superficial en donde llega a formar ríos, lagos y lagunas o bien, es absorbida por el suelo mediante la infiltración. Parte del agua infiltrada permanece en las partes superiores del suelo a poca profundidad y es tomada por las raíces de las plantas y transpirada a través de la superficie de las hojas regresando a la atmósfera, a este fenómeno se le conoce como

evapotranspiración. El resto del agua sigue su curso a través de suelos y rocas alcanzando las capas más profundas formando y recargando los acuíferos (roca subsuperficial saturada), los cuales almacenan grandes cantidades de agua dulce por largos períodos de tiempo. Otra parte del agua subterránea se encuentra en aberturas en la superficie terrestre y emerge como manantiales de agua dulce o descargas que alimentan ríos y océanos (USGS, 2013).



Figura 1. El Ciclo Hidrológico y su relación con la hidrogeología.

5.2. Infiltración

El concepto de infiltración fue introducido por primera vez por Horton, quien definió la capacidad máxima de infiltración como el índice de máxima absorción de agua, procedente de una precipitación dada por parte de un tipo de suelo en ciertas condiciones. Hoy en día, se entiende a la infiltración como el proceso mediante el cual

el agua que llega al suelo por la precipitación, comienza a atravesar la superficie de la tierra por zonas no saturadas en donde se manifiestan un sinnúmero de procesos químicos y biológicos que le darán ciertas características fisicoquímicas (Davis y De Wiest, 1971; Millares Valenzuela, 2006).

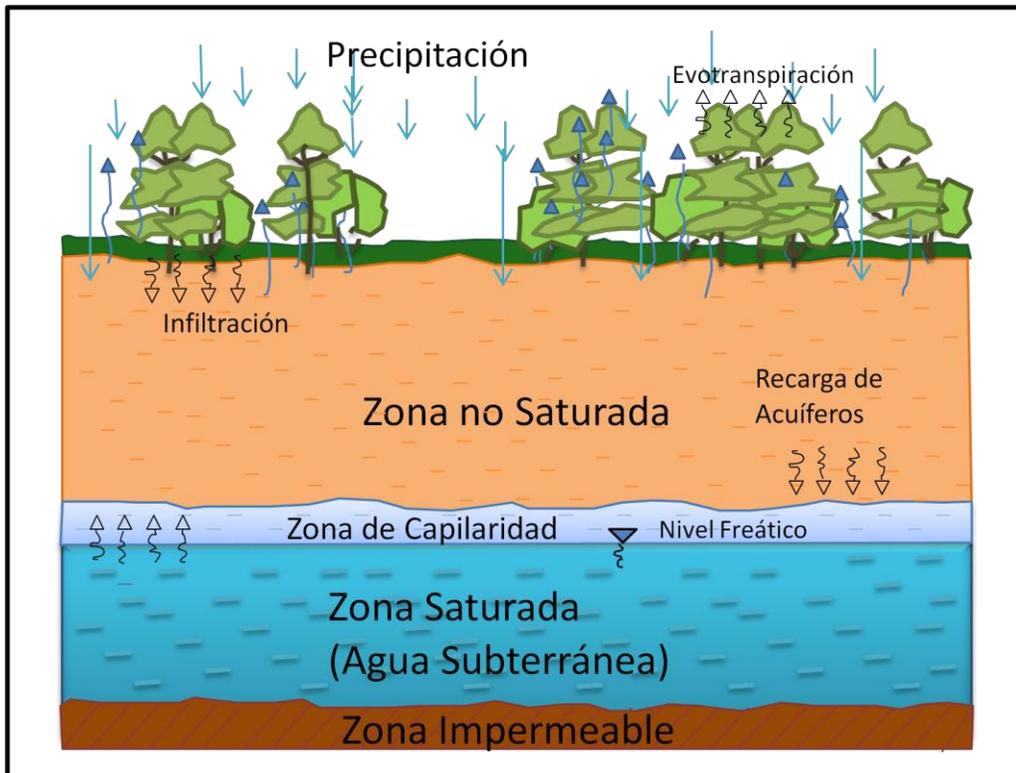


Figura 2. Zonas principales por donde atraviesa el agua en el proceso de infiltración hasta llegar a la zona saturada.

En la Figura 2 se observa como el agua que llega al suelo comienza a penetrar en la zona no saturada, si el agua infiltrada no es absorbida por las plantas continuara su curso hacia zonas más profundas hasta alcanzar la zona saturada en la que todos los poros de la roca se encuentran llenos de agua. El límite que separa estas dos zonas se le denomina nivel freático para acuíferos libres o nivel piezométrico para acuíferos confinados. Inmediatamente por arriba del nivel freático, el efecto de capilaridad origina una franja de terreno saturado, zona capilar, en donde la presión es menor a la atmosférica (Price, 2003; Martínez *et al.*, 2006).

La infiltración es de gran importancia, pues el agua que logra acumularse en el subsuelo forma y recarga los acuíferos. Se calcula que el 0.68% del total del agua del

planeta se encuentra como agua subterránea, suponiendo un volumen total de 9.5 millones de km³, mientras que el agua superficial representa cerca del 0.01% del total del recurso hídrico (FCIHS, 2009).

La calidad del agua subterránea puede verse afectada por las actividades que se desarrollan en la superficie y aunque los acuíferos mantienen una baja susceptibilidad a la contaminación, cuando esta llega a ocurrir, el problema puede llegar a convertirse en desastre al elevar los costos de descontaminación o incluso quedar imposibilitado para su uso. Esta dificultad se debe a que el grado de renovación del agua subterránea es lento, se calcula que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace más difícil su purificación, (Price, 2003; López-Geta *et al.*, 2009).

La contaminación del agua es la alteración de las propiedades físicas, químicas y/o biológicas del líquido por la acción de procesos naturales o artificiales que producen resultados indeseables en el agua tanto superficial como subterránea. Se debe principalmente a las actividades antrópicas en donde se generan sustancias solubles en agua que pueden ser transportadas al subsuelo hasta llegar al manto freático y contaminar el agua que se encuentra en el acuífero. Las actividades humanas que producen contaminación se clasifican en: urbanas, industriales, agrícolas y ganaderas cada una de estas actividades genera contaminación en diferente forma y cantidad, pudiendo ser puntual o difusa según la fuente que la genera, Figura 3 (Price, 2003; Martínez *et al.*, 2006).

Cuando ocurre algún cambio en la presión en un punto del acuífero, este cambio afectará la presión y el nivel de otro punto, esto debido al contacto hidráulico que tienen. Por ejemplo, la infiltración de una fuerte lluvia localizada colinas arriba puede afectar el nivel freático en un punto alejado de la infiltración. Este contacto hidráulico permite hacer más susceptible al agua subterránea de contaminarse en cantidades mayores cuando las sustancias contaminantes han llagado al manto freático (Manahan, 2007).



Figura 3. Fuentes principales de contaminación de aguas subterráneas y superficiales

Es importante resaltar la importancia que tiene el conocer la dinámica y componente de cada sistema subterráneo, por ejemplo, conocer el nivel freático es trascendental para explicar y predecir el flujo de pozos y manantiales, así como los niveles de arroyo y lagos. Pero también es importante para la determinación de la dirección y extensión en que los contaminantes y productos químicos peligrosos del subsuelo puede ser transportado por el agua. Del mismo modo, conocer el flujo de las aguas subterráneas permitirá determinar la accesibilidad del agua para el uso y el transporte de contaminantes desde los sitios subterráneos de disposición controlada de residuos (Price, 2003; López-Geta *et al.*, 2009).

5.3. Los Acuíferos

La palabra acuífero proviene del latín *aqua*= agua y *fero*=llevar y hace referencia a la unidad geológica capaz de trasportar o almacenar agua. Se puede definir como toda formación geológica que almacena y permite la circulación de agua en el suelo a través de sus poros y/o grietas en cantidades suficientes para permitir su desarrollo económico (Millares, 2006).

Los acuíferos pueden ser ordenados en función de diferentes criterios; sin embargo la clasificación más práctica es aquella que se hace en base al grado de confinamiento del

agua. Destacando de esta manera las formaciones geológicas que no llegan a ser acuíferos como son los acuitardos, los acuicludos y los acuífugos los cuales se diferencian por transmitir en menor o mayor cantidad el agua (Martínez *et al.*, 2006; López-Geta *et al.*, 2009).

La clasificación más representativa de los acuíferos se realiza en base a la presión hidrostática que guardan, catalogándose en acuíferos libres, acuíferos confinados, acuíferos semiconfinados, y acuíferos colgados, la Figura 4 esquematiza los diferentes acuíferos de acuerdo al grado de confinamiento.

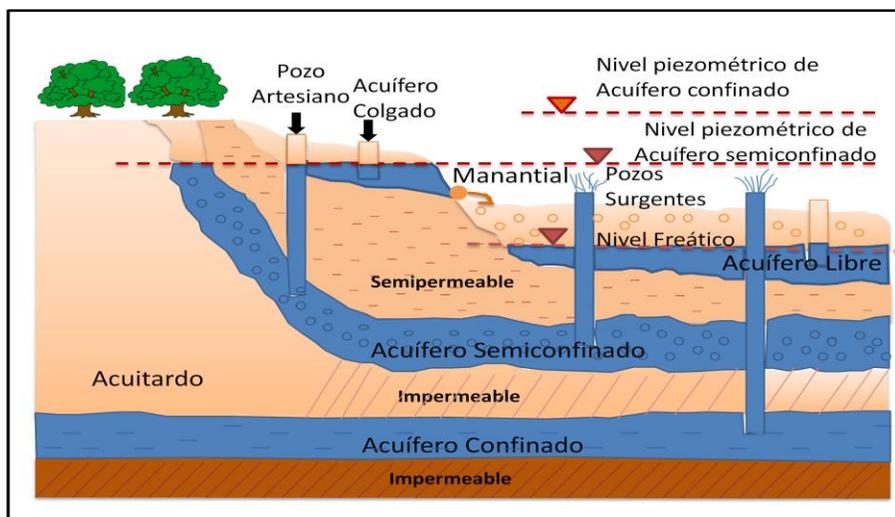


Figura 4 . Tipos de unidades acuíferas según su disposición.

Los acuíferos libres son aquellos acuíferos de formación permeable saturada, formados por un estrato superior permeable que descansa sobre otro impermeable, en donde el límite de la zona saturada coincide con la interfaz de la zona no saturada, a este límite se le conoce como nivel freático y se encuentra a presión atmosférica, por lo que al perforar un pozo en un acuífero de este tipo, el agua alcanzará el nivel del propio acuífero (FCIHS, 2009; López-Geta *et al.*, 2009).

El acuífero confinado es de una formación geológica completamente saturada de agua que se encuentra confinada entre dos estratos impermeables y cuya presión hidrostática es superior a la atmosférica, de manera que al perforar un pozo, el agua asciende por él hasta cierta altura llamada nivel piezométrico. Si este nivel quedara por

encima de la cota del terreno se habla de pozos surgentes, mientras que si queda por debajo, se habla de pozo artesiano. Estos acuíferos también son conocidos como acuíferos cautivos o a presión (FCIHS, 2009; López- Geta *et al.*,2009).

La recarga de estos tipos de acuíferos procede principalmente de la lluvia que infiltra directamente a través de zonas en la que aflora la formación acuífera (López-Geta *et al.*, 2009; Mateos y González (Coord), 2009).

Los acuíferos semiconfinados se encuentran a una presión mayor a la atmosférica, descansan en una capa impermeable sin embargo están limitados en la parte superior por una capa de tipo semipermeable (acuitardo), permitiendo alguna filtración que contribuye en cierta proporción al caudal que se extrae del acuífero (Price, 2003).

Por último, se tienen los acuíferos colgados, los cuales se producen cuando existe una capa de material impermeable por encima de un nivel freático de manera que se produce una “bolsa de agua” de extensión limitada. Este tipo de acuíferos se dan con mucha frecuencia aunque, por lo general, cuentan con pocos recursos hídricos (Prince, 2003.)

5.4. Manantiales

Pocas manifestaciones de agua subterránea han atraído más el interés popular que los manantiales, los manantiales de las regiones áridas fueron en gran parte los responsables de instalación de poblados antiguos, incluso la tradición religiosa está llena de referencias de manantiales (Davis y De Wiest, 1971; Price,2003).

Se entiende por manantial como el punto o zona del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua procedente de un acuífero o embalse subterráneo debido al cambio de permeabilidad. Custodio y Llamas(2001) y Davis y De Wiest (1971), hacen referencia a la definición de manantial considerando la descarga lo suficientemente grande como para constituir un pequeño riachuelo y nombrando como zona de manantío o zona de rezumo a la descarga de orden menor.

En el sentido estricto de la palabra, un manantial es la manifestación del agua subterránea que aflora a la superficie debido al cambio de permeabilidad del medio que

lo contiene, Figura 5. Según el interés que se tenga en el manantial, se han generado una serie de clasificaciones basados en diferentes aspectos como es: el material geológico del acuífero, o las relaciones litología-estructura-terreno, la cuantía y régimen del caudal, o las características químicas o de temperatura de sus aguas o a su origen (Maderey,1967; Custodio y Llamas,2001; Mook, 2001).

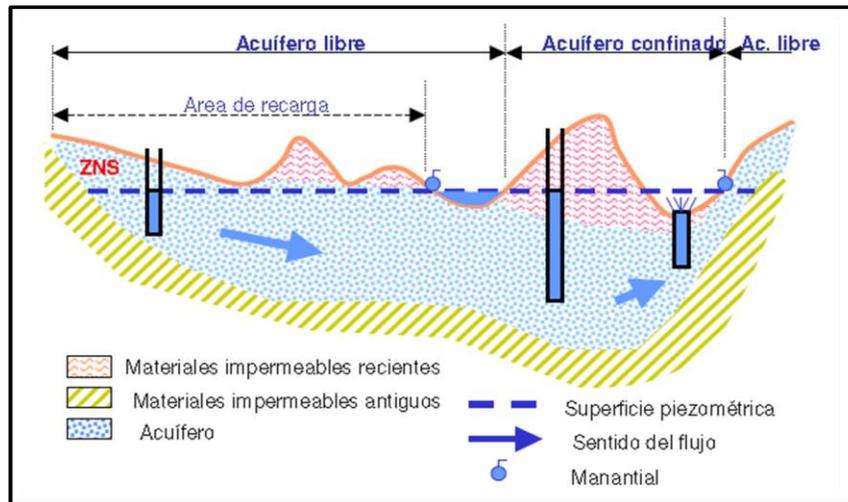


Figura 5. Descarga de un acuífero en forma de manantial de acuerdo al cambio de permeabilidad de la roca.

El funcionamiento de un manantial resulta muy claro si se tiene en cuenta que se trata del resultado o desagüe de un medio poroso o embalse subterráneo (acuífero) que resulta de una recarga de agua o infiltración, en base a estas consideraciones se tiene la siguiente clasificación hidrogeológica (FCIHS,2009):

- a) Manantial Drenante (de afloramiento- desagüe). Se trata de los manantiales que drenan un acuífero colgado, esto es cuando existe una capa de material impermeable por encima de un nivel freático de manera que se produce una “bolsa de agua” de extensión limitada. Actúan a modo de desagüe de fondo. Estos manantiales también son conocidos como descendentes (FCIHS, 2009; Mook, 2001).

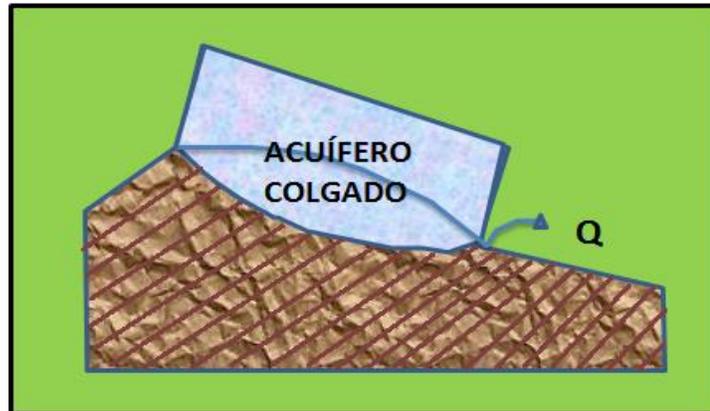


Figura 6 Esquema de un manantial Drenante.

- b) Emergentes. Son los manantiales que drenan un acuífero cuyo máximo espesor saturado está por debajo de la cota de emergencia, Figura 7. Se originan en los puntos en que la superficie piezométrico de una capa de agua subterránea encuentra la superficie topográfica. Actúan a modo de aliviadero. A diferencia de los drenantes, en este caso si el manantial dejara de aportar agua, se podría seguir explotando el acuífero (por debajo del nivel de emergencia) mediante pozos. Estos manantiales también son conocidos como ascendentes (Gomelia y Guerrée, 1982; Mook, 2001; FCIHS, 2009).

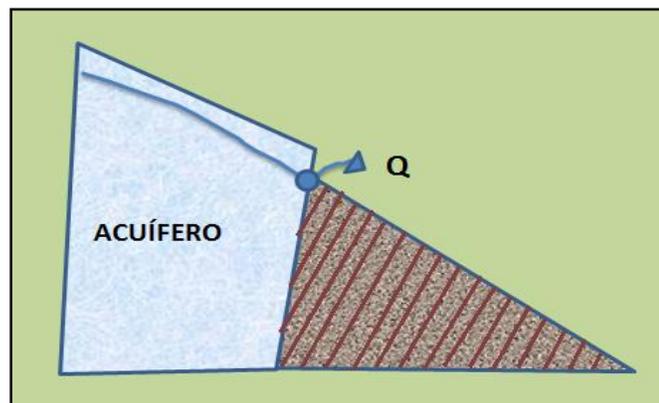


Figura 7. Esquema de surgimiento de un manantial Emergente.

- c) Filonianos o Diaclasianos (aguas termales- minerales), De circuito profundo, en general se encuentran en rocas ígneas o metamórficas, se trata de aguas más profundas que emergen aprovechando la figuración de este tipo de rocas, Figura 8, (FCIHS, 2009).

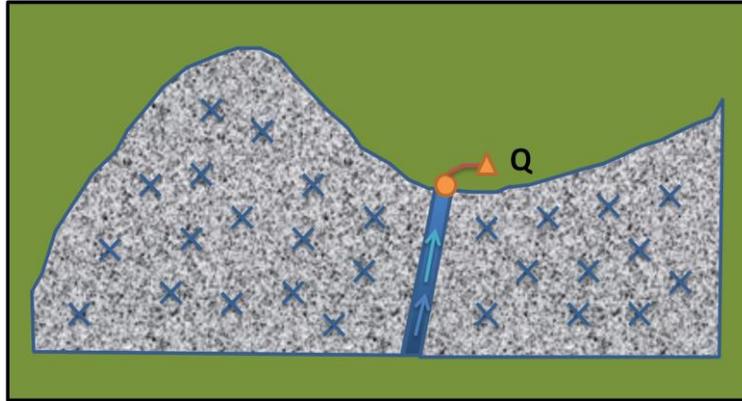


Figura 8. Esquema de surgimiento de un manantial Filoniano o Diaclasiano.

5.5. Composición química de las aguas naturales

Se entiende por agua natural un sistema de cierta complejidad, no homogéneo, que puede estar constituido por una fase acuosa, una gaseosa y una o más fases sólidas, las cuales se encuentran interactuando entre sí mediante equilibrios químicos regidos por leyes termodinámicas y en cuya composición química intervienen además otros factores químico-físicos, geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, pedológicos, microbiológicos, climáticos y ambientales (Fagundo y Beato Mesa, 2013).

En el agua subterránea, las sustancias disueltas que la conforman se encuentran en estado iónico (Custodio y Llamas, 2001; Martínez *et al.*, 2006; López-Geta *et al.*, 2009). Estas sustancias presentes se encuentran en diferentes cantidades y son las responsables de darle características hidroquímicas al agua, por lo que basados en esta afirmación, se *clasifican en*:

- *Iones mayores*
- *Constituyentes secundarios*
- *Iones menores*
- *Elementos trazas*

a) ***Iones mayores***: estos iones se encuentran en un rango de concentración de 1 a 1000 ppm. Contemplan al ion Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{+2}) y Magnesio (Mg^{+2}) como **iones mayores**; Cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{-2}) y Bicarbonatos (CO_3H^-) como **aniones mayores**. Así como el Carbonato (CO_3^{-2}) y el Potasio (K^+) cuando se

encuentran en grandes cantidades de acuerdo a ciertas condiciones. En la Tabla 1 se habla con mayor detalle de estos iones (Davis y De Wiest, 1971).

- b) **Constituyentes secundarios:** Existen iones que no siempre se presentan en el agua subterránea. En esta clasificación se hallan de acuerdo a su concentración los iones de Hierro (Fe^{+3}), Estroncio (Sr^{+2}) y Potasio (K^{+}); y los aniones de Carbonatos (CO_3^{-2}), Nitratos (NO_3^{-}) y Fluoruros (F^{-}) quienes se llegan a encontrar en rangos de 0.01 a 10.00 ppm. En ocasiones el anión nitrato figura como ion mayor cuando las actividades antrópicas, afectan la calidad del agua infiltrada, Tabla 1(López-Geta *et al.*, 2009).
- c) **iones menores:** se encuentran en cantidades notablemente más pequeñas, *no* superan el 1% del contenido iónico total (concentraciones entre 0,0001 y 10 mg/L), se consideran los iones de Antimonio, Aluminio (Al^{+3}), Bario , Bromo (Br^{-}), Cadmio , Cromo, Cobalto, Cobre, Germanio, Yodo, Plomo, Litio , Manganeso (Mn^{+2}), Molibdeno, Níquel, Fosforo, Rubidio, Selenio, Titanio, Uranio, Vanadio, y Zinc (Custodio y Llamas, 2001; Martínez, 2006).
- d) **Constituyentes trazas:** están presentes en las aguas subterráneas en concentraciones inferiores a los 0.0001 ppm. Estos elementos son difícilmente medibles por medios químicos usuales. Entre estos elementos están: Berilio, Bismuto, Cesio, Cerio, Estaño, Galio, Oro, Indio, Lantánido, Niobio, Platino, Radio, Rutenio, Escandio, Plata, Talio, Torio, Tungsteno, Yterbio, Ytrio, Zirconio (Custodio y Llamas, 2001; Martínez, 2006).

Tabla 7 .Principales constituyentes químicos presentes en el agua subterránea, origen y características. Fuente: Davis y De Wiest (1971); Custodio y Llamas (2001); FCIHS (2009).

CONSTITUYENTE	FUENTE	CARACTERÍSTICAS
Ion Cloruro (Cl⁻)	Terrenos de origen marino, aguas congénitas y fósiles. Agua de lluvia, especialmente en zonas cercanas a la costa.	Sales muy solubles en agua y de gran estabilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales y difícilmente se precipitan, no entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal.
Ion Calcio (Ca⁺²)	En rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias en forma de carbonatos (calcita, aragonito y dolomita) o sulfatos (yeso y anhidrita).	Sales moderadamente solubles a muy solubles y pueden precipitar como CO ₃ Ca. Su química está asociada a los iones Ca ₃ H ⁺ y CO ₃ ⁻² , pudiendo precipitar y disolver al cambiar el pH o la presión parcial de CO ₂ . El intercambio iónico entre calcio y sodio se potencia notablemente en terrenos arcillosos de baja permeabilidad.
Ion Sodio (Na⁺)	La meteorización de silicatos tipo albita, feldespatos y feldespatoideos; la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos fundamentalmente como NaCl. Una fuente importante la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras, tanto por intrusión marina como por infiltración del agua de lluvia.	Solubilidad muy elevada, difícilmente se precipita. Las aguas naturales con elevado contenido de sodio, suelen tener también elevados contenidos de F ⁻ . Puede ser adsorbido en arcillas e intercambiado con calcio provocando una disminución de la dureza de las aguas.
Ion Magnesio (Mg⁺²)	Procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas y dolomíticas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina.	La solubilidad de la magnesita (MgCO ₃) es mayor que la de la calcita por lo que, el MgCO ₃ no precipita directamente de la disolución produciendo cierto grado de sobresaturación. Los procesos de intercambio iónico influyen en las concentraciones de magnesio.
Ion Potasio (K⁺)	Procede de la meteorización de los feldespatos y	En aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/l,

Universidad Veracruzana

CONSTITUYENTE	FUENTE	CARACTERÍSTICAS
	ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales potásicas de tipo silvina (KCl) o carnalita (KCl MgCl ₂).	a excepción de algunas salmueras. En ocasiones, más altas concentraciones pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales.
Bicarbonato (CO₃H), carbonato (CO₃⁻²) y CO₂	Proceden de la disolución de CO ₂ atmosférico o del suelo. De La disolución de calizas y dolomías, potenciada por el aporte de CO ₂ y/o ácidos orgánicos o inorgánicos..	Comunican alcalinidad al formar una solución tampón. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales y pueden precipitar con mucha facilidad como CO ₃ Ca. En aguas con pH inferior a 8,3 la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato.
Ion Sulfato (SO₄⁻²)	De la disolución de sales sulfatadas (yeso y anhidrita fundamentalmente).De lavado de terrenos en ambiente marino o condiciones de gran aridez, de la oxidación de sulfuros distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, de la descomposición de sustancias orgánicas, etc. También es aportado por contaminación por aguas residuales, industriales y agrícolas .	Generalmente estable y difícilmente precipitable químicamente. El ion sulfato después de los bicarbonatos son los principales aniones presentes en el agua natural. Los sulfatos intervienen en la conductividad total.
Ion Nitrato (NO₃⁻)	Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas bien como resultado de la disolución de rocas que los contengan, lo que ocurre raramente, bien por la oxidación bacteriana de materia orgánica o bien por contaminación	Son aniones muy solubles y difícilmente precipitables. Son estables, puede pasar a N ₂ o NH ₄ si llegan a intervenir procesos biológicos. Está relacionado con la contaminación por actividades urbanas, industriales y ganaderas y con las prácticas de abonados intensivos inadecuados con compuestos nitrogenados.

5.6. Características fisicoquímicas del agua

El agua subterránea natural como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas, presenta una serie de propiedades o características fisicoquímicas. Estas propiedades varían en el espacio y en el tiempo y entre las más representativas se encuentran:

- a) **Temperatura:** es la medición del contenido calorífico del agua que obedece a la media anual de las temperaturas atmosféricas. Es un parámetro de fácil registro y poca variación que nos puede brindar información valiosa relacionada con el tipo de medio por donde se desplaza el agua subterránea y la distancia vertical mediante el gradiente Geotérmico (la temperatura aumenta 1°C por cada 33 m de profundidad). Es un parámetro importante en lo que se refiere al control del quimismo de las aguas. En particular cuando entre áreas diferentes del acuífero existen notables diferencias de temperatura que pueden influir en la solubilidad de determinadas sustancias y en el contenido de gases disueltos (Davis y De Wiest, 1971; Custodio y Llamas, 2001).

- b) **pH:** Es la medida que indica la acidez del agua. Conceptualmente se define como el logaritmo negativo de la actividad del ion hidronio: $\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$. Se refiere a la presencia de sustancias disociables en agua y que como producto de disociación generan el ión hidronio (H_3O^+). El agua de las precipitaciones al pasar por la zona del suelo, donde es abundante el CO_2 , adquiere un pH relativamente bajo, del orden de 4,5. Luego por interacción con las rocas carbonatadas éste tiende a elevarse hasta cerca de 7. Cuando esta interacción se produce durante un tiempo prolongado el agua incrementa su contenido de iones HCO_3^- y adquiere, además, iones CO_3^{2-} . En esas condiciones el pH puede alcanzar un valor cercano a 8,4; aunque excepcionalmente puede variar entre 3 y 11. El pH juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas naturales (equilibrio carbonatado, procesos redox. etc.). Es fácilmente alterable por lo que su determinación debe hacerse en el momento de la toma de la muestra (Fagundo, 1990).

- c) **Sólidos disueltos totales:** los sólidos disueltos totales se refieren a la concentración de los componentes disueltos presentes en las aguas naturales, y la salinidad a la concentración total de los componentes iónicos. Se mide en ppm o g/L., este parámetro puede verse afectado por la temperatura y el pH por la precipitación o disolución de sales. Los STD, la salinidad y la conductividad eléctrica tienen una relación al ser los parámetros que miden las soluciones disueltas en el agua.
- d) **Conductividad eléctrica:** Es indicativo de la materia ionizable total presente en el agua y, por ende, se relaciona con la salinidad. La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de un cuerpo o solución de permitir el paso de la corriente eléctrica, a través de él (FCIHS, 2009). Esta capacidad depende de la presencia de iones positivos y negativos, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura a la cual se realiza la medición. Por ende es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución, fundamentalmente cloruros (Cl^-), sodio (Na^+), sulfatos (SO_4^{-2}), magnesio (Mg^{+2}), Calcio (Ca^+), fosfatos (PO_4^{-3}), nitratos (NO_3^-). Por medio de la conductividad conocemos el grado de mineralización del agua y podemos detectar infiltraciones de aguas superficiales contaminadas (Rondán, 2003; FCIHS, 2009).

La unidad de la conductividad en el siemens/cm (S/cm) o micro siemens/cm ($\mu\text{s}/\text{cm}$). La conductividad crece con la temperatura en razón de 2%/C por lo que es preciso tomar una temperatura de referencia al hacer la medición, normalmente esta temperatura es de 18°C o 25°C (Custodio y Llamas, 2001).

La conductividad en los cuerpos de agua dulce se encuentra primariamente determinada por la geología del área a través de la cual fluye el agua (cuenca). Por ejemplo, aguas que corren en sustrato graníticos tienden a tener menor conductividad, ya que ese sustrato está compuesto por materiales que no se

ionizan. Las descargas de aguas residuales suelen aumentar la conductividad debido al aumento de la concentración de Cl^- , NO_3^- y SO_4^{-2} u otros iones.

Es por esto que la conductividad es una medida generalmente útil como indicador de la calidad de aguas dulces. Cada cuerpo de agua tiene un rango relativamente constante de conductividad, que una vez conocido, puede ser utilizado como línea de base para comparaciones con otras determinaciones puntuales. Cambios significativos pueden ser indicadores eventos puntuales de contaminación (American Public Health Association *et al.*, 1999)

- e) **Alcalinidad:** es la capacidad de una sustancia para neutralizar ácidos, es decir eliminar los iones H^+ . En aguas subterráneas la alcalinidad mide el efecto de los iones carbonatos (CO_3^{-2}) bicarbonatos (CO_3H^-) y fosfatos (PO_4^{-3}). La presencia de boratos y silicatos en concentraciones altas también contribuyen a la alcalinidad del medio. Suele expresarse en ppm o meq/L de CO_3Ca (Martínez, 2006).
- f) **Dureza.** Es la capacidad que tiene un agua para consumir jabón (aguas sódicas o blandas), o para producir incrustaciones (aguas duras o cálcicas). Es causada por iones metálicos polivalentes disueltos, principalmente calcio y magnesio. Es la causante de las incrustaciones en las tuberías y puede llegar a ser corrosiva. La dureza es la suma de meq. de Ca^{+2} y Mg^{+2} en solución expresada en ppm de CaCO_3 . La dureza de las aguas subterráneas naturales varía generalmente entre 10 y 300 mg /L de CaCO_3 , pudiendo llegar a 2000 meq. o más. (Custodio y Llamas, 2001; Martínez, 2006).

6. ZONA DE ESTUDIO

El manantial El Castillo se ubica en la localidad de El Castillo, Municipio de Xalapa Ver. Es específicamente una zona compuesta por 4 descargas de agua subterránea separadas por una distancia no mayor a los 500 m. Sus coordenadas geográficas son 19 °32' latitud Norte y 96 ° 52' " de longitud Oeste, y una altitud de 1140 msnm. Por sus cercanías con Xalapa obedece a las características generales del municipio.

Xalapa se localiza en la región montañosa central del actual estado de Veracruz, Ubicada en las coordenadas 19° 32' 24" de latitud Norte, 96° 55' 39" de longitud al Oeste del Greenwich y una altitud regional variable, que va desde los 800msnm cerca de El Lencero hasta cerca de los 1500msnm cerca del municipio de Banderilla. Esta ciudad se asentó en las faldas del cerro del Macuiltépetl, enclavada al pie de las laderas del cofre de Perote. Colinda al norte con los municipios de Banderilla y Jilotepec; al oriente, con Naolinco; al Sur con Emiliano Zapata y Coatepec; y al occidente, con Tlalnelhuayocan.

6.1. Clima

El clima de Xalapa es húmedo y variado, teniendo una temperatura media anual que fluctúa de los 11 °C a los 20 °C presenta heladas irregulares de noviembre a marzo; las lluvias son abundantes en verano y principios de otoño, seguidas de lloviznas ligeras acompañadas de “chipi-chipi” en invierno. De acuerdo a la clasificación de Köppen adecuada por E. García para México, el clima que predomina es el Templado– Húmedo con lluvias todo el año, C(fm)w aunque también se encuentran representados el Frío-Húmedo, Templado-Regular, Cálido húmedo y Cálido Seco. La precipitación media anual para este municipio es de 1,552.8 mm. El municipio se encuentra influenciado por las isoyetas medias anuales de 1500 y 2000 mm y las isotermas de 18°C y 20° C medios anuales (MDGIF y Gobierno del Estado de Veracruz, 2011).

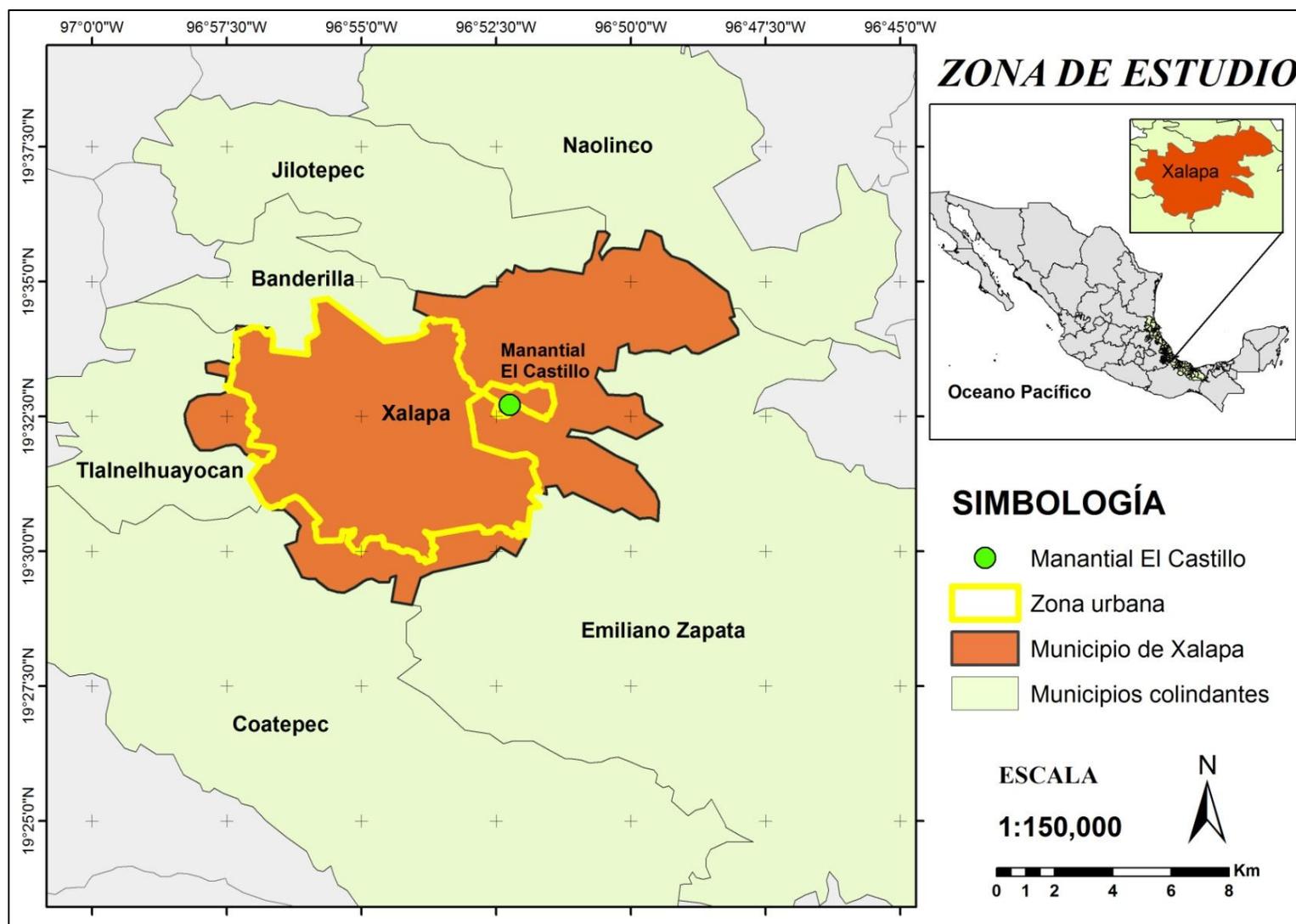


Figura 9. Localización de municipio de Xalapa y los municipios colindantes. En base al marco geostadístico municipal INEGI (2011).

6.2. Geología y Relieve

El terreno que presenta Xalapa es irregular con accidentes de poca elevación. Se ubica al pie del eje neo volcánico de la sierra madre Oriental. Las principales elevaciones del municipio de Xalapa son el Cerro de Macuiltépetl (1,580 msnm), Cerro Colorado (1,580 msnm) y el Cerro del Estropajo (1,620 msnm) (Capitanachi, 2008). En la tabla 3 y Figura 10, se muestra una descripción del tipo de roca y el lugar de ubicación de esta roca.

Tabla 8. Características Geológicas de Xalapa. Tipos de roca y la zona en donde se encuentran en el municipio de Xalapa. Fuente: MDGIF y Gobierno del Estado de Veracruz (2011).

Período Geológico	Tipo de roca	Ubicación
Cuaternario Holoceno (reciente)	Cenizas Volcánicas	Centro-oeste de Banderilla y Suroeste de Tlalnahuayocan, Oeste de Xalapa
	Andesita y andesita basáltica	Centro-norte, Centro-sur y Suroeste de Xalapa
	Andesita y andesita basáltica recubierta por cenizas volcánicas	Suroeste de Banderilla, Norte y Este de Tlalnahuayocan. Noroeste de Xalapa
	Flujo piroclástico pumítico arenoso poco consolidado, recubierto por cenizas volcánicas	Norte y Este de Banderilla, Noroeste y Sur de Xalapa, Centro y Sur de Tlalnahuayocan
	Flujo piroclástico consolidado	Este de Xalapa
	Brecha volcánica muy alterada	Noreste de Tlalnahuayocan, Noroeste de Xalapa, Centro-Sur de Banderilla
	Basalto caótico de malpaís	Noroeste y Este de Banderilla, Norte de Xalapa
	Basalto caótico de malpaís recubierto por cenizas volcánicas	Noroeste y Centro de Banderilla, Norte, Noroeste y Sureste de Xalapa
Terciario Eoceno	Material piroclástico poco consolidado	Norte de Banderilla, Este de Xalapa
	Travertino	Norte de Banderilla, Este y Noreste de Xalapa

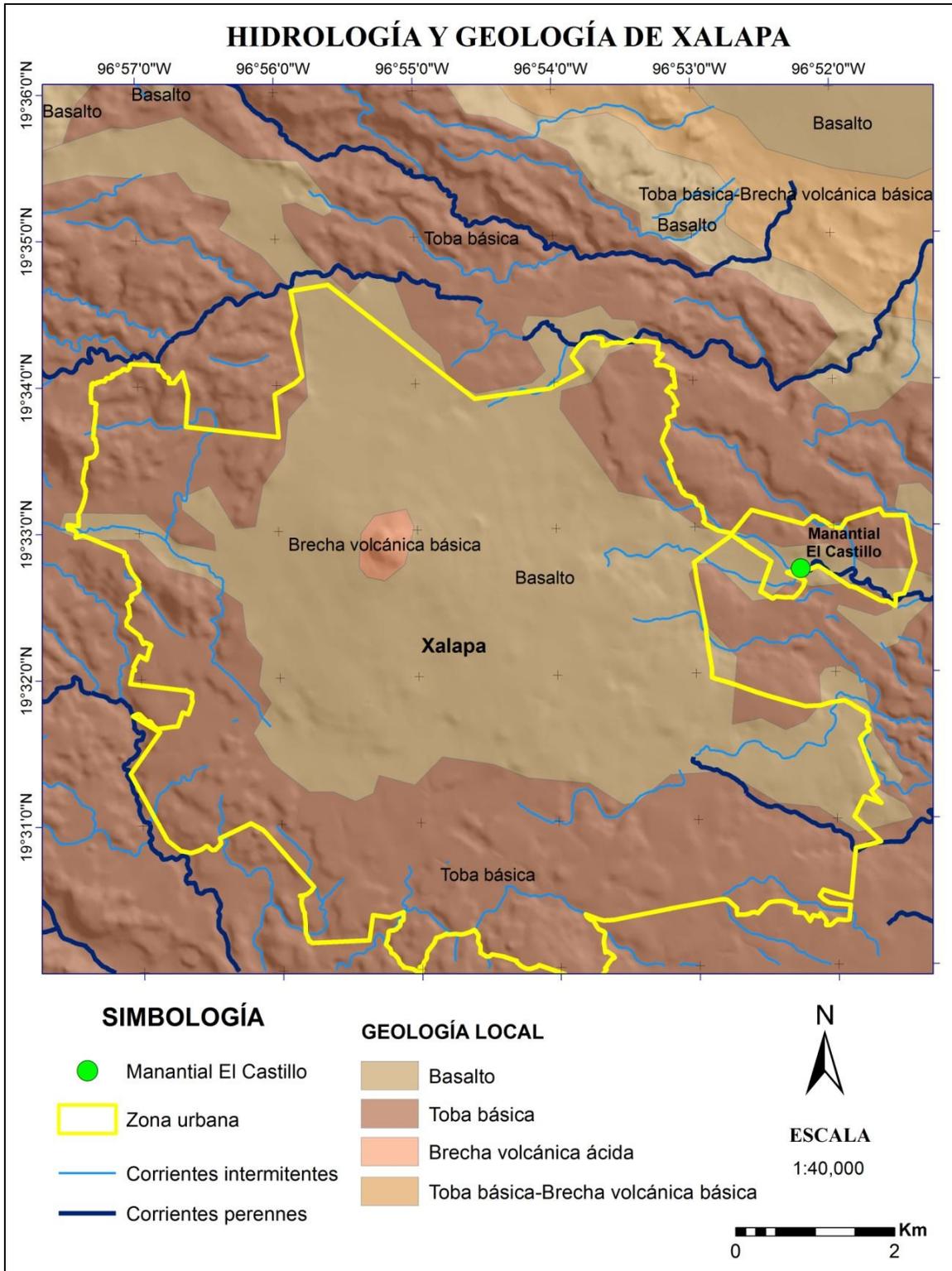


Figura 10. Hidrología y geología del municipio de Xalapa sobre carta de datos geológicos vectoriales E1403 Escala 1:250,000 INEGI (S/F). y carta topográfica E14B27 Escala 1:250,000 de INEGI.

6.3. Hidrografía

El sistema hidrológico de Xalapa presenta dos particularidades. La primera es la existencia de corrientes temporales y perenes que provienen del cofre de Perote y se localizan entre las cuencas hidrológicas de los ríos de Actopan y la Antigua (CONAGUA, 2013); la segunda es atribuible a las características geológicas del terreno, por las vetas de arena blanquecina y de basalto poroso donde circula una gran cantidad de agua delgada, producto de la filtración del suelo, y sirven de depósitos acuíferos subterráneos (González de Cosiio, 1957;Nelly, 2009).

En los alrededores de la Ciudad de Xalapa se encuentran los ríos: Sedeño y Sordo; los arroyos Carneros, Chiltoyac, Sucio y las Animas; también cuenta con alrededor de 45 manantiales como son Los Tecajetes, Xallitic, Techacapan, Los Lagos, El Castillo, entre los más importantes (Capitanachi, 2008).

6.4. Demografía

Según datos del Censo de Población y Vivienda 2010 realizado por INEGI, el municipio de Xalapa cuenta con una población de 457,928 habitantes (INEGI, 2013). Es el segundo municipio más poblado después de Veracruz. Los censos reflejan una tasa de crecimiento de 1.6 %. Como se observa en la Figura 11, en donde se ve el crecimiento que ha tenido Xalapa.

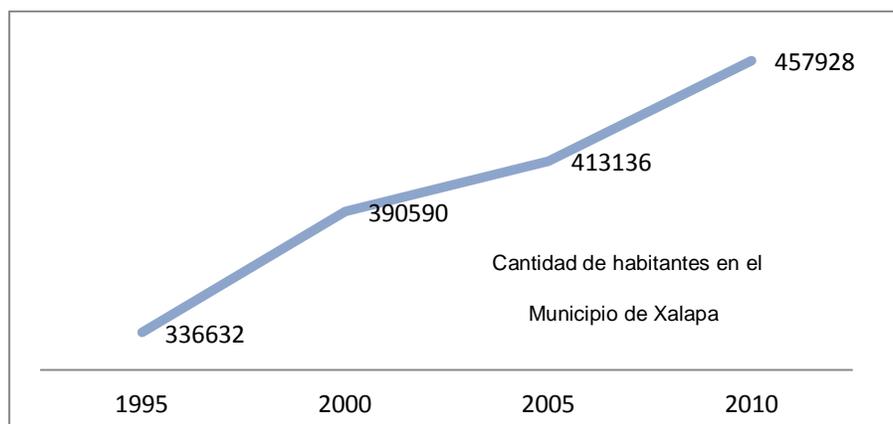


Figura 11 Crecimiento poblacional en el municipio de Xalapa durante los últimos 15 años. Fuente: INEGI (2013).

6.5. Suministro de agua en Xalapa.

Para cubrir las necesidades básicas, incluyendo el consumo en alimentos, el aseo personal y del hogar, cada habitante necesita de cierta cantidad de agua diaria, esta cantidad varía de acuerdo a las necesidades de cada región habitada y a la disponibilidad de agua.

El consumo de agua por persona en los países desarrollados puede alcanzar los 300 litros diarios en contraste con los 25 L que consumen en algunas zonas subdesarrolladas y áridas o los 80 litros que recomienda la Organización Mundial de la Salud, OMS, para las necesidades vitales de aseo personal (ONU y OMS, 2011); en México se tiene calculado que el consumo por habitante se ubica entre los 220 a 300 litros por habitante, Tabla 3. (CONAGUA, 2007).

Tabla 9 .Consumo de agua por habitante en base al clima y estilo de vida.

Fuente: CONAGUA (2007).

Consumo Doméstico "PER CAPITA"			
Consumo Por Clima Y Clase Socioeconómica (L/Hab/Día)			
Clima	Residencial	Media	Popular
Cálido	400	230	185
Semicálido	300	205	130
Templado	250	105	100

En la actualidad Xalapa consume un total de 1760 l/s/día de agua de acuerdo a CMAS (2013), esto equivale a un consumo de 330 L/Hab/día, ubicando el consumo doméstico por arriba del promedio de consumo "Per Capita" de acuerdo a la Tabla 3. Sin embargo de esta cantidad se estima que el 40% se desperdicia en fugas y tomas clandestinas y en tiempo de estiaje el flujo de producción de agua se ve reducido entre un 12% a 15%. Sus diferentes fuentes de captación provienen principalmente de agua superficial y se distribuyen como se muestra en la tabla 4.

Tabla 10 .Fuentes de Abastecimiento de agua en la ciudad de Xalapa, Ver.

Fuente: CMAS Xalapa, (2013).

Fuentes de Abastecimiento de Agua para Xalapa, Ver.			
Fuente	Municipio	Estado	L/s
Rio Huitzilapan (Presa Los colibríes)	Quimixtlan	Puebla	1000
Rio Socoyolapa	Tlalnahuayocan,	Veracruz	100
Manantiales del Cofre de Perote	Perote, Rafael Ramírez, Coatepec y Xico	Veracruz	250
Manantiales EL Castillo	El Castillo	Veracruz	60
Rio Pixquiac	Tlalnahuayocan	Veracruz	250
Rio Cinco Palos	Coatepec	Veracruz	100

El manantial El Castillo es una de las fuentes que abastecen Xalapa y forma parte de la hidrografía importante de la región, la concesión que se tiene de esta fuente corresponde a 60 L/s, el resto del agua es utilizada para beneficio de comunidades localizadas a menor altitud, incluyendo algunas del municipio de Emiliano Zapata, Tabla 5.

Tabla 11 .Localidades abastecidas por los Manantiales de El Castillo.

Fuente: CONAPO (2013).

Localidad	Municipio	Población total
El Castillo	Xalapa	5 154
Castillo Chico	Xalapa	211
Las Cruces	Xalapa	455
El Guayabo	Emiliano Zapata	431
El Limón	Emiliano Zapata	317
Rancho Nuevo	Emiliano Zapata	496
El Terrero	Emiliano Zapata	1 244
Tres Pasos	Emiliano Zapata	72

7. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el análisis de los parámetros hidrogeoquímicos del manantial “El Castillo” durante el período 2010-2012, se muestra en la Figura 12., y se describe detalladamente a continuación.

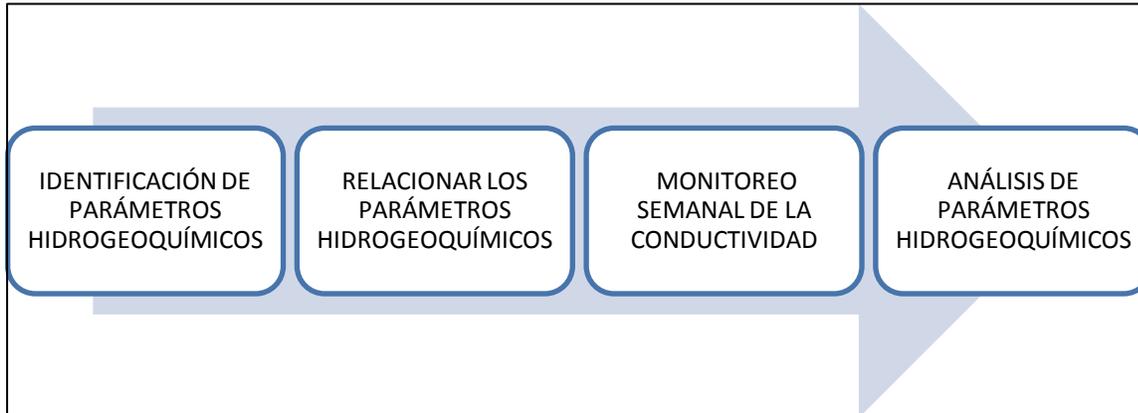


Figura 12. Diagrama de la metodología empleada para el análisis del comportamiento del manantial El Castillo.

a) Identificación de los parámetros hidrogeoquímicos. Se realizó a través de la búsqueda de una base de datos de resultados de análisis fisicoquímicos e hidrológicos de los manantiales de la ciudad de Xalapa, principalmente de El Castillo. La búsqueda de información se efectuó en publicaciones técnico científicas, revistas de circulación científica y en tesis realizadas por la U V principalmente. Adicionalmente se solicitó a la Comisión Municipal de Agua y Saneamiento de Xalapa (CMAS), resultados de aforos y análisis fisicoquímicos realizados al manantial El Castillo en el período 2010-2012, para correlacionar los datos.

Se realizó un recorrido de verificación en campo de los aprovechamientos encontrados en la bibliografía. Para el geoposicionamiento para la georeferenciación de cada punto se utilizó un GPS GARMIN modelo EXTREM.

i. Se realizó un análisis geoestadístico de interpolación Kriging para obtener las líneas de isoconcentración de la conductividad eléctrica del agua de los manantiales, eligiendo que los datos fueran lo mayormente homogéneos

considerando las fechas cercanas en mes y año. Este método de interpolación Kriging, presupone que la distancia o dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. En su proceso de análisis incluye, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza.

Con base en la verificación realizada y debido a que es uno de los manantiales de mayor caudal y relevancia como fuente de abastecimiento de agua se tomó la decisión de estudiar el Manantial El Castillo.

- b) Relacionar los parámetros hidrogeoquímicos. Con los datos proporcionados por CMAS Xalapa y los datos de precipitación mensual acumulada por parte del INIFAP, se realizó un análisis estadístico utilizando el software Statistica 7 para obtener la matriz de correlación de Pearson para $p < 0.05$ de las variables caudal, precipitación, pH, conductividad, alcalinidad y dureza total, temperatura del agua y ambiente, nitratos (N-NO_3^-), sulfatos (SO_4^{-2}), cloruros (Cl^-), Coliformes fecales y totales, con la finalidad de encontrar relaciones existentes entre los diferentes parámetros medidos.

En algunos casos la correlación de los datos se realizó tomando únicamente los datos de temporada de secas considerando que en esta época las relaciones que pudieran existir son debidas únicamente al proceso de infiltración del agua y su transporte por el acuífero.

La precipitación mensual acumulada ocurrida en Xalapa se obtuvo de la estación climatológica INBIOTECA, UV del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

- c) Monitoreo semanal de la conductividad eléctrica .Se programó un monitoreo semanal durante la época de secas enero – junio 2013 en dicho manantial y se midieron los siguientes parámetros: conductividad, pH, STD y temperatura del agua. Las mediciones fueron realizadas alrededor del afloramiento del manantial

y de manera aleatoria, tomando 5 mediciones de cada variable. La unidad utilizada para las mediciones fue un equipo multiparamétrico marca PALINTEST modelo Waterproof 800. Además de observar si existía alguna variación física que pudiera dar mayor detalle al análisis.

- d) Análisis de parámetros hidrogeoquímicos. El análisis de los parámetros hidrogeoquímicos se realizó conjuntando los datos obtenidos tanto en bibliografía como en campo. Además de emplear herramientas de análisis geográficos.
 - i. Utilizando la carta topográfica vectorial E14B27 elaborada por el INEGI, se delimitó la microcuenca correspondiente al manantial El Castillo mediante la herramienta Hydrology contenida en el software ARCGIS 10. Este instrumento de análisis se basa en la premisa de encontrar todos los puntos de fluidez en los extremos de la ventana de análisis (donde el agua se derrama por fuera de la trama), así como resumideros; posteriormente identifica la zona que contribuye por encima y que corresponden a la misma dirección de flujo. de acuerdo al modelo digital de elevación.

Como actividad complementaria se participó en el muestreo químico de manantiales alrededor de la ciudad de Xalapa, incluyendo al manantial El Castillo, llevado a cabo para el proyecto OIEA-UV, en donde un grupo de especialistas en hidrología de la UV, UNAM y IOEA efectuaron mediciones de parámetros fisicoquímicos de conductividad, alcalinidad, pH, STD, temperatura, se tomaron muestras para análisis de iones mayores y menores, isotopos Deuterio, ^2H ; Tritio, ^3H ; Oxígeno-18, ^{18}O y Carbono- 14, ^{14}C , así como gases nobles.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La información de los manantiales de Xalapa se presentan en el Anexo 1 (Tabla A), donde se muestran 16 manantiales, incluido el manantial El Castillo, de éstos uno fue imposible localizarlo y dos presentaban un caudal muy bajo, motivo por el cual se descartaron.

En la Figura 13 se ubican geográficamente los 13 manantiales localizados, separados en dos zonas y que de acuerdo a la Figura 10, estas fuentes de agua surgen en las rocas basálticas. La primera de ellas, se ubica al suroeste de la ciudad, comprende los manantiales históricamente conocidos como Xallitic, Tecajetes, Parque Juárez, Techacapan y Los Lagos entre los mas importante. Se observa, que en esta zona la conductividad disminuye en sentido noroeste-sureste, cerca de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en una distancia no mayor a 4 km y en sentido de decremento de la altitud.

La segunda zona, se observa al noreste de Xalapa, en donde los manantiales son de menor caudal, a excepción del manantial El Castillo, y no representan importancia para la ciudadanía, según se observó en el recorrido de campo, pues el agua que brota se conduce y mezcla con los riachuelos, o canales de agua de mala calidad. Al parecer, el comportamiento espacial de la conductividad es inverso a la zona sur de la ciudad, pero en la misma dirección. Esto implica un probable sentido de flujo de agua subterránea en sentido noroeste-sureste que a medida que circula el agua recibe descargas con mayor contenido iónico.

En la figura 13 también se observan las isolíneas de conductividad eléctrica registrada en los aprovechamientos generados en base a la información recabada. De acuerdo al análisis de interpolación Kriging, los manantiales con mayor conductividad se ubican en la zona suroeste de la ciudad (400 $\mu\text{s}/\text{cm}$), principalmente los localizados en la zona centro de Xalapa.

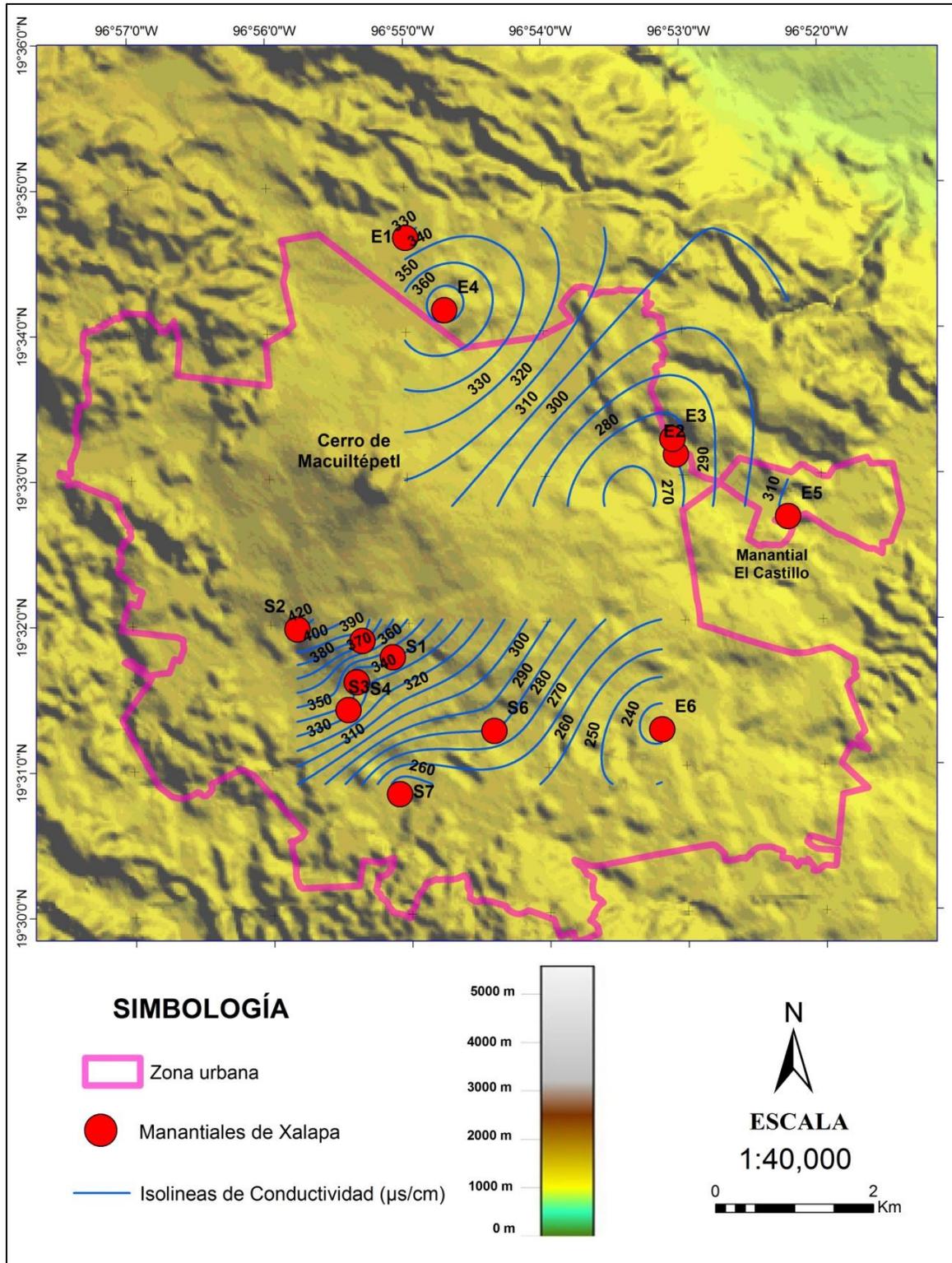


Figura 13. Ubicación de los manantiales de Xalapa e isolneas de conductividad eléctrica, obtenidas mediante el método de interpolación tipo Kriging.

Tabla 12. Ubicación de los manantiales de Xalapa. Claves con nombres y su localización Geográfica.

CLAVE	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
		(N)	(W)	(Z)
S1	Techacapan	19° 31' 46.2"	96° 55' 7.32"	1399
S2	Tecajetes	19° 31' 58.08"	96° 55' 48.72"	1456
S3	Los Lagos	19° 31' 24.6"	96° 55' 26.8"	
S4	Parque Juárez	19° 31' 36.12"	96° 55' 23.16"	1419
S5	Xallitic	19° 31' 53.04"	96° 55' 20.64"	1432
S6	Murillo Vidal	19° 31' 15.24"	96° 54' 23.4"	1356
S7	Circuito Presidentes (Protección Civil Del Estado)	19° 30' 49.68"	96° 55' 4.8"	1357
E1	Tangerina, Col Naranjal	19° 34' 39"	96° 54' 59.76"	1406
E2	Del Nacimiento, Col Higueras	19° 33' 8.28"	96° 53' 3.12"	1217
E3	Dos Arbolitos, Col Higueras	19° 33' 14.76"	96° 53' 4.56"	1254
E4	Andador 2 Esq Rio Amazonas, Col El Moral.	19° 34' 9.12"	96° 54' 43.2"	1390
E5	El Castillo	19 °32' 42.36"	96 ° 52' 14.52"	1185
E6	Las Animas	19 ° 31'14.88"	96 ° 53'10.68"	1268

La conductividad eléctrica es una medida de la materia ionizada en el agua y en algunos casos es utilizada para medir indirectamente la contaminación (American Public Health Association,1999), en base a esta afirmación y considerando que los manantiales con mayor conductividad se ubican en la zona centro de Xalapa, esto es, zona con mayor antropización se puede inferir que el agua de estas fuentes hídricas se encuentran afectadas por ciertas infiltraciones de descargas de agua urbana, estas descargas se ven confirmadas con la presencia de coliformes totales y fecales no solo en estos aprovechamientos también en la mayoría de los manantiales encontrados de acuerdo a los análisis realizados por los trabajos recopilados.

8.1. Identificación de parámetros

De acuerdo al análisis de isoclinas de conductividad y en base a las observaciones de campo con respecto a los manantiales localizados, se determinó que el manantial El Castillo es el de mayor importancia, debido a que tiene un caudal significativo y por el uso que se le da en la actualidad como portador de agua para consumo humano.

De los datos proporcionados por CMAS Xalapa se utilizaron para el análisis hidrogeoquímico los valores del caudal, pH, conductividad, alcalinidad y dureza total, temperatura del agua y ambiente, nitratos ($N-NO_3^-$), sulfatos (SO_4^{-2}), cloruros (Cl^-), Coliformes fecales y totales, presentados en la Tabla B Anexo 1. De esta información

surge el análisis estadístico que permitió relacionar los parámetros hidrogeoquímicos del manantial.

8.1.1. Manantial El Castillo

El manantial El castillo, es en realidad un conjunto de 4 descargas subterráneas de tipo manantial. Se considera como un solo manantial debido a que geológica e hidrogeoquímicamente tienen las mismas características.

La figura 14. muestra el esquema de ubicación espacial del conjunto de manantiales. Los manantiales 2, 3 y 4 se encuentran protegidos por tanques de captación del agua, separados por una distancia menor a 15 metros, entre ellos atraviesa un canal revestido que conduce el agua sobrante de las 4 fuentes. Los datos de aforo proporcionados por CMAS, Xalapa, son medidos después del manantial 4. Los datos fisicoquímicos proporcionados por CMAS Xalapa, son tomados directamente del tanque de bombeo correspondiente al manantial 4.

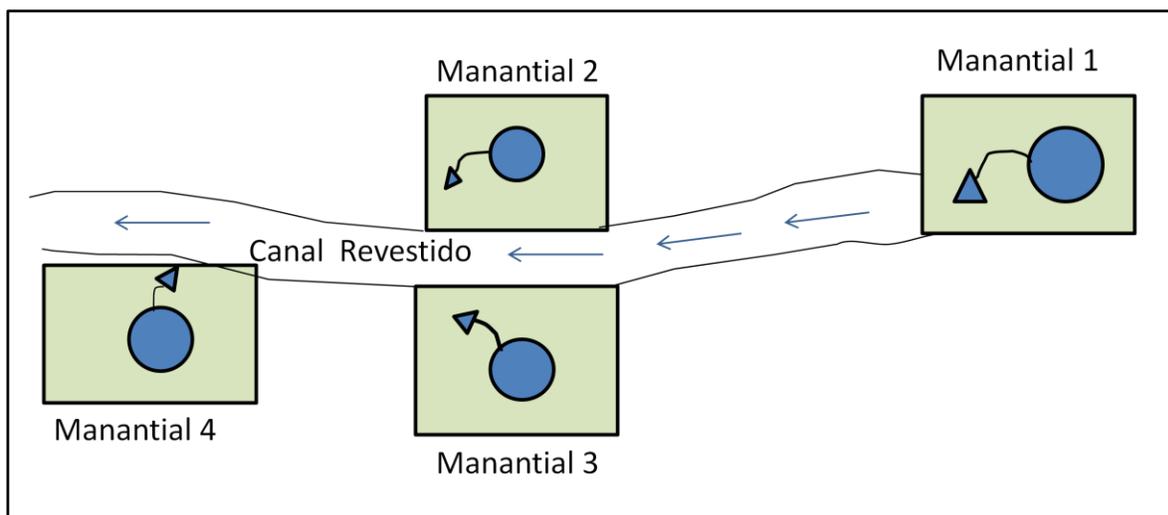


Figura 14. Esquema del conjunto de manantiales que forman el Manantial El Castillo.

Las mediciones semanales realizadas para este trabajo fueron tomadas en el manantial 1, localizado a 500 metros topográficamente arriba de los manantiales 2,3 y 4. Se eligió esa fuente debido al fácil acceso que se tiene a él y a que no se encuentra resguardado por algún organismo operador, probablemente el manantial sea administrado por la comunidad de El Castillo. Está protegido por una barda que lo rodea, el agua que brota

forma un riachuelo que se dirige al complejo de los 3 manantiales restantes. El muestreo realizado por parte del proyecto PCT OIEA-UV se efectuó en el manantial 2.

8.2. Relación de parámetros hidrogeoquímicos

La matriz de correlación de Pearson de los parámetros hidrológicos y de precipitación mensual acumulada (Tabla B), tiene la finalidad de medir que tan relacionadas se encuentran las variables entre sí. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

De acuerdo al objetivo planteado, la precipitación se encuentra correlacionada significativamente, 76.7%, con el caudal promedio mensual registrado en el manantial el Castillo. También se presenta una correlación significativa del 68.3% entre la precipitación y los sulfatos (SO_4^{-2}), y de 56.4% con los Coliformes totales.

Por su parte, los coliformes fecales muestran una correlación significativa con respecto a la dureza, la conductividad y el tiempo transcurrido de monitoreo, con porcentajes de 64.2%, 62.13% y 59.9% respectivamente.

La dureza mostró relación con el tiempo de monitorio del 74.3%, con la conductividad de 62.9% y con la temperatura ambiente del 60.7%. De la misma manera se asume una correlación importante entre el cloruro y la temperatura ambiente de 73.2%. Para el caso del ion nitrato (N-NO_3^-), los datos muestran una cierta correlación con los cloruros (Cl^-) del 53.4%.

Por último el sulfato (SO_3^{-2}) y el caudal manifestaron una correlación del 54.8%. Finalmente se considera que las correlaciones restantes no fueron significativas mediante este análisis debido a que presentan valores menores al 50 %.

De acuerdo al análisis estadístico anterior, la correlación más alta es la descrita por el caudal y la precipitación mensual acumulada, en la figura 15, se observan graficados los valores de precipitación mensual acumulada y el caudal, registrados durante el periodo enero 2010- diciembre 2012 del manantial El Castillo.

Tabla 13 .Matriz de correlación de Pearson de datos fisicoquímicos del manantial El Castillo.

VARIABLES	Caudal	pH	Tem peratura de agua	Temperatura ambiente	Conductivida d	Alcalinidad	Cloruros (Cl)	Dureza	Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	Coliformes totales	Coliformes fecales	Prec mensual
Tiempo	0.118 +	0.133 -	0.526 +	0.279 -	0.518 +	0.033 -	0.120 +	0.743 +	0.369 -	0.152 +	0.506 +	0.600 +	
Caudal	1.00 +	0.091 +	0.165 -	0.544 -	0.242 +	0.507 +	0.468 +	0.306 +	0.478 +	0.548 +	0.445 +	0.115 -	0.767 +
pH		1.000	0.228 -	0.242 +	0.116 -	0.199 +	0.228 -	0.036 +	0.126 +	0.314 +	0.021 +	0.210 -	0.027 +
Temperatura del agua			1.000 +	0.140 +	0.247 -	0.055 +	0.011 -	0.183 +	0.279 -	0.119 +	0.198 +	0.050 +	0.216 +
Temperatura ambiente				1.000 +	0.413 -	0.345 -	0.732 -	0.607 -	0.468 -	0.002 -	0.520 -	0.406 -	0.159 -
Conductividad					1.000 +	0.041 -	0.156 +	0.629 +	0.299 -	0.243 -	0.329 +	0.621 +	0.018 +
Alcalinidad						1.000 +	0.547 +	0.300 +	0.509 +	0.085 +	0.063 +	0.265 -	0.425 +
Cloruros (Cl)							1.000 +	0.323 +	0.534 +	0.151 -	0.201 +	0.001 +	0.157 +
Dureza								1.000 +	0.045 +	0.088 +	0.632 +	0.643 +	0.282 +
Nitratos (N-NO₃⁻)									1.000 +	0.050 +	0.018 +	0.123 -	0.257 +
Sulfatos (SO₄⁻²)										1.000 +	0.469 +	0.311 -	0.684 +
Coliformes totales											1.000 +	0.502 +	0.564 +
Coliformes fecales												1.000 +	0.058 -
Prec mensual													1.000 +

El caudal máximo registrado en el manantial EL Castillo en el período señalado, fue de 1300 l/s en el mes de septiembre del 2010, mes en que termina la época de lluvias en la ciudad de Xalapa, mientras que el caudal mínimo registrado es de 200 l/s en el mes de mayo del 2011, mes en donde concluye la temporada de estiaje en la ciudad de Xalapa. Esta correlación positiva entre el caudal y la precipitación aparenta que el manantial responde a la precipitación, esto es, aumenta precipitación, aumenta el caudal, disminuye la precipitación, disminuye el caudal.

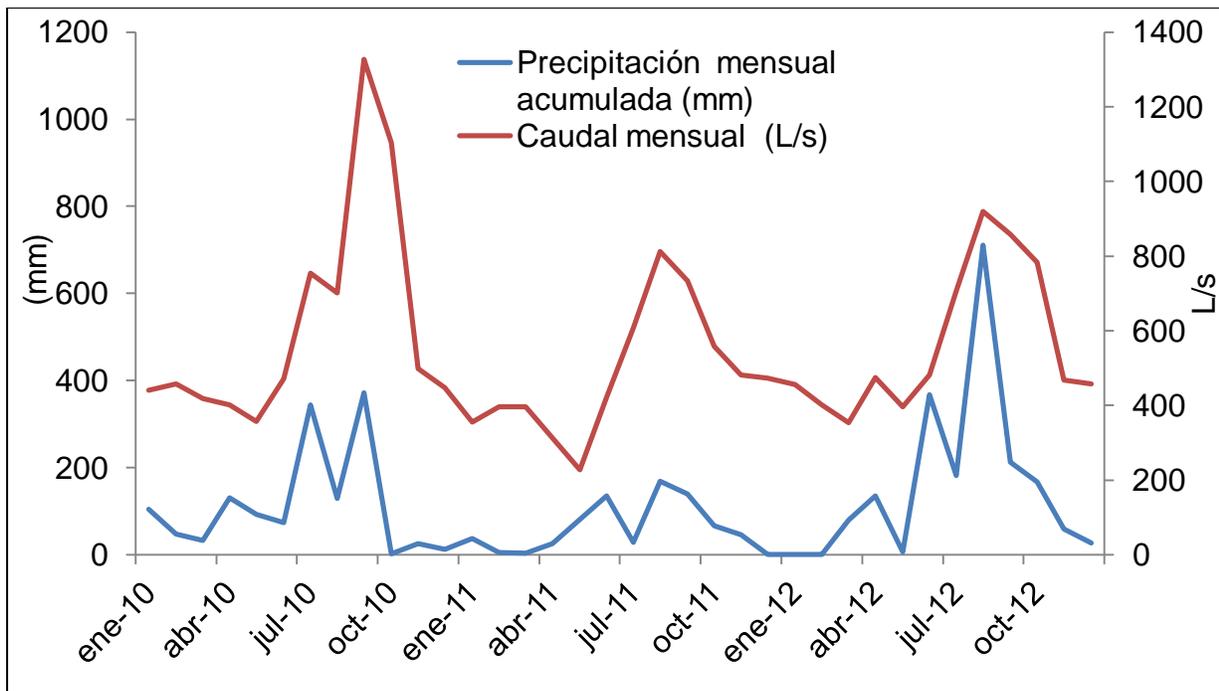


Figura 15. Relación Precipitación mensual acumulada-Caudal. del Manantial El Castillo durante el Período 2010-2012. Fuente: CMAS Xalapa (2013), INIFAP (2013).

El manantial El Castillo se encuentra aflorando en el contacto entre las lavas emitidas del volcán Macuiltépetl con una alta permeabilidad, evidenciada por tubos de lava como son la cueva de la Orquídea al oriente del cráter del volcán y probablemente una roca ignimbrítica con menor permeabilidad, Pérez Quezadas *et al.* (2012). Debido a lo anterior se puede pensar que el caudal registrado es producto de la infiltración y descarga inmediata de la precipitación. Esta hipótesis podría implicar la existencia de un acuífero libre fracturado localizado en las rocas basálticas originadas por dicho

volcán y sobre las cuales se encuentra emplazado la ciudad de Xalapa con 500,000 habitantes aproximadamente.

Del análisis geográfico para la determinación de la microcuenca del manantial realizado con la herramienta de Hydrology del software ARCGIS 10 se obtuvo la Figura 16, en donde se muestra la microcuenca del manantial, dicha microcuenca nace en las faldas del volcán Macuiltépetl y tiene un área aproximada de 9 km². En ella se observa que existen escurrimientos intermitentes que se conducen hacia el manantial, pudiendo aportar agua superficial al aprovechamiento. Como se mencionó con anterioridad, la medición del aforo se realizó en el canal revestido localizado inmediatamente abajo del punto de descarga donde se acumula el caudal drenante y sobrante de los 4 manantiales que conforman el manantial El Castillo, por lo que existe la posibilidad que los datos de aforo contengan una desviación.

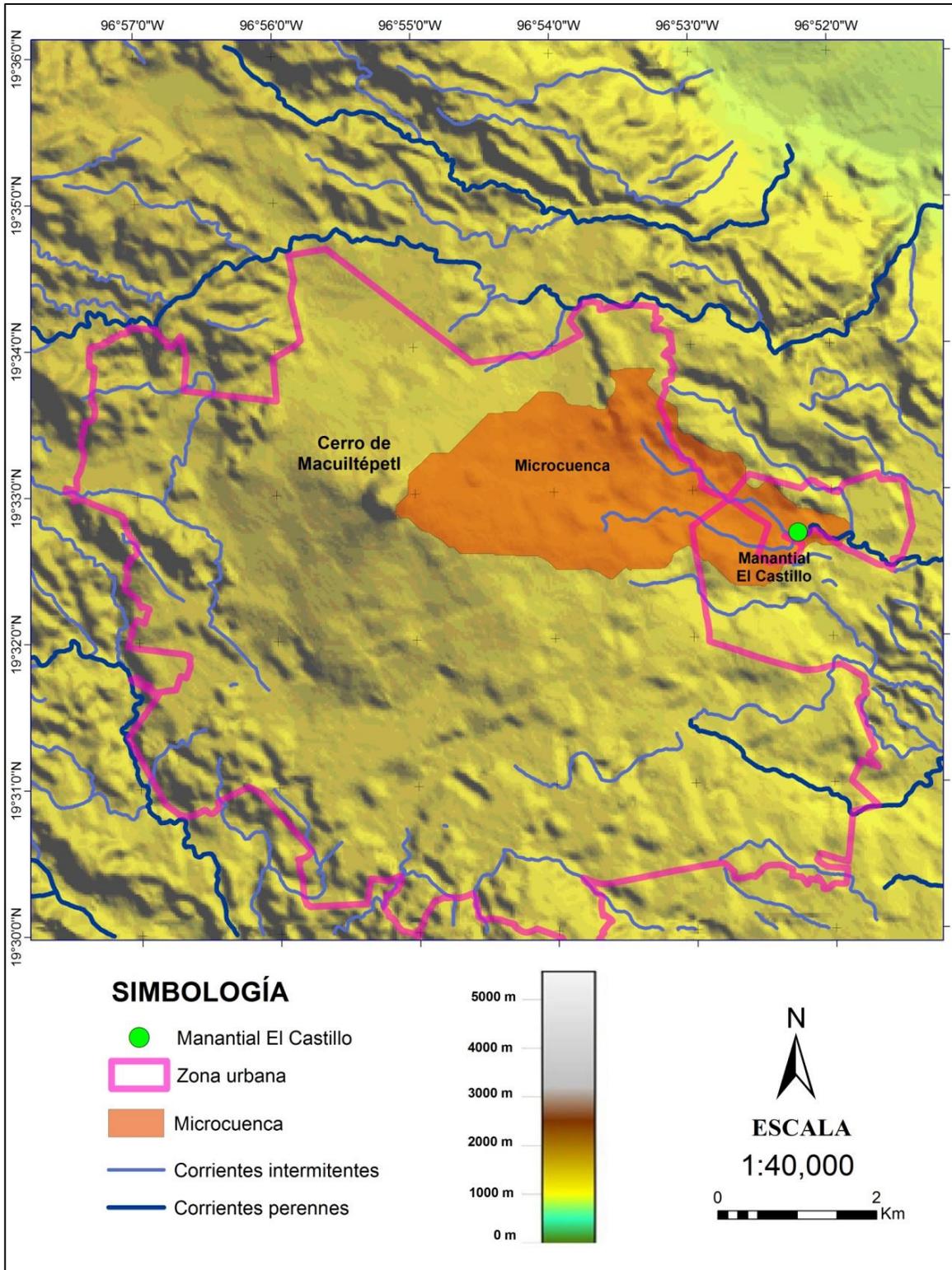


Figura 16. Microcuenca del Manantial el Castillo y corrientes de agua. Basado en Carta topográfica E14B27 Escala 1:150,000 de INEGI.

Lo anterior permite fijar la atención en la temporada de estiaje, cuando prácticamente el caudal drenante es agua subterránea. Considerando que el análisis estadístico fue realizado en base a los datos tanto de la temporada de lluvias como la temporada de secas, se busco la correlación existente únicamente en la temporada de secas, mostrando una relación mucho menor a la anterior (13.3%), Figura 17 . Con este análisis no se observa con claridad la dependencia del caudal promedio mensual de agua subterránea con la precipitación acumulada mensual.

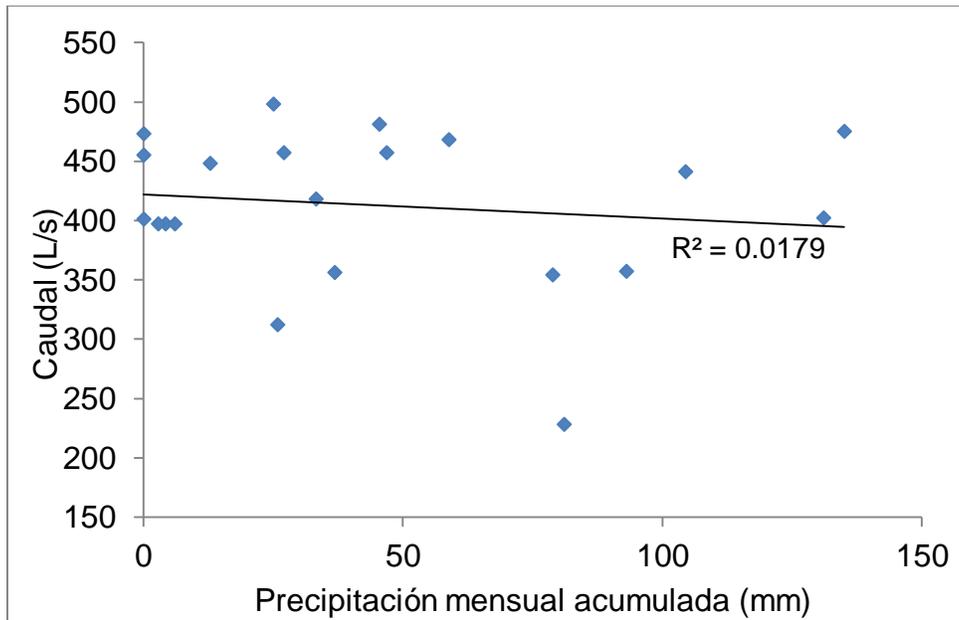


Figura 17. Correlación entre la precipitación mensual acumulada y el caudal del manantial El Castillo en temporada de seca del periodo 2010-2012.

Sin embargo, en el manantial donde se monitorearon los parámetros fisicoquímicos semanales se observó un aumento del caudal descargado del agua subterránea, después de 3 días de lluvias intensas como las ocurridas por la tormenta tropical Barry. Esta observación permite plantear que es probable la existencia de una correlación importante entre las lluvias y el caudal, sin embargo esta se presenta en menor escala de tiempo.

a) Sulfato (SO_4^{-2})

Otra de las correlaciones importantes resultantes en la matriz de correlación de Pearson, fue la presentada entre sulfatos (SO_4^{-2}) y la precipitación mensual acumulada (68.4%) y los sulfatos y el caudal (54.8%).

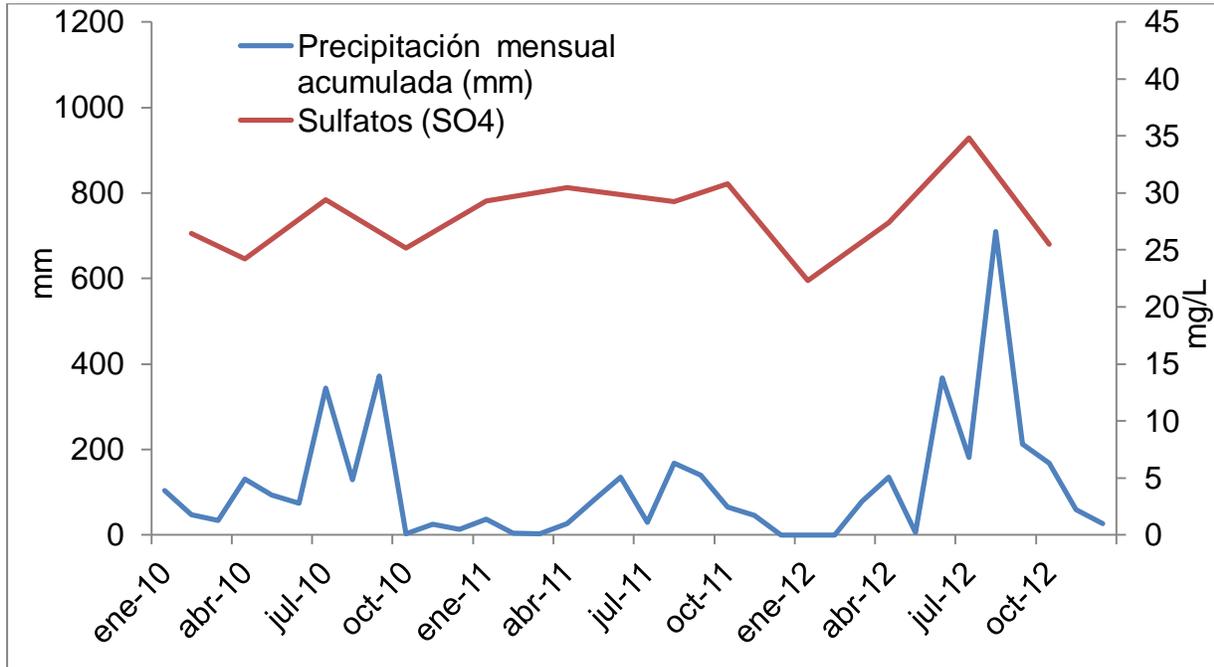


Figura 18. Relación de la precipitación mensual acumulada y Sulfatos (SO_4^{-2}) del manantial El Castillo durante el período 2010-2012. Fuente: CMAS Xalapa (2013), INIFAP (2013).

La presencia de sulfatos en el Manantial el Castillo se encontró en un rango de 25 y 35 mg/l en el periodo señalado, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible de acuerdo a la NOM-127-SSA-1994 (400 mg./l de SO_4^{-2}) Figura 18.

Los sulfatos son aniones que se presentan en el agua de forma natural debido a la disolución de rocas sulfatas como lo son los yesos y anhidritas en el agua (Custodio y Llamas, 2001), sin embargo también se deben al lavado de terrenos en ambiente marino o por descargas de aguas residuales, industriales y agrícolas. Los valores de 25mg/L a 35 mg/L, no corresponden a concentraciones de agua natural en ambiente geológico sulfatado, por lo que la presencia de sulfatos en el agua pudiera estar asociada a agua residual.

La figura 18 muestra el comportamiento de la precipitación y los sulfatos (SO_4^{-2}) en el manantial, los valores elevados que se observan corresponden al aumento de precipitación, sin embargo, considerando que posiblemente exista una aportación de agua de las corrientes intermitentes que cruzan por el manantial, se analizaron los datos por separado para la época de secas.

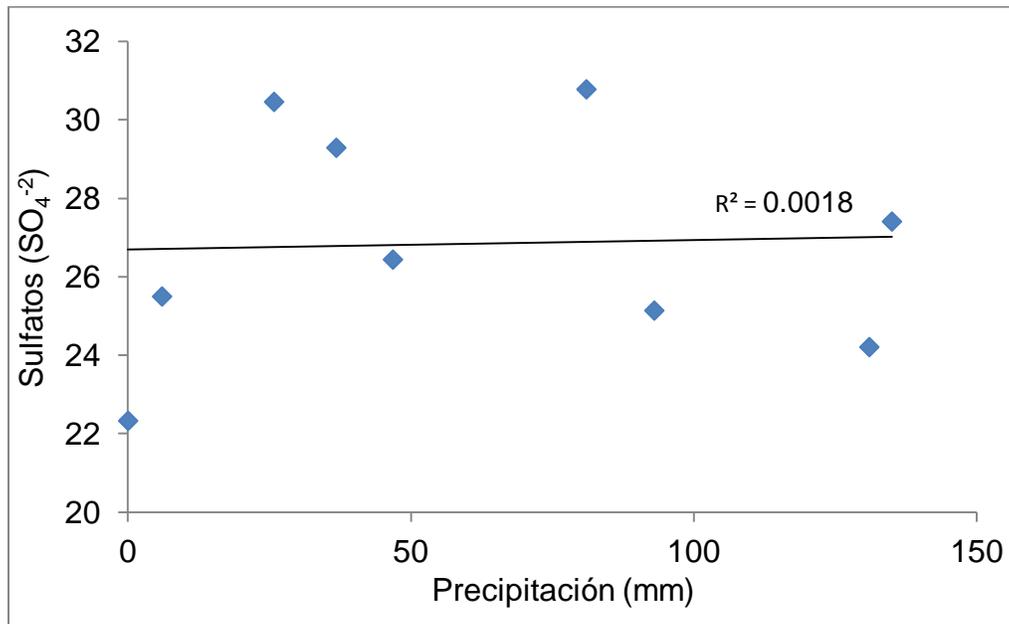


Figura 19. Correlación entre Sulfatos (SO_4^{-2}) y la precipitación mensual acumulada en época de secas del manantial El Castillo.

Al separar la época de secas y de lluvias y correlacionar los datos de sulfatos con precipitación y sulfatos con caudal se encuentra que la precipitación en época de secas no tiene relación con los sulfatos(SO_4^{-2}), mientras que el caudal con los sulfatos(SO_4^{-2}) si presenta una correlación del 68.7%. Figura 19.

Probablemente los sulfatos que se encuentran en el agua del manantial se deban a un aporte de agua residual o compuestos agrícolas infiltrados a través de las rocas que alimentan al manantial.

Cloruro (Cl^-)

El ion cloruro es uno de los iones con mayor estabilidad y sus aportaciones en el agua se deben principalmente al agua marina, a la contaminación antrópica o al agua de precipitación. Los cloruros en el manantial El Castillo, se encontraron en

concentraciones de los 17 mg/l. a 21 mg/l., valores por debajo del límite máximo permisibles que marca la NOM-127-SSA-1994, el cual es de 250 mg/L.

De acuerdo al análisis estadístico los cloruros presentan una correlación significativa con la temperatura ambiental, sin embargo esta relación no se considera importante para efectos de este estudio.

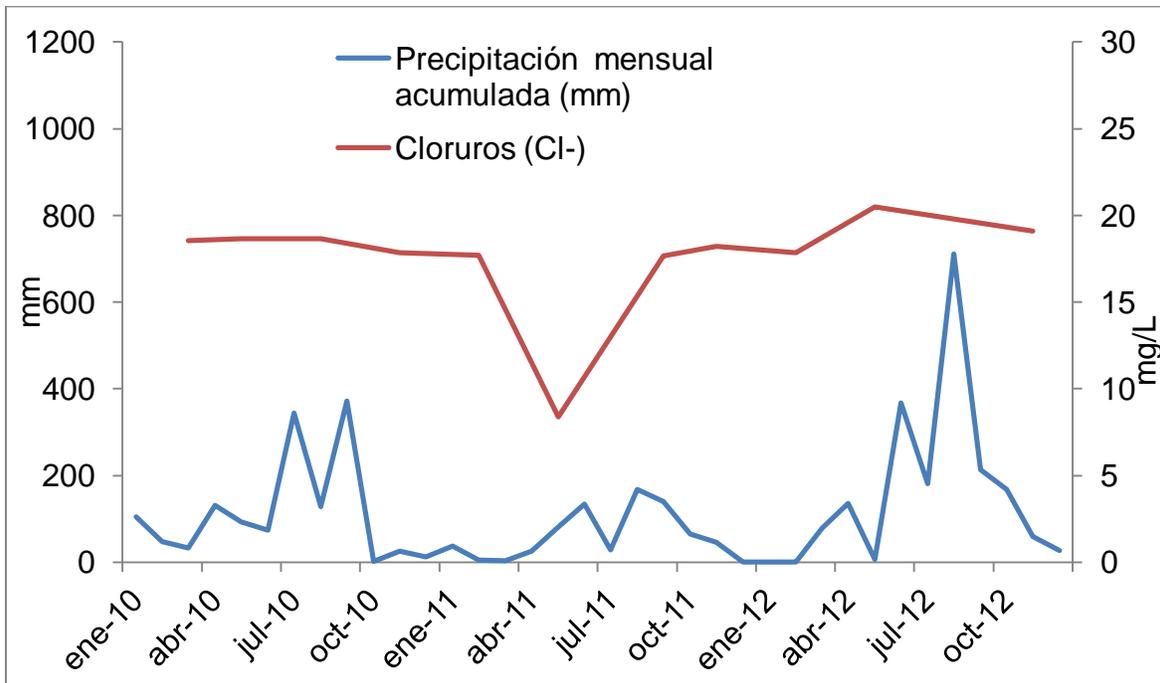


Figura 20. Relación Cloruros (Cl⁻)/precipitación mensual acumulada en el manantial El Castillo durante el periodo 2010-2012. Fuente: CMAS Xalapa (2013), INIFAP (2013).

En la figura 20 se muestra el comportamiento del ion cloruro con el tiempo y con la precipitación mensual acumulada en el mismo periodo, en general el comportamiento del ion es estable, presentando cambios no significativos de concentración en periodos cortos, sin embargo presenta una tendencia a aumentar ligeramente con el tiempo como se observa principalmente en los últimos meses.

La presencia de cloruros (Cl⁻) forma parte de la característica hidrogeoquímica del agua del manantial de acuerdo a Salas (2010), en donde define al agua del manantial EL Castillo como agua bicarbonatada cálcica con tendencia a ser clorurada sódica debido a las cantidades de cloruros presentes en el agua en comparación con los manantiales restantes de la región estudiada. Esta característica implica un cambio en la

hidrogeoquímica natural del agua del manantial, por lo que resulta de gran importancia conocer el origen de este ion cloruro para saber si el aporte y aumento se debe a los factores naturales de la infiltración y disolución de rocas o por alguna sustancia incorporada durante el proceso de recarga.

b) Nitrato (N-NO₃⁻)

El comportamiento del nitrato (N-NO₃⁻) en el manantial comienza a ser relevante. El ion nitrato (NO₃⁻) es uno de los constituyentes secundarios del agua, su presencia se relaciona, la mayoría de las veces, con la contaminación urbana.

Los nitratos (N-NO₃⁻) en el periodo 2010-2012 se encontraron en un rango de 1.3 mg/L a 12.32 mg/L. Se observa, en la Figura 21, un aumento significativo de los nitratos (N-NO₃⁻), en los últimos meses del año 2012 cruzando el límite máximo permisible de 10 mg/L para nitratos (como N), de acuerdo a la NOM- 127-SSA-1994.

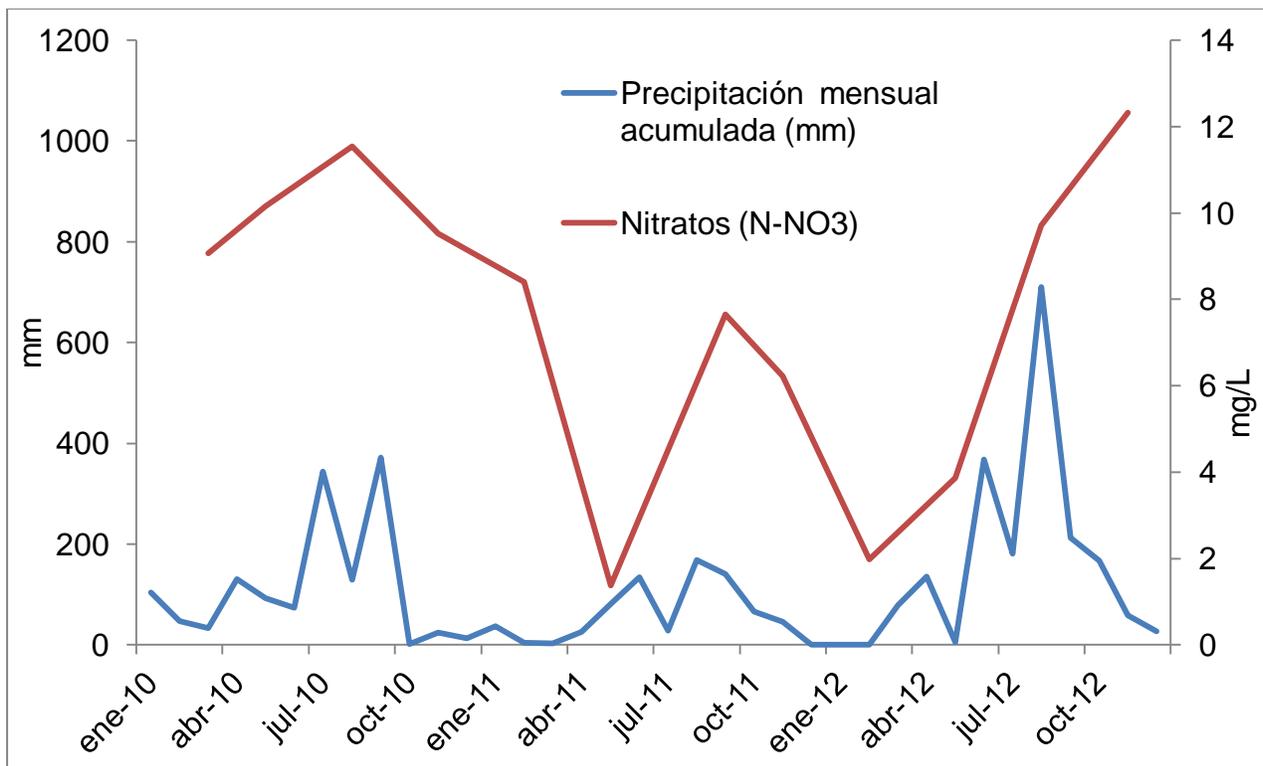


Figura 21. Relación precipitación mensual acumulada/Nitratos (N-NO₃⁻) del manantial El Castillo durante el período 2010-2012. Fuente: CMAS Xalapa 2012: INIFAP 201

Derivado del análisis estadístico no existe una correlación significativa de los nitratos (N-NO_3^-) con respecto al resto de los parámetros. Sin embargo las variaciones que se presentan presumen un deterioro ambiental posiblemente producido por las actividades antrópicas o alguna infiltración de agua residual al acuífero correspondiente al manantial. Esta misma deducción es referidas por Salas (2010) en donde de acuerdo a su análisis, el aumento de nitratos (NO_3^-) en el agua, requiere de mayor atención de estudio, pues geológicamente su presencia no es característica de la zona y los valores tan cambiantes podrían obedecer al arrastre de agua contaminada que se infiltra en el subsuelo y descarga en el manantial

La relación que presentó el caudal y el nitrato (N-NO_3^-) en la época de secas es mayor (56.95%) a la correlación resultante del análisis de Pearson, Figura 22. Esta premisa se entiende mediante el modelo conceptual ya explicado con anterioridad en donde se presume que el manantial se encuentra recargándose en la zona de Xalapa iniciando su recarga en las faldas del volcán Macuiltépetl en donde el grado de urbanización es alto y las rocas presentes en la microcuenca son de gran porosidad, por lo que cualquier derrame de aguas negras podría infiltrarse rápidamente y llegar al acuífero que alimenta al manantial.

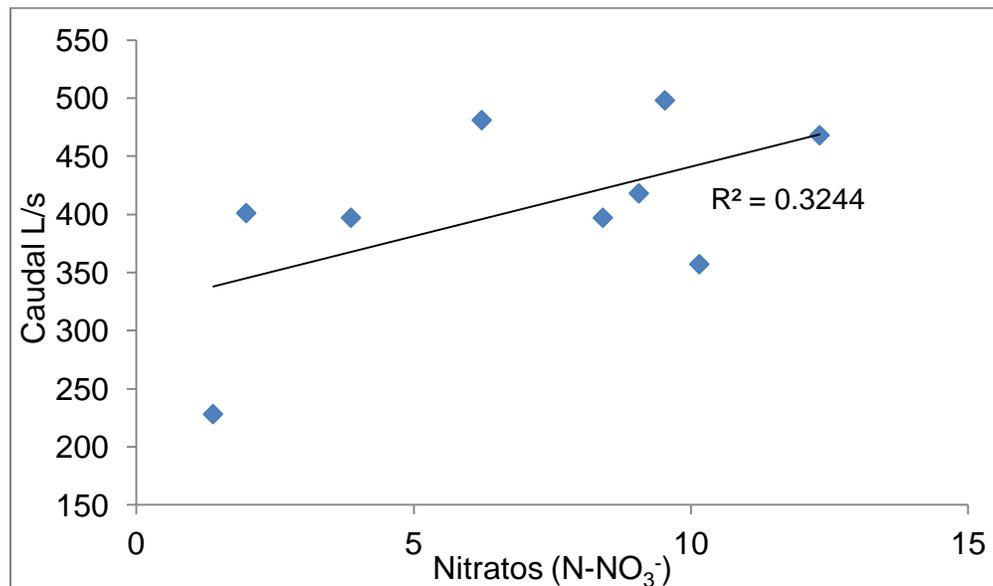


Figura 22. Relación Nitratos (N-NO_3^-) - caudal del manantial El Castillo durante la época de secas del periodo 2010-2012

El valor de N-NO_3^- obtenido por el muestreo realizado por Salas (2010) fue de 8.8mg/l (39 mg/l de NO_3^-) mientras que para mayo del 2012 y 2013 los valores obtenidos por el proyecto PCT IOEA-UV fueron de 14 mg/l (62 mg/l de NO_3^-) y de 9.9 mg/l (44 mg/l de NO_3^-) respectivamente. Estos valores se encuentran cerca 10 mg/l de N-NO_3^- (45 mg/L de NO_3^-) que corresponde al límite máximo permisible de acuerdo a la NOM- 127-SSA-1994. Estas muestras fueron tomadas en la época de secas y se encuentran en el rango determinado mediante los datos de CMAS. Por lo que es de primordial atención llevar a cabo estudios para determinar las posibles fuentes de aporte de este ion importante para la salud.

c) Coliformes

Este indicador se encuentra relacionado con la contaminación por aguas residuales y actividades antrópicas. Es un parámetro de gran importancia cuando se habla de agua para consumo humano. De acuerdo a la NOM-127-SSA-1994 el límite máximo permisible para coliformes totales y para coliformes fecales es la ausencia de éstos. En el manantial el Castillo tanto los coliformes totales como fecales se encuentran con valores que varían tanto en tiempo como en intensidad drásticamente y que sobrepasan los límites de la norma antes mencionada.

En la Figura 23, se muestra como los valores de los coliformes fecales aumentaron significativamente en periodo de secas, y en general en el último año. De acuerdo al análisis estadístico, los coliformes fecales presentaron una correlación importante con el tiempo transcurrido (59.9%), con la conductividad (62.13%) y con la dureza del agua (64.2%). La relación presentada con el tiempo es evidente en el grafico, pues en el último año, los valores de Coliformes fecales presentaron un incremento considerable en comparación con los años anteriores.

La correlación entre los coliformes fecales y conductividad de la época de secas presento un valor mayor respecto al análisis que incluye las épocas (77%), Figura 24. Si se considera que al aumentar la conductividad aumentan la cantidad de coliformes fecales, dicha relación se podría tomar como indicador de calidad de agua, sin embargo es necesario conocer más acerca de las posibles fuentes de contaminación y

si estas fuentes aportan iones solubles que aumenten la conductividad y ayuden al crecimiento bacteriológico de coliformes totales y fecales.

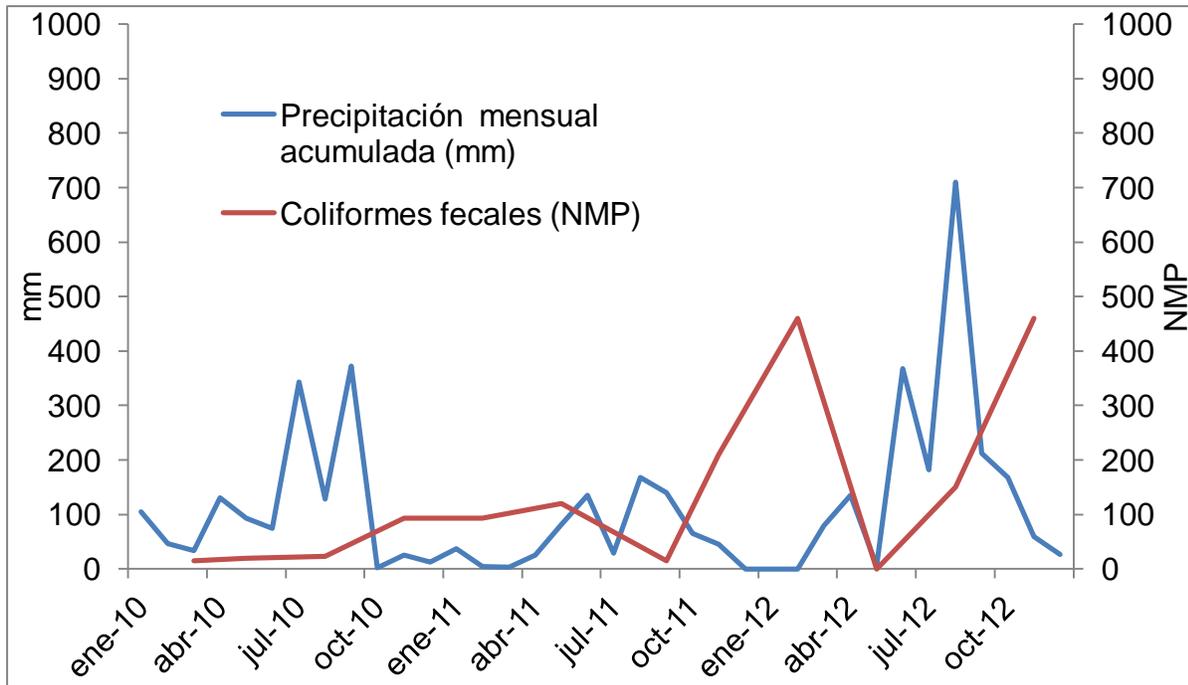


Figura 23. Relación de la precipitación mensual acumulada y Coliformes del manantial El Castillo en el período 2010-2012.

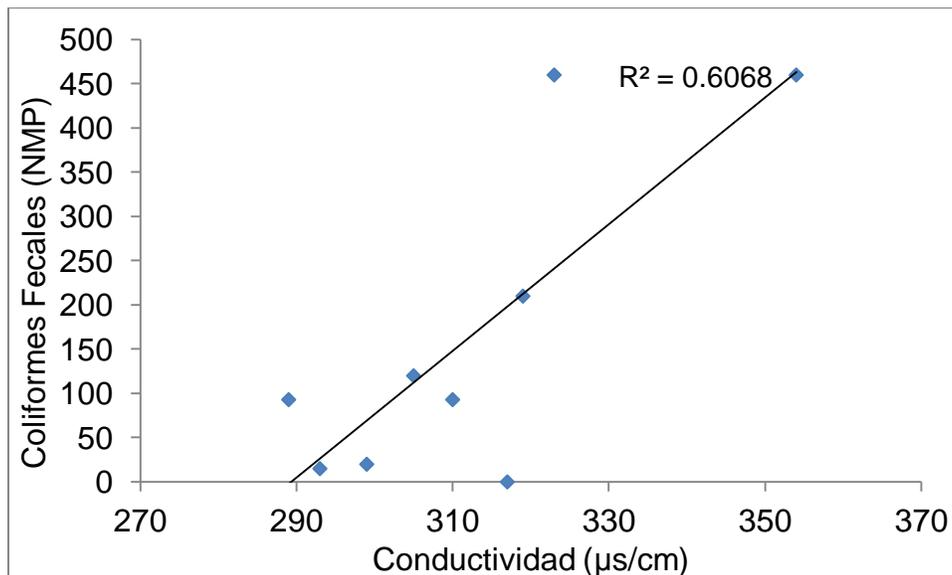


Figura 24. Correlación Coliformes fecales Conductividad en la época de secas del manantial El Castillo durante el periodo 2010-2012.

d) Conductividad

Las conductividades registradas en el manantial se encontraron en un rango de 298 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 354 $\mu\text{s}/\text{cm}$. En la Figura 25 se observa la relación temporal que existe entre la conductividad eléctrica del agua del manantial y la precipitación mensual acumulada medida en la ciudad de Xalapa. De acuerdo al análisis estadístico existe una correlación del 51.8% con respecto al tiempo por lo que, esto explica la ligera tendencia de aumento en la conductividad eléctrica del agua con el transcurrir de los años y que se observa en la Figura 25. También presenta una correlación significativa con la dureza del agua del 62.9%.

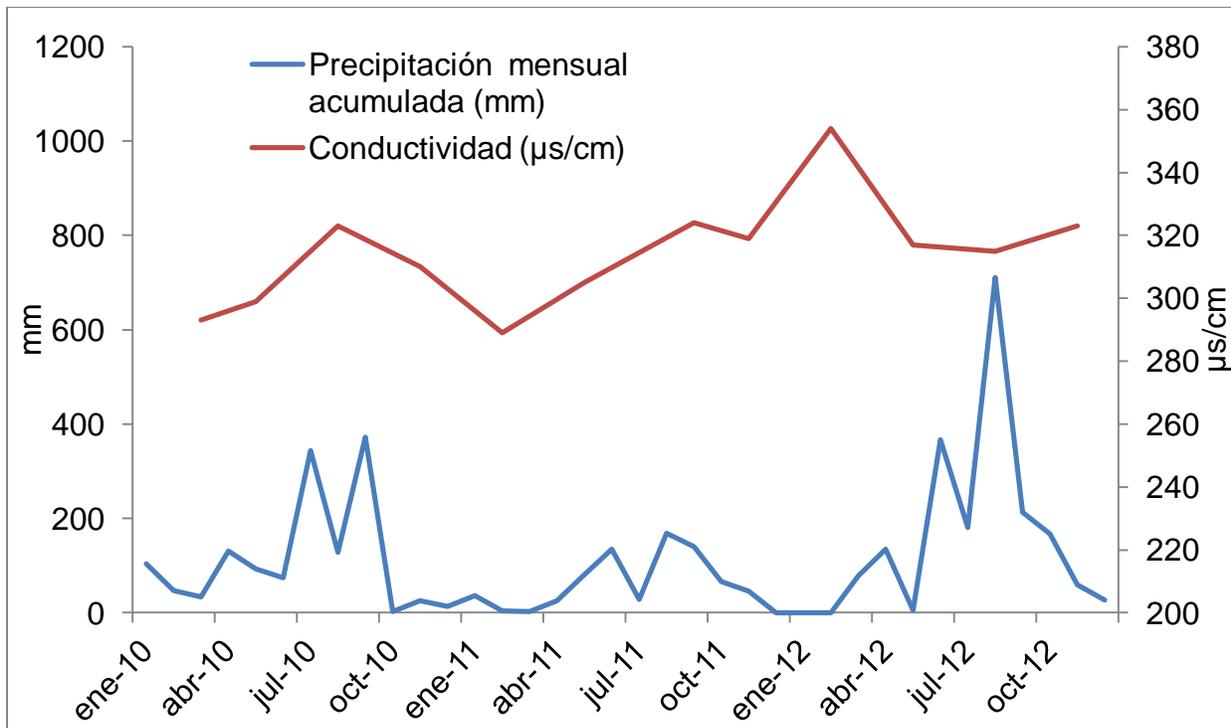


Figura 25. Relación precipitación mensual acumulada y/conductividad del manantial El Castillo durante el período 2010-2012

Este parámetro es la medición de la suma de iones disueltos en el agua, y en ocasiones se ocupa como indicador indirecto de contaminación. La dureza por su parte es producida principalmente por los iones de calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}) presentes en el agua, por lo que en la medición de la conductividad se está midiendo indirectamente parte de la dureza, debido a que se contemplan los iones disueltos de

calcio (Ca^{+2}) , magnesio (Mg^{+2}), sodio (Na^{+}), cloruros(Cl^{-}), carbonatos (CO_3^{-2}), nitratos (NO_3^{-}), sulfatos (SO_4^{-2}), potasio (K^{+}), entre otros. Por lo que si aumenta la conductividad, es razonable el aumento de la dureza, sobre todo si el aumento se debe a iones que afectan tanto a la conductividad como la dureza como son Ca^{+2} , Mg^{+2} y SO_4^{-2} . Estas suposiciones deben de estar mayormente fundamentadas en base a análisis químicos que permitan determinar cuál es la causa del aumento de la conductividad.

8.3. Monitoreo semanal del manantial El Castillo

Como resultado del monitoreo semanal registrado en la temporada de enero - junio 2013 se generó la Figura 26 basada en la Tabla C Anexo 1, en donde se muestran las variaciones de la conductividad en el periodo señalado. Los valores se hallan entre 300 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 360 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Estos valores se encuentran dentro del rango obtenido en el periodo 2010-2012, por lo que se considera que las características del agua no han cambiado en general.

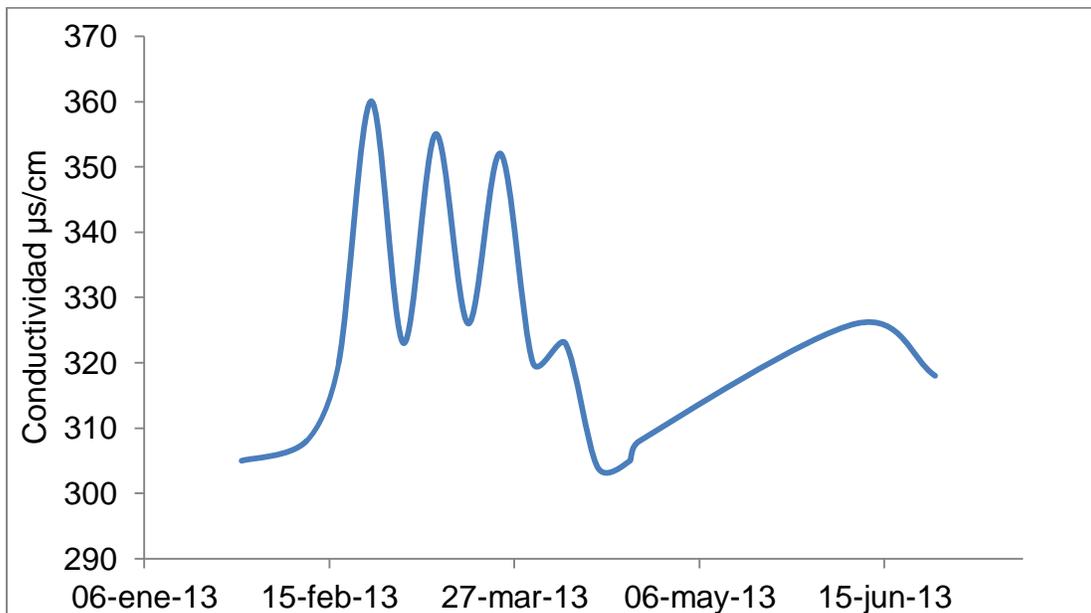


Figura 26. Conductividad eléctrica medida en el manantial El Castillo durante el periodo enero-junio 2013. En la Figura 26, se puede observar una periodicidad en los datos, salvo en el último mes debido a que no fue posible la toma de medición en el mes de mayo. Sin embargo

se puede decir que durante la época de secas la conductividad se comporta de manera uniforme respecto al rango determinado en el periodo 2010-2012.

La última medición registrada fue tomada al inicio de la época de lluvias, su valor se encontró dentro del rango medido en el periodo enero-junio, por lo que para poder determinar si existe alguna variación de conductividad en la época de secas y de lluvias, se necesita continuar con el monitoreo durante la época de lluvias.

El monitoreo semanal permitió visualizar el sistema como un sistema dinámico al encontrar variaciones de valores de conductividad eléctrica, sin embargo es importante determinar las causas de estas variaciones, considerar que la conductividad podría servir como indicador de calidad una vez que se tengan identificadas las relaciones entre estas, esto es que tanto afectan o dependen un parámetro del otro. Es una buena medida de control debido a su fácil análisis y puede brindar información acerca de los cambios que se van presentando con el tiempo.

En general se puede decir que de acuerdo al análisis realizado, el agua del manantial El Castillo cambia con el tiempo, se considera que los iones nitratos, sulfatos y cloruros en las cantidades que se registraron, son aportes no solo de la roca que forma al acuífero, sino de infiltraciones de sustancias como pueden ser aguas residuales, o de algún lavado de terreno agrícola, y que la presencia de coliformes fecales y totales, permiten ver la vulnerabilidad a la contaminación por infiltración.

9. CONCLUSIONES

El manantial El Castillo es uno de los más importantes de la región, debido al caudal significativo que porta para el suministro de agua para consumo humano.

Se determinó que existen variaciones anuales de caudal que van de los 200 L/s en temporada de secas a 1200 L/s en temporada de lluvias. De acuerdo al análisis geográfico de la microcuenca del manantial podría haber un aporte de agua precedente de las corrientes intermitentes que escurren hacia el manantial EL Castillo.

Las Figuras realizadas con la información proporcionada por CMAS Xalapa reflejan que existe una variación temporal en cada uno de los parámetros monitoreados. Aunque las variaciones durante estos años han sido mínimas, las tendencias en general de algunos parámetros es de aumentar con el tiempo (Tabla B en Anexo 1).

Mediante el análisis del comportamiento histórico de los parámetros monitoreados, se puede tener una idea más amplia sobre del funcionamiento temporal del Manantial El Castillo, por lo que es necesario la realización de análisis en periodos más cortos a los elaborados en CMAS Xalapa.

El ion Cloruro (Cl^-) y el ion Sulfato (SO_4^{-2}) son iones caracterizados por su mayor estabilidad en el agua; su rango de concentración fue de 17 mg/L a 21 mg/L. para cloruros (Cl^-) y de 25mg/L a 35 mg/L para sulfatos (SO_4^{-2}). Estas variaciones sugieren un cambio importante hidrogeológicamente en el agua.

El rango de la conductividad se encuentre entre los 300 $\mu\text{s}/\text{cm}^2$ y los 360 $\mu\text{s}/\text{cm}^2$, por su parte, la dureza fue de 80 mg/L a 100 mg/L de CaCO_3 y la alcalinidad fue de 52 mg/L a 65 mg/L. De estas propiedades se encuentra una relación con el tiempo positiva, por lo que probablemente estos valores seguirán aumentando con respecto al tiempo.

Por último y de mayor importancia en cuanto a calidad de agua, debido a la relación que tienen estos parámetros con la contaminación antrópica se encuentran los nitratos (NO_3^-) y los Coliformes totales y fecales; estos parámetros tienen eventos de variación radicales que sobrepasan los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA-1994 y su tendencia con el tiempo es la de aumentar con mayor medida que los parámetros

anteriores. Denotan un deterioro ambiental significativo que puede deberse a infiltración de aguas residuales que llegan al acuífero y descargan en el manantial de acuerdo al flujo de agua subterránea.

Con base a los resultados obtenidos, es necesario enfatizar sobre la necesidad de monitorear de forma independiente las fuentes del manantial El Castillo, principalmente datos referentes a la hidrogeoquímica del manantial. Esto permitirá identificar las posibles fuentes que pudieran estar afectando la calidad del agua subterránea.

10. GLOSARIO

Acuífero: Formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua susceptible de ser explotada en cantidades económicamente apreciables para atender diversas necesidades.

Acuífero libre: También llamado no confinado o freático. Acuífero no limitado en la parte superior por un techo impermeable de manera que existe un nivel freático a una cierta profundidad, en ellos existe una superficie libre y real del agua encerrada, que se encuentra a presión atmosférica. Su posición no es fija sino que varía en función de las épocas secas o lluvias. Si perforamos total o parcialmente la formación acuífera, la superficie obtenida por los niveles de agua de cada pozo forman una superficie real: superficie freática o piezométrica, que coinciden.

Acuífero confinado: También llamados cautivos, a presión o en carga. El agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. Esta limitado en la parte superior por un techo impermeable por lo que No existe zona no saturada. Si perforamos, el nivel de agua asciende hasta situarse en una determinada posición (nivel piezométrico) que coincide con el nivel de saturación del acuífero en el área de recarga. Estos acuíferos se recargan lateralmente

Acuífero semiconfinado: acuífero de tipo confinado que se diferencia por encuentra limitado en la parte superior por un techo el cual no es totalmente impermeable o por un acuitardo y permiten la filtración vertical del agua y, por tanto, puede recibir recarga o perder agua a través del techo o de la base.

Acuífero colgado: Se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.

Acuitardo: Es una formación geológica semipermeable, que contiene cantidades de agua apreciables que transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para la

captación de agua subterránea, sin embargo permiten una recarga vertical de otros acuíferos.

Acuícludo: Es una formación geológica poco impermeable, que conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite, por lo tanto no es posible su explotación.

Acuífugo: Son las formaciones que no pueden almacenar agua, ni transmitirla, como ocurre por ejemplo a los granitos no fisurados. No posee capacidad de circulación ni de retención de agua.

Nivel freático: se llama así a la parte superior de la zona saturada en un acuífero libre, es el nivel en donde termina la zona no saturada y comienza la zona saturada.

Nivel piezométrico: es la altura a la que se encuentra el agua según la presión, en los acuíferos confinados.

Zona saturada: zona del suelo y subsuelo en donde los intersticios y las cavidades se encuentran llenas de agua.

Zona no saturada: Medio parcialmente saturado de agua con aire en los poros. Generalmente se hace referencia a la franja que va de la superficie del terreno al nivel freático.

11. ANEXO 1

Tabla A. Datos obtenidos sobre los manantiales de la zona de Xalapa.

Nombre	Fecha de muestreo	Coordenadas geográficas			Aforo l/día	Ph	Temp agua	Conductividad $\mu\text{s/cm}$	Turbiedad	ST	SST	STD	OD	Coliformes		Fuente de información		
		Latitud norte	Longitud oeste	Altitud										Totales	Fecales			
Techacapa	09/01/96	19° 31'46.2"	96°55' 7.32"	1399	19906.2	6.75	19	326.7		300	0.85	299.15	6.91		Nd	1		
	03/05/96					6.75	24	410		330	2	328	6.15		Nd	1		
	15/07/96					6.3	18	310		210	2	208	7.21		Nd	1		
	28/08/96					6.5	23	255		303	1.43	253.58	6.5	0		Nd	1	
	2007					6--7							6.6	345	6			2
	23/06/10					6.90	20.1	352	0.35				167.0	4.73	240	240		
Tecajetes	09/01/96	19°31'58.08"	96°55'48.72"	1456	422159	7.11	16.5	534.6		300	4.25	343.46	6.91	2375	Nd	1		
	09/05/96					6.8	23	490		283.2	1	282.2	6.61		Nd	1		
	20/07/96					6.8	25	450		210	2	346.5	6.41		Nd	1		
	25/09/96					6.5	23	492.3		451	0.96	450	6.8	0	Nd	1		
	2007																	2
	24/06/10					7.11	19.3	372	0.42				122.3	4.56	93	15		
24/06/10	7.51	20	453	0.59				148.3	4.80	93	93			3				
Los Lagos	15/01/96	19°31'24.6"	96°55'26.8"			7	18	140		100	11	89	5.62		Nd	1		
	15/05/96					6.9	25	350		273.5	0.5	273	5.35		Nd	1		
	25/07/96					6.8	18	390		310	8	312	6.42		Nd	1		
	03/10/96					6.9	21	265		250.6	0.56	250	6		0	1		
Parque Juárez	20/01/96	19°31'36.12"	96°55'23.16"	1419	10963.8	7.4	20	345		170	2	168	5.63		Nd	1		
	26/05/96					7.2	25	300		194.2	0.2	194	6.5		Nd	1		
	28/07/96					7.1	28	310		260	12	248	6.42			1		
	15/10/96					7.3	19	328		293	30	290	6.4		0	1		
	2007																	2
	23/06/10							287	1.64						30	13		
Xallitic	13/02/96	19°31'53.04"	96°55'20.64"	1432	56764.8	6.8	21	300		202	2	200	7.8	145	Nd	1		
	13/05/96					6.8	18	320		281.98	0.98	281	6.9	160	Nd	1		
	29/07/96					6.2	18	410		340	12	328	6.42	160	Nd	1		
	23/10/96					6.5	23	400		375	5	370	5.8	150	0	1		
	2007																	2
23/06/10	6.46	20.4	443	1.31				153.8	3.85	93	93			3				

Universidad Veracruzana

Nombre	Fecha de muestreo	Coordenadas geográficas			Aforo l/día	Ph	Temp agua	Conductividad $\mu\text{s/cm}$	Turbiedad	ST	SST	STD	OD	Coliformes		Fuente de información
		Latitud norte	Longitud oeste	Altitud										Totales	Fecales	
Murillo Vidal	15/02/96	19°31'15.24"	96°54'23.4"	1356	291988.8	6.2	18	340		298	8	290	3.8			1
	13/05/96					6.8	18	350		312	2	310	3.5			1
	28/08/96					6.8	21	345		303	3	300	4			1
	02/11/96					6.5	23	350		312	2	310	4			1
	25/07/10					6.64	19.9	308	2.95				103.1	5.07	43	43
Manantial Las Animas	27/03/06	19°31'14.88"	96°53'10.68"	1268		7.6	20.6					6.9	A	A	4	
	24/02/13				7.1	20.5	214			319						
Castillo	19/06/08	19°32'42.36"	96°52'14.52"	1185		6.8	20	255				199.6				5
	30/06/10				6.78	20.3	325	2.43			109.0	4.57	93	93	3	
	30/06/10				6.89	20.6	328	0.69			109.8	4.22	23	23	3	
	01/07/10				6.98	20.7	330	1.71			157.0	4.87	9	4	3	
	May-12				7	19.5	316				211				6	
May-13	6.95	20.7	307				207				6					
El Chorro	2007	19° 34'15"	96° 54'7.17"		21850.60	6-7						9	33	94	2	
Casa Blanca	2007	19° 32'38.9"	96°53'18.5"		12985.20	6-7						7.9	918	9	2	
Circuito Presidentes (Protección Civil Del Estado)	04/08/10	19°30'49.68"	96° 55' 4.8"	1357		6.18	21.2	223	1.98			104.0	3.12	43	43	3
Tangerina Col Naranjal	01/07/10	19° 34' 39"	96°54'59.76"	1406		6.51	19.9	299	1.67			141.0	2.95	240	240	3
Calle Mercurio (Colinas Del Lago)	24/06/10	19°32'27.24"	96°56'51.72"	1401		6.18	20.2	93	5.06			43.0	1.60	240	240	3
Del Nacimiento Col Higueras	28/07/10	19° 33' 8.28"	96° 53' 3.12"	1217		6.4	20.8	336	0.56			112.8	1.15	9	9	3
	17/02/13				6.4	20.4				220						
Dos Arbolitos Col Higueras	28/07/10	19°33'14.76"	96°53' 4.56"	1254		6.45	20.4	217	1.79			72.8	4.48	9	9	3
	17/02/13				6.5	19.8				233						
Andador 2 Esq. Río Amazonas Col Moral	28/07/10	19° 34' 9.12"	96°54'43.2"	1390		6.69	20.8	445	0.39			139.5	3.64	93	93	3
Av. Monte Everest Col Higueras	01/09/10					6.88	19.9					107.90	3.72			3
	17/02/13			1267		6.70	19.5						294			

Universidad Veracruzana

Continuación de Tabla A. Resumen de los datos obtenidos en tesis sobre los manantiales de la zona de Xalapa

Nombre	Fecha De Muestreo	DBO5	Alcalinidad (CaCO ₃)	Dureza(CaCO ₃ MI/L)			Calcio Ca ⁺²	Magnesio Mg ⁺²	Sodio Na ⁺	Potasio K ⁺	Bicarbonato HCO ₃ ⁻	Cloruros Cl ⁻	Sulfatos SO ₄ ⁻²	Nitratos NO ₃ ⁻	Fuente De Info. Ver Tabla Anexa
				Ca ⁺²	MG ⁺²	TOTAL									
TECHACAPA	09/01/1996		88.46	57.7	32.7	90.38	23.07	7.95	29.75	12	107.85	18.59	35.93		1
	03/05/1996	<0.05	90	70	30.15	100.15	28.02	7.24	30	11	109.8	25			1
	15/07/1996	<0.05	66.5	48.27	8.21	56.48	19.31	1.97	30.5	1		20.2			1
	28/08/1996	<0.05	77.5	52.99	20.46	73.45	21.19	4.96	30.12	6.5	96	19.39			1
	2007					80.1									
	23/06/2010				92.0										3
TECAJETES	09/01/1996		150	53.84	86.53	140.4	21.54	21.04	30.05	10.05	183	17.57	56.7		1
	09/05/1996		150	109	59	168	43.64	14.16	28	9	183	32			1
	20/07/1996		190	84.76	16.14	100.9	3.94	3.87	26	8.75	109.8	29.57			1
	25/09/1996	<0.05	120	85.64	35.14	120.8	27.74	12.46	28.02	9.4	135	24.57			1
	24/06/2010					108.0									3
	24/06/2010				127.6									3	
LOS LAGOS	15/01/1996	1.65	51	29.16	22.91	52.07	11.62	5.5	1.09	0.28	61	8.2			1
	15/05/1996		130	8.16	80	140	32.02	14.4	25	9	156	36			1
	25/07/1996	1	114	98.52	37.44	135.96	39.45	8.98	23	8.75	139.08	22.91			1
	03/10/1996	7.5	82.5	63.84	30.18	94.02	25.54	7.24	12.04	4.51	105	15.55			1
PARQUE JUÁREZ	20/01/1996	9.06	92	64.58	27.08	91.66	25.86	6.5	1.83	0.72	112.24	8.2			1
	26/05/1996	9.03	90	58.63	47.87	106.5	23.48	11.49	19	5	109.8	23			1
	28/07/1996	1	79.8	59.11	23.65	82.76	23.66	5.68	23	12	97.17	22.17			1
	15/10/1996	<0.05	86	61.85	25.37	87.22	24.76	6.09	12.42	6.36	101	15.18			1
	23/06/2010					62.0								3	
XALLITIC	13/02/1996	5.22	130	84.18	118.71	202.89	33.7	8.4	28.5	15	156	24.83			1
	13/05/1996	5.3	130	93	40	133	37.24	9.6	30	16	156	31			1
	29/07/1996	1	79.8	88.67	29.55	118.22	35.5	7.09	32.5	16.75	97.36	41.39			1
	23/10/1996	4.6	105	86.43	32	118.4	34.6	8.15	30.5	15.88	12.3	33.11			1
MURILLO VIDAL	15/02/1996	<0.05	53.2	42.82	18.4	61.22	14.7	4.42	26.5	13	64.9	21.68			1
	13/05/1996	12	140	44	21	65	17.61	5.04	2.5	11		25			1
	28/08/1996	9.08	96.6	43.41	19.7	63.11	16.16	4.73	25.75	12	100	23.5			1
	02/11/1996	8.9	75	43.11	19	62.11	62.2	15.43	4.57	26.12	98	15			1
	25/07/2010					78.8								3	
MANANTIAL LAS ANIMAS	27-mar-06											83.9			4

Universidad Veracruzana

Nombre	Fecha De Muestreo	DBO5	Alcalinidad (CaCO ₃)	Dureza(CaCO ₃ MI/L)			Calcio Ca ⁺²	Magnesio Mg ⁺²	Sodio Na ⁺	Potasio K ⁺	Bicarbonato HCO ₃ ⁻	Cloruros Cl ⁻	Sulfatos SO ₄ ²⁻	Nitratos NO ₃ ⁻	Fuente De Info. Ver Tabla Anexa	
				Ca ⁺²	MG ⁺²	TOTAL										
CASTILLO	19/06/2008						19.9	7.01	20.6	5.4	65	19.86	26.2	39.19	5	
	30/06/2010														3	
	30/06/2010														3	
	01/07/2010														3	
	May-12			53				22.98	8.13	22.45	6.35		22.25		61.96	6
	May-13			46				20.3	9.4	24	6.1	69.36	19.1	27.68	44.07	6
Casa blanca	2007														2	
Circuito Presidentes (Protección civil del Estado)	04/08/2010														3	
Tangerina,col Naranjal	01/07/2010														3	
Calle Mercurio (costado del Fracc. Colinas del Lago) Coapexpan	24/06/2010														3	
Del Nacimiento col Higueras	28/07/2010														3	
Dos Arbolitos col Higueras	28/07/2010														3	
Andador 2 esq. Río Amazonas col Moral	28/07/2010														3	
Av. Monte Everest col Higueras	01/09/2010														3	

FUENTES

- | | |
|---|--|
| <p>1 Clemente, M. A. y Paredes, D. C. (1997).</p> <p>2 Contreras <i>et al.</i> (2007).</p> <p>3 CMAS 2012</p> | <p>4 Hernández <i>et al.</i>, (2006)..</p> <p>5 Salas, (2010).</p> <p>6 Proyecto PCT OIEA-UV</p> |
|---|--|

Universidad Veracruzana

Tabla B. Precipitación, aforos y parámetros medidos al Manantial de El Castillo durante el período de 2010-2012. Fuente: CMAS e INIFAP.

Fecha	Promedio mensual (l/s)	pH	Temp del agua (°C)	Temp ambiente (°C)	Conductividad (µs/cm)	Alcalinidad total (mg/l de CaCO ₃)	Cloruros (Cl ⁻)	Dureza total (mg/l de CaCO ₃)	Nitratos (N-NO ₃)	Sulfatos (SO ₄)	Coliformes totales (NMP)	Coliformes fecales (NMP)	Prec. mensual (mm)	T. Med. (°C)
Ene 2010	441												104.4	12.42
Feb-2010	457												46.8	13.48
Mar-2010	418	6.5	19	23	293	56.68	18.55	81	9.06	26.44	43	15	33.2	15.39
Abr-2010	402												131	18.87
May-2010	357	7	19	27	299	61.59	18.67	84.46	10.15	4.21	150	20	93	20.89
Jun-2010	471												74.2	21.09
Jul-2010	755												343.4	19.78
Ago-2010	701	7	14	23	323	58.98	18.66	86.05	11.54	29.4	93	23	128.6	19.66
Sep-2010	1327												372.2	19.37
Oct-2010	1104												2.2	17.35
Nov-2010	498	7	17	23	310	65.93	17.86	84.74	9.53	25.14	210	93	25	16.3
Dic-2010	448												12.8	13.87
Ene-2011	356												36.8	15.21
Feb-2011	397	7	19	25	289	53.83	17.7	80.88	8.41	29.29	460	93	4.2	15.65
Mar-2011	397												2.8	18.26
Abr-2011	312												25.8	21.53
May-2011	228	7	19	30	305	52.99	8.39	84.48	1.38	30.46	210	120	81	21.64
Jun-2011	421												134.6	19.28
Jul-2011	607												28.6	19.28
Ago-2011	812												168.2	19.63
Sep-2011	734	7	19	23	324	59.85	17.67			29.26	460	15	140	19.18
Oct-2011	559												65.6	16.84
Nov-2011	481	7	18	21	319	57.05	18.2	92.82	6.226	30.78	>2400	210	45.4	16.98

Universidad Veracruzana

Fecha	Promedio mensual (l/s)	pH	Temp del agua (°C)	Temp ambiente (°C)	Conductividad (µs/cm)	Alcalinidad total (mg/l de CaCO ₃)	Cloruros (Cl ⁻)	Dureza total (mg/l de CaCO ₃)	Nitratos (N-NO ₃)	Sulfatos (SO ₄)	Coliformes totales (NMP)	Coliformes fecales (NMP)	Prec. mensual (mm)	T. Med. (°C)
Dic-2011	473												0	14.8
Ene-2012	455												0	15.03
Feb-2012	401	6.68	18	23	354	53.24	17.86	90.64	1.979	22.33	1100	460	0	16.49
Mar-2012	354												78.8	17.77
Abr-2012	475												134.99	18.29
May-2012	397	6.87	20	24	317	63.21	20.48	91.49	3.868	27.41	11	0	6	19.91
Jun-2012	481												367.4	19.75
Jul-2012	707												181.4	18.67
Ago-2012	920	6.86	20	22	315	64.8	19.78	93.14	9.716	34.83	>2400	150	710.4	19.43
Sep-2012	859												212.8	19
Oct-2012	783												167.4	17.63
Nov-2012	468	6.89	19	20	323	60.55	19.08	98.66	12.32	5.5	1100	460	58.8	15.23
Dic-2012	457												27	15.57

Tabla C. Datos obtenidos del monitoreo semanal al manantial El Castillo en el período de enero - junio 2013.

FECHA	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			pH	TEMPERATURA °C	CONDUCTIVIDAD μs/cm	STD ppm
	x	y	Z				
27/01/2013				6.97	19.5	305	204
10/02/2013				7	19.6	308	207
17/02/2013				6.9	19.4	321	215
24/02/2013				7	19.7	360	223
03/03/2013				7.14	19.4	323	217
10/03/2013				7	19.7	356	238
17/03/2013				6.99	19.76	325	218
24/03/2013	722823	2162564	1192	6.84	19.6	352	236
31/03/2013				6.8	19.76	317	212
07/04/2013				6.8	19.6	322	216
14/04/2013				7.08	19.7	304	203
21/04/2013				6.94	19.7	304	203
23/04/2013				6.95	20.6	308	206
09/06/2013				6.9	19.7	326	218
26/06/2013				6.8	19.9	318	213

12. ANEXO 2



Figura 27. Manantial El Nacimiento. Colonia Higueras.



Figura 28. Manantial Dos Arbolitos. Colonia Higueras



Figura 29. Manantial de la calle Monte Everest. Colonia Higueras



Figura 30. Manantial por la calle Tangerina. Colonia Naranja



Figura 30. Manantial El Castillo. Punto de bombeo de CMAS Xalapa.



Figura 31. Parte del sistema geológico del manantial El Castillo.



Figura 32. Participación en el muestreo del proyecto PCT OIEA-UV 2013.



Figura 33. Surgimiento del manantial El Castillo. Manantial 1

13. TRABAJOS CITADOS

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington D.C., E.U.A. Obtenido de http://www.mwa.co.th/ewtadmin/ewt/mwa_internet_eng/ewt_dl_link.php?nid=223

Azcoitia, F. X. (1943). *Reseña de la Ciudad de Xalapa*. Xalapa.

Capitanachi, C. (2008). *Las Unidades Ambientales urbanas de Xalapa* (Vol. I). Veracruz: Universidad Veracruzana. Pag 10-45.

Clemente Mendoza, A., & Paredes Delgado, C. (1997). Calidad de los Manantiales de la Ciudad de Xalapa, Ver. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 110 pp

CONAGUA. (2007). *Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2012, de:

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/05 DatosBasicos.pdf>

CONAPO. (2013). *Indice de Marginacion por Localidad 2010*. Obtenido de Consejo nacional de Poblacion:

http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010

Contreras Gutiérrez, E., Ledezma Santos, A., & Tabon Osario, A. (2007). Análisis de los manantiales de Xalapa, para su posible uso público urbano. Tesis de especialidad en Diagnóstico y Gestión Ambiental, Facultad de Ingeniería Química. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 81 pp.

Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea* (Vol. I). Barcelona, España: Omega. Cap. 4.2, 5.2, 10

Davis, S. N., & De Wiest, R. J. (1971). Hidrogeología. Barcelona, España.: Ediciones Ariel. Pag. 66-109, 118-135, 138-174.

Fagundo, J. R. (1990). *Evolución Química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los Factores Geológicos, Hidrológicos y ambientales*. Granada, España. Pag. 18-46.

Fagundo, J. R., & Beato, M. O. (2013). *Hidrogeoquímica e Hidrología Isotópica*. Recuperado el 29 de Enero de 2013, de:

<http://www.fagundojr.com/documentos/Hidrogeoquimica%20e%20Hidrologia%20Isotopica.pdf>

FCIHS, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. (2009). *Hidrología. Conceptos Básicos de Hidrología subterránea*. Barcelona, España: FCIHS. Pag 184-188, 274-276.

Flores, I. N. (Enero-abril de 2009). Agua subterránea, el agua que no vemos. La ciencia y el hombre, XXII(1). Recuperado el Marzo de 2013, de: <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol22num1/articulos/agua/>

Gomelia, C., & Guerrée, H. (1982). *La distribución del agua en las aglomeraciones urbanas y rurales*. Barcelona, España: Editores técnicos y asociados, S.A. Pag. 4-19.

González de Cossio, F. (1957). *Xalapa, breve reseña histórica*. México: Talleres Gráficos de la Nación. 488 pp.

González Hernández, A. (2009). *Descripción de los manantiales con mayor descarga en los municipios de Coatepec, Xalapa y Xico, Ver. México*. Tesis de licenciatura en Geografía, Facultad de Economía. Universidad Veracruzana, UV. Xalapa, Ver. 81pp.

Hernández Domínguez, L., Hernández Flores, T. A., Piedra Castillo, K., & Piedra Castillo, L. (2006). Diagnóstico de la microcuenca del manantial de "Las Animas" en Xalapa Veracruz, México. Tesis de especialidad en Diagnóstico y Gestión ambiental, Facultad de Ingeniería química. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 73 pp.

- INEGI. (2013). *México en cifras*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/>
- INIFAP. (2013). *Estaciones agroclimáticas*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias: <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/estaciones.aspx>
- Lopez-Geta, J. A., Fornes A., J. M., Ramon G., G., & Villarroya G., F. (2009). *Las Aguas Subterráneas. Un recurso natural del subsuelo*. Madrid, España: Instituto Minero de España. Pag. 11-28, 82-89.
- Maderey Rascón, L. E. (1967). *Aguas subterráneas en México*. México: Instituto de geografía de la UMAN. Pag. 11-17.
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. España: Reverté-UNAM. 640pp.
- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Madrid, España: Mundi- Prensa. Pag. 19-21,75-80,165-182,192-200.
- Mateos Ruíz, R. M., & González Casanova, C. (Coord). (2009). *Los caminos del agua de las Islas Balearias. Acuíferos y Manantiales*. Madrid, España: Instituto Minero de España y Conselleria de Medi Ambient del Govern de les Illes Balears. Pag. 68-45, 88-98.
- MDGIF, Gobierno del Estado de Veracruz. (2011). *Resultados obtenidos en materia de gestión de riesgos y adaptación al cambio climático en el sector hídrico en la ciudad de Xalapa, Veracruz*. Recuperado el 26 de Febrero de 2013, de <http://187.174.252.244/caev/pdfs/ONU/Habitat/Reporte%20final%20Riesgos%20y%20ACC%20Xalapa.pdf> 98 pp.
- Millares Valenzuela, A. (2006). *Estudio Hidrogeológico para la Gestión Integrada de la Cuenca del Río Guadalfeo (Granada)*. Granada, España: GDFA-Universidad de Granada. Recuperado el 28 de diciembre de 2012, de

http://www.cuencaguadalfeo.com/archivos/Guadalfeo/Libros/DEA_Agustin_Millar.es.pdf

Mook, W. G. (Ed.). (2001). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: Principios y Aplicaciones*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España. 596 pp.

Nelly, L. F. (2009). *Los debates y las batallas por el agua en Xalapa (1838-1882)*. México: Universidad Veracruzana. 300 pp.

ONU. (2007). *UNESCO*. Recuperado el 3 de Marzo de 2013, de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001495/149519S.pdf>

ONU y OMS. (2011). *El Derecho al Agua*. Recuperado el 8 de Marzo de 2013, de: <http://www.ohchr.org/Documents/Publications/FactSheet35sp.pdf>

Pérez Quezadas, J., Cortes Silva, A., Salas Ortega, R., Carrillo Chávez, A., & Pérez Sesma, A. (2012). *Características hidrogeoquímicas de los manantiales cercanos a Xalapa Veracruz y su relación con el agua meteórica local*. Campeche.

Price, M. (2003). *Agua Subterránea*. México: Limusa, Noriega Editores. Pag. 71-81,101-110,173-182,230-244.

Rondán Pérez, G. A. (2003). *Bioindicación de la calidad de agua en Colombia: Uso del método BMWP/Col*. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. Pag. 1-9

Salas Ortega, R. (2010). *Estudio geológico e hidrológico de un sistema de manantiales en la región de Xalapa, Veracruz*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México. D.F,México. 82 pp.

SEMARNAT, CONAGUA, & IMTA. (2005). *Plan para la Gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca de Valle de Bravo, Estado de México*. Obtenido de:<http://www.cuencaamanalcovalle.org/doctosn/05%20Anexo%20A%20Caracterizacion%20Organismos%20del%20Agua.pdf>

UN WATER. (2011). *Water quality*. Recuperado el 27 de Abril de 2013, de UN WATER:
http://www.unwater.org/downloads/waterquality_policybrief.pdf. Pag 34

USGS. (2013). United State Geological Survey. Recuperado el 19 de Enero de 2013, de
<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html#infiltration>.