



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Evaluación de la calidad del agua potable en Acámbaro y
Jerécuaro, Guanajuato**

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

presenta el

Ing. Anibal Sol Benitez

Directora de Tesis:

Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva

Codirector de Tesis:

Dr. Raúl Cortes Martínez

Morelia, Michoacán, abril del 2013

CARTA DE ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEL TRABAJO FINAL DE TESIS

**Dedico este trabajo a mi Padre J.G. Sol por ser mi inspiración, y a mi Madre
M.G. Benitez por su inagotable amor y cuidado. A mis hermanos Martín, Indira y
Emilia, a Paola.**

Este trabajo se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Químico Biológicas (IIQB) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, bajo la dirección de la Doctora Ruth Alfaro Cuevas Villanueva y la codirección del Doctor Raúl Cortes Martínez.

Agradezco a las autoridades de las instituciones involucradas por las facilidades brindadas para la realización de esta tesis.

Agradezco a CONACyT su apoyo económico brindado por medio de una beca.

Y el Apoyo a Redes de PROMEP dentro del Cuerpo Académico UMSNH-CA-167

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora la Doctora Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por el tiempo, apoyo y esfuerzo brindado para llevar a buen término este trabajo de tesis.

Al Dr. Raúl Cortes Martínez, Dr. Julio César Orantes Ávalos, M.C. Gabriel Martínez Herrera, Dra. Maricela Villicaña Méndez por sus observaciones y enseñanzas.

Al Ingeniero Jesús Edgar Delgado Ramírez gerente del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Acámbaro, por su cooperación para la realización de este proyecto.

Al Técnico Jesús Mora Martínez del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Acámbaro, por su asistencia en campo.

Al Ingeniero Juan Rangel Camarena por el apoyo en las determinaciones fisicoquímicas y bacteriológicas que se realizaron en la Comisión Nacional del Agua.

Al M.C. Benjamín Villalobos Castañeda por su indispensable ayuda y guía.

A mi Familia por ser siempre pilar en mi crecimiento personal y profesional.

A la Arquitecta Paola Villanueva Macías por su cariño y comprensión.


Al M.C. José Roberto Anguiano Valencia por la colaboración y auxilio en el manejo de software

A mis amigos de generación por ser una excelente e inmejorable compañía

CONTENIDO

CONTENIDO.....	i
LISTA DE TABLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN.....	2
2. GENERALIDADES.....	4
2.1 EL AGUA	4
2.1.1 Tipos de aguas	5
2.2 PARÁMETROS FÍSICOS.....	7
2.3 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	8
2.4 COMPONENTES MAYORES	10
2.5 PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS	11
2.6 METALES PESADOS	12
2.7 ARSÉNICO	13
2.8 FLÚOR	15
3. ANTECEDENTES.....	17
3.1 ARSÉNICO	18
3.1.1 El mundo	18
3.1.2 Latinoamérica	20
3.1.3 México.....	22
3.1.4 Problemas de salud.....	22
3.2 FLÚOR	25
3.2.1 El mundo	26
3.2.2 Latinoamérica	28
3.2.3 México	28
3.2.4 Salud.....	29
4. OBJETIVO GENERAL	31
5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	32

5.1	ACÁMBARO	32
5.2	JERÉCUARO	33
5.3	ACUÍFEROS	34
5.3.1	Acuífero Valle de Acámbaro	34
5.3.2	Acuífero Lago de Cuitzeo.....	37
5.4	GEOLOGÍA.....	39
5.5	HIDROLOGÍA	41
6.	METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	42
6.1	LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO.....	42
6.2	TOMA DE MUESTRAS	45
6.2.1	Material y equipo.....	47
6.3	ANÁLISIS DE PARÁMETROS	48
6.3.1	Parámetros fisicoquímicos.....	48
6.3.2	Componentes mayores.....	48
6.3.3	Parámetros bacteriológicos.....	49
6.3.4	Metales pesados	49
6.3.5	Arsénico.....	49
6.3.6	Flúor	49
6.4	DIAGRAMA DE PIPER	49
6.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	52
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
7.1	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	53
7.2	COMPONENTES MAYORES	56
7.3	PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS	58
7.4	METALES PESADOS	59
7.5	ARSÉNICO	61
7.6	FLÚOR	62
7.7	DIAGRAMA DE PIPER	63
7.8	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	65
7.8.1	ANOVA y comparación de medias (Tukey-Kramer) entre sitios	65
7.8.2	ANOVA y comparación de medias (Tukey-Kramer) entre periodos.....	77



7.8.3	Análisis de correlación multivariada	77
8.	CONCLUSIONES	80
9.	RECOMENDACIONES	82
10.	BIBLIOGRAFÍA	83
11.	ANEXOS	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los sitios de toma de muestra.....	43
Tabla 2. Toma, preservación y almacenamiento de muestras de agua potable según las normas mexicanas.....	46
Tabla 3. Material y equipo requerido para realizar las determinaciones <i>in situ</i> y laboratorio.	47
Tabla 4. Valores obtenidos de temperatura (T), pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), salinidad (S), sólidos disueltos totales (SDT), dureza total (DT) y alcalinidad total (AT) realizados a las muestras de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.	53
Tabla 5. Resultados de la medición de componentes mayores realizados en las muestras de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.	56
Tabla 6. Resultados de los análisis de coliformes fecales realizados a las muestras de agua de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.	58
Tabla 7. Resultados de los análisis de arsénico y hierro realizados a las muestras de agua de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.	59
Tabla 8. Coeficientes de correlación mayor o igual a 0.76 de los parámetros.	78
Tabla 9. Resultados del balance de componentes mayores realizados en las muestras de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato	112
Tabla 10. Análisis de varianza realizado a parámetros fisicoquímicos	114




Tabla 11. Comparación de medias en parámetros fisicoquímicos utilizando Tukey-Kramer	116
Tabla 12. Matriz de correlación fuerte positiva de los parámetros fisicoquímicos.....	120
Tabla 13. Matriz de correlación fuerte negativa de los parámetros fisicoquímicos.	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Países afectados por la presencia de arsénico en agua potable (Halem <i>et al.</i> , 2009).....	18
Figura 2. Presencia de fluoruros en agua subterránea en varias partes del mundo (Brindha y Elango, 2011).	28
Figura 3. Macrolocalización y microlocalización del Municipio de Acámbaro, Guanajuato (INEGI, 2011).....	32
Figura 4. Macrolocalización y microlocalización del Municipio de Jerécuaro, Guanajuato (INEGI, 2011).....	33
Figura 5. Localización del acuífero Valle de Acámbaro (CNA, 2011a).....	34
Figura 6. Localización del acuífero Lago de Cuitzeo (CNA, 2011b).....	37
Figura 7. Geología de la zona de estudio (COTAS, 2010).....	39
Figura 8. Hidrología de los Municipios de Acámbaro y Jerécuaro (CNA, 2009).....	41
Figura 9. Localización de los sitios de toma de muestra en el Estado de Guanajuato (INEGI, 2009; INEGI, 2009a).....	43
Figura 10. Sitio S1 (Cútaró).	44
Figura 11. Sitio S2 (Palo Blanco).....	44
Figura 12. Sitio S3 (Jaripeo).....	44
Figura 13. Sitio S4 (La Merced).....	44
Figura 14. Sitio S5 (Cazuelejas).....	44
Figura 15. Sitio S6 (Abejitas).....	44

Figura 16. Diagrama trilinear de Piper que es usado para trazar los resultados de los estudios de la química del agua (Hiscock, 2005).	50
Figura 17. Sistema de clasificación hidroquímica para aguas naturales usando el diagrama trilinear de Piper (Hiscock, 2005).....	51
Figura 18. Diagrama de Piper para la clasificación del tipo de agua en pozos y manantiales.	63
Figura 19. Análisis de una vía y comparación de medias para la temperatura por sitios.	66
Figura 20. Análisis de una vía y comparación de medias para la turbiedad por sitios.	67
Figura 21. Análisis de una vía y comparación de medias para la conductividad eléctrica por sitios.....	67
Figura 22. Análisis de una vía y comparación de medias para la los sólidos totales por sitios.....	68
Figura 23. Análisis de una vía y comparación de medias para la los sólidos disueltos totales por sitios.	68
Figura 24. Análisis de una vía y comparación de medias para la dureza total por sitios.	69
Figura 25. Análisis de una vía y comparación de medias para la alcalinidad total por sitios.	69
Figura 26. Análisis de una vía y comparación de medias para cloruros por sitios.....	70
Figura 27. Análisis de una vía y comparación de medias para bicarbonatos por sitios.	70
Figura 28. Análisis de una vía y comparación de medias para calcio por sitios.	71
Figura 29. Análisis de una vía y comparación de medias para magnesio por sitios.	71
Figura 30. Análisis de una vía y comparación de medias para sodio por sitios.	72




Figura 31. Análisis de una vía y comparación de medias para oxígeno disuelto por sitios. 73	
Figura 32. Análisis de una vía y comparación de medias para pH por sitios. 73	
Figura 33. Análisis de una vía y comparación de medias para sólidos suspendidos totales por sitios. 74	
Figura 34. Análisis de una vía y comparación de medias para sulfatos por sitios. 74	
Figura 35. Análisis de una vía y comparación de medias para carbonatos por sitios. 75	
Figura 36. Análisis de una vía y comparación de medias para arsénico por sitios. 75	
Figura 37. Análisis de una vía y comparación de medias para arsénico por sitios. 76	
Figura 38. Análisis de una vía y comparación de medias para flúor por sitios. 77	

RESUMEN

En varios acuíferos de México se han detectado concentraciones de arsénico y flúor por arriba del límite máximo establecido por los estándares nacionales, ocasionando problemas de la salud a la población que usa y consume el agua. Los acuíferos del Valle de Acámbaro y del Lago de Cuitzeo se encuentran en la subregión media del río Lerma que presenta contaminación de arsénico y flúor de origen natural debida a la geología de tipo volcanosedimentaria, sedimentaria e ígnea intrusiva y extrusiva.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la concentración de arsénico y flúor en el agua potable de 4 pozos y 2 manantiales que abastecen a los Municipios de Acámbaro y Jerécuaro en Guanajuato; y para ello se determinaron los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, así como metales pesados. Las muestras se tomaron en 4 periodos del año: diciembre 2011, enero, abril y agosto 2012.

La composición del agua varía entre sitios, la del pozo S1 (Cútaró) y de los manantiales S5 (Cazuelejas) y S6 (Abejitas) se clasificó como $\text{HCO}_3^- \text{-Na}^+$ mientras que la del pozo S2 (Palo Blanco) fue del tipo $\text{HCO}_3^- \text{-Mg}^{2+} \text{-Ca}^{2+} \text{-Na}^+$, la del pozo S3 (Jaripeo) fue $\text{HCO}_3^- \text{-Na}^+ \text{-Ca}^{2+} \text{-Mg}^{2+}$ y del tipo $\text{HCO}_3^- \text{-Na}^+ \text{-Mg}^{2+} \text{-Ca}^{2+}$ para el pozo S4 (La Merced).

Los resultados mostraron que la concentración de flúor y arsénico en agua sobrepasa los límites máximos establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 en un 83% y 66% de las muestras respectivamente, por lo que se recomienda no usarla para consumo debido al riesgo de contraer enfermedades relacionadas a estos contaminantes.

El rango de flúor fue de 0.9 a 21.2 mg/L siendo Cazuelejas el sitio con mayor concentración, y en general los manantiales presentaron mayor concentración de flúor con respecto de los pozos. El rango de concentración del arsénico fue de <0.001 a 0.083 mg/L siendo Cútaró el sitio con mayor concentración, y en general los pozos presentaron mayor concentración de arsénico con respecto a los manantiales y tampoco se recomienda su consumo.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la calidad del agua potable ha sido un factor determinante del bienestar humano. Un requisito primario para tener buena salud es un abastecimiento adecuado que satisfaga la calidad sanitaria, aunque también es importante que el agua sea agradable para que pueda ser consumida y usada. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que 3.4 millones de personas mueren cada año debido a enfermedades transmitidas por el agua contaminada con microorganismos o por la falta de acceso a instalaciones sanitarias (Nemerow *et al.*, 2009).

Las enfermedades propagadas por agua contaminada con materia fecal diezmaron a la población de ciudades enteras. Incluso actualmente, el agua insalubre contaminada por fuentes naturales sigue causando grandes problemas a las personas que se ven obligadas a usarla, tanto para beber como para la irrigación de hortalizas y otras plantas comestibles crudas (Manahan, 2007; Gray, 2008).

La elevada concentración de flúor y arsénico ocurrida de manera natural en el agua, es un problema a nivel mundial. Muchos países de Asia y Latinoamérica han reportado frecuentemente concentraciones de flúor y arsénico por arriba de los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) o la de sus propios estándares nacionales. En muchas comunidades en los estados del centro y norte de México, la población está expuesta a estos contaminantes. De acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática, aproximadamente 14 millones de personas viven en zonas de riesgo (Bundschuh, et al., 2012).

La Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago-Pacífico cuenta con la cuenca Lerma-Santiago-Pacífico que se ubica en el centro-poniente de la República Mexicana y comprende las cuencas de los ríos Lerma y Santiago. El río Lerma a su vez, cuenta con la subregión del Medio Lerma que presenta contaminación de arsénico y flúor de origen natural donde se encuentran ubicados los acuíferos del Valle de Acámbaro y del Lago de

Cuitzeo. La geología en estos acuíferos es volcanosedimentaria, sedimentaria e ígnea intrusiva y extrusiva (INE-SEMARNAT, 2006; CNA, 2011c).

El acuífero del Valle de Acámbaro se localiza en el extremo suroriental del Estado de Guanajuato y cubre en su mayor parte a los Municipios de Acámbaro, Jerécuaro y la totalidad de Tarandacuaio; así como pequeñas porciones de Salvatierra y Tarimoro. Se ubica en la porción sur del Estado de Guanajuato (CNA, 2011a).

El acuífero Lago de Cuitzeo, se ubica en la porción sur del Estado de Guanajuato. En su porción sureste, se encuentra el Municipio de Acámbaro; y la región occidental comprende pequeñas áreas de los Municipios de Salvatierra, Yuriria y Uriangato (CNA, 2011b).

En este trabajo se realizó una evaluación de la concentración de arsénico y flúor en el agua potable de pozos para uso y consumo humano que abastecen a los Municipios de Acámbaro y Jerécuaro en Guanajuato. Se determinaron además los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, así como metales pesados con el objeto de complementar un estudio de calidad del agua.

2. GENERALIDADES

2.1 EL AGUA

El agua, de fórmula química H_2O , es una sustancia de importancia vital en el ambiente que cubre aproximadamente el 70% de la superficie de la Tierra y se encuentra en los océanos como una vasta reserva de agua salada; en la tierra como agua superficial en lagos y ríos; en el subsuelo como agua subterránea; en la atmósfera como vapor de agua y en las capas polares como hielo sólido. El agua es una sustancia esencial para todos los sistemas vivos y es el medio en el cual se desarrolla la vida (Manahan, 2007; Spellman, 2008).

El agua transporta materia y energía a través de diferentes estratos en el planeta, lixivia los constituyentes solubles de minerales y los lleva hasta el mar o los deja como depósitos en algunos de los lugares que recorre; también transporta nutrientes del suelo hacia las raíces de las plantas. La energía solar absorbida en la evaporación del agua de los océanos se acumula como calor latente y se libera en el suelo. Esta liberación del calor latente provee la energía que transporta el calor de las regiones ecuatoriales hacia los polos (Hiscock, 2005).

A lo largo de la historia el saber la cantidad y calidad del agua disponible para consumo humano ha sido de gran importancia para el bienestar del hombre. Civilizaciones enteras han desaparecido debido a su escasez por los cambios en el clima y aún en climas templados las fluctuaciones en los niveles de las lluvias pueden llegar a causar problemas (Gray, 2008).

El estudio de la química del agua considera el transporte, características y composición del agua subterránea, de ríos, lagos, estuarios y océanos, así como el fenómeno que determina la distribución y circulación de especies químicas en aguas naturales. Tanto las reacciones químicas que se llevan a cabo en el agua como las especies químicas que se encuentran en ella están influenciadas por el medio en el que ésta se encuentra. La química del agua superficial es diferente a la de la subterránea y los

microorganismos también influyen en la determinación de la composición del agua (Gray, 2008).

2.1.1 Tipos de aguas

La composición general de los diversos tipos de agua en la hidrosfera puede estudiarse mejor dentro del marco de referencia del ciclo hidrológico. De la cantidad total del agua sobre la Tierra, los océanos conforman el 97.13%, los casquetes polares y los glaciares el 2.4%, el agua subterránea es el 0.61% y los ríos, lagos y corrientes sólo el 0.02% del total (Nalco, 2009).

El agua de los océanos se evapora y se transporta sobre las masas territoriales, donde se puede depositar por cualquier forma de precipitación (lluvia, nieve, granizo, etc). El agua atraviesa la parte inferior de la atmósfera durante su paso del océano a la superficie terrestre y debido a esto, tiene la posibilidad de equilibrarse con los gases de la atmósfera. La composición promedio de la atmósfera terrestre está sujeta a variaciones considerables, especialmente en los niveles de ciertos constituyentes menores como son CO_2 , CO , SO_2 , NO_x , etc., que son productos de los procesos de combustión y están asociados a la contaminación atmosférica que hay en las comunidades urbanas-industriales. La composición de la precipitación es variable y los contaminantes atmosféricos influyen considerablemente sobre ella. Una precipitación cerca de los océanos contiene más SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ y Mg^{2+} que la que cae en el interior del continente. La lluvia y la nieve que se generan en una atmósfera que tiene cierta concentración de SO_2 producidos por combustión pueden ser ácidas. Sin embargo, el agua de lluvia es sin duda una solución muy diluida de sales, lo que indica la notable eficiencia del proceso de destilación que resulta en la producción de agua potable a partir del agua de mar (Jiménez, 2011).

El valor del pH de un agua de precipitación no contaminada puede variar entre 5.5 y 6.5, siendo éste significativamente menor que el del agua de mar de la cual se generó. Este es un reflejo del equilibrio que se logra con el CO_2 atmosférico. El agua de lluvia no contiene amortiguadores, de manera que no se puede mantener su pH neutro en presencia de estas cantidades tan pequeñas de gases que producen ácidos (AWWA, 2011).

El agua cae sobre la superficie de la tierra durante la precipitación pluvial y establece contacto con rocas, sedimentos y el suelo, así como con los habitantes tanto animales como vegetales de la superficie terrestre, llevándose a cabo reacciones químicas que modifican aún más la composición del agua. Estas reacciones se pueden considerar en términos generales como una titulación ácido-base gigantesca en donde los ácidos del agua de lluvia (CO_2 , SO_2 y NO_x) neutralizan las bases de la roca. Como la composición de la superficie terrestre varía de un lugar a otro, estas reacciones pueden ocurrir en aguas de diversas composiciones. El tiempo y el grado de contacto también influyen sobre la composición de la solución (Miller y Spoolman, 2008).

Las aguas superficiales que se originan en cuencas donde las rocas principales son graníticas contienen pequeñas cantidades de materiales disueltos (no más de 30 mg/L) y dichas aguas forman un grupo importante. Un segundo tipo general de aguas superficiales tienen su origen en cuencas distintas a las graníticas. Esta agua tiene valores intermedios de dureza (cálcica y magnésica), alcalinidad y contenido total de minerales (Jiménez, 2011).

El agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento de agua potable en el mundo, especialmente en áreas rurales. Debido a esto, es de gran importancia conocer su calidad. Si el agua destinada para consumo humano no cumple con las normas para agua potable, debe entonces ser sometida a un tratamiento antes de ser distribuida. Estas aguas generalmente tienen concentraciones de sólidos disueltos, sulfatos y cloruros superiores a las de las aguas superficiales provenientes de fuentes naturales, por el escaso contacto entre el agua cargada de CO_2 , las rocas, la tierra en el suelo, así como por el tiempo de disolución. Además, puede agregarse CO_2 al agua en el suelo por la actividad de microorganismos (Jiménez, 2011; DOF, 1994a).

La mayoría de las aguas subterráneas son de excelente calidad natural, sin embargo su composición puede deteriorarse como resultado de la contaminación del acuífero hasta niveles perjudiciales para la salud. Esta contaminación depende mucho de factores locales y por ello un estudio requiere un buen conocimiento de la zona y de casos similares. Los contaminantes pueden ser muy diversos: materia tóxica, sólidos en suspensión o disueltos, microorganismos patógenos, etc., que pueden otorgarle propiedades indeseables, como corrosividad, incrustabilidad, toxicidad, mal olor, mal sabor y mala apariencia. Parte de

estos contaminantes provienen de la atmósfera, pero la mayoría los toma del suelo, por lo cual se le da una especial importancia a la geología, ya que la composición de los estratos será la que finalmente proporcione las características de la calidad del agua extraída (Nalco, 2009; AWWA, 2011; Jiménez, 2011; Hiscock, 2005).

Entonces, para que el agua sea potable debe tener un aspecto agradable y no debe contener sustancias perjudiciales a la salud además de captarse en zonas no contaminadas para que no adquiera sabor, color ni olor; y tampoco debe contener bacterias. Lo anterior es fundamental para prevenir y evitar enfermedades, por lo que las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua deben estar dentro de los límites permisibles establecidos por la normatividad vigente. Para conocer la calidad del agua y poder caracterizarla es necesario llevar a cabo una evaluación que comprenda la determinación de los parámetros fisicoquímicos y biológicos (DOF, 1994; Jiménez, 2011; USEPA, 2006).

2.2 PARÁMETROS FÍSICOS

Temperatura. Su valor es un criterio de la calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable. Tiene efectos en la mayoría de las reacciones que ocurren en los sistemas de agua natural ya que con el aumento de esta, se incrementa la solubilidad de los minerales. La temperatura aumenta de acuerdo al gradiente geotérmico (1°C cada 33 m), aunque llega a ser mayor en zonas volcánicas activas y menor en grandes cuencas. Las temperaturas elevadas son indicadores de actividad biológica, química y física. La temperatura ideal del agua para abastecimiento debería de ser constante o con variaciones mínimas de entre 8 y 14°C , ya que tales variaciones tienen influencia en el tratamiento del agua; en la vida acuática; en el sabor del agua; en el oxígeno disuelto; en la actividad de los organismos que producen mal olor y sabor; y en la tasa de corrosión en los sistemas de distribución. Además, las tomas de muestra de agua y las lecturas de temperatura deben de realizarse inmediatamente debido a los cambios causados por la temperatura propia del aire y la manipulación de las muestras (Metcalf y Eddy, 1994; Nemerow *et al.*, 2009; APHA-AWWA-WPCF, 1995).

Turbiedad. Es debida a la materia fina suspendida en el agua, mayormente causada por materia coloidal y es medida como la propiedad de transmisión de la luz en el agua. La sílice, arcilla, limo y otros componentes del suelo son la fuente natural de esta. El agua que contiene una baja turbiedad te permite ver imágenes a una profundidad considerable. La materia orgánica puede proteger a los organismos patógenos de la acción de los agentes desinfectante, mientras que las partículas inorgánicas tienen poco o ningún efecto. La turbiedad también puede contener partículas que son tóxicas o que ayudan a acumular sustancias tóxicas en el agua. Una alta turbiedad causa problemas en los sistemas de abastecimiento de agua al producir sabor y olor (Saravanan et al., 2005; Spellman, 2008).

2.3 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

La determinación de parámetros fisicoquímicos en aguas subterráneas permite estimar la interacción entre el fluido y la matriz sólida, y puede dar información referente al transporte de contaminantes en los acuíferos. La comprensión de la contaminación química del agua y su control dependen de un conocimiento básico de la química ambiental acuática, donde están comprendidos los componentes mayores y los elementos traza (Deutsch, 1997; AWWA, 2011; Manahan, 2007).

pH. Este parámetro indica el grado de acidez o basicidad en el agua. En las aguas subterráneas oscila entre 6 y 8.5, aunque en manantiales termales puede ser menor. El pH es usado para calcular carbonatos, bicarbonatos, corrosión, índice de estabilidad, etc. Mientras que la alcalinidad o acidez miden la resistencia total del pH a cambiar o la capacidad amortiguadora. El pH también está asociado con la dureza y la estabilidad del dióxido de carbono (particularmente al agua subterránea) (Armienta y Segovia, 2008; Saravanan *et al.*, 2005; Gray, 2008).

Conductividad eléctrica. Está considerada como uno de los parámetros más importantes para determinar la pureza del agua y es útil para controlar su calidad. Es una prueba para aguas naturales y residuales para una determinación rápida de minerales. Es una medida de la corriente eléctrica en las muestras de agua conducida por medio de la ionización de sustancias y por consiguiente los sólidos disueltos básicamente están

relacionado con su medida que también está influenciada por la buena conductividad de los ácidos inorgánicos, bases, sales y la pobre conductividad de los compuestos orgánicos (Metcalf y Eddy, 1994, 1998; Gray, 2008).

Oxígeno disuelto (OD). Sirve como indicador del efecto producido por los contaminantes oxidables. La concentración del OD a 20° C es de 9.17 mg/L mientras que a 25 °C es de 8.38 mg/L. En la ciudad de México (2230 msnm) se tiene como concentración de saturación 7.2 mg/L O₂ a 20 °C y a nivel del mar es de 9 mg/L (Gaur, 2008; Jiménez, 2011).

Salinidad. La salinidad de una solución es medida por medio de su habilidad para transmitir una corriente eléctrica debido al contenido de materia inorgánica y es uno de los indicadores de la calidad (Blanchfield, 2011).

Sólidos. El propósito de este parámetro es evaluar y medir toda la materia suspendida y disuelta en el agua.

- Sólidos disueltos totales (SDT). Los SDT en la toma de muestra del agua están limitados a los sólidos en solución.
- Sólidos sedimentables. Son los sólidos en suspensión que se espera que sedimenten por gravedad en cierto tiempo.
- Sólidos suspendidos (SS o SST). Son los sólidos que no están disueltos y que también son llamados material suspendido.
- Sólidos totales. Son todos los sólidos contenidos en el agua, determinados por evaporación y secado. Es la suma de los SST y SDT
- Sólidos volátiles. Son los sólidos provenientes de químicos orgánicos volátiles (Metcalf y Eddy, 1994).

Dureza total. Es debida principalmente a la presencia de carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos de calcio y magnesio en su forma disuelta. Sus valores se encuentran generalmente entre 10 y 300 mg/L de CaCO₃. La dureza del agua varía considerablemente de un lugar a otro y en general el agua superficial es más suave que el agua subterránea. La dureza del agua refleja la naturaleza de las formaciones geológica con las cuáles ha estado en contacto (Gaur, 2008; Nalco, 2009; Saravanan *et al.*, 2005).

Alcalinidad. Es una medida de la capacidad para neutralizar ácidos y se debe a las sales de ácidos débiles aunque las bases débiles o fuertes también pueden contribuir. La alcalinidad es usualmente impartida por bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Una alcalinidad elevada puede afectar los sistemas de tuberías en los procesos industriales. La variación de la concentración en agua potable va de 5 a 125 mg/L CaCO_3 ((Shreemahadevan *et al.*, 2009; Sawyer *et al.*, 2003; Manahan, 2001).

La mayoría de las especies disueltas en las aguas subterráneas son: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- y Cl^- , en cantidades entre 1 y 1000 mg/L, los cuales se conocen como constituyentes mayores. Los elementos traza se encuentran en concentraciones iguales o menores de 1 mg/L (Gray, 2008).

2.4 COMPONENTES MAYORES

Cloruros. Se encuentran en la mayor parte de las aguas naturales y tienen cuatro fuentes principales de procedencia; el agua marina atrapada en sedimentos; la disolución de la sal común y minerales afines; la concentración por evaporación de los cloruros existentes en la lluvia y la nieve; y la disolución de las partículas de material sólido de la atmósfera. La concentración de cloruros en agua dulce oscila entre 10 y 250 mg/L. La concentración máxima permisible establecida por la Norma Oficial Mexicana es 250 mg/L (DOF, 1994a).

Sulfatos. Su presencia en el agua subterránea generalmente se debe a la disolución de yacimientos evaporíticos y a la transformación de los minerales sulfurosos disueltos por la acción del agua filtrada rica en oxígeno disuelto. La concentración de sulfatos en aguas subterráneas oscila entre 2 y 150 mg/L, habiéndose encontrado hasta 5000 mg/L en aguas saladas con presencia de calcio. La concentración máxima permisible establecida por la Norma Oficial Mexicana es de 400 mg/L (DOF, 1994a).

Carbonatos y bicarbonatos. La presencia de estas dos especies en el agua subterránea se debe principalmente a la existencia de dióxido de carbono procedente de la atmósfera y del suelo y por disolución de las rocas carbonatadas. La concentración total de

carbonatos y bicarbonatos varía de 5 a 500 mg/L como CaCO_3 . A valores de pH inferiores a 8.3, la especie predominante son los bicarbonatos (Nalco, 2009; Rodier, 1994).

Calcio. Su presencia en la corteza terrestre es abundante y tiene gran movilidad en la hidrósfera, por lo que resulta ser uno de los iones más frecuentes en las aguas subterráneas. Generalmente se encuentra entre 5 a 500 mg/L como CaCO_3 (de 2 a 200 mg/L como Ca^{2+}). Los efectos que producen estas concentraciones sobre la salud son insignificantes. Las aguas que sobrepasan los 200 mg/L presentan inconvenientes para uso doméstico y alimentación de calderas, debido a las incrustaciones que ocasiona (Nalco, 2009).

Magnesio. Es un componente común en muchos minerales y a pesar de su gran solubilidad, suele encontrarse en menores concentraciones que el calcio. Su concentración en aguas dulces oscila entre 1 y 100 mg/L. Contribuye a la dureza del agua y puede ocasionar incrustaciones (Nalco, 2009; Rodier, 1994).

Sodio. No es un constituyente fundamental de la roca. En el agua subterránea su concentración varía de 10 a 100 mg/L. puede estar presente en forma de cloruros, carbonatos o bicarbonatos. La Norma Oficial Mexicana establece una concentración máxima permisible de 200 mg/L (Rodier, 1994; DOF, 1994a).

2.5 PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS

De acuerdo a un reporte emitido por la ONU, la contaminación del agua subterránea por microorganismos patógenos es el problema de salud más importante a nivel mundial ya que se estima que más de la mitad de la población consume agua contaminada con bacterias patógenas de origen fecal (Halem *et al.*, 2009; Mora-Bueno *et al.*, 2012).

Los coliformes fecales son indicadores bacteriológicos de la calidad de un cuerpo de agua. Dado que la capacidad para sobrevivir en el agua de algunos miembros de la especie *coli* es limitada, sus concentraciones pueden emplearse para estimar el grado de contaminación fecal, ya que las heces contienen microorganismos patógenos, los cuales constituyen un riesgo para la salud pública al ser ingeridos por el ser humano (DOF, 1994).

Debido a que se ha incrementado la demanda del uso de agua subterránea en México, el interés en las investigaciones de la microbiología en esta fuente es indispensable para que no exista riesgo a la salud ya que las rutas de exposición a los microorganismos pueden ser el consumo de agua potable contaminada con bacterias y el contacto con agua recreacional contaminada (Kaushik y Kaushik, 2010).

Los efectos en la salud por consumir agua potable contaminada se hacen presentes en diferentes localidades. En la ciudad de México el estudio de Cifuentes y Rodríguez (2005) encontró que el riesgo de contraer diarrea fue más alto en niños donde los hogares recibían agua potable de pozo contaminada que donde los pozos estaban libres de contaminantes. Algunas otras enfermedades transmitidas por el agua contaminada causadas por las bacterias son cólera, disentería, tifoidea, poli, hepatitis infecciosa (Kaushik y Kaushik, 2010).

Nayarit es uno de los estados mexicanos que presenta los mayores índices de enfermedades infectocontagiosas por consumo de agua subterránea contaminada con coliformes fecales (Mora-Bueno *et al.*, 2012).

2.6 METALES PESADOS

Los metales son componentes naturales de la tierra y se encuentran con mayor frecuencia en distintos minerales en combinación con otros elementos. En consecuencia, son parte inherente a la totalidad de nuestro ambiente y existen en los ecosistemas de la geósfera o litósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera (Williams *et al.*, 2000).

En química, se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 g/cm^3 . Sin embargo, en ciencias ambientales el grupo es más amplio, abarcando a todos aquellos metales que pueden ser tóxicos. Dentro de este concepto, pueden diferenciarse 2 grupos: (1) *oligoelementos o micronutrientes*, requeridos a nivel traza que se vuelven tóxicos al superar cierto valor límite (arsénico, cobalto, cromo, molibdeno, manganeso, níquel, selenio y zinc); y (2) *metales pesados sin función biológica conocida*, de forma que la presencia en organismos vivos conduce a disfunciones de su

sistema biológico. Son altamente tóxicos y tienden a acumularse en los organismos (cadmio, mercurio, plomo, antimonio, bismuto y uranio) (Pérez, 2005).

Los metales son resistentes a la degradación natural y algunas de estas propiedades tienen interés toxicológico puesto que pueden tener efecto adverso en organismos vivos. Existen muchos factores que influyen en la dinámica de entrada del elemento al organismo y consecuentemente su toxicidad. Dentro de los factores más importantes está la concentración, la duración de exposición, las propiedades fisicoquímicas y la ruta de entrada. Las rutas de entrada más comunes son la dérmica, la vía gastrointestinal o el tracto respiratorio. Por lo tanto, después de la absorción y entrada de la sustancia al torrente sanguíneo, ésta es distribuida a otras partes del cuerpo y si la concentración de la sustancia tóxica en el cuerpo es significativa y excede la capacidad de excreción del cuerpo, el compuesto se puede acumular en órganos o tejidos específicos. La genética, el desarrollo, la salud, el género y el comportamiento son factores que también afectan la respuesta del contaminantes (Svarc-Gajiae, 2009; Ming-Ho, 2005).

2.7 ARSÉNICO

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en la corteza terrestre. Ha sido clasificado químicamente como un metaloide, con propiedades tanto de metal como de elemento no metálico. El arsénico elemental es un material sólido de color gris acero. En el ambiente se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno, cloro y azufre para formar arsénico inorgánico. La mayoría de los compuestos de arsénico son polvos de color blanco que no se evaporan, no tienen olor y la mayoría no tienen ningún sabor especial y es por esta razón que no se sabe inmediatamente si están presentes en los alimentos, el agua o el aire (Reimann *et al.*, 2009; ASTDR, 2007).

El arsénico inorgánico está presente naturalmente en el suelo y en muchos tipos de rocas, especialmente en minerales que contienen cobre o plomo. En algunas otras zonas existe como resultado de la composición geológica y por consecuencia las concentraciones en el agua subterránea son elevadas. En México el arsénico se encuentra en forma natural en los acuíferos de la Comarca Lagunera (Estados de Coahuila y Durango) en

concentraciones que exceden 15 veces los valores recomendado por la OMS (ASTDR, 2007; Jiménez, 2011).

Existen más de 200 especies minerales que tiene como componente al arsénico en diferentes concentraciones, más comúnmente es el caso de los sulfuros de minerales y la arsenopirita que son los más abundantes. Las concentraciones más altas de minerales ricos en arsénico se presentan en áreas mineralizadas asociadas con el basamento rocoso y áreas de actividad volcánica. Los compuestos orgánicos de arsénico son menos tóxicos que sus sales minerales (Gomez *et al.*, 2009).

El arsénico no puede ser degradado en el ambiente, solamente puede cambiar de forma química o puede adherirse o separarse de partículas. También puede cambiar de forma al reaccionar con oxígeno o con otras moléculas presentes en el aire, el agua o el suelo, o por la acción de bacterias que viven en el suelo o el sedimento. El arsénico puede entrar al agua por medio de la escorrentía, por el agua que se infiltra a través del suelo o por las erupciones volcánicas. Las formas solubles del arsénico son el ion arsenito (AsO_2^{3-}) y el arsenato (AsO_4^{3-}) y el estado trivalente es más tóxico que el pentavalente. Su estado de oxidación en el que se encuentra en el agua no se conoce con exactitud, pero es probable que sea pentavalente. La Norma Oficial Mexicana indica una concentración máxima permisible de 0.025 mg/L (DOF, 1994a).

Si se ingiere arsénico a través del agua la mayor parte de éste se puede pasar rápidamente a la corriente sanguínea. La cantidad que pasa dependerá de la cantidad y del tipo de arsénico que se ingiera y se eliminará a través de la orina. El efecto más característico de la exposición oral prolongada a arsénico inorgánico es un cuadro de alteraciones de la piel como melanosis, leucomelanosis y queratosis; que incluye síntomas como oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeños callos o verrugas en la palma de las manos, la planta de los pies y el torso a menudo asociados con alteraciones en los vasos sanguíneos de la piel. También se puede desarrollar cáncer de piel y se ha observado que el ingerir arsénico aumenta el riesgo de desarrollar cáncer (hígado, vejiga y pulmones), de contraer problemas reproductivos u ocasionar daños en las funciones intelectuales de los niños. Las exposiciones crónicas provocan daños cardiacos y anemia (ASTDR, 2007;

McClintock *et al.*, 2012; Jiménez, 2011; Franco y Carro, 2009; Mazumder y Dasgupta, 2011; Rahman, *et.* , 2009).

2.8 FLÚOR

El flúor es un gas natural que toma colores que van de amarillo pálido a verde. Se encuentra en combinación con una variedad de elementos para formar fluoruros en el aire, agua, minerales, suelo y alimentos, y casi nunca se encuentra libre en la naturaleza. Las fuentes naturales de flúor incluyen vulcanismo, aerosoles de los spray oceánicos y partículas del suelo, etc. El fluoruro de sodio se disuelve fácilmente en agua pero no así el fluoruro de calcio; y el fluoruro de hidrógeno se disuelve en agua formando ácido fluorhídrico aunque también se encuentra como fluorita (CaF_2) y criolita (Na_2AlF_6) (ATSDR, 2004; Ming-Ho, 2005).

El flúor no puede ser destruido en el ambiente, solamente puede cambiar en forma de sales con minerales en el suelo. El gas de fluoruro de hidrógeno es absorbido por la lluvia, las nubes y la niebla y forma ácido fluorhídrico, el cual cae a la tierra. Los fluoruros liberados al aire por volcanes y la industria son transportados por el viento y la lluvia, a aguas, suelo y fuentes de alimentos cercanas. En el agua y en el suelo los fluoruros se adherirán fuertemente al sedimento o partículas (ATSDR, 2004).

Los fluoruros se acumulan en plantas y en animales. En animales se acumula principalmente en los huesos más que en los tejidos blandos. La población puede estar expuesta a los fluoruros en el aire, alimentos, suelo contaminados y agua potable (ATSDR, 2004).

La tasa de absorción depende del compuesto formado con el flúor (ej. 97% de NaF, 87% de $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$, 77% de Na_3AlF_6 y 62% de CaF_2), y cerca del 50% absorbido es excretado por los riñones mientras que el remanente es almacenado principalmente en los tejidos calcificados. Los huesos tienen una gran afinidad por el flúor y lo incorporan a la hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$) formando fluorapatita ($\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$) (Ming-Ho, 2005).

El flúor es deseable en el agua potable y la concentración óptima para evitar la caries en la población infantil es de 0.7 a 1.2 mg/L. En algunas partes del mundo como la India, México y China, los sistemas de abastecimiento de agua potable en muchas comunidades (usualmente en pozos) contienen niveles altos de flúor y en algunos casos superiores a 20 mg/L. La fluorosis dental es el primer signo de intoxicación crónica de flúor y se manifiesta por una decoloración blanca, amarilla, café y negra del esmalte de los dientes, ya sea como puntos o como rayas horizontales. Otro efecto más severo es causado por el consumo elevado durante un periodo largo, esta enfermedad es denominada fluorosis esquelética, y sucede cuando los fluoruros acumulados en los huesos durante muchos años causan rigidez y dolor en las articulaciones y finalmente cambios en la estructura ósea y calcificación de ligamentos (AWWA, 2011; Jiménez, 2011; Gomez , 2009).

Otros desórdenes de salud son degeneración de la fibra muscular, niveles de hemoglobina bajos, sed excesiva, dolores de cabeza, erupciones en la piel, nerviosismo, manifestaciones neurológicas, depresión, problemas gastrointestinales, atenuación en el sistema inmunitario, esterilidad masculina y otros. Muchos grupos de investigadores han reportado efectos reproductivos negativos en humanos debido al flúor (Brindha y Elango, 2011; Ming-Ho, 2005; Bhupinder, 2011).

La dosis letal de flúor inorgánico ha sido estimada entre 2.5 y 5 g en un hombre de 70 kg o con base en un consumo de 2 litros de agua por día con una concentración de 2000 mg/L. Para el establecimiento de un valor guía del fluoruro es importante considerar las condiciones climáticas, la cantidad de agua consumida y el aporte por otras fuentes; sin embargo, el valor guía establecido por la OMS es de 1.5 mg/L así como en la NOM-127-SSA1-1994. El Servicio de Salud Pública (PHS) recomienda que los suministros de agua pública contengan entre 0.7 y 1.2 miligramos de fluoruro por litro de agua potable (DOF, 1994a; Ming-Ho, 2005; Jiménez, 2011; ATSDR, 2004).

3. ANTECEDENTES

Conforme la población mundial se incrementa, el agua potable, uno de los recursos fundamentales para la supervivencia del hombre está disminuyendo. Las crecientes demandas de agua a menudo no pueden ser satisfechas por los suministros de agua superficial y esto ha llevado a una mayor dependencia de agua subterránea en muchas partes del mundo. Las consecuencias del abastecimiento de agua subterránea más comunes incluyen sobreexplotación, hundimientos y el uso del agua subterránea no apta para el consumo humano (Chouhan y Flora, 2010).

En América Latina y el Caribe, la cobertura del servicio de agua potable mediante una conexión doméstica alcanza el 80%, pero aún existen alrededor de 50 millones de personas que carecen del más mínimo acceso al agua potable, y la falta de acceso a esta tiene efectos adversos en el ámbito económico y de salud (PNUMA, 2010).

En México los abastecimientos de agua potable provenientes de suministros de agua subterránea abarcan un 75% del total de la población, pero su compleja geología de rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas y un ambiente de actividad tectónica en constante ajuste, predisponen a la contaminación del ambiente natural de las aguas subterráneas debido a que existen sustancias potencialmente tóxicas que pueden alcanzar concentraciones peligrosas en esta fuente como resultado de los procesos geoquímicos (Alarcón-Herrera, et al., 2012).

A pesar de la incidencia del flúor en la salud y de su influencia en algunos Estados de México, se han realizado pocas investigaciones de carácter hidrogeológico en cuencas y acuíferos regionales que permitan evaluar los controles físicos y químicos de este elemento (Ortega, 2009).

3.1 ARSÉNICO

El arsénico está reconocido como uno de los contaminantes inorgánicos más peligrosos en agua subterránea y se estima que cerca de una tercera parte de la población mundial usa el agua subterránea para consumo (Seok-Hwi *et al.*, 2012; Brahman *et al.*, 2012; Halem *et al.*, 2009).



Figura 1. Países afectados por la presencia de arsénico en agua potable (Halem *et al.*, 2009).

3.1.1 El mundo

En Geumsan, Corea las concentraciones de arsénico en agua subterránea fueron de 113 $\mu\text{g/L}$. El 16% de las muestras se excedieron con respecto al límite máximo establecido por la OMS (Ahn, 2012).

En un estudio realizado de 1996 hasta 2010 en Bangladesh, se tomaron muestras de los 64 distritos con que cuenta la ciudad; 27.2%, 42.1% y 7.5% de los pozos tienen concentraciones de arsénico por arriba de 50, 10 y 300 $\mu\text{g/L}$ de arsénico en el agua respectivamente. Se estima que debido a esto, en este país existen cerca de 36 millones y 22 millones de personas consumiendo agua potable con concentraciones de arsénico por arriba de 10 y 50 $\mu\text{g/L}$ respectivamente; y por consecuencia también se estima que habrá de 200

000 a 270 000 muertes por cáncer causado por las altas concentraciones de arsénico (Chakraborti, *et al.*, 2010; Shukla *et al.*, 2010).

En el norte de China en la cuenca Datong se realizó un estudio en donde se encontró que las concentraciones de arsénico en el agua subterránea estaba entre 1.0 y 1160 $\mu\text{g/L}$ con 49% de las muestras excediendo el límite máximo permisible de la OMS (Su *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2012).

En Vietnam un gran número de pozos contienen altas concentraciones de arsénico en el río Rojo y en el Delta del Mekong. En la isla Mediterránea de Cyprus durante el periodo 2007-2009 se analizaron 84 muestras de pozos, y las concentraciones de arsénico fueron de 0.3 a 64.2 $\mu\text{g/L}$ superando con esto el límite establecido por la OMS (Nguyen y Itoi, 2009; Hoang *et al.*, 2010; Christodoulidou *et al.*, 2012).

Aproximadamente medio millón de personas en las regiones de Terai en Nepal, se encuentran expuestas a agua para consumo contaminada con arsénico en niveles superiores a 50 $\mu\text{g/L}$. Y se estima que 3.5 millones de personas en esta misma región están expuestas a niveles de entre 10 y 50 $\mu\text{g/L}$ (Pokhrel *et al.*, 2009).

En un estudio en Camboya las muestras tomadas de agua de pozo mostraron concentraciones de arsénico de hasta cerca de 900 $\mu\text{g/L}$, y con 54% de sus muestras excediendo los límites máximos establecidos por la OMS. En otro estudio en esta misma localidad, las concentraciones de arsénico en agua subterránea estuvieron entre 6.64 y 1543 $\mu\text{g/L}$, y con 86% de sus muestras excediendo los límites establecidos por la OMS (Sthiannopkao *et al.*, 2008; Luu *et al.*, 2009; Sthiannopkao, *et al.*, 2010).

En el este de Croacia en un estudio realizado a muestras de agua de 18 pozos se observaron concentración promedio de arsénico de 240 $\mu\text{g/L}$ en un periodo de 10 años. También en Serbia se encontró que dos terceras partes de las municipalidades (6.4% de la población total) excedieron los límites máximos establecidos en las normas europeas (Romic *et al.*, 2011; Jovanovic *et al.*, 2011).

En las planicies de Hetao, Mongolia se estudió la geoquímica del agua subterránea resultando en concentraciones de arsénico de 76 a 1093 $\mu\text{g/L}$ quedando más del 40% de las

muestras excediendo los 400 $\mu\text{g/L}$ y con ello los límites máximos establecidos por la OMS (He *et al.*, 2009).

Las fuentes de abastecimiento de agua subterránea en la cuenca de Pannonian (Hungría, Rumania, Croacia y Serbia) son conocidas por tener elevadas concentraciones de arsénico y por ser el área de afectación más grande en Europa. Las concentraciones van de 0.5 a 240 $\mu\text{g/L}$ y se estima que existen 1 millón de personas expuestas a estas concentraciones que exceden los límites máximos establecidos por la OMS (Rowland, *et al.*, 2011).

En Etiopía central el 35% de 23 muestras de agua de pozo y 70% de 14 aguas termales muestran concentraciones de arsénico por encima de lo que marca la OMS (Rango *et al.*, 2010).

3.1.2 Latinoamérica

A principios del siglo 21 los descubrimientos de altas concentraciones de arsénico en el agua de países de Latinoamérica se incrementaron rápidamente. Esta contaminación se detectó por primera vez en 10 países dentro de los últimos 10 o 15 años y hoy en día se han detectado altas concentraciones en 15 de los 20 países latinoamericanos (Bundschuh *et al.*, 2012; McClintock, *et al.*, 2012).

Es común que la mayoría de los habitantes en comunidades pobres rurales y urbanas afectadas por problemas de arsénico en Latinoamérica, no estén al tanto de la toxicidad de éste. Se estima que en Latinoamérica existen 4.5 millones de personas expuestas a agua potable con concentraciones de arsénico por encima de 50 $\mu\text{g/L}$; pero si consideramos que el límite adoptado en la mayoría de los países de esta región está establecido en 10 $\mu\text{g/L}$, entonces el número de personas expuestas se incrementaría de 3 a 4 veces esta cifra (Bundschuh *et al.*, 2012; McClintock, *et al.*, 2012).

En 14 países de Centroamérica los casos dados a conocer de altas concentraciones de arsénico en el agua subterránea, fueron detectados en Nicaragua (1996/2000), El Salvador (1998), Brasil (1998/2000), Bolivia (2001), Venezuela (2005), Ecuador (2005), Honduras (2006), Uruguay (2005/06), Colombia (2007), Guatemala (2007) y Costa Rica

(2005/2009). En la mayoría de los casos de los países en donde se presentan altos niveles el origen del arsénico en agua subterránea, es debido a fuentes naturales que son producto de las configuraciones tectónicas de la costa del Pacífico en la zona de subducción que cuenta con numerosos volcanes. La infiltración del agua a través de roca volcánica y conductos hidrotermales, así como los fluidos geotermales son fuentes comunes de arsénico en los abastecimientos de agua dulce (Bundschuh, *et al.*, 2012; McClintock, *et al.*, 2012).

Argentina fue el primer país de Latinoamérica donde se reportó la presencia de arsénico en aguas subterráneas a principios del siglo XX. En las décadas siguientes se identificaron nuevas regiones con altas concentraciones de arsénico en agua subterránea, mayormente regiones del altiplano andino y la llanura Chaco Pampeana, ya que esta llanura es el área más grande del mundo con concentraciones de arsénico en el agua subterránea. Se estima entre 1.2 y 2 millones las personas que están expuestas a arsénico considerando que el límite en agua potable es de 50 $\mu\text{g/L}$. Sin embargo, este número podría incrementarse entre 3 y 8 millones si el límite seguro es considerado como 10 $\mu\text{g/L}$ que fue el introducido en Argentina en el 2007 (Bundschuh, *et al.*, 2012).

En Chile en la región del Desierto de Atacama, los habitantes han sido expuestos a arsénico en agua potable por mucho tiempo, aunque no fue sino hasta 1962 que se presentó el primer caso de problemas relacionados a la salud a causa del arsénico en la ciudad de Antofagasta. En esta ciudad la exposición fue consecuencia del suministro de agua potable del río Loa (proveniente de roca volcánica y depósitos de sulfuro de minerales) que contenía concentraciones de arsénico de hasta 800 $\mu\text{g/L}$ (Bundschuh, *et al.*, 2012).

En Perú existen muchos sitios donde las fuentes de agua están afectadas por altas concentraciones de arsénico y en la mayoría de los casos el origen es de tipo geogénico. Se calcula que en este país existen al menos 250 000 persona que toman agua con concentraciones de arsénico por encima de 50 $\mu\text{g/L}$ que es el límite de regulación nacional. En el área de los altiplanos andinos el 44% del agua de pozos excedió los límites establecidos por la ONU, estableciéndose la más alta concentración en 180 $\mu\text{g/L}$ (Bundschuh, *et al.*, 2012).

3.1.3 México

En México el arsénico se presentó en conjunto con el flúor como en el acuífero del valle de Toluca y en acuíferos de los Estados de Aguascalientes, Coahuila, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas. Además, en varios estudios se ha encontrado una correlación positiva entre estos dos elementos como sucedió en los estudios en Acámbaro (Guanajuato), Durango, Chihuahua, Hermosillo, Zacatecas y en agua subterránea de la cuenca Lerma-Chapala. En las zonas áridas del Valle de Guadiana (Durango) y la Comarca Lagunera (Durango-Coahuila) la concentración de arsénico y flúor en los acuíferos aluviales varían de 0.02 a 0.4 mg/L y de 1.2 a 16 mg/L respectivamente (Esteller et al., 2011; Armienta y Segovia, 2008; Mora-Bueno *et al.*, 2012; Armienta *et al.*, 2010; Ortega, 2009; Alarcón-Herrera *et al.*, 2012).

En otros estudios se han reportado casos de contaminación por arsénico excediendo la normatividad nacional en agua potable en San Agustín, Irapuato, Cútaró, Acámbaro, San Miguel de Allende, Silao-Romita, El Copal, Salamanca, Cuerámbaro (Guanajuato), San Luis Potosí, Matehuala (Oaxaca), acuífero Salamanca, Coahuila, acuíferos de Baja California, Zimapán (Hidalgo), Sonora, Puebla, Aguascalientes, Chihuahua, Comarca Lagunera, Michoacán y algunas otras partes del país (Armienta, 2010; Bundschuh, et al., 2012; Caballero *et al.*, 2010; Carrillo *et al.*, 2000; Zambrano *et al.*, 2011; Guzmán *et al.*, 2011; Reyes *et al.*, 2010; Espino, 2009; Alfaro *et al.*, 2002; Monroy *et al.*, 2009; Villaescusa y Bollinger, 2008).

Localmente el enriquecimiento de aguas geotermales con arsénico esta usualmente asociado a las áreas con actividad volcánica y sistemas hidrotermales y su presencia se ha detectado en aguas geotermales como: Cerro Prieto (BCN), las 3 Vírgenes (BCS), los Humeros (Puebla) los Azufres (Michoacán) y la Primavera (Jalisco) (López *et al.*, 2012; Birkle et al., 2010).

3.1.4 Problemas de salud

La OMS ha estimado que la exposición a largo plazo a arsénico en agua subterránea en concentraciones por arriba de 500 µg/L causa la muerte en 1 de 10 adultos. En Europa

los problemas de arsénico en agua potable están centrados en países como Serbia, Hungría e Italia (Halem *et al.*, 2009).

Actualmente, decenas de miles de personas en Bangladesh, China e India han sido diagnosticadas con arsenicosis al mismo tiempo que miles de millones de habitantes en estas mismas regiones (mayormente en áreas rurales) continúan bebiendo agua contaminada con arsénico diariamente (Sthiannopkao *et al.*, 2008).

En Latinoamérica en 1913 se conoció el primer caso de exposición humana a arsénico relacionado al agua potable proveniente de un suministro subterráneo en la localidad de Bell-Ville en la llanura Chaco-Pampeana en Argentina; y fue hasta finales de 1950 y principios de 1960 que el problema de agua subterránea contaminada (predominantemente por arsénico geogénico) fue detectado en otros países de Latinoamérica como México y Chile. La mayoría de estos estudios relacionados a la salud en Latinoamérica se han llevado a cabo en Argentina, Chile y algunos en México (Bundschuh *et al.*, 2012; McClintock, *et al.*, 2012).

Otros estudios en Latinoamérica han reportado efectos adversos en la salud por exposición a altas concentraciones de arsénico en agua potable que incluyen; bajo peso y alta mortalidad en recién nacidos, cáncer, problemas reproductivos, enfermedades cardiovasculares y de pulmón, así como deterioro cognitivo en niños (McClintock *et al.*, 2012; Bundschuh, *et al.*, 2012).

Un estudio llevado a cabo en Chile de 1958 a 1971 en personas expuestas a arsénico en agua potable con concentraciones de 600 $\mu\text{g/L}$, los residentes tuvieron una mortalidad elevada y significativa de cáncer de pulmón en hombres y mujeres. En Córdoba, Argentina en un estudio se encontró que la mortalidad por cáncer de riñón fue elevada en hombres y mujeres expuestos a altas concentraciones de arsénico en agua ($>178 \mu\text{g/L}$). (McClintock, *et al.*, 2012).

Los impactos del arsénico en el agua en la población de la cuenca de Pannonian muestran deterioro en la salud. Se han encontrado casos de hiperqueratosis e hiperpigmentación en personas que bebieron agua con niveles por arriba de 50 $\mu\text{g/L}$ (Rowland, *et al.*, 2011).

En México los primeros antecedentes reportados de problemas de salud relacionados con arsénico en el agua subterránea datan de 1962, cuando se notificaron 40 casos graves y una defunción en el sector urbano de Torreón, Coahuila (Castro, 2006; McClintock *et al.*, 2012; Bundschuh *et al.*, 2012).

Del Razo (2011) encontró una asociación entre la exposición a arsénico inorgánico en el agua potable y la diabetes en un estudio llevado a cabo en Zimapán y la región Lagunera (McClintock, *et al.*, 2012).

En la región lagunera se evaluó la relación entre la exposición crónica al arsénico, el virus del papiloma humano, y el cáncer de piel no melanocítico. Se concluyó que las infecciones virales pueden constituir un riesgo adicional para desarrollar cáncer de piel no melanocítico dentro de la población crónicamente expuesta al arsénico (Duker *et al.*, 2005; Rosales-Castillo, *et al.*, 2004; Gerdson *et al.*, 2000; Grimmel *et al.*, 1988).

En nueve localidades del Estado de Coahuila, se llevó a cabo un estudio donde los niveles de arsénico inorgánico en agua para consumo humano eran altos (20 a 400 $\mu\text{g/L}$) con respecto a las Normas Oficiales Mexicanas. Los resultados mostraron que la exposición a arsénico puede producir diabetes y otros estudios así lo confirman ya que existe una relación clara en la dosis-respuesta con los niveles de arsénico en agua potable y el continuo incremento de diabetes mellitus y la hipertensión dentro de los residentes con niveles de exposición de arsénico en agua de 50 $\mu\text{g/L}$ (McClintock, *et al.*, 2012; Razo *et al.*, 2011; Henke, 2009; Villaescusa y Bollinger, 2008; Rahman *et al.*, 2009; DOF, 1994a).

También se ha reportado un continuo aumento en muertes por enfermedades vasculares periféricas dentro de los residentes con exposiciones a arsénico en agua potable a largo plazo en México (Mahmudur *et al.*, 2009; McClintock *et al.*, 2012; Bundschuh *et al.*, 2012).

Los posibles efectos por exposición a arsénico en agua son los referentes al sistema reproductivo femennino relacionados a problemas menstruales, comportamiento sexual alterado, infertilidad, alteración en el inicio de la pubertad, alteración en la duración del nacimiento, problemas de lactancia, alteraciones en la menopausia así problemas de embarazo; y los efectos en el sistema reproductivo masculino son los relacionados a la

alteración en el comportamiento sexual, alteraciones en la fertilidad y problemas con la forma de los espermatozoides así como de su conteo (Duker *et al.*, 2005; Henke 2009; Bundschuh *et al.*, 2012).

El arsénico es uno de los elementos que ha sido clasificado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) como carcinógeno, basado en información epidemiológica de expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) del Comité Mixto de la Organización de Alimentos y Agricultura de las Naciones Unidas (FAO)/OMS (Bhandari *et al.*, 2011; AWWA, 2011; WHO, 2011).

En México aún hay poca información acerca del alcance de la exposición del arsénico en agua potable y la relación con los problemas de salud asociados a esto (McClintock, et al., 2012).

3.2 FLÚOR

El fluoruro es un anión que existe de manera natural en algunos suelos y rocas y es considerado como uno de los mayores contaminantes en el agua subterránea a nivel mundial ya que se presenta en muchos suministros de agua potable, siendo estos suministros a su vez la mayor fuente de exposición a flúor en la mayoría de los individuos (AWWA, 2011; Bhupinder, 2011).

Usualmente las personas usan el agua para consumo o para usos domésticos como cocinar, y esto lo hacen sin darle ningún tratamiento previo. En varias partes del mundo se han encontrado concentraciones de flúor en agua subterránea por encima de los límites máximos permisibles establecidos por la OMS, y ha tomado importancia debido al impacto en la salud del ser humano (Bhupinder, 2011).

La contaminación de agua subterránea por arsénico y fluoruro ha sido identificada en muchos países en desarrollo y solamente en algunos desarrollados. Existen muchos lugares en el mundo donde el arsénico y el flúor están presentes de manera simultánea en el agua subterránea en altas concentraciones (Chouhan y Flora, 2010; Gomez *et al.*, 2009).

3.2.1 El mundo

Cerca de 200 millones de personas de 25 países en todo el mundo están bajo los efectos de las altas concentraciones de flúor en el agua subterránea y los 2 países más afectados por esta situación son India y China (Brindha y Elango, 2011; Su *et al.*, 2012; Bhupinder, 2011).

La contaminación por arsénico en el agua subterránea en el este de la cuenca de Bengal en India, es una de los peores desastres naturales presentados hasta la fecha. La principal fuente de exposición a agua potable con concentraciones altas de flúor y arsénico a nivel mundial se origina de manera natural. En Paquistán la contaminación del agua subterránea es predominantemente a causa de las altas concentraciones de arsénico y fluoruro; las concentraciones de arsénico varían de 10 a 500 $\mu\text{g/L}$, y las de flúor de 0.96 a 2.74 mg/L (Chouhan y Flora, 2010; Husain *et al.*, 2012).

En el distrito Haryana en India, 52 muestras de agua subterránea mostraron que las concentraciones de fluoruro se encontraron entre 0.90 y 34.50 mg/L ; encontrándose el 75% de estas muestras por encima del límite establecido por OMS. Además, se estima que en este país existen 20 estados que enfrentan problemas de altas concentraciones de fluoruro en el agua subterránea. En otras comunidades como Ramsapathar y Lungnit las concentraciones de flúor superan los 20.6 mg/L y los 15.4 mg/L respectivamente. En el distrito de Nalgonda las concentraciones llegan hasta los 7.6 mg/L . En Nueva Delhi, India cerca del 50% del agua subterránea excede el límite máximo permisible para fluoruros (Bhupinder, 2011; Kotoky, et al., 2008; Reddy *et al.*, 2010; Brindha y Elango, 2011).

En el norte de China en la cuenca Datong se realizó un estudio en el cual se encontró que las concentraciones de fluoruro en las muestras de agua subterránea de 70 pozos estuvieron entre 0.1 y 8.3 mg/L , situación que pone al 51% de las muestras en un exceso de flúor conforme al límite máximo establecido por la OMS. Otro estudio encontró una concentración de fluoruros en manantiales de agua fría de 0.027 a 0.47 mg/L mientras que en un manantial de agua caliente la concentración estuvo entre 1.02 y 6.90 mg/L (Su *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2009).

El agua subterránea en Noruega tiene concentraciones de fluoruros que alcanzan los 8.26 mg/L debido a las rocas ricas en este elemento. En Turquía se ha observado una concentración de fluoruros en agua potable que se encuentra entre 1.5 y 4 mg/L desde 1955. En el sur de Argelia, Messaïfa se reportaron concentraciones de fluoruro en el agua subterránea de hasta 2.3 mg/L (Brindha y Elango, 2011).

El agua subterránea que se usa en 14 aldeas para uso y consumo en Dashtestan en Irán fue analizada, encontrándose que las concentraciones de fluoruro van de 0.99 a 2.50 mg/L aunque en otros estudios similares se encontraron concentraciones entre 0.12 y 0.39 mg/L en un área y de 0.12 a 2.17 mg/L en otra (Dobaradaran *et al.*, 2008).

En las planicies de Hetao, Mongolia se estudió la geoquímica del agua subterránea resultando en concentraciones de fluoruro de 0.40 a 3.36 mg/L con un 21% de las muestras excediendo los estándares establecidos por la OMS (He *et al.*, 2009).

Las concentraciones de fluoruros en agua subterránea en el Desierto de Thar al sureste de Paquistán se encuentran entre 1.13 y 7.85 mg/L y aproximadamente el 78% de las muestras se encuentran excediendo el límite máximo permisible establecido por la OMS (Rafique *et al.*, 2009).

En la Figura 2 se puede tener una visión más clara y detallada de la presencia y concentración de fluoruros en el agua subterránea en varias regiones del mundo (Brindha y Elango, 2011).

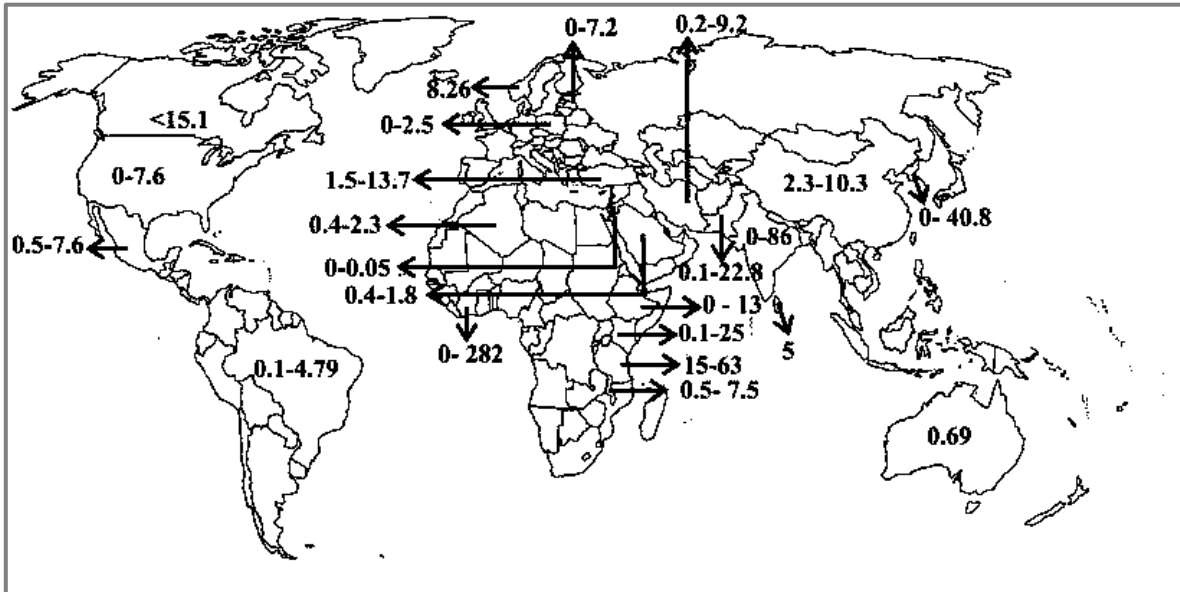


Figura 2. Presencia de fluoruros en agua subterránea en varias partes del mundo (Brindha y Elango, 2011).

3.2.2 Latinoamérica

Debido a que el flúor no es considerado un problema, su presencia no ha sido determinada en muchas partes de Latinoamérica pero ha sido reportado en países como El Salvador, Perú, Bolivia, Nicaragua, Ecuador, Colombia y Guatemala (Alarcón-Herrera, et al., 2012).

3.2.3 México

En México 75% de la población hace uso del agua subterránea para consumo y se estima que existen 6 millones de personas expuestas a altas concentraciones de flúor en agua (Alarcón-Herrera, et al., 2012).

Existen varios estados, municipios y cuerpos de agua en los que la gran contaminación del agua potable por fluoruros ya representa un riesgo para la salud pública por exceder el límite máximo permisible que establece la Norma Oficial Mexicana y es el caso de los acuíferos de San Luis Potosí y el acuífero de Salamanca, la ciudad de Aguascaliente, Ensenada, Chihuahua, Hermosillo, San Miguel de Allende, en la Cuenca Lerma-Chapala, Guanajuato, San Luis Potosí, en la Laguna de Bustillos y en términos

generales en el centro y norte del país. Incluso aunque la concentración de fluoruro en agua no haya excedido los límites máximos permisibles establecidos en la norma, existen afectaciones en la dentadura de los adolescentes en el Estado de Querétaro (Daesslé *et al.*, 2009; Esteller *et al.*, 2011; Armienta y Segovia, 2008; Mahlkecht *et al.*, 2008; Bundschuh, *et al.*, 2012; Ortega *et al.*, 2009; Vega, 2001; Armienta *et al.*, 2010; Rubio *et al.*, 2005; Bundschuh, *et al.*, 2012; DOF, 1994a; ESF, 2006; Sánchez *et al.*, 2004).

Algunos otros puntos de contaminación de agua con fluoruros son las áreas gotermales y volcánicas. Los Azufres y Araró en Michoacán muestran contaminación natural geotermal de flúor con rangos de concentración de 9 a 17 mg/L y de 0.7 a 4.2 mg/L respectivamente (Alarcón-Herrera, *et al.*, 2012).

3.2.4 Salud

En India 62 millones de personas incluyendo 6 millones de niños se encuentran en serios problemas de salud debido al consumo de agua contaminada con fluoruros. La fluorosis es una de ellas y se debe a que en el territorio se encuentran 12 millones de toneladas de las 85 millones disponibles de fluoruros en depósitos en la corteza terrestre. En el distrito de Karbianglongr, Assam, India los estudios muestran que 100 000 personas (una séptima parte de la población local) se encuentran enfermas de fluorosis dental o esquelética (Brindha y Elango, 2011; Bhupinder, 2011; Kotoky *et al.*, 2008).

La fluorosis endémica prevalece en 29 provincias, municipalidades y regiones autónomas en China y cerca de 26 millones de personas en este país, sufren de fluorosis dental debido al alto consumo de fluoruro en el agua. Se estima que más de 30 millones de personas sufren de fluorosis crónica (Brindha y Elango, 2011).

Algunas comunidades de México se han diagnosticado con hidrofluorosis, especialmente en las regiones áridas y semiáridas del centro y noreste. Existen estudios de daños a la salud por la exposición a concentraciones altas de flúor en las fuentes de abastecimiento, y así lo hacen notar los casos de fluorosis en Chihuahua, San Luis Potosí, Jalisco, Tula de Allende, Aguascalientes, Ciudad de México, Nezahualcóyotl y en la Laguna de Bustillos, Chihuahua (Rodríguez *et al.*, 2005; Armienta *et al.*, 2010; Vázquez *et*

al., 2010; Hernández, 2003; Galicia *et al.*, 2009; Alarcón-Herrera, et al., 2012; Rubio *et al.*, 2005).

El flúor también puede producir cambios bioquímicos y funcionales perjudiciales en el cerebro humano en desarrollo como sucedió en un estudio en San Luis Potosí donde los niños de entre 10 y 12 años que estaban expuestos a concentraciones altas de flúor en agua (3.15 ± 0.61 mg/L) el IQ era significativamente más bajo que el de los niños expuestos a concentraciones bajas (0.37 ± 0.04 mg/L) (Rocha *et al.*, 2007).

Los resultados de consumir agua potable con una concentración de flúor de entre 0.5 a 1.5 mg/L es una salud dental óptima; entre 1.5 y 4 mg/L causa fluorosis dental; entre 4 y 10 mg/L induce fluorosis dental y esquelética mientras que a concentraciones mayores a 10 mg/L resulta en fluorosis paralizante (Brindha y Elango, 2011).

El arsénico y el flúor han sido claramente identificados como los causantes de efectos adversos a la salud por medio de la ingesta de agua subterránea contaminada. Asimismo, estos dos elementos están reconocidos a nivel mundial como algunos de los contaminantes inorgánicos prioritarios a tomar más en cuenta en el agua potable (Armienta y Segovia, 2008).

4. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo es evaluar la calidad del agua, haciendo énfasis en el estudio de la presencia de arsénico y flúor en el agua potable proveniente de pozos localizados en la zona de Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.

Objetivos específicos

- Realizar una caracterización fisicoquímica, bacteriológica y de metales pesados en cuatro pozos y dos manantiales que abastecen agua potable en los Municipios de Jerécuaro y Acámbaro, Guanajuato, durante cuatro campañas de muestreo a lo largo de un año.
- Cuantificar el contenido de arsénico y flúor en los seis sitios de estudio durante cuatro campañas de muestreo a lo largo de un año.
- De acuerdo a los resultados obtenidos y en función de una revisión bibliográfica y de la normatividad vigente, se establecerá un diagnóstico de la calidad del agua potable en los sitios de estudio.
- Elaborar un diagrama de Piper, para caracterizar el tipo de agua.

5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1 ACÁMBARO

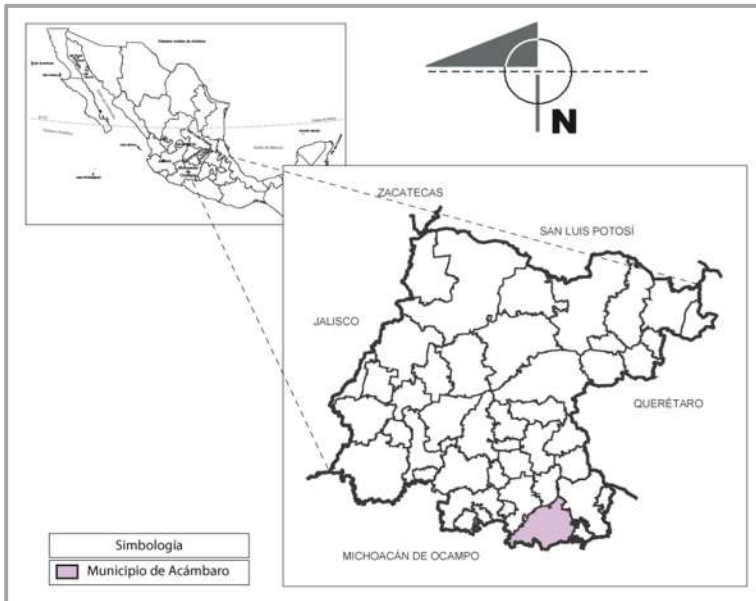


Figura 3. Macrolocalización y microlocalización del Municipio de Acámbaro, Guanajuato (INEGI, 2011).

El Municipio de Acámbaro se encuentra entre los paralelos $19^{\circ}54'$ y $20^{\circ}14'$ N y los meridianos $100^{\circ}28'$ y $101^{\circ}00'$ W con una altura de entre 1800 y 3100 msnm. Colinda al norte con los Municipios de Salvatierra, Tarimoro y Jerécuaro; al este con los Municipios de Jerécuaro y Tarandacuao; al sur con el Estado de Michoacán de Ocampo; al oeste con el Estado de

Michoacán de Ocampo y el Municipio de Salvatierra. Cuenta con 267 localidades y una población total de 101 762 habitantes (Figura 3) (INEGI, 2009).

El rango de temperatura en el municipio va de 10 a 20 °C, con precipitaciones anuales entre 700 y 900 mm. Es de clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, templado subhúmedo con lluvias en verano y semifrío subhúmedo con lluvias en verano. El 61.5% del territorio es un suelo de uso agrícola y el 2.4% es zona urbana (INEGI, 2009).

5.2 JERÉCUARO

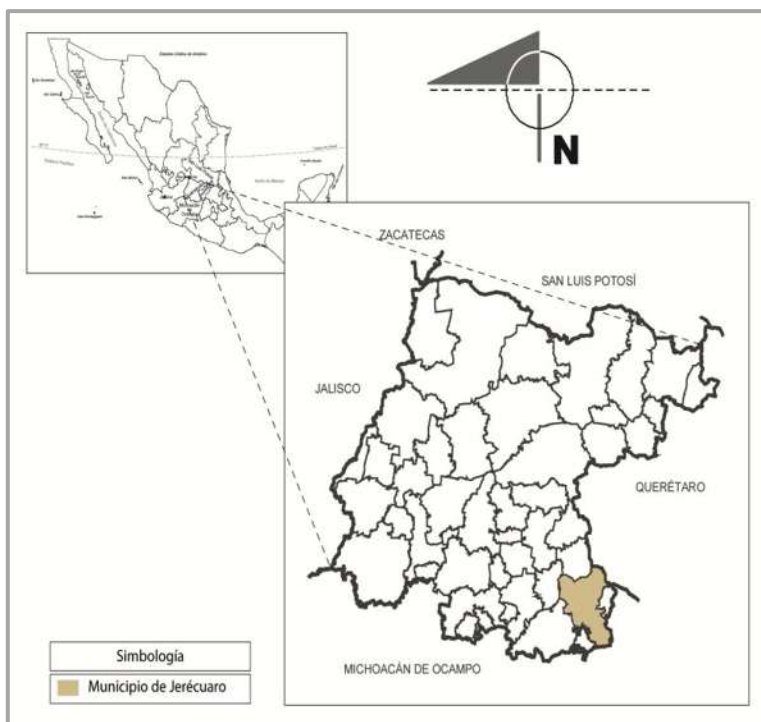


Figura 4. Macrolocalización y microlocalización del Municipio de Jerécuaro, Guanajuato (INEGI, 2011).

El Municipio de Jerécuaro se encuentra entre los paralelos $20^{\circ}24'$ y $19^{\circ}58'$ N; los meridianos $100^{\circ}21'$ y $100^{\circ}42'$ W a una altura entre 1800 y 3100 msnm. Colinda al norte con el Municipio de Apaseo El Alto y el Estado de Querétaro; al este con el Estado de Querétaro, el Municipio de Coroneo y el Estado de Michoacán de Ocampo; al sur con el Estado de Michoacán de Ocampo, los Municipios de Tarandacua y Acámbaro; al oeste con los Municipios de Acámbaro y Tarimoro. Cuenta con 184 localidades y una población total de 46 137 habitantes (Figura 4) (INEGI, 2009a).

El rango de temperatura en el municipio va de 10 a 20°C , con una precipitación entre 700 y 900 mm. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, semicálido subhúmedo con lluvias en verano y semifrío subhúmedo con lluvias en verano. El 60.8% del suelo es de uso agrícola y el 0.9% es zona urbana (INEGI, 2009a).

5.3 ACUÍFEROS

5.3.1 Acuífero Valle de Acámbaro



Figura 5. Localización del acuífero Valle de Acámbaro (CNA, 2011a).

todos ellos pertenecientes al Estado de Guanajuato y al sur con el acuífero Maravatio-Contepec-E. Huerta, perteneciente al Estado de Michoacán (Figura 5) (CNA, 2011a).

El acuífero cubre en su mayor parte los Municipios de Acámbaro, Jerécuaro y la totalidad de Tarandacuao; así como pequeñas porciones de Salvatierra y Tarimoro. El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Lerma-Pacífico y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guanajuato. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda (CNA, 2011a).

Fisiografía: los valores de precipitación y temperatura media anual son de 743.5 mm/año y 18 °C respectivamente. Los valores medios máximos de temperatura en el acuífero se presentan en mayo y descienden en forma gradual hasta el mes de enero (CNA, 2011a).

Localización: el acuífero Valle de Acámbaro, se localiza en el extremo suroriental del Estado de Guanajuato, entre los paralelos 19° 56' y 20° 12' N y los meridianos 100° 21' y 100° 55' W, cubre una superficie aproximada de 1123 km². Limita al norte con el acuífero Valle de La Cueva, al noroeste y oeste con el acuífero Salvatierra-Acámbaro, al suroeste con el acuífero Lago de Cuitzeo,

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 12 Lerma-Chapala-Santiago, que pertenece a las subcuencas del Lerma-Salamanca y Lerma-Toluca, el cual cruza el Municipio de Acámbaro con dirección este-oeste y capta un gran número de escurrimientos provenientes de las zonas elevadas del municipio. En el territorio del acuífero se encuentra la Presa Solís y la corriente superficial más importante de la región es el río Lerma. Este río atraviesa la porción central del acuífero, con dirección este hasta la ciudad de Acámbaro, desviándose después al noroeste, hacia Salvatierra (CNA, 2011a).

Los rasgos morfológicos de la zona de estudio están relacionados con estructuras volcánicas; los más abundantes son los cerros de forma cómica que están asociados a conos volcánicos que representan antiguos volcanes (CNA, 2011a).

Geología superficial: las fronteras son convencionales y están definidas por los parteaguas de las elevaciones topográficas que lo delimitan. Al norte está definida por la Sierra Los Agustinos y el Cerro Cuevas de Moreno; al sur por los cerros San Andrés, San Antonio y Gordo, en los límites entre los Estados de Guanajuato y Michoacán; al oriente por las Sierras Tierra Fría y de Puruoaagua, que limitan los Estados de Guanajuato y Michoacán y al occidente por los lomeríos que se ubican entre las poblaciones Las Cruces, San Pablo Pejo y San José Las Pilas. Con excepción de la Sierra Los Agustinos, las demás sierras están constituidas por roca basáltica y andesíticas que presentan permeabilidad primaria y secundaria por fracturamiento (doble porosidad) (CNA, 2011a).

Hidrogeología: las evidencias geológicas y geofísicas permiten establecer la dinámica del agua subterránea que presenta un sistema-acuífero libre a semiconfinado, tipo granular-fracturado con doble porosidad, por ende heterogéneo y anisótropo de continuidad hidráulica regional, entre unidades volcánicas, piroclásticas, vulcano-sedimentarias y depósitos terrígenos de compacidad y granulometría variables. Está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, areniscas y conglomerados; y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición basáltica. La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava. Por su parte, el medio volcánico fracturado presenta un gran espesor, con marcadas propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea. El paquete en su conjunto está afectado por tectonismo, generando un

sistema de fosas y pilares tectónicos. El funcionamiento hidrogeológico en la región es variado, debido a la heterogeneidad de los basaltos y demás derrames volcánicos que afloran y a su grado o intensidad de fracturamiento (CNA, 2011a).

La dirección del flujo subterráneo muestra una red concéntrica hacia la porción central del valle, con dirección preferencial NE-SW, con alimentaciones provenientes de los flancos sur y noroeste. El flujo tiende a descargar hacia la Presa Solís y hacia el cauce del río Lerma, en esta última zona la concentración del bombeo ha provocado un extenso cono de abatimiento, que ha interceptado el flujo que en condiciones naturales seguía el curso del río Lerma a través del cañón que formó en las rocas basálticas, hacia el acuífero vecino Salvatierra-Acámbaro (CNA, 2011a).

La familia de agua predominante es bicarbonatada sódica que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia que ha estado en contacto con rocas volcánicas (CNA, 2011a).

5.3.2 Acuífero Lago de Cuitzeo

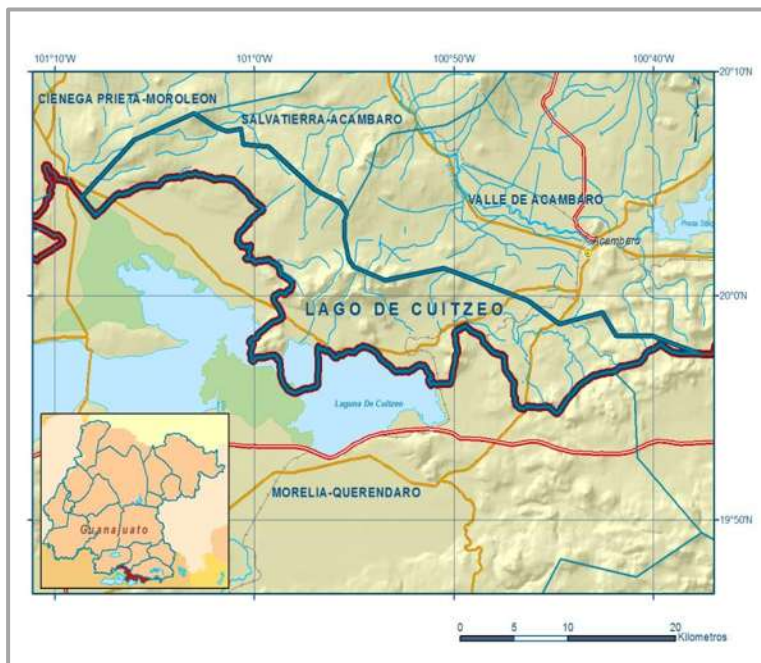


Figura 6. Localización del acuífero Lago de Cuitzeo (CNA, 2011b).

En su porción sureste, se encuentra el Municipio de Acámbaro; y la región occidental comprende pequeñas áreas de los Municipios de Salvatierra, Yuriria y Uriangato. El acuífero pertenece a la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guanajuato. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda (CNA, 2011b).

En su porción sureste, se encuentra el Municipio de Acámbaro; y la región occidental comprende pequeñas áreas de los Municipios de Salvatierra, Yuriria y Uriangato. El acuífero pertenece a la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guanajuato. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda (CNA, 2011b).

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago. El cuerpo de agua más importante en el área de estudio es el lago de Cuitzeo, en él desembocan los ríos Grande y Queréndaro, además de otras corrientes secundarias. El lago de Cuitzeo, ocupa el fondo de una cuenca originalmente cerrada, en dirección Norte-Sur y su máxima longitud es de 13 km (CNA, 2011b).

Localización: el acuífero Lago de Cuitzeo, se ubica en la porción sur del Estado de Guanajuato, entre los paralelos $19^{\circ} 55'$ y $20^{\circ} 09'$ de N y los meridianos $100^{\circ} 38'$ y $100^{\circ} 09'$ W; cubriendo una superficie aproximada de 341 km². Limita al norte con el acuífero Salvatierra - Acámbaro, al noroeste con el acuífero Valle de Acámbaro, al noroeste con Ciénega Prieta-Moroleón, todos ellos pertenecientes al Estado de Guanajuato; al sureste con el acuífero Maravatío-Contepec-E. Huerta y al sur con el acuífero Morelia-Queréndaro, pertenecientes al Estado de Michoacán (Figura 6) (CNA, 2011b).

El acuífero se localiza en una región cuyo relieve define rasgos geomorfológicos diversos, la mayor parte de origen volcánico y de procedencia fluvial y aluvial. La región se caracteriza por presentar numerosos aparatos volcánicos de estructuras diversas que en general conservan su estructura original (CNA, 2011b).

Geología superficial: las fronteras son convencionales y están definidas por los parteaguas de las elevaciones topográficas que lo delimitan. Al norte, en su límite con los acuíferos Ciénega Prieta-Moroleón y Salvatierra-Acámbaro, está definida por el Cerro Blanco y los cerros ubicados entre las poblaciones La Pila y Las Cruces, y en su límite con el acuífero Valle de Acámbaro por el cerro sin nombre ubicado entre las poblaciones San Pablo Pejo y San José de Las Pilas; al sur y occidente su límite es una frontera de carga constante representada por el Lago de Cuitzeo; al oriente la frontera es el límite político con el Estado de Michoacán. Todos los cerros están constituidos por rocas basálticas y andesíticas de permeabilidad primaria y secundaria por fracturamiento (doble porosidad) (CNA, 2011b).

Hidrogeología: las evidencias geológicas y geofísicas permiten establecer que la dinámica del agua subterránea se presenta en un sistema acuífero libre a semiconfinado, tipo granular-fracturado con doble porosidad, por ende heterogéneo y anisótropo de continuidad hidráulica entre unidades volcánicas, piroclásticas, vulcano-sedimentarias y depósitos aluviales y lacustres de compactación y granulometría variables. Está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, y lacustres; y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición basáltica. La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava. Por su parte, el medio volcánico fracturado presenta un gran espesor, con marcadas propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea. El paquete en su conjunto está afectado por tectonismo, generando un sistema de fosas y pilares tectónicos. El funcionamiento hidrogeológico en la región es muy variado, debido a la heterogeneidad de las diferentes emisiones de basalto y demás derrames volcánicos que afloran y a su grado o intensidad de fracturamiento (CNA, 2011b).

La familia de agua predominante es bicarbonatada-sódica que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha estado en contacto con rocas

volcánicas que contienen plagioclasas sódicas. En segundo lugar se encuentra la familia sulfatada cálcica (CNA, 2011b).

La presencia de la Sierra de Iramuco, forma vetas de cuarzo con mineralización de molibdenita, oro y plata, que es susceptible de contener arsenopirita, muy soluble en agua y mucho más en ácido carbónico (CNA, 2011b).

5.4 GEOLOGÍA

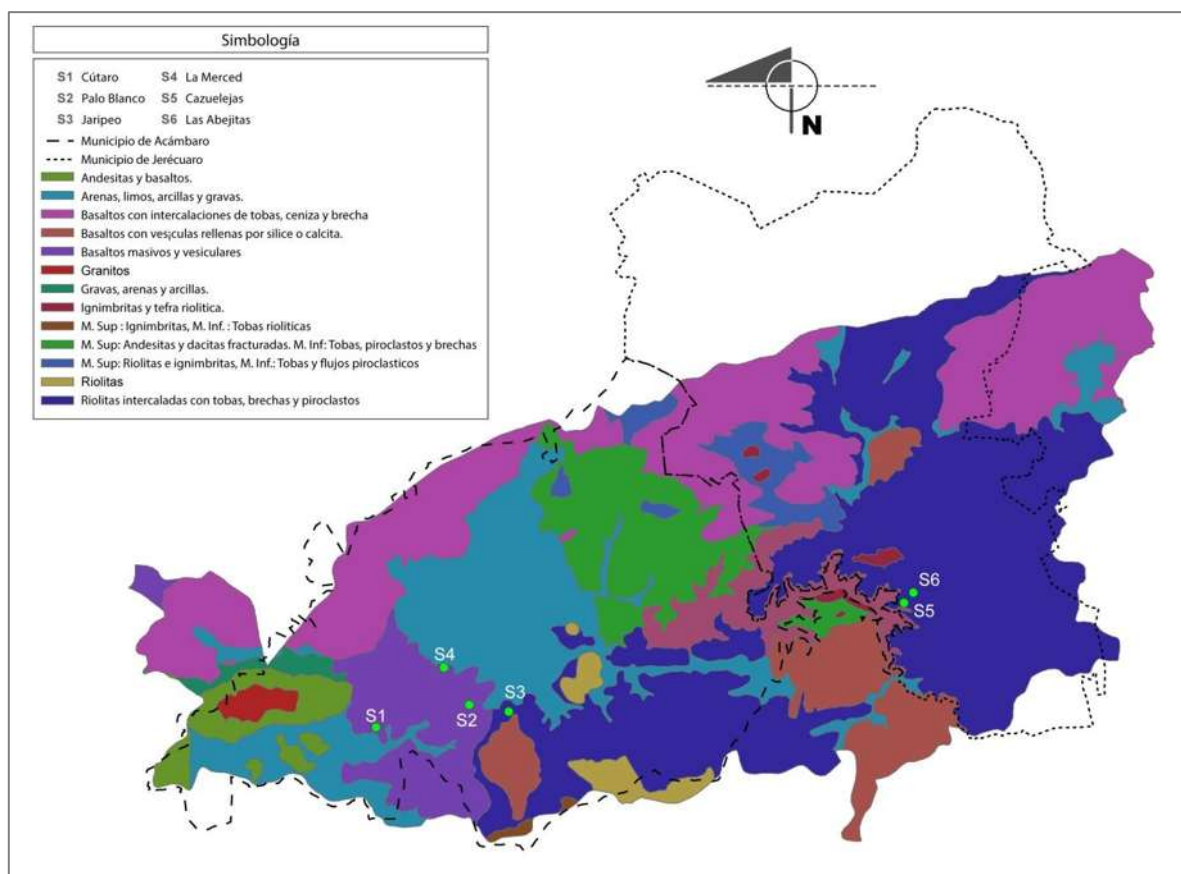


Figura 7. Geología de la zona de estudio (COTAS, 2010).

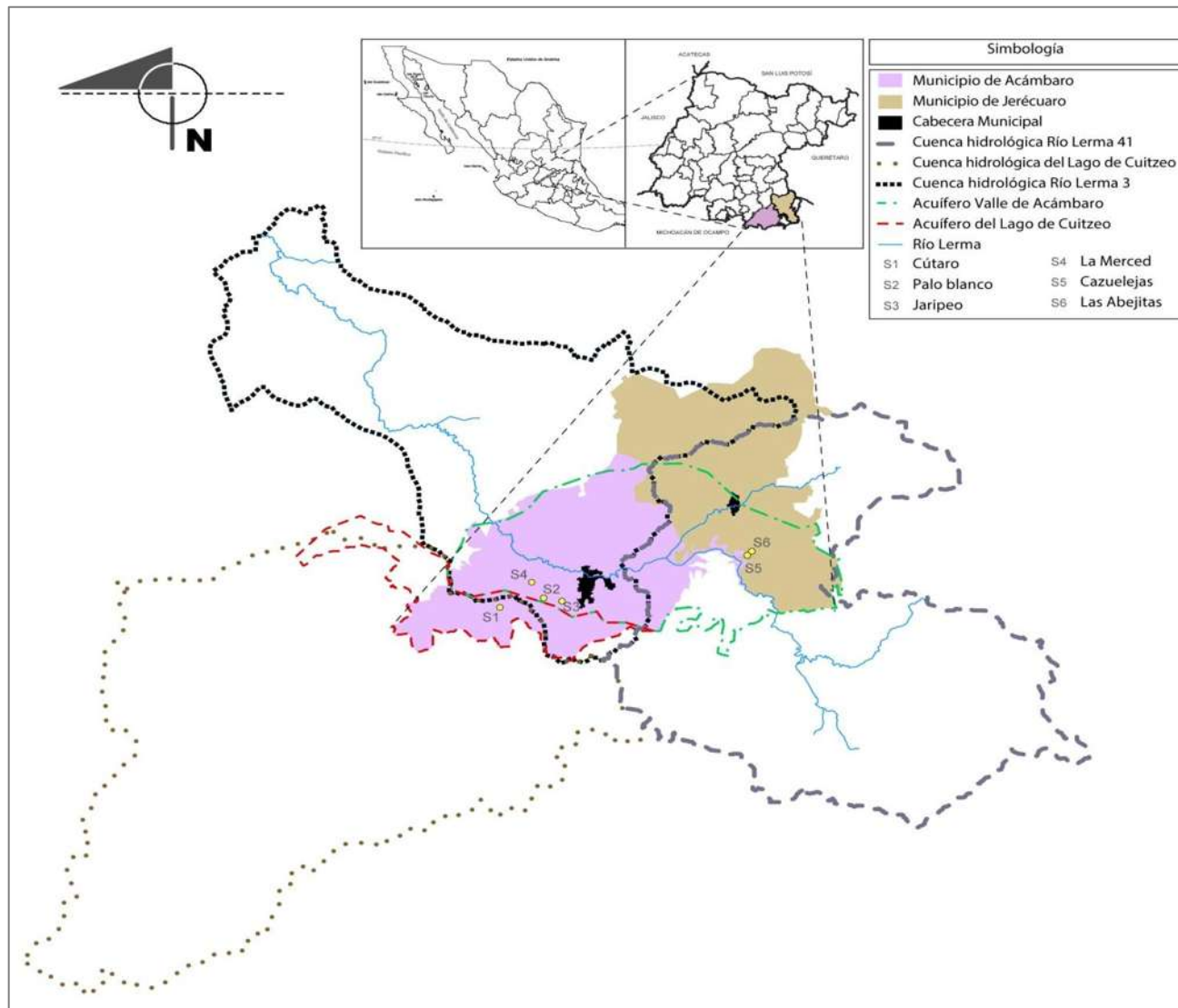
La geología en la zona de estudio, específicamente los sitios S1 (Cútaró), S2 (Palo Blanco) y S4 (La Merced) (Figura 7) está comprendida en un área de 96.63 km² y es clasificada como basaltos del mioceno tardío, siendo ricos en FeO, MgO y CaO. Son basaltos masivos y vesiculares con espesores que van de los 300 a los 400 metros. La edad

es del Mioceno Superior (Messiniano) y datan de hace 6 millones de años (COTAS, 2010; Dercourt y Paquet, 2010).

La geología en la zona de estudio, específicamente en el sitio S3 (Jaripeo) (Figura 7) está comprendida en un área de 145.73 km² y es clasificada como del terciario volcánico riolítico (riolita chichindaro). Son riolitas (SiO₂) intercaladas con tobas (ricas en Al, Si, K y F), brechas y piroclastos. La edad es del Oligoceno Inferior (Rupeliano) y datan de hace 32 millones de años (COTAS, 2010; Dercourt y Paquet, 2010).

La geología en la zona de estudio, específicamente en los sitios S5 (Cazuelejas) y S6 (Abejitas) (Figura 7) está comprendida en un área de 375.39 km² y es clasificada como del terciario volcánico riolítico (riolita chichindaro). Son riolitas (SiO₂) intercaladas con tobas (ricas en Al, Si, K y F), brechas y piroclastos. La edad es del Oligoceno Inferior (Rupeliano) y datan de hace 32 millones de años (COTAS, 2010).

5.5 HIDROLOGÍA



En la Figura 8 se muestran los cuerpos de agua subterráneos (acuíferos) y superficiales (río y cuencas) que se encuentran dentro del área de estudio.

Los datos fueron proporcionados por la CNA y el Consejo Técnico de Aguas de Acámbaro-Cuitzeo (COTAS) y procesados en un software de manejo de sistemas de información geográfica (ArcGIS).

Figura 8. Hidrología de los Municipios de Acámbaro y Jerécuaro (CNA, 2009).

6. METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.1 LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Se seleccionaron cuatro pozos (Figura 10 a 13) y dos manantiales (Figura 14 y 15) en los Municipios de Acámbaro y Jerécuaro, en el Estado de Guanajuato. La Tabla 1 y la Figura 9 indican la ubicación de los sitios seleccionados.

La selección de los sitios de toma de muestra se estableció de acuerdo a los siguientes criterios: 1) con respecto a la información obtenida de la presencia de contaminantes en la cuenca de Cuitzeo; 2) de la accesibilidad para la toma de muestra y; 3) del agua para uso y consumo humano. La metodología que se siguió para la toma, transporte y conservación de las muestras de los pozos de agua fue la establecida en la Norma Oficial Mexicana y el Manual de Métodos Estándar (DOF, 1993; APHA-AWWA-WPCF, 1995).

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los sitios de toma de muestra.

SITIO	LOCALIDAD	NOMENCLATURA	PROF. POZO (m)	ALTURA DE POZO A NTN* (m)	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
					Sexagesimales	UTM
1	Cútaro	S1	90	1957	20° 00' 14.9" N 100° 51' 20.2" W	X : 305872 Y : 2213009
2	Palo Blanco	S2	200	1910	20° 00' 29.3" N 100° 47' 11.1" W	X : 313126 Y : 2213382
3	Jaripeo	S3	-	1922	20° 00' 8.2" N 100° 45' 35.7" W	X : 315881 Y : 2212707
4	La Merced	S4	150	1884	20° 01' 48" N 100° 48' 38.8" W	X : 310596 Y : 2215797
5	Cazuelejas	S5	-	1914	20° 04' 14.6" N 100° 29' 25.6" W	X : 344150 Y : 2220008
6	Abejitas	S6	-	1921	20° 04' 37.7" N 100° 29' 3.8" W	X : 344812 Y : 2220715

*NTN = nivel de terreno natural

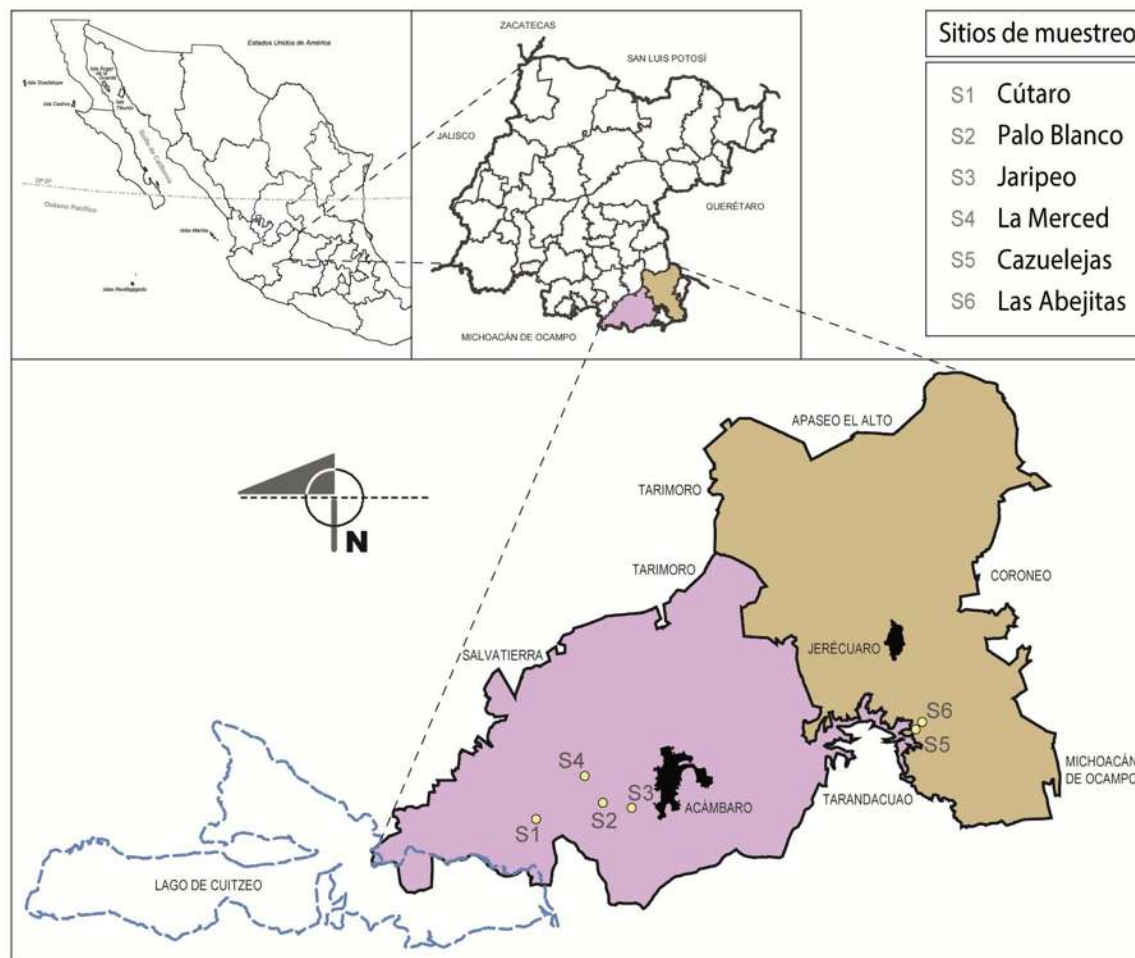


Figura 9. Localización de los sitios de toma de muestra en el Estado de Guanajuato (INEGI, 2009; INEGI, 2009a).



Figura 10. Sitio S1 (Cútaró).



Figura 11. Sitio S2 (Palo Blanco).



Figura 12. Sitio S3 (Jaripeo).



Figura 13. Sitio S4 (La Merced).



Figura 14. Sitio S5 (Cazuelejas).



Figura 15. Sitio S6 (Abejitas).

6.2 TOMA DE MUESTRAS

Para este trabajo se realizaron cuatro tomas de muestra en los meses de diciembre 2011, febrero, abril y agosto 2012, de acuerdo con las indicaciones de la normatividad mexicana que establece los procedimientos para la toma, transporte y recolección de las muestras (Tabla 2). Todas las muestras se mantuvieron a 4°C durante su traslado al laboratorio. En la Tabla 2 se muestran los requerimientos de preservación y almacenamiento de las muestras.

Parámetros fisicoquímicos. La toma de muestras para determinar los parámetros fisicoquímicos se realizó en botellas de HDPE (polietileno de alta densidad) que se llenaron tratando de minimizar la presencia de aire con el objeto de evitar cambios químicos. En cada sitio se tomaron 3L de muestra. Cada recipiente se marcó con la fecha y el sitio de toma de muestra. Las muestras se conservaron a 4°C durante su traslado al laboratorio (Tabla 2).

Parámetros bacteriológicos. La toma de muestras para determinar coliformes fecales se realizó en bolsas estériles desechables Whirl-Pak de 100 mL. En el lugar de toma de muestra se removió el sello de la bolsa y se llenó aproximadamente $\frac{3}{4}$ partes del volumen. Se cerró la bolsa y se transportó al laboratorio para realizar los análisis (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

Tabla 2. Toma, preservación y almacenamiento de muestras de agua potable según las normas mexicanas.

PARÁMETRO	NORMA MEXICANA	CANTIDAD MÍNIMA DE MUESTRA	TIPO DE ALMACENAMIENTO	PERIODO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO	PRESERVACIÓN
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	100 mL	<i>In situ</i>	Periodo no mayor a 24 h	Sin preservación
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	100 mL	<i>In situ</i>	Periodo no mayor a 2 h	No se debe agregar ningún preservador
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000	Según el instrumento empleado	<i>In situ</i>	Periodo no mayor a 24 h	No requiere
Oxígeno disuelto	NMX-AA-012-SCFI-2001	Según el instrumento empleado	<i>In situ</i>	Periodo no mayor a 8 h	No requiere
Dureza total	NMX-AA-072-SCFI-2001	400 mL	Frasco de polietileno o vidrio de borosilicato. Refrigeración a 4°C	Periodo no mayor a 6 meses	Acidificar con HNO ₃ hasta pH 2 o menor inmediatamente después de la recolección
Alcalinidad total	NMX-AA-036-SCFI-2001	500 mL	Frasco de vidrio, polietileno o polipropileno. Conservar de 0 a 4°C	Periodo no mayor a 24 h	No requiere
Arsénico	NMX-AA-051-SCFI-2001	250 mL	Envase de polietileno o polipropileno. Refrigeración a 4°C	Periodo no mayor a 6 meses	Agregar ácido nítrico concentrado hasta un pH menor a 2
Coliformes fecales	NMX-AA-042-1987	100 mL	Bolsas para análisis bacteriológico. Mantener a 4°C	Periodo no mayor a 24 h	Agregar 0.1 cm ³ de solución de tiosulfato de sodio al 1%
Metales pesados	NMX-AA-051-SCFI-2001	500 mL	Envase de polietileno o polipropileno. Refrigeración a 4°C	Periodo no mayor a 6 meses. Para mercurio periodo no mayor a 28 días	Agregar ácido nítrico concentrado hasta un pH menor a 2
Flúor	NMX-AA-077-SCFI-2001	300 mL	Envase de polietileno o teflón. Refrigeración a 4°C	Periodo no mayor a 28 días	No requiere

Metales pesados, arsénico y flúor La toma de muestras se realizó en recipientes de polietileno de 120 mL previamente descontaminados (Tabla 2). Para esto, cada frasco con su tapa y contratapa se introdujo en una solución de HNO₃ al 10% durante una semana. Posteriormente se cambió a una solución de HNO₃ al 1% durante una semana. Después se enjuagó tres veces y se llenó con agua desionizada. En el lugar de toma de muestra se utilizó una de estas botellas como blanco, vaciándola y volviéndola a llenar con agua desionizada con el objeto de obtener datos referentes a posibles contaminantes locales adquiridos en el manejo de las muestras. Otra botella se vació y llenó con la muestra. Al final del procedimiento, todas las botellas fueron etiquetadas con los datos de toma de muestra (Alfaro *et al.*, 2002).

6.2.1 Material y equipo

Los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, metales y arsénico se determinaron siguiendo la metodología indicada por la Norma Oficial Mexicana y por el Manual de Métodos Estándar para cada parámetro. El equipo que se usó en los análisis *in situ* y de laboratorio se indica en la Tabla 3 (DOF, 1987; DOF, 2001; DOF, 2001a; DOF, 2001b; DOF, 2001c; DOF, 2001d; DOF, 2001e, APHA-AWWA-WPCF, 1995).

Tabla 3. Material y equipo requerido para realizar las determinaciones *in situ* y laboratorio.

PARÁMETRO	EQUIPO
Fisicoquímicos (<i>in situ</i>)	Termómetro Potenciómetro (Corning Checkmate II) Potenciómetro HANNA HI991003
Fisicoquímicos (laboratorio)	Potenciómetro (Corning Checkmate II) Espectrómetro de absorción atómica (PerkinElmer AAnalyst 200) Fluorímetro (HANNA HI 98402)
Metales pesados	Espectrómetro de absorción atómica (PerkinElmer AAnalyst 200)
Arsénico	Espectrómetro de absorción atómica con generador de hidruros (PerkinElmer AAnalyst 200)

6.3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS

6.3.1 Parámetros fisicoquímicos

Temperatura. La temperatura de las muestras se midió *in situ* inmediatamente después de la colecta, con un termómetro de inmersión (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. El pH, conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto se midieron *in situ* con un potenciómetro portátil (Corning Checkmate II). La calibración para pH se realizó utilizando soluciones buffer para pH 7 y 10. La estandarización cero de oxígeno disuelto se realizó con la inmersión del electrodo en la disolución estándar (sulfito de sodio y disolución saturada de cloruro de cobalto) de concentración nula (0 mg/L) de oxígeno y para la conductividad eléctrica se calibró el electrodo al aire (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

Dureza total. Se determinó de acuerdo a la NMX-AA-072-SCFI-2001. El método se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) con los iones calcio y magnesio (Anexo 3) (DOF, 2001b).

Alcalinidad. Se determinó de acuerdo a la NMX-AA-036-SCFI-2001. El método está basado en la medición de la alcalinidad o acidez en el agua por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante un álcali o un ácido según sea el caso de concentración perfectamente conocida (Anexo 2) (DOF, 2001).

6.3.2 Componentes mayores

Los Cl^- y SO_4^{2-} y se determinaron de acuerdo a la NMX-AA-074-1981 y la NMX-AA-073-SCFI-2001 por métodos tritrimétricos (Anexo 4 y Anexo 5) (DOF, 2001c) (DOF, 1981).

Los CO_3^{2-} y HCO_3^- se calcularon mediante la siguiente ecuación, con base en los valores de alcalinidad total y pH obtenidos (Deutsch, 1997):

$$\text{CO}_3^{2-} \text{ (mg/L)} = \frac{[\text{Alcalinidad total (mg/L CaCO}_3)]60}{(2 + (\frac{10^{-\text{pH}}}{10^{-10.3}}))50}$$

$$\text{HCO}_3^- \text{ (mg/L)} = \frac{[\text{Alcalinidad total (mg/L CaCO}_3)]61}{(1 + (2 \times \frac{10^{-10.3}}{10^{-\text{pH}}}))50}$$

6.3.3 Parámetros bacteriológicos

Los coliformes fecales se determinaron de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-42-198, por el método de tubos múltiples. El método permite determinar el número más probable de microorganismos coliformes presentes en una muestra utilizando un medio selectivo (Anexo 7) (DOF, 1987).

6.3.4 Metales pesados

Los metales se determinaron de acuerdo al Manual de Métodos Estandarizados por espectrometría de absorción atómica (AAS). El método basado en el uso de la espectrometría de absorción atómica se describe en el Anexo 8 (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

6.3.5 Arsénico

El arsénico se determinó de acuerdo a la NMX-AA-051-SCFI-2001 por espectrometría de absorción atómica (AAS) mediante generación de hidruros. El método basado en el uso de la espectrometría de absorción atómica se describe en el Anexo 9 (DOF, 1994b; APHA-AWWA-WPCF, 1995; DOF, 2001a).

6.3.6 Flúor

Los fluoruros se determinaron de acuerdo a la NMX-AA-077-SCFI-2001. El método se basa en el uso de un electrodo selectivo de ion específico para fluoruro como se describe en el Anexo 10 (DOF, 2001e).

6.4 DIAGRAMA DE PIPER

Las especies iónicas mayoritarias presentes en la mayoría de las aguas naturales son Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- y SO_4^{2-} y el diagrama trilinear (diagrama de

Piper) muestra el porcentaje de composición de los iones agrupando Na^+ y K^+ y los cationes mayoritarios. Al agrupar CO_3^{2-} y HCO_3^- se generan tres grupos de aniones mayoritarios. La Figura 16 muestra la forma del diagrama que se usa en la caracterización del agua (Fetter, 2000; Hiscock, 2005).

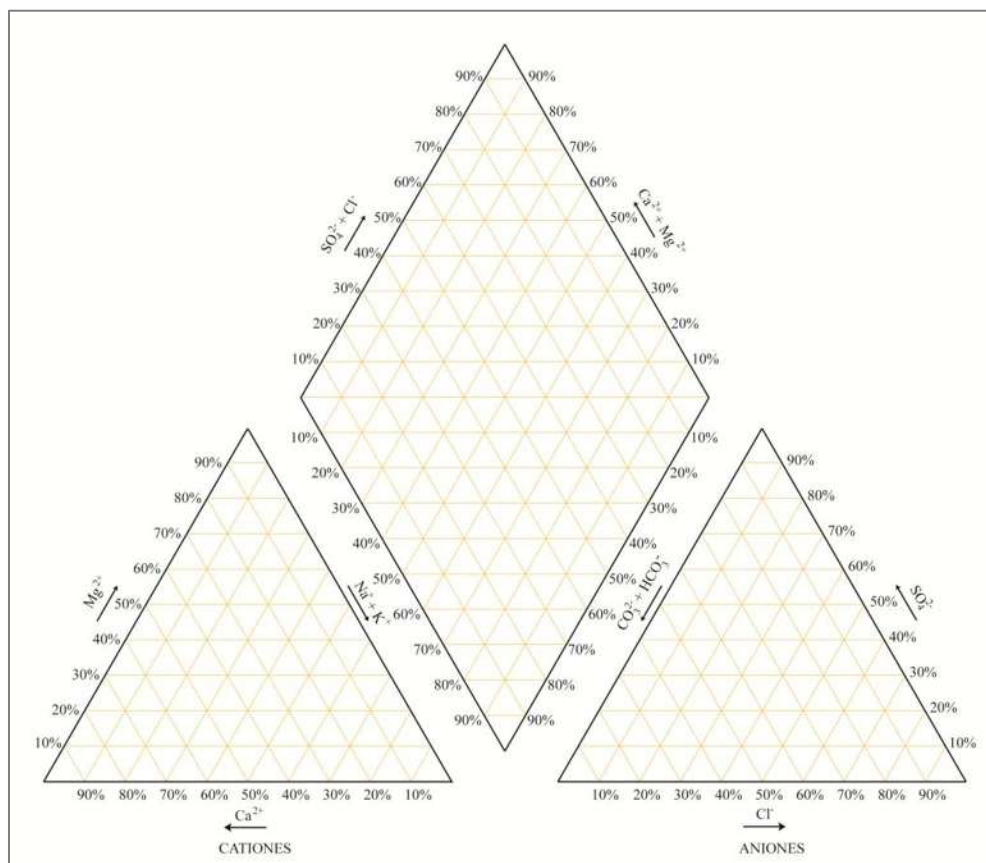


Figura 16. Diagrama trilinear de Piper que es usado para trazar los resultados de los estudios de la química del agua (Hiscock, 2005).

El análisis se lleva a cabo en base a los porcentajes de cationes y aniones. Cada vértice del triángulo representa una concentración del 100% de uno de los 3 constituyentes. Si la muestra tiene presente 2 grupos de constituyentes, entonces el punto representará el porcentaje de cada uno trazado en la línea entre los vértices para esos 2 grupos. Si los 3 grupos de constituyentes están presentes, el análisis caerá en el centro del campo (Fetter, 2000; Hiscock, 2005).

La figura con forma de diamante localizada entre los 2 triángulos se usa para representar la composición del agua con respecto a los cationes y aniones en conjunto. El

punto de los cationes es proyectado dentro del diamante de manera paralela con respecto del lado del triángulo etiquetado como magnesio y el punto de los aniones es proyectado de manera similar al lado del triángulo etiquetado como sulfatos. La intersección de estas 2 líneas se traza como un punto en el diamante (Fetter, 2000; Hiscock, 2005).

Como el agua fluye a través de un acuífero se asume que la composición química de diagnóstico es consecuencia de la interacción con el entorno, y el término facies hidroquímicas es usado para describir a los cuerpos de agua subterránea en un acuífero que difiere en su composición química. Las facies están en función de la litología, de las cinéticas de la solución y de los patrones de flujo del acuífero. Las facies hidroquímicas se clasifican en base a la dominancia de los iones en la facies por medio del diagrama trilinear (Figura 17) (Fetter, 2000; Hiscock, 2005).

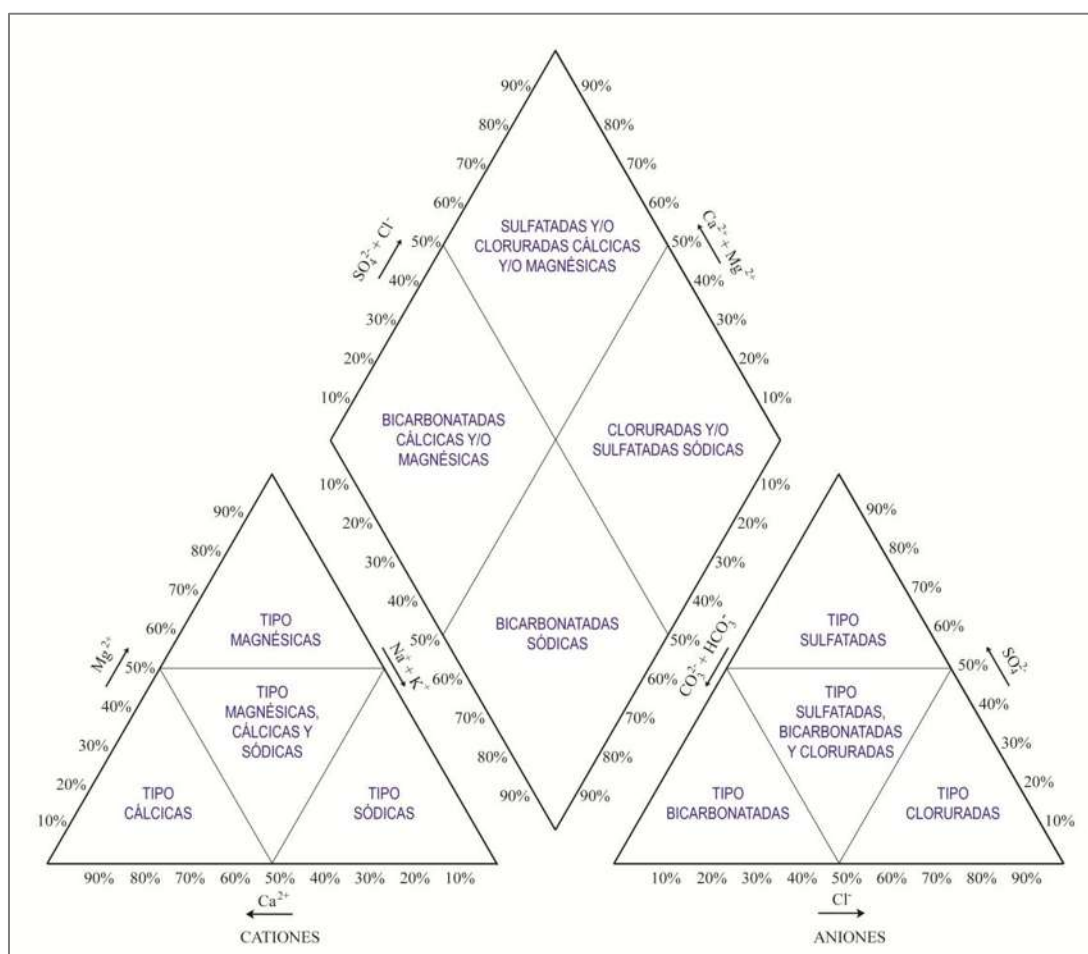


Figura 17. Sistema de clasificación hidroquímica para aguas naturales usando el diagrama trilinear de Piper (Hiscock, 2005).

La calidad del agua subterránea depende de las sustancias disueltas en el agua y ciertas propiedades y características que estas sustancias le imparten al agua (Fetter, 2000; Hiscock, 2005).

6.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis de varianza (ANOVA) de una vía nos sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa. Esta prueba es una generalización del contraste de igualdad de medias para dos muestras independientes. Se aplica para contrastar la igualdad de medias de tres o más poblaciones independientes con distribución normal y se requieren “k” muestras independientes de la variable de interés (Portilla, 2006).

Cuando realizamos un análisis de varianza, un valor de F significativo nos indica que no todas las condiciones producen el mismo efecto sobre la variable independiente. Con el fin de tener mayores elementos para toma de decisiones es importante saber dónde se encuentran dichas diferencias significativas y si éstas siguen una tendencia que nos permita una mejor toma de decisiones. Una prueba que nos permite evaluar dicha diferencia es la prueba de Tukey, que mide la diferencia de los valores de las medias de dos grupos en términos de la varianza intragrupal (Portilla, 2006).

Las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos, metales pesados, arsénico y flúor en agua se compararon por sitios y muestreos mediante un análisis de varianza, así como la prueba de Tukey. Las pruebas se efectuaron con un nivel de significancia del 95% a fin de comparar las diferencias existentes utilizando el programa JMP versión 8.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos en pozos y manantiales en el Estado de Guanajuato se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores obtenidos de temperatura (T), pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), salinidad (S), sólidos disueltos totales (SDT), dureza total (DT) y alcalinidad total (AT) realizados a las muestras de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.

Periodo	Sitio	T	pH	CE	OD	S	SDT	DT	AT
		°C	-	µS/cm	mg/L	-	mg/L	mg/L CaCO ₃	mg/L CaCO ₃
I	S1	26.5	7.9	540	5.36	0.3	286.0	128.8	302.0
II	S1	22.9	8.3	525	4.65	0.3	281.0	112.3	281.0
III	S1	24.0	8.1	528	4.30	0.3	280.0	114.6	244.0
IV	S1	25.4	8.1	529	4.00	0.3	281.0	133.2	220.0
I	S2	21.7	7.5	323	3.86	0.2	171.6	117.7	177.1
II	S2	25.5	8.1	408	3.06	0.2	214.0	124.6	216.0
III	S2	29.1	7.9	316	3.86	0.2	172.1	118.4	137.0
IV	S2	26.0	8.0	327	4.13	0.2	174.4	127.0	143.0
I	S3	28.1	8.0	300	5.15	0.1	160.1	122.1	235.4
II	S3	26.4	8.4	304	4.18	0.1	160.9	89.8	172.0
III	S3	30.5	8.1	298	4.50	0.1	160.7	112.3	133.0
IV	S3	28.5	7.9	308	3.20	0.1	163.9	112.4	129.0
I	S4	25.5	7.9	504	3.80	0.2	270.0	99.9	137.1
II	S4	25.8	8.2	520	2.70	0.2	271.0	89.8	225.0
III	S4	28.8	8.0	499	4.00	0.2	266.0	114.4	217.0
IV	S4	25.5	8.0	506	4.00	0.2	269.0	112.4	204.0
I	S5	46.1	5.8	3450	1.50	> ld	1805.0	666.0	1159.5
II	S5	44.7	6.4	3440	0.94	> ld	1796.0	680.6	1170.0
III	S5	46.6	6.3	3480	1.08	> ld	1783.0	592.2	992.5
IV	S5	47.3	6.4	3460	0.96	> ld	1816.0	576.7	970.0
I	S6	41.3	6.3	3820	0.71	> ld	2010.0	665.6	1350.0
II	S6	39.7	6.5	3910	1.12	> ld	2002.0	688.1	1330.0
III	S6	42.6	6.4	3830	0.90	> ld	1991.0	653.4	1120.0
IV	S6	40.9	6.5	3920	1.10	> ld	2050.0	607.9	1080.0

> ld= mayor al límite de detección del equipo

I = 13-dic-11; II = 31-ene-12; III = 24-abr-12; IV = 15-ago-12

La temperatura oscila entre 21.7 y 47.3 °C, con el valor más bajo obtenido en S2 (Palo Blanco, primer periodo) y el valor más alto en S5 (Cazuelejas, cuarto periodo) y de manera general los manantiales tienen temperaturas más altas que los pozos. En el caso de los manantiales (Cazuelejas y Abejitas) las altas temperaturas afectaron en la concentración de oxígeno disuelto ya que a mayor temperatura menor solubilidad de éste. Este parámetro está asociado directamente a la disolución de los elementos que están presentes en la geología del acuífero.

Los valores del pH se encuentran entre 5.8 en S5 (Cazuelejas, primer periodo) y 8.4 en S3 (Jaripeo, segundo periodo) siendo ligeramente alcalino para el caso de los pozos y ligeramente ácido para el caso de los manantiales. El pH de los sitios está dentro de los límites establecidos por la norma para agua potable a excepción de S5 (en los 4 periodos) y S6 (Abejitas, primer y tercer periodo) que son inferiores a 6.5, siendo el S5 (Cazuelejas, primer periodo) el más ácido de todos los sitios. Aunque el pH no tiene un efecto directo en la salud humana, sí interviene en la especiación de los elementos contenidos en el agua, así como en su concentración. Además, a pH menores a 7 puede afectar los sistemas de abastecimiento por corrosión y a pH mayor a 8 en la cloración (DOF, 1994a).

La conductividad eléctrica se encuentra entre 298 a 3920 $\mu\text{S}/\text{cm}$, presentándose el valor mínimo en S3 (Jaripeo, tercer periodo) y el más alto en S6 (Abejitas, cuarto periodo). Este parámetro nos ayuda a estimar de manera general el contenido de iones en disolución debido a que son buenos conductores, por tanto la conductividad se interpreta como la cantidad total de sales disueltas que a su vez significa la contaminación de elementos inorgánicos.

El oxígeno disuelto se encuentra entre 0.71 y 5.36 mg/L. El mínimo se observó en S6 (Abejitas, primer periodo) y el máximo en S1 (Cútaró, primer periodo). Su concentración afecta las reacciones en las que participan el hierro, manganeso, cobre y los compuestos que contienen nitrógeno.

La salinidad en los pozos en los 4 periodos resultó ser baja (0.3) con respecto a los manantiales donde superó el límite de detección en los 4 periodos. La salinidad está asociada directamente con la presencia de sodio y potasio. La presencia de estos dos

elementos se da de manera natural. Es uno de los parámetros que se usan para determinar si el agua es apta para consumo humano.

La concentración de sólidos disueltos totales mínima fue de 160.1 mg/L en S3 (Jaripeo, primer periodo) y la máxima de 2050 mg/L en S6 (Abejitas, cuarto periodo). La concentración en los manantiales (Cazuelejas y Abejitas) en los 4 periodos, superó el límite máximo permisible indicado por la norma para agua potable que establece un máximo de 1000 mg/L; y la concentración en pozos no superó el límite máximo permisible en ninguno de los periodos o sitios. Los sólidos disueltos totales son un indicativo de la presencia de material soluble inorgánico y están directamente relacionados con la salinidad (DOF, 1994a).

La dureza total mínima fue de 89.8 mg/L CaCO_3 en S3 y S4 (Jaripeo y La Merced, segundo periodo) y la máxima de 688.1 mg/L CaCO_3 en S6 (Abejitas, segundo periodo). La concentración en los manantiales (Cazuelejas y Abejitas) en los cuatro periodos, superó el límite máximo permisible indicado por la norma para agua potable que establece un máximo de 500 mg/L; y la concentración en pozos no superó el límite máximo permisible en ninguno de los periodos o sitios. Las altas concentraciones se pueden deber a los niveles elevados de sólidos disueltos totales que reflejan la disolución de los minerales; y en el agua subterránea se debe principalmente a carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros de calcio o de magnesio (Bhupinder, 2011; DOF, 1994a).

La alcalinidad total mínima fue de 129 mg/L CaCO_3 en S3 (Jaripeo, cuarto periodo) y la máxima de 1350 mg/L CaCO_3 en S6 (Abejitas, primer periodo), siendo los valores más altos en los manantiales (Cazuelejas y Abejitas). La alcalinidad se adquiere mediante la disolución de rocas básicas carbonatadas, que además aportan al medio hídrico cationes mayoritarios como Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Mg^{2+} (Rodríguez y Marín, 1999).

7.2 COMPONENTES MAYORES

Los resultados de la medición de componentes mayores y el balance de los mismos, realizados a pozos y manantiales en Cútaro (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en el Estado de Guanajuato se muestran en la Tabla 5 y Tabla 9 respectivamente.

Tabla 5. Resultados de la medición de componentes mayores realizados en las muestras de Cútaro (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.

Periodo	Sitio	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	B.I.
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
I	S1	17.8	21.4	10.5	291.4	26.6	15.1	89.2	4.1	2.66%
II	S1	18.1	19.3	6.0	275.0	21.2	14.4	82.2	3.1	1.21%
III	S1	15.2	16.1	9.0	235.0	23.7	13.4	63.6	4.0	0.72%
IV	S1	20.9	16.2	14.0	206.0	28.3	15.2	51.7	4.4	1.44%
I	S2	14.8	9.3	16.8	160.3	19.5	16.7	34.5	6.1	0.12%
II	S2	16.7	10.4	0.0	216.0	25.3	14.9	42.3	2.1	-0.10%
III	S2	10.2	5.9	15.0	129.0	26.1	12.9	16.6	0.9	4.46%
IV	S2	13.0	10.8	0.0	143.0	25.8	15.2	12.0	1.1	1.06%
I	S3	15.9	18.8	31.5	203.9	17.8	18.9	71.5	3.9	6.12%
II	S3	8.1	8.5	8.0	164.0	14.7	12.9	39.2	2.4	1.42%
III	S3	10.2	10.7	9.0	124.0	23.7	12.9	15.3	1.3	2.56%
IV	S3	13.0	10.7	0.0	129.0	24.1	12.6	12.7	1.6	0.17%
I	S4	11.5	9.0	16.0	121.1	16.0	14.6	25.9	5.7	0.90%
II	S4	20.0	15.6	0.0	225.0	14.7	12.9	68.4	3.3	0.23%
III	S4	22.0	10.7	16.0	201.0	23.7	13.4	57.6	1.2	3.46%
IV	S4	21.5	15.9	8.0	196.0	23.3	16.0	46.4	1.9	1.32%
I	S5	357.1	90.5	0.0	1159.5	213.1	32.3	429.7	21.2	-0.13%
II	S5	372.5	120.9	0.0	1170.0	214.6	35.0	439.1	10.0	-0.05%
III	S5	363.8	139.1	0.0	992.5	178.9	35.2	420.0	8.3	0.39%
IV	S5	358.9	126.8	0.0	970.0	141.6	54.1	414.5	7.9	0.80%
I	S6	347.3	75.2	0.0	1350.0	233.6	19.8	492.0	18.5	0.33%
II	S6	390.5	105.7	0.0	1330.0	214.6	36.8	509.3	8.9	0.58%
III	S6	344.4	132.6	0.0	1120.0	195.2	40.2	421.7	6.4	0.36%
IV	S6	335.0	132.7	0.0	1080.0	150.0	56.6	421.9	7.9	0.28%

I = 13-dic-11; II = 31-ene-12; III = 24-abr-12; IV = 15-ago-12

Para comprobar la relativa exactitud de los resultados de los análisis químicos (Tabla 5), se calculó el balance iónico (Anexo 11) fundamentado en la neutralidad eléctrica de las muestras de agua, de tal modo que el total de cargas de aniones y cationes calculados con base en los resultados de laboratorio, debe de ser igual. El total de cargas positivas y negativas se obtiene sumando los equivalentes químicos de aniones y cationes, respectivamente. El error de balance iónico se expresa por la diferencia, como un porcentaje de la suma, y un error igual o menor al 10% es aceptable. Los datos del balance iónico en este trabajo fueron analizados en una hoja de cálculo programada en Excel, y la mayoría presentó un error dentro del aceptable, lo que indica confiabilidad en los resultados (Paredes *et al.*, 2010).

7.3 PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS

La Tabla 6 indica los resultados de los análisis de coliformes fecales realizados a las muestras de agua.

Tabla 6. Resultados de los análisis de coliformes fecales realizados a las muestras de agua de Cútaro (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.

COLIFORMES FECALES					
Periodo	Sitio	NMP/100mL	Periodo	Sitio	NMP/100mL
I	S1	0	I	S4	7
II	S1	0	II	S4	0
III	S1	0	III	S4	0
IV	S1	0	IV	S4	0
I	S2	0	I	S5	0
II	S2	0	II	S5	0
III	S2	0	III	S5	0
IV	S2	0	IV	S5	0
I	S3	0	I	S6	0
II	S3	0	II	S6	0
III	S3	0	III	S6	0
IV	S3	0	IV	S6	0

Existe ausencia de coliformes fecales en todos los sitios y muestras excepto en S4 (La Merced, segundo periodo) que es un pozo de agua, superando con esto lo establecido en la Norma Mexicana, que señala que no debe detectarse la presencia de coliformes fecales. La presencia de coliformes indica la existencia de una fuente de contaminación fecal reciente y constante. El sitio S4 (La Merced) es el único pozo que es sometido al proceso de desinfección (DOF, 1994a).

7.4 METALES PESADOS

La Tabla 7 indica los resultados de los análisis de metales pesados realizados a las muestras de agua. Se realizaron análisis para determinar la presencia de los metales pesados que marca la normatividad mexicana y se encontraron solamente hierro y arsénico.

Tabla 7. Resultados de los análisis de arsénico y hierro realizados a las muestras de agua de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazulejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato.

ARSÉNICO Y HIERRO (mg/L)							
Periodo	Sitio	As	Fe	Periodo	Sitio	As	Fe
I	S1	0.072	0.019	I	S4	0.035	0.001
II	S1	0.054	<l/d	II	S4	0.029	<l/d
III	S1	0.086	<l/d	III	S4	0.054	<l/d
IV	S1	0.056	0.183	IV	S4	0.055	0.806
I	S2	0.045	0.015	I	S5	0.001	1.190
II	S2	0.025	<l/d	II	S5	0.002	0.046
III	S2	0.034	<l/d	III	S5	<l/d	0.992
IV	S2	0.054	0.317	IV	S5	0.001	1.608
I	S3	0.049	<l/d	I	S6	0.003	3.125
II	S3	0.034	0.001	II	S6	0.003	0.047
III	S3	0.046	<l/d	III	S6	<l/d	3.148
IV	S3	0.060	0.180	IV	S6	0.002	2.516

<l/d = menor al límite de detección

El hierro no estuvo presente en todas las muestras de agua. Las concentraciones se presentaron entre 0.001 mg/L en S3 (Jarapeo, segundo periodo) y S4 (La Merced, primer periodo) a 3.148 mg/L en S6 (Abejitas, tercer periodo). En los sitios S1 (Cútar), S2 (Palo Blanco) y S4 (La Merced) en el segundo y tercer periodo y S3 (Jarapeo) en el primero y segundo periodo, no se detectó la presencia de este metal. La concentración de hierro superó el límite máximo establecido por la Norma Oficial Mexicana de 0.3 mg/L en los pozos S2 (Palo Blanco) y S4 (La Merced) ambos el cuarto periodo (DOF, 1994a). El hierro superó el límite máximo permisible en los manantiales S5 y S6 (Cazuelejas y Abejitas) en todos los periodos excepto en el segundo. Las concentraciones más altas se presentaron en los manantiales que son los sitios más ácidos, y esto se puede explicar porque en pH ligeramente ácidos se promueve la disolución de óxidos e hidróxidos de hierro. Las concentraciones más altas se presentaron en el mes de agosto (cuarto periodo) excepto en S6 (Abejitas) que sucedió en el mes de abril (tercer periodo); y las concentraciones más bajas en el mes de enero. Además, el hierro mostró un comportamiento que fue inversamente proporcional al arsénico (Hoang, 2010).

7.5 ARSÉNICO

En todos los sitios estuvo presente el arsénico en el agua entre 0.001 mg/L en S5 (Cazuelejas) en el primer y cuarto periodo a 0.086 mg/L en S1 (Cútar) en el tercer periodo. En S5 y S6 (Cazuelejas y Abejitas) en el tercer periodo no se alcanzó a detectar la presencia de arsénico. La concentración de arsénico en todos los pozos fue superior o igual al límite máximo permitido por la Norma Oficial Mexicana de 0.025 mg/L, y la concentración de arsénico en los manantiales estuvo por debajo de lo establecido en la Norma Oficial Mexicana. Estas concentraciones serían todavía más preocupantes si consideramos como referencia el límite máximo permisible establecido por la OMS (0.010 mg/L). Las concentraciones de arsénico más altas de los 4 pozos se presentaron en la toma de muestra del mes de agosto (cuarto periodo) que es cuando la temporada de lluvias en la región se encuentra en los valores más altos de precipitación. Esto es consistente con la información referente a la geología de la región, ya que en el acuífero del Lago de Cuitzeo existe arsenopirita que es muy soluble en agua y que es el área en donde se encuentran los 4 pozos. Y para el caso de los manantiales, es probable que en la geología de la región no existan minerales que contengan arsénico. La población expuesta al agua de los pozos es susceptible de presentar problemas de salud por las concentraciones de arsénico, debido a que se usa para consumo y preparación de alimentos.

7.6 FLÚOR

Las concentraciones de flúor van de 0.94 mg/L como mínimo en S2 (Palo Blanco; tercer periodo) a 21.20 mg/L como máximo en S5 (Cazuelejas; primer periodo); la concentración en todos los sitios excede el límite máximo permisible (1.5 mg/L) que marca la norma a excepción de S2 (Palo Blanco, tercero y cuarto periodo), S3 (Jaripeo, tercer periodo) y S4 (La Merced, tercer periodo). Los valores más altos de fluoruros en el agua están registrados en los manantiales. La concentración de flúor en el agua subterránea es función de factores como: la disponibilidad y solubilidad de los minerales que lo contienen; velocidad del flujo; temperatura, pH, concentración de iones de calcio y bicarbonato en el agua; así como de la geología y de las características físicas o químicas del acuífero (DOF, 1994a; Moghaddam y Fijani, 2008).

Excepto por S1 (Cútaró) que presentó su máxima concentración de flúor en el segundo periodo y su mínima en el cuarto periodo, el resto de los sitios presentaron su máxima concentración en el primer periodo correspondiente a la época de menor precipitación pluvial (diciembre) y su mínima concentración en el cuarto periodo correspondiente a la época de mayor precipitación pluvial (agosto). Lo anterior es congruente con lo que establece Ozsvarh (2009) que las áreas con precipitación abundante son menos propensas a tener altas concentraciones debido a que los iones solubles como el fluoruro son lixiviados y diluidos en comparación con los ambientes de baja tasa de recarga en las aguas subterráneas, que llevan a una interacción prolongada del agua y el mineral lo que hace que la alta salinidad intensifique la disolución.

La población expuesta al agua de los pozos y manantiales es susceptible de presentar problemas de salud por las concentraciones de flúor, debido a que el agua de pozo la usan para consumo y preparación de alimentos, y la de manantiales la consumen con fines terapéuticos.

7.7 DIAGRAMA DE PIPER

La Figura 18 muestra el diagrama de Piper con la clasificación del agua conforme al porcentaje de iones. Los diferentes tipos de aguas subterráneas se clasifican a fin de informar de una forma gráfica sobre la composición química o sobre algunos aspectos de la misma. Los datos utilizados para la realización de los diagramas de Piper se encuentran en el Anexo 11.

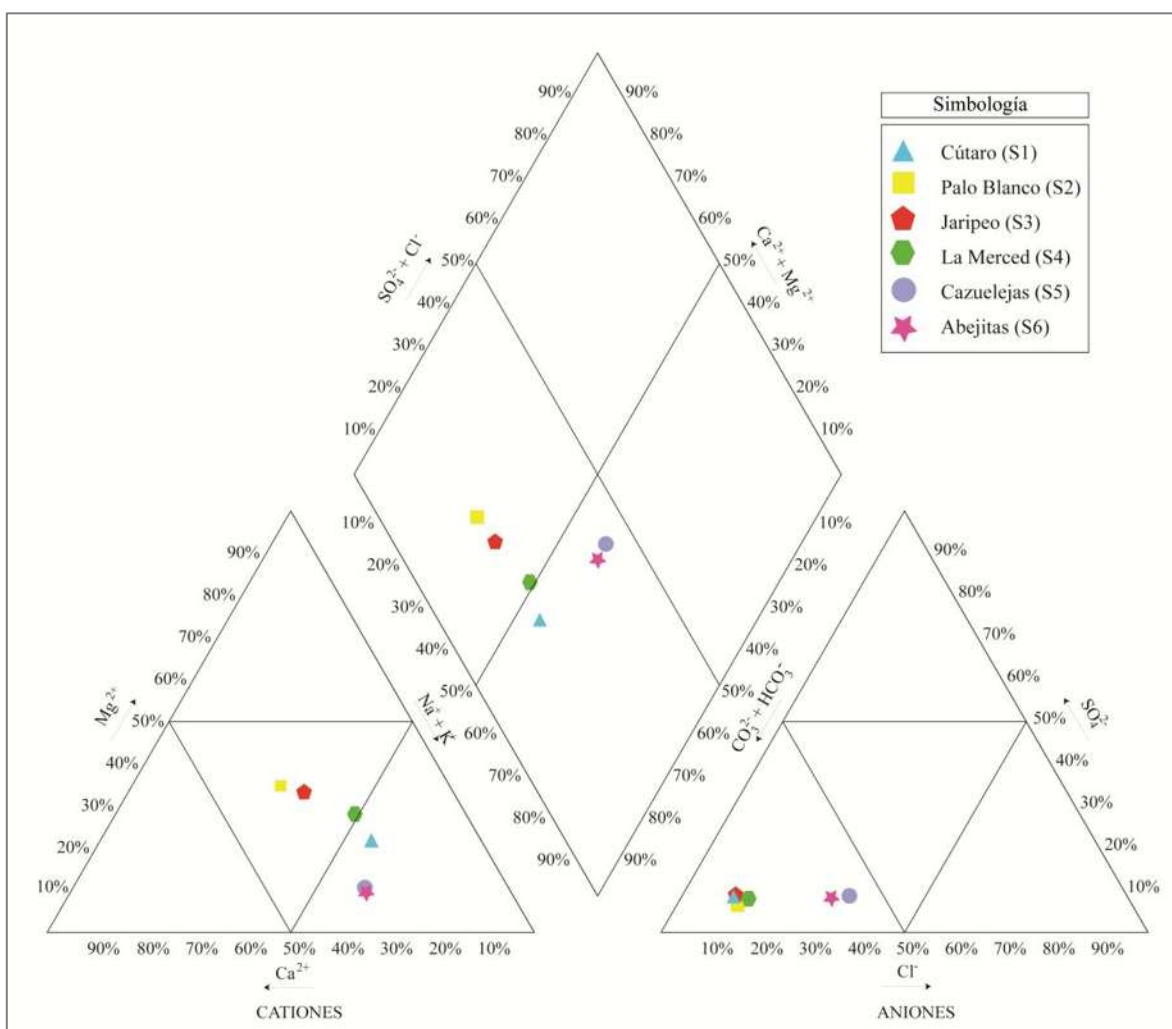


Figura 18. Diagrama de Piper para la clasificación del tipo de agua en pozos y manantiales.

El agua del pozo S1 (Cútaró) y de los manantiales S5 (Cazuelejas) y S6 (Abejitas) se clasificaron como $\text{HCO}_3^- \text{-Na}^+$ mientras que el pozo S2 (Palo Blanco) fue del tipo $\text{HCO}_3^- \text{-Mg}^{2+} \text{-Ca}^{2+} \text{-Na}^+$, el pozo S3 (Jaripeo) fue $\text{HCO}_3^- \text{-Na}^+ \text{-Ca}^{2+} \text{-Mg}^{2+}$ y $\text{HCO}_3^- \text{-Na}^+ \text{-Mg}^{2+} \text{-Ca}^{2+}$ para el pozo S4 (La Merced). De acuerdo con la secuencia de Chevorateb el agua de lluvia (reciente infiltración) es normalmente bicarbonatada cálcica, condicionadas por la naturaleza del medio sólido que determina la solubilidad y abundancia de elementos químicos y el tiempo de reacción. En términos generales, las aguas subterráneas empiezan siendo (según la concentración de aniones) bicarbonatadas, luego sulfatadas y finalmente cloruradas y con los cationes empiezan como cálcicas, magnésicas y después sódicas. Por lo tanto, la sobreexplotación del acuífero del Valle de Acámbaro y del acuífero del Lago de Cuitzeo, así como el alto contenido de bicarbonatos (>50%) en el agua de todos los sitios y periodos, puede ser indicativo de que estos cuerpos de agua presentan agua de reciente infiltración (Contreras *et al.*, 2012; Santana *et al.*, 2008; CNA, 2011a; CNA, 2011b).

7.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los datos obtenidos en los 4 periodos para los 6 sitios, se realizó con el programa JMP versión 8.0. Se utilizó el método de Tukey de comparaciones múltiples para comparar todos los pares de media con una significancia de 0.05. Se calcularon las matrices de correlación tomando a $r \geq 0.76$ como valor de correlación fuerte como lo hace Cuéllar *et al.*, (2012) en sus trabajos, ya que se debe considerar que los resultados de los análisis están influenciados por factores externos que no pueden ser controlados en el laboratorio y pueden generar un margen de error más amplio.

7.8.1 ANOVA y comparación de medias (Tukey-Kramer) entre sitios

Este análisis se realizó con la finalidad de comparar las medias aritméticas de los parámetros fisicoquímicos y saber si existen diferencias estadísticas significativas entre sitios ($p < 0.05$). De acuerdo a los valores obtenidos en el análisis de varianza el estudio muestra las diferencias estadísticas significativas ($p < 0.001^*$) que se presentaron entre los pozos y manantiales, siendo los manantiales los que mostraron los valores más altos respecto a los pozos. Esta situación se confirmó con la comparación de medias (Figura 19 a 30 y Anexo 12).

La temperatura más alta se presentó en los manantiales superando los 40°C mientras que los pozos mostraron valores menores a 30°C. En el caso de la turbiedad los valores en los manantiales no superaron las 10 UTN y en los pozos resultaron menores a 1.5 UTN. El valor más elevado de conductividad eléctrica fue alcanzado en los manantiales sin superar los 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en los pozos no superó 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De la misma manera, los valores máximos de los sólidos totales se presentaron en los manantiales alcanzando un máximo de 2125 mg/L y en los pozos el valor máximo fue de 360.5 mg/L. Los sólidos disueltos totales presentaron los valores más altos en los manantiales (aprox. 2050 mg/L) y los más bajos en los pozos (aprox. 300 mg/L). La concentración de dureza total fue más baja en los pozos con valores menores a 125 mg/L CaCO_3 , con respecto a los manantiales donde alcanzó valores de hasta 653 mg/L CaCO_3 . Para el caso de la alcalinidad total los manantiales no sobrepasaron de 1300 mg/L CaCO_3 y en los pozos se obtuvieron valores menores a los 200

mg/L. En cuanto a los cloruros, estos presentaron los valores menores a 2 mg/L en los pozos y los manantiales mostraron los valores más altos aproximados a los 370 mg/L. En lo que se refiere a las concentraciones de bicarbonatos las mediciones máximas presentaron en los manantiales con valores menores a 1300 mg/L y con valores inferiores a 260 mg/L. El calcio alcanzó valores máximos de 120 mg/L en manantiales y de 25 mg/L en pozos. En cuanto al magnesio, no superó los 15 mg/L en los pozos y en los manantiales su concentración fue menor a 40 mg/L. Por último, el sodio mostró valores máximos en los manantiales de 470 mg/L, mientras que los pozos resultaron con valores máximos de 75 mg/L (Figura 19 a 30 y Anexo 12).

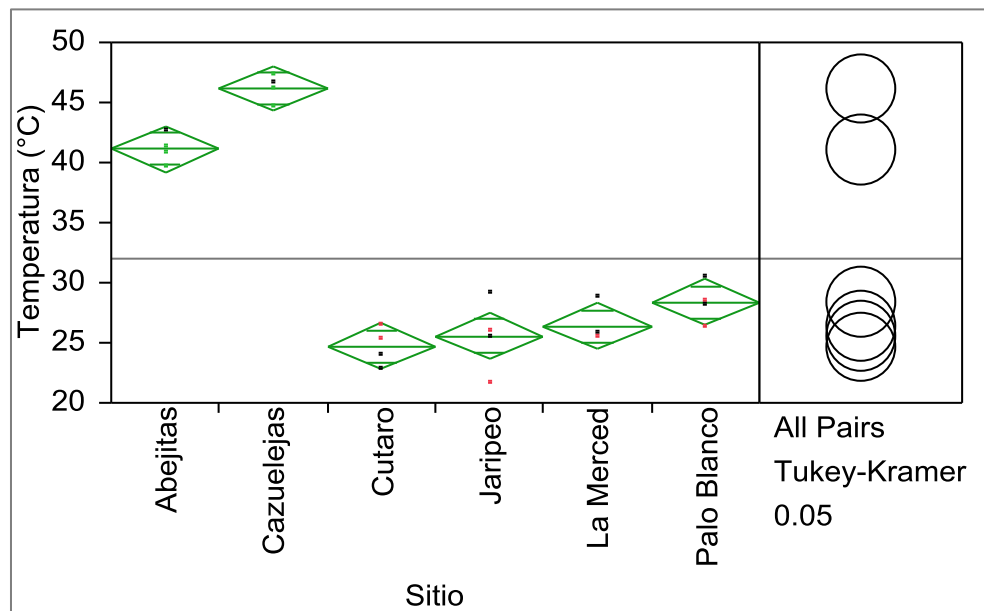


Figura 19. Análisis de una vía y comparación de medias para la temperatura por sitios.

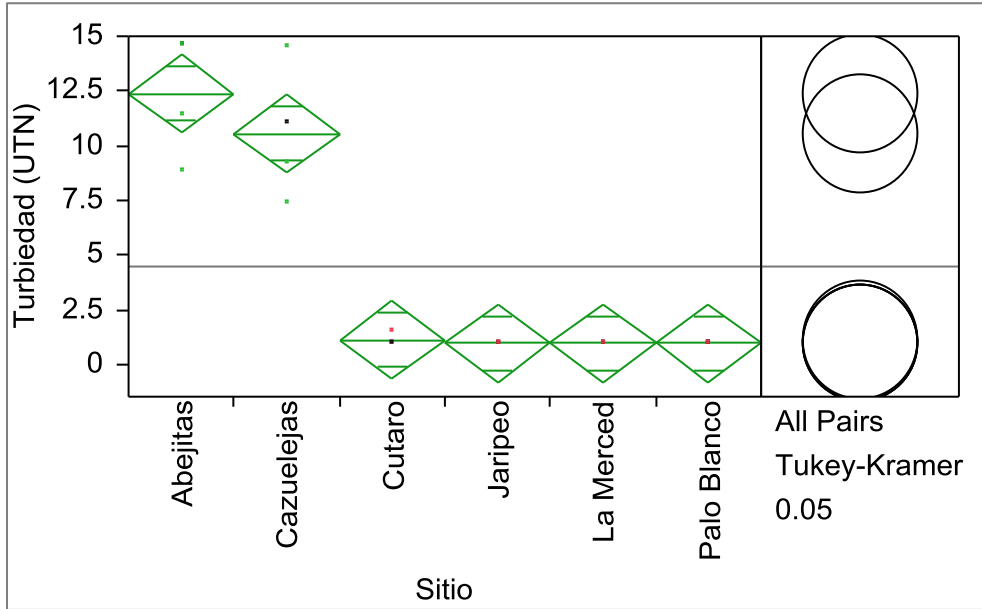


Figura 20. Análisis de una vía y comparación de medias para la turbiedad por sitios.

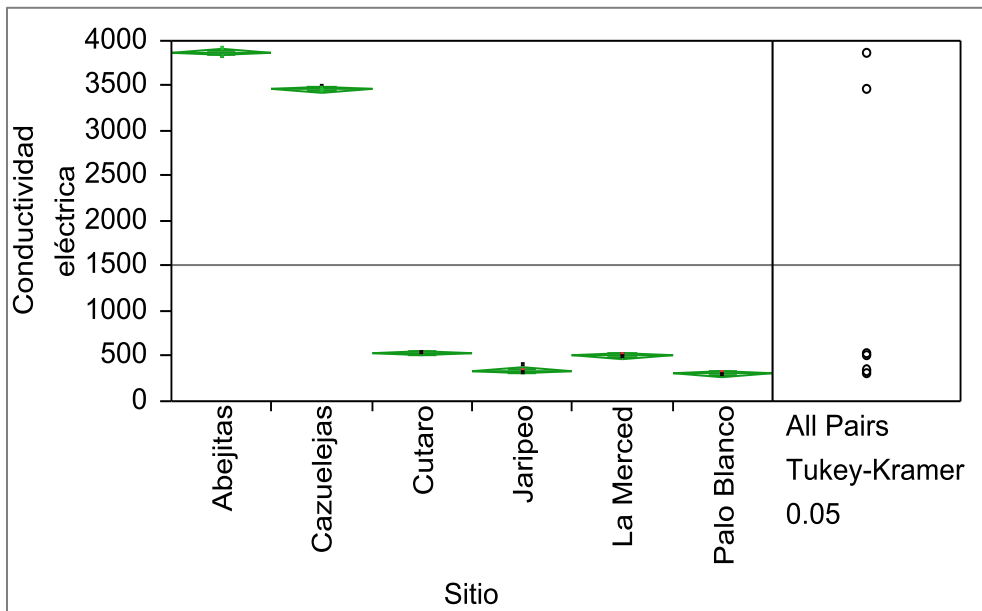


Figura 21. Análisis de una vía y comparación de medias para la conductividad eléctrica por sitios.

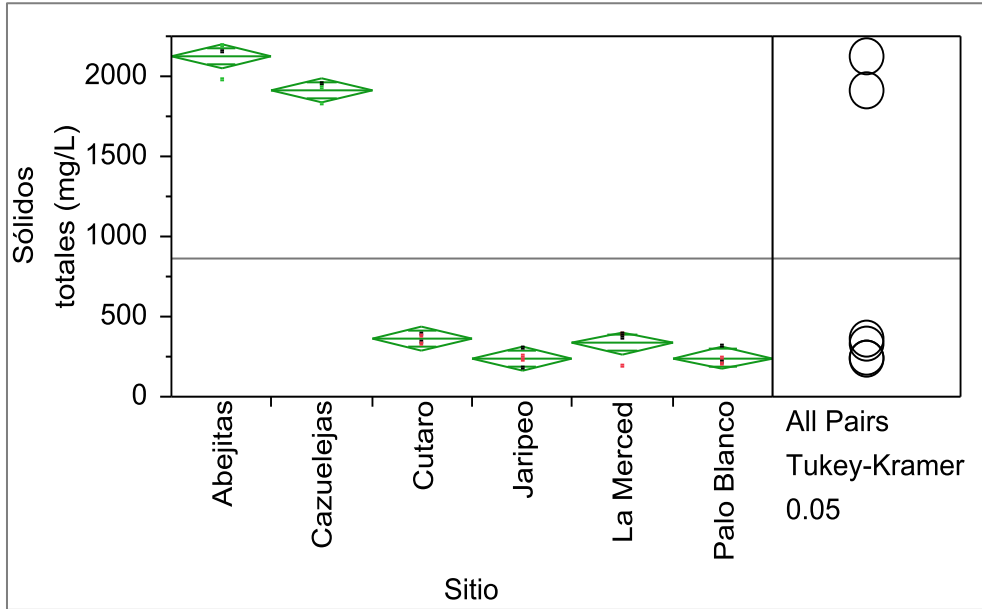


Figura 22. Análisis de una vía y comparación de medias para la los sólidos totales por sitios.

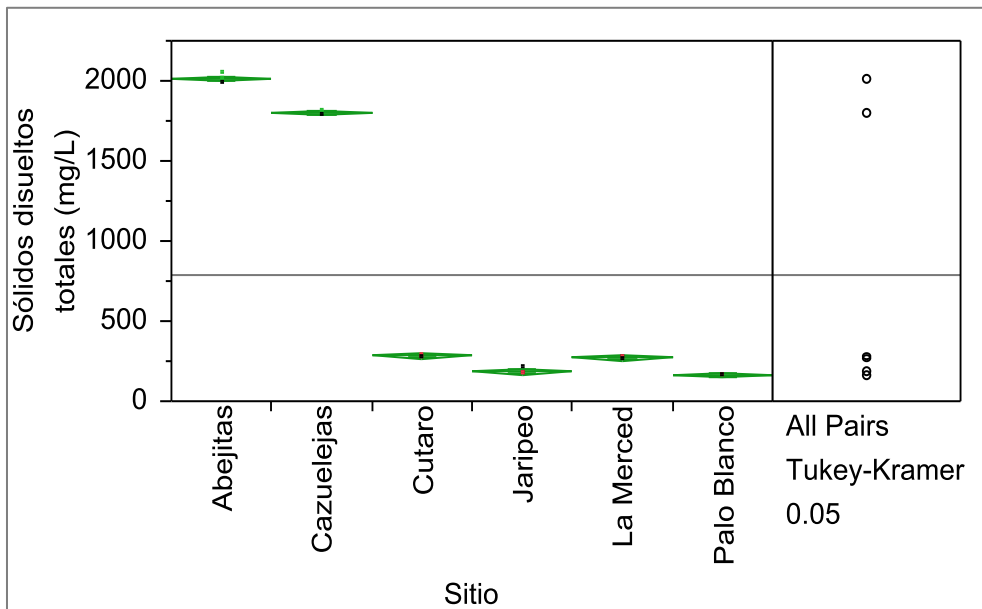


Figura 23. Análisis de una vía y comparación de medias para la los sólidos disueltos totales por sitios.

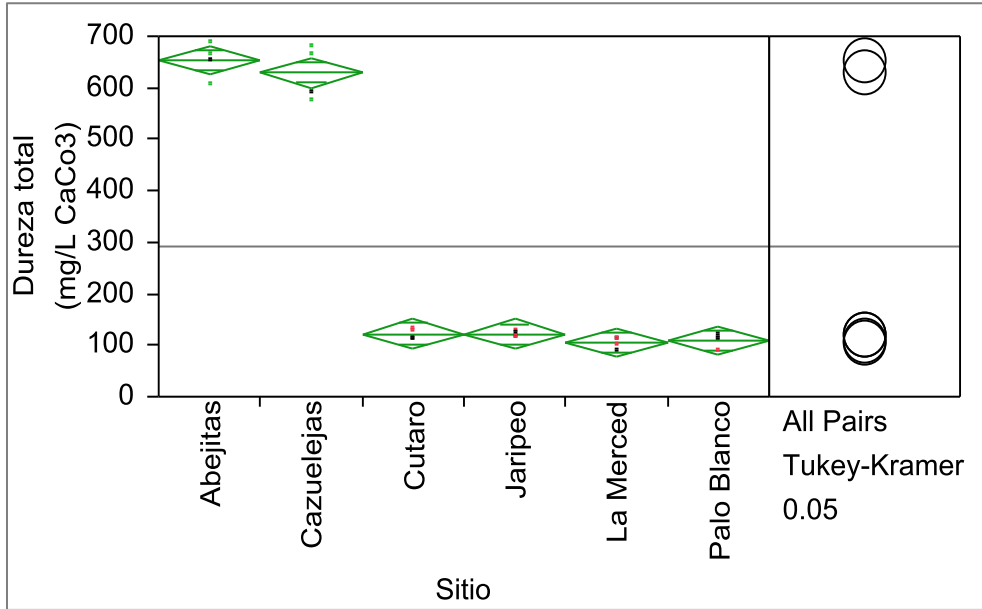


Figura 24. Análisis de una vía y comparación de medias para la dureza total por sitios.

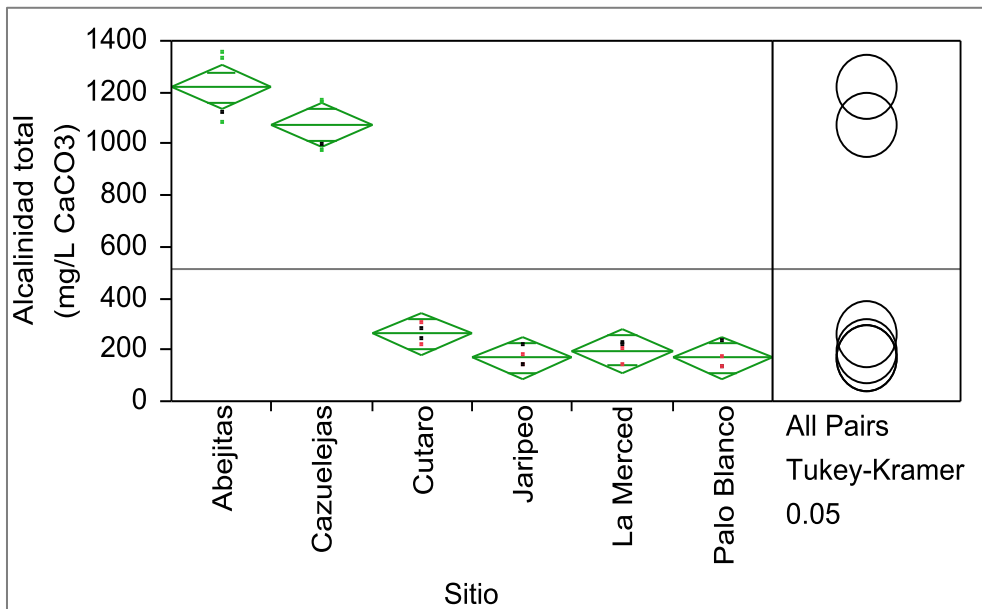


Figura 25. Análisis de una vía y comparación de medias para la alcalinidad total por sitios.

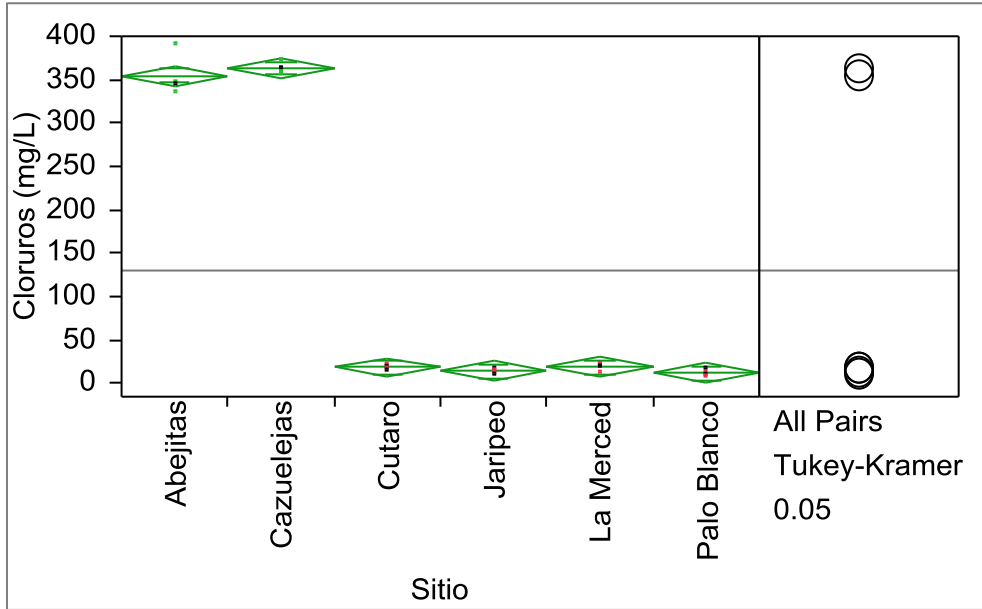


Figura 26. Análisis de una vía y comparación de medias para cloruros por sitios.

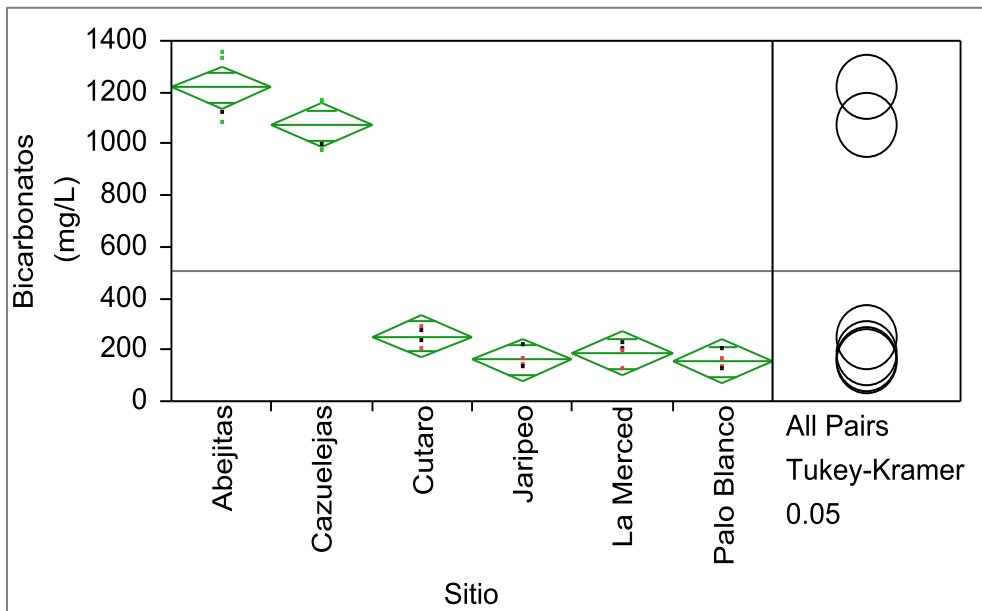


Figura 27. Análisis de una vía y comparación de medias para bicarbonatos por sitios.

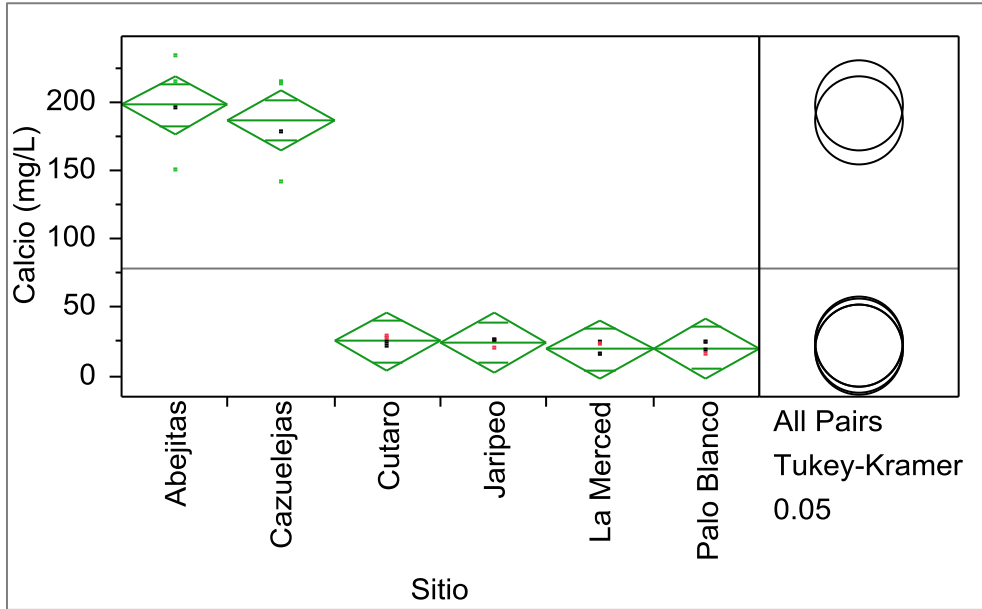


Figura 28. Análisis de una vía y comparación de medias para calcio por sitios.

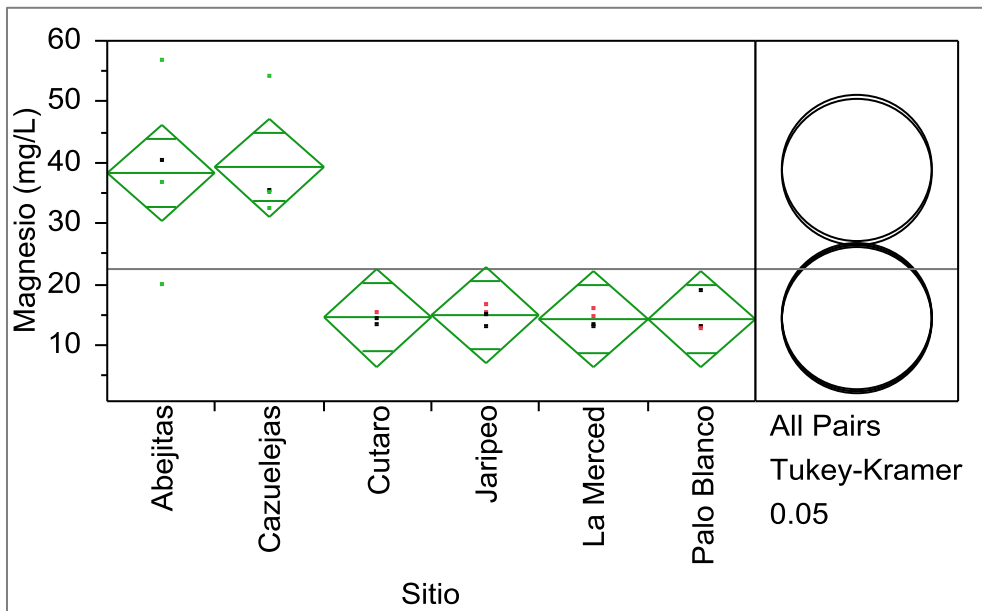


Figura 29. Análisis de una vía y comparación de medias para magnesio por sitios.

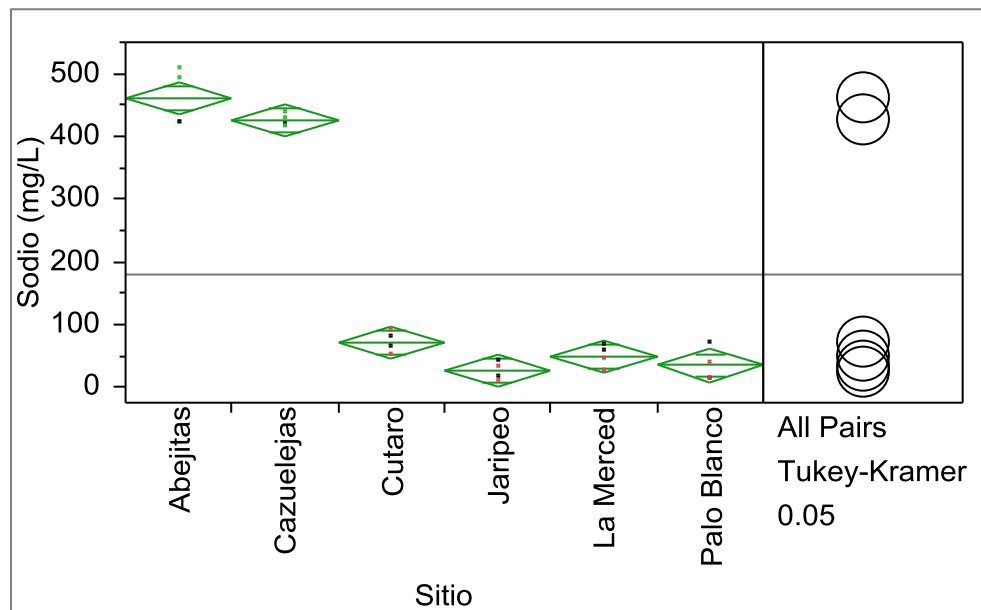


Figura 30. Análisis de una vía y comparación de medias para sodio por sitios.

- El oxígeno disuelto y pH presentan diferencias estadísticas significativas ($p < 0.001^*$) entre pozos y manantiales, siendo los pozos los que mostraron los valores más altos respecto a los manantiales. Para el caso del oxígeno disuelto los pozos no alcanzaron los 5 mg/L y en los manantiales fueron menores a 1.3 mg/L. Del mismo modo los valores de pH en los pozos resultaron menores a 8.2 y en los manantiales no alcanzaron los 6.5. Esta situación se confirma con la comparación entre medias (Figura 31 y 32 y Anexo 12).

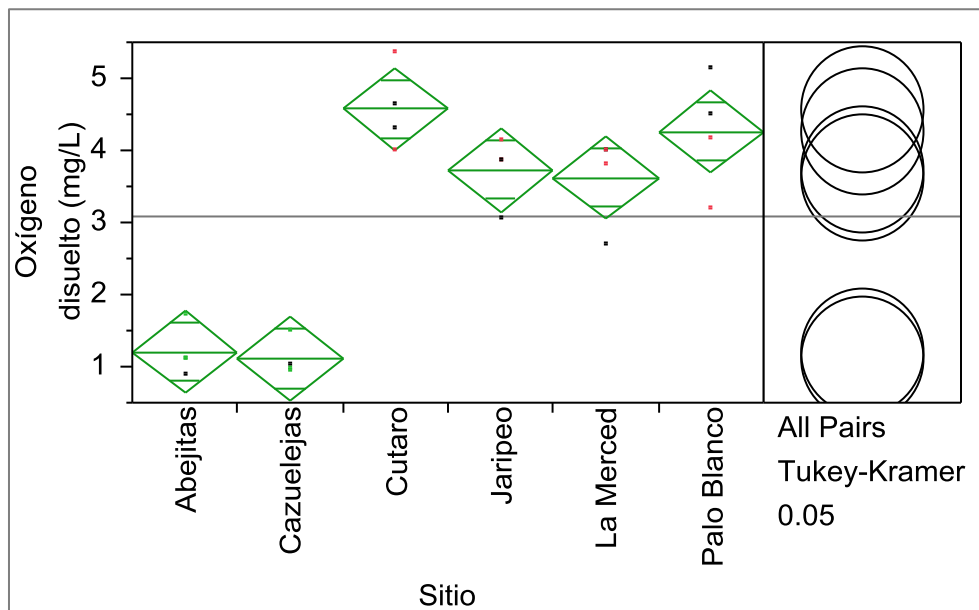


Figura 31. Análisis de una vía y comparación de medias para oxígeno disuelto por sitios.

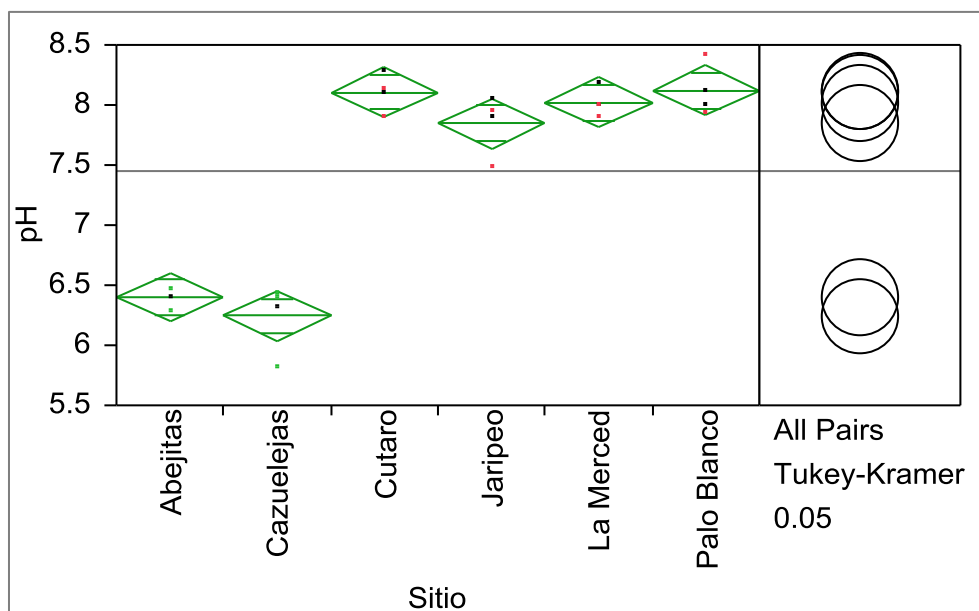


Figura 32. Análisis de una vía y comparación de medias para pH por sitios.

- Los sólidos suspendidos totales ($p=0.101$), sulfatos ($p=0.361$) y carbonatos ($p=0.125$) no presentaron diferencias estadísticas significativas entre pozos y manantiales, así mismo, la comparación entre medias confirma que los manantiales y los pozos pertenecen a un mismo grupo (Figura 33 a 35 y Anexo 12).

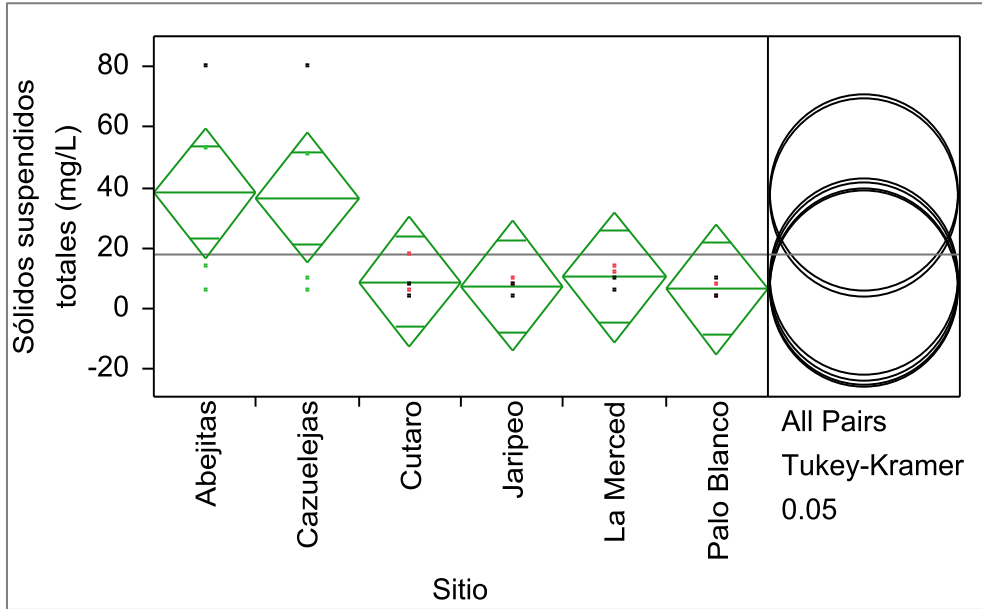


Figura 33. Análisis de una vía y comparación de medias para sólidos suspendidos totales por sitios.

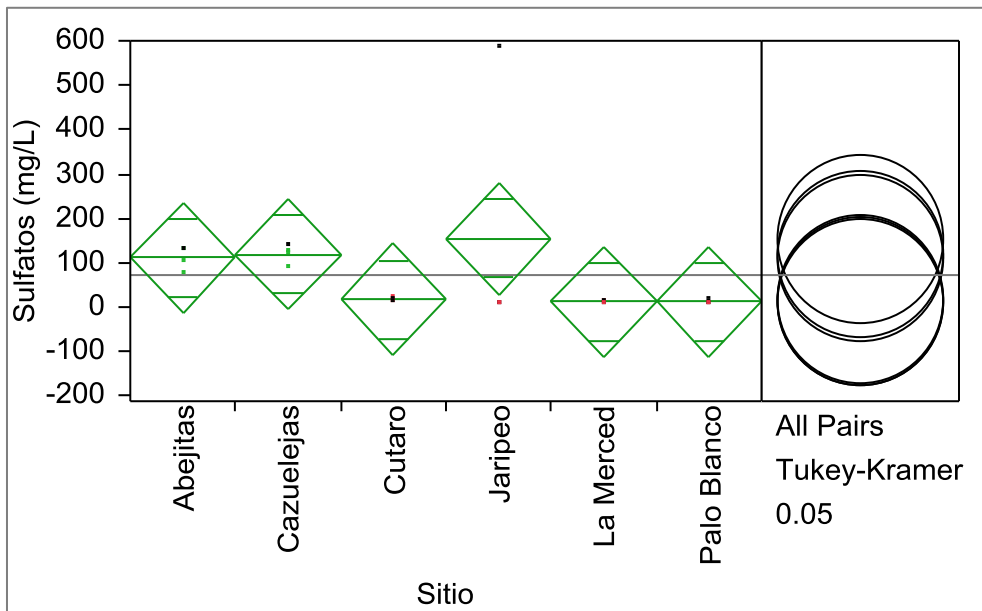


Figura 34. Análisis de una vía y comparación de medias para sulfatos por sitios.

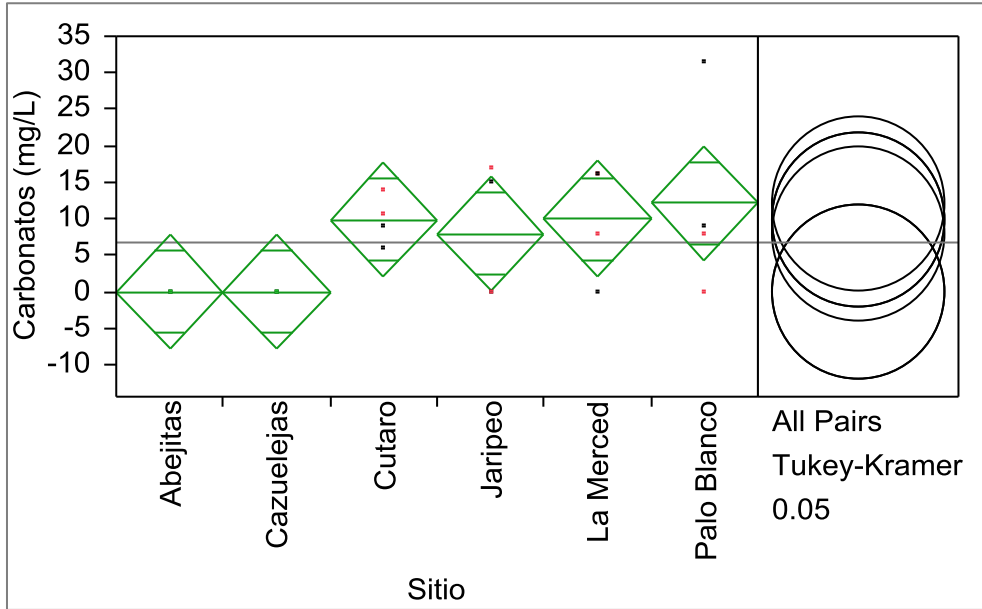


Figura 35. Análisis de una vía y comparación de medias para carbonatos por sitios.

- En el caso del hierro el manantial Abejitas mostró la media más alta (2.20 mg/L) y los demás sitios no superaron la concentración de 1 mg/L (Figura 36 y Anexo 12).

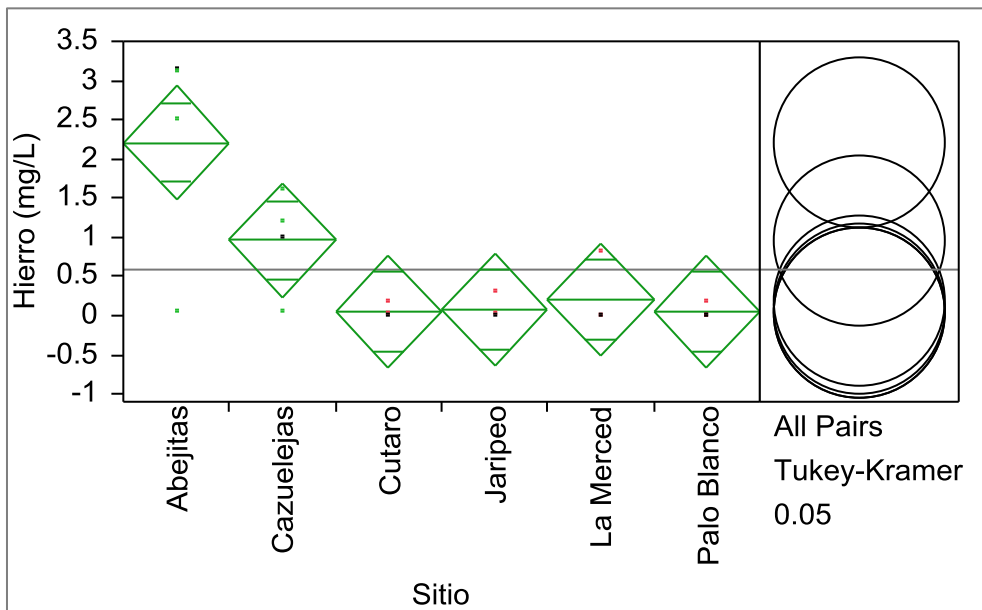


Figura 36. Análisis de una vía y comparación de medias para arsénico por sitios.

- Los manantiales (Cazuelejas y Abejitas) presentaron valores de media inferiores a 0.01 mg/L, mientras que el pozo Cútaró presentó la media más alta (0.06 mg/L); los pozos restantes resultaron con valores de media menores a 0.05 mg/L (Figura 37 y Anexo 12).

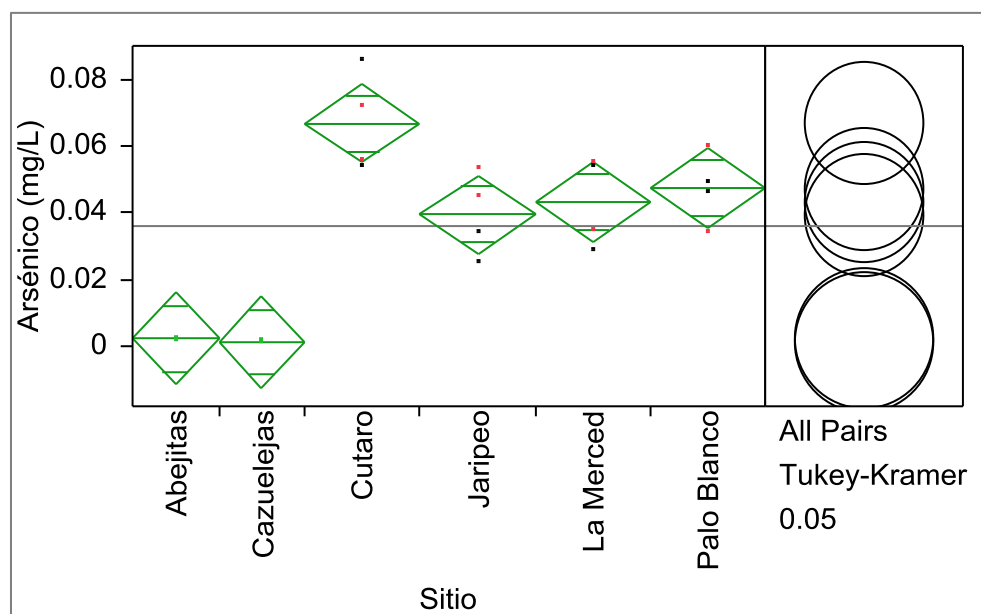


Figura 37. Análisis de una vía y comparación de medias para arsénico por sitios.

- En el caso del flúor los manantiales (Cazuelejas y Abejitas) también presentaron los valores más altos (mayores a 10 mg/L), y de igual manera los pozos presentaron las medias más bajas (menores a 4 mg/L) (Figura 38 y Anexo 12).

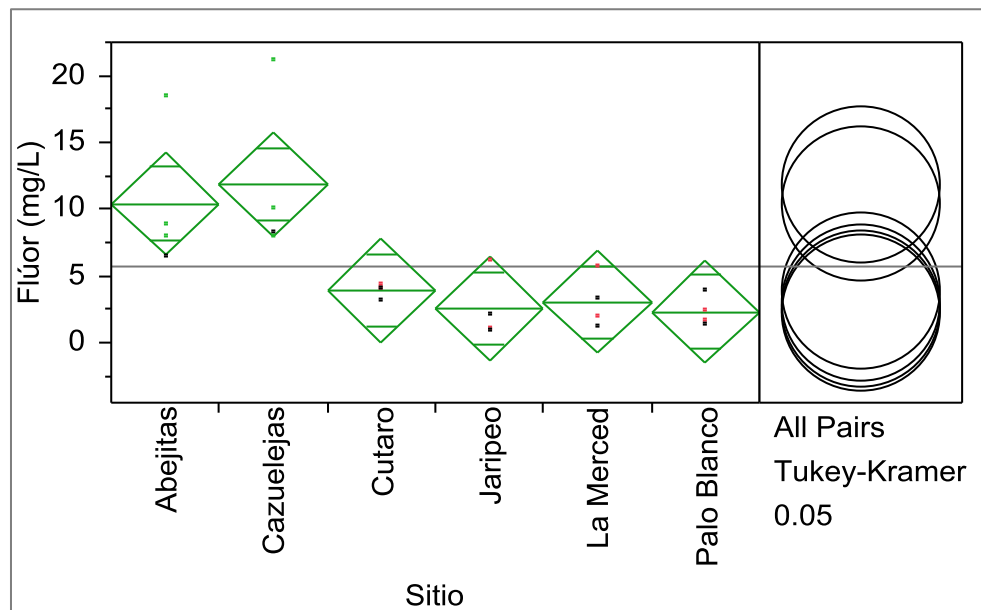


Figura 38. Análisis de una vía y comparación de medias para flúor por sitios.

7.8.2 ANOVA y comparación de medias (Tukey-Kramer) entre periodos

Respecto al análisis de varianza y la comparación de medias realizada para periodos, ninguno de los parámetros analizados mostró diferencias estadísticas significativas, lo cual indica que la variación entre periodos es mínima y no representa diferencia entre los 4 periodos.

7.8.3 Análisis de correlación multivariada

El análisis de correlación multivariada nos ayudó a descubrir la estructura de los datos y en consecuencia las tendencias de valores y asociación de parámetros, los cuáles mostraron una correlación considerable como se muestra en la Tabla 8 y Anexo 13.

Existe correlación fuerte del arsénico con el pH y esta relación puede deberse a que las aguas subterráneas se caracterizan por tener condiciones alcalinas provocadas por los largos tiempos de residencia del agua en el acuífero (Gómez *et al.*, 2009).

La correlación débil entre el arsénico y el flúor puede deberse a que el acuífero se encuentra en condiciones de reducción y el mecanismo causante de la contaminación del

agua por estos dos minerales se puede deber mayormente a la disolución reductiva de los óxidos e hidróxidos de hierro. Una correlación fuerte negativa entre el flúor y el arsénico puede ser indicativo de la lixiviación de minerales tipo mica que tienen reacciones irreversibles asociadas principalmente al desgaste de estos. Por lo tanto, las correlaciones pobres entre el arsénico y el flúor probablemente están asociadas con las diferencias en su comportamiento geoquímico (Seok-Hwi 2012).

La fuerte correlación del flúor con cloruros, bicarbonatos, calcio y sodio, indica que el ambiente alcalino ha favorecido el reemplazo de fluoruros que están contenidos en los minerales por los hidróxidos que se encuentran en el agua (Husain *et al.*, 2012; Brahman *et al.*, 2012).

Tabla 8. Coeficientes de correlación mayor o igual a 0.76 de los parámetros.

Parámetro	Correlaciones
Temperatura (T)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , CE, turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S, pH, As
Turbiedad	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , CE, T, ST, SDT, DT, AT, S, Fe, OD, pH, As
pH	OD, As, Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , CE, F, CE, T, turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S
Conductividad eléctrica (CE)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , T, turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S, OD, pH, As
Oxígeno disuelto (O.D.)	pH, As, Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , CE, T, turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S
Salinidad (S)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , CE, T, turbiedad, ST, SDT, DT, AT, OD, pH, As
Sólidos totales (ST)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , CE, T, turbiedad, SDT, DT, AT, S, OD, pH, As
Sólidos disueltos totales (SDT)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , F ⁻ , CE, T, turbiedad, ST, DT, AT, S, OD, pH, As
Dureza total (DT)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , F ⁻ , CE, T, turbiedad, ST, SDT, AT, S, OD, pH, As
Alcalinidad total (AT)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , F ⁻ , CE, T, turbiedad, ST, SDT, DT, S, OD, pH, As
Cloruros (Cl)	HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , F ⁻ , turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S, OD, pH, As
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	Cl ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , F ⁻ , turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S, OD, pH, As
Calcio (Ca ²⁺)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , F ⁻ , turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S, OD, pH, As
Magnesio (Mg ²⁺)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S, OD, pH, As
Sodio (Na ⁺)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , F ⁻ , turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S, OD, pH, As
Hierro (Fe)	Turbiedad

Arsénico (As)	OD, pH, Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , CE, T, turbiedad, ST, SDT, DT, AT, S
Flúor (F)	Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , CE, SDT, DT, AT, S, pH

8. CONCLUSIONES

1. El agua en los manantiales excedió el límite máximo permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en dureza en todos los sitios y periodos, pudiendo ser perjudicial para las personas que la consumen debido a que favorece la formación de cálculos renales en los usuarios además de causar problemas organolépticos, generar incrustaciones y disminuir la vida media de las tuberías.
2. El agua en los manantiales excedió el límite máximo permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en sodio en todos los sitios y periodos, pudiendo ser perjudicial para las personas que la consumen y que sufren de enfermedades cardíacas, renales y circulatorias.
3. La presencia de coliformes fecales en el pozo de la Merced confirma que existe contaminación fecal reciente y continua, aunque no representa un peligro por existir un tratamiento de desinfección previo al uso de esta fuente de agua.
4. El agua en La Merced requiere de un tratamiento de desinfección debido a que se excede el límite máximo permisible establecido para los coliformes fecales, y por lo tanto se debe de seguir clorando.
5. El diagnóstico de calidad de los pozos y manantiales sugiere que el agua no debería de ser usada y consumida por la población por exceder los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en hierro, arsénico y flúor.
6. La débil correlación entre el arsénico y el flúor puede deberse a la geología de la zona y a parámetros como el pH, el cuál es fundamental en la movilidad de estos elementos en agua, mientras que el ambiente alcalino favorece la presencia de fluoruros y la disminución de hidróxidos en agua.

7. La concentración en la que están presentes el arsénico y el flúor representan un riesgo a la salud para las personas que la usan y consumen.
8. La población que está expuesta al agua contaminada con arsénico o flúor es susceptible de presentar enfermedades agudas o crónicas asociadas a estos elementos como son: pigmentación en la piel, fluorosis dental o esquelética por mencionar algunas.

9. RECOMENDACIONES

- I. Dar informe a las autoridades gubernamentales correspondientes acerca de la situación en la que se encuentra el agua de uso y consumo de la zona, con respecto a las concentraciones de los contaminantes y sus posibles efectos en la salud de los habitantes.
- II. Se sugiere llevar un continuo monitoreo de la calidad del agua en los pozos a fin de prevenir enfermedades en la población expuesta.
- III. Llevar a cabo estudios complementarios (geofísico, geoquímicos, hidráulicos, hidroquímicos, etc.) más amplios con el fin de que ayuden a entender el comportamiento (origen, movilización, absorción, desorción, etc.) de los coliformes fecales, arsénico y flúor en los abastecimientos de agua.
- IV. Realizar estudios toxicológicos para determinar el daño a la salud de quienes consumen estas aguas.
- V. Se recomienda implementar algún tratamiento al agua contaminada por arsénico (coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa) y flúor (alúmina activada, carbón de hueso u ósmosis inversa) recomendado por la NOM-127-SSA1-1994.
- VI. Realizar estudios de factibilidad para la creación, sustitución o adecuación de pozos contaminados, con la finalidad de disminuir la toxicidad en el agua.
- VII. Se recomienda extender el trabajo de investigación en el área de estudio y aumentar el número de periodos, para continuar con el monitoreo de las concentraciones de coliformes fecales, arsénico y flúor.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Ahn, J. (2012). Geochemical occurrences of arsenic and fluoride in bedrock groundwater: a case study in Geumsan County, Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, 34, 43-54.
- Aksoy, N., Şimşek, C., & Gunduz, O. (2009). Groundwater contamination mechanism in a geothermal field: A case study of Balçova, Turkey. *Journal of Contaminant Hydrology*, 103, 13-28.
- Alarcón-Herrera, M., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H., Gutierrez, M., Reyes-Gomez, V., et al. (2012). Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*.
- Alfaro, R. (2002). *Determinación de la calidad del agua en pozos localizados en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán y alternativas de tratamiento para su mejoramiento*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México., México.
- Altas, L., Isik, M., & Kavurmaci, M. (2011). Determination of arsenic levels in the water resources of Aksaray Province, Turkey. *Journal of Environmental Management*, 92, 2182-2192.
- APHA-AWWA-WPCF. (1995). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Washington, E.U.A.
- Armienta, M. A., & Segovia, N. (2008). Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environmental Geochemistry Health*, 30, 345-353.
- Armienta, M. A., Rodríguez, R., Segovia, N., & Monteil, M. (2010). Medical geology in Mexico, Central America and the Caribbean. *Medical Geology*, 59-78.
- ATSDR. (2004). *Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades*. Recuperado el Enero de 2013, de http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts11.html
- AWWA. (2011). *A handbook on drinking water. Water quality and treatment* (Sixth ed.). (J. K. Edzwald, Ed.) Denver: McGraw Hill.
- Bhandari, N., Reeder, R., & Strongin, D. (2011). Photoinduced oxidation of arsenite to arsenate on ferrihydrite. *Environmental Science & Technology*, 2783-2789.

- Bhupinder, S. (2011). Assessment of Groundwater Quality With Respect to Fluoride. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 1, 45-50.
- Birkle, P., Bundschuh, J., & Sracek, O. (2010). Mechanisms of arsenic enrichment in geothermal and petroleum reservoirs fluids in Mexico. *Water research*, 44, 5606-5617.
- Blanchfield, D. (Ed.). (2011). *Environmental encyclopedia* (4th ed.). Cengage Learning.
- Brahman, K., Kazi, T., Afridi, H., Naseem, S., Arain, S., & Ullah, N. (2012). Evaluation of high levels of fluoride, arsenic species and other physicochemical parameters in underground water of two sub districts of Tharparkar, Pakistan: A multivariate study. *Water Research*, 1-16.
- Brindha, K., & Elango, L. (2011). Fluoride in Groundwater: Causes, Implications and Mitigation Measures. *Fluoride Properties, Applications and Environmental Management*, 111-136.
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J.-S., et al. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*, 429, 2-35.
- Caballero Gutiérrez, P. U., Carrillo Rodríguez, J. C., Gomez Ugalde, R. M., & Jerez Salas, M. P. (2010). Presencia de arsénico en pozos y en cultivos en Oaxaca, México. *Agronomía Mesoamericana*, 21(1), 177-184.
- Carrillo Chávez, A., Drever, J., & Martínez, M. (2000). Arsenic content and groundwater geochemistry of the San Antonio-El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, Mexico. *Environmental Geology*, 39(11), 1295-1303.
- Castro de Esparza, M. L. (2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *international Congress. Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*. Mexico City.
- Chakraborti, D., Rahman, M., Das, B., Murrill, M., Dey, S., Mukherjee, S., et al. (2010). Status of groundwater arsenic contamination in Bangladesh: A 14-year study report. *Water Research*, 44, 5789-5802.
- Chouhan, S., & Flora, S. (2010). Arsenic and fluoride: Two major ground water pollutants. *Indian Journal of Experimental Biology*, 48, 666-678.
- Christodoulidou, M., Charalambous, C., Aletrari, M., Nicolaidou Kanari, P., Petronda, A., & Ward, N. (2012). Arsenic concentrations in groundwaters of Cyprus. *Journal of Hydrology*, 468-469, 94-100.

- Cifuentes, E., & Rodríguez, S. (2005). Urban sprawl, water insecurity, and enteric diseases in children from Mexico City. *EcoHealth*, 2, 70-75.
- CNA. (2009). *Atlas del agua en México 2009*. SEMARNAT.
- CNA. (2011a). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Acámbaro (1117), estado de Guanajuato*. México.
- CNA. (2011b). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Lago de Cuitzeo (1121), estado de Guanajuato*.
- CNA. (2011c). *Atlas del agua en México*.
- Contreras, T., Vargas, I., & Badilla, E. (2012). Propiedades hidrogeoquímicas e isotópicas del agua subterránea en la parte media de la cuenca del río Tulián, Puerto Cortés, Honduras. *Revista Geológica de América Central*, 46, 179-188.
- Contreras, T., Vargas, I., & Badilla, E. (2012). propiedades hidrogeoquímicas e isotópicas del agua subterránea en la parte media de la cuenca del río Tulián, Puerto Cortés, Honduras. *Revista Geológica de América Central*, 46, 179-188.
- COTAS. (2010). *Monografía del consejo técnico de aguas de Acámbaro-Cuitzeo A.C.*
- Cuéllar Luna, L., Molina Esquivel, E., del Puerto Rodríguez, A., Maldonado Cantillo, G., González Aguilar, I., & Sosa Rosales, M. (2012). Distribución espacial de los fluoruros en fuentes de abasto de aguas subterráneas en cuatro provincias de Cuba. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 50(3).
- Daesslé, L. W., Ruiz Montoya, L., Tobschall, H. J., Chandrajith, R., Camacho Ibar, V. F., Mendoza Espinoza, L. G., et al. (2009). Fluoride, nitrate and water hardness in groundwater supplied to the rural communities of Ensenada country, Baja California, Mexico. *Environmental Geology*, 58, 419-429.
- Dercourt, J., & Paquet, J. (2010). *Geología* (436 ed.). Barcelona: Reverté.
- Deutsch, W. (1997). *Groundwater geochemistry. Fundamentals and applications to contamination* (First ed.). Washington: CRC Press.
- Dobaradaran, S., Mahvi, A., Dehdashti, S., & Vakil Abadia, D. (2008). Drinking water fluoride and child dental caries in Dashtestan, Iran. *Fluoride*, 41(3), 220-226.
- DOF. (1981). *NMX-AA-074-1981*. Análisis de agua - Determinación del ion sulfato.
- DOF. (1987). *NMX-AA-42-1987*. Calidad del agua - Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva.

- DOF. (1989). *CE-CCA-001/89*. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua.
- DOF. (1993). *NOM-014-SSA1-1993*. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.
- DOF. (1994). *NOM-112-SSA1-1994*. Bienes y servicios - Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.
- DOF. (1994a). *NOM-127-SSA1-1994*. Salud ambiental - Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- DOF. (1994b). *Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica*.
- DOF. (2001). *NMX-AA-036-SCFI-2001*. Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- DOF. (2001a). *NMX-AA-051-SCFI-2001*. Análisis de agua - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Secretaría de comercio y fomento industrial.
- DOF. (2001b). *NMX-AA-072-SCFI-2001*. Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- DOF. (2001c). *NMX-AA-073-SCFI-2001*. Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- DOF. (2001d). *NMX-AA-012-SCFI-2001*. Análisis de agua - Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.
- DOF. (2001e). *NMX-AA-077-SCFI-2001*. Análisis de aguas - Determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- Drinking Water Directive (98/83/EEC). (2003). *On the quality of water intended for human consumption*. European Commission.
- Duker, A., Carranza, E. J., & Hale, M. (2005). Arsenic geochemistry and health. *Environmental International*, 31, 631-641.
- Ecosystem Science Foundation. (2006). *Calidad del agua de los pozos en San Miguel de allende. Fase I: resultados y conclusiones*. Recuperado el 12 de Agosto de 2012, de

[http://www.ecosystemsciences.com/Portals/0/pdfs/Drinking%20Water%20Quality%20in%20San%20Miguel,%20Mexico%20\(En%20Español\).pdf](http://www.ecosystemsciences.com/Portals/0/pdfs/Drinking%20Water%20Quality%20in%20San%20Miguel,%20Mexico%20(En%20Español).pdf)

- Espino Valdés, M. S., Barrera Prieto, Y., & Herrera Peraza, E. (2009). Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*, 3(1), 8-18.
- Esteller, M. V., Rodríguez, R., Cardona, A., & Padilla Sánchez, L. (2011). Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation case studies from Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- Fetter, C. (2000). *Applied hydrology* (Fourth ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Franco, M., & Carro Perez, M. (2009). Assessment of natural arsenic in groundwater in Cordoba Province, Argentina. *Environmental Geochemistry and Health*, 31, 673-682.
- Galicia Chacón, L., Juárez López, M., & Molina, F. N. (2009). Prevalencia de fluorosis dental y consumo de fluoruros ocultos en escolares del municipio de Nezahualcóyotl. *Gaceta Médica de México*, 145(4), 263-267.
- Gaur, R. (2008). *Environmental engineering laboratory manual*. New Delhi: New Age International.
- Gerdson, R., Stockfleth, E., Uerlich, M., Fartasch, M., Steen, K., & Bieber, T. (2000). Papular palmoplantar hyperkeratosis following chronic medical exposure to arsenic: human papillomavirus as a co-factor in the pathogenesis of arsenical keratosis? *Acta Dermato-Venereologica*, 80(4), 292-293.
- Gomez, M., Blarasin, M., & Martínez, D. (2009). Arsenic and fluoride in a loess aquifer in the central area of Argentina. *Environmental Geology*, 57, 143-155.
- Gray, N. (2008). *Drinking water quality* (2 ed.). New York: Cambridge.
- Grimmel, M., de Villiers, E., Neumann C., Pawlita, M., & zur Hausen, H. (1988). Characterization of a new human papillomavirus (HPV 41) from disseminated warts and detection of its DNA in some skin carcinomas. *international Journal of Cancer*, 41(1), 5-9.
- Guo, H., Tang, X., Yang, S., & Shen, Z. (2008). Effect of indigenous bacteria on geochemical behavior of arsenic in aquifer sediments from the Hetao Basin, Inner Mongolia: Evidence from sediment incubations. *Applied Geochemistry*, 23, 3267-3277.

- Guzmán Colis, G., Ramírez López, E. M., Thalasso, F., Rodríguez Narciso, S., Guerrero Barrera, A. L., & Avelar González, F. J. (2011). Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río San Pedro en el estado de Aguascaliente. *Universidad y Ciencia*, 27(1), 17-32.
- Halem, D., Bakker, S., Amy, G., & Dijk, J. (2009). Arsenic in drinking water: a worldwide water quality concern for water supply companies. *Drinking Water Engineering and Science*, 2, 29-34.
- Hassan, K., Fukuhara, T., Hai, F., Bari, Q., & Shafiul Islam, K. (2009). Development of a bio-physicochemical technique for arsenic removal from groundwater. *Desalination*, 249, 224-229.
- He, J., An, Y., & Zhang, F. (2013). Geochemical characteristics and fluoride distribution in groundwater of Zhangye Basin in Northwestern China. *Journal of Geochemical Exploration*.
- He, J., Ma, T., Deng, Y., Yang, H., & Wang, Y. (2009). Environmental geochemistry of high arsenic groundwater at western Hetao plain, Inner Mongolia. *Frontiers of Earth Science in China*, 3(1), 63-72.
- Henke, K. (Ed.). (2009). *Arsenic: environmental chemistry, health threats and waste treatment*. John Wiley & Sons.
- Hernández Montoya, V., Bueno López, J., Sánchez Ruelas, A., García Servín, J., Trejo Vázquez, R., Bonilla Petriciolet, A., y otros. (2003). Fluorosis y caries dental en niños de 9 a 11 años del estado de Aguascalientes, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(4), 1997-204.
- Hiscock, K. (2005). *Hidrogeology*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Hoang, T., Bang, S., Kim, K.-W., Nguyen, M., & Dang, D. (2010). Arsenic in groundwater and sediment in the Mekong River delta, Vietnam. *Environmental Pollution*, 158, 2648-2658.
- Husain, V., Nizam, H., & Arain, G. (2012). Arsenic and Fluoride Mobilization Mechanism in Groundwater of Indus Delta and Thar Desert, Sindh, Pakistan. *International Journal of Economic and Environment Geology*, 3(1), 15-23.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Acámbaro, Guanajuato*. México.
- INEGI. (2009a). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Jerécuaro, Guanajuato*. México.

- INEGI. (2011). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 23 de Julio de 2011, de <http://www.inegi.org.mx>
- INE-SEMARNAT. (2006). *Atlas de la cuenca Lerma-Chapala construyendo una visión conjunta*. (H. Cotler Ávalos, M. Mazari Hiriart, & J. de Anda Sánchez, Edits.) México.
- Jiménez Cisneros, B. E. (2011). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa.
- Jovanovic, D., Jakovljevic, B., Zorica, R.-M., Paunovic, K., Pekovic, G., & Knezevic, T. (2011). Arsenic occurrence in drinking water supply systems in ten municipalities in Vojvodina Region, Serbia. *Environmental Research*, 111, 315-318.
- Kar, S., Maity, J., Jiin-Shuh, J., Chia-Chuan, L., Bibhash, N., Huai-Jen, Y., et al. (2010). Arsenic-enriched aquifers: Occurrences and mobilization of arsenic in groundwater of Ganges Delta Plain, Barasat, West Bengal, India. *Applied Geochemistry*, 25, 1805-1814.
- Kaushik, A., & Kaushik, C. (2010). *Basics of environment and ecology*. New Delhi: New age International Publishers.
- Kotoky, P., Barooah, P., Baruah, M., Goswami, A., Borah, G., Gogoi, H., et al. (2008). Fluoride and endemic fluorosis in the Karbianglong district, Assam, India. *Fluoride*, 41(1), 42-45.
- Kuang-Liang, L., Chen-Wuing, L., Sheng-Wei, W., Cheng-Shin, J., Kao-Hung, L., Vivian Hsiu-Chuan, L., et al. (2011). Assessing the characteristics of groundwater quality of arsenic contaminated aquifers in the blackfoot disease endemic area. *Journal of Hazardous Materials*, 185, 1458-1466.
- Kumar, M., Kumar, P., Ramanathan, A., Bhattacharya, P., Thunvik, R., Singh, U., et al. (2010). Arsenic enrichment in groundwater in the middle Gangetic Plain of Ghazipur District in Uttar Pradesh, India. *Journal of Geochemical Exploration*, 105, 83-94.
- López, D., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M., Cumbal, L., Sracek, O., et al. (2012). Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Science of the Total Environment*.
- Luo, K., Liu, Y., & Li, H. (2012). Fluoride content and distribution pattern in groundwater of eastern Yunnan and western Guizhou, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 34, 89-101.

- Luo, T., Hu, S., Cui, J., Tian, H., & Jing, C. (2012). Comparison of arsenic geochemical evolution in the Datong Basin (Shanxi) and Hetao Basin (Inner Mongolia), China. *Applied Geochemistry*, 27, 2315-2323.
- Luu, T., Sthiannopkao, S., & Kim, K.-W. (2009). Arsenic and other trace elements contamination in groundwater and a risk assessment study for the residents in the Kandal Province of Cambodia. *Environment International*, 35, 455-460.
- Mahlknecht, J., Horst, A., Hernández Limón, G., & Aravena, R. (2008). Groundwater geochemistry of the Chihuahua City region in the rio Conchos Basin (northern Mexico) and implications for water resources management. *Hidrological Processes*, 22, 4736-4751.
- Mahmudur Rahman, M., Ng, J., & Naidu, R. (2009). Chronic exposure of arsenic via drinking water and its adverse health impacts on humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31, 189-200.
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la química ambiental*. México: Reverté.
- Maté Jimenez, C. (1995). *Curso general sobre Statgraphics: procedimientos, métodos estadísticos, aplicaciones y ejercicios resueltos*. (U. P. Comillas, Ed.)
- Mazumder, D., & Dasgupta, U. (2011). Chronic arsenic toxicity: Studies in West Bengal, India. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 27, 360-370.
- Mazziotti-Tagliani, S., Angelone, M., Armiento, G., Pacifico, R., Cremisini, C., & Gianfagna, A. (2012). Arsenic and fluorine in the Etnean volcanics from Biancavilla, Sicily, Italy: environmental implications. *Environmental Earth Science*, 66, 561-572.
- McClintock, T., Chen, Y., Bundschuh, J., Oliver, J., Navoni, J., Olmos, V., et al. (2012). Arsenic exposure in Latin America: Biomarkers, risk assessments and related health effects. *Science of the Total Environment*, 429, 76-91.
- Metcalf, & Eddy. (1994). *Ingeniería Sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Estados Unidos: Labor.
- Miller, G. T., & Spoolman, S. (2008). *Environmental science. Problems, concepts, and solutions* (Twelfth Edition ed.). Canada: Thomson.
- Ming-Ho, Y. (2005). *Environmental toxicology; biological and health effects of pollutants*. Boca Raton: CRC Press.
- Moghaddam, A., & Fijani, E. (2008). Distribution of fluoride in groundwater of Maku area, northwest of Iran. *Environmental Geology*, 281-287.

- Monroy Torres, R., Ramírez Gómez, X. S., & Macías Hernández, A. E. (2009). Accesibilidad a agua potable para el consumo y preparación de alimentos en una comunidad expuesta a agua contaminada con arsénico. *Revista de Medicina de la Universidad Veracruzana*, 9(1 sup. 1), 10-13.
- Mora-Bueno, D., Sánchez-Peña, L., Del Razo, L., González-Arias, C., Medina-Díaz, I., Robledo-Marengo, M., y otros. (2012). Presencia de arsénico y coliformes en agua potable del municipio de Tecuala, Nayarit, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(2), 127-35.
- Nakaya, S., Natsume, H., Masuda, H., Mitamura, M., Biswas, D., & Seddique, A. (2011). Effect of groundwater flow on forming arsenic contaminated groundwater in Sonargaon, Bangladesh. *Journal of Hydrology*, 409, 724-736.
- Nalco. (2009). *The Nalco Water Handbook* (Third ed.). New York: McGraw Hill.
- Nemerow, N., Agardy, F., Sullivan, P., & Salvato, J. (2009). *Environmental engineering: water, wastewater, soil and groundwater treatment and remediation* (Sixth ed.). (N. L. Nemerow, F. J. Agardy, P. Sullivan, & J. A. Salvato, Eds.) New Jersey: John Wiley & Sons.
- Nguyen, K., & Itoi, R. (2009). Source and release mechanism of arsenic in aquifers of the Mekong Delta, Vietnam. *Journal of Contaminant Hydrology*, 103, 58-69.
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable: incluye el primer apéndice. Vol. 1 Recomendaciones*.
- Ortega Guerrero, M. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143-161.
- Ozsvath, D. (2009). Fluoride and environmental health: a review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 8, 59-79.
- Paredes Zúñiga, V., Vargas Azofeifa, I., Vargas Quintero, M., & Arellano Hartig, F. (2010). Hidrogeoquímica en el acuífero costero del eje bananero de Urabá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 51-62.
- Pérez, G. (2005). Disponibilidad de metales tóxicos en sitios contaminados. Aplicaciones y limitaciones de la fraccionación en la determinación de gradientes de polución. *Memoria para aspirar al grado de Doctor en Química, Universidad Autónoma de Barcelona, Departamento de Química, Unidad de Química analítica*.
- PNUMA. (2010). *Perspectivas del medio ambiente: América latina y El Caribe*. 380.

- Pokhrel, D., Bhandari, B., & Viraraghavan, T. (2009). Arsenic contamination of groundwater in the Terai region of Nepal: An overview of health concerns and treatment options. *Environment International*, 35, 157-161.
- Portilla, M. (2006). *Manual práctico del paquete estadístico SPSS para Windows* (Tercera ed., Vol. 2). (U. p. navarra, Ed.)
- Rafique, T., Naseemb, S., Usmania, T. H., Bashirb, E., Khana, F. A., & Bhangar, M. I. (2009). Geochemical factors controlling the occurrence of high fluoride groundwater in the Nagar Parkar area, Sindh, Pakistan. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 424-430.
- Rahman, M., Ng, J., & Naidu, R. (2009). Chronic exposure of arsenic via drinking water and its adverse health impacts on humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31, 189-200.
- Rango, T., Bianchini, G., Beccaluva, L., & Tassinari, R. (2010). Geochemistry and water quality assessment of central Main Ethiopian Rift natural waters with emphasis on source and occurrence of fluoride and arsenic. *Journal of African Earth Sciences*, 57, 479-491.
- Razo, L. M., García-Vargas, G. G., Valenzuela, O. L., Hernández Castellanos, E., Sánchez-Peña, L. C., Currier, J. M., et al. (2011). Exposure to arsenic in drinking water is associated with increased prevalence of diabetes: a cross-sectional study in the Zimapán and Lagunera regions in Mexico. *Environmental Health*, 10(73), 1-11.
- Reddy, D., Nagabhushanam, P., Sukhija, B., Reddy, A., & Smedley, P. (2010). Fluoride dynamics in the granitic aquifer of the Wailapally watershed, Nalgonda District, India. *Chemical Geology*, 269, 278-289.
- Reimann, C., Matschullat, J., Birke, M., & Salminen, R. (2009). Arsenic distribution in the environment: The effects of scale. *Applied Geochemistry*, 24, 1147-1167.
- Reyes Gómez, V. M., Alarcón Herrera, M. T., Núñez López, D., & Cruz Medina, R. (2010). Dinámica del arsénico en el Valle de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, en Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(1), 21-31.
- Rocha Amador, D., Elena Navarro, M., Carrizales, L., Morales, R., & Calderón, J. (2007). Decreased intelligence in children and exposure to fluoride and arsenic in drinking water. *Cadernos de Saúde Pública*, 23 sup. 4, 579-587.
- Rodier, J. (1994). *Manual del agua. Su naturaleza y tratamiento. Aplicaciones* (Vol. I). Estados Unidos: McGraw-Hill.

- Rodríguez Dozal, S., Alarcón Herrera, M., Cifuentes, E., Barraza, A., Loyola Rodríguez, J., & Sanin, L. (2005). Dental fluorosis in rural communities of Chihuahua, Mexico. *Fluoride*, 38(2), 143-150.
- Rodríguez Mellado, J., & Marín Galvín, R. (1999). *Fisicoquímica de aguas*. Madrid: Díaz de Santos.
- Romic, Z., Habuda-Stanic, M., Kalajdzic, B., & Kuleš, M. (2011). Arsenic distribution, concentration and speciation in groundwater of the Osijek area, eastern Croatia. *Applied Geochemistry*, 26, 37-44.
- Rosales-Castillo, J., Acosta-Saavedra, L., Torres, R., Ochoa-Fierro, J., Borja-Aburto, V., Lopez-Carrillo, L., et al. (2004). Arsenic exposure and human papillomavirus response in non-melanoma skin cancer Mexican patients: a pilot study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 77, 418-423.
- Rowland, H., Omoregie, E., Millot, R., Jimenez, C., Mertens, J., Baciú, C., et al. (2011). Geochemistry and arsenic behaviour in groundwater resources of the Pannonian Basin (Hungary and Romania). *Applied Geochemistry*, 26, 1-17.
- Rubio Arias, H., Saucedo, R., Lara, C., Wood, K., & Jimenez, J. (2005). Water quality in the Laguna de Bustillos of Chihuahua, Mexico. *Water Resources Management III*, 80, 155-160.
- Sánchez García, S., Pontigo Loyola, A., Heredia Ponce, E., & Ugalde Arellano, J. (2004). Fluorosis dental en adolescentes de tres comunidades del estado de Querétaro. *Revista Mexicana de Pediatría*, 71(1), 5-9.
- Santana Arango, D., Carolina Martínez, D., & Betancourt Vargas, T. (Agosto de 2008). Uso de hidroquímica e isótopos ambientales para la evaluación de la conexión hidrológica entre el agua subterránea y el humedal ciénaga Colombia. *Gestión y Ambiente*, 11(2), 21-38.
- Saravanan, S., Ramachandran, S., & Baskar, R. (2005). *Principles of environmental science and technology*. New Delhi: New Age.
- Sawyer, C., McCarty, P., & Parkin, G. (2003). *Chemistry for environmental engineering and science* (Fifth ed.). New York: McGraw Hill.
- Seok-Hwi, K., Kangjoo, K., Kyung-Seok, K., Yeongkyoo, K., & Kwang-Sik, L. (2012). Co-contamination of arsenic and fluoride in the groundwater of unconsolidated aquifers under reducing environments. *Chemosphere*, 87, 851-856.
- Shreemahadevan Pillai, P. (2009). *A comprehensive laboratory manual for environmental science and technology*. New Delhi: New Age international.

- Shukla, D., Dubey, C., Singh, N., Tajbakhsh, M., & Chaudhry, M. (2010). Sources and controls of Arsenic contamination in groundwater of Rajnandgaon and Kanker District, Chattisgarh Central India. *Journal of Hydrology*, 395, 49-66.
- Sikdar, P., & Chakraborty, S. (2008). Genesis of arsenic in groundwater of North Bengal Plain using PCA: A case study of English Bazar Block, Malda District, West Bengal, India. *Hydrological Processes*, 22, 1796-1809.
- Spellman, F. (2008). *The science of water: concepts and applications* (2nd ed.). Florida: CRC Press.
- Sthiannopkao, S., Kim, K., Sotham, S., & Choup, S. (2008). Arsenic and manganese in tube well waters of Prey Veng and Kandal Provinces, Cambodia. *Applied Geochemistry*, 23, 1086-1093.
- Sthiannopkao, S., Kyoung-Woong, K., Cho, K., Wantala, K., Sotham, S., Sokuntheara, C., et al. (2010). Arsenic levels in human hair, Kandal Province, Cambodia: The influences of groundwater arsenic, consumption period, age and gender. *Applied Geochemistry*, 25, 81-90.
- Su, C., Wang, Y., Xie, X., & Li, J. (2012). Aqueous geochemistry of high-fluoride groundwater in Datong Basin, Northern China. *Journal of Geochemical Exploration*.
- Svarc-Gajiae, J. (2009). *General toxicology*. New York: Nova Science Publishers.
- USEPA. (2006). *US National Primary and Secondary Drinking Water Standards*.
- Vázquez Alvarado, P., Prieto García, F., Coronel Olivares, C., Gordillo, M. A., Ortiz Espinoza, R., & Hernandez Ceruelos, A. (2010). Fluorides and dental fluorosis in students from Tula de Allende Hidalgo, Mexico. *Journal of Toxicology and Environmental Health Science*, 2(3), 24-31.
- Vega Gleason, S. (2001). *Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México*. Recuperado el 12 de Agosto de 2012, de www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/104.pdf
- Villaescusa, I., & Bollinger, J. C. (2008). Arsenic in drinking water. Sources, occurrence and health effects (a review). *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7, 307-323.
- Villanueva-Estrada, R., Prol-Ledesma, R., Rodríguez-Díaz, A., Canet, C., & Armienta, M. (2012). Arsenic in hot springs of Bahía Concepción, Baja California Peninsula, México. *Chemical Geology*.

- Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros* (6a ed.). México: Prentice Hall.
- Wang, Y., Shvartsev, S. L., & Su, C. (2009). Genesis of arsenic/fluoride-enriched soda water: A case study at Datong, northern China. *Applied Geochemistry*, 24(9).
- Weiner, R. F., & Matthews, R. F. (2003). *Environmental engineering* (Fourth Edition ed.). Amsterdam: Butterworth Heinemann.
- WHO. (2011). *Arsenic in Drinking-water*.
- Williams, P., James, R., & Roberts, S. (Eds.). (2000). *Principles of toxicology. Environmental and industrial applications* (Second ed.). New York: Wiley-Interscience.
- Zambrano Cárdenas, R. M., González Torres, L., Aranguré Zúñiga, J., Espinosa Rodríguez, M. Á., & Paredes Limas, J. C. (2011). ¿Arsénico en Nayarit? *Revista Fuente*, 3(6), 25-30.

11. ANEXOS

Anexo 1. Límites máximos permisibles para agua potable nacional e internacional

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE (mg/L)				
	NOM-127-SSA1-1994	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (agua potable)	Guías para la calidad del agua potable (OMS)	EC Drinking Water Directive (98/83/EEC)	US EPA
Arsénico	0.025	N/E	0.01	0.01	0.01
Cloruros (Cl ⁻)	250	N/E	250	250	250
Dureza total (CaCO ₃)	500	N/E	N/E	N/E	N/E
<i>E. coli</i> , coliformes fecales u organismo termotolerantes	Ausencia o no detectables	1000/100 mL	0	0/100 mL	0
Fluoruros (F ⁻)	1.5	N/E	1.5	1.5	4.0
Hierro	0.3	N/E	0.3	0.2	0.3
pH	6.5 – 8.5	N/E	N/E	6.5 – 9.5	6.5 – 8.5
Sodio	200	N/E	N/E	200	N/E
Sólidos disueltos totales	1000	500	N/E	N/E	500
Sulfatos (SO ₄)	400	N/E	N/E	250	250
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método	N/E	5 unidades de turbiedad nefelométricas	Aceptable para el consumidor y sin cambio anormal	N/E

N/E: no existe

Anexo 2. Determinación de alcalinidad y acidez total. NMX-AA-036-SCFI-2001

Este método está basado en la medición de la acidez o alcalinidad en el agua por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante un álcali o un ácido según sea el caso de concentración perfectamente conocida.

MATERIAL Y EQUIPO:

- Tabla de color Munsell
- Placa de porcelana con huecos
- Piceta
- Tamiz con aberturas de 2 mm de diámetro

PROCEDIMIENTO:

1. Valoración de las disoluciones
 - a. Valoración del ácido sulfúrico o ácido clorhídrico (0.02 N). Pesar 0.0265 g del patrón primario de carbonato de sodio, secado 105°C, añadir 25 mL de agua y unas gotas de la disolución de naranja de metilo, valorar con el ácido hasta el vire del indicador. Calcular la normalidad del ácido.
 - b. Valoración del hidróxido de sodio (0.02 N). Pesar 0.102 g de biftalato de potasio secado a 105°C, añadir 25 mL de agua y unas gotas de la disolución de fenolftaleína, titular hasta el vire del indicador (de incoloro a rosa). Calcular la normalidad del hidróxido.
2. Acidez
 - a. Pretratamiento de la muestra: en caso de detectarse la presencia de cloro residual, eliminar la interferencia añadiendo 0.1 mL de la disolución de tiosulfato de sodio 0.1 M.
 - b. Transferir 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína e introducir la barra magnética. Titular con hidróxido de sodio valorada hasta el vire del indicador, registrar el volumen empleado en la titulación (acidez total).
 - c. Transferir 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de naranja de metilo e introducir la barra magnética. Iniciar la agitación y titular con disolución de hidróxido de sodio valorada hasta el vire del indicador, registrar el volumen empleado en la titulación. Calcular la acidez, tomando en cuenta el vire del indicador (de amarillo a canela) (acidez al anaranjado de metilo).
3. Alcalinidad
 - a. Transferir 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL
 - b. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína

- c. Titular con la disolución valorada de ácido (0.02 N) hasta el vire de la fenolftaleína, registrar los mililitros gastados (alcalinidad a la fenilftaleina). Adicionar 2 gotas de la disolución indicadora de naranja de metilo.
- d. Continuar con la titulación hasta alcanzar el vire del naranja de metilo, alcalinidad total.
- e. Registrar los volúmenes para ambos puntos
- f. Calcular la alcalinidad, tomando en cuenta el vire de los indicadores.

CÁLCULOS:

- Calcular la acidez total como CaCO_3 en mg/L

$$\text{Acidez total como } \text{CaCO}_3 \text{ en } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{[(A \times B) - (C \times D)](50)(100)}{100}$$

Donde:

- 100 es el volumen de la muestra en mL
- A es el volumen de NaOH utilizando al vire de la fenolftaleína
- B es la normalidad de la disolución de NaOH
- C son los mL de H_2SO_4 utilizados en el tratamiento con peróxido
- D es la normalidad del H_2SO_4 utilizado
- 50 es el factor para convertir eq/L a mg CaCO_3/L
- 1000 es el factor para convertir mL a L

- Calcular la alcalinidad total como CaCO_3 en mg/L

$$\text{Alcalinidad total como } \text{CaCO}_3 \text{ en } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{AXN}{100}(50)(1000)$$

Donde:

- A es el volumen total gastado de ácido en la titulación al vire del anaranjado de metilo en mL
- N es la normalidad de la disolución de ácido
- 100 es el volumen de la muestra en mL
- 50 es el factor para convertir eq/L a mg CaCO_3/l
- 1000 es el factor para convertir mL a L

Anexo 3. Determinación de dureza total. NMX-AA-072-SCFI-2001

El método consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final, el negro de eriocromo T, que es de color rojo en la presencia del calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran acomplejados o ausentes. El complejo del EDTA con el calcio y el magnesio es más fuerte que el que estos iones forman con el negro de eriocromo T, de manera que la competencia por los iones se desplaza hacia la formación de los complejos con EDTA desapareciendo el color rojo de la disolución y tornándose azul.

MATERIAL Y EQUIPO:

- Balanza analítica
- Materiales
- Bureta de 25 mL o 50 mL

PROCEDIMIENTO:

1. Tratamiento previo de muestras de aguas contaminadas y residuales
 - a. Se recomienda llevar a cabo una digestión con ácido nítrico – ácido sulfúrico o ácido nítrico – ácido perclórico y ajustar posteriormente el pH de la disolución a un valor de 9, utilizando disolución de amoníaco.
2. Titulación de muestras
 - a. Colocar 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL
 - b. Añadir 1 mL o 2 mL de disolución amortiguadora.
 - c. Añadir 0.2 g del indicador eriocromo negro T. La muestra debe tomar un color vino rojizo
 - d. Titular con la disolución de EDTA 0.01 M agitando continuamente hasta que desaparezcan los últimos matices rojizos. Añadir las últimas gotas con intervalos de 3 s a 5 s. En el punto final la muestra cambia de color rojizo a azul

CÁLCULOS:

- Calcular la dureza total

$$\text{Dureza total expresada como CaCO}_3(\text{mg/L}) = \frac{(A - B) \times C \times 1000}{D}$$

Donde:

- A son los mL de EDTA gastados en la titulación de la muestra
 B son los mL de EDTA gastados en la titulación en el blanco (si fue utilizado)
 C son los mg de CaCO₃ equivalentes a 1 mL de EDTA
 D son los mL de muestra

Anexo 4. Determinación del ion sulfato. NMX-AA-074-1981

Este método es aplicable para la determinación del ion sulfato en aguas naturales y residuales con un ámbito de aplicación de 10 a 100 mg/L. El ion sulfato se precipita y se pesa como sulfato de bario después de eliminar la sílice y materia insoluble.

MATERIAL Y EQUIPO:

- Baño de vapor
- Horno de secado,
- Mufla con indicador de temperatura
- Desecador
- Balanza analítica
- Cápsula de platino

PROCEDIMIENTO:

1. Eliminación de sílice
2. En caso de que la muestra tuviera una concentración menor de 25 mg/L de sílice, efectuar el procedimiento anterior sin la adición de ácido fluorhídrico. Pasarla directamente de la flama del mechero a una mufla a 1073 K (800°C) durante una hora.
3. Transferir con pipeta volumétrica a un vaso de precipitados, un volumen de muestra clarificada que contenga no más de 50 mg de ion sulfato y ajustar a un volumen de 250 cm³.
4. Llevar a un pH de 4.5 – 5.0 con la solución de ácido clorhídrico 1:1.
5. Adicionar de 1 a 2 cm³ de la solución de ácido clorhídrico 1:1, calentar a ebullición y agitar lentamente, agregar solución de cloruro de bario hasta que la precipitación sea completa. Añadir 2 cm³ en exceso de la solución de cloruro de bario.
6. Digerir el precipitado a 353 – 363 K (80°C – 90°C) durante 10 – 12 horas y no menos de 2.
7. Mezclar una pequeña cantidad de la pulpa del papel filtro de cenizas conocidas con el precipitado de sulfato de bario y filtrar a temperatura ambiente
8. Lavar el precipitado con porciones pequeñas de agua caliente, para que los lavados estén libres de cloruros y hasta que 10 cm³ de las aguas de lavado no produzcan turbiedad al adicionarles 1 cm³ del reactivo de nitrato de plata ácido nítrico.
9. Secar el papel filtro y precipitado en estufa, pasar a un mechero y posteriormente a una mufla a 1073 K (800°C) durante una hora
10. Enfriar en desecador y pesar

CÁLCULOS:

- El contenido del ion sulfato en mg/L se conoce aplicando al fórmula siguiente:

$$1 \text{ mg de } \frac{\text{BaSO}_4^-}{L} = \frac{A \times 0.4115 \times 1000}{B}$$

Donde:

- A Peso del sulfato de bario, en mg
B Volumen de la muestra original en cm³

Anexo 5. Determinación de cloruros totales. NMX-AA-073-SCFI-2001

La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. En las inmediaciones del punto de equivalencia al agotarse el ion cloruro, empieza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata puede identificarse por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo así como en la forma del precipitado. En este momento se da por terminada la valoración.

MATERIAL Y EQUIPO:

- Balanza analítica
- Potenciómetro para medición de pH
- Frascos para tomas de muestra de polietileno, polipropileno o vidrio de boca ancha de 500 mL de capacidad

PROCEDIMIENTO:

1. Utilizar un volumen de muestra de 100 mL. Ajustar el pH entre 7 y 10 utilizando las disoluciones de hidróxido de sodio (0.1 N) y/o ácido sulfúrico (0.1 N)
2. Si la muestra tiene mucho color, añadir de 3 mL a 5 mL de la suspensión de hidróxido de aluminio antes de acondicionar. Mezclar, dejar sedimentar y filtrar con papel filtro cualitativo.
3. A 100 mL de muestra acondicionada, adicionar 1 mL de disolución indicadora de cromato de potasio. Valorar con la disolución patrón de nitrato de plata hasta que vire de amarillo a naranja rojizo, manteniendo un criterio constante en el punto final.
4. Titular un blanco con las muestras.

CÁLCULOS:

- Calcular la concentración de iones cloruro en la muestra original, en mg/L como sigue:

$$Cl^{-} \text{ mg/L} = \frac{[(A - B) \times N \times 35450]}{\text{mL de muestra}}$$

Donde:

- A son los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración de la muestra
 B son los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración del blanco
 N es la normalidad del nitrato de plata

Anexo 6. Determinación de fósforo total. NMX-AA-029-SCFI-2001

El ácido 12-molibdofosfórico es reducido por el cloruro de estaño a azul de molibdeno, compuesto de composición desconocida que contiene una mezcla de Mo (VI) y Mo (V), que absorbe a 690 nm. La intensidad de color azul formado depende de la concentración de fosfatos adicionados al heteropoliácido.

Todo el fósforo contenido en la muestra debe estar como ion ortofosfato (PO_4)³⁻, ya que el método espectrofotométrico es esencialmente específico para este ion ortofosfato. La materia orgánica de la muestra es destruida por medio de una digestión con persulfato de amonio y ácido sulfúrico, rompiendo las ligaduras orgánicas del fósforo, e hidrolizando los polifosfatos a ortofosfatos.

MATERIAL Y EQUIPO:

- Balanza analítica
- Placa de calentamiento: una superficie de 30 cm x 50 cm es adecuada
- Autoclave
- Espectrofotómetro
- Embudo de filtración y papel filtro cualitativo Whatman 42 o equivalente.

PROCEDIMIENTO:

1. Preparación de la muestra por medio de la digestión con persulfato
2. Método cloruro estañoso
 - a. Ajustar el pH de la muestra. A 100 mL de muestra que contenga no más de 200 µg P y libre de color y turbidez adicionar 1 gota de fenolftaleína. Si la solución tiene un color rosado, adicionar unas cuantas gotas de disolución de ácido fuerte para neutralizar.
 - b. Desarrollo del color en la muestra. Adicionar, agitando fuertemente después de cada adición, 4.0 mL de disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado y 0.5 mL de disolución de cloruro estañoso. Es importante realizar las mediciones a la misma temperatura.
 - c. Medición de color. La medición debe de efectuarse después de 10 min de haber desarrollado el color, pero antes de 12 min, utilizar el mismo intervalo de tiempo para todas las mediciones, medir la intensidad de color espectrofotométricamente a 690 nm y comparar contra la curva de calibración, utilizar como blanco agua.

CÁLCULO:

- Calcular la concentración de la muestra por medio de la ecuación obtenida de la curva de calibración y que es representada por la siguiente ecuación:

$$Y = mX + b$$

Donde:

- m es la pendiente
- b es la ordenada al origen
- Y es la absorbancia
- X es la concentración (mg P/L)

- En caso de haber hecho dilución utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{mg P/L} = \text{concentración} \times \text{Factor de dilución}$$

Anexo 7. Determinación del número más probable (nmp) de coliformes totales y coliformes fecales. NMX-AA-042-1987

Esta Norma Mexicana establece un método para la detección y enumeración en agua de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales mediante el cultivo en un medio líquido en tubos múltiples y el cálculo de sus números más probables (NMP) en la muestra.

MATERIALES Y EQUIPO:

- Incubadora
- Estufa
- Autoclave u olla de presión o con manómetro
- Potenciómetro
- Balanza analítica con sensibilidad de 0.0001 g
- Pipetas serológicas
- Pipeteros de aluminio o acero inoxidable
- Tubos de ensaye de cristal refractario
- Frascos muestreadores
- Tubos de fermentación
- Asas de inoculación

PROCEDIMIENTO:

1. A partir del número de tubos que dan reacciones positivas en los medios de aislamiento y confirmativo, calcular por referencia a las tablas de estadísticas el número más probable de organismos coliformes fecales y coliformes fecales en 100 cm³ de la muestra. Cuando se emplean de dilución para hacerlo equivalente.
2. O emplear la siguiente ecuación para los cálculos:

$$\frac{Nmp}{100cm^3} = \frac{N. de tubos positivos \times 100}{\sqrt{cm^3 de muestra en tubos negativos \times cm^3 de muestra en todos los tubos}}$$

Anexo 8. Determinación del contenido de metales en muestra de agua mediante espectrometría de absorción atómica.

- I. Una vez encendido el espectrómetro y seleccionado los valores de medición para el elemento en cuestión según indicaciones del fabricante; se instala la base y la celda de cuarzo a la altura adecuada para posteriormente calentar el aparato durante unos minutos previo al análisis para lograr la estabilidad del sistema.
- II. El espectrómetro realiza por sí solo la curva de calibración al medir el HNO_3 al 2% y los 4 estándares de calibración según corresponda el elemento a medir.



- III. La medición de metales en agua se hace colocando el capilar dentro de la botella el tiempo suficiente para que el espectrómetro haga la medición de la concentración de manera automática.



- IV. Por último se obtiene un archivo digital en formato PDF (resultados) donde aparecen todas las especificaciones de la medición: secuencia, número de mediciones por muestra, concentración del metal, lugar de toma de muestra, etc.

Method: Cu-Sedimento Page: 1 Date: 20/04/2012 03:49:38 p.m.

Analysis Begun

Logged in Analyst: UMGSH Technique: AA Flame
Spectrometer Model: AAnalyst 400, S/N 2006499202 Autosampler Model:

Sample Information File: C:\data-AA\UMGSH\Sample Information\ANIBAL ACAGUARO.sif
Sample ID:
Result Data Set: Cu Anibal JM
Results Library: C:\data-AA\UMGSH\Results\Results.mdb

Method Loaded
Method Name: Cu-Sedimento Method Last Saved: 23/02/2012 05:13:10 p.m.
Method Description: Cu-Sedimento

Sequence No.: 1 Autosampler Location:
Sample ID: 8903 24 Date Collected: 20/04/2012 02:23:29 p.m.
Analyst: Data Type: Original

Replicate Data: 8903 24

Rep#	Sample Conc	Std Conc	Std Dev	Time	Signal	Stored
#	mg/L	mg/L				
1	10.00	0.000		1422930	Yes	
2	10.00	0.000		1423135	Yes	
3	10.00	0.000		1423140	Yes	
Blank:	0.00	0.000				
Std:	0.00	0.0005				
RESD:	0.00	0.15				

Auto-zero performed.

Sequence No.: 2 Autosampler Location:

Anexo 9. Determinación del contenido de arsénico en muestra de agua de pozo mediante espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros

- I. Se disuelven 3 g de NaBH_4 en un matraz aforado de 100 mL y se lleva al volumen con NaOH al 1%.



- II. Se coloca la solución de NaBH_4 en la botella correspondiente al sistema de generación de hidruros.



- III. A partir de una solución estándar de 1000 mg/L de arsénico se prepara una de 1 mg/L; y luego de la solución de 1 mg/L se prepara las curvas de calibración en volúmenes de 10 mL que contengan 1, 2.5 y 5 $\mu\text{g/L}$ de arsénico.



- IV. Una vez instalado el generador de hidruros según indicaciones del fabricante; se instala la base y la celda de cuarzo a la altura adecuada para posteriormente calentar el aparato durante unos minutos previo al análisis para lograr la estabilidad del sistema.
- V. Se leen las absorbancias de estándares y se revisa la curva de calibración.
- VI. Se leen las muestras y se anota la absorbancia para obtener las concentraciones.
- VII. Las concentraciones se obtienen a partir de una regresión lineal obtenida con cuatro lecturas promedio de tres estándares. Con la ecuación de la forma $y = mx+b$, se resuelve para “x” con los valores de lectura de las muestras de agua

Anexo 10. Determinación del contenido de fluoruro en muestra de agua mediante el uso del electrodo selectivo de ion específico (HANNA HI 98402)

- I. Se enciende el fluorímetro (HANNA HI 98402) y se estabiliza de acuerdo a las instrucciones del fabricante.



- II. Se ajusta la temperatura de la muestra y la de los estándares a temperatura ambiente.
- III. El fluorímetro (HANNA HI 98402) se calibra utilizando 2 puntos de referencia de la concentración conocida de flúor a partir de la solución de 1 mg/L de fluoruro (HI 4010-11); de la solución de 10 mg/L de fluoruro (HI 4010-10); o de la solución de 100 mg/L de fluoruro (HI 4010-05).
- IV. Una vez que se realizó la calibración, se toma una alícuota de 50 mL en un contenedor de polietileno.



- V. El volumen total de la muestra debe de ser suficiente para sumergir los electrodos. Mientras se hace la medición se debe de mezclar cada solución usando un agitador magnético.
- VI. Se sumergen los electrodos del potenciómetro en la muestra y se realiza la lectura en un promedio de tiempo de 12 minutos.
- VII. Se retiran los electrodos, se lavan con agua destilada y se secan. La operación anterior se repite entre cada lectura.

Anexo 11. Balance iónico

Tabla 9. Resultados del balance de componentes mayores realizados en las muestras de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jariepo (S3), La Merced (S4), Cazuelejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato

Periodo	Sitio	Datos del análisis químico (mg/L)								Cantidades en reacción (meq)								Suma		B.I.
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Catión	Anión	
I	S1	26.64	15.09	89.17	17.82	21.43	291.4	10.5	4.10	1.33	1.24	3.88	0.22	0.50	0.45	4.78	0.18	6.45	6.12	2.66%
II	S1	21.24	14.38	82.24	18.08	19.26	275.0	6	3.11	1.06	1.18	3.58	0.16	0.51	0.40	4.51	0.10	5.82	5.68	1.21%
III	S1	23.66	13.39	63.56	15.16	16.09	235.0	9	4.00	1.18	1.10	2.77	0.21	0.43	0.33	3.85	0.15	5.05	4.98	0.72%
IV	S1	28.32	15.16	51.68	20.94	16.2	206.0	14	4.4	1.41	1.25	2.25	0.23	0.59	0.34	3.38	0.23	4.91	4.77	1.44%
I	S2	19.54	16.71	34.48	14.85	9.29	160.3	16.8	6.10	0.98	1.37	1.50	0.32	0.42	0.19	2.63	0.28	3.85	3.84	0.12%
II	S2	25.32	14.87	42.34	16.70	10.45	216.0	0	2.05	1.26	1.22	1.84	0.11	0.47	0.22	3.54	0.00	4.33	4.34	-0.10%
III	S2	26.14	12.89	16.62	10.21	5.87	129.0	15	0.94	1.30	1.06	0.72	0.05	0.29	0.12	2.11	0.25	3.09	2.82	4.46%
IV	S2	25.82	15.17	12.00	12.99	10.8	143.0	0	1.1	1.29	1.25	0.52	0.06	0.37	0.23	2.34	0.00	3.06	2.99	1.06%
I	S3	17.76	18.87	71.53	15.87	18.81	203.9	31.5	3.90	0.89	1.55	3.11	0.21	0.45	0.39	3.34	0.53	5.55	4.91	6.12%
II	S3	14.70	12.89	39.22	8.08	8.48	164.0	8	3.35	0.73	1.06	1.71	0.18	0.23	0.18	2.69	0.13	3.50	3.40	1.42%
III	S3	23.68	12.89	15.32	10.21	10.65	124.0	9	1.34	1.18	1.06	0.67	0.07	0.29	0.22	2.03	0.15	2.91	2.76	2.56%
IV	S3	24.15	12.64	12.72	12.99	10.7	129.0	0	1.6	1.20	1.04	0.55	0.09	0.37	0.22	2.11	0.00	2.80	2.79	0.17%
I	S4	15.98	14.56	25.85	11.52	9.05	121.1	16	5.70	0.80	1.20	1.12	0.30	0.32	0.19	1.98	0.27	3.12	3.06	0.90%
II	S4	14.70	12.89	68.43	19.95	15.61	225.0	0	3.30	0.73	1.06	2.98	0.17	0.56	0.33	3.69	0.00	4.77	4.75	0.23%
III	S4	23.68	13.39	57.62	22.01	10.65	201.0	16	1.24	1.18	1.10	2.51	0.07	0.62	0.22	3.30	0.27	4.79	4.47	3.46%
IV	S4	23.25	16.03	46.44	21.46	15.9	196.0	8	1.9	1.16	1.32	2.02	0.10	0.61	0.33	3.21	0.13	4.50	4.38	1.32%
I	S5	213.12	32.35	429.72	357.12	90.48	1159.5	0	21.20	10.63	2.66	18.70	1.12	10.07	1.88	19.01	0.00	32.00	32.08	-0.13%
II	S5	214.60	34.99	439.13	372.52	120.87	1170.0	0	10.00	10.71	2.88	19.11	0.53	10.51	2.52	19.18	0.00	32.70	32.73	-0.05%
III	S5	178.86	35.21	420.00	363.77	139.13	992.5	0	8.30	8.92	2.90	18.28	0.44	10.26	2.90	16.27	0.00	30.10	29.86	0.39%
IV	S5	141.58	54.09	414.53	358.93	126.8	970.0	0	7.9	7.06	4.45	18.04	0.42	10.12	2.64	15.90	0.00	29.55	29.08	0.80%
I	S6	233.56	19.85	491.97	347.33	75.24	1350.0	0	18.50	11.65	1.63	21.41	0.97	9.80	1.57	22.13	0.00	34.70	34.47	0.33%
II	S6	214.60	36.78	509.35	390.52	105.65	1330.0	0	8.90	10.71	3.03	22.16	0.47	11.02	2.20	21.80	0.00	35.90	35.49	0.58%
III	S6	195.19	40.18	421.73	344.43	132.61	1120.0	0	6.40	9.74	3.31	18.35	0.34	9.72	2.76	18.36	0.00	31.40	31.17	0.36%
IV	S6	149.98	56.61	421.94	335.02	132.7	1080.0	0	7.9	7.48	4.66	18.36	0.42	9.45	2.76	17.70	0.00	30.50	30.33	0.28%

I = 13-dic-11; II = 31-ene-12; III = 24-abr-12; IV = 15-ago-12

Tabla 9 (continuación). Resultados del balance de componentes mayores realizado a las muestras de agua de Cútaró (S1), Palo Blanco (S2), Jaripeo (S3), La Merced (S4), Cazulejas (S5) y Abejitas (S6) en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato

Periodo	Sitio	Porcentaje relativo de cationes y aniones							Porcentaje relativo de iones					
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻ +CO ₃
I	S1	20.61	19.24	60.15	8.22	7.29	78.10	2.86	20.61	19.24	60.15	8.22	7.29	80.96
II	S1	18.21	20.32	61.47	8.97	7.06	79.33	1.76	18.21	20.32	61.47	8.97	7.06	81.09
III	S1	23.39	21.82	54.80	8.59	6.73	77.43	3.01	23.39	21.82	54.80	8.59	6.73	80.44
IV	S1	28.78	25.41	45.81	12.38	7.07	70.80	4.89	28.78	25.41	45.81	12.38	7.07	75.69
I	S2	25.33	35.70	38.97	10.91	5.04	68.40	7.29	25.33	35.70	38.97	10.91	5.04	75.69
II	S2	29.18	28.26	42.56	10.86	5.02	81.64	0.00	29.18	28.26	42.56	10.86	5.02	81.64
III	S2	42.24	34.34	23.42	10.20	4.33	74.87	8.85	42.24	34.34	23.42	10.20	4.33	83.72
IV	S2	42.12	40.80	17.08	12.24	7.54	78.29	0.00	42.12	40.80	17.08	12.24	7.54	78.29
I	S3	15.96	27.96	56.07	9.11	7.97	68.04	10.69	15.96	27.96	56.07	9.11	7.97	78.73
II	S3	20.95	30.29	48.75	6.70	5.19	79.01	3.92	20.95	30.29	48.75	6.70	5.19	82.93
III	S3	40.63	36.46	22.92	10.42	8.03	73.57	5.43	40.63	36.46	22.92	10.42	8.03	79.00
IV	S3	43.06	37.16	19.78	13.14	7.96	75.83	0.00	43.06	37.16	19.78	13.14	7.96	75.83
I	S4	25.56	38.39	36.05	10.60	6.15	64.75	8.70	25.56	38.39	36.05	10.60	6.15	73.45
II	S4	15.37	22.22	62.41	11.85	6.84	77.65	0.00	15.37	22.22	62.41	11.85	6.84	77.65
III	S4	24.67	22.99	52.34	13.89	4.96	73.72	5.97	24.67	22.99	52.34	13.89	4.96	79.69
IV	S4	25.79	29.31	44.91	13.81	7.53	73.31	3.04	25.79	29.31	44.91	13.81	7.53	76.35
I	S5	33.24	8.32	58.44	31.40	5.87	59.25	0.00	33.24	8.32	58.44	31.40	5.87	59.25
II	S5	32.75	8.80	58.44	32.10	7.69	58.60	0.00	32.75	8.80	58.44	32.10	7.69	58.60
III	S5	29.65	9.62	60.72	34.36	9.70	54.48	0.00	29.65	9.62	60.72	34.36	9.70	54.48
IV	S5	23.91	15.06	61.04	34.81	9.08	54.68	0.00	23.91	15.06	61.04	34.81	9.08	54.68
I	S6	33.59	4.71	61.70	28.42	4.54	64.21	0.00	33.59	4.71	61.70	28.42	4.54	64.21
II	S6	29.83	8.43	61.74	31.04	6.20	61.44	0.00	29.83	8.43	61.74	31.04	6.20	61.44
III	S6	31.02	10.53	58.45	31.16	8.86	58.90	0.00	31.02	10.53	58.45	31.16	8.86	58.90
IV	S6	24.54	15.27	60.19	31.15	9.11	58.37	0.00	24.54	15.27	60.19	31.15	9.11	58.37

I = 13-dic-11; II = 31-ene-12; III = 24-abr-12; IV = 15-ago-12

Anexo 12. Estadística de parámetros

Tabla 10. Análisis de varianza realizado a parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F Ratio	Prob > F
Temperatura	Sitio	5	1692.9883	338.598	102.8651	<.0001*
	Error	18	59.25	3.292		
	C. Total	23	1752.2383			
Turbiedad	Sitio	5	586.35875	117.272	41.5142	<.0001*
	Error	18	50.8475	2.825		
	C. Total	23	637.20625			
pH	Sitio	5	15.684733	3.13695	80.7047	<.0001*
	Error	18	0.69965	0.03887		
	C. Total	23	16.384383			
Conductividad eléctrica	Sitio	5	56582666	11316533	13476.74	<.0001*
	Error	18	15115	839.70833		
	C. Total	23	56597781			
Oxígeno disuelto	Sitio	5	46.968888	9.39378	31.347	<.0001*
	Error	18	5.394075	0.29967		
	C. Total	23	52.362963			
Salinidad	Sitio	5	9318.6933	1863.74		
	Error	18	0.0000	0.00		
	C. Total	23	9318.6933			
Sólidos totales	Sitio	5	16024481	3204896	682.7786	<.0001*
	Error	18	84490	4694		
	C. Total	23	16108971			
Sólidos suspendidos totales	Sitio	5	4565.333	913.067	2.1854	0.1013
	Error	18	7520.5	417.806		
	C. Total	23	12085.833			
Sólidos disueltos totales	Sitio	5	15237355	3047471	14075.51	<.0001*
	Error	18	3897	217		
	C. Total	23	15241252			
Dureza total	Sitio	5	1483191.5	296638	414.1361	<.0001*
	Error	18	12893.1	716		
	C. Total	23	1496084.6			
Alcalinidad total	Sitio	5	4862148.2	972430	155.2933	<.0001*
	Error	18	112714	6262		
	C. Total	23	4974862.2			
Cloruros	Sitio	5	628308.43	125662	1068.09	<.0001*
	Error	18	2117.72	118		
	C. Total	23	630426.15			
Sulfatos	Sitio	5	82270.32	16454.1	1.1698	0.3619
	Error	18	253176.67	14065.4		
	C. Total	23	335446.99			
Carbonatos	Sitio	5	566.9333	113.387	2.0152	0.125
	Error	18	1012.805	56.267		
	C. Total	23	1579.7383			

Tabla 10 (continuación). Análisis de varianza realizado a parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F Ratio	Prob > F
Bicarbonatos	Sitio	5	4959002.4	991800	159.9617	<.0001*
	Error	18	111604.2	6200		
	C. Total	23	5070606.6			
Calcio	Sitio	5	155436.6	31087.3	73.4717	<.0001*
	Error	18	7616.15	423.1		
	C. Total	23	163052.76			
Magnesio	Sitio	5	3143.6403	628.728	11.0207	<.0001*
	Error	18	1026.8955	57.05		
	C. Total	23	4170.5359			
Sodio	Sitio	5	851935.15	170387	267.8005	<.0001*
	Error	18	11452.43	636		
	C. Total	23	863387.58			
Hierro	Sitio	5	15.003700	3.00074	6.4265	0.0014*
	Error	18	8.404815	0.46693		
	C. Total	23	23.408515			
Arsénico	Sitio	5	0.01400737	0.002801	24.8816	<.0001*
	Error	18	0.00202666	0.000113		
	C. Total	23	0.01603403			
Flúor	Sitio	5	367.66478	73.533	5.4424	0.0032
	Error	18	243.19915	13.5111		
	C. Total	23	610.86393			

Tabla 11. Comparación de medias en parámetros fisicoquímicos utilizando Tukey-Kramer

Parámetro	q*	Alfa	Nivel	Grupo	Promedio	
Temperatura	3.17804	0.05	Cazuelejas	A		46.175
			Abejitas		B	41.125
			Palo Blanco		C	28.375
			La Merced		C	26.4
			Jaripeo		C	25.575
			Cutaro		C	24.7
Turbiedad	3.17804	0.05	Abejitas	A		12.375
			Cazuelejas	A		10.55
			Cutaro		B	1.15
			Jaripeo		B	1
			La Merced		B	1
			Palo Blanco		B	1
pH	3.17804	0.05	Palo Blanco	A		8.12
			Cutaro	A		8.105
			La Merced	A		8.02
			Jaripeo	A		7.8475
			Abejitas		B	6.4
			Cazuelejas		B	6.2425
Conductividad eléctrica	3.17804	0.05	Abejitas	A		3870
			Cazuelejas		B	3457.5
			Cutaro		C	530.5
			La Merced		C	507.25
			Jaripeo		D	343.5
			Palo Blanco		D	302.5
Oxígeno disuelto	3.17804	0.05	Cutaro	A		4.5775
			Palo Blanco	A		4.2575
			Jaripeo	A		3.7275
			La Merced	A		3.625
			Abejitas		B	1.2075
			Cazuelejas		B	1.1075
Salinidad	3.17804	0.05	Abejitas			42
			Cazuelejas			42
			Cutaro			0.3
			Jaripeo			0.2
			La Merced			0.2
			Palo Blanco			0.1

Tabla 11 (continuación). Comparación de medias en parámetros fisicoquímicos utilizando Tukey-Kramer

Parámetro	q*	Alfa	Nivel	Grupo	Promedio
Sólidos totales	3.17804	0.05	Abejitas	A	2125
			Cazuelejas	B	1913.75
			Cutaro	C	360.5
			La Merced	C	332.5
			Palo Blanco	C	243.75
			Jaripeo	C	236.75
Sólidos suspendidos totales	3.17804	0.05	Abejitas	A	38.25
			Cazuelejas	A	36.75
			La Merced	A	10.5
			Cutaro	A	9
			Jaripeo	A	7.5
			Palo Blanco	A	6.5
Sólidos disueltos totales	3.17804	0.05	Abejitas	A	2013.25
			Cazuelejas	B	1800
			Cutaro	C	282
			La Merced	C	269
			Jaripeo	D	183.025
			Palo Blanco	D	161.4
Dureza total	3.17804	0.05	Abejitas	A	653.765
			Cazuelejas	A	628.8525
			Cutaro	B	122.2175
			Jaripeo	B	121.9125
			Palo Blanco	B	109.1695
			La Merced	B	104.1295
Alcalinidad total	3.17804	0.05	Abejitas	A	1220
			Cazuelejas	A	1073
			Cutaro	B	261.7375
			La Merced	B	195.7625
			Jaripeo	B	168.2625
			Palo Blanco	B	167.3375
Cloruros	3.17804	0.05	Cazuelejas	A	363.085
			Abejitas	A	354.325
			La Merced	B	18.735
			Cutaro	B	18
			Jaripeo	B	13.687
			Palo Blanco	B	11.7875

Tabla 11 (continuación). Comparación de medias en parámetros fisicoquímicos utilizando Tukey-Kramer

Parámetro	q*	Alfa	Nivel	Grupo	Promedio
Sulfatos	3.17804	0.05	Jaripeo	A	154.3935
			Cazuelejas	A	119.324
			Abejitas	A	111.54225
			Cutaro	A	18.2415
			La Merced	A	12.78975
			Palo Blanco	A	12.15
Carbonatos	3.17804	0.05	Palo Blanco	A	12.125
			La Merced	A	10
			Cutaro	A	9.875
			Jaripeo	A	7.95
			Abejitas	A	0
			Cazuelejas	A	0
Bicarbonatos	3.17804	0.05	Abejitas	A	1220
			Cazuelejas	A	1073
			Cutaro	B	251.85
			La Merced	B	185.7625
			Jaripeo	B	162.0625
			Palo Blanco	B	155.2125
Calcio	3.17804	0.05	Abejitas	A	198.333
			Cazuelejas	A	187.037
			Cutaro	B	24.964
			Jaripeo	B	24.203
			Palo Blanco	B	20.072
			La Merced	B	19.404
Magnesio	3.17804	0.05	Cazuelejas	A	39.15875
			Abejitas	A	38.35525
			Jaripeo	B	14.90875
			Cutaro	B	14.50525
			Palo Blanco	B	14.3225
			La Merced	B	14.21575
Sodio	3.17804	0.05	Abejitas	A	461.2443
			Cazuelejas	A	425.8457
			Cutaro	B	71.66355
			La Merced	B	49.58225
			Palo Blanco	B	34.696
			Jaripeo	B	26.36

Tabla 11 (continuación). Comparación de medias en parámetros fisicoquímicos utilizando Tukey-Kramer

Parámetro	q*	Alfa	Nivel	Grupo	Promedio	
Hierro	3.47332	0.05	Abejitas	A		2.209
			Cazuelejas	A	B	0.959
			La Merced		B	0.20225
			Jaripeo		B	0.0835
			Cutaro		B	0.051
			Palo Blanco		B	0.04575
Arsénico	3.22215	0.05	Cutaro	A		0.066875
			Palo Blanco	A	B	0.0471875
			La Merced	A	B	0.0433125
			Jaripeo		B	0.039375
			Abejitas		C	0.001644
			Cazuelejas		C	0.00101275
Flúor	3.17804	0.05	Cazuelejas	A		11.85
			Abejitas	A	B	10.425
			Cutaro	A	B	3.9025
			La Merced		B	3.04
			Jaripeo		B	2.5475
			Palo Blanco		B	2.305

Anexo 13. Matrices de coeficientes de correlación de parámetros para correlaciones positivas significativamente fuertes

Tabla 12. Matriz de correlación fuerte positiva de los parámetros fisicoquímicos.

	Oxígeno disuelto (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Bicarbonatos (mg/L)	Calcio (mg/L)	Magnesio (mg/L)	Sodio (mg/L)	Flúor (mg/L)	Conductividad	Temperatura (°C)	pH	Turbiedad (UTN)	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Dureza total (mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	Salinidad	Hierro (mg/L)	Arsénico (mg/L)	
Oxígeno disuelto (mg/L)	1																					
Cloruros (mg/L)	-0.92	1																				
Sulfatos (mg/L)	-0.27	0.26	1																			
Carbonatos (mg/L)	0.70	-0.58	-0.02	1																		
Bicarbonatos (mg/L)	-0.88	0.98	0.22	-0.57	1																	
Calcio (mg/L)	-0.88	0.98	0.25	-0.57	0.99	1																
Magnesio (mg/L)	-0.82	0.86	0.24	-0.45	0.80	0.75	1															
Sodio (mg/L)	-0.89	0.99	0.22	-0.56	1.00	0.98	0.83	1														
Flúor (mg/L)	-0.63	0.76	0.07	-0.36	0.80	0.82	0.49	0.78	1													
Conductividad eléctrica	-0.92	0.99	0.25	-0.58	0.99	0.97	0.87	0.99	0.76	1												
Temperatura (°C)	-0.88	0.96	0.32	-0.54	0.91	0.92	0.84	0.93	0.71	0.94	1											
pH	0.89	-0.97	-0.28	0.52	-0.95	-0.96	-0.82	-0.95	-0.83	-0.96	-0.94	1										
Turbiedad (UTN)	-0.89	0.94	0.26	-0.55	0.91	0.88	0.92	0.93	0.66	0.96	0.91	-0.91	1									
Sólidos totales (mg/L)	-0.91	0.99	0.24	-0.58	0.98	0.97	0.88	0.99	0.73	1.00	0.94	-0.95	0.96	1								
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	-0.53	0.60	0.12	-0.34	0.60	0.65	0.35	0.60	0.56	0.61	0.61	-0.64	0.61	0.60	1							
Sólidos disueltos totales (mg/L)	-0.92	0.99	0.25	-0.58	0.99	0.97	0.87	0.99	0.76	1.00	0.94	-0.96	0.96	1.00	0.61	1						
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	-0.91	1.00	0.26	-0.57	0.99	0.99	0.84	0.99	0.78	0.99	0.95	-0.97	0.93	0.99	0.61	0.99	1					
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	-0.88	0.98	0.22	-0.56	1.00	0.99	0.80	1.00	0.80	0.99	0.91	-0.95	0.91	0.98	0.60	0.99	0.99	1				
Salinidad	-0.92	1.00	0.26	-0.58	0.98	0.98	0.87	0.99	0.77	1.00	0.96	-0.97	0.95	0.99	0.61	1.00	1.00	0.98	1			
Hierro (mg/L)	-0.64	0.68	0.16	-0.44	0.69	0.67	0.63	0.69	0.56	0.73	0.65	-0.69	0.83	0.72	0.65	0.74	0.69	0.69	0.71	1		
Arsénico (mg/L)	0.90	-0.87	-0.34	0.53	-0.84	-0.84	-0.76	-0.84	-0.65	-0.86	-0.85	0.84	-0.83	-0.85	-0.53	-0.86	-0.86	-0.84	-0.87	-0.61	1	

Anexo 13 (continuación). Matrices de coeficientes de correlación de parámetros para correlaciones negativas significativamente fuertes

Tabla 13. Matriz de correlación fuerte negativa de los parámetros fisicoquímicos.

	Oxígeno disuelto (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Bicarbonatos (mg/L)	Calcio (mg/L)	Magnesio (mg/L)	Sodio (mg/L)	Flúor (mg/L)	Conductividad	Temperatura (°C)	pH	Turbiedad (UTN)	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Dureza total (mg/L CaCO ₃)	Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	Salinidad	Hierro (mg/L)	Arsénico (mg/L)	
Oxígeno disuelto (mg/L)	1.00																					
Cloruros (mg/L)	-0.92	1.00																				
Sulfatos (mg/L)	-0.27	0.26	1.00																			
Carbonatos (mg/L)	0.70	-0.58	-0.02	1.00																		
Bicarbonatos (mg/L)	-0.88	0.98	0.22	-0.57	1.00																	
Calcio (mg/L)	-0.88	0.98	0.25	-0.57	0.99	1.00																
Magnesio (mg/L)	-0.82	0.86	0.24	-0.45	0.80	0.75	1.00															
Sodio (mg/L)	-0.89	0.99	0.22	-0.56	1.00	0.98	0.83	1.00														
Flúor (mg/L)	-0.63	0.76	0.07	-0.36	0.80	0.82	0.49	0.78	1.00													
Conductividad eléctrica	-0.92	0.99	0.25	-0.58	0.99	0.97	0.87	0.99	0.76	1.00												
Temperatura (°C)	-0.88	0.96	0.32	-0.54	0.91	0.92	0.84	0.93	0.71	0.94	1.00											
pH	0.89	-0.97	-0.28	0.52	-0.95	-0.96	-0.82	-0.95	-0.83	-0.96	-0.94	1.00										
Turbiedad (UTN)	-0.89	0.94	0.26	-0.55	0.91	0.88	0.92	0.93	0.66	0.96	0.91	-0.91	1.00									
Sólidos totales (mg/L)	-0.91	0.99	0.24	-0.58	0.98	0.97	0.88	0.99	0.73	1.00	0.94	-0.95	0.96	1.00								
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	-0.53	0.60	0.12	-0.34	0.60	0.65	0.35	0.60	0.56	0.61	0.61	-0.64	0.61	0.60	1.00							
Sólidos disueltos totales (mg/L)	-0.92	0.99	0.25	-0.58	0.99	0.97	0.87	0.99	0.76	1.00	0.94	-0.96	0.96	1.00	0.61	1.00						
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	-0.91	1.00	0.26	-0.57	0.99	0.99	0.84	0.99	0.78	0.99	0.95	-0.97	0.93	0.99	0.61	0.99	1.00					
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	-0.88	0.98	0.22	-0.56	1.00	0.99	0.80	1.00	0.80	0.99	0.91	-0.95	0.91	0.98	0.60	0.99	0.99	1.00				
Salinidad	-0.92	1.00	0.26	-0.58	0.98	0.98	0.87	0.99	0.77	1.00	0.96	-0.97	0.95	0.99	0.61	1.00	1.00	0.98	1.00			
Hierro (mg/L)	-0.64	0.68	0.16	-0.44	0.69	0.67	0.63	0.69	0.56	0.73	0.65	-0.69	0.83	0.72	0.65	0.74	0.69	0.69	0.71	1.00		
Arsénico (mg/L)	0.90	-0.87	-0.34	0.53	-0.84	-0.84	-0.76	-0.84	-0.65	-0.86	-0.85	0.84	-0.83	-0.85	-0.53	-0.86	-0.86	-0.84	-0.87	-0.61	1.00	