



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Facultad de Biología
Facultad de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería Química

“Evaluación de la calidad del agua subterránea en función de la presencia de arsénico, flúor y boro en Ciudad Hidalgo, Michoacán”

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

Presenta la:

Química Farmacobióloga Marisol Arreola Cianca

Directora de Tesis:

Doctora en Ingeniería Ruth Alfaro Cuevas Villanueva

Morelia, Michoacán. Septiembre 2014.



*Dedico este trabajo a la memoria de mi padre J.L. Arreola Montes de Oca † y de mi
abuela C. Correa Lara †.*

A mi madre Irma Georgina Cianca Correa.

A mis hermanos Carolina, Georgina, Rodrigo Y J. David.

A mis sobrinos Lizbeth, Andrés, Marco A., Leonardo, Omar, Yareli y Johana.

A todos los becarios CONACyT.

Este trabajo se realizó en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Químico Biológicas (IIQB) en el laboratorio de Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, bajo la dirección de la Doctora Ruth Alfaro Cuevas Villanueva.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado por medio de una beca con el número de becario 279436.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mi asesora la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por el apoyo, aportaciones, tiempo y dedicación que me brindo durante este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Raúl Cortes Martínez, Dra. Maricela Villicaña Méndez, M.C. Abril Munro Rojas y al M.C. Gabriel Martínez Herrera por sus observaciones que contribuyeron a la mejora de este trabajo.

Agradezco al D.I. Raúl Cortes Martínez por el apoyo brindado para la determinación de boro que se realizó en el laboratorio de alimentos de la Facultad de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Agradezco a la Dra. Ofelia Morton Bermea del Instituto de Geofísica de la UNAM, México y a la M.C. Elizabeth Hernández Álvarez por su apoyo en las determinaciones por ICP-MS.

Al Técnico Edu Eduardo Rodríguez Franco jefe del departamento electromecánico y calidad del agua del SAPA (Sistema de Alcantarillado y Agua Potable) de Ciudad Hidalgo, por el apoyo en campo brindado y las facilidades para la colecta de muestras.

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

Al M.C. Benjamín Villalobos Castañeda y al Q.F.B Rigoberto Rivera por su apoyo en campo y su entrañable compañía.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A mi gran amigo M.C. Leonel Campos López por todo el apoyo y amistad.

A mis compañeros de generación de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental 2012-2014 que hicieron muy ameno el tiempo compartido.

A mis amigas Adriana, Fernanda, Alejandra, Leticia, Carmen y Liz por el apoyo y los agradables momentos. Al M.C. Benjamín Villalobos y M.C. Manuel Rivera por su apoyo con el uso de softwares.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Justificación	5
1.2 Hipótesis	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos particulares	6
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Generalidades	7
2.1.1 El agua	7
2.1.2 Disponibilidad del agua	7
2.1.3 Ciclo hidrológico	8
2.1.4 Calidad del agua	8
2.1.4.1 Clasificación de los tipos de agua	8
2.1.5 Contaminación del agua	9
2.1.5.1 Contaminación del agua subterránea	9
2.1.5.2 Contaminación por metales pesados	10
2.1.6 Parámetros fisicoquímicos	17
2.1.7 Parámetros bacteriológicos	19
2.1.8 Posibles efectos a la salud ocasionados por la presencia de As, F y B	19

2.2 Antecedentes	20
2.3. Descripción del área de estudio	26
2.3.1 Ubicación	26
2.3.2 Fisiografía	27
2.3.3 Orografía	27
2.3.4 Hidrografía, clima y ecosistemas	27
2.3.5 Edafología	27
CAPITULO 3. METODOLOGÍA	28
3.1 Selección de los sitios de estudio	28
3.2 Colecta de muestras	29
3.3 Análisis de parámetros	30
3.4 Balance iónico o condición de electroneutralidad	31
3.5 Tipo de agua en la zona de estudio	32
3.6 Índice de Calidad del Agua (ICA)	33
3.7 Análisis estadístico multivariado	35
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1 Análisis de parámetros	37
4.1.1 Parámetros in situ	37
4.1.2 Parámetros fisicoquímicos	40
4.1.3 Coliformes fecales	49
4.1.4 Metales pesados, arsénico y boro	49
4.1.5 Especiación química	51
4.1.6 Tipo de agua en la zona de estudio	55
4.1.7 Índice de Calidad del Agua (ICA)	56
4.2 Análisis estadístico multivariado	56
4.2.1 Análisis de varianza entre muestreos y prueba de Tukey-Kramer	57

4.2.2 Análisis de varianza entre sitios y prueba de Tukey- Kramer.	61
4.2.3 Análisis de componentes principales	68
4.2.4 Análisis Clúster	69
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	76
ANEXOS	85
Anexo 1. Valores de parámetros in situ	85
Anexo 2. Valores de parámetros fisicoquímicos	86
Anexo 3. Metales determinados expresados en mg/L	87
Anexo 4. Balance iónico	91
Anexo 5. Valores de coliformes fecales.	93
Anexo 6. Tablas resultados Análisis estadístico	94
Anexo 7. Técnica determinación de B	99
Anexo 8. Técnica determinación de dureza total	101
Anexo 9. Técnica determinación de sólidos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales.	104
Anexo 10. Técnica determinación de organismos coliformes	106
Anexo 11. Técnica determinación de ion sulfato	107
Anexo 12. Técnica determinación de cloruros totales	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permisibles marcados en la NOM-127-SSA1-1994	15
Tabla 2. Límites máximos permisibles marcados en la NOM-127-SSA1-1994.	16
Tabla 3. Resumen de elementos traza importantes encontrados en aguas naturales (Manahan 2007).	17
Tabla 4. Límites máximos permisibles marcados en la NOM-127-SSA1-1994.	19
Tabla 5. Localización de los sitios de muestreo.	28
Tabla 6. Equipo requerido para realizar las determinaciones de campo y de laboratorio.	31
Tabla 7. Peso de parámetros	33
Tabla 8. Clasificación del valor del índice de calidad del agua.	35
Tabla 9. Valor del ICA para los sitios de estudio.	56
Tabla 11. Valores de parámetros in situ	85
Tabla 12. Valores de parámetros fisicoquímicos.	86
Tabla 13. Metales determinados expresados en mg/L	87
Tabla 14. Valores de iones mayoritarios y balance iónico.	91
Tabla 15. Valores de Coliformes fecales.	93
Tabla 16. Análisis de varianza (ANOVA) de una vía para muestreos.	94
Tabla 17. Comparación de medias entre muestreos Tukey-Kramer HSD.	94
Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) de una vía para sitios.	95
Tabla 19. Comparación de medias entre muestreos Tukey-Kramer HSD.	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio.	26
Figura 2. Ubicación geográfica de los sitios de estudio.	28
Figura 3. Valores de temperatura del agua (°C) en los diez sitios de muestreo.	37
Figura 4. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los diez sitios de muestreo.	38
Figura 5. Valores de oxígeno disuelto (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	39
Figura 6. Valores de pH en los diez sitios de muestreo.	39
Figura 7. Valores de dureza total (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	40
Figura 8. Valores de sólidos disueltos totales (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	41
Figura 9. Valores alcalinidad total (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	41
Figura 10. Valores de sólidos totales (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	42
Figura 11. Valores de sólidos suspendidos totales (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	42
Figura 12. Valores de Ca^{2+} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	43
Figura 13. Valores de Mg^{2+} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	43
Figura 14. Valores de Na^{+} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	44
Figura 15. Valores de K^{+} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	45
Figura 16. Valores de HCO_3^{-} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	45
Figura 17. Valores de SO_4^{2-} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	46
Figura 18. Valores de Cl^{-} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	46
Figura 19. Valores de F^{-} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	47
Figura 20. Representación gráfica del balance iónico.	48
Figura 21. Valores para coliformes fecales expresados en NMP/100 mL en los diez sitios de muestreo.	49
Figura 22. Valores para Arsénico (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	50
Figura 23. Valores para Boro (mg/L) en los diez sitios de muestreo.	51
Figura 24. Especies predominantes de As presentes en cinco sitios de muestreo a partir de concentraciones máximas obtenidas.	52
Figura 25. Especies predominantes de As presentes en cinco sitios de muestreo a partir de concentraciones máximas obtenidas.	53

Figura 26. Especies predominantes de Fe presentes en cinco sitios de muestreo a partir de concentraciones máximas obtenidas. _____	54
Figura 27. Especies predominantes de Fe presentes en cinco sitios de muestreo a partir de concentraciones máximas obtenidas. _____	54
Figura 28. Diagrama de Piper del agua en la zona de estudio. _____	55
Figura 29. Análisis de una vía para Oxígeno disuelto por muestreo. _____	57
Figura 30. Análisis de una vía para potasio por muestreo _____	58
Figura 31. Análisis de una vía para cloruro por muestreo _____	58
Figura 32. Análisis de una vía para flúor por muestreo. _____	59
Figura 33. Análisis de una vía para Zinc por muestreo _____	60
Figura 34. Análisis de una vía para Plomo por muestreo. _____	60
Figura 35. Análisis de una vía para Hierro por muestreo. _____	61
Figura 36. Análisis de una vía para Temperatura del agua entre sitios. _____	62
Figura 37. Análisis de una vía para conductividad eléctrica entre sitios _____	62
Figura 38. Análisis de una vía para pH entre sitios _____	63
Figura 39. Análisis de una vía para Alcalinidad Total entre sitios _____	63
Figura 40. Análisis de una vía para Solidos disueltos totales entre sitios _____	64
Figura 41. Análisis de una vía para concentraciones de calcio entre sitios. _____	64
Figura 42. Análisis de una vía para concentraciones de magnesio entre sitios. _____	65
Figura 43. Análisis de una vía para concentraciones de magnesio entre sitios. _____	66
Figura 44. Análisis de una vía para concentraciones de sulfato entre sitios. _____	66
Figura 45. Análisis de una vía para concentraciones de arsénico entre sitios _____	67
Figura 46. Análisis de una vía para concentraciones de hierro entre sitios _____	68
Figura 47. Matriz coeficientes de correlación para parámetros fisicoquímicos. _____	69
Figura 48. Análisis Clúster modo R de parámetros fisicoquímicos. _____	70
Figura 49. Análisis Clúster modo R para As, F, B y Fe. _____	72

RESUMEN

El agua subterránea a nivel mundial presenta contaminación química, física y biológica debido a factores naturales o antropogénicos. En México, existen lugares con altas concentraciones de arsénico, flúor y otras sustancias químicas que provienen de fuentes naturales. En Michoacán se han localizado acuíferos con concentraciones potenciales. Por lo anterior, en este trabajo se evaluó la calidad del agua subterránea en Ciudad Hidalgo, Michoacán, en un periodo que cubrió un ciclo hidrológico dividido en cuatro campañas de muestreo de marzo 2013 a febrero 2014. La zona no cuenta con estudios publicados sobre la calidad del agua que abastece a la población y el objetivo principal del trabajo fue evaluarla en función de arsénico, flúor y boro. Se evaluó el agua de cinco pozos y cinco manantiales donde también se determinaron metales pesados, parámetros fisicoquímicos y biológicos.

Algunos sitios exceden los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, únicamente para coliformes fecales, pH y hierro. De manera general en cuanto a composición fisicoquímica el sitio P-fresno, presentó las concentraciones más altas de todos los parámetros. Se realizó la especiación química de arsénico y hierro, se encontró que el arsénico presenta estado de oxidación (V), siendo la especie química predominante H_2AsO_4^- para nueve sitios de estudio, para el sitio P-undepo la especie predominante es HAsO_4^{2-} . El hierro presenta estado de oxidación (III), la especie química de hierro que representa aproximadamente el 99% de la concentración obtenida es $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$. De acuerdo con el diagrama de Piper el agua en la zona de estudio es tipo $\text{Ca}^{2+}\text{HCO}_3^-$, lo que sugiere es de reciente infiltración en el acuífero. El resultado del ICA exhibe para los diez sitios de estudio una excelente calidad del agua en la zona de acuerdo con las fórmulas matemáticas utilizadas.

En cuanto al análisis estadístico la prueba ANOVA y prueba de Tukey-Kramer exponen las diferencias estadísticas entre muestreos y sitios de estudio para algunos parámetros. El análisis de componentes principales revela que la temperatura del agua, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, dureza total, alcalinidad y sólidos disueltos, presentan correlaciones significativas lineales y representan un 95.099 % del total de la variabilidad de los datos. El análisis clúster dio como resultado en cuanto a parámetros fisicoquímicos la formación de dos grupos, uno mayor englobando a siete sitios y uno menor con tres sitios, dentro del grupo menor se incluyen los sitios (P-fresno, M-virgen y P-undepo) que presentaron las concentraciones máximas encontradas para la mayoría de parámetros fisicoquímicos.

Palabras clave: Ciudad Hidalgo, Arsénico, Flúor, Boro, Calidad del Agua.

ABSTRACT

The groundwater to global level presents contamination chemical, physical and biological factors due to natural or anthropogenic. In Mexico, there are places with high concentrations of arsenic, fluoride and other chemicals that come from natural sources. In Michoacan there has been localized potential aquifers with concentrations. Therefore, in this work we assessed the quality of groundwater in Ciudad Hidalgo, Michoacan, in a period which covered a hydrological cycle divided into four sampling campaigns from March 2013 to February 2014.

The area has no published studies on the quality of the water that caters to the population and the main objective of the work was evaluated in terms of arsenic, fluoride and boron. The water was evaluated in five wells and five springs where there was also identified heavy metals, physicochemical and biological parameters.

Some sites exceed the maximum allowable limits established by the NOM-127-SSA1-1994, only for fecal coliform, pH and iron. Generally in terms of physicochemical composition the site P-fresno, presented the highest concentrations of all the parameters.

In the chemical speciation of arsenic and iron, it was found that the arsenic presents oxidation state (V), being the predominant chemical species H_2AsO_4^- for nine study sites, for the site P-undepo the predominant species is HAsO_4^{2-} . The iron presents oxidation state (III), the chemical species of iron that represents approximately 99% of the concentration obtained is $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$.

According to the diagram of Piper the water in the area of study is type $\text{Ca}^{2+}\text{HCO}_3^-$, what you suggest is of recent infiltration into the aquifer. The result of the ICA exhibits for the ten study sites an excellent water quality in the area according with the mathematical formulas used.

In regard to the statistical analysis ANOVA test and Tukey-Kramer test presents the differences between sampling and study sites for some parameters. The principal components analysis reveals that the water temperature, electrical conductivity, dissolved oxygen, pH, total hardness, alkalinity, dissolved solids, presented significant correlations and linear represent a 95.099% of the total variability in the data. The cluster analysis resulted in terms of physicochemical parameters the formation of two groups, a larger group that includes seven sites and a less group with three sites (P-fresno, M-virgen and P-undepo) these presented the maximum concentrations encountered in the majority of physicochemical parameter.

Keywords: Ciudad Hidalgo, arsenic, fluoride, boron, water quality.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro suficiente, accesible e inocuo (OMS 2006). La calidad de los distintos tipos de agua se ha valorado partiendo de variables físicas, químicas y biológicas evaluadas de manera grupal o individual, estos parámetros dan información extensa de la naturaleza de las especies químicas presentes en el agua así como sus propiedades físicas (Samboni *et al.* 2007).

El agua potable se define como aquella que contiene un aspecto agradable, que no contiene sustancias perjudiciales a la salud y es importante se capte en zonas no contaminadas, no debe tener sabor, color, olor ni microorganismos (Páez 2008). Es de vital importancia que el agua potable cuente con una calidad adecuada para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para ello se requiere no sobrepase los límites máximos permisibles recomendados por la normatividad respecto a sus características fisicoquímicas, microbiológicas y organolépticas, esto para asegurar y preservar la calidad del agua para uso y consumo humano (DOF 1994).

El agua subterránea es un recurso vital para el suministro económico y seguro de agua potable en el medio urbano y rural, y juega un papel fundamental en el bienestar del ser humano y de muchos ecosistemas acuáticos. A nivel mundial, los acuíferos están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y mineras, por esta razón existe la necesidad de proteger y evaluar la calidad natural del agua subterránea (Foster *et al.* 2002). Si el agua destinada a consumo humano sobrepasa los límites permisibles por la legislación deberá ser sometida a un tratamiento antes de su distribución (DOF 1994).

Entre las fuentes principales que suministran agua para consumo humano se encuentran los acuíferos, estos son formaciones geológicas que almacenan agua y sirven como depósito y reserva. Por lo general conforman grandes extensiones y se recargan por el aporte de aguas pluviales, corrientes superficiales y lagos que se infiltran en el suelo. En el interior del acuífero el agua escurre gracias a la gravedad desde las zonas de recarga hacia las de descarga, las cuales pueden ser ríos, lagos o manantiales. Estas aguas se extraen mediante el bombeo en pozos (Price 2007).

La composición química del agua subterránea puede ser controlada por factores naturales o antropogénicos. Los naturales son el clima, su interacción con el medio geológico por el cual circula y el tiempo de residencia. Los antropogénicos están directamente relacionados con fuentes potenciales de contaminación a actividades humanas (López-Álvarez *et al.* 2013).

A partir de la Revolución Industrial el tema de la contaminación en todos los ambientes dio un giro importante, al existir un incremento de materias primas útiles en los procesos industriales y el uso de nuevas fuentes de energía aumentaron la escala de impactos ambientales. La introducción de componentes de mayor o menor toxicidad en el medio natural supera la capacidad de “autolimpieza” de los ecosistemas dando como resultado la acumulación de contaminantes perjudiciales como son los metales pesados (Martin 2008).

En este trabajo se evaluó la calidad del agua de cinco manantiales y cinco pozos ubicados en Ciudad Hidalgo, la cual forma parte de la cuenca de Cuitzeo, donde en estudios previos (Segovia *et al.* 2005, Herrera 2007, Páez 2008, Villalobos *et al.* 2010, Alfaro 2010) se ha observado la presencia natural de ciertos contaminantes en el agua.

1.1 Justificación

En este trabajo se realizó un estudio sobre la calidad del agua potable que se abastece en la región de Ciudad Hidalgo, Michoacán. Esta zona se encuentra dentro de la cuenca de Cuitzeo, donde en estudios previos tanto en agua superficial como subterránea se ha observado la presencia natural de algunas especies químicas en niveles que pueden llegar a resultar de riesgo para la salud de quienes consumen esta agua.

Hasta la fecha no se cuenta con reportes publicados sobre calidad del agua y el contenido de metales pesados, arsénico, flúor o boro en la zona, por lo que la finalidad de este trabajo fue realizar una determinación de la calidad del agua en dichos sitios, que contemple el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, metaloides y metales pesados y establecer la forma química en la que se encuentran en estas aguas, ya que de la forma química depende la toxicidad de algunas especies; sentando de esta manera las bases para una posible determinación del riesgo a la salud de las personas que consumen estas aguas.

1.2 Hipótesis

La calidad del agua en la zona de estudio se ve afectada debido a que los parámetros fisicoquímicos así como arsénico, flúor y boro se encuentran en concentraciones que superan las recomendaciones de la normatividad mexicana.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar la calidad del agua en función de la presencia de arsénico, flúor y boro en pozos y manantiales de agua potable que abastecen a Ciudad Hidalgo, Michoacán.

1.3.2 Objetivos particulares

- Realizar una caracterización fisicoquímica, bacteriológica, de metales pesados, arsénico flúor y boro, en agua potable durante cuatro campañas de muestreo, cubriendo un ciclo hidrológico.
- Determinar el comportamiento de las especies químicas predominantes mediante la modelación de su movilidad.
- Determinar el tipo de agua mediante la construcción de un diagrama de Piper.
- Establecer el diagnóstico de la calidad del agua.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

2.1.1 El agua

La vida como se conoce se desarrolla en su mayoría en soluciones acuosas. El agua es tan familiar que se ha llegado a considerar como un líquido insípido de carácter simple, sin embargo es un líquido reactivo desde el punto de vista químico con propiedades físicas extraordinarias. Las estructuras y los procesos biológicos sólo pueden comprenderse en base a las propiedades físicas y químicas del agua (Voet y Voet J. 2006).

El agua es una sustancia pura, incolora, inodora e insípida. En el medio natural el agua presenta una gran variedad de compuestos que alteran significativamente sus propiedades organolépticas. Respecto al color, el agua puede contener diversas sustancias que lo pueden alterar, por ejemplo, un agua natural puede llevar disueltos compuestos orgánicos como; ácidos húmicos, etc. (Doménech y Peral 2006).

2.1.2 Disponibilidad del agua

El 70% de la superficie de la Tierra es agua, la disponibilidad del agua promedio en el mundo es de aproximadamente $1\ 386 \times 10^6$ de km^3 , de los cuales el 97.5% es agua salada (contenida en los océanos) y sólo el 2.5% (35 millones de km^3) es agua dulce, de esta cantidad alrededor del 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra en los glaciares, en la nieve y en el hielo. Del agua disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos, cuya renovación es producto de la infiltración (CONAGUA 2010, Agudelo 2005).

En México los estudios realizados por la CONAGUA, el INEGI y el INE han identificado 1471 cuencas hidrográficas, las cuales se han subdivido en cuencas hidrológicas. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas. Respecto a las aguas subterráneas, México se divide en 653 acuíferos (SEMARNAT 2011).

2.1.3 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico describe el movimiento y conservación del agua en la Tierra. Abarca toda el agua presente sobre la superficie del planeta o debajo de ella (agua salada y dulce, agua subterránea y superficial, agua presente en las nubes y la atrapada en rocas bajo la superficie terrestre). El agua se transfiere a la atmósfera mediante dos procesos: 1) evaporación y 2) transpiración, aunque existe un tercer proceso llamado evapotranspiración. Aunado a éstos, está la precipitación que es el principal mecanismo por el que se libera agua de la atmósfera, al precipitarse hacia la superficie terrestre, las gotas pueden caer en ríos, mares, y otras corrientes; pueden moverse de manera lateral en el plano inferior de la superficie terrestre o desplazarse verticalmente a través del suelo y convertirse en agua subterránea (Davis y Masten 2005).

En México poco más del 70% del agua que precipita se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el resto escurre por los ríos o arroyos, o se infiltra al suelo y recarga los acuíferos. A nivel nacional, el 68% de la precipitación ocurre entre los meses de junio y septiembre (SEMARNAT 2011).

2.1.4 Calidad del agua

La calidad del agua potable a lo largo de la historia, ha sido un factor determinante del bienestar humano. Las enfermedades propagadas por agua “potable” contaminada con materia fecal diezmaron a la población de ciudades enteras. Actualmente, el agua contaminada por fuentes naturales o humanas sigue causando grandes problemas a las personas que la usan de manera obligada, tanto para beber como para la irrigación de hortalizas y otras plantas comestibles crudas (Manahan 2007).

La calidad del agua subterránea evoluciona rápidamente a medida que pasa a través de las vías del subsuelo, dentro del suelo y la zona no saturada y de allí a la zona saturada del acuífero (Edmunds *et al.* 2003).

2.1.4.1 Clasificación de los tipos de agua

De acuerdo con su origen, los suministros de agua se clasifican en tres categorías (Ramalho 1996; Restrepo 2007):

1.- *Aguas superficiales*. Comprenden los cauces (ríos), océanos, lagos y aguas embalsadas. Son aquellas aguas que se encuentran transitoriamente discurriendo, o en reposo, sobre un suelo, otros cuerpos de agua u otro material.

2. *Aguas subterráneas*. Es el agua existente bajo la superficie terrestre en una zona de saturación llenando los espacios vacíos del suelo y del subsuelo, procedente de la infiltración por precipitaciones y escorrentías. El agua infiltrada circula por el subsuelo hasta llegar a una zona de acumulación limitada por capas impermeables, formando un manto, denominado acuífero que abastece pozos y manantiales.

3. *Aguas meteorológicas*. La precipitada sobre la tierra en forma de lluvia, nieve y granizo, originada por la condensación del vapor acuoso de la atmósfera.

2.1.5 Contaminación del agua

La contaminación del agua es su daño o alteración por efecto de productos extraños. El agua de lluvia, el agua de los mares, ríos, lagos, acuíferos, etc., es contaminada por los gases residuales, desechos de lugares habitados, fábricas y ciudades, etc. (Prieto 2004).

En general, se considera un “contaminante” al exceso de materia o energía (calor) que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua. Entonces, no existe una división precisa entre las aguas contaminadas y las no contaminadas; este calificativo se atribuye en función del uso, las exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes (Jiménez 2001).

En la actualidad la mayor preocupación sobre la seguridad del agua es la presencia potencial de contaminantes químicos. Éstos pueden incluir productos químicos orgánicos e inorgánicos y metales pesados, procedentes de efluentes industriales, agrícolas y de la escorrentía urbana. Como los contaminantes pueden provenir de una variedad de fuentes, es importante se cuente con marcadores de contaminación del agua que sean indicativos de las fuentes. Algunos herbicidas pueden servir como marcadores de la escorrentía agrícola, y las bacterias Coliformes se utilizan como marcadores de contaminación fecal proveniente de fuentes domésticas (Manahan 2007).

2.1.5.1 Contaminación del agua subterránea

La escasez del agua ha propiciado el desarrollo de grandes obras subterráneas para la explotación de los mantos acuíferos (Chacón 2011). Uno de los principales problemas que presenta en la actualidad el agua subterránea y que repercuten en la salud del humano es la contaminación por sustancias químicas como los metales pesados, metaloides como el arsénico y boro, algunos no metales como el flúor.

Las actividades humanas han introducido ciertos contaminantes a la hidrósfera en aspectos, tales como la quema de combustibles fósiles, la fundición de minerales, las aguas residuales municipales, industriales, mediante efluentes de minería, vertederos, evacuación subterránea de desechos tóxicos, etc., estos contaminantes independientemente de su fuente, se dispersan fácilmente en los sistemas acuáticos y tienden a acumularse en los organismos vivos, provocando diversos trastornos y enfermedades en los ecosistemas (Jang-Soon *et al.* 2009).

Algunos de los metales pesados están entre los más dañinos de los contaminantes elementales, y son de gran interés debido a su toxicidad.

2.1.5.2 Contaminación por metales pesados

Los metales pesados pertenecen a los contaminantes prioritarios más peligrosos, pueden entrar en los depósitos de agua y participar en reacciones de hidrólisis, adsorción, desorción, formación de complejos y precipitación. En estas reacciones la especiación de metales puede cambiar (Sedykh *et al.* 2000). La descarga de metales pesados en el medio acuático es de gran preocupación en todo el mundo. Bajo ciertas condiciones ambientales, los metales pesados pueden acumularse a una concentración tóxica y causar daños ecológicos (Ömer *et al.* 2008).

La contaminación de los sistemas acuáticos con metales pesados por causas naturales o antropogénicas, es actualmente un serio problema ambiental. En Química los metales pesados son especies químicas no degradables, con una densidad mayor o igual a 5 g/cm^3 . En Ciencias Ambientales también se consideran dentro de este grupo algunos metales y metaloides de menor densidad. Debido a su movilidad en los ecosistemas acuáticos naturales y a su toxicidad para las formas superiores de vida, los iones de metales pesados presentes en los abastecimientos de aguas superficiales y subterráneos, se les ha dado prioridad como los contaminantes inorgánicos más importantes del ambiente. Los metales pesados pueden ser detectados en su estado elemental o enlazados en complejos con sales (Mesa *et al.* 2007; Cañizares 2000).

Una vez incorporados al medio ambiente pueden encontrarse en el aire, agua o suelo, cambiando a veces su estado de oxidación o incorporándose a los seres vivos (Panigatti 2003). La cantidad de metales liberada anualmente al ambiente es impactante, y hay estudios que indican que la toxicidad total de los metales movilizados por las actividades humanas es superior a los desechos radiactivos y orgánicos. Esto puede producir efectos nocivos en la flora y fauna, así como un aumento de

enfermedades crónicas en la población humana, limitación del uso múltiple del agua en varias regiones del mundo (Moore 1991).

2.1.5.2.1 Elementos traza

Como contaminantes importantes en las aguas subterráneas se presentan los elementos traza. Son elementos o compuestos químicos que existen en niveles muy bajos del orden de microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$) en un sistema dado incluyéndose elementos como el As, F, B, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb, Cd y Zn (Manahan 2007). En el agua subterránea las especies disueltas predominantes son los iones; Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- y Cl^- en cantidades entre 1 y 1000 mg/L, estos son conocidos como constituyentes mayores (Páez 2008).

Arsénico (As); Es el metaloide más importante como contaminante del agua. Es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza, constituyendo aproximadamente un 0.0005% de la corteza terrestre. Su origen puede ser natural o antropogénico, aunque la mayor parte de él proviene de fuentes naturales. Es un elemento tóxico, se puede encontrar en distintos estados de oxidación, el As (III) se considera 60 veces más tóxico que el As (V) (Corroto *et al.* 2006).

El arsénico ingresa a los acuíferos previa disolución de minerales y menas que lo contienen y se encuentra presente en concentraciones elevadas en las aguas subterráneas de algunos lugares. El agua de bebida procedente de fuentes superficiales no suele tener concentraciones elevadas de arsénico, a menos que estas últimas se surtan de aguas subterráneas contaminadas con este metaloide (OMS 2006a).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (U.S. EPA) recomiendan una concentración máxima para el As en agua potable de 0.01 mg/L, en México se ha establecido un límite máximo de 0.025 mg/L (DOF 1994).

De las diferentes fuentes ambientales de arsénico la que tiene mayor efecto en la salud humana es la presencia de éste en agua potable. Para que aparezcan concentraciones elevadas de arsénico en aguas son necesarios tres factores (Revuelta *et al.* 2003):

1. Debe existir una fuente de arsénico; puede ser de origen geológico, muchos minerales contienen diferentes formas de arsénico, los sulfuros y los óxidos y oxohidróxidos

metálicos presentan cierta capacidad de adsorción de arsenitos y arseniatos, especialmente los óxidos de hierro.

2. Movilización; las piritas y otros sulfuros, principales fuentes naturales de arsénico, se forman preferentemente en zonas con fuertes condiciones reductoras. Son compuestos inestables en sistemas aerobios y se oxidan liberando sulfatos, óxidos de hierro y diversos metales que pasan a las aguas.
3. Transporte; está directamente relacionado con los procesos de adsorción/ desorción. Se ha comprobado que la velocidad de transporte es diferente para arsenito y arseniato, dependiendo también de factores como el pH y el potencial redox.

Existen numerosas fuentes geogénicas de arsénico, incluyendo más de 200 minerales que lo contienen, la liberación y movilidad de arsénico en cada entorno está controlada por diferentes procesos geoquímicos, biogeoquímicos, así como condiciones geológicas, hidrogeológicas, geomorfológicas y climáticas (Bundschuh *et al.* 2010).

En México la mayor presencia de arsénico se encuentra dentro del Cinturón Volcánico, con suelos ricos en arsénico que contaminan los mantos freáticos. Así como posiblemente por el uso de plaguicidas órgano arsenicales empleados desde antes de 1945. En el agua de bebida, por lo general el arsénico se encuentra en forma de arseniato y puede ser absorbido con facilidad en el tracto gastrointestinal en una proporción entre 40 y 100% (Esparza 2006).

Boro (B); Es un elemento ubicuo, en humanos, animales y plantas, a bajas concentraciones es un elemento nutricional benéfico, su deficiencia puede derivar en riesgos potenciales a la salud. Las frutas, vegetales y nueces son fuente de boro en la dieta humana y una ingesta diaria aceptable es de 0.3 mg/kg de peso. En altas concentraciones es de relevancia en los estudios de calidad del agua debido a su toxicidad en seres vivos (Velázquez *et al.* 2011).

La concentración promedio de boro en la corteza terrestre es de 10 mg/kg, y se libera en el agua subterránea, principalmente a través de la erosión de las rocas, intrusión marina en los acuíferos, y la actividad volcánica. El boro es un elemento soluble en agua que se produce en soluciones acuosas y se puede encontrar como ácido bórico- $B(OH)_3$ o como el anión borato- $B(OH)_4^-$, la distribución de estas especies depende del valor de pH en el ambiente acuoso. En el pH alrededor de 7, la mayor

parte del boro está presente en la forma de $B(OH)_3$, sin embargo, la fracción de iones borato aumenta gradualmente con el aumento del valor de pH (Karro y Uppin 2013).

Flúor (F); El flúor es el décimo tercer elemento más abundante de la corteza terrestre, representa alrededor de 0.3 g/kg. Es un elemento natural, puede combinarse con otros elementos (cargados positivamente) en forma de fluoruro. Se encuentra de forma natural en el agua, los alimentos, el suelo y varios minerales como fluorita y fluorapatita. El fluoruro (F^-) entra en el medio ambiente y el cuerpo humano a través de agua, alimentos, exposición industrial, fármacos, cosméticos, etc. Sin embargo, el fluoruro se ha reconocido como contaminante del agua subterránea y esto ha provocado problemas graves de salud en el mundo (Ghosh *et al.* 2012).

El agua es la fuente principal del flúor, sobre todo en zonas donde la concentración de flúor que se encuentra presente en los recursos hídricos proceden de rocas y suelos por lo que las aguas de consumo presentan contenidos muy variados dependiendo del origen del agua. Por esta razón es conveniente que dentro de los parámetros de análisis de la calidad del agua, se contemple el análisis fisicoquímico de fluoruros (Reyes *et al.* 2011).

Cobre (Cu); Es un micronutriente esencial para la mayoría de los organismos, ya que es un constituyente de muchas metaloenzimas y de proteínas implicadas en el proceso de transporte de electrones. En altas concentraciones, es tóxico. Su toxicidad se atribuye principalmente a sus interacciones con los ácidos nucleicos, a la alteración de sitios activos de enzimas y a la oxidación de componentes de las membranas (Cervantes y Sánchez 1999).

Cromo (Cr); Es un elemento esencial para el humano y animales, niveles altos del metal (15 mg/L en agua de ríos y 0.10 mg/L en agua potable) resultan tóxicos en estos seres vivos. El cromo se encuentra presente en agua y suelo principalmente en dos estados de oxidación: Cr (III) o Cr (VI), aunque también puede encontrarse como óxido de cromo, sulfato de cromo, trióxido de cromo, ácido crómico, cromato (CrO_4^{2-}) y dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$). En presencia de materia orgánica, el Cr (VI) presente en aguas y suelos es reducido a Cr (III), cuando el ion en estado hexavalente se encuentra en altas concentraciones puede sobrepasar esta capacidad de reducción, lo que impide su adecuada eliminación (Cárdenas y Acosta 2010).

El Cromo (III) es considerado relativamente inocuo comparado con el Cromo (VI), los compuestos que forma el cromo atraviesan fácilmente las barreras biológicas y han mostrado ser mutagénicos y carcinogénicos (Acosta *et al.* 2012).

Hierro (Fe) y Manganeso (Mn); el hierro es un elemento esencial que produce problemas de aceptación (color y sabor) a concentraciones inferiores a las tóxicas (0.30 mg/L) (Etxabe *et al.* 2010, DOF 1994). Las concentraciones significativas de hierro y manganeso se producen a nivel mundial, aunque estos metales no son sospechosos de causar efectos directos sobre la salud a través de su presencia en el agua potable, pueden causar decoloración severa de agua (WHO 2004).

El hierro y el manganeso presentes en el agua de consumo humano ocasionan serios problemas operacionales y estéticos, ya que generan incrustaciones en las tuberías, manchas en la ropa y en los aparatos sanitarios y contribuyen a la formación de biopelículas en las redes de distribución incrementando los riesgos microbiológicos. Las aguas de pozos contienen mayores concentraciones de hierro y manganeso que las aguas superficiales, debido al bajo pH, y la alta concentración de CO₂ y el escaso contenido de oxígeno disuelto (Restrepo 2007).

Plomo (Pb); El plomo se encuentra en la corteza terrestre de manera relativamente abundante, en promedio de 16 mg/kg. Fue uno de los primeros metales extraídos por el hombre a partir de la galena, la cerusita y la anglesita (Lacasaña *et al.* 1996). El plomo es una sustancia tóxica que se acumula en los huesos, es tóxico para el sistema nervioso central como para el periférico, e induce efectos neurológicos y conductuales. Los lactantes, los niños hasta 6 años de edad y las embarazadas son las personas más vulnerables para asimilarlo (Etxabe *et al.* 2010).

La EPA menciona que altas concentraciones de plomo en el organismo pueden causar graves daños al cerebro, riñón, sistema nervioso y glóbulos rojos. En México el límite máximo permisible en agua es de 0.01 mg/L.

Cadmio (Cd) y Zinc (Zn); Estos dos metales experimentan por lo regular procesos geoquímicos juntos, ambos se encuentran en el agua en el estado de oxidación 2⁺, son contaminantes comunes del agua y sedimentos de los puertos cercanos a instalaciones industriales (Manahan 2007). El zinc abunda en la corteza terrestre en el orden de 0.02% en peso, es un oligoelemento indispensable que se encuentra en todos los alimentos y en el agua de bebida en forma de sales o complejos orgánicos (CNA 2007).

El cadmio es un metal blanco azulado, poco abundante, es de los metales más tóxicos, también se puede presentar en el estado de oxidación 1^+ (inestable). Tiene gran toxicidad, y no se conoce que tenga alguna función en ningún sistema biológico en la naturaleza. La exposición al cadmio en los seres humanos se produce generalmente a través de dos fuentes principales: vía oral (por agua e ingesta de alimentos contaminados) o vía inhalación (se encuentra en los cigarrillos) (Martín 2008).

Se ha encontrado que el cadmio a altas concentraciones tiene efectos tóxicos en el riñón y en los sistemas óseo y respiratorio, está clasificado como carcinógeno para el hombre. Se encuentra generalmente en el ambiente a bajas concentraciones, puede desplazarse a gran distancia desde la fuente de emisión por transferencia atmosférica (OMS 2010). A diferencia del zinc que al ser un elemento traza esencial para el hombre del cual se requiere una ingesta diaria de 15-20 mg/día, concentraciones de zinc iguales o mayores a 3 mg/L no son aceptables para los consumidores (WHO 2008).

En la tabla 1, se indican los límites máximos permisibles de metales pesados en agua.

Tabla 1. Límites máximos permisibles marcados en la NOM-127-SSA1-1994

PARÁMETRO	LÍMITE PERMISIBLE (mg/L)
Arsénico	0.025
Cadmio	0.005
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Hierro	0.30
Fluoruros (F ⁻)	1.50
Manganeso	0.15
Plomo	0.01
Zinc	5.00

2.1.5.2.2 Componentes mayores

Sodio (Na⁺); es el catión principal de la biosfera y constituye el 2.83% de la corteza terrestre. Se encuentra solo en estado combinado, en sales extremadamente solubles por lo que está presente en toda el agua (CNA 2007).

Calcio (Ca^{2+}); es un catión encontrado a altas concentraciones en la mayoría de los sistemas de agua dulce. Es importante en muchos procesos geoquímicos y los minerales constituyen la fuente principal del ion calcio en el agua, este ion junto con el magnesio y a veces el ion Fe^{3+} determinan la dureza del agua (Manahan 2007). Por lo regular se encuentra en un intervalo de 5 a 500 mg/L como $CaCO_3$ (2 a 200 mg/L como Ca^{2+}).

Sulfatos (SO_4^{2-}); están presentes en forma natural en diversos minerales. La concentración en aguas naturales varía, contribuyen a la dureza no carbonatada (CNA 2007).

Cloruros (Cl^-); Representan los compuestos de cloro con otro elemento o radical, presentes en casi todas las aguas naturales y en un amplio intervalo de concentraciones, de los más abundantes y estables son el cloruro de sodio, y en menor grado el de calcio y magnesio. Proviene de la disolución de rocas basálticas y sedimentarias así como de efluentes industriales. La concentración promedio de cloruro en el agua subterránea es de 6 mg/L (CNA 2007).

Carbonatos y bicarbonatos (CO_3^{2-} y HCO_3^-); el carbono inorgánico disuelto en un agua natural procede de la respiración de los organismos vivos presentes, pero principalmente de la disolución de CO_2 atmosférico, de los procesos de carbonatación calcárea y de la degradación de la materia orgánica (Doménech y Peral 2006). La formación de CO_3^{2-} y HCO_3^- incrementa la solubilidad del CO_2 , concentraciones elevadas de CO_2 pueden afectar de manera adversa la respiración y el intercambio de gases de los animales acuáticos (Manahan 2007).

La tabla 2 muestra los límites máximos permisibles de componentes mayores en agua potable y la tabla 3 expone los principales elementos traza que pueden estar presentes en agua subterránea, así como la fuente y los efectos adversos que causan.

Tabla 2. Límites máximos permisibles marcados en la NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Límite permisible(mg/L)
Cloruros (Cl^-)	250.00
Sodio (Na^+)	200.00
Sulfatos (SO_4^{2-})	400.00

Tabla 3. Resumen de elementos traza importantes encontrados en aguas naturales (Manahan 2007).

Elemento	Fuentes	Efectos e importancia
Arsénico	Subproductos mineros, residuales químicos.	Tóxico, posiblemente carcinogénico.
Boro	Carbón, detergentes, residuos líquidos.	Tóxico.
Cobre	Recubrimientos metálicos, minería, residuos industriales.	Elemento traza esencial, tóxico en niveles altos.
Cromo	Recubrimientos metálicos.	Esencial como Cr (III), tóxico como Cr (VI).
Flúor	Fuentes geológicas naturales.	Previene caída de dientes, y caries dental (mg/L). Tóxico a niveles superiores.
Hierro	Residuos industriales, corrosión, agua ácida de minas, acción microbiana.	Nutriente esencial.
Manganeso	Residuos industriales, drenajes o aguas ácidas de las minas, acción microbiana.	Tóxico a las plantas.
Plomo	Residuos industriales, minería y combustibles.	Tóxico, daña a la fauna.
Zinc	Residuos industriales, recubrimiento de metales.	Elemento esencial, tóxico para las plantas a altos niveles.

2.1.6 Parámetros fisicoquímicos

Para evaluar los cambios que el agua subterránea pudiera tener respecto a su calidad, se emplea una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos, también conocidos como indicadores de calidad del agua (Nissen *et al.* 2000).

Los parámetros fisicoquímicos dan información extensa de la naturaleza de las especies químicas presentes en el agua, así como sus propiedades físicas, sin aportar información de su influencia en la vida acuática; los métodos biológicos aportan esta información pero no señalan nada acerca del contaminante o los contaminantes responsables, por lo que se recomienda la utilización de ambos (Samboni 2007).

Los principales parámetros a evaluar para la determinación de la calidad del agua subterránea son los siguientes:

pH; es un parámetro de suma importancia ya que controla las reacciones químicas y biológicas en el agua (INEGI 2000). La NOM-127-SSA1-1994 establece un valor de 6.5 a 8.5. En aguas subterráneas se encuentra entre 6 y 8.5, en manantiales puede ser menor (Armienta *et al.* 1994).

Temperatura; Las temperaturas elevadas en el agua son indicadores de actividad biológica, química y física en el agua (DOF 2000a). Con el incremento de la temperatura se presenta una mayor

solubilidad de los minerales presentes (Metcalf y Eddy 1994). De manera general las variaciones de temperatura afectan la solubilidad de sales y gases en el agua (Galvín 2003).

Alcalinidad; se define como la capacidad del agua para neutralizar ácidos, reaccionando con iones hidrógeno, como su capacidad para aceptar protones o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH^-) (Armienta *et al.* 1994).

Acidez; es la capacidad del agua de neutralizar iones OH^- , se presenta cuando el agua contiene ácidos débiles como el CO_2 y H_2PO_4^- . El agua ácida es indicador de contaminación (Manahan 2007).

Dureza total; se define como la suma de cationes polivalentes (principalmente calcio y magnesio), se expresa en (mg/L).

Conductividad eléctrica; mide la capacidad del agua para transportar una corriente eléctrica, esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura (DOF 2000).

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5); Determina la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos oxiden la materia orgánica (biodegradable).

El incremento de la DBO_5 incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con una afectación a los sistemas acuáticos (SEMARNAT 2011).

Nitrato (NO_3^-); el nitrato se encuentra naturalmente en el medio ambiente y es un importante nutriente para las plantas, se encuentra presente en todas la plantas y es una parte importante del ciclo del nitrógeno. Puede llegar a las aguas subterráneas como consecuencia de la agricultura (aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados inorgánicos y abonos), procedentes de la eliminación de aguas residuales y de la oxidación de los productos de desecho nitrogenados en la excreta humana y animal, incluidos los tanques sépticos. Las concentraciones de nitratos en agua subterránea presentan cambios relativamente lentos. En general, la fuente más importante de exposición humana a los nitratos es a través de verduras y carne en la dieta, sin embargo, el agua de consumo puede hacer una contribución significativa de nitratos (WHO 2011).

2.1.7 Parámetros bacteriológicos

La NOM-127-SSA1-1994 establece dentro de este parámetro la determinación de características microbiológicas debidas a microorganismos nocivos para la salud; y menciona la determinación de organismos coliformes totales y fecales, principalmente *Escherichia coli*.

Se definen como coliformes; aquellos bacilos Gram negativos, no esporulados, aerobios o anaerobios facultativos, que a 35°C fermentan la lactosa con la producción de gas bajo ciertas condiciones (DOF 1994).

En la tabla 4 se muestran los límites máximos permisibles de organismos Coliformes.

Tabla 4. Límites máximos permisibles marcados en la NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Límite permisible (NMP/100mL)
Organismos coliformes totales.	Ausencia o no detectables.
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termo tolerantes.	Ausencia o no detectables.

2.1.8 Posibles efectos a la salud ocasionados por la presencia de As, F y B

El arsénico no se ha demostrado sea esencial en los seres humanos. La toxicidad aguda de los compuestos de arsénico en los seres humanos está en función de la tasa de eliminación en el cuerpo. Cuando existe exposición crónica a arsénico en el agua de consumo se puede presentar arsenicismo, incluyendo lesiones dérmicas tales como cáncer de piel, hiperpigmentación e hipopigmentación, neuropatía periférica, cáncer de vejiga y pulmón. Los síntomas más comúnmente observados han sido las lesiones dérmicas, que se producen después de los periodos de exposición mínimas de aproximadamente 5 años. En niños que consumen agua contaminada con arsénico durante un promedio de 7 años se han observado efectos cardiovasculares, con una concentración media de 0.6 mg/L.

El Programa Internacional de Seguridad Química (IPCS) concluye que la exposición a largo plazo a arsénico en el agua potable es causalmente relacionada con un mayor riesgo de cáncer en la piel, los pulmones, la vejiga y los riñones, así como otros cambios en la piel (WHO 2011).

El flúor en concentraciones mínimas es un componente esencial para la mineralización normal de los huesos y la formación del esmalte dental (Meenakshi y Maheshwari 2006). La ingesta de fluoruros tiene efectos benéficos (prevención de caries dental) y efectos negativos a altas concentraciones (0.5 mg/L y 2 mg/L respectivamente) (WHO 2008). Una ingesta excesiva de fluoruro se debe por lo general al consumo de aguas subterráneas que lo poseen en abundancia de forma natural, o de productos de cultivos que captan fluoruros y se riegan con esas aguas (OMS 2010). El consumo de agua con concentraciones sobre los límites permisibles causan problemas de salud como la fluorosis dental y ósea, y propicia a una mayor susceptibilidad a enfermedades renales y cáncer entre otras como la reducción del coeficiente intelectual principalmente en los niños (Reyes *et al.* 2011).

El boro es un constituyente menor disuelto de las aguas subterráneas, se asocia a menudo con el flúor. Al igual que el fluoruro, altos niveles de boro se consideran peligrosos para la salud humana. Sin embargo, los efectos de boro sobre la salud, así como su comportamiento geoquímico se han estudiado menos en comparación con los fluoruros (Karro y Uppin 2013).

En humanos solo se ha demostrado que la exposición aguda a boro se asocia con efectos irritantes a corto plazo de las vías respiratorias superiores. En animales se han observado múltiples efectos tras la ingesta de boro, entre ellos están; efectos agudos neurológicos, diarrea, anorexia, pérdida de peso, atrofia testicular (en ratones, ratas y perros), disminución del peso corporal fetal, aumentos en malformaciones esqueléticas y defectos cardiovasculares en hembras embarazadas (Yazbeck *et al* 2005; Palmucci y Rusi 2014).

2.2 Antecedentes

En varios países, como Argentina, Bangladesh, Chile, China, la India, México, Tailandia y los Estados Unidos, se han encontrado aguas subterráneas con arsénico (OMS 2004). En la India, en Bengala Occidental en 1983 se identificaron los primeros casos de lesiones causadas por el arsénico en varios pacientes, se presentaron lesiones en la pigmentación de la piel, en la parte superior del tórax; brazos y piernas, y queratosis de las palmas de manos y plantas de los pies. Con el apoyo de la OMS, se analizaron las fuentes de agua utilizadas por los pacientes, y se encontraron concentraciones elevadas de arsénico en el agua de bebida, lo que permitió confirmar el diagnóstico

de morbilidad por arsénico. Y en 1987 se identificaron varios casos en pacientes de Bangladesh (OMS 2006a).

En la India se informó por primera vez del exceso de flúor en el agua subterránea en 1937 en el estado de Andhra Pradesh. En la India, aproximadamente 62 millones de personas, incluyendo 6 millones de niños sufren de fluorosis debido al consumo de agua con altas concentraciones de flúor. Diecisiete estados de la India se han identificado como endémicos de fluorosis (Meenakshi *et al.* 2004).

En China más de 26 millones de personas padecen fluorosis dental debido a las altas concentraciones de fluoruro en el agua de bebida (OMS 2004).

En el año 2000 se detectaron los primeros pozos con elevados niveles de arsénico en la zona de Íscar, Valladolid, España. El agua de estos pozos se utiliza principalmente para el riego de cultivo y consumo humano (Revuelta *et al.* 2003).

Momodu y Anyakora (2010) en Surulere, Nigeria detectaron altas concentraciones de aluminio, cadmio y plomo, en agua subterránea lo que sugiere un riesgo significativo para esta población, dada la toxicidad de los metales.

Karro y Uppin (2013) reportaron que al oeste de Estonia, un sistema acuífero contiene altas concentraciones de boro y fluoruros, y donde la química del agua subterránea presenta HCO_3^- - Cl^- - Na^+ - Ca^{2+} - Mg^{2+} , el agua es alcalina y su contenido de Ca^{2+} es bajo. Los efectos en la salud del boro, así como su comportamiento geoquímico se han estudiado menos en comparación con fluoruro. El boro es un elemento disuelto menor de las aguas subterráneas, donde se asocia a menudo con fluoruros.

En varias regiones de América Latina, la falta o escasez de agua dulce es un problema muy importante que está en constante crecimiento, debido al incremento de la población y las economías en expansión (Bundschuh *et al.* 2010). Reacciones naturales entre el agua y la roca dan lugar a una gran diversidad de minerales en las aguas subterráneas, e imparten propiedades intrínsecas tales como la dureza y suavidad, la salinidad, entre otras. Existe una creciente conciencia pública de las propiedades naturales del agua subterránea, así como la percepción de que el cambio de propiedades de sabor y agua están vinculados con la contaminación del agua (Edmunds *et al.* 2003).

La presencia de arsénico y flúor en el agua subterránea se ha informado ampliamente en América Latina, especialmente en las regiones áridas y semiáridas de México, Argentina y Chile. Desafortunadamente, es común que la presencia de flúor no se considera como un problema, razón por la cual su presencia, incluso no se ha determinado en muchos lugares de América Latina (Alarcón-Herrera *et al.* 2012). En los Andes, la cordillera de América Central y el cinturón volcánico mexicano; la oxidación de minerales de sulfuro es el proceso de movilización primaria de arsénico (Bundschuh *et al.* 2012).

En algunos países de América Latina como Argentina, Chile, El Salvador, México, Nicaragua, Perú y Bolivia, por lo menos cuatro millones de personas beben permanentemente agua con niveles de arsénico que ponen en riesgo su salud. Las concentraciones de arsénico en el agua subterránea presentan niveles que llegan en algunos casos hasta 1 mg/L (Esparza y Medina 1998). La presencia natural de arsénico en aguas superficiales y profundas de América Latina está asociada al vulcanismo terciario y cuaternario desarrollado en la Cordillera de los Andes, proceso que continúa y se muestra en flujos de lava, géiseres, fumarolas, aguas termales y fenómenos geotérmicos relacionados con el vulcanismo, el cual también ejerce influencia en algunas características de estas aguas como son pH alto, baja dureza, moderada salinidad y presencia de boro, flúor, sílice y vanadio (Castro 2006).

Estudios recientes del norte de Chile han demostrado que la población indígena de América Latina pudo haber sufrido arsenicismo hace 7 000 años causado por la alta exposición de arsénico de origen geogénico en agua potable y en los alimentos, sin embargo fue hasta 1913, cuando se describieron los primeros casos de intoxicación humana en la llanura Chaco- Pampeana en Argentina, en relación al agua potable de las aguas subterráneas (Bundschuh *et al.* 2012). En Argentina, se estima que la población expuesta al consumo de agua con contenido de As superiores al nivel aceptable, es de 4×10^6 de habitantes (Corroto *et al.* 2006).

De todos los recursos acuáticos, el agua subterránea es uno de los menos investigados, en comparación con otros cuerpos de agua, principalmente porque se cree que este tipo de agua es “limpia” por la acción filtrante del medio poroso por el cual atraviesa el agua. Actualmente en México el interés por la investigación sobre el agua subterránea se ha incrementado debido a la creciente demanda de esta fuente (Ramírez *et al.* 2009).

En México, el agua subterránea es un recurso vital para el desarrollo de todos los sectores, debido a que en más del 50% de su territorio prevalecen los climas seco y semiseco. La cuantiosa reserva de agua almacenada en los acuíferos regionales, es un recurso valioso que ha propiciado el desarrollo de las zonas áridas y que permite compensar las variaciones estacionales de la precipitación pluvial y de escurrimiento superficial. Dado a la creciente demanda de agua subterránea y a su lenta renovación, en los últimos 40 años la reserva de cerca de 100 acuíferos fue minada por sobreexplotación y se sigue mermando al ritmo actual de unos $5.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ por año. Un grave impacto ecológico fue generado en las primeras décadas de sobreexplotación (1960-1980) mediante agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales, eliminación de vegetación nativa y pérdida de ecosistemas (DOF 2007).

Se ha reportado que más de cinco millones de habitantes en México están crónicamente expuestos a elevadas concentraciones de fluoruros a través del agua para uso y consumo humano (Chacón *et al.* 2011). Frecuentemente se encuentran concentraciones de altos niveles que exceden los límites permisibles de flúor en aguas subterráneas donde la composición geológica del suelo favorece estas concentraciones. El flúor se encuentra de manera natural en acuíferos de varios estados de México, tales como Aguascalientes, Chihuahua, Durango, Jalisco, Guanajuato, San Luis Potosí, Sonora, Zacatecas por lo que son estados vulnerables a la exposición de altas concentraciones de flúor (Chávez 2010). Aunque el flúor entra en el cuerpo a través de alimentos, agua, exposición industrial, medicamentos, cosméticos, etc., el agua potable es el principal contribuyente (75-90% de la ingesta diaria) (Meenakshi *et al.* 2004).

En el caso particular de México, existe el caso crónico endémico de hidroarsenosis e hidrofluorosis en la cuenca cerrada de la Región Lagunera, en los estados de Coahuila y Durango (Ortega 2009). En 1958, se identificaron por primera vez altos niveles de arsénico como causa de efectos adversos sobre la salud en “la comarca Lagunera”, en el norte de México (Armienta y Segovia 2008).

En 1996 se informó que en Acámbaro, Guanajuato, centro de México, existían concentraciones de arsénico de hasta 16 veces la norma de agua potable de México en el agua de pozo. También se reportó que el sistema acuífero de Salamanca estaba siendo afectado con arsénico, plomo y benceno provenientes de distintas fuentes de contaminación (Armienta y Segovia 2008).

En 1991 en un estudio sobre la calidad del agua subterránea de Valle del Río Turbio en el estado de Guanajuato se reportó que estaba siendo afectada por la incorporación de compuestos de cromo al sistema acuífero con concentraciones de hasta 50mg/L de este metal (Rodríguez y Armienta 1991).

Existe una relación del boro con áreas de vulcanismo en México considerando que se han reconocido unas 2 332 manifestaciones geotérmicas, de las cuales aproximadamente 71 se localizan en el Estado de Michoacán. En investigaciones previas sobre calidad del agua, en el río Duero; en el Estado de Michoacán, se ha encontrado que el boro se adiciona a las aguas superficiales del río Duero a través de las descargas de aguas residuales en la red hidrográfica, en las aguas subterráneas se pueden encontrar altas concentraciones de boro de origen geotérmico (Velázquez *et al.* 2011).

La cuenca de Cuitzeo es una unidad geológica con una superficie de 4 026 km² en la cual quedan comprendidos parcial o totalmente los territorios de 23 municipios del estado de Michoacán, entre ellos Ciudad Hidalgo (Buenrostro e Israde, 2003). El lago de Cuitzeo forma parte de una fosa tectónica por distensión cuyo material de rellenos es de tipo granular, lo que produce que parte del agua almacenada se infiltre y sea aprovechada por todas las perforaciones someras que se encuentran sobre las riveras del lago, deduciéndose su relación con el campo geotérmico de los Azufres (Israde y Garduño, 1999, Páez 2008).

El sistema geotérmico los Azufres Michoacán, ubicado en el centro de la República Mexicana, se encuentra a 80 km al este de la Ciudad de Morelia y 16 km al noroeste de Ciudad Hidalgo y dentro de lo que se conoce con el nombre de Cinturón volcánico Mexicano (Martínez y Axelsson 2011), ahí se localiza la segunda planta geotérmica más importante del país y donde en el año 2003 se tenían en operación 29 pozos (con profundidades de entre 600 y 3500 m) y otros 82 pozos perforados. La exploración, desarrollo y explotación de los recursos geotérmicos puede tener un impacto significativo en el medio ambiente que rodea el recurso. Los principales aspectos ambientales relacionados con la explotación de energía geotérmica son emisiones gaseosas y aguas de desecho. Una vez que los fluidos geotérmicos han sido utilizados con cualquier fin deben tratarse o reinyectarse al yacimiento ya son una fuente importante de contaminación. Estos fluidos pueden contener en general sustancias peligrosas para la salud de plantas y animales como (Li, As, B, Hg,

Cu, Cd, F, Na, K, Cl, Al, etc.). En los Azufres toda el agua utilizada se regresa al yacimiento por medio de pozos inyectoros (Iglesias *et al.* 2005).

Los Azufres, Michoacán, muestran una contaminación geotérmica natural de arsénico y flúor (5.1 a 24 mg/L y 17.9 mg/L), respectivamente. Además las concentraciones en Los Azufres se han incrementado desde 1982, después de la creación de la central eléctrica. Un estudio mostró mayores niveles de arsénico (de 2 a 32 mg/L) y flúor (10 a 90 mg/L) en el agua subterránea de Los Azufres. Aunque el agua se destine a la industria, la evaporación genera mayor concentración de arsénico y flúor en la zona (Alarcón-Herrera *et al.* 2012).

Las enfermedades diarreicas derivadas de la contaminación del agua, representaron 1.8 millones de muertes en 2002. Esto coloca a las enfermedades diarreicas como la sexta causa más alta de mortalidad y el tercero en la lista de morbilidad, se estima que el 3.7% de la carga de morbilidad mundial se deriva del agua (WHO 2006).

En los años 70's en Estados Unidos se observó que el uso de agua subterránea no tratada provocó enfermedades, lo que confirmó la posibilidad de su contaminación por microorganismos patógenos. En México, el interés en las investigaciones de la microbiología del agua subterránea se ha incrementado por la creciente demanda de esta fuente (Ramírez *et al.* 2009).

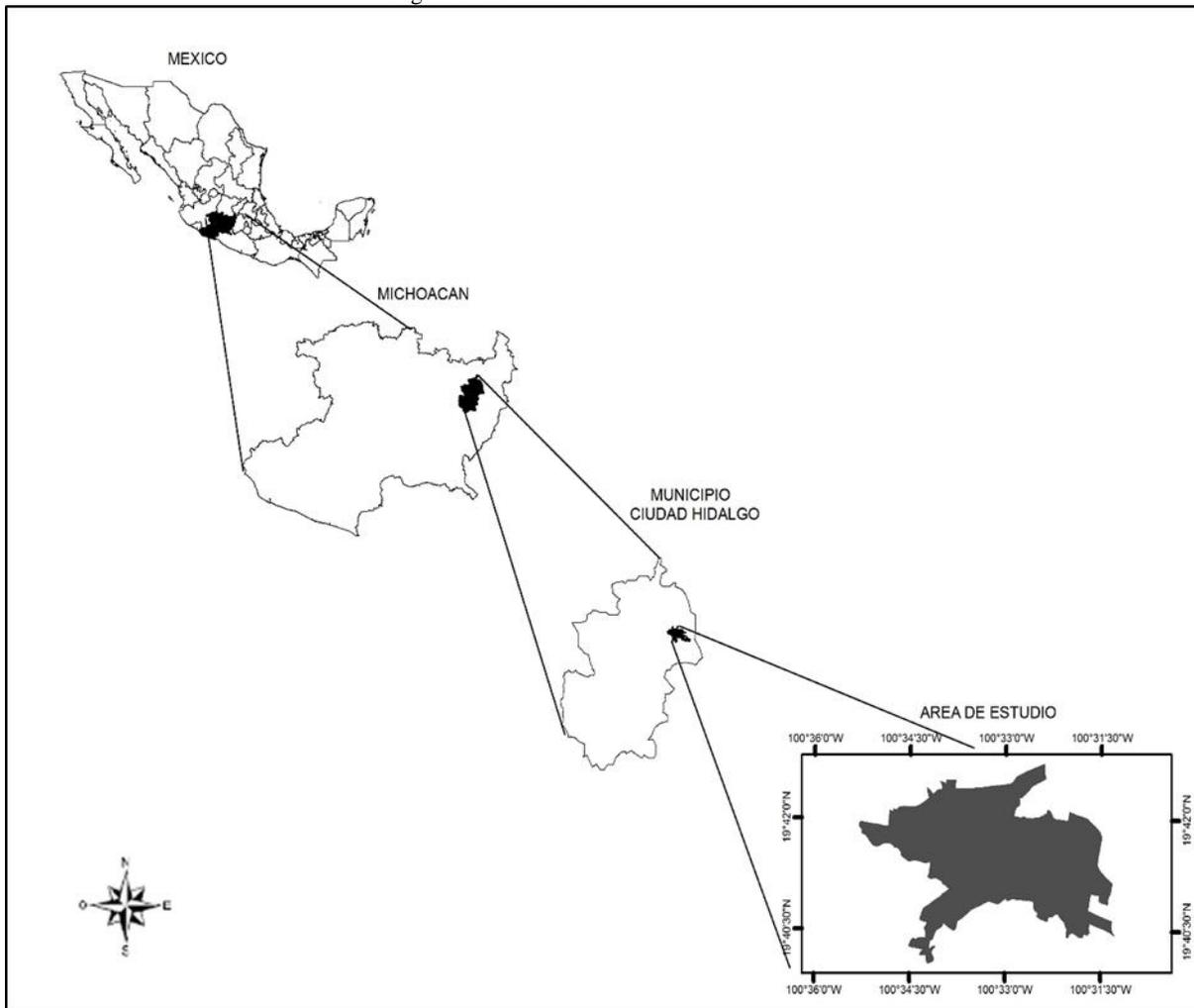
Al norte de Mérida, Yucatán en las comunidades rurales el agua subterránea presenta contaminación con coliformes principalmente *Escherichia*, *Shigella* y *Salmonella* y otros microorganismos patógenos, lo cual pone en peligro a la población rural que utiliza el agua de esos terrenos kársticos (Pacheco *et al.* 2000).

2.3. Descripción del área de estudio

2.3.1 Ubicación

Ciudad Hidalgo es la cabecera municipal del municipio de Hidalgo, que pertenece a la Región IV Oriente del Estado de Michoacán, se ubica al noreste del Estado, en las coordenadas $19^{\circ} 42' N$ y $100^{\circ} 33' W$, con una altura de 2 040 msnm. Al norte limita con Zinapécuaro y Maravatío, al oeste con Tzitzio, Zinapécuaro y Queréndaro, al este con Irimbo, Maravatío, Tuxpan y Jungapeo, al sur con Jungapeo, Tuzantla y Titzio. Presenta una distancia a la capital del Estado (Morelia) de 104 km. Cuenta una superficie de 1 063.06 km² y representa un 1.95% del total del Estado, cuenta con 269 localidades y una población total de 110 311 habitantes (figura 1) (INEGI 2009; INAFED 2010).

Figura 1. Localización de la zona de estudio.



Fuente (Elaboración propia)

2.3.2 Fisiografía

Provincia. Sierra Madre del Sur (53.42%) y Eje Neovolcánico (46.58%).

Subprovincia. Depresión del Balsas (53.42%) y Mil Cumbres (46.58%).

Sistemas de topoformas. Sierra alta compleja (49.85%), Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados con mesetas (41.55%), Sierra volcánica con estrato volcanes aislados (5.03%) y Valle ramificado con lomerío (3.57%) (INEGI 2009).

2.3.3 Orografía

El relieve está conformado por el sistema volcánico transversal, la sierra de Mil Cumbres y por los cerros; Del Fraile, Azul, San Andrés, Ventero, Guangoche y Blanco (INAFED 2010).

2.3.4 Hidrografía, clima y ecosistemas

El municipio cuenta con los ríos de Agostitlán, Chaparro, Zarco, y Grande, así como las presas de Sabaneta, Pucuat y Mata de Pinos. De acuerdo a la clasificación de Romero (1974) el municipio presenta un clima templado con lluvias en verano, y al norte con lluvias todo el año. Tiene una precipitación pluvial anual de 1 810.2 mm y temperaturas entre 4.1 a 24 °C (INEGI 2009; INAFED 2010).

Sus principales ecosistemas son bosque mixto, con aile, encino y sauce, así como bosque de coníferas, con pino. La fauna está conformada principalmente por coyote, tlacuache, zorrillo, zorro, liebre, torcaz, conejo, mapache, armadillo y pato (INAFED 2010).

2.3.5 Edafología

Suelo dominante: andosol (56.96%), luvisol (29.05%), regosol (6.16%), leptosol (3.07%), vertisol (1.06%) y feozem (0.94%) (INEGI 2009).

En el municipio existen yacimientos minerales no metálicos de caliza, arcilla, arcilla caolinítica, caolín, sub bentonita, azufre y tierra fuiler (INAFED 2010).

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Selección de los sitios de estudio

Se seleccionaron 10 sitios de muestreo (figura 2 y tabla 5) representativos del área de estudio en mención.

Figura 2. Ubicación geográfica de los sitios de estudio.

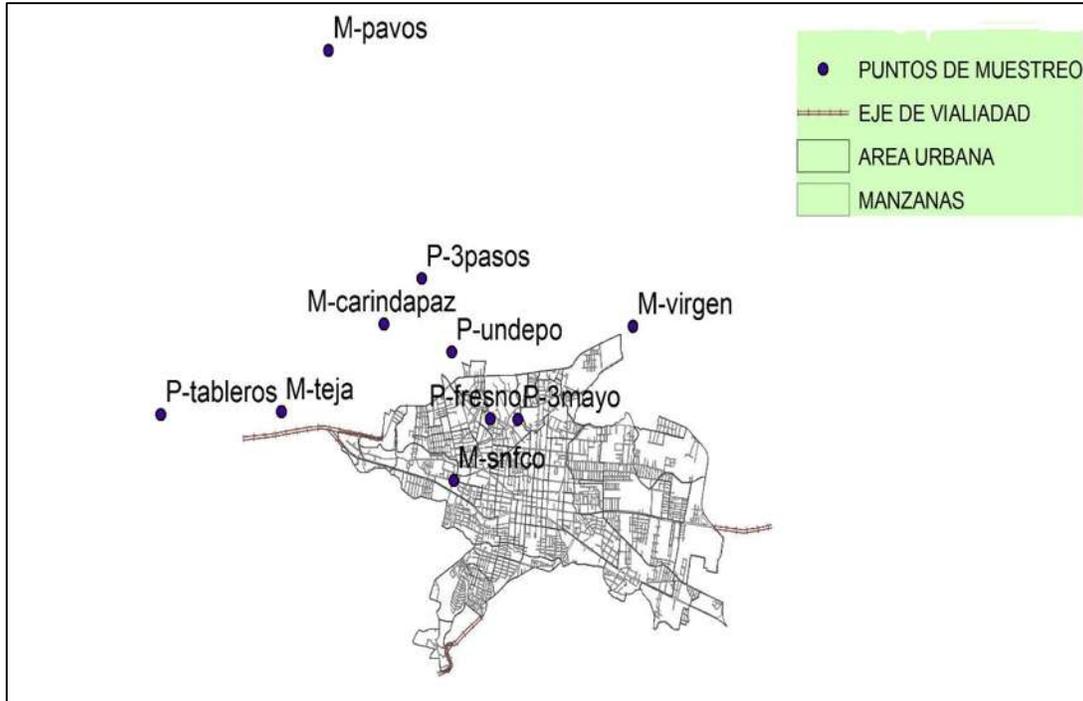


Tabla 5. Localización de los sitios de muestreo.

SITIO	NOMBRE	COORDENADAS	ALTURA
P-3mayo	Pozo profundo 3 de Mayo	N 19°42'03.8" W 100°33'26.9"	2089 msnv P 6m
P-fresno	Pozo profundo El Fresno	N 19°42'03.9" W 100°32'43.9"	2067 msnv P 5.1m
M-virgen	Manantial La Virgen	N 19°42'48.6" W 100°32'16.1"	2030 msnv P 7.5m
P-undepo	Pozo Profundo Unidad Deportiva	N 19°40'35.3" W 100°34'08.0"	2116 msnv P 6.4m
M-snfco	Manantiales San Francisco	N 19°41'34.4" W 100°34'06.0"	2076 msnv P 5.4m
P-tableros	Noria filtrante Tableros	N 19°42'04.1" W 100°37'07.1"	2094 msnv P 5.7m

M-teja	Manantial La Teja	N 19°42'06.2" W 100°35'52.7"	2092 msnv P 10 m
M-pavos	Manantiales Los Pavos	N 19°44'57.9" W 100°35'25.3"	2085 msnv P 10.5m
M-carindapaz	Manantiales Carindapaz	N 19°42'48.3" W 100°34'49.9"	2082 msnv P 6.4m
P-3pasos	Pozo Profundo Los Tres Pasos	N 19°43'10.1" W 100°34'26.7"	2265 msnv P 5.7m

msnv= metros sobre el nivel del mar.

3.2 Colecta de muestras

Se realizaron cuatro colectas de muestras en los meses de marzo, julio, octubre del 2013 y febrero del 2014 de acuerdo con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002 y lo indicado en el manual APHA-AWWA-WPCF (1995) para cada uno de los parámetros indicados.

Muestreo para parámetros fisicoquímicos. El muestreo se realizó en botellas de polietileno de 1L que se llenaron tratando de minimizar la presencia de aire con el objeto de evitar cambios químicos. Se marcó cada recipiente con la fecha y el sitio de muestreo y se siguió el procedimiento indicado en la normatividad mexicana (NOM-230-SSA1-2002). En cada sitio se tomaron 2L de muestra que se depositaron en una hielera para mantener una temperatura de 4°C durante su traslado al laboratorio. La temperatura, la conductividad eléctrica, el pH y el oxígeno disuelto fueron medidos *in situ* (APHA-AWWA-WPCF 1995).

Muestreo para metales pesados y arsénico. Se utilizaron recipientes de polietileno de 120 mL previamente descontaminados de la siguiente manera: cada frasco con su tapa y contratapa se introdujeron en una solución de HNO₃ al 10% durante una semana. Posteriormente se cambiaron a una solución de HNO₃ al 1% durante una semana. Después se enjuagaron tres veces y se llenaron con agua desionizada. En el lugar de muestreo 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. Todas las botellas se marcaron con la fecha y el sitio de muestreo, se indicó de manera correcta el blanco. Las muestras se depositaron en una hielera para su traslado al laboratorio (Alfaro *et al.*, 2002; APHA-AWWA-WPCF, 1995) (Tabla 6).

Muestreo para boro. Se colectaron 100mL de muestra en un envase de polietileno, se preservó la muestra con HNO₃ hasta pH < 2, Las muestras fueron marcadas con la fecha y sitio de muestreo. Se depositaron en una hielera a 4°C hasta su análisis en el laboratorio (NMX-AA-063-SCFI-2001).

Muestreo para coliformes fecales. Se tomaron 100 mL de muestra de cada uno de los sitios de muestreo, en bolsas microbiológicas estériles con Na₂S₂O₃ con el fin de inhibir la acción del cloro que pudiera estar presente en la muestra, las bolsas se manejaron con precaución para evitar cualquier tipo de contaminación que pudiera afectar los resultados, en los sitios de muestreo que contaban con bomba se dejó fluir el agua 5 minutos libremente antes de tomar la muestra. Los sitios que no contaban con sistema de bombeo, se tomó la muestra directamente del pozo utilizando bolsa estéril con lastre. Se tomaron las precauciones debidas para mantener al máximo las condiciones de asepsia. Todas las bolsas se marcaron con la fecha y el sitio de muestreo. Las muestras se conservaron en una hielera a 4°C, el examen de las muestras se realizó lo más pronto posible para evitar proliferación o muerte de las bacterias (NMX-AA-102-SCFI-2006).

3.3 Análisis de parámetros

En este trabajo se determinaron los parámetros fisicoquímicos tanto *in situ* (temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) como en laboratorio (dureza y alcalinidad totales, DBO₅, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, F⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, metales pesados, As y B). Las técnicas de análisis que se utilizaron están basadas en la Normatividad Mexicana (DOF 1981; DOF 1981a; DOF 1987; DOF 2000; DOF 2001; DOF 2001a; DOF 2001b; DOF 2001d; DOF 2001e; DOF 2001f) y en el manual APHA-AWWA-WPCF (1995). Las técnicas para la medición de temperatura, conductividad eléctrica, OD y pH *in situ* están basadas en el manual APHA-AWWA-WPCF (1995). En la determinación de los parámetros fisicoquímicos que se evaluaron en el laboratorio se utilizaron técnicas analíticas de potenciometría, volumetría y espectrometría de absorción atómica.

La determinación de arsénico y de los metales pesados se realizó mediante ICP-MS (Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo), debido a que las concentraciones presentes en las muestras se encontraban debajo del límite inferior de detección del Espectrofotómetro de Absorción Atómica, equipo recomendado por la normatividad mexicana para la determinación de metales pesados y arsénico (DOF 2001c).

El análisis de boro se llevó a cabo mediante espectrofotometría UV-visible (DOF 2001). Los organismos coliformes se determinaron mediante el método de filtración en membrana (NMX-AA-102-SCFI-2006).

El equipo que se utilizó en las pruebas de campo y de laboratorio se indica en la Tabla 6. El material que se utilizó para realizar los análisis fue el de uso común en el laboratorio.

Tabla 6. Equipo requerido para realizar las determinaciones de campo y de laboratorio.

PARÁMETRO	EQUIPO
Fisicoquímicos (<i>in situ</i>)	Termómetro de inmersión (Branan) Potenciómetro (Corning Checkmate II)
Fisicoquímicos (laboratorio)	Potenciómetro (Corning Checkmate II) Espectrómetro de absorción atómica (PerkinElmer AAnalyst 200)
Arsénico	Espectrómetro de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo.
Boro	Espectrofotómetro UV-Visible (Genesys)
Flúor (F ⁻)	Fluorómetro
Coliformes fecales	Incubadora, autoclave, potenciómetro (Corning Checkmate II)

3.4 Balance iónico o condición de electroneutralidad

El balance iónico o condición de electroneutralidad permite comprobar la exactitud de los resultados de los análisis químicos mediante un cálculo aritmético, el cálculo se basa en la obtención del error porcentual de la neutralidad eléctrica de las muestras de agua de los principales cationes y aniones determinados. El error que resulta de dicho balance se expresa por la diferencia de iones (Ecuación 1). Si el error es negativo, hay exceso de aniones y si es positivo exceso de cationes. Se considera aceptable un error menor o igual al 10% (Alfaro 2010, Peña *et al.* 2012).

$$\% \text{ Electroneutralidad} = \frac{\Sigma \text{ Cationes} - \Sigma \text{ Aniones}}{\Sigma \text{ Cationes} + \Sigma \text{ Aniones}} \times 100$$

Ecuación 1

3.5 Tipo de agua en la zona de estudio

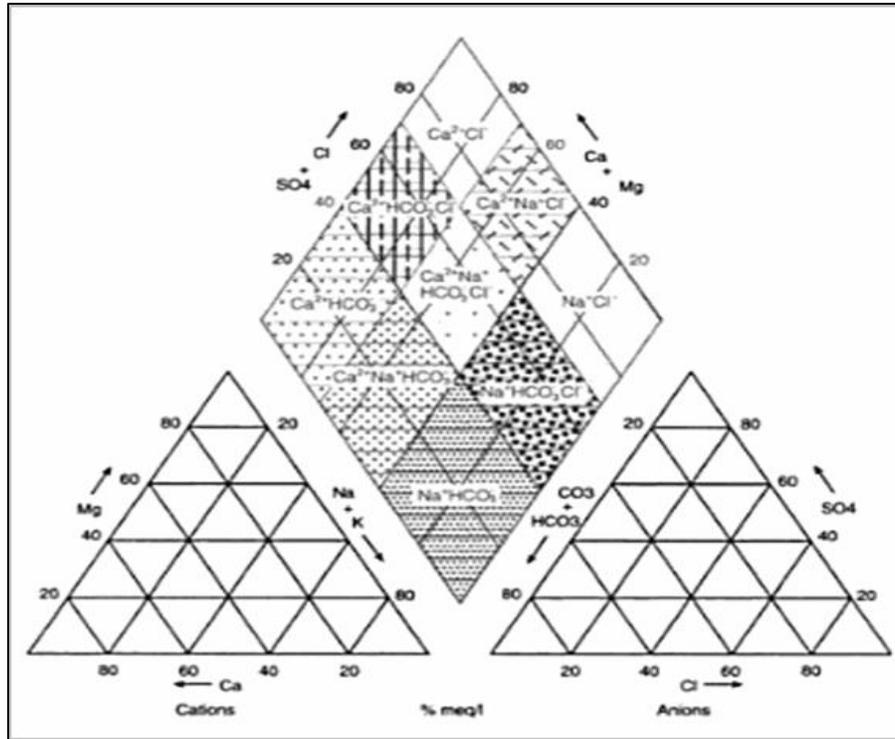
La composición química del agua subterránea es el resultado de continuos procesos de interacción entre el agua de precipitación que se infiltra en el terreno y la litología por donde circula. Durante el trayecto del flujo subterráneo ocurren procesos hidrogeoquímicos como el intercambio iónico, reacciones ácido-base, procesos oxidación-reducción, disolución, precipitación, posibles mezclas de aguas, reducción bacteriana y degradación (Deutsch 1997; Morán *et al.* 2013).

De acuerdo con la secuencia de Chevotareb, las aguas subterráneas de reciente infiltración comienzan siendo, según la condición de la naturaleza del medio sólido que determina la solubilidad y abundancia de elementos químicos, y el tiempo de reacción, en términos generales, según la concentración de aniones; bicarbonatadas, luego sulfatadas y finalmente cloruradas, para los cationes; cálcicas, magnésicas y después sódicas, después de un largo tiempo de residencia, y por consecuencia del contacto del agua infiltrada con la roca, la composición de los iones se invierte (Arango *et al.* 2008; Peña *et al.* 2012).

La gran variedad de la composición química del agua y la búsqueda del entendimiento de la interacción entre el agua subterránea y los materiales rocosos que conforman el acuífero han generado diferentes técnicas para reportar los componentes químicos del agua (Peña *et al.* 2012). La composición mayor de los iones presentes en el agua subterránea se utiliza para clasificar las aguas en diversos tipos, se basa en la concentración de cationes y aniones dominantes. Para representarlo de manera gráfica se utilizan los diagramas de Piper o diagramas trilineales. Este tipo de diagramas cualitativos permiten identificar el agua presente en familias de agua o facies hidrogeoquímicas, así como establecer la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea (Deutsch 1997; Morán *et al.* 2013).

La figura 3, muestra la forma básica del trazado del diagrama trilineal para analizar el agua y proyecta los distintos tipos de agua de acuerdo a las concentraciones de cationes y aniones mayoritarios.

Figura 3. Diagrama de Piper de los tipos de agua. (Deutsch 1997)



3.6 Índice de Calidad del Agua (ICA)

El ICA es un instrumento matemático que se utiliza para integrar y transformar ciertos valores en un solo número, éste índice se emplea para evaluar integralmente la calidad de diversos cuerpos de agua, se basa en el uso de algunos parámetros fisicoquímicos y biológicos (Olguín *et al.* 2010). A cada uno de los parámetros se le asigna un peso (w_i) de acuerdo a su importancia relativa en la calidad general de agua potable (tabla 7).

En este trabajo se utilizaron trece parámetros fisicoquímicos para el cálculo del ICA (pH, oxígeno disuelto, dureza total, conductividad eléctrica, alcalinidad total, sólidos disueltos totales, calcio, magnesio, cloruros, fluoruros, nitratos, hierro y sulfatos), estos parámetros fueron obtenidos en un año de muestreo (cuatro campañas de muestreo ya descritas y diez sitios de estudio).

Tabla 7. Peso de parámetros

Parámetro	Peso (w_i)	Peso relativo (W_i)
pH	4.00	0.19
Oxígeno disuelto	3.00	0.19
Dureza total	2.00	0.15

Se requieren tres pasos para la determinación del ICA (Ramakrishnaiah C.R. *et al.* 2009; Patil V.T. y Patil P.R. 2013). Como primer

Conductividad eléctrica	4.00	0.0754717	paso se asigna el peso (w_i) de acuerdo a la importancia de cada uno de los parámetros con un valor de 1 a 5, en este caso se considera asignar el valor más alto de 5.0 al NO_3^- y el valor mínimo de 1.0 se le asigna al Mg, por ser el parámetro que no se considera en sí perjudicial, las ponderaciones de los demás parámetros se asignan de acuerdo a la importancia relativa en el
Alcalinidad total	3.00	0.0754717	
Sólidos disueltos totales	4.00	0.0754717	
Ca^{2+}	2.00	0.03773585	
Mg^{2+}	1.00	0.03773585	
Cl^-	3.00	0.03773585	
F^-	4.00	0.03773585	
NO_3^-	5.00	0.03773585	
SO_4^{2-}	4.00	0.01886792	
Fe	4.00	0.01886792	
Σ	43	1.00	

agua potable (Patil V.T. y Patil P.R. 2013). Como segundo paso se calcula el peso relativo (W_i) (tabla 7) utilizando la ecuación 2;

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Ecuación 2

Donde:

w_i : peso asignado de acuerdo a la importancia relativa del parámetro.

W_i : peso relativo

n : número de parámetros

El tercer paso para el cálculo del ICA es la obtención de una escala de calificación de calidad (q_i) para cada uno de los parámetros, el valor se obtiene mediante la ecuación 3.

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100$$

Ecuación 3

Donde:

q_i = calificación de calidad

C_i = concentración del parámetro obtenido en la muestra

S_i = es el estándar o límite permisible para cada uno de los parámetros asignado por las normas y/o guías de agua potable

Por último se calcula para cada parámetro el subíndice (*SIi*) de cada uno de los parámetros utilizando la ecuación 4.

$$SIi = Wi \times qi$$

Ecuación 4

Y para determinar finalmente el índice de calidad del agua se utiliza la siguiente sumatoria (ecuación 5);

$$ICA = \sum SIi$$

Ecuación 5

De acuerdo al valor obtenido en el cálculo del índice de calidad del agua (ICA), la calidad del agua es clasificada en cinco tipos (tabla 8).

Tabla 8. Clasificación del valor del índice de calidad del agua.

Valor del ICA	Calidad del Agua
<50	Excelente
50-100	Buena calidad
100-200	Mala calidad
200-300	Muy mala calidad
>300	Agua no potable

3.7 Análisis estadístico multivariado

Al realizar una investigación experimental de tipo cuantitativo es posible se generen múltiples mediciones de un parámetro, y estas mediciones por lo general están sujetas a error. El análisis estadístico se utiliza para resumir estas observaciones mediante la estimación de la media, lo que proporciona una estimación de la media verdadera (Peters 2001).

El análisis de varianza (ANOVA) se utiliza para trabajar con la prueba de medias poblacionales, donde se asumen *K* muestras de *K* poblaciones. El análisis de varianza es un procedimiento para probar la homogeneidad de un conjunto de medias. Sin embargo, cuando se observa que no todas las medias son iguales, no se sabe cuáles lo son y cuales sí dentro de un conjunto de datos. Para probar la comparación de medias se requiere de un intervalo de confianza. La prueba de Tukey permite la formación de intervalos de confianza del 100% simultáneo para todas las comparaciones. (Walpole y Myers 1992).

El análisis de correlación intenta medir la fuerza de la relación entre dos variables por medio de un número conocido como coeficiente de correlación. La medida ρ (coeficiente de correlación poblacional) de asociación lineal entre dos variables X y Y se estima con el coeficiente de correlación muestral r .

Si el coeficiente de correlación es igual o cercano a 1 se considera una relación lineal perfecta positiva, por el contrario si el valor es igual o cercano a -1 se tiene una relación lineal perfecta negativa, y los valores cercanos a cero indican poca o ninguna correlación (Walpole y Myers 1992).

Los resultados del análisis de correlación se representan mediante la matriz de correlación. El análisis de componentes principales (ACP) es un análisis que sirve para reducir el número de variables a un número menor, con datos en componentes que representan la mayor parte de la variación en los datos originales, simplificando la interpretación de las múltiples variables. El ACP se basa en el análisis de la matriz de correlación y permite dar forma a los conjuntos de variables que representan el mismo origen geológico y/o fuente geoquímica (Sappa *et al.* 2014).

El análisis Clúster es un método para la colocación de objetos en grupos más o menos homogéneos, de manera que la relación entre los grupos se revela (Nagaraju *et al.* 2014). Este método se utiliza para detectar patrones y clasificar todos los casos en grupos pequeños basados en similitudes dentro de un grupo mayor y las diferencias entre grupos. Por lo tanto, dependiendo de la magnitud en la asociación permite clasificar a los grupos como una asociación fuerte (homogeneidad) entre los casos en el mismo grupo y débil (heterogeneidad) entre los diferentes grupos. Se muestra gráficamente como un diagrama de árbol (dendrograma) (Shyu *et al.* 2011).

Hay dos tipos de análisis clúster: el modo R se utiliza para clasificar los parámetros en grupos basados en su similitud con otro grupo y el modo Q es para clasificar los parámetros en grupos basados en su diferencia con los demás (Nagaraju *et al.* 2014; Subyani y Al Ahmadi 2009).

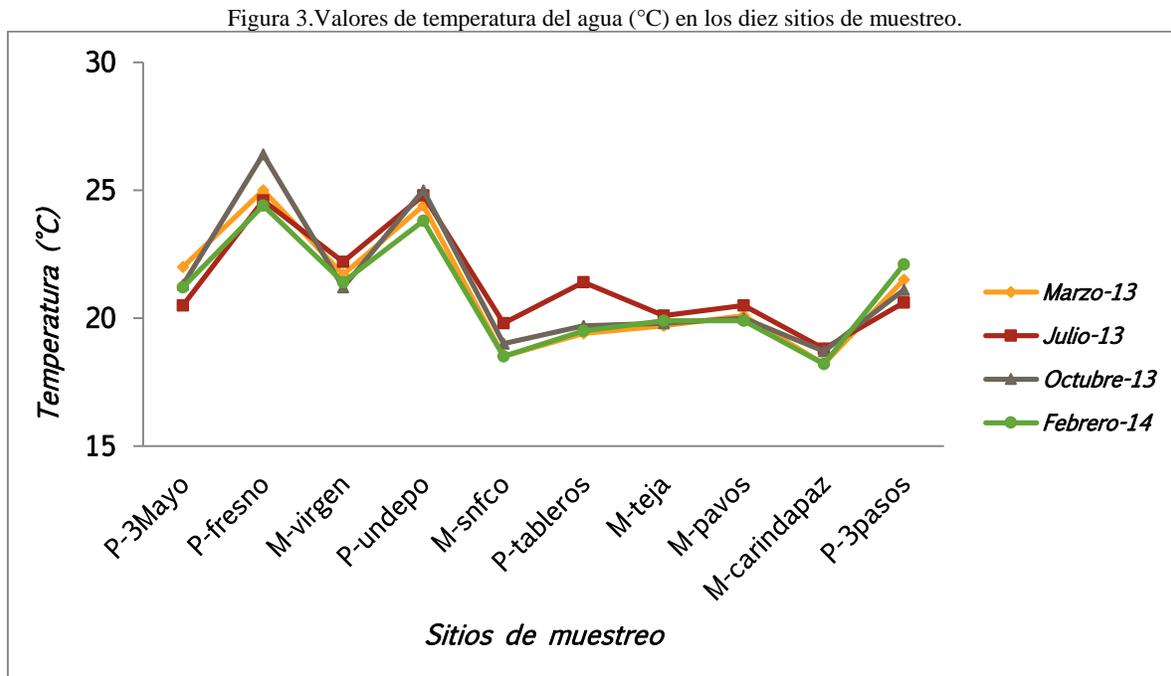
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de parámetros

Se realizaron cuatro colectas de muestra en los meses de; marzo, julio, octubre y febrero dentro del periodo 2013-2014 en los diez sitios ya descritos, para los cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

4.1.1 Parámetros in situ

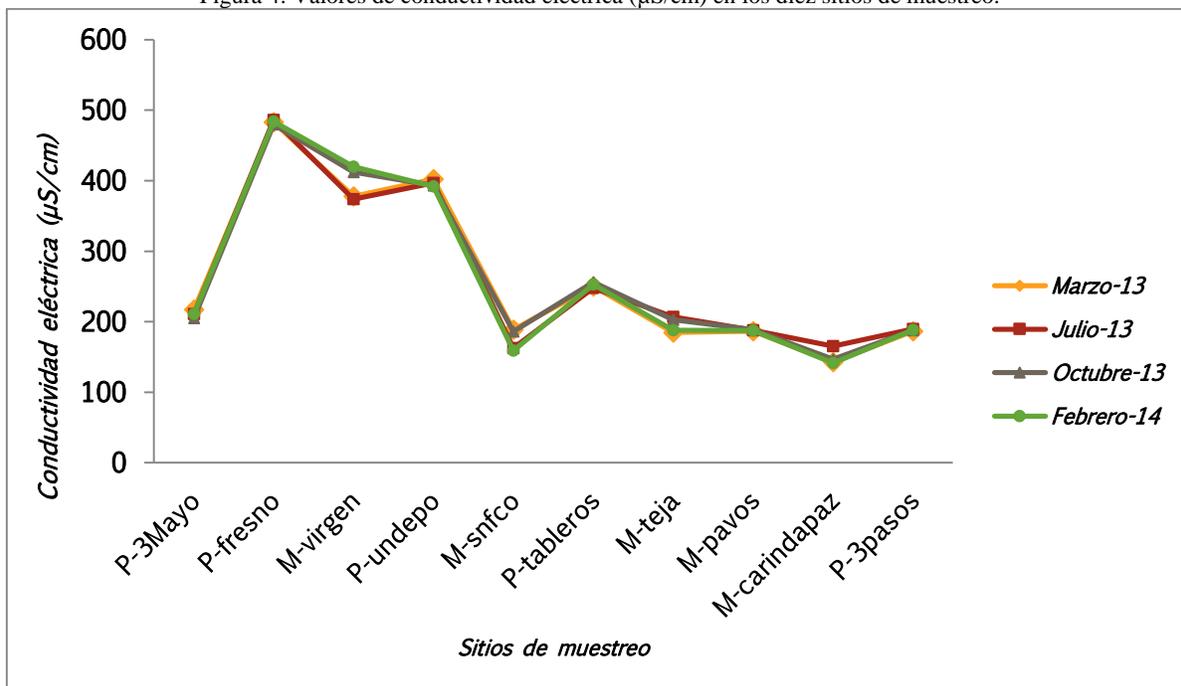
La tabla 11 (Anexo 1) muestra los resultados obtenidos *in situ* de la campaña de muestreos realizados y se representan en las figuras 3 a 6.



Los datos obtenidos *in situ* muestran durante los muestreos realizados que la temperatura del agua presenta una variación aproximada de ± 1 °C en ocho sitios, para los sitios P-fresno y P-tableros hay variación aproximada de ± 2 °C, el sitio P-fresno presenta la temperatura más alta entre sitios, seguido de P-undepo, la temperatura más baja se muestra en el sitio M-carindapaz. No se observa variación significativa entre muestreos. De manera general se observa que la temperatura más alta se midió en el segundo muestreo (Julio-13) para la mayoría de los sitios, excepto para P-3mayo, P-fresno y P-undepo donde la temperatura máxima alcanzada es en Octubre-13 y Marzo-13 respectivamente.

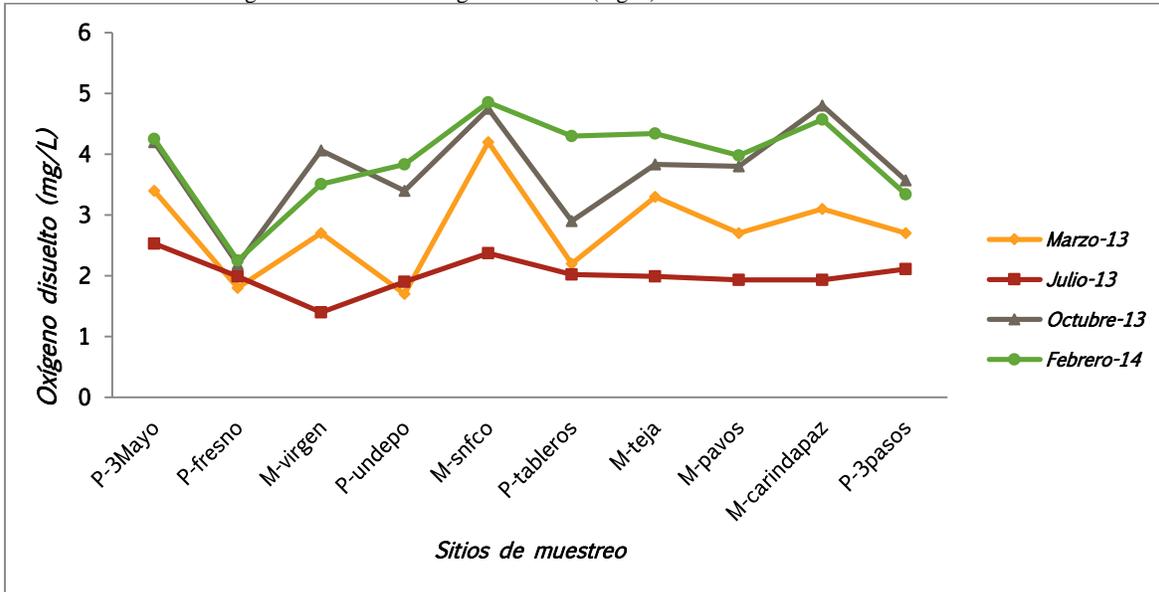
La conductividad eléctrica medida en cada uno de los sitios se mantiene similar entre muestreos los valores más altos para este parámetro se observan en el sitio P-fresno y los más bajos en el sitio M-carindapaz. Fagundo *et al.* (2007) sugiere que existe una relación tipo lineal entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica, lo que se observa en los resultados obtenidos en el presente trabajo, en el sitio P-fresno se presentan los valores de conductividad eléctrica máximos encontrados y las concentraciones de aniones y cationes mayoritarios, por el contrario las concentraciones de conductividad eléctrica menores se reportan en el sitio M-carindapaz así como las concentraciones menores de iones mayoritarios (Figura 4, Tabla 14).

Figura 4. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los diez sitios de muestreo.



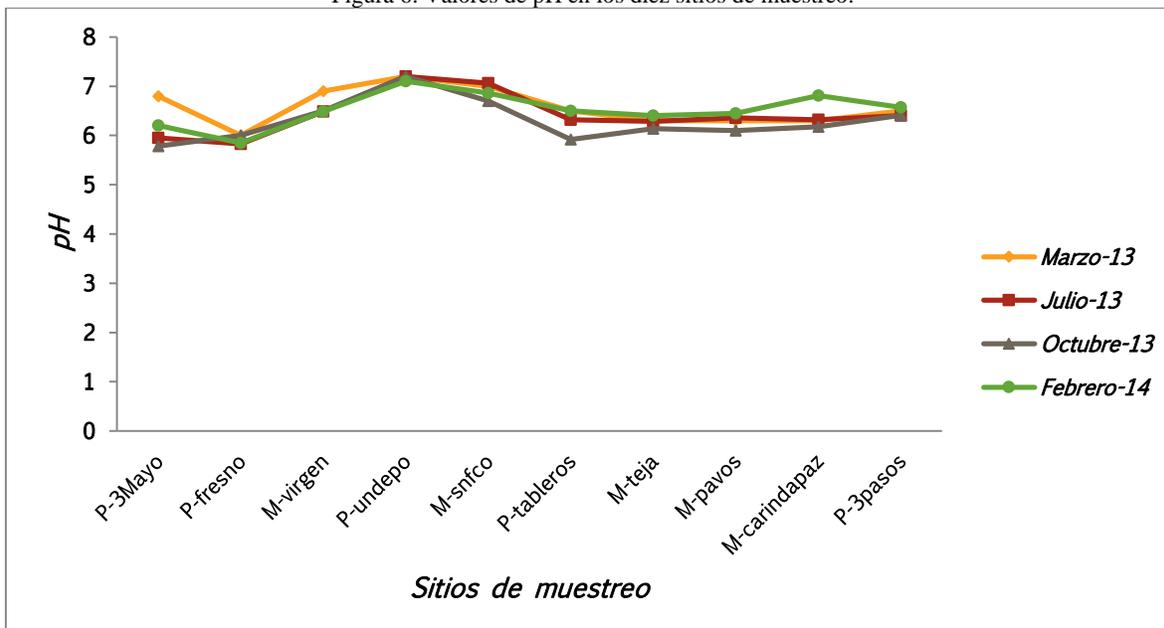
Para el oxígeno disuelto las concentraciones máximas encontradas se observan de manera general para todos los sitios durante Febrero-14, por lo tanto se puede observar la relación inversa que existe entre el oxígeno disuelto (figura 5) y la temperatura (figura 3), durante los dos primeros muestreos, puesto que a mayor temperatura menor oxígeno disuelto, ya que la temperatura afecta la solubilidad de los gases en el agua y a menor temperatura mayor oxígeno disuelto.

Figura 5. Valores de oxígeno disuelto (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



En cuanto al pH se mantuvo sin variación significativa entre muestreos, los valores indican que el agua de la mayoría de los sitios es ligeramente ácida, a excepción de los sitios P-undepo y M-snfco que están cercanos a la neutralidad. Sin embargo algunos sitios presentan valores inferiores de pH en al menos en un muestreo de acuerdo a lo recomendado por la normatividad mexicana.

Figura 6. Valores de pH en los diez sitios de muestreo.

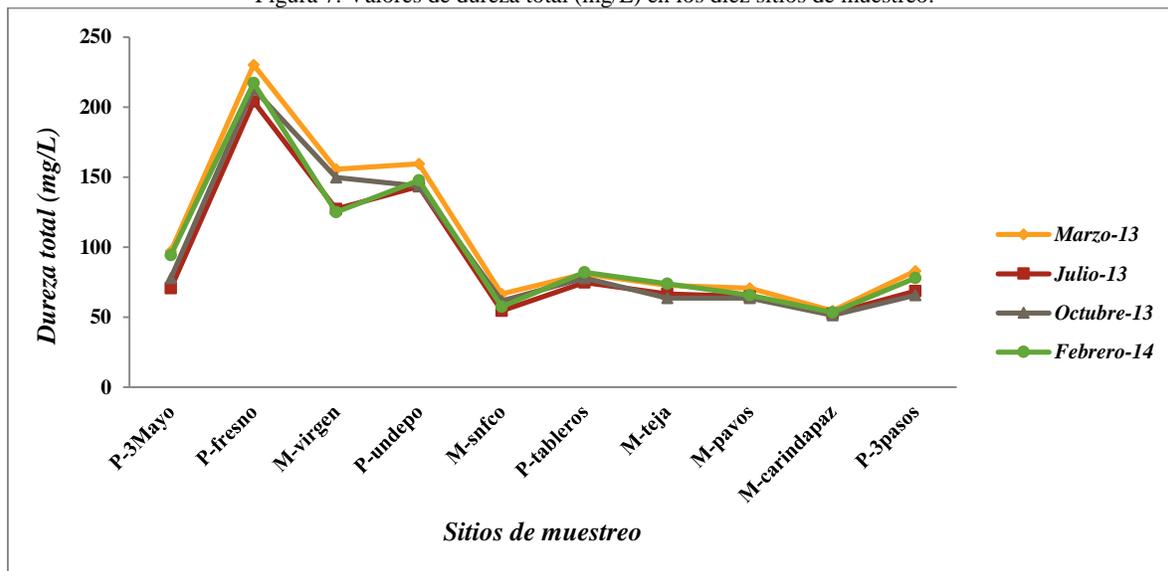


4.1.2 Parámetros fisicoquímicos

La determinación de los parámetros fisicoquímicos permite obtener información sobre la interacción entre el fluido y la matriz sólida, y puede aportar información sobre el transporte de contaminantes en el agua subterránea. En la tabla 12 (Anexo 2) figuras 7 a 12 se pueden apreciar los resultados obtenidos para estos parámetros. Los resultados obtenidos para estos parámetros no sobrepasan los límites establecidos en la normatividad correspondiente, lo que puede indicar que el agua de todos los sitios tiene una buena calidad fisicoquímica para su uso como potable.

La dureza total se basa en la determinación de sales de calcio y magnesio principalmente (DOF 2001f) (tabla 12) lo cual a su vez se puede relacionar con la conductividad eléctrica, se observa para ambos parámetros valores bajos respecto al límite máximo permisible (DOF 1994), que van de 141.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 486 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad eléctrica, los datos obtenidos de dureza total van desde 51.25 mg/L a 230.20 mg/L en el sitio M-carindapaz para el tercer muestreo y en el sitio P-fresno durante el primer muestreo respectivamente.

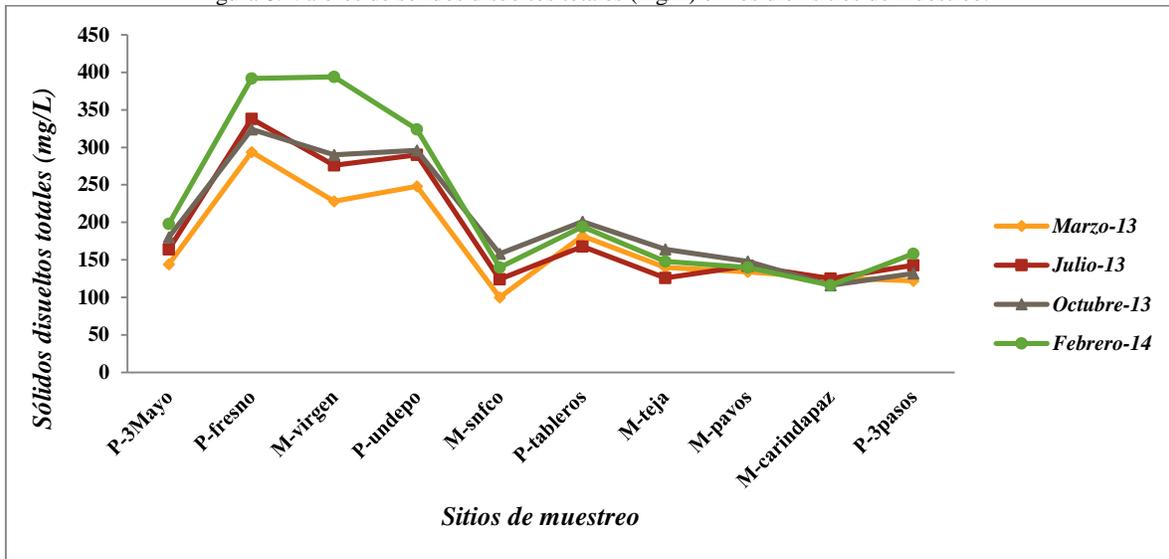
Figura 7. Valores de dureza total (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



En cuanto a los sólidos disueltos totales no se superan los límites máximos establecidos por la normatividad correspondiente, se observan valores bajos respecto al límite máximo encontrándose un valor mínimo de 100 mg/L para el sitio M-snfco durante el primer muestreo y el valor más alto se reporta en el sitio P-fresno durante el cuarto muestreo con un valor de 392 mg/L, en éste sitio se observan los valores más altos en cuanto a sólidos disueltos en los muestreos y el sitio M-snfco

presenta los valores más bajos (Figura 8). La OMS menciona que las aguas con concentraciones menores a 600 mg/L de sólidos disueltos son buenas para consumo humano (WHO 2011).

Figura 8. Valores de sólidos disueltos totales (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



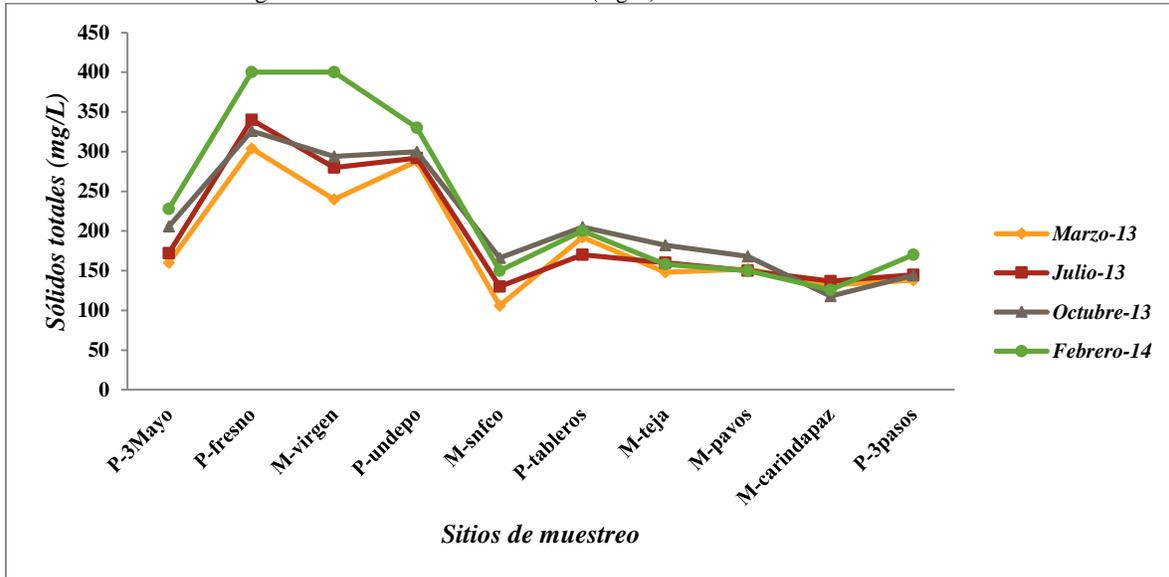
La alcalinidad total obtenida expresada en mg/L de CaCO_3 (figura 9) se mantiene similar en los muestreos, encontrándose el menor valor para este parámetro en el sitio M-snfco y el valor mayor en el sitio P-fresno.

Figura 9. Valores alcalinidad total (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



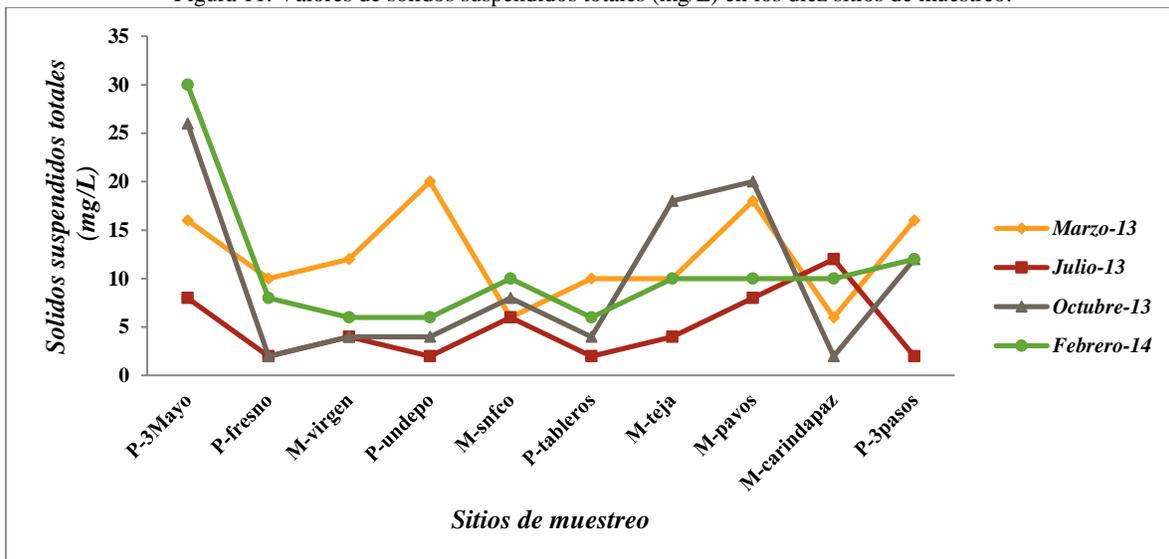
La concentración mínima de sólidos totales (figura 10) se reporta para el sitio M-snfco y M-carindapaz en dos muestreos y la más alta en el sitio P-fresno.

Figura 10. Valores de sólidos totales (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



El valor mínimo obtenido para sólidos suspendidos totales (figura 11) fue de 2 mg/L en cinco sitios de muestreo, la concentración más elevada se encontró en el sitio P-3mayo (30 mg/L).

Figura 11. Valores de sólidos suspendidos totales (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



4.1.2.1 Componentes mayores y fluoruros

En la Tabla 14 y figuras 12 a 19 se presentan las concentraciones obtenidas de iones mayoritarios durante la campaña de muestreos. El Na^+ y K^+ se determinaron mediante la técnica de emisión atómica de flama en un espectrofotómetro de absorción atómica. Se detectó la presencia de los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y aniones (SO_4^{2-} , HCO_3^- y Cl^-), las concentraciones no superan los

límites máximos permisibles (DOF 1994). No se observó la presencia de CO_3^{2-} , debido a que a estos valores de pH la especie mayoritaria carbonatada es HCO_3^- y esto se refleja en el resultado. Las concentraciones de Ca^{2+} (Figura 12) se presentan en valores que van desde 9.7 mg/L hasta 42.7 mg/L, en el sitio P-fresno se reportan las concentraciones más elevadas y las mínimas en el sitio M-carindapaz. No se observa variación de concentraciones significativas de los sitios entre muestreos, las concentraciones más elevadas se presentan en el mes de octubre para la mayoría de los sitios y las más bajas en julio.

Figura 12. Valores de Ca^{2+} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.

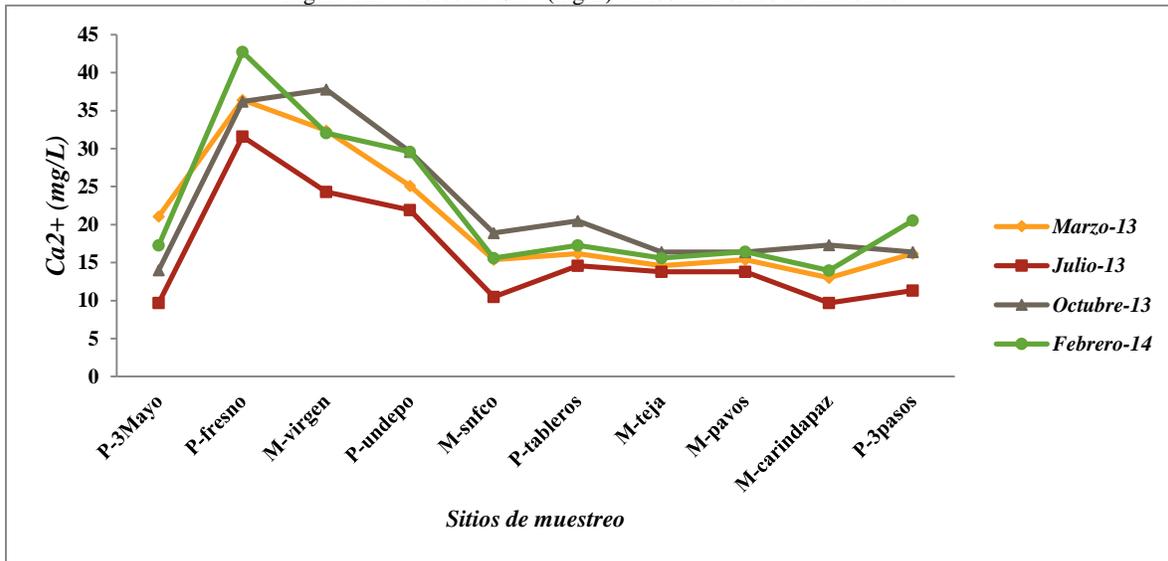
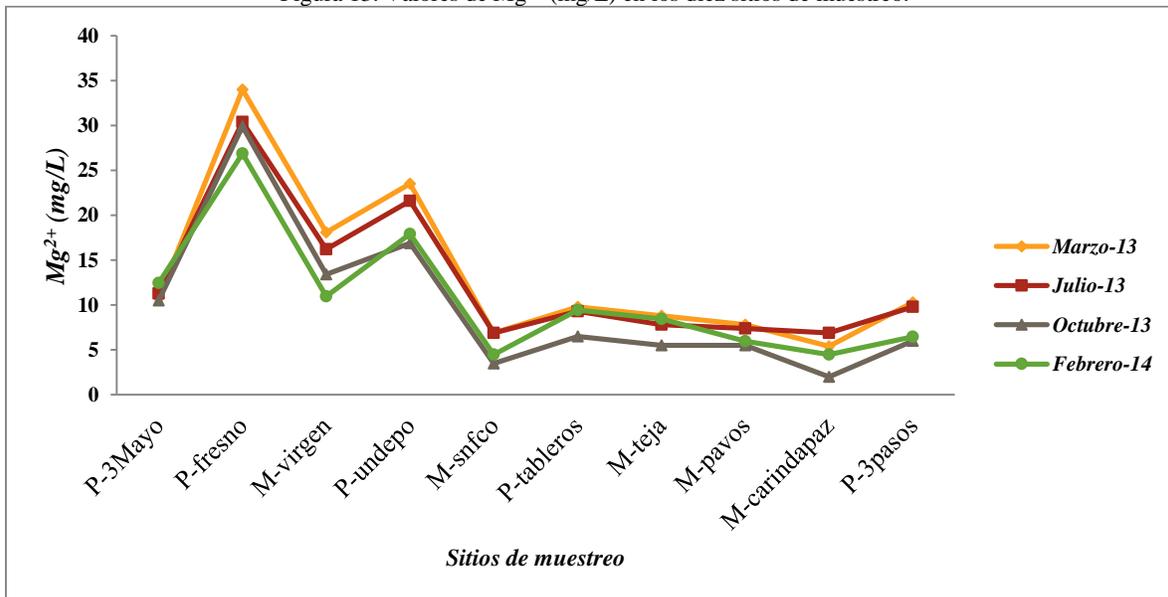


Figura 13. Valores de Mg^{2+} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.

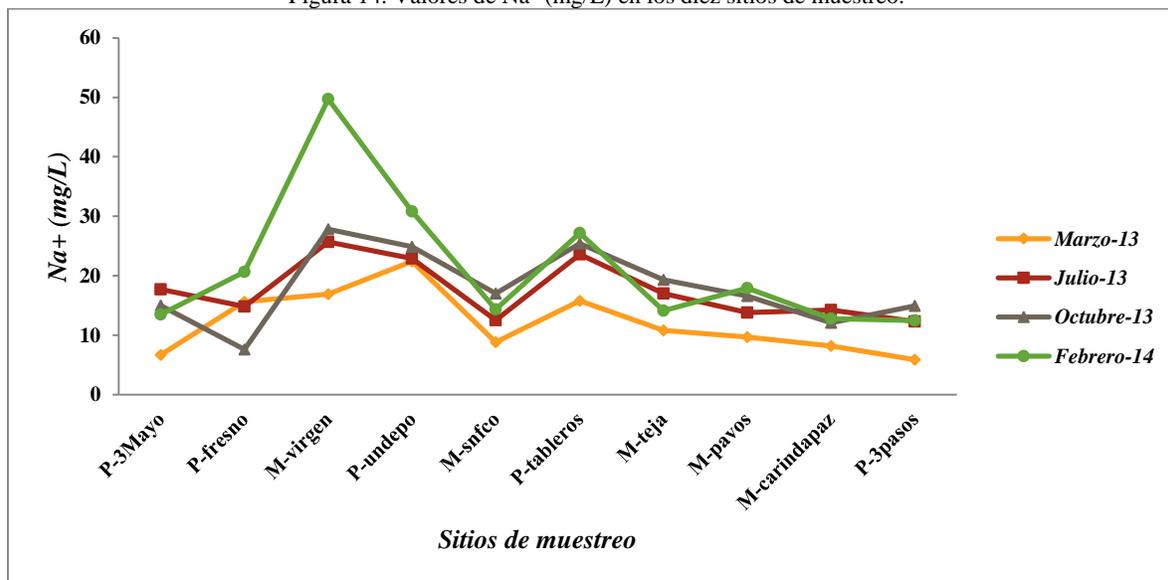


El Mg^{2+} se presenta (Figura 13) en valores que van desde 2 mg/L hasta 30.4 mg/L, encontrándose el valor mínimo en el sitio M-carindapaz y el máximo en el sitio P-fresno, no se observa variación significativa de concentraciones en los sitios respecto a muestreos, en el mes de marzo se observan las concentraciones más elevadas del catión y las más bajas entre octubre y febrero.

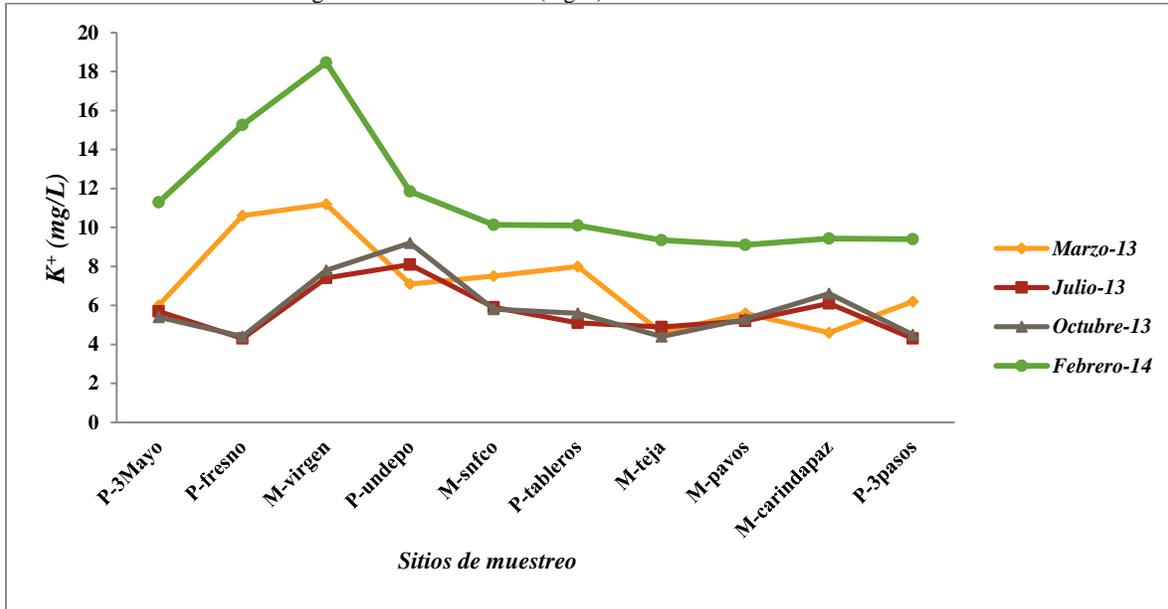
En cuanto al Na^+ (Figura 14) el valor mínimo encontrado es de 5.9 mg/L en el sitio P-3pasos y el máximo de 49.7 mg/L en el sitio M-virgen, de manera general se observa que las concentraciones mínimas se presentaron durante el primer muestreo y las más elevadas en el cuarto. Los sitios M-carindapaz y P-3pasos, tienen las concentraciones más bajas, y el sitio M-virgen las máximas encontradas.

En el sitio P-3mayo se observa que para el primer muestreo las concentraciones de Na^+ presentes (6.7 m/L) aumentan 11 mg/L (17.7 mg/L), y las de Ca^{2+} disminuyen 11.4 mg/L (21.1 a 9.7 mg/L) respecto del primer muestreo al segundo, lo que puede sugerir presencia de intercambio catiónico en el medio.

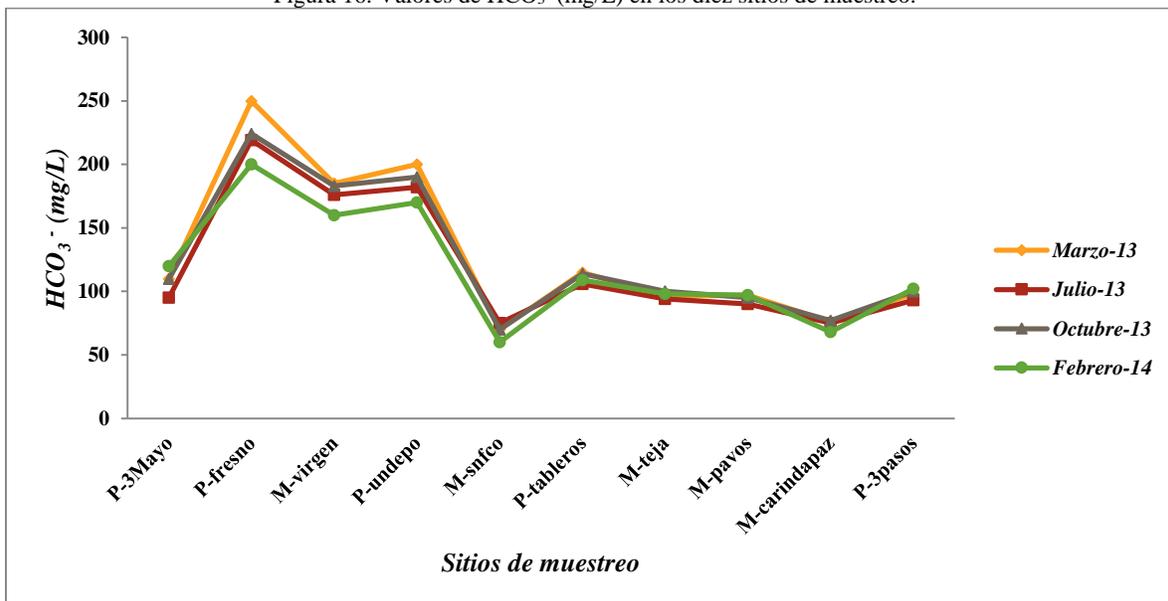
Figura 14. Valores de Na^+ (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



El K^+ se reporta para todos los sitios de muestreo (Figura 15), en general los valores más altos para este catión se presentan durante el cuarto muestreo en el mes de febrero, encontrándose las concentraciones más elevadas en el sitio M-virgen, no se observa variación significativa entre las concentraciones presentes en los sitios, pero si es notable la variación entre muestreos.

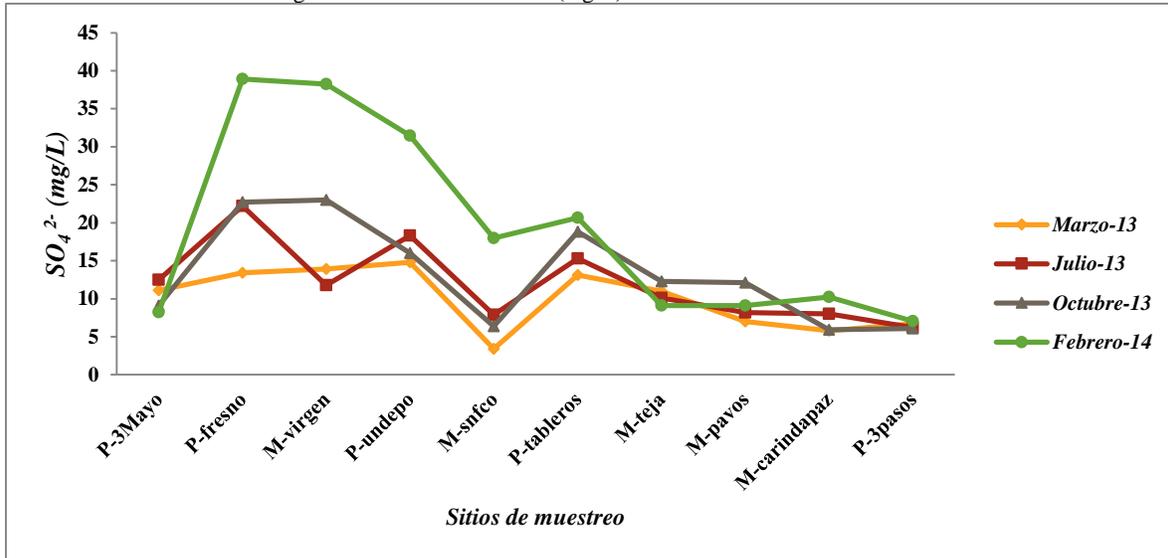
Figura 15. Valores de K^+ (mg/L) en los diez sitios de muestreo.

Para el anión HCO_3^- (figura 16) no se observa variación entre muestreos, es notable que el sitio M-snfco presenta las más bajas y el sitio P-fresno las más elevadas. Con valores mínimos de 60 mg/L y máximos de 250 mg/L, respectivamente para los sitios mencionados.

Figura 16. Valores de HCO_3^- (mg/L) en los diez sitios de muestreo.

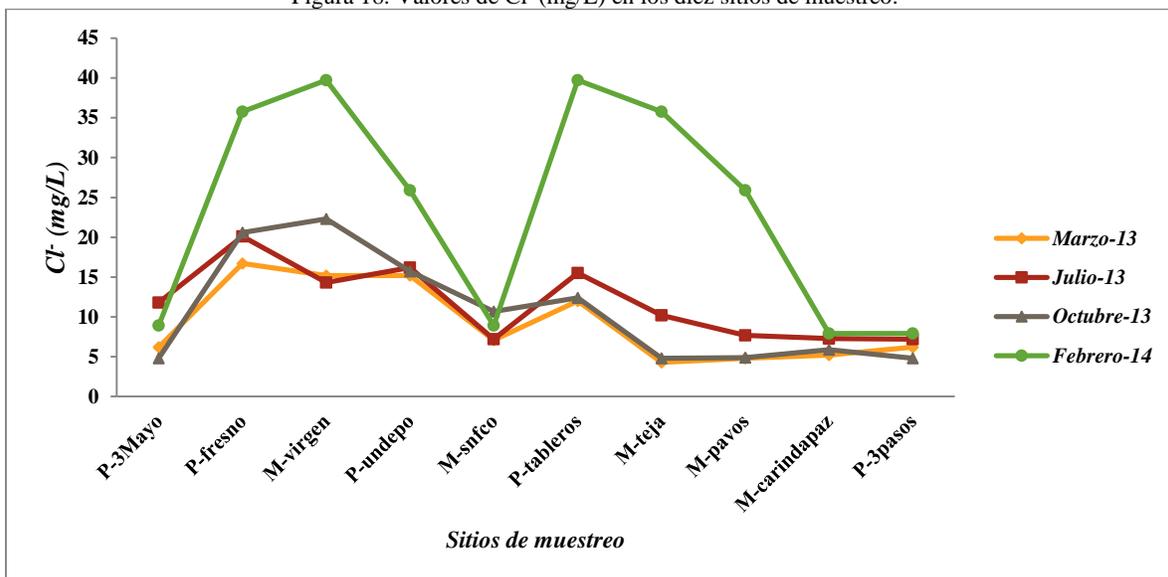
Los SO_4^{2-} (figura 17) de manera general se presentan a mayores concentraciones durante el mes de febrero, notándose las mínimas concentraciones en el sitio M-snfco (3.4 mg/L) y las máximas en el sitio P-fresno (38.9 mg/L).

Figura 17. Valores de SO_4^{2-} (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



Las concentraciones de Cl^- se incrementan para la mayoría de sitios en el cuarto muestreo respecto a los anteriores, se observa que el sitio M-virgen presenta las concentraciones más elevadas del anión. Y las mínimas se reportan para los sitios M-carindapaz y P-3pasos.

Figura 18. Valores de Cl^- (mg/L) en los diez sitios de muestreo.

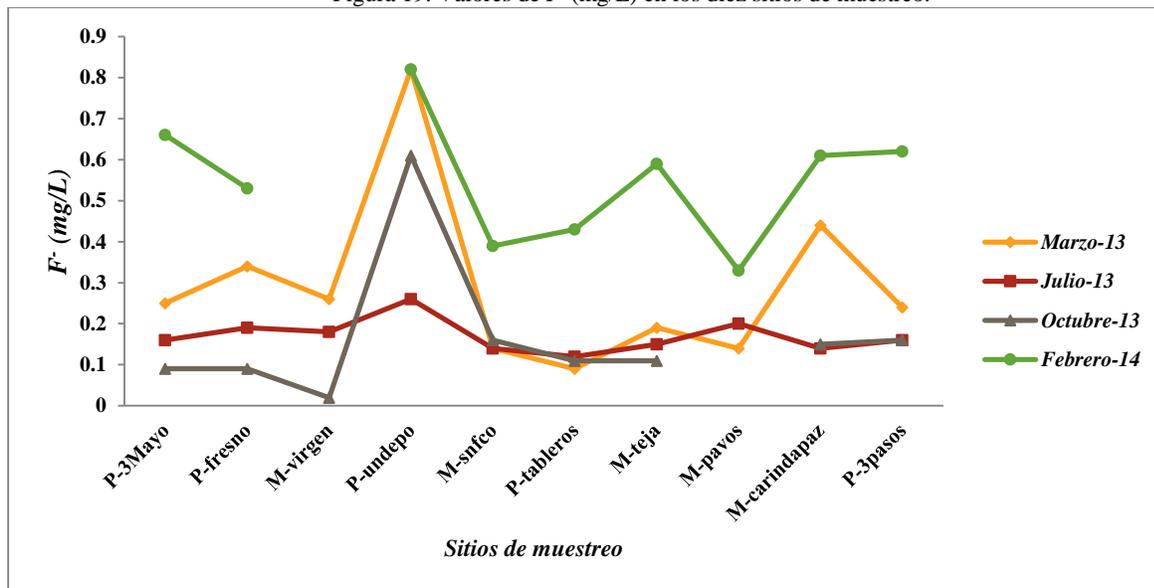


En cuanto a los F^- (figura 19) se observan concentraciones de 0.02 a 0.82 mg/L, las concentraciones máximas se observan en particular para el sitio P-undepo, y en general en el mes de febrero para todos los sitios. Se presentan diferencias significativas entre los sitios de estudio respecto a las concentraciones del parámetro. En los sitio M-virgen y M-pavos, no se reporta un valor de concentración debido a que existe un error en la medición en el primer sitio mencionado y en el otro sitio el equipo no detectó concentración de F^- (tabla 13).

Es importante mencionar que durante el primer y tercer muestreo se realizó la determinación del parámetro de la muestra al 100% y para los resultados del segundo y cuarto muestreo se utilizó la solución TISAB II, la cual ayuda a inhibir la presencia de otros iones presentes en la muestra.

Estudios indican que existe una relación entre F^- y solidos disueltos totales (SDT), a mayor concentración de SDT aumenta la fuerza iónica, lo que lleva al aumento de la solubilidad de F^- en el agua subterránea (He *et al.* 2013). De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que las concentraciones de SDT son bajas al igual que las concentraciones de F^- .

Figura 19. Valores de F^- (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



Se ha reportado que los niveles bajos de Ca^{2+} y una alta alcalinidad favorece un alto contenido de F^- y de HCO_3^- en el agua subterránea, en este tipo de agua la concentración natural del F^- depende de las características geológicas, químicas y físicas del acuífero, la porosidad y la acidez del suelo y rocas, la temperatura, y profundidad de los pozos. Debido al gran número de variables, las

concentraciones de F^- en el agua subterránea pueden variar desde valores inferiores a 1.0 mg/L hasta más de 35.0 mg/L (Meenakshi y Maheshwari 2006).

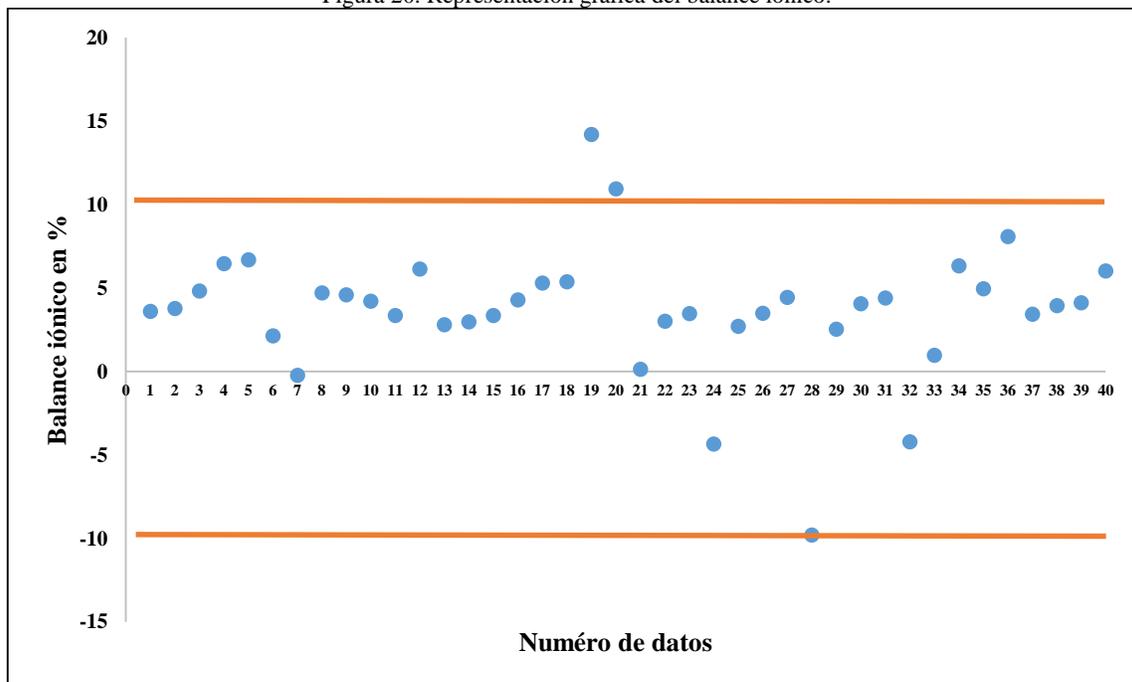
En general el orden para cationes determinados en la mayoría de sitios de estudio de acuerdo a concentración es $Ca^{2+} \gg Na^+ \gg Mg^{2+} \gg K^+$ y el orden para los aniones es $HCO_3^- \gg SO_4^{2-} \gg Cl^- \gg F^-$, por lo anterior se puede suponer la presencia de $Ca(HCO_3)_2$ y/o $NaHCO_3$, lo cual ayuda a predecir el tipo de agua en la zona y se refleja al construir el diagrama de Piper (Figura 28).

4.1.2.1.1 Balance iónico

Se calculó el porcentaje de error mediante la ecuación 1 para corroborar el balance de cargas para las 40 muestras analizadas durante la campaña de muestreo (4 períodos de muestreo y 10 sitios) (anexo 5). El balance iónico de los resultados exhibe un balance aceptable para la mayoría de los sitios de muestreo (figura 20), el sitio M-snfco presenta exceso de cationes en el tercer y cuarto muestreo, con valores porcentuales de 14.2 y 10.94 respectivamente. Lo anterior puede significar error en la medición o influencia de otros cationes.

Debe considerarse que otro catión puede estar influyendo en el cálculo del balance.

Figura 20. Representación gráfica del balance iónico.

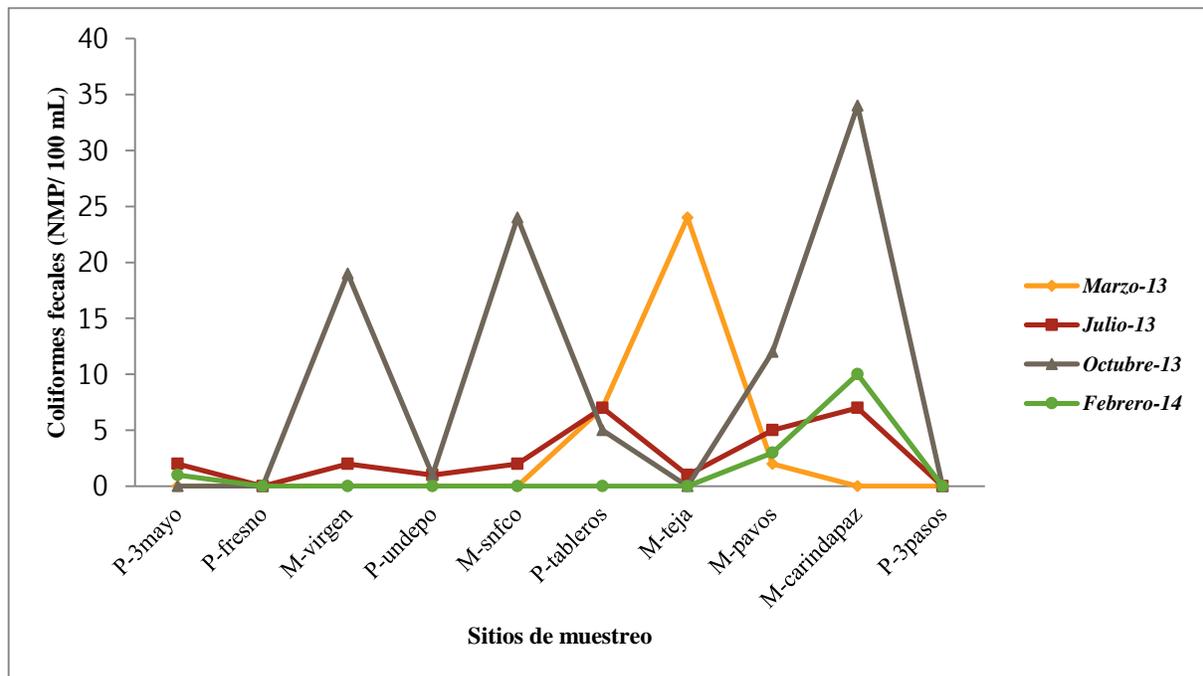


4.1.3 Coliformes fecales

La tabla 15 (Anexo 5) y figura 21 representan los resultados obtenidos en la determinación de coliformes fecales, expresados como NMP (Numero más probable). El análisis bacteriológico de las muestras se realizó conforme lo establece la NMX-AA-102-SCFI-2006.

Se reportan coliformes fecales en ocho sitios de estudio, exceptuando a los sitios P-fresno y P-3pasos con cero organismos coliformes. El sitio M-carindapaz es el que presenta el mayor número de microorganismos (51 NMP/100 mL), el límite máximo establecido por la normatividad correspondiente señala que debe ser cero organismos coliformes, por lo tanto se estaría sobrepasando lo establecido. Sin embargo, es importante mencionar que la toma de la muestra se realiza antes del proceso de desinfección en cada sitio.

Figura 21. Valores para coliformes fecales expresados en NMP/100 mL en los diez sitios de muestreo.



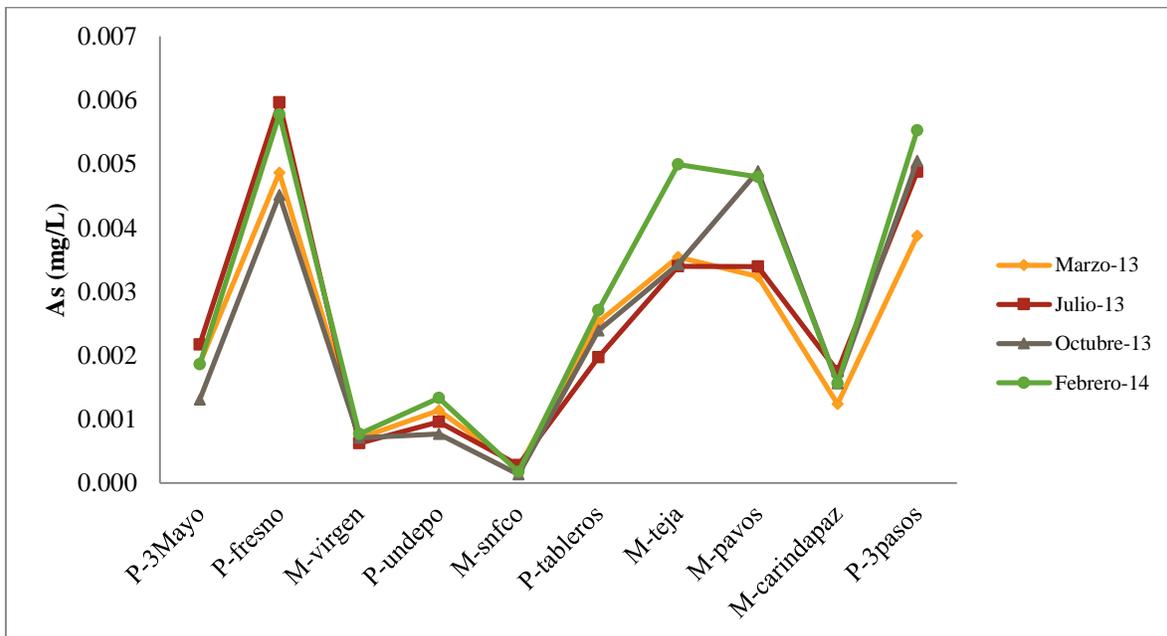
4.1.4 Metales pesados, arsénico y boro

Se determinaron los metales Fe, Mn, Ni, Cd, Cu, Zn, Pb, Be, Ti, V, Co, Mo, Tl, y As mediante la técnica de ICP-MS, los resultados obtenidos no superan los límites máximos establecidos por la normatividad mexicana correspondiente (NOM-127-SSA1-2000) (ver anexo 3, tabla 12) excepto para el Fe durante el cuarto muestreo en los sitios M-virgen y P-undepo con concentraciones de 0.42 mg/L y 0.63 mg/L respectivamente. La OMS (WHO 2011) menciona que a niveles por encima

de lo máximo permisible (0.3 mg/L), el hierro tiñe accesorios de lavandería y de plomería. No se considera sea tóxico para la salud en las concentraciones observadas.

Se determinó B utilizando un espectrofotómetro UV- visible, esta última técnica se basa en la medición a partir de la formación de un compuesto rojo denominado rosocianina. El As (figura 22) se detectó en mayor concentración en el sitio P-fresno con concentraciones máximas de 0.006 mg/L, el sitio que presenta las mínimas concentraciones es M-snfco, ninguno de los sitios presenta concentraciones que rebasen los límites nacionales e internacionales (0.025 mg/L y 0.01 mg/L respectivamente). No se observa variación significativa de concentraciones entre muestreos.

Figura 22. Valores para Arsénico (mg/L) en los diez sitios de muestreo.

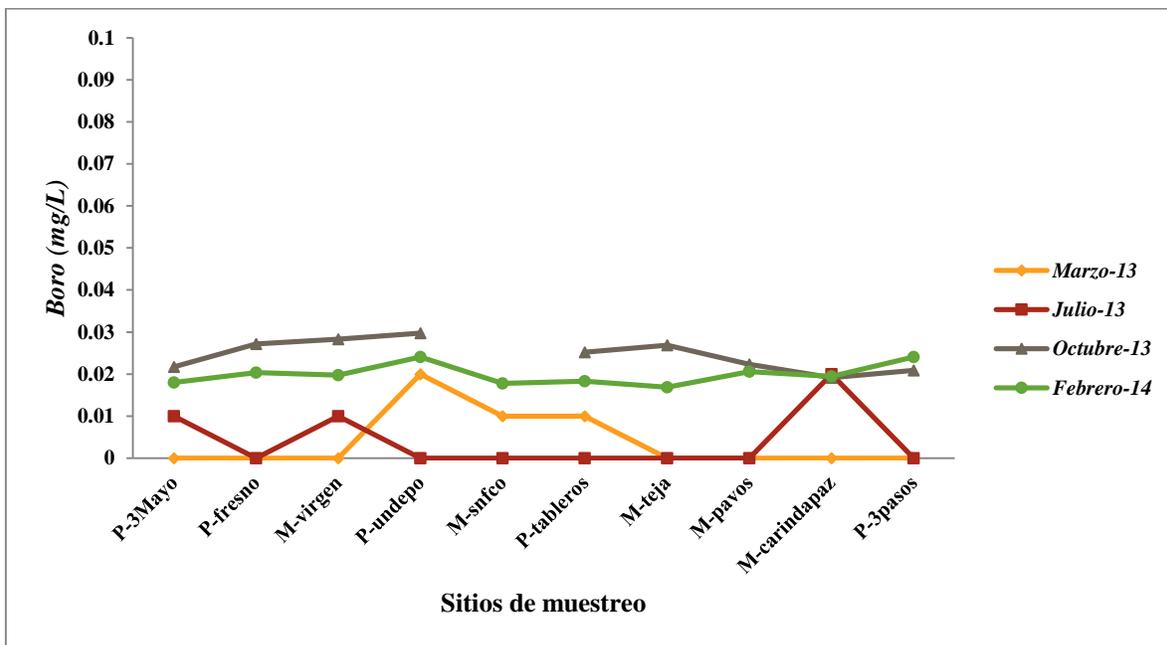


Existe una correlación entre al As y F^- que sugiere una co-ocurrencia de estos contaminantes, las pequeñas variaciones de As y F^- indican una evolución estable de estos dos elementos (Alarcón-Herrera *et al.* 2012). Se recomienda hacer monitoreo de estas dos especies químicas en las aguas subterráneas, con el propósito de observar el comportamiento de ambos elementos dentro del acuífero, especialmente como indicadores cuando el uso de la tierra cambia y la demanda de agua subterránea está aumentando (Reyes *et al.* 2013).

El B (figura 23) se detectó en todos los sitios pero no en todos los muestreos, en seis sitios estuvo presente en tres muestreos y en los sitios restantes solo se detectó en dos muestreos, en general las concentraciones máximas encontradas se observan durante el mes de octubre.

Karro y Uppin (2013) sustentan que existe una relación entre el F⁻ y el B en las aguas subterráneas, presentándose el último en menor concentración, de acuerdo a los resultados obtenidos se observa la relación mencionada, puesto que la concentración máxima de F se encontró en el sitio P-undepo y las máximas de B en el mismo sitio. En México no existe un límite máximo establecido en la normatividad para la presencia de B en el agua de uso y consumo humano, pero la OMS recomienda una concentración de 0.5 mg/L de B, para el agua de consumo humano (WHO 2008) y en la última actualización de las guías propuestas por la OMS el valor se amplía a 2.4 mg/L (WHO 2011), por lo anterior se consideran bajas las concentraciones encontradas.

Figura 23. Valores para Boro (mg/L) en los diez sitios de muestreo.



4.1.5 Especiación química

El conocimiento sobre la especiación del metal, es decir, la distinta forma física o química en la que pueda estar un metal, se considera importante para la comprensión y predicción del comportamiento y el impacto que éste pueda tener en cualquier sistema ambiental. La especiación química de un metal depende de su estado de oxidación y de sus interacciones con otros componentes del sistema (Tipping *et al.* 1998).

Los factores más importantes que predicen la especiación de arsénico inorgánico son el Eh y pH, en el agua subterránea en condiciones oxidantes concentraciones altas de As (V) se pueden derivar de la oxidación de minerales de sulfuro, principalmente arsenopirita (Romić *et al.* 2011). Bonte *et*

al. (2013) menciona que en la literatura se reportan varios mecanismos responsables de la movilización del arsénico en acuíferos, se consideran tres mecanismos principales: 1.- Oxidación de la pirita, 2.- reducción de minerales de Fe (III) y 3.- desorción de las superficies cargadas con óxidos de Fe, Al y Mn. El arsénico existe en el agua subterránea principalmente como oxianiones, con dos estados de oxidación: As (III), arsenito y As (V) arseniato. Ambas especies se encuentran en el rango de pH de 6 a 9, y la forma dominante que se presenta está en función de la geología y el medio ambiente en el agua subterránea. Aunque el As (V) se ve favorecido termodinámicamente en aguas oxicas y el As (III) en aguas anoxicas (Sorg *et al.* 2014).

La especiación química se realizó con el programa Visual MINTEQ (versión 3.0) para As y Fe. Para el As las figuras 24-25 representan la forma química en la que se encuentra el As en las muestras de agua, se observa la única presencia de As (V), formando distintas especies químicas, siendo la predominante para nueve sitios de muestreo el ion dihidrógeno arseniato (H_2AsO_4^-), para el sitio P-undepo, la especie predominante es el ion hidrogeno arseniato (HAsO_4^{2-}). También se observa en el sitio P-3Mayo un bajo porcentaje de ácido arsénico (H_3AsO_4). Por lo anterior se deduce que se tiene un sistema oxidante.

Figura 24. Especies predominantes de As presentes en cinco sitios de muestreo a partir de concentraciones máximas obtenidas.

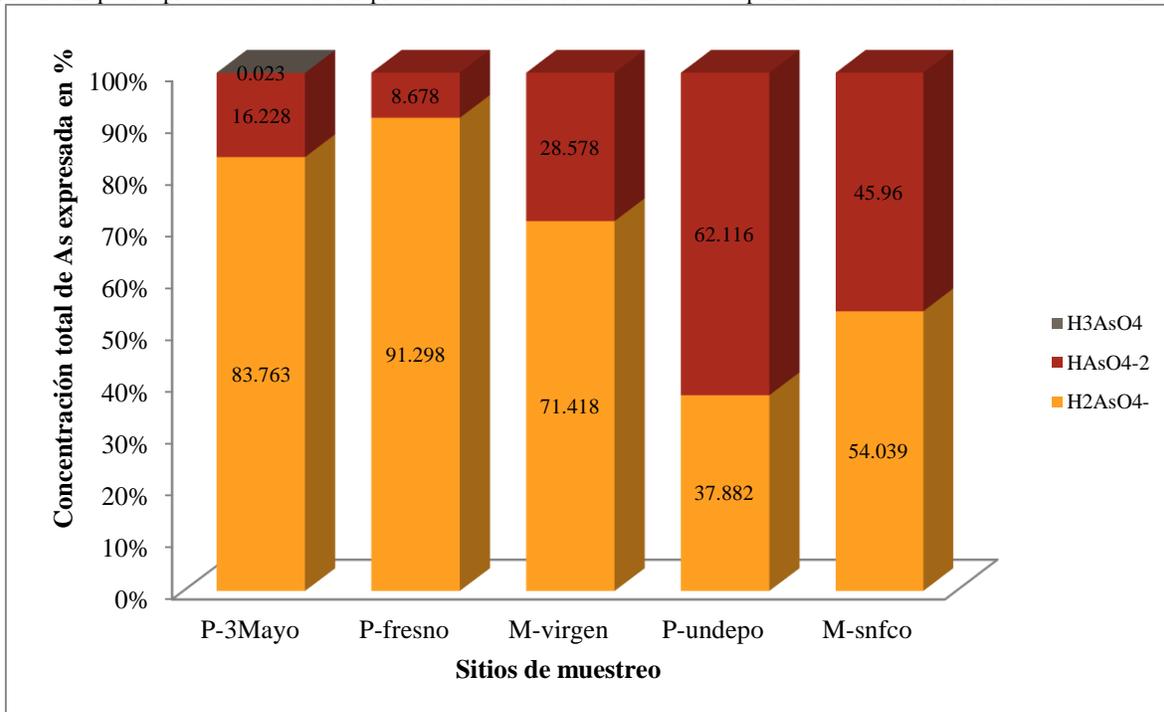
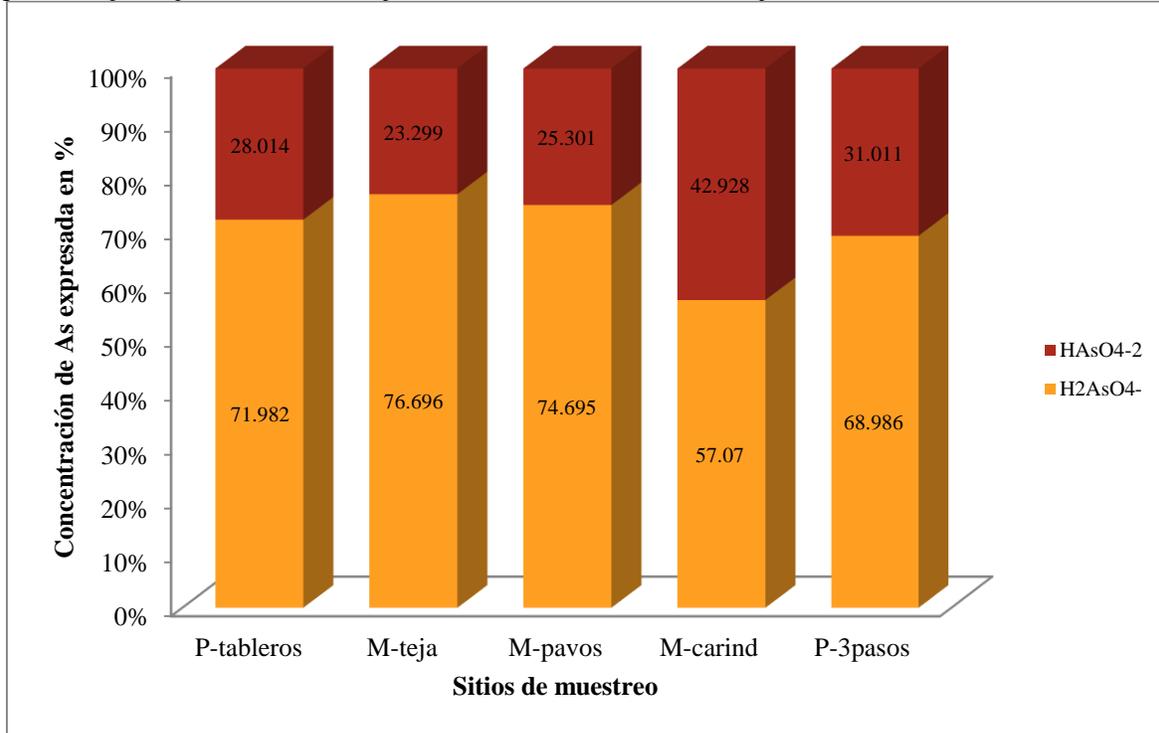


Figura 25. Especies predominantes de As presentes en cinco sitios de muestreo a partir de concentraciones máximas obtenidas.



En la mayoría de los sistemas acuáticos naturales que son medios ácidos oxidantes predomina el ion Fe^{+3} . El hierro soluble se encuentra en el agua subterránea debido a las condiciones reductoras que favorecen el estado de oxidación de Fe^{2+} , la cual es la forma soluble del metal, a su vez tiende a oxidarse dependiendo del pH que presente el agua, al oxidarse el Fe^{2+} a Fe^{3+} se convierte en insoluble (Manahan 2007).

Las figuras 26 y 27 representan la especiación química de hierro para los diez sitios de muestreo, para todos los sitios el hierro se encuentra como Fe (III) formando distintas especies químicas en disolución, siendo la especie predominante $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, de manera general representa cerca del 99% de la concentración total obtenida del metal. Se reportan otras especies de hierro; FeOH^{+2} , $\text{Fe}(\text{OH})_{3(\text{aq})}$ y $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, éstas están en un porcentaje bajo $<1\%$. El Fe (III) presente en los sitios de estudio se encuentra formando complejos coloidales.

Figura 26. Especies predominantes de Fe presentes en cinco sitios de muestreo a partir de concentraciones máximas obtenidas.

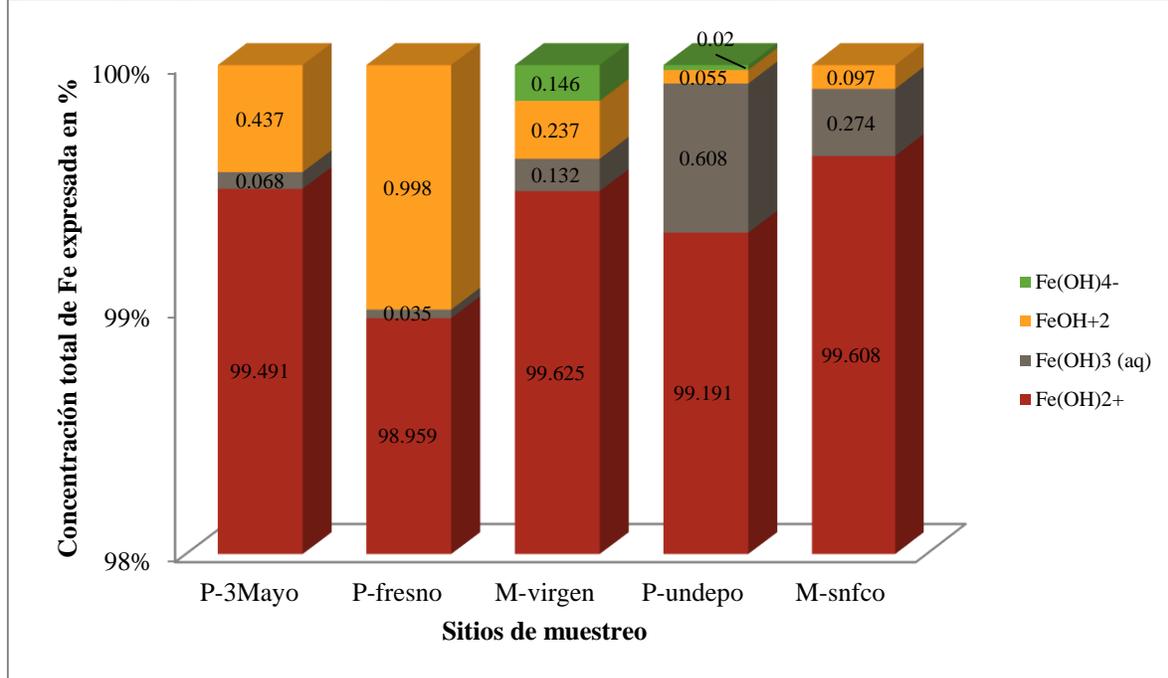
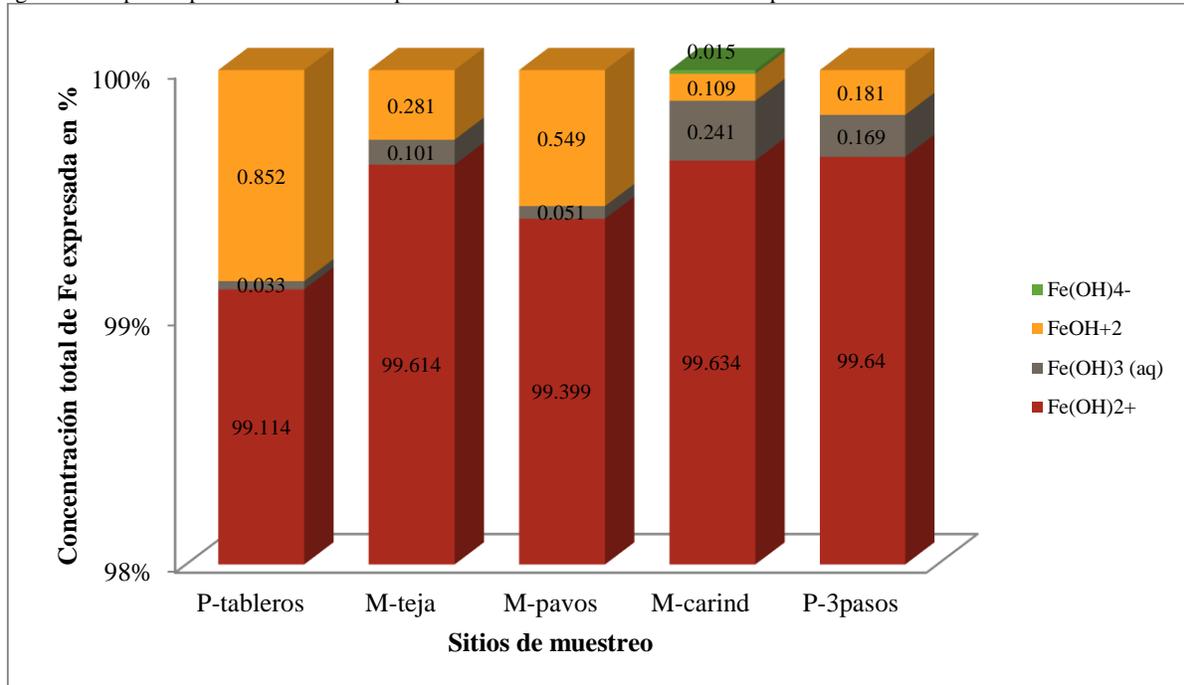


Figura 27. Especies predominantes de Fe presentes en cinco sitios de muestreo a partir de concentraciones máximas obtenidas.

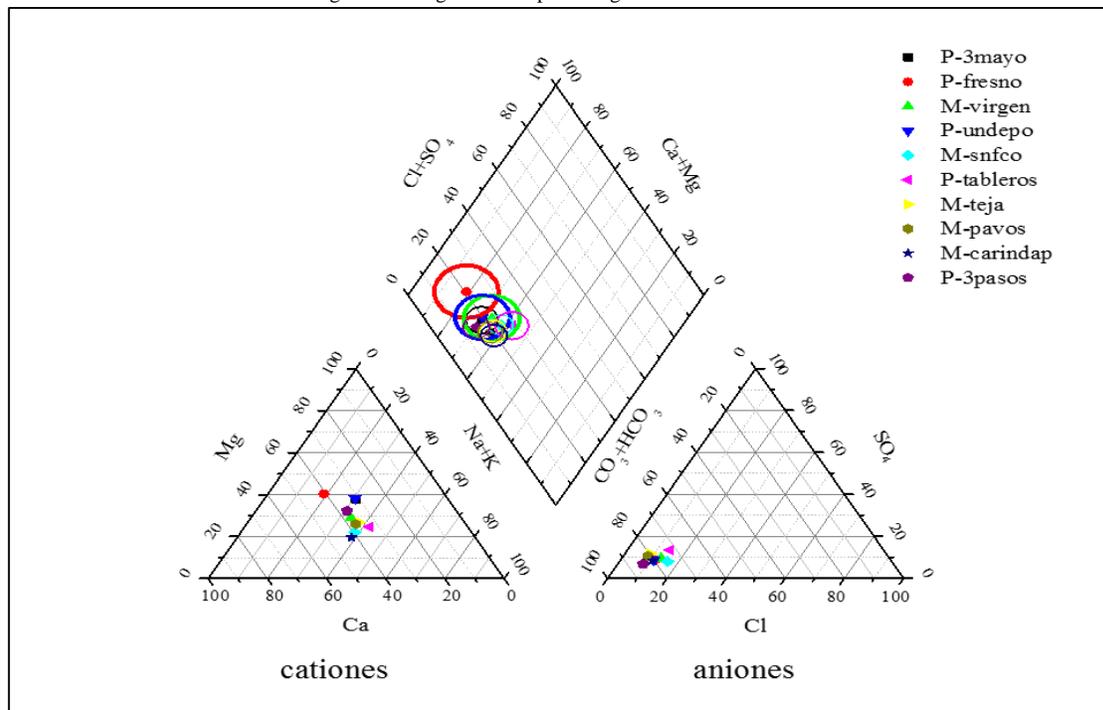


4.1.6 Tipo de agua en la zona de estudio

El diagrama de Piper o trilineal muestra las concentraciones relativas de los iones mayoritarios en porcentaje de Meq/L, los cationes y aniones se representan en un triángulo respectivamente, y se proyectan a un punto en un cuadrilátero que representa los aniones y cationes, de esta manera se construye el diagrama de Piper (Deutsch 1997), se utilizó el programa OriginPro 9.1 para la construcción del diagrama.

La figura 28, representa los tipos de agua para los diez sitios de muestreo durante la campaña de muestreo realizada en el ciclo marzo 13 - febrero 14.

Figura 28. Diagrama de Piper del agua en la zona de estudio.



El tipo de agua presente en la zona de acuerdo al diagrama de Piper es para nueve sitios tipo $\text{Ca}^{2+} \text{Na}^+ \text{HCO}_3^-$ (bicarbonatada-sódica-cálcica), y para el sitio P-Fresno el tipo de agua es $\text{Ca}^{2+} \text{HCO}_3^-$ (bicarbonatada-cálcica), entonces, se puede considerar que el agua en la zona de estudio es de reciente infiltración debido a que el anión encontrado a concentraciones más altas es el ion HCO_3^- y el catión predominante es Ca^{2+} , de manera general, se considera que el agua en la zona de estudio pertenece a la misma facie; facie $\text{Ca}^{2+} \text{HCO}_3^-$ (bicarbonatada cálcica). La presencia de Na^+ se puede relacionar con el paso del agua a través de las rocas o con un intercambio catiónico en el

medio; fenómeno asociado con la presencia de minerales de arcilla, que afecta principalmente los cationes Na^+ , Ca^{2+} , y Mg^{2+} , consiste en que el terreno cede iones Na^+ y toma del agua iones Ca^{2+} y Mg^{2+} ; como resultado el agua se ablanda y tiende a convertirse en sódica (Contreras *et al.* 2012). El hecho de que se considere el agua como de reciente infiltración puede ser indicativo de que el acuífero presenta sobreexplotación.

4.1.7 Índice de Calidad del Agua (ICA)

El objetivo principal del Índice de calidad del agua (ICA) es convertir los datos complejos obtenidos de calidad de agua en información comprensible y utilizable para la población de la zona de estudio (Patil V.T. y Patil P.R. 2013).

El resultado del ICA para el área de estudio, oscila en rangos que van desde 20.75 hasta 42.36 (tabla 9), lo cual significa que los sitios de estudio de acuerdo al cálculo realizado, presentan excelente calidad de agua, siendo el sitio M-pavos el que presenta una excelente calidad por arriba de los demás sitios y el sitio P-undepo el que presenta la más baja calidad. Sin embargo, de manera general se observa que el agua de los diez sitios de estudio es de excelente calidad.

Tabla 9. Valor del ICA para los sitios de estudio.

Sitio de muestreo	Valor del ICA	Calidad del agua
P-3mayo	23.15	Excelente
P-fresno	39.89	Excelente
M-virgen	35.84	Excelente
P-undepo	42.36	Excelente
M-snfco	23.50	Excelente
P-tableros	23.89	Excelente
M-teja	22.21	Excelente
M-pavos	20.75	Excelente
M-carindapaz	21.64	Excelente
P-3pasos	21.75	Excelente

4.2 Análisis estadístico multivariado

El análisis estadístico se realizó con el programa JMP (versión 10.0). Este trabajo se centra en determinar la calidad del agua en función de la presencia de arsénico, flúor y boro, sin embargo para estudios de calidad se engloban todos los parámetros determinados para la realización del análisis estadístico.

4.2.1 Análisis de varianza entre muestreos y prueba de Tukey-Kramer

El análisis de varianza (ANOVA) de una vía para parámetros *in situ* en cuanto a muestreos presenta una diferencia significativa para el oxígeno disuelto (Figura 29, tabla 15) con una $p = < 0.0001^*$, lo que indica diferencia entre las medias de los muestreos, presentándose las medias más altas en los meses de estiaje siendo los meses que se considera presentan menores temperaturas (Febrero y octubre). La media más baja se presenta en el mes de julio. Para la temperatura del agua, pH y conductividad eléctrica no hay diferencias significativas entre muestreos.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos en lo que respecta a los componentes mayores el K^+ y Cl^- (figura 30 y 31, tabla 15) presentan diferencias significativas entre sus medias con $p = < 0.0001^*$ y $p = < 0.0018^*$ respectivamente, el F^- también presenta diferencia significativa de sus medias entre muestreos; $p = < 0.0001^*$ (figura 32, tabla 15). La prueba de Tukey-Kramer permite comparar las medias entre muestreos (tabla 16), en este caso refleja que el muestreo de febrero-14 es distinto para las concentraciones de K^+ , Cl^- y F^- encontradas respecto de los otros muestreos.

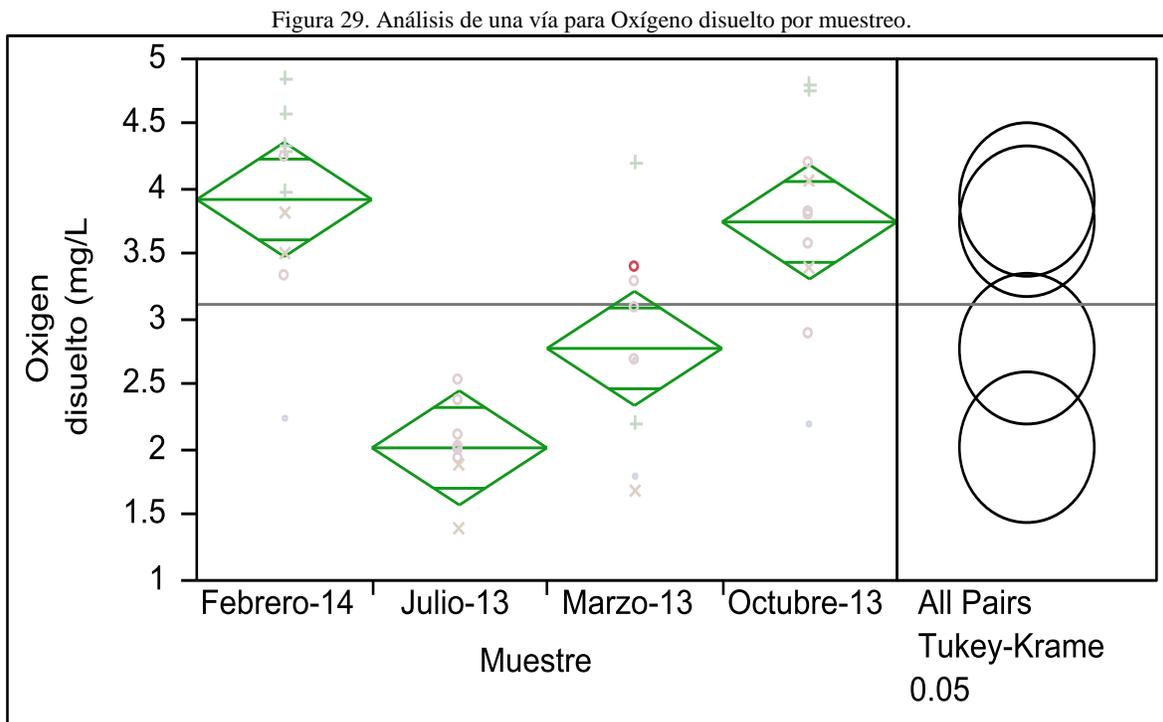


Figura 30. Análisis de una vía para potasio por muestreo

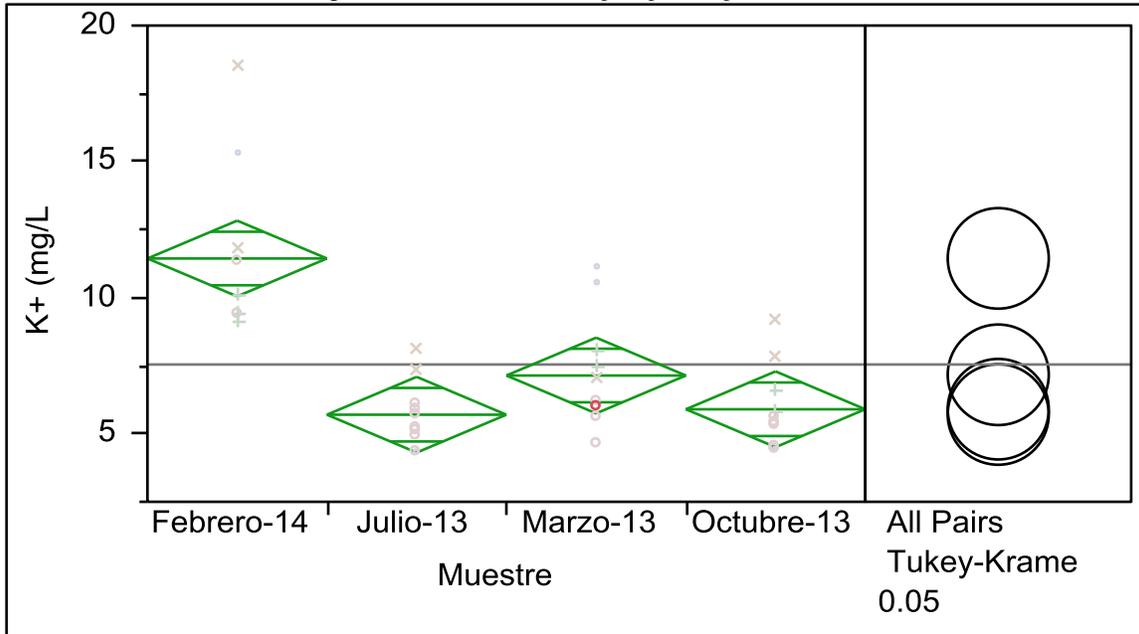


Figura 31. Análisis de una vía para cloruro por muestreo

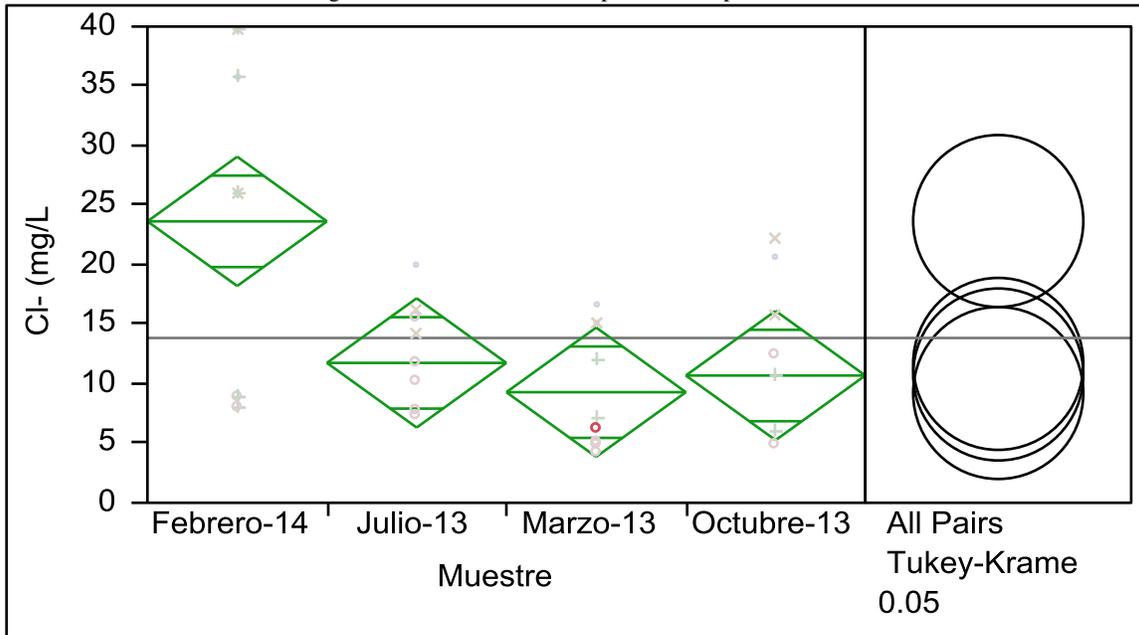
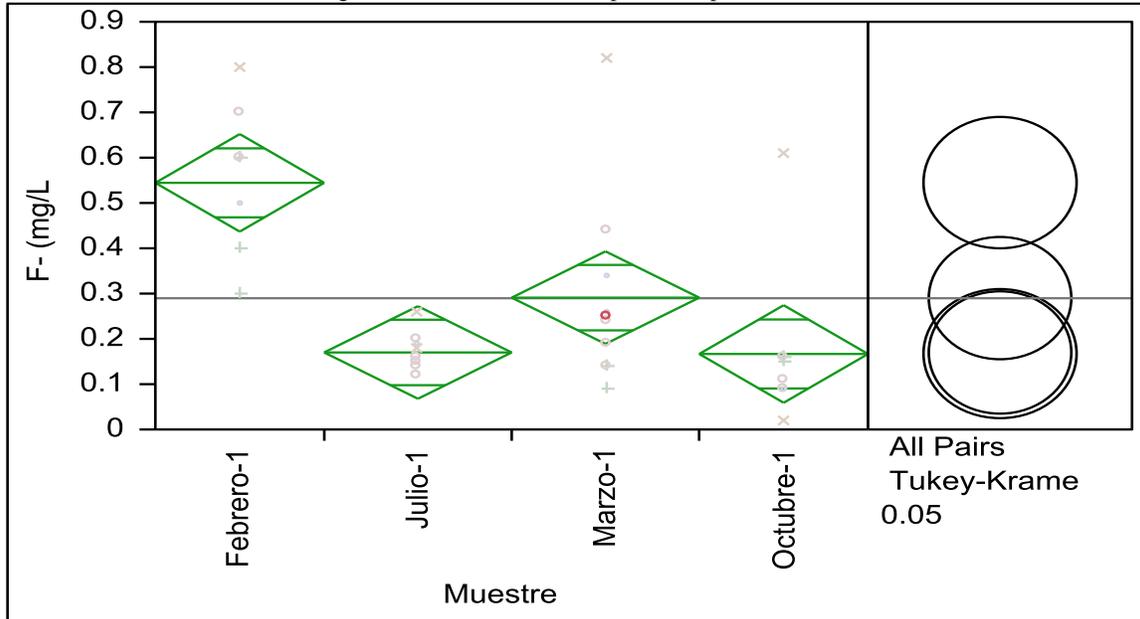


Figura 32. Análisis de una vía para flúor por muestreo.



Para los metales pesados determinados los que presentaron diferencias significativas entre medias para muestreos son: Zn, Pb y Fe, con $p= 0.0031^*$, 0.0432^* y 0.0040^* (Figuras 34,35 y 36; tabla 15) respectivamente. Para Zn el cuarto muestreo presenta diferencias estadísticas en cuanto a los primeros tres muestreos, la prueba Tukey-Kramer indica que para el Pb los resultados obtenidos en octubre-13 y febrero-14 son estadísticamente diferentes entre sí y difieren también de los otros dos muestreos, marzo-13 y julio-13 presentan similitudes. El Fe es similar estadísticamente en los muestreos de Marzo-13, Julio-13 y octubre-13, aunque octubre-13 también es similar a Febrero-14.

De manera general se observa que los parámetros Oxígeno disuelto, K^+ , Cl^- , F^- , Zn, Pb y Fe son estadísticamente diferentes entre muestreos y difieren las medias entre muestreos principalmente en Febrero-14.

Figura 33. Análisis de una vía para Zinc por muestreo

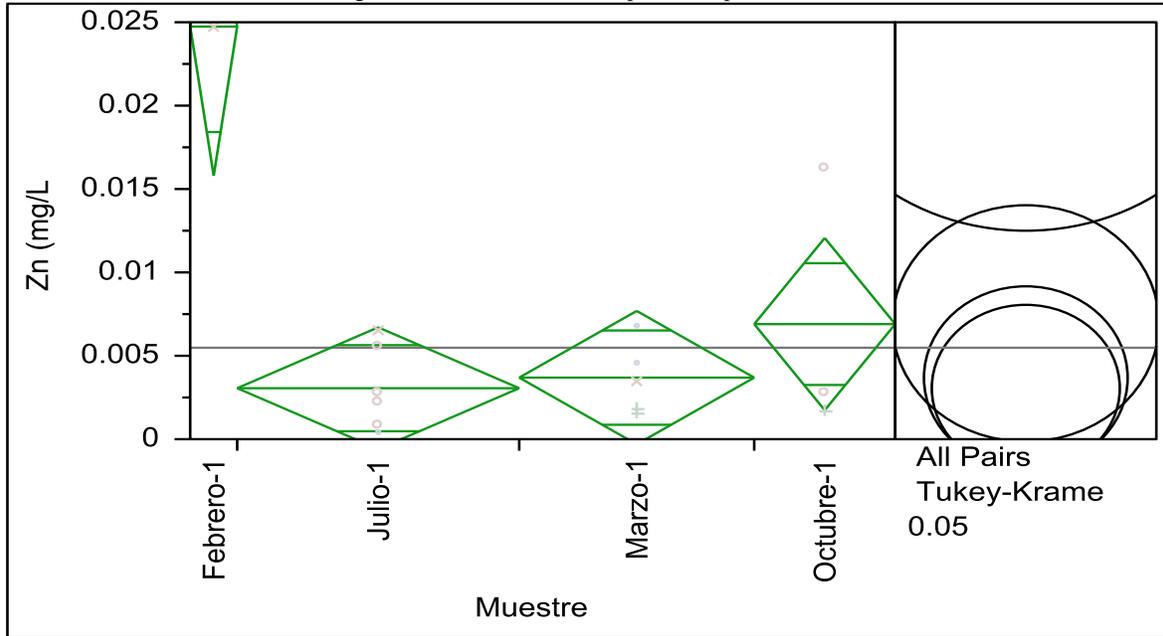


Figura 34. Análisis de una vía para Plomo por muestreo.

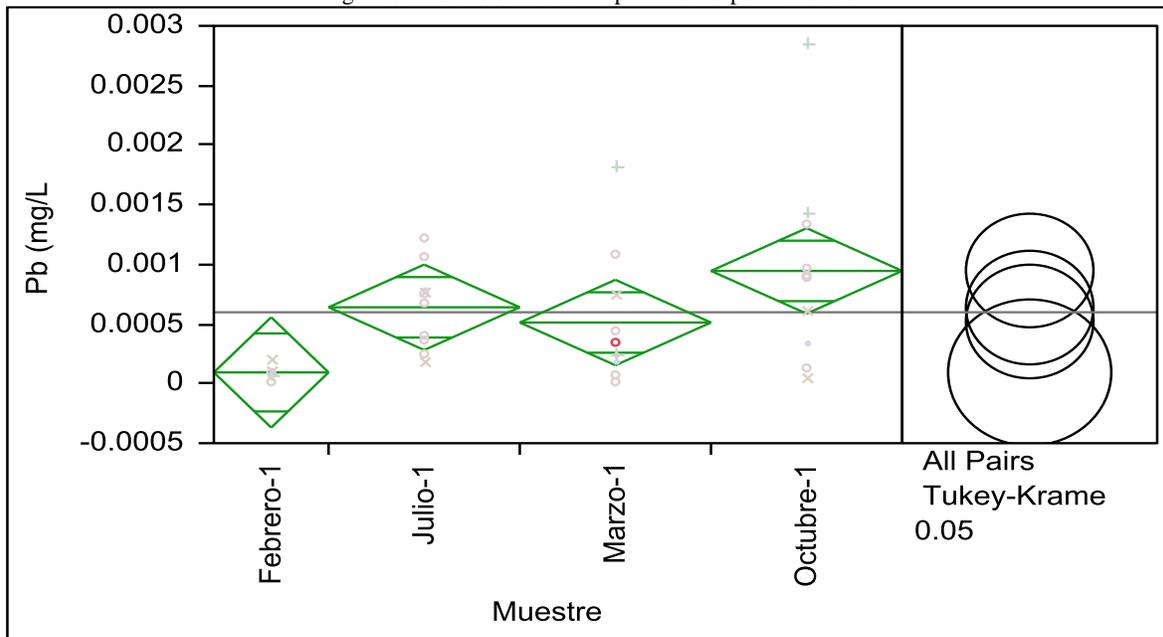
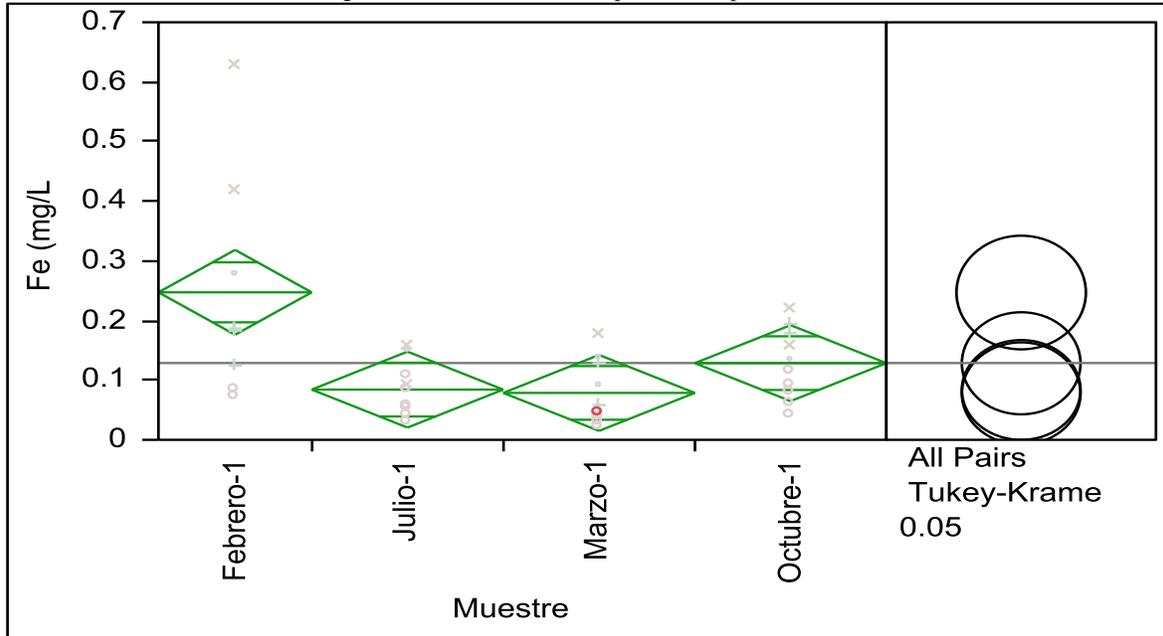


Figura 35. Análisis de una vía para Hierro por muestreo.



4.2.2 Análisis de varianza entre sitios y prueba de Tukey- Kramer.

Se realizó el ANOVA entre sitios, a continuación se muestran los parámetros que son estadísticamente diferentes entre sitios de muestreo. Dentro de los parámetros medidos *in situ* la temperatura del agua, la conductividad eléctrica y el pH (figura 36, 37 y 38) presentan diferencias estadísticas significativas entre sitios con $p < 0.0001^*$ para los tres parámetros mencionados. De acuerdo a la prueba de Tukey-Kramer la temperatura del agua es similar estadísticamente para los sitios P-3pasos y P-3mayo. P-3mayo comparte características con M-pavos, P-tableros y M-teja, los anteriores son similares con M-snfco, y a su vez este último es similar con M-teja y M-carindapaz. Los sitios P-fresno y P-undepo son distintos de los demás sitios y similares entre sí (Figura 36).

En cuanto a los valores de conductividad eléctrica obtenidos (Figura 37), los sitios P-fresno y P-tableros difieren estadísticamente en la media a los demás sitios y entre ellos, M-virgen y P-undepo son semejantes, P-3mayo, M-teja, P-3pasos y M-pavos tienen similitudes entre sí y los últimos tres son similares con M-snfco, éste presenta semejanza con M-carindapaz.

El pH presenta diferencias estadísticas entre sitios (Figura 38); P-undepo y M-snfco son estadísticamente distintos de M-pavos, M-teja, P-3mayo y P-fresno, M-snfco es similar con M-

virgen, y también con P-3pasos, M-carindapaz, los últimos tres comparten similitudes con P-tableros.

Figura 36. Análisis de una vía para Temperatura del agua entre sitios.

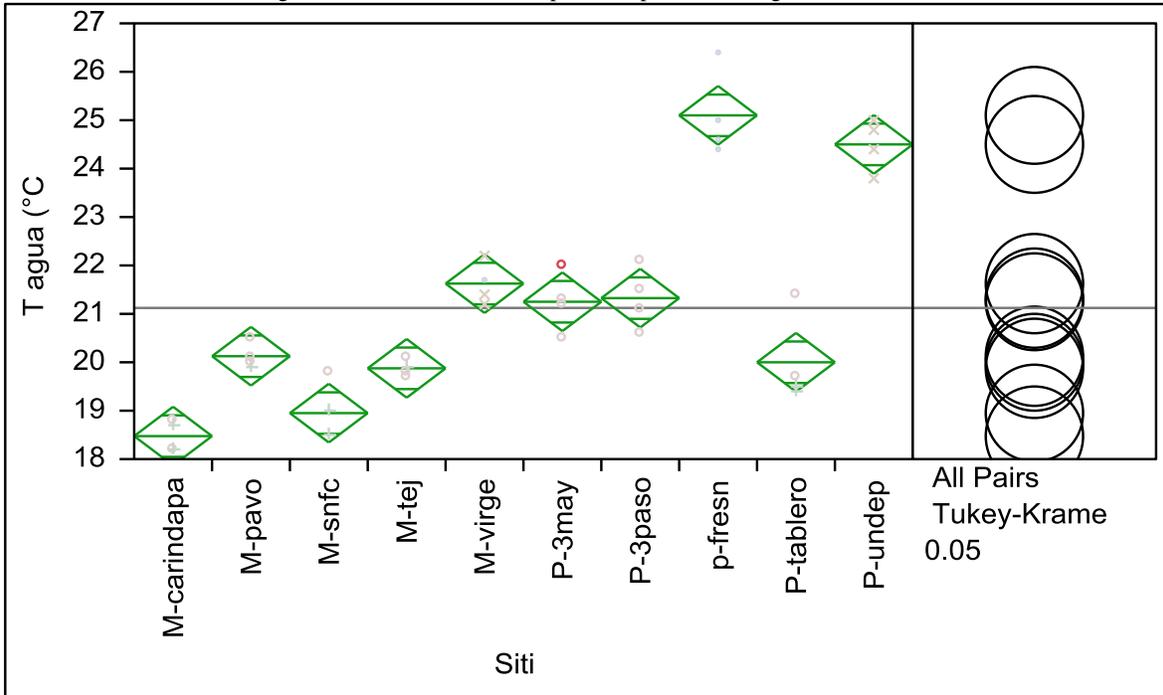


Figura 37. Análisis de una vía para conductividad eléctrica entre sitios

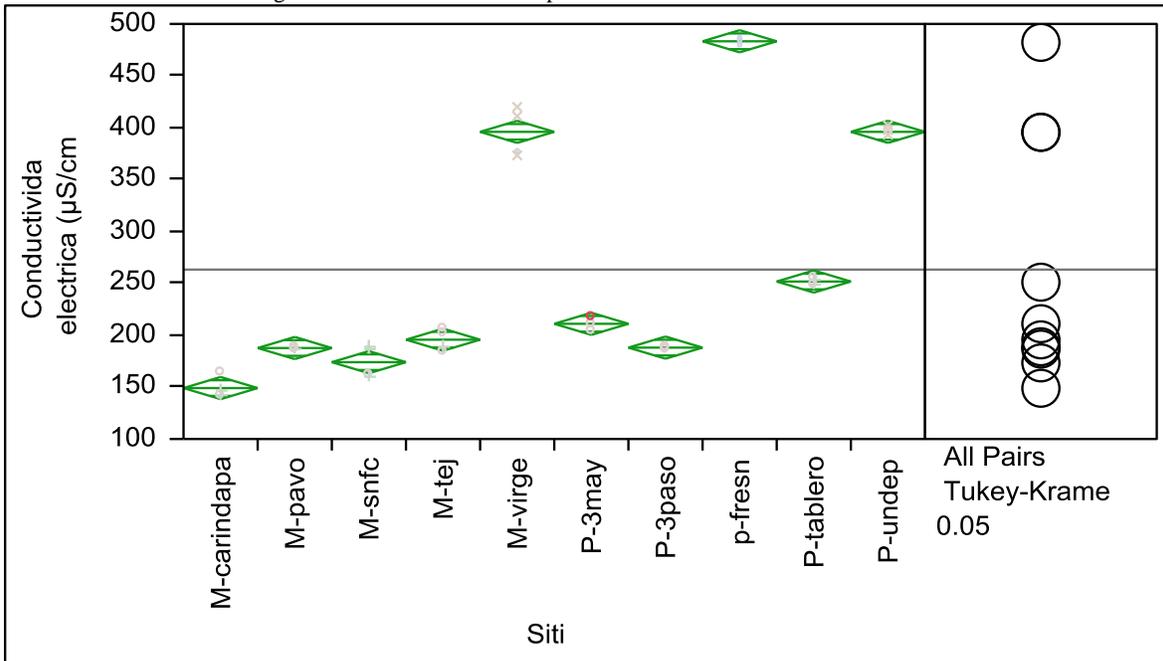
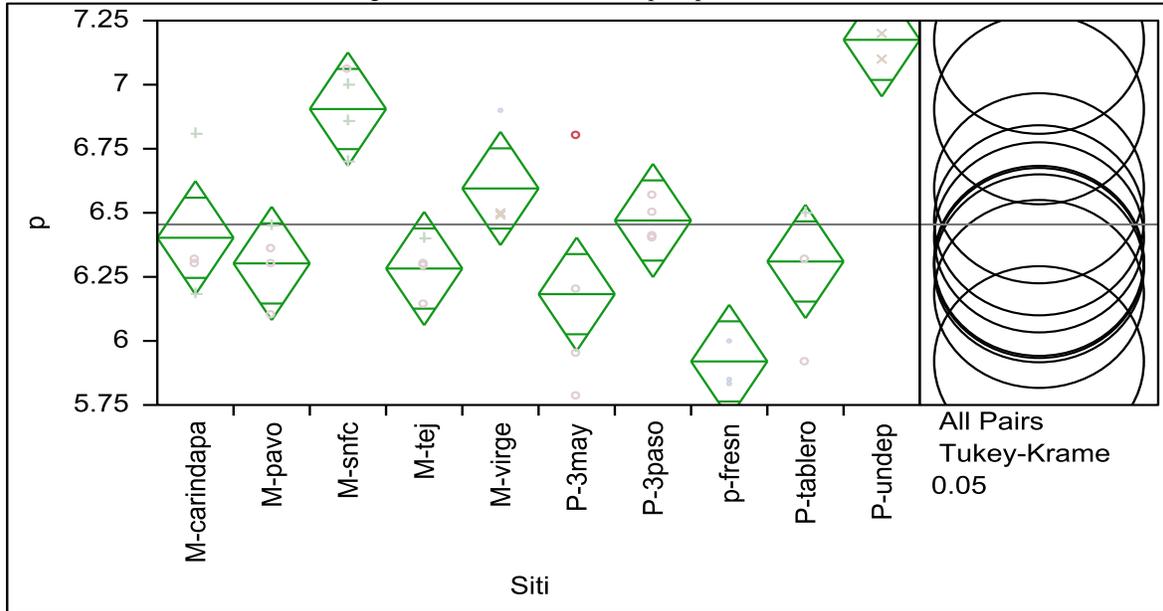
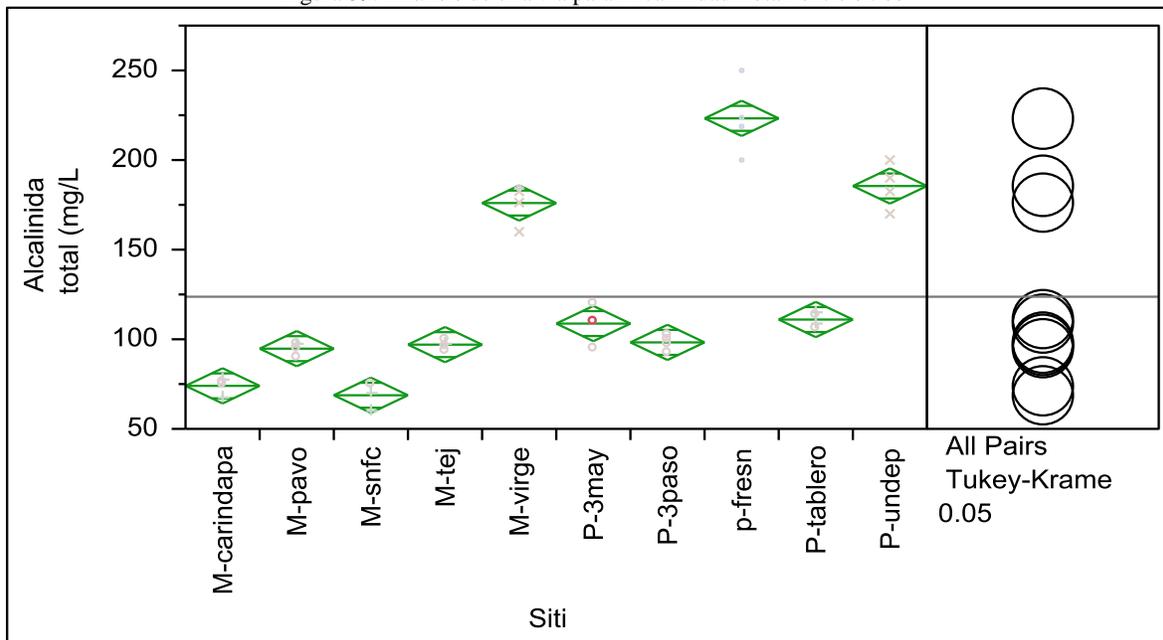


Figura 38. Análisis de una vía para pH entre sitios

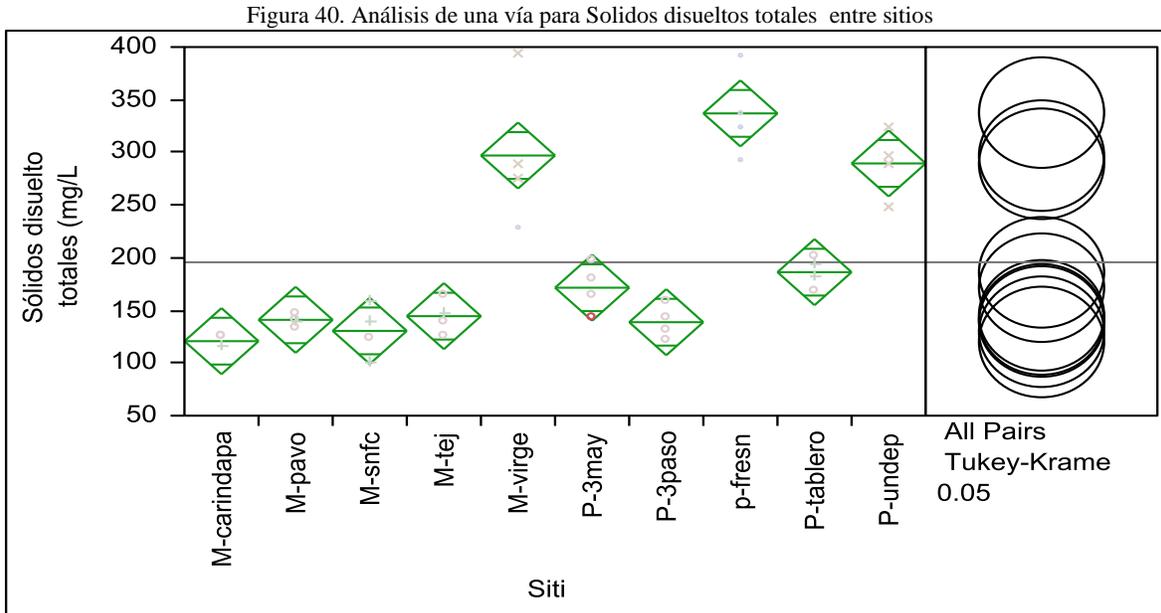


Los resultados para alcalinidad total (Figura 39) presentan diferencias estadísticas significativas con $p < 0.001^*$ para las medias respecto a los sitios de muestreo, el sitio P-fresno es diferente de los demás sitios, P-undepo y M-virgen son similares entre sí y distintos de los demás, P-tableros, P-3mayo y P-3pasos presentan similitudes entre sí, los dos últimos comparten características respecto a resultados de alcalinidad con M-teja y M-pavos, éstos con M-carindapaz, el sitio anterior es similar con M-snfc.

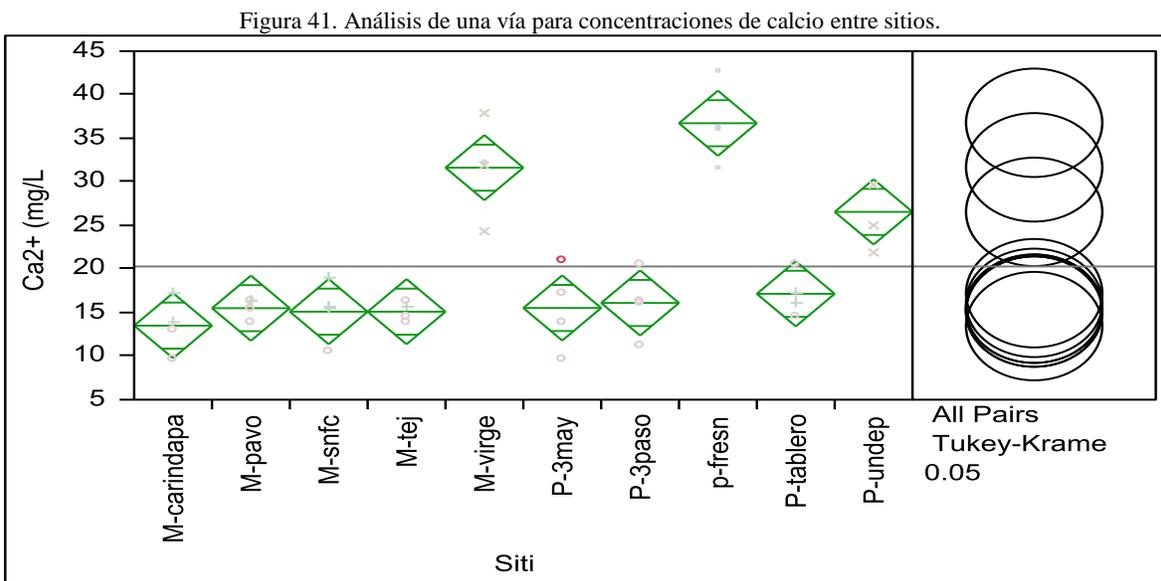
Figura 39. Análisis de una vía para Alcalinidad Total entre sitios



Para los sólidos disueltos totales con $p < 0.0001^*$ presentan diferencias significativas; los sitios P-fresno, M-virgen y P-undepo son estadísticamente similares entre sí y diferentes de los demás, respecto a sus medias. Los otros siete sitios son similares entre sí (Figura 40).

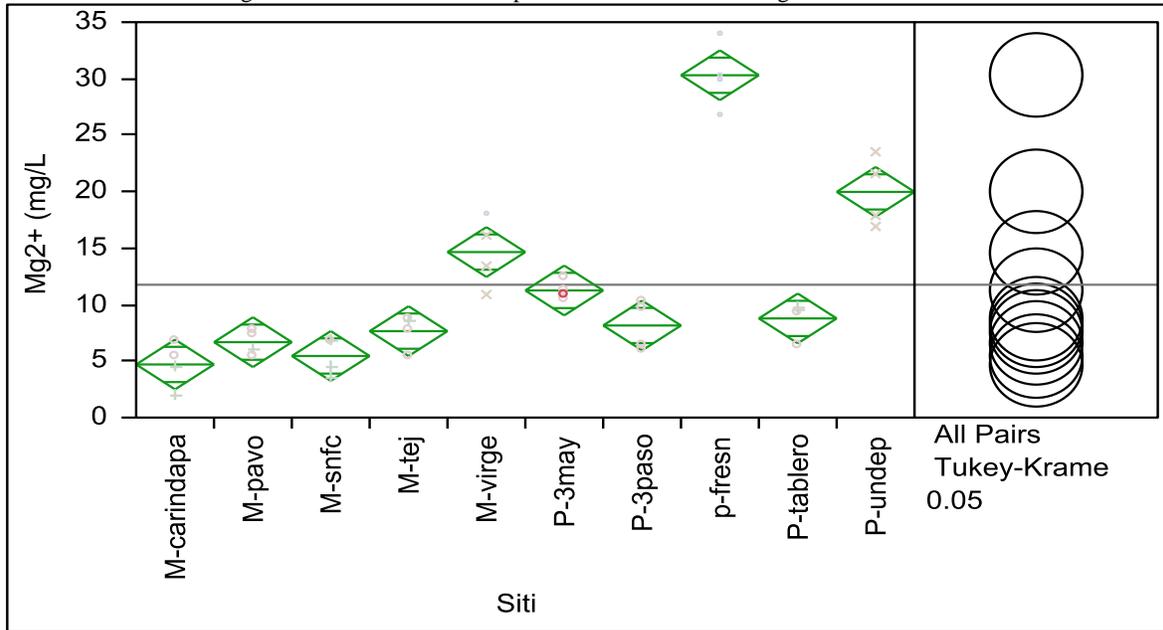


Las concentraciones de calcio obtenidas en los sitios de muestreo, presentan similitud en los sitios P-tableros, P-3pasos, P-3mayo, M-pavos, M-snfc, M-teja y M-carindapaz. Los sitios P-fresno y M-virgen presentan disimilitud estadística significativa con $p < 0.0001^*$ respecto a los otros sitios y éstos dos son similares entre sí, P-undepo también comparte semejanza con M-virgen (Figura 41).



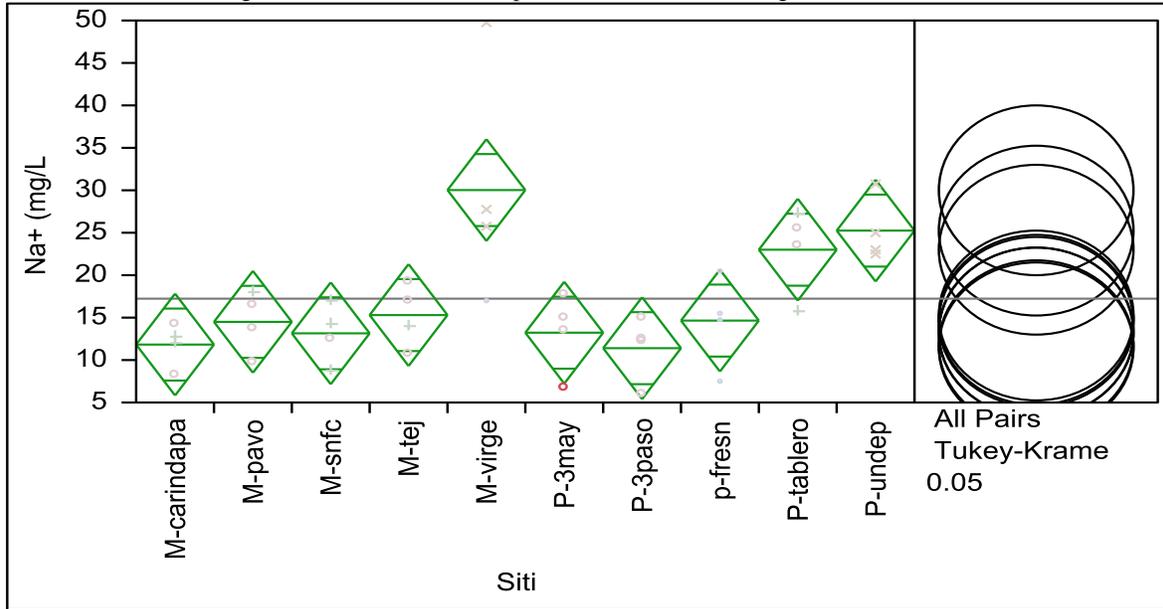
En relación a las concentraciones encontradas de magnesio, existen diferencias estadísticas significativas entre las medias de los sitios con $p < 0.0001^*$, reportándose (Figura 42) que los sitios P-fresno y P-undepo son distintos entre sí y de los demás sitios, M-virgen y P-3mayo son similares y éste último a su vez comparte semejanzas con P-tableros, P-3pasos, M-teja y M-pavos, los cuatro anteriores presentan también similitud con M-snfco y M-carindapaz.

Figura 42. Análisis de una vía para concentraciones de magnesio entre sitios.



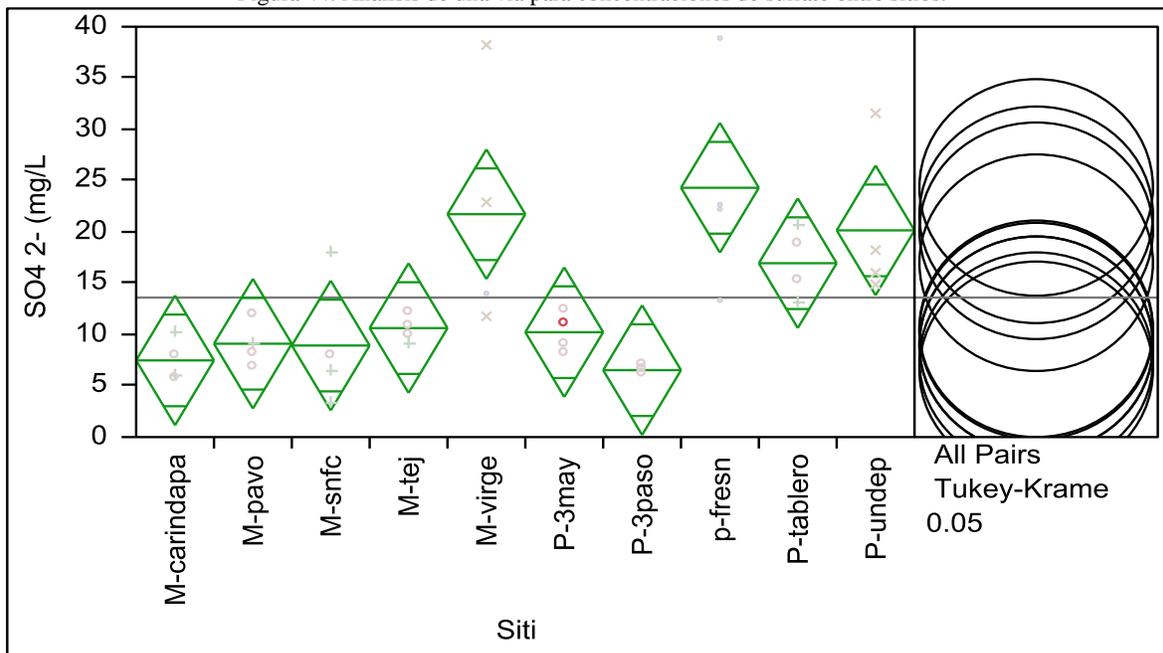
Con respecto al sodio presente en los sitios de estudio se muestran diferencias estadísticas con $p=0.0005^*$ entre las medias (figura 43) de algunos sitios; M-teja, P-fresno, M-pavos, P-3mayo, M-snfco, M-carindapaz y P-3pasos son similares entre sí y distintos de los demás sitios, aunque también comparten similitud con P-undepo y P-tableros, M-virgen es totalmente distinto de todos los sitios.

Figura 43. Análisis de una vía para concentraciones de magnesio entre sitios.

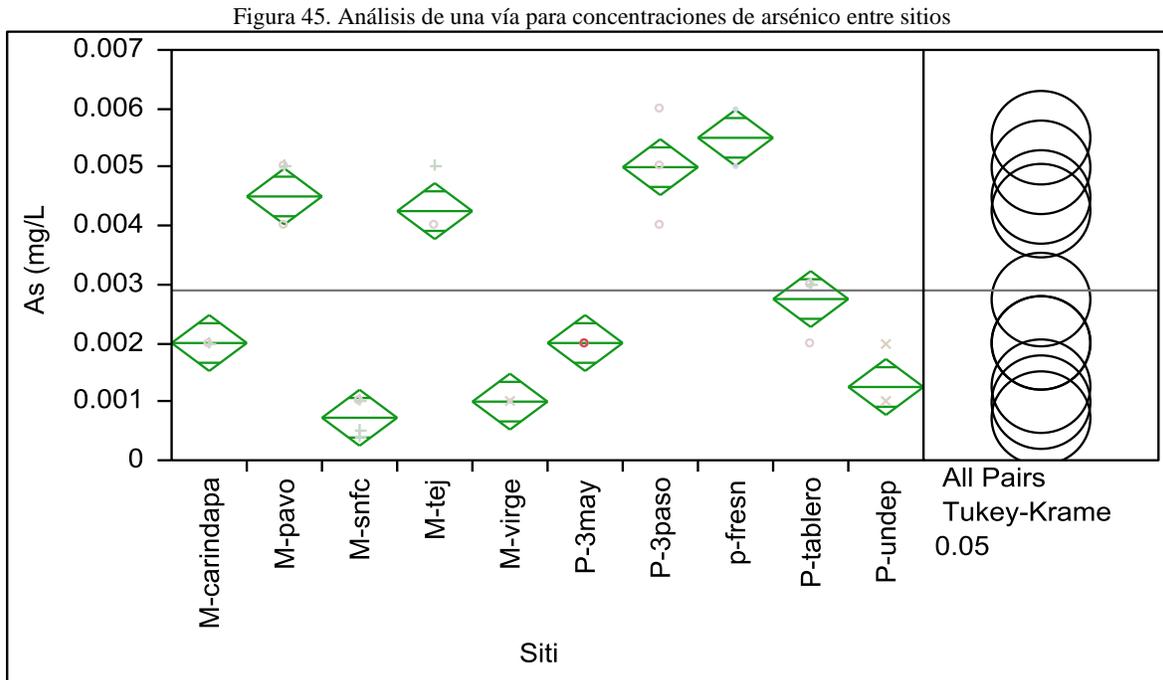


Dentro de los aniones, el sulfato de acuerdo a las concentraciones encontradas en los sitios, éstos son diferentes entre sí, respecto a las medias que presentan (Figura 44) siendo los sitios P-undepo, P-tableros, M-teja y P-3mayo similares entre sí, compartiendo semejanzas con M-pavos, M-snfc y M-carindapaz, P-3pasos y P-fresno son distintos entre sí, pero comparten similitudes con algunos sitios también. Diferencia significativa entre sitios con $p= 0.0009^*$.

Figura 44. Análisis de una vía para concentraciones de sulfato entre sitios.



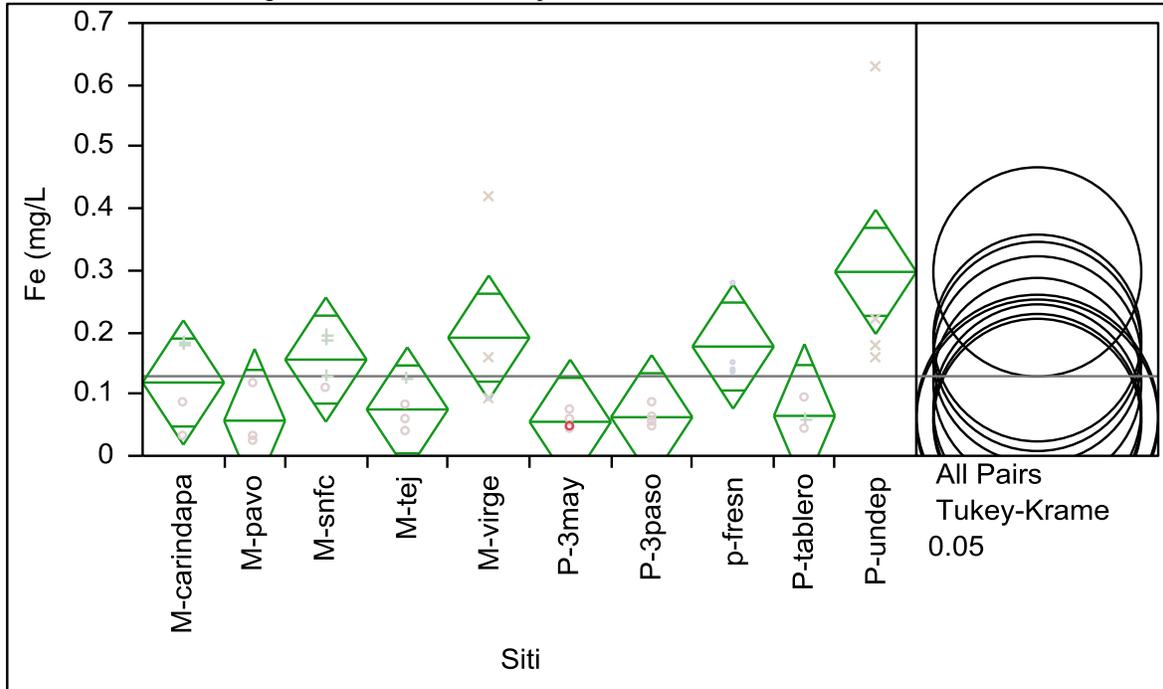
Acorde a las concentraciones de arsénico, se observa (Figura 45) la diferencia estadística significativa con $p < 0.0001^*$ en cuanto a las medias en los sitios P-fresno, P-3pasos, M-pavos y M-teja, los cuales son distintos a los demás sitios, pero similares entre ellos. P-tableros, M-carindapaz, P-3mayo, P-undepo y M-virgen son distintos a los anteriores y similares entre ellos, M-snfc sólo comparte similitudes con los dos últimos sitios mencionados.



El hierro muestra diferencia estadística significativa con $p = 0.0283^*$. En la Figura 46 se observa que los sitios P-undepo y P-3mayo son distintos entre sí de acuerdo a las medias entre sitios, sin embargo los demás sitios son similares entre sí y comparten similitudes con los dos mencionados.

De manera general se observa que de acuerdo al ANOVA y prueba de Tukey y Kramer, en cuanto a muestreos, el cuarto muestreo (Febrero-14) es donde existen más variaciones estadísticas entre las medias, en lo que respecta al análisis entre sitios; el sitio P-fresno es el que presenta mayor discrepancia estadística respecto de los demás sitios. Lo que sugiere que el sitio mencionado es estadísticamente distinto a los demás y en el mes de febrero se presentan variaciones respecto a los otros meses de muestreo, lo anterior para los parámetros que presentan diferencias estadísticas significativas.

Figura 46. Análisis de una vía para concentraciones de hierro entre sitios



4.2.3 Análisis de componentes principales

Se realizó el análisis de componentes principales partiendo de veinticuatro parámetros fisicoquímicos, de los cuales al final solo siete mostraron correlación significativa, representan un 95.099% del total entre la variabilidad de los datos.

La figura 47 muestra la matriz de coeficientes de correlación (r) para parámetros fisicoquímicos, Shuy *et al.* 2011 considera correlación fuerte entre dos parámetros si el valor del coeficiente de correlación es mayor a 0.7, si el valor de r está entre 0.5 y 0.7 indica moderada correlación con un nivel de significancia $p < 0.05$. Tomando como antecedente los valores mencionados, se considera entonces, que la conductividad eléctrica presenta asociación fuerte con la alcalinidad total ($r = 0.9716$), dureza total ($r = 0.9617$), sólidos disueltos ($r = 0.9473$).

Esta fuerte asociación se debe a que tanto los sólidos disueltos, como la alcalinidad definida principalmente por la presencia de iones bicarbonato, así como la dureza total que es la concentración de sales de calcio y magnesio, incrementan la concentración iónica.

La dureza total tiene correlación fuerte con la alcalinidad total ($r = 0.9702$), esto es por la presencia de bicarbonato de calcio. La temperatura del agua también presenta asociación fuerte con la

alcalinidad total ($r= 0.8959$), dureza total ($r= 0.8816$), conductividad eléctrica ($r= 0.8513$) y los sólidos disueltos totales ($r= 0.7795$), esta asociación es porque la temperatura favorece la disolución de la roca por la que atraviesa el agua cuando se infiltra en el suelo, y al disolverse da la generación de compuestos como bicarbonatos, calcio, magnesio; los cuales definen a los parámetros mencionados. Hay correlación fuerte importante de la alcalinidad total ($r= 0.8864$) y la dureza total ($r= 0.9473$) con los sólidos disueltos totales, la explicación es que tanto las sales de calcio y magnesio, así como el bicarbonato se encuentran disueltos en el agua.

Las correlaciones descritas anteriormente son positivas lineales, es decir directamente proporcionales. El oxígeno disuelto y el pH no mostraron correlaciones significativas para ningún parámetro. Pero se consideran importante porque permiten reacciones oxido-reducción en el sistema. Con lo anterior se puede comprobar que en ocasiones el análisis estadístico no se ajusta a los datos, por lo tanto con la discusión química se puede entender mejor el comportamiento de los datos.

Figura 47. Matriz coeficientes de correlación para parámetros fisicoquímicos.

	T agua (°C)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Dureza total (mg/L)	Alcalinidad total (mg/L)	Sólidos disueltos totales (mg/L)
T agua (°C)	1						
Conductividad eléctrica (μS/cm)	0.8513	1					
Oxígeno disuelto (mg/L)	-0.4789	-0.4187	1				
pH	0.032	-0.0057	0.1088	1			
Dureza total (mg/L)	0.8816	0.9617	-0.4077	-0.0673	1		
Alcalinidad total (mg/L)	0.8959	0.9716	-0.4477	-0.0325	0.9702	1	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	0.7795	0.9473	-0.2864	-0.0458	0.878	0.8864	1

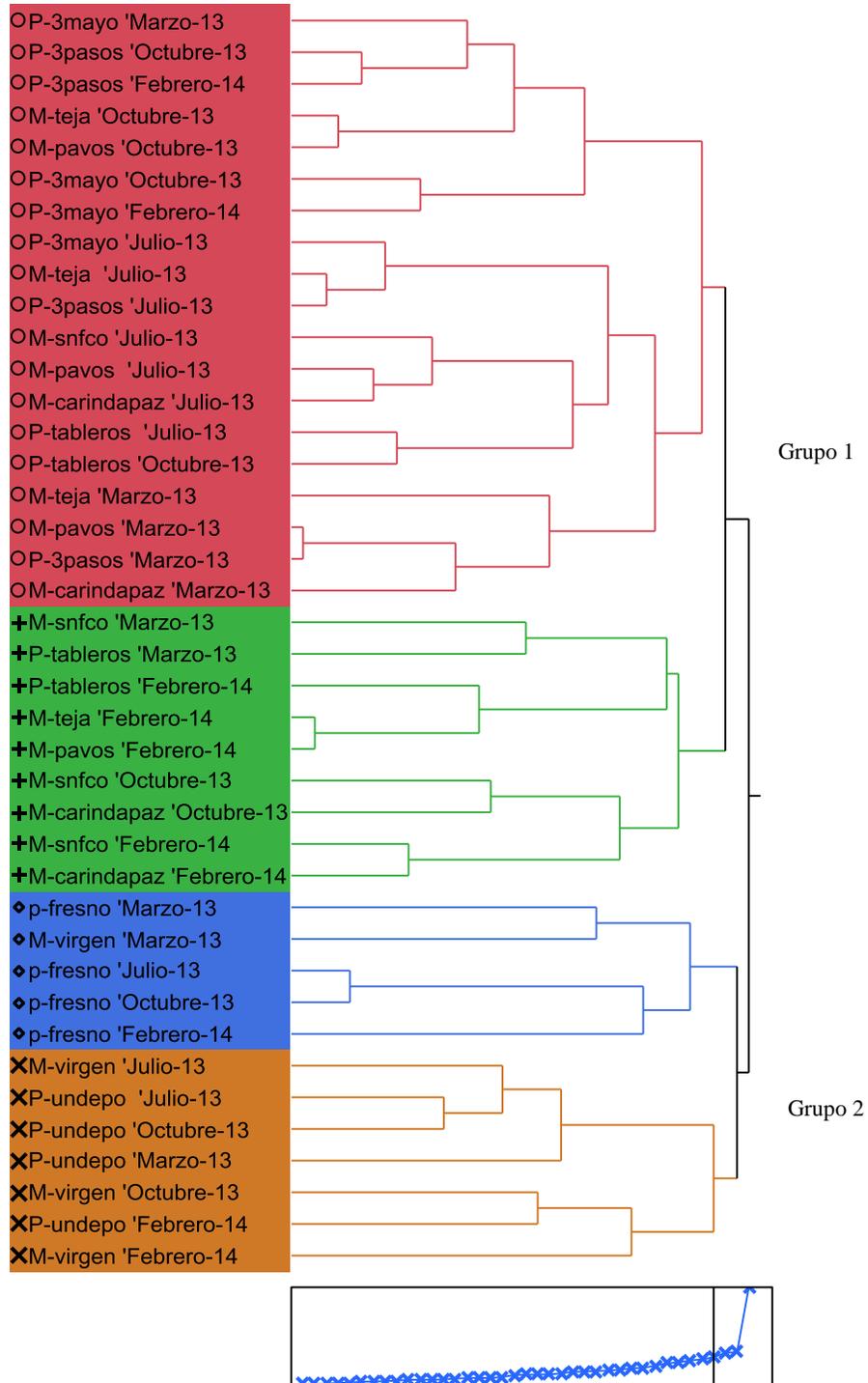
4.2.4 Análisis Clúster

4.2.4.1 Clúster de fisicoquímicos

Se realizó el análisis clúster modo R, que permite agrupar a los sitios en grupos de acuerdo a las similitudes de los parámetros fisicoquímicos; temperatura del agua y el ambiente, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, dureza total, dureza cálcica y magnésica, alcalinidad total, sólidos

totales, solidos suspendidos totales y solidos disueltos totales, color, turbiedad, coliformes fecales, los iones; Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- . La figura 48 muestra el resultado del análisis.

Figura 48. Análisis Clúster modo R de parámetros fisicoquímicos.



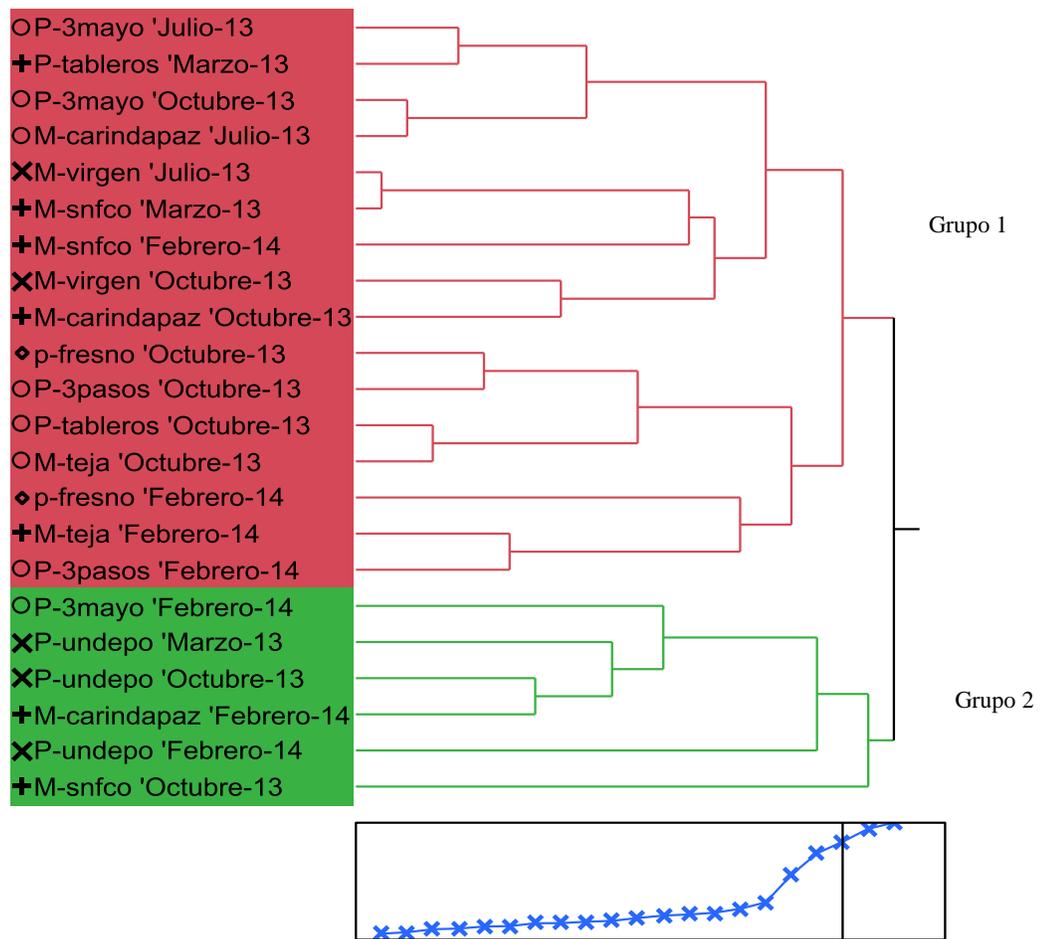
Se distinguen dos grupos principales, los cuales se dividen en dos subgrupos. El primer grupo engloba siete sitios de estudio que de manera general presentan valores similares para los parámetros fisicoquímicos y el segundo grupo a tres. Estos últimos son los sitios que presentan las concentraciones más elevadas para todos los parámetros, se observa que el sitio P-fresno forma un subgrupo de manera particular junto con el M-virgen en el mes de marzo, esto se debe a que P-fresno es el sitio con las concentraciones máximas encontradas para la mayoría de los parámetros y el M-virgen en ese mes de muestreo presentó elevadas concentraciones.

4.2.4.2 Clúster para As, F, B y Fe

Se construyó el clúster modo R para las concentraciones de As, F, B y Fe presentes en los sitios de estudio durante la campaña de muestreos (Figura 49), de un total de 40 datos se incluyen 24, ya que se excluyen algunos sitios por falta de datos en algún parámetro, se distinguen dos grupos principales, el mayor (grupo 1) agrupa 16 datos, los cuales presentan concentraciones similares para los cuatro elementos químicos.

El grupo menor (grupo 2) con 6 datos difiere del otro grupo porque el sitio P-undepo presenta las concentraciones elevadas de B, F y Fe, en este grupo también se incluye el sitio P-3mayo y M-carindapaz en el mes de febrero, posiblemente por la asociación con P-undepo de alta concentración de F respecto a los muestreos anteriores. El sitio M-snfco durante octubre, es parte del grupo 2 porque presenta la máxima concentración de B reportada, así como concentración similar de Fe con M-carindapaz en febrero.

Figura 49. Análisis Clúster modo R para As, F, B y Fe.



CONCLUSIONES

- Este estudio permite establecer un diagnóstico sobre la calidad del agua en la zona de estudio, siendo de gran utilidad para la población de la comunidad ya que no se cuenta con un estudio publicado de esta índole.
- Las concentraciones de arsénico, flúor y boro presentes en las muestras de agua no superan los valores establecidos por la normatividad nacional (NOM-127-SSA1-1994) e internacional (OMS y EPA).
- El agua en los diez sitios de estudio (pozos y manantiales) excede el límite máximo permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para los coliformes fecales, el pH y hierro, el último únicamente excede el límite máximo permisible para los sitios M-virgen y P-undepo (0.42 y 0.63 mg/L respectivamente) durante el cuarto muestreo. No se detectó la presencia de otros metales pesados en concentraciones superiores a las recomendadas por la Normatividad Mexicana.
- La presencia de los organismos coliformes sugiere que existe una fuente cercana y continua de contaminación fecal a los sitios, el sitio M-carindapaz presentó las máximas concentraciones de organismos coliformes (34 NMP durante el mes de octubre), sin embargo el agua de este manantial sí pasa por un proceso de desinfección.
- El pH está por debajo del rango establecido por la normatividad mexicana para ocho sitios, con el valor mínimo registrado de 5.78 en el sitio P-3mayo durante el mes de octubre, lo que indica que el agua en esos ocho sitios es ligeramente ácida.
- No se observan diferencias en cuanto a concentraciones de parámetros fisicoquímicos entre el agua de pozos y manantiales.
- El sitio P-fresno presenta las concentraciones máximas encontradas de parámetros fisicoquímicos durante el período de estudio.
- En la especiación química para As y Fe, se observa que no son especies químicas tóxicas para la población que utiliza el agua en la zona. El As se encuentra en estado de oxidación (V) y el Fe en estado de oxidación (III), éste se observa, deriva principalmente de óxidos, ambas especies se encuentran en disolución, el Fe en disolución coloidal.
- Se detectó la presencia de As, F y B, encontrándose en el sitio P-undepo las máximas de F (0.82 mg/L), en el sitio P-fresno y P-3pasos las máximas de As (0.006 mg/L para ambos

sitios durante el mes de febrero), para el B se reportan las máximas concentraciones en el sitio P-undepo (0.03 mg/L en el mes de octubre).

- Al construir el diagrama de Piper se concluye que todos los sitios pertenecen a la misma facie hidrogeoquímica (bicarbonatada sódica cálcica), y por ende al mismo acuífero.
- El tipo de agua encontrado en la zona sugiere es de reciente infiltración, por lo tanto considerar si el acuífero que abastece a los pozos y manantiales está en proceso de sobre explotación.
- El ICA realizado muestra que el agua en la zona es de excelente calidad, de acuerdo a las fórmulas utilizadas.
- Durante el mes de febrero se alcanzan las concentraciones máximas de oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- y As, para la mayoría de los sitios.
- Con el análisis estadístico se puede concluir que los sitios P-fresno, P-undepo y M-virgen son estadísticamente distintos a los demás sitios y similares entre ellos, en el análisis clúster se observa cómo forman un subgrupo.
- El mes de febrero es estadísticamente distinto a los demás, de acuerdo con el ANOVA y prueba de Tukey-Kramer, esto puede deberse a que es el mes que presenta las temperaturas mínimas registradas en la mayoría de sitios.

RECOMENDACIONES

- Es de suma importancia continuar con el monitoreo de los sitios analizados y de ser posible monitorear todos los sitios que abastecen a la población.
- Continuar con el análisis de parámetros fisicoquímicos, metales pesados y bacteriológicos, en particular monitorear los elementos químicos; As, F y B.
- Realizar estudios geológicos, geoquímicos, hidroquímicos, entre otros, con el propósito de entender el comportamiento y origen de las especies químicas; As, F, B. Así como la co-ocurrencia que pueden tener.
- Monitorear principalmente a los sitios P-fresno, P-undepo y M-virgen.
- Identificar las fuentes potenciales de contaminación fecal en los sitios que presentan organismos coliformes, principalmente en M-carindapaz, con la finalidad de disminuir o eliminar el índice de organismos coliformes.
- Realizar el cálculo del ICA con datos de al menos diez años para corroborar el índice obtenido en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acosta R.I., González S.H., Moctezuma Z.M., Cárdenas G.J., Martínez J.V. (2012). “*Remoción de Cromo (VI) en solución por la cascara de naranja (citrus sinensis Osbeck)*” Revista Académica de Investigación.
- Agudelo C. (2005). “*El agua, recurso estratégico del siglo XXI*”. Revista de la Facultad Nacional de Salud Pública. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. (23) 1 91-102.
- Alarcón-Herrera M.T., Bundschuh J., Nath B., Nicolli H.B., Gutiérrez M., Reyes-Gómez V.M., Núñez D., Martín-Domínguez I.R. (2012). “*Co-ocurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation*”. Journal of Hazardous Materials.
- Alfaro, R.; Segovia, N.; Peña, P.; López, M.B.E.; Armienta, M.A.; Rangel, J. y Seidel, J.L. (2002). “*Radon behavior in springs and wells around Cuitzeo Lake, Lerma River basin*”. Geofísica Internacional, 41(4): 439-445.
- APHA-AWWA-WPCF. (1995). “*Methods for the examination of water*”. 19ª edición. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation. (WPCF). Washington.
- Arango S.D.P., Martínez D.C., Vargas B.T. (2008) “*Uso de hidroquinona e isotopos ambientales para la evaluación de la conexión hidrológica entre el agua subterránea y el humedal ciénaga Colombia*”. Gestión y Ambiente vol.11, núm. 2, p. 21-37.
- Armienta, M. A.; Zamora, V. y Juárez, F. (1994). “*Manual para el análisis químico de aguas naturales, en el campo y en el laboratorio*”. Comunicaciones Técnicas. Serie de docencia y divulgación No. 4. IGFUNAM.
- Armienta M.A., y Segovia N. (2008). “*Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico*”. Environ Geochem Health 30:345-353.
- Bonte M., Breukelen B.M., Stuyfzand P.J. (2013). “*Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production*”. Water Research 47 5088-5100.
- Borbolla S.M., Vázquez L. Gutiérrez O., Gutiérrez J., Garrido S. (2003). “*Calidad del Agua en Tabasco*”. Secretaria del Estado de Tabasco, Villahermosa, México 001(9) 170-177.
- Buenrostro O. e Israde I. (2003). “*La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del Lago de Cuitzeo, México*” Rev. Int. Contam. Ambient. 19 (4) 161-169.
- Bundschuh J., Litter M., Ciminelli V., Morgada M.E., Cornejo L., Garrido H.S., Hoinkis J., Alarcón-Herrera M.T., Armienta M.A., Bhattacharya P. (2010). “*Emergin mitigation needs and sustainable options for solving the arsenic problems of rural and isolated urban áreas in Latin America – A critical analysis*”. Water Research (44) 5828-5845.

- Bundschuh J., Litter M., Parvez F., Román-Ross G., Nicolli H.B., Jean J-S., Liu C-W., López D., Armienta M., Guilherme L., Cuevas A., Cornejo L., Cumbal L., Toujaguez R. (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.
- Cañizares V. R. (2000). “*Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana*”. Revista Latinoamericana de Microbiología (42) 131-143.
- Cárdenas G.F., Acosta R.I. (2010). “*Remoción de Cromo Hexavalente por el Hongo Paecilomyces sp. Aislado del medio ambiente*”. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Centro de Investigación y de Estudios de Posgrado. 22 (1). 9-16 2011.
- Castro de E. M.L. (2006). “*Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública*”. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, Perú. International Congress Mexico city.
- Cervantes C., Sánchez M.R., (1999). “*Contaminación Ambiental por metales pesados. Impacto en los seres vivos*”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Químico – Biológicas, Morelia Michoacán. 1era reimpresión 2007. Pp 157.
- Chacón G. L., Molina F.N., Oropeza O.A., Gaona E., Juárez L.L (2011). “*Análisis de la concentración de fluoruro en agua potable de la delegación Tláhuac, Ciudad de México*”. Contaminación Ambiental 27(4) 283-289.
- Chávez Soto M.J. (2010). “*Evaluación del Riesgo por la presencia de contaminantes en agua destinada al uso y consumo humano del acuífero del Valle del Guadiana*”. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Instituto Politécnico Nacional (IPN) Tesis de Maestría, Durango Dgo. México.
- CNA (1999). Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua.
- CNA (2007). Comisión Nacional del Agua. “*Diseño de plantas potabilizadoras tipo tecnología simplificada*” Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México D.F. pp 329
- CONAGUA (2004). Comisión Nacional del Agua. “*Estadísticas del agua en México*” México D.F
- CONAGUA (2010). Comisión Nacional del Agua. “*Estadísticas del agua en México*” Capitulo 8. México D.F.
- Contreras L.A., y Molero M.M. (2009). “*Ciencia y Tecnología del Medioambiente*” Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED. Madrid España. pp 383
- Contreras C.T, Vargas I., Badilla E. (2012). “*Hydrochemical and isotopic properties of the groundwater in the middle part of the Tulián River watershed, Puerto Cortes, Honduras*”. Revista Geologica de America central 46:179-188.
- Corroto C., Pérez C.A., Calderón E., Fernández C. (2006). “*Alternativas de Remoción de Arsénico en Aguas de Rechazo de Plantas de Osmosis Inversa*” CETA (centro de Estudios

Transdisciplinarios del Agua) Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires.

Davis M., Masten S. (2005). *“Ingeniería y ciencias Ambientales”* Editorial McGraw-Hill Interamericana pp 749.

Deutsch W.J. (1997). “Groundwater geochemistry fundamentals and applications to contamination”. International Standard Book Number 0-87371-308-7.

DOF (1981). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-046-1981. Determinación de Arsénico. México.

DOF (1981a). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-074-1981. Determinación del Ion Sulfato. México.

DOF (1993). Diario Oficial de la Federación. 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. México.

DOF (1994). Diario Oficial de la Federación. NOM-127-SSAI-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. México.

DOF (2000). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-093-SCFI-2000. Determinación de la Conductividad Electrolítica- Método de Prueba. México.

DOF (2000a). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-007-SCFI-2000. Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.

DOF (2001). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-063-SCFI-2001. Determinación de boro en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. México.

DOF (2001a). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-073-SCFI-2001. Determinación de Cloruros Totales en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas- Método de Prueba. México.

DOF (2001b). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-077-SCFI-2001. Determinación de Fluoruros en Aguas Naturales, Residuales y Residuales tratadas. México.

DOF (2001c). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-051-SCFI-2001. Determinación de Metales por Absorción Atómica en Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas – Método de Prueba.

DOF (2001d). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-028-SCFI-2001. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas- Método de Prueba. México.

DOF (2001e). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-036-SCFI-2001. Determinación de Acidez y Alcalinidad en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas- Método de Prueba. México.

- DOF (2001f). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-072-SCFI-2001. Determinación de Dureza Total en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas- Método de Prueba. México.
- DOF (2002). Diario Oficial de la Federación. NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. México.
- DOF (2006). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-102-SCFI-2006. Detección y enumeración de organismos Coliformes, organismos Coliformes termotolerantes y Escherichia coli presuntiva-Método de filtración en membrana. México.
- DOF (2007). Diario Oficial de la federación. NOM-014- CONAGUA-2007. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- Doménech X., Peral P. (2006). *“Química Ambiental de los sistemas terrestres”* Editorial Reverté pp 229.
- Edmunds W.M., Shand P., Hart P., Ward R.S. (2003). *“The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study”* The Science of the Total Environment (310) 25-35
- Etxabe Z.I., Cotín C.K., Olalde O.C., y Alonso V.J. (2010). *“Cesión de plomo y otros metales desde las tuberías al agua de consumo en la Comunidad Autónoma del País Vasco”* Gac. Sanitaria 24(6) pp 460 – 465.
- Esparza M.L. y Medina M.W. (1998). *“Abatimiento de Arsénico en Aguas Subterráneas para zonas rurales”* XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Fagundo C.J.R., Monteagudo Z.V., Rodríguez P.M., Perez L.T., González H.P., Suarez M.M, Melián R.C., Abraham A.A. (2007). *“Geoquímica de la aguas subterráneas que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno”*. Revista de Geociencias.
- Foster S., Hirata R., Gomes D., Mónica D., Paris M. (2002). *“Protección de la Calidad del Agua Subterránea”* Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. pp127.
- Galvín M.R. (2003). *“Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos, tratamiento y control de calidad de aguas”* Ed. Díaz de santos. Madrid España pp 310.
- Ghosh A., Kakali M., Ghosh S.K., Bidyut s. (2012). *“Sources and toxicity of fluoride in the environment”* Springer Science- Bussines Media Dordrecht, Res Chem Intermed 10(1007).
- He X., Wang Y., Shan H., Deng Y., (2013) *“Hydrogeochemistry of high fluoride groundwater in shallow aquifers, Hangjinhouqi, Hetao Plain”* Journal of Geochemical Exploration 135 (2013) 63-70.
- INAFED (2010). Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_michoacan (Accesada 03 de Enero 2013).

- INEGI (2000). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “*Los Análisis físico y químicos en la cartografía hidrología del INEGI*” 2000 México D.F.
- INEGI (2009). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “*Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*” Hidalgo, Michoacán de Ocampo, Clave geoestadística 16034.
- Israde A.I. y Garduño M. V.H. (1999). “*Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central-western Mexico, Michoacán)*”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 151 209-227.
- Jang-Soon K., Seong-Taek Y., Jong-Hwa L., Soon-Oh K., Ho Y.J. (2009). “*Removal of divalent heavy metals from aqueous solutions using scoria: Kinetics and equilibria of sorption*” *Journal Hazardous Materials* (174) 307-313.
- Jiménez B.E. (2001). “*La Contaminación ambiental en México. Causas, efectos y la tecnología apropiada*” Ed. Limusa. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. Pp 911
- Karro E., y Uppin M., (2013) “*The occurrence and hydrochemistry of fluoride and boron in carbonate aquifer system, central and western Estonia*” *Environ Monit Assess* 185:3735-3748.
- Lacasaña M., Romieu I., McConnell R. (1996). “*El problema de exposición al Plomo en América Latina y el Caribe*” Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de Salud y Organización Mundial de la Salud.
- López- Álvarez B., Ramos-Leal J.A., Moran- Ramírez J., Cardona B.A., y Hernández G. G. (2013). “*Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí?*” *Sociedad Geológica Mexicana* 65 (1) pp 9-26.
- Manahan S.E. (2007). “*Introducción a la química ambiental*” Ed. Reverté. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. pp 725
- Martin Lara Ma. A., (2008). “*Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados*” Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química pp 347.
- Meenakshi, Maheshwari R.C. (2006) “*fluoride in drinking water and its removal*” *Journal of Hazardous Materials* (B137) 456-463
- Meenakshi, Garg V.K., Kavita, Renuka, Malik A. (2004) “*Groundwater quality in some villages of Haryana, India: focus on fluoride and fluorosis*” *Journal of Hazardous Materials* (106B) 85-79
- Mesa J., Bravo A., Morales J., Sánchez L., Valle P., Gutiérrez E., Ledo H. (2007). “*Content of trace metals in groundwater from western región of Maracaibo Lake, Venezuela*” *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia* (30).

- Momodu M.A y Anyakora C.A. (2010). “*Heavy metal contamination of ground water: the Surulere Case Study*” Research Journal Enviromental and Earth Sciences 2 (1): 39-43
- Moore J.W., (1991). “*Inorganic Contaminants of surface water*” Sringer-Verlag, New York. Pp 64-81.
- Morán R.J, Leal R.J.A., Álvarez L.B., Lozada C.S., De León S.G. (2013) “*Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso Huasteca Potosina*”. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol 65, No. 1, p. 71-82.
- Nagaraju A., Sunil Kumar K., Thejaswi A., Shafari Z. (2014). “*Statistical Analysis of the Hydrogeochemical Evolution of groundwater in the Rangampeta área, Chitoor District, Andra Pradesh, south India*”. American Journal of Water Resources, Vol 2, No. 3, 63-70.
- Nissen M.J., Garay V.M., Aguilera M.A. (2000). “*Calidad de aguas subterráneas de la décima región de chile*”. *Agro sur*, vol.28, no.1, p.25-39.
- Olguín E. et al. (2010). *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal, RELBAA*. Vol 1, No. 2.
- Olmos R.R., Villalobos M.R., Villalobos M.F. (2003). “*El agua en el medio ambiente, Muestreo y análisis*” Universidad Autónoma de Baja California, primera Edición, Editado por Plaza y Valdés, México pp 189.
- OMS (2004). Organización Mundial de la Salud “*Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud*”.
- OMS (2005). Organización Mundial de la Salud “*Agua, Saneamiento y Salud*” Departamento de Salud Pública y Medio Ambiente. Ginebra, Suiza.
- OMS (2006). Organización Mundial de la Salud “*Mitigación de los efectos del arsénico presente en las aguas subterráneas*”.
- OMS (2006a). Organización Mundial de la Salud. “*Guías para la calidad del agua potable*”. Primer apéndice a la tercera edición, volumen 1. pp 408.
- OMS (2010). Organización Mundial de la Salud “*Salud Pública y Medio Ambiente*” Ginebra, Suiza.
- Ömer A., Melek T.S. , Ayten K.E. (2008). “*Water quality and heavy metal monitoring in water and sediment samples of the Küçükçekmece Lagoon, Turkey*” Springer science, Istanbul, Turkey.
- Ortega G.A. (2009). “*Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de Cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México*” *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(1) pp 143-161.

- Páez S.A., (2008). *“Evaluación de la Concentración de As y calidad del Agua Subterránea en Función de su manejo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán”* Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia Michoacán México pp 74.
- Pacheco A.J., Cabrera A., Marín L.E., (2000). *“Bacteriological contamination in the karstic aquifer of Yucatán, México”* Geofísica Internacional 39 (3) pp 285-291.
- Palmucci W y Rusi S. (2014). *“Boron-rich groundwater in Central Eastern Italy: a hydrogeochemical and statistical approach to define origin and distribution”* Environ Earth Sci.
- Panigatti C., Torres J.M., Griffa C., Boglione R., (2003). *“Biorremediación de Efluentes con Cromo (VI) proveniente de plantas metalmeccánicas”* Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe Argentina.
- Patil V.T. y Patil P.R. (2013). *“Groundwater quality status using water quality index in Amalner town, Maharashtra”*. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 5(5):67-71.
- Peña H.Y., De León S.G., Salazar C.H. (2012). *“Water Quality in wells of the network of monitoring of the aquifer in the valley of San Luis Potosí, Mexico”*. Aqua-LAC-vol.4, no. 1, p 49-59.
- Peters A.C. (2001). *“Statistics for Analysis of Experimental Data”*. Department of civil and Environmental Engineering, Princeton University, NJ 08544.
- Price M. (2007). *“Agua subterránea”*. Limusa, Ciudad de México, 330 pp.
- Prieto Bolívar C.J. (2004). *“El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación”* ECOE ediciones, 2da edición Pp 380 Bogotá.
- Ramakrishnaiah C.R., Sadashivaiah C., Ranganna G. (2009). *“Assesment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India”*. E-Journal of Chemistry, 6(2), 523-530.
- Ramalho R.S. (1996). *“Tratamiento de Aguas Residuales”* Edición revisada, Editorial Reverté. Reimpresión 2003, Barcelona España pp 696.
- Ramírez E., Robles E., Sainz G., Ayala R y Campoy E. (2009). *“Microbiological quality of the Zacatepec aquifer, Morelos, Mexico”* Contaminación Ambiental (24) México.
- Reyes G.V.M., Alarcón H.M.A., Gutiérrez M., Núñez L.D., (2013). *“Fluoride an Arsenic in an Alluvial Aquifer System in Chihuahua, Mexico: Contaminant Levels, Potential Sources, and Co-ocurrence”* Water Air Soil Pollut 224:1433.
- Reyes N.M., Alvarado A.I., Antuna D.M., González V.L., Vázquez A.E., García V.A. (2011). *“Calidad en la determinación de Fluoruros en agua de Consumo Humano”* Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Durango Dgo., México.

- Restrepo Fraume N.J. (2007) "Diccionario Ambiental" Editorial ECOE Ediciones, primera edición pp 468.
- Restrepo I, Sánchez D., Galvis A., Rojas J., Sanabria I. (2007). "*Avances en Investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio*" Ed. Universidad del Valle. Primera Edición, Cali Colombia pp 577.
- Revuelta C.C., Álvarez B.J., Benítez A.M., Díez M.P., Rodríguez B.S. (2003). "*Contaminación por As en aguas subterráneas en la provincia de Valladolid: variaciones estacionales*" Instituto tecnológico Agrario de Castilla y León, Departamento de Ingeniería Química (VI).
- Romero F.J. (1974). "*Nomenclatura Geográfica de Michoacán*" Investigaciones Lingüísticas, Morelia, Michoacán.
- Romić Ž., Habuda-Stanić M., Kalajdžić B., Kuleš M. (2011). "*Arsenic distribution, concentration and speciation in groundwater of the Osijek area, eastern Croatia*". Applied Geochemistry 26 37-44.
- Samboni R.N., Carvajal E.Y, Escobar J. (2007). "A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators" Universidad Nacional de Colombia 27 (003) 127-181.
- Sappa G., Ergul S., Ferranti F. (2014). "*Geochemical modeling and multivariate statistical evaluation of trace elements in arsenic contaminated groundwater systems of Viterbo Area, (Central Italy)*". SpringerPlus 3:237
- Shyu G.S., Cheng B.Y., Chiang C.T., Yao P.H., Chang T.K. (2011). "*Applying Factor Analysis Combined with Kriging and Information Entropy Theory for Mapping and Evaluating the Stability of Groundwater Quality Variation in Taiwan*". Int. J. Environ Res. Public Health, 8, 1084-1109.
- SEMARNAT (2011). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. "Estadísticas del agua en México" México D.F.
- Sedykh E.M., Starshinova N.P., Bannykh L.N., Ershova E. Yu., Venitsianov E.V. (2000). "*Using Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry and Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry*" Journal of Analytical Chemistry 55 (4) pp 385-391.
- Sorg T. J., Chen A.S.C., Wang L. (2014). "Arsenic species in drinking water wells in the USA with high arsenic concentrations". Water Research 48 156-169.
- Subyani A.M y Al Ahmadi M.E. (2009). "Multivariate statistical of groundwater quality in Wadi Ranyah, Saudi Arabia". Earth Sci., Vol 21, No. 2 pp (29-46).
- Tipping E., Lofts S., Lawlor A.J., (1998). "Modelling the chemical speciation of trace metals in the surface waters of the Humber system". The Science of the Total Environment 210/211 63-77.
- Velázquez M.A., Pimentel J.L., Ortega M. (2011). "*Estudio de la distribución de boro en fuentes de la cuenca del río Duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado*"

Universidad Autónoma de México (UNAM), Revista Internacional de Contaminación Ambiental (27) 1 pp. 19-30.

Voet D., Voet J.G. (2006). “*Bioquímica*” Editorial Médica Panamericana, 3^{ra} edición. Argentina pp 1776.

Walpole E.R. y Myers H.R. (1992). “*Probabilidad y Estadística para Ingenieros*”. Editorial McGraw Hill, 4ta Edición. Mexico pp 486,508,409,410.

WHO (2004). World Health Organization. “*Chemical safety for drinking-water*”.

WHO (2006). World Health Organization.”*Protecting Groundwater for Health” Managing the Quality of Drinking-water sources*”. London.

WHO (2008). World Health Organization. “*Guidelines for drinking-water quality*” 3era edición. Geneva.

WHO (2011). World Health Organization. “*Guidelines for drinking-water quality*” 4ta edición

Yazbeck C., Kloppmann W., Cottier R., Sahuquillo J., Debotte G., Huel G. (2005) “*Health impact evaluation of boron in drinking water: a geographical risk assessment in Northern France*”. Environmental Geochemistry and Health 27:419-427.

ANEXOS

Anexo 1. Valores de parámetros *in situ*

Tabla 10. Valores de parámetros *in situ*

<i>SITIO</i>	<i>Muestreo</i>	<i>T agua</i> (°C)	<i>Conductividad</i> <i>eléctrica</i> (μ S/cm)	<i>Oxígeno</i> <i>disuelto</i> (mg/L)	<i>pH</i>
P-3mayo	Marzo-13	22	217	3.4	6.8
	Julio-13	20.5	211	2.53	5.95
	Octubre-13	21.3	205	4.20	5.78
	Febrero-14	21.2	211	4.25	6.2
P-fresno	Marzo-13	25	483	1.8	6
	Julio-13	24.6	486	1.99	5.83
	Octubre-13	26.4	480	2.19	6
	Febrero-14	24.4	484	2.25	5.85
M-virgen	Marzo-13	21.7	378	2.7	6.9
	Julio-13	22.2	374	1.4	6.49
	Octubre-13	21.2	412	4.06	6.5
	Febrero-14	21.4	420	3.51	6.49
P-undepo	Marzo-13	24.4	402	1.7	7.2
	Julio-13	24.8	397	1.9	7.2
	Octubre-13	25	393	3.40	7.2
	Febrero-14	23.8	392	3.83	7.1
M-snfco	Marzo-13	18.5	188.6	4.2	7
	Julio-13	19.8	162.5	2.37	7.06
	Octubre-13	19	185.9	4.75	6.7
	Febrero-14	18.5	159.1	4.85	6.86
P-tableros	Marzo-13	19.4	250	2.2	6.5
	Julio-13	21.4	248	2.02	6.32
	Octubre-13	19.7	256	2.9	5.92
	Febrero-14	19.5	253	4.3	6.5
M-teja	Marzo-13	19.7	184.7	3.3	6.3
	Julio-13	20.1	207	1.99	6.29
	Octubre-13	19.8	203	3.83	6.14
	Febrero-14	19.9	188.1	4.34	6.4
M-pavos	Marzo-13	20.1	186.4	2.7	6.3
	Julio-13	20.5	188	1.93	6.36
	Octubre-13	20	189	3.8	6.10
	Febrero-14	19.9	187.3	3.98	6.45
M-carindapaz	Marzo-13	18.2	142.7	3.1	6.3
	Julio-13	18.8	165.5	1.93	6.32
	Octubre-13	18.7	146.8	4.8	6.18
	Febrero-14	18.2	141.3	4.57	6.81
P-3pasos	Marzo-13	21.5	186.5	2.7	6.5
	Julio-13	20.6	189.6	2.11	6.4
	Octubre-13	21.1	187.9	3.57	6.41
	Febrero-14	22.1	188.2	3.34	6.57
<i>Limite permisible*</i>					
	-	-	-	-	6.5-8.5

* (DOF 1994)

Anexo 2. Valores de parámetros fisicoquímicos

Tabla 11. Valores de parámetros fisicoquímicos.

<i>SITIO</i>		<i>DBO₅</i>	<i>dureza total (mg/L)</i>	<i>dureza Ca (mg/L)</i>	<i>dureza Mg (mg/L)</i>	<i>Alcalinidad total (mg/L)</i>	<i>solidos totales (mg/L)</i>	<i>Solidos Suspendedos totales (mg/L)</i>	<i>Solidos Disueltos Totales (mg/L)</i>	<i>N-NO₃ (mg/L)</i>	<i>N-NH₃ (mg/L)</i>	<i>Color (Pt/Co)</i>	<i>Turbiedad UTC</i>
P-3mayo	<i>M1</i>	2.20	96.96	52.52	44.44	110	160	16	144	0.45	0.118	5	1.0
	<i>M2</i>	-	70.70	24.24	46.46	95	172	8	164	-	-	5	2.0
	<i>M3</i>	-	77.90	34.85	43.05	110	206	26	180	-	-	5	2.0
	<i>M4</i>	0.40	94.30	43.05	51.25	120	228	30	198	-	-	5	2.0
P-fresno	<i>M1</i>	2.60	230.20	90.90	139.30	250	304	10	294	0.10	0	10	1.0
	<i>M2</i>	-	204.02	78.78	125.24	219	340	2	338	-	-	5	2.0
	<i>M3</i>	-	213.20	90.20	123.00	224	326	2	324	-	-	5	2.0
	<i>M4</i>	1.0	217.30	106.60	110.70	200	400	8	392	-	-	5	2.0
M- virgen	<i>M1</i>	2.60	155.54	80.80	74.74	185	240	12	228	0.734	0.17	10	1.0
	<i>M2</i>	-	127.26	60.60	66.66	176	280	4	276	-	-	5	2.0
	<i>M3</i>	-	149.65	94.30	55.35	183	294	4	290	-	-	5	2.0
	<i>M4</i>	0.50	125.05	79.95	45.10	160	400	6	394	-	-	5	2.0
P- undepo	<i>M1</i>	2.80	159.58	62.62	96.96	200	288	20	248	0.10	0.28	5	1.0
	<i>M2</i>	-	143.42	54.54	88.88	182	292	2	290	-	-	5	2.0
	<i>M3</i>	-	143.50	73.80	69.70	190	300	4	296	-	-	5	2.0
	<i>M4</i>	0.60	147.60	73.80	73.80	170	330	6	324	-	-	5	2.0
M-snfco	<i>M1</i>	1.80	66.66	38.38	28.28	70	106	6	100	0.191	0.06	10	2.7
	<i>M2</i>	-	54.54	26.26	28.28	75	130	6	124	-	-	5	2.0
	<i>M3</i>	-	61.50	47.15	14.35	70	166	8	158	-	-	5	2.0
	<i>M4</i>	1.20	57.40	38.95	18.45	60	150	10	140	-	-	5	3.4
P- tableros	<i>M1</i>	1.0	80.80	40.40	40.40	115	192	10	182	0.103	0.11	10	2.0
	<i>M2</i>	-	74.74	36.36	38.38	106	170	2	168	-	-	5	2.0
	<i>M3</i>	-	77.90	51.25	26.65	114	205	4	201	-	-	5	2.0
	<i>M4</i>	0.80	82.00	43.05	38.95	109	200	6	194	-	-	5	2.0
M-teja	<i>M1</i>	1.80	72.72	36.36	36.36	96	148	10	140	0.20	0.10	5	1.0
	<i>M2</i>	-	66.66	34.34	32.32	94	160	4	126	-	-	5	2.0
	<i>M3</i>	-	63.55	41.00	22.55	100	182	18	164	-	-	5	2.0
	<i>M4</i>	0.40	73.80	38.95	34.85	98	158	10	148	-	-	5	2.0
M- pavos	<i>M1</i>	0.60	70.70	38.38	32.32	97	152	18	134	0.28	0.10	5	1.0
	<i>M2</i>	-	64.64	34.34	30.30	90	150	8	142	-	-	5	2.0
	<i>M3</i>	-	63.55	41.00	22.55	95	168	20	148	-	-	5	2.0
	<i>M4</i>	1.00	65.60	41.00	24.60	97	150	10	140	-	-	5	2.0
M- carinda paz	<i>M1</i>	1.80	54.54	32.32	22.22	76	132	6	126	0.11	0.10	5	1.0
	<i>M2</i>	-	52.52	24.24	28.28	75	137	12	125	-	-	5	2.8
	<i>M3</i>	-	51.25	43.05	8.20	77	118	2	116	-	-	5	3.0
	<i>M4</i>	1.00	53.30	34.85	18.45	68	126	10	116	-	-	5	2.4

P-3pasos	M1	1.40	82.82	40.40	42.42	98	138	16	122	0.10	0.06	5	1.0
	M2	-	68.68	28.28	40.40	93	145	2	143	-	-	5	2.0
	M3	-	65.60	41.00	24.60	100	144	12	132	-	-	5	2.0
	M4	0.40	77.90	51.25	26.65	102	170	12	158	-	-	5	2.0
Limite permisible			500						1000	10	0.50	20	5.0

*(DOF 1994). **M1**: primer muestreo (Marzo-13), **M2**: segundo muestreo (Julio-13), **M3**: tercer muestreo (Octubre-13).

Anexo 3. Metales determinados expresados en mg/L

Tabla 12. Metales determinados expresados en mg/L

Metal	P-3mayo	P-fresno	M-virgen	P-undepo	M-snfco	P-tableros	M-teja	M-pavos	M-carindapaz	P-3pasos
Be	1.0E-05	3.3E-05	1.0E-05	< L.D.	2.4E-05	2.2E-05	1.9E-05	1.2E-05	1.0E-05	6.0E-06
	1.3E-05	4.0E-05	7.0E-06	< L.D.	1.5E-05	1.1E-05	2.1E-05	1.7E-05	2.7E-05	4.0E-06
	1.0E-05	3.1E-05	9.0E-06	< L.D.	2.8E-05	1.5E-05	2.1E-05	1.7E-05	3.1E-05	5.0E-06
	1.2E-05	4.1E-05	9.0E-06	< L.D.	1.9E-05	8.0E-06	2.4E-05	1.8E-05	2.1E-05	5.0E-06
Ti	3.6E-02	9.6E-02	8.0E-02	7.6E-02	4.6E-02	3.7E-02	2.5E-02	2.1E-02	1.6E-02	3.1E-02
	3.6E-02	1.1E-01	7.2E-02	6.3E-02	2.6E-02	2.8E-02	2.8E-02	2.1E-02	2.6E-02	3.5E-02
	2.6E-02	1.0E-01	9.6E-02	5.9E-02	3.9E-02	4.0E-02	3.5E-02	3.5E-02	2.7E-02	3.9E-02
	3.9E-02	1.3E-01	1.2E-01	9.7E-02	3.6E-02	4.6E-02	3.9E-02	3.6E-02	2.7E-02	4.4E-02
V	1.5E-02	1.7E-02	1.3E-02	< L.D.	1.5E-02	2.9E-03	7.9E-03	7.2E-03	5.7E-03	1.6E-02
	1.7E-02	2.1E-02	1.3E-02	< L.D.	1.0E-02	1.8E-03	6.8E-03	7.3E-03	7.0E-03	2.0E-02
	1.1E-02	1.8E-02	1.5E-02	< L.D.	1.2E-02	2.5E-03	7.4E-03	1.1E-02	7.5E-03	2.0E-02
	1.7E-02	2.8E-02	1.8E-02	< L.D.	1.4E-02	2.3E-03	1.2E-02	1.1E-02	7.8E-03	2.9E-02
Cr	2.2E-04	2.2E-04	3.2E-04	1.2E-04	7.0E-04	5.1E-04	8.1E-05	4.6E-05	1.4E-04	2.5E-04

	-5.0E-04	2.3E-04	4.0E-04	7.5E-05	2.8E-04	1.7E-04	1.4E-04	< L.D.	1.9E-04	4.0E-04
	2.3E-04	3.2E-04	4.3E-04	4.1E-05	5.0E-04	2.0E-04	2.3E-04	1.2E-04	4.2E-04	4.9E-04
	4.6E-04	1.8E-03	7.4E-04	5.3E-04	2.4E-04	3.5E-04	2.6E-04	1.3E-04	1.4E-04	6.3E-04
	4.0E-04	6.8E-04	4.0E-04	1.7E-01	1.6E-03	2.2E-03	2.7E-04	2.1E-04	3.2E-04	4.3E-04
Mn	-1.3E-04	4.4E-04	1.2E-04	1.2E-01	5.8E-04	1.3E-03	4.3E-04	1.4E-04	1.8E-03	2.6E-04
	1.3E-04	3.9E-04	2.9E-05	1.1E-01	8.3E-04	1.8E-03	2.1E-04	4.1E-04	1.5E-03	1.7E-04
	1.2E-04	4.2E-04	3.3E-05	1.4E-01	2.2E-04	1.4E-03	< L.D.	4.9E-05	8.6E-04	5.5E-05
	2.3E-05	6.5E-05	1.5E-04	7.3E-05	8.5E-05	5.0E-05	1.9E-05	1.3E-05	1.5E-05	2.5E-05
Co	-2.8E-05	6.9E-05	1.4E-04	5.8E-05	4.1E-05	2.8E-05	2.4E-05	1.0E-05	4.1E-05	2.8E-05
	1.8E-05	6.2E-05	1.7E-04	4.3E-05	6.6E-05	3.5E-05	2.3E-05	1.7E-05	3.8E-05	2.4E-05
	2.0E-05	6.0E-05	1.8E-04	5.7E-05	3.1E-05	2.5E-05	1.1E-05	9.0E-06	1.7E-05	2.1E-05
	< L.D.	1.4E-03	6.3E-04	1.5E-03	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	6.3E-04	6.0E-04
Ni	< L.D.	1.9E-03	1.1E-03	4.4E-03	8.5E-04	< L.D.	< L.D.	< L.D.	2.5E-03	1.3E-03
	< L.D.	2.6E-03	3.3E-03	-1.9E-04	2.4E-03	< L.D.	1.2E-03	< L.D.	< L.D.	7.6E-04
	< L.D.	9.4E-04	< L.D.							
	7.4E-04	1.8E-03	6.6E-04	8.5E-04	1.1E-03	7.9E-04	5.1E-04	5.5E-04	< L.D.	8.2E-04
Cu	-1.5E-03	9.7E-04	1.5E-03	5.4E-04	5.6E-04	-1.6E-03	-2.9E-04	-5.8E-04	-1.1E-03	1.7E-03
	3.8E-03	2.9E-03	3.6E-03	4.3E-04	4.3E-04	6.3E-04	5.7E-04	-3.6E-04	4.4E-03	4.7E-03
	-1.7E-03	3.9E-04	-3.7E-04	-1.9E-03	-2.5E-03	-1.6E-03	< L.D.	-1.6E-03	< L.D.	-9.4E-03
	< L.D.	6.9E-03	4.6E-03	3.5E-03	1.9E-03	1.5E-03	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
Zn	< L.D.	4.4E-04	< L.D.	6.5E-03	< L.D.	2.2E-03	5.5E-03	8.4E-04	< L.D.	2.8E-03
	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	1.7E-03	2.8E-03	< L.D.	< L.D.	< L.D.	1.6E-02

	< L.D.	< L.D.	< L.D.	2.5E-02	< L.D.	< L.D.				
Se	5.8E-05	1.8E-04	3.2E-04	9.3E-05	3.4E-04	1.5E-04	-2.6E-05	-3.0E-05	3.3E-05	2.4E-04
	4.1E-04	4.4E-04	3.2E-04	1.5E-04	1.6E-04	9.0E-05	1.1E-04	< L.D.	1.8E-04	2.3E-04
	< L.D.	2.7E-04	2.4E-04	< L.D.	1.8E-04	< L.D.	8.8E-05	< L.D.	< L.D.	2.3E-04
	< L.D.	1.6E-04	3.1E-04	9.1E-05	< L.D.	1.1E-04				
Mo	4.5E-04	4.4E-04	5.2E-04	2.8E-03	5.9E-04	4.6E-04	5.5E-04	5.1E-04	4.4E-04	8.2E-04
	4.9E-04	4.8E-04	-1.2E-04	2.3E-03	9.9E-04	2.6E-04	4.7E-04	3.9E-04	5.2E-04	9.4E-04
	5.1E-04	4.4E-04	5.0E-04	2.2E-03	5.7E-04	3.9E-04	5.7E-04	7.4E-04	5.4E-04	1.1E-03
	5.2E-04	4.8E-04	5.6E-04	3.2E-03	6.1E-04	3.2E-04	7.0E-04	7.0E-04	5.3E-04	1.1E-03
Cd	1.1E-05	-5.3E-04	-6.9E-05	4.2E-04	1.9E-03	1.1E-05	3.4E-04	-1.8E-04	-9.8E-05	1.5E-04
	4.2E-04	2.7E-04	1.7E-05	7.6E-05	3.6E-04	-1.0E-04	9.5E-04	1.4E-04	-1.5E-04	4.1E-04
	-7.8E-04	-1.1E-03	-5.6E-04	-5.4E-04	9.6E-04	-1.0E-03	4.5E-04	9.2E-04	6.5E-04	3.9E-04
	5.0E-06	2.1E-05	0.0E+00	1.6E-05	-2.1E-05	-3.0E-06	-5.0E-06	-5.8E-05	2.0E-06	6.0E-06
Sb	1.2E-05	1.2E-05	2.0E-05	8.0E-06	3.3E-05	2.9E-05	2.1E-05	1.8E-05	2.0E-05	1.6E-05
	1.9E-05	2.2E-05	-7.8E-05	-5.4E-05	1.8E-04	2.1E-05	3.0E-05	1.9E-05	3.4E-05	2.0E-05
	9.6E-05	1.2E-05	-1.1E-05	< L.D.	-1.3E-04	1.9E-05	3.9E-05	-1.6E-04	1.3E-04	3.7E-05
	1.8E-05	1.1E-05	2.0E-05	< L.D.	2.8E-05	1.6E-05	2.6E-05	2.4E-05	2.5E-05	2.3E-05
Tl	-2.0E-06	3.0E-06	9.0E-06	3.0E-06	9.0E-06	3.0E-06	2.0E-06	2.0E-06	2.0E-06	< L.D.
	< L.D.	2.0E-06	6.0E-06	3.0E-06	6.0E-06	< L.D.	4.0E-06	2.0E-06	1.1E-05	< L.D.
	< L.D.	3.0E-06	1.0E-05	4.0E-06	1.1E-05	2.0E-06	3.0E-06	3.0E-06	8.0E-06	< L.D.
	2.0E-06	4.0E-06	1.0E-05	6.0E-06	9.0E-06	2.0E-06	4.0E-06	2.0E-06	7.0E-06	< L.D.
Pb	3.4E-04	2.5E-04	1.7E-04	7.5E-04	1.8E-03	2.4E-04	4.3E-04	5.6E-05	3.0E-06	1.1E-03

	6.6E-04	7.9E-04	7.7E-04	1.8E-04	1.2E-03	2.5E-04	1.1E-03	3.9E-04	3.5E-04	7.5E-04
	9.0E-04	3.3E-04	6.1E-04	5.0E-05	1.4E-03	1.2E-04	8.9E-04	9.6E-04	2.9E-03	1.3E-03
	4.0E-06	9.8E-05	1.1E-04	2.0E-04	-1.2E-04	6.3E-05	-1.3E-04	-6.4E-05	-6.2E-05	8.9E-05
Fe	4.8E-02	1.4E-01	9.3E-02	1.8E-01	1.3E-01	5.8E-02	3.8E-02	2.4E-02	2.9E-02	4.7E-02
	5.8E-02	1.5E-01	9.3E-02	1.6E-01	1.1E-01	4.2E-02	5.7E-02	3.0E-02	8.5E-02	5.4E-02
	4.2E-02	1.4E-01	1.6E-01	2.2E-01	2.0E-01	9.3E-02	8.2E-02	1.2E-01	1.8E-01	6.3E-02
	7.2E-02	2.8E-01	4.2E-01	6.3E-01	1.9E-01	< L.D.	1.2E-01	< L.D.	1.8E-01	8.6E-02
As	2.0E-03	5.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	3.0E-03	4.0E-03	4.0E-03	2.0E-03	4.0E-03
	2.0E-03	6.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	2.0E-03	4.0E-03	4.0E-03	2.0E-03	5.0E-03
	2.0E-03	5.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	4.0E-04	3.0E-03	4.0E-03	5.0E-03	2.0E-03	5.0E-03
	2.0E-03	6.0E-03	1.0E-03	2.0E-03	5.0E-04	3.0E-03	5.0E-03	5.0E-03	2.0E-03	6.0E-03
B	<L.D.	<L.D.	<L.D.	2.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
	1.0E-02	<L.D.	1.0E-02	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	2.0E-02	<L.D.
	2.2E-02	2.7E-02	2.8E-02	3.0E-02	E	2.5E-02	2.7E-02	2.2E-02	1.9E-02	2.1E-02
	1.8E-02	2.0E-02	2.0E-02	2.4E-02	1.8E-02	1.8E-02	1.7E-02	2.1E-02	1.9E-02	2.4E-02

<L.D. (menor al límite de detección del equipo).

E (error en la medición)

Anexo 4. Balance iónico

Tabla 13. Valores de iones mayoritarios y balance iónico.

SITIO	MUESTREO	CATIONES				ANIONES				BALANCE IÓNICO
		Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	B.I. (%)
P-3mayo	M1	21.1	10.8	6.7	6	110	11.1	6.2	0.25	3.61
	M2	9.7	11.3	17.7	5.7	95	12.5	11.8	0.16	3.77
	M3	14	10.5	15	5.4	110	9.1	4.8	0.09	4.83
	M4	17.3	12.4	13.5	11.3	120	8.2	8.9	0.7	6.47
P-fresno	M1	36.4	34	15.6	10.6	250	13.4	16.7	0.34	6.69
	M2	31.6	30.4	14.8	4.3	219	22.2	20.1	0.19	2.13
	M3	36.2	29.9	7.6	4.4	224	22.7	20.6	0.09	-0.23
	M4	42.7	26.9	20.6	15.3	200	38.9	35.8	0.5	4.71
M-virgen	M1	32.4	18.1	16.9	11.2	185	13.9	15.2	0.26	4.6
	M2	24.3	16.2	25.7	7.4	176	11.8	14.3	0.18	4.22
	M3	37.8	13.4	27.8	7.8	183	23	22.3	0.02	3.35
	M4	32	10.9	49.7	18.5	160	38.2	39.7	Error	6.15
P-undepo	M1	25.1	23.5	22.4	7.1	200	14.8	15.2	0.82	2.8
	M2	21.9	21.6	22.9	8.1	182	18.3	16.2	0.26	2.98
	M3	29.6	16.9	24.9	9.2	190	16	15.7	0.61	3.36
	M4	29.6	17.9	30.8	11.8	170	31.5	25.9	0.8	4.30
M-snfco	M1	15.4	6.9	8.8	7.5	70	3.4	7.1	0.14	5.3
	M2	10.5	6.9	12.5	5.9	75	7.9	7.2	0.14	5.38
	M3	18.9	3.5	17	5.8	70	6.4	10.7	0.16	14.2
	M4	15.6	4.5	14.3	10.1	60	18	8.9	0.4	10.94
P-tableros	M1	16.2	9.8	15.8	8	115	13.1	12	0.09	0.14
	M2	14.6	9.3	23.6	5.1	106	15.3	15.5	0.12	3.01
	M3	20.5	6.5	25.4	5.6	114	18.8	12.4	0.11	3.48
	M4	17.3	9.5	27.2	10.1	109	20.6	39.7	0.4	-4.35
M-teja	M1	14.6	8.8	10.8	4.6	96	11	4.3	0.19	2.71
	M2	13.8	7.8	17	4.9	94	10.1	10.2	0.15	3.49
	M3	16.4	5.5	19.3	4.4	100	12.3	4.8	0.11	4.45
	M4	15.6	8.5	14.1	9.4	98	9.1	35.8	0.6	-9.79
M-pavos	M1	15.4	7.8	9.7	5.6	97	7	4.8	0.14	2.53
	M2	13.8	7.4	13.8	5.2	90	8.2	7.7	0.2	4.06
	M3	16.4	5.5	16.6	5.3	95	12.1	4.9	<ld	4.4
	M4	16.4	6	17.9	9.1	97	9.1	25.9	0.3	-4.20

M-acrindapaz	M1	13	5.4	8.2	4.6	76	5.8	5.2	0.44	0.97
	M2	9.7	6.9	14.2	6.1	75	8	7.3	0.14	6.33
	M3	17.3	2	12.1	6.6	77	5.9	5.9	0.15	4.95
	M4	14	4.5	12.8	9.4	68	10.2	7.9	0.6	8.09
P-3pasos	M1	16.2	10.3	5.9	6.2	98	6.7	6.2	0.24	3.43
	M2	11.3	9.8	12.3	4.3	93	6.2	7.2	0.16	3.95
	M3	16.4	6	14.9	4.5	100	6.1	4.8	0.16	4.13
	M4	20.5	6.5	12.5	9.4	102	7.1	7.9	0.6	6.03
Limite permisible*		-	-	200	-	-	400	250	1.5	-

*(DOF 1994). **M1**: primer muestreo (Marzo-13), **M2**: segundo muestreo (Julio-13), **M3**: tercer muestreo (octubre-13). **M4**: cuarto muestreo (Febrero-14). <ld: menor al límite de detección. Error: error en la medición.

Anexo 5. Valores de coliformes fecales.

Tabla 14. Valores de Coliformes fecales.

SITIO	MUESTREO	NMP/100 mL	SITIO	MUESTREO	NMP/100 mL
P-3mayo	Marzo-13	0	P-tableros	Marzo-13	7
	Julio-13	2		Julio-13	7
	Octubre-13	0		Octubre-13	5
	Febrero-14	1		Febrero-14	0
P-fresno	Marzo-13	0	M-teja	Marzo-13	24
	Julio-13	0		Julio-13	1
	Octubre-13	0		Octubre-13	0
	Febrero-14	0		Febrero-14	0
M-virgen	Marzo-13	0	M-pavos	Marzo-13	2
	Julio-13	2		Julio-13	5
	Octubre-13	19		Octubre-13	12
	Febrero-14	0		Febrero-14	3
P-undepo	Marzo-13	0	M-carindapaz	Marzo-13	0
	Julio-13	1		Julio-13	7
	Octubre-13	1		Octubre-13	34
	Febrero-14	0		Febrero-14	10
M-snfco	Marzo-13	0	P-3pasos	Marzo-13	0
	Julio-13	2		Julio-13	0
	Octubre-13	24		Octubre-13	0
	Febrero-14	0		Febrero-14	0
Limite permisible* 0					

*(DOF 1994)

Anexo 6. Tablas resultados Análisis estadístico

Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) de una vía para muestreos.

Parámetro (mg/L)	Fuente de Variación	G.L.	Suma cuadrados	Cuadrados medios	F calculada	Prob > F
Oxígeno Disuelto	Muestreo	3	23.72	7.91	16.9383	< 0.0001*
	Error	36	16.80	0.47		
	C. total	39	40.53			
K ⁺	Muestreo	3	214.45	71.48	15.1906	<0.0001*
	Error	36	169.41	4.71		
	C. total	39	383.86			
Cl ⁻	Muestreo	3	1310.33	436.78	6.0915	0.0018*
	Error	36	2581.29	71.70		
	C. total	39	3891.62			
F ⁻	Muestreo	3	0.86359	0.28786	11.3923	<0.0001*
	Error	34	0.85911	0.02527		
	C. total	37	1.72269			
Zn	Muestreo	3	0.00043	0.000143	8.6482	0.0031*
	Error	11	0.00018	0.000017		
	C. total	14	0.00061			
Pb	Muestreo	3	0.0000028	9.4026e-7	3.0373	0.0432*
	Error	32	0.0000099	3.0957e-7		
	C. total	35	0.0000127			
Fe	Muestreo	3	0.1573476	0.052449	5.3489	0.0040*
	Error	34	0.3333896	0.009806		
	C. total	37	0.4907372			

Tabla 16. Comparación de medias entre muestreos Tukey-Kramer HSD.

Parámetro (mg/L)	Nivel (muestreo)	Similitudes	
Oxígeno Disuelto	Febrero-14	A	
	Octubre-13	A	q* 2.69323
	Julio-13	B	α 0.05
	Marzo-13	B	
K ⁺	Febrero-14	A	
	Octubre-13	B	q* 2.69326
	Julio-13	B	α 0.05
	Marzo-13	B	
Cl ⁻	Febrero-14	A	
	Octubre-13	B	q* 2.69326
	Julio-13	B	α 0.05
	Marzo-13	B	
F ⁻	Febrero-14	A	
	Octubre-13	B	q* 2.70080
	Julio-13	B	α 0.05
	Marzo-13	B	
Zn	Febrero-14	A	
	Octubre-13	B	q* 3.00951
	Julio-13	B	α 0.05
	Marzo-13	B	

Pb	Febrero-14	A	q* 2.70936 α 0.05
	Octubre-13	A B	
	Julio-13	A B	
	Marzo-13	B	
Fe	Febrero-14	A	q* 2.70080 α 0.05
	Octubre-13	A B	
	Julio-13	B	
	Marzo-13	B	

Las similitudes no conectadas con la misma letra son significativamente diferentes.

Tabla 17. Análisis de varianza (ANOVA) de una vía para sitios.

Parámetro (mg/L)	Fuente de Variación	G.L.	Suma cuadrados	Cuadrados medios	F calculada	Prob > F
Temperatura del agua (°C)	Sitio	9	127.31225	19.1458	54.3015	<.0001*
	Error	30	10.57750	0.3526		
	C. total	39	182.88975			
Conductividad eléctrica (µS/cm)	Sitio	9	493736.37	54859.6	501.3378	<.0001*
	Error	30	3282.79	109.4		
	C. total	39	497019.16			
pH	Sitio	9	4.7119900	0.523554	11.1442	<.0001*
	Error	30	1.4094000	0.046980		
	C. total	39	6.1213900			
Alcalinidad Total (mg/L)	Sitio	9	98151.23	10905.7	117.5710	<.0001*
	Error	30	2782.75	92.8		
	C. total	39	100933.98			
Sólidos disueltos totales (mg/L)	Sitio	9	233704.53	25967.2	27.4744	<.0001*
	Error	30	28354.25	945.1		
	C. total	39	262058.78			
Ca ²⁺ (mg/L)	Sitio	9	2443.2813	271.476	20.2311	<.0001*
	Error	30	402.5625	13.419		
	C. total	39	2845.8438			
Mg ²⁺ (mg/L)	Sitio	9	2296.7253	255.192	54.7338	<.0001*
	Error	30	139.8725	4.662		
	C. total	39	2436.5978			
Na ⁺ (mg/L)	Sitio	9	1500.1953	166.688	4.8318	0.0005*
	Error	30	1034.9525	34.498		
	C. total	39	2535.1478			
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Sitio	9	1538.1950	170.911	4.4619	0.0009*
	Error	30	1149.1250	38.304		
	C. total	39	2687.3200			
As (mg/L)	Sitio	9	0.00011303	0.000013	57.4570	<.0001*
	Error	30	0.00000656	2.186e-7		
	C. total	39	0.00011959			
Fe (mg/L)	Sitio	9	0.22069607	0.024522	2.5426	0.0283*
	Error	28	0.27004109	0.009644		
	C. total	37	0.49073716			

Tabla 18. Comparación de medias entre muestreos Tukey-Kramer HSD.

Parámetro (mg/L)	Nivel (sitio)	Similitudes	
Temperatura del agua (°C)	P-fresno	A	q* 3.41119 α 0.05
	P-undepo	A	
	M-virgen	B	
	P-3pasos	B C	
	P-3mayo	B C D	
	M-pavos	C D E	
	P-tableros	C D E	
	M-teja	D E F	
	M-snfco	E F	
	M-carindapaz	F	
Conductividad eléctrica (μS/cm)	P-fresno	A	q* 3.41119 α 0.05
	M-virgen	B	
	P-undepo	B	
	P-tableros	C	
	P-3mayo	D	
	M-teja	D E	
	P-3pasos	D E	
	M-pavos	D E	
	M-snfco	E F	
	M-carindapaz	F	
pH	P-undepo	A	q* 3.41119 α 0.05
	M-snfco	A B	
	M-virgen	B C	
	P-3pasos	B C	
	M-carindapaz	B C D	
	P-tableros	C D	
	M-pavos	D	
	M-teja	D	
	P-3mayo	D	
	P-fresno	D	
Alcalinidad Total (mg/L)	P-fresno	A	q* 3.41119 α 0.05
	P-undepo	B	
	M-virgen	B	
	P-tableros	C	
	P-3mayo	C	
	P-3pasos	C	
	M-teja	C D	
	M-pavos	C D	
	M-carindapaz	D E	
	M-snfco	E	
Solidos disueltos totales (mg/L)	P-fresno	A	q* 3.41119 α 0.05
	M-virgen	A	
	P-undepo	A	
	P-tableros	B	
	P-3mayo	B	
	M-teja	B	
	M-pavos	B	
P-3pasos	B		

	M-snfco		B		
	M-carindapaz		B		
Ca ²⁺ (mg/L)	P-fresno	A			
	M-virgen	A	B		
	P-undepo		B		
	P-tableros			C	
	P-3pasos			C	
	P-3mayo			C	
	M-pavos			C	
	M-snfco			C	
	M-teja			C	
	M-carindapaz			C	
Mg ²⁺ (mg/L)	P-fresno	A			
	P-undepo		B		
	M-virgen			C	
	P-3mayo			C	D
	P-tableros				D E
	P-3pasos				D E
	M-teja				D E
	M-pavos				D E
	M-snfco				E
	M-carindapaz				E
Na ⁺ (mg/L)	M-virgen	A			
	P-undepo	A	B		
	P-tableros	A	B		
	M-teja		B		
	P-fresno		B		
	M-pavos		B		
	P-3mayo		B		
	M-snfco		B		
	M-carindapaz		B		
	P-3pasos		B		
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	P-fresno	A			
	M-virgen	A	B		
	P-undepo	A	B	C	
	P-tableros	A	B	C	
	M-teja	A	B	C	
	P-3mayo	A	B	C	
	M-pavos		B	C	
	M-snfco		B	C	
	M-carindapaz		B	C	
	P-3pasos			C	
As (mg/L)	P-fresno	A			
	P-3pasos	A	B		
	M-pavos	A	B		
	M-teja		B		
	P-tableros			C	
	M-carindapaz			C	D
	P-3mayo			C	D
	P-undepo				D E
M-virgen				D E	

	M-snfco		E
Fe (mg/L)	P-undepo	A	
	M-virgen	A B	
	P-fresno	A B	
	M-snfco	A B	
	M-carindapaz	A B	q* 3.42949
	M-teja	A B	α 0.05
	P-tableros	A B	
	P-3pasos	A B	
	M-pavos	A B	
	P-3mayo	B	

Las similitudes no conectadas con la misma letra son significativamente diferentes.

Anexo 7. Técnica determinación de B

DETERMINACIÓN DE BORO. NMX-AA-063-SCFI-2001.

Este método es aplicable para la determinación de boro disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se utiliza para la determinación de boro en un intervalo de concentraciones entre 0.1 mg/L y 1.0 mg/L. El método se basa en la medición de un compuesto rojo denominado rosocianina, cuando el boro de la muestra reacciona con la curcumina y el ácido clorhídrico, esta reacción se lleva a cabo a 55°C y se lleva a sequedad. El residuo se disuelve con alcohol etílico y se mide espectrofotométricamente a 540 nm.

MATERIAL Y EQUIPO

- Baño de agua caliente
- Espectrofotómetro
- Balanza analítica
- Capsulas de evaporación

PROCEDIMIENTO

1.- Disolución patrón de boro

- 1.1. Secar H_3BO_3 durante 24 horas.
- 1.2. Pesar 0.5719 g de H_3BO_3 .
- 1.3. Aforar a 100 mL de H_2O .
- 1.4. Colocar disolución en envase de plástico.

2.- Disolución intermedia de boro

- 2.1. Tomar alícuota de 1 mL de disolución patrón.
- 2.2. Transferir a matraz volumétrico de 100 mL y aforar con agua.
- 2.3. Colocar en recipiente de plástico.

3.- Disolución de curcumina

- 3.1. Pesar 40g de curcumina y 5g de ácido oxálico.
- 3.2. Diluir en 80 mL de alcohol etílico.
- 3.3. Adicionar 4mL de HCl concentrado.
- 3.4. Aforar a 100mL con alcohol etílico.
- 3.5. Mantener a 4°C.

4.- Curva de calibración

- 4.1. A partir de la disolución intermedia preparar los estándares de 10, 50, 75 y 100 μL .
- 4.2. Transferir a capsula de evaporación.
- 4.3. Añadir agua hasta volumen final de 1mL.

5.- Procedimiento para muestras

- 5.1. Tomar 1mL de muestra.
- 5.2. Hacer un blanco.
- 5.3. Colocar en capsula de evaporación.
- 5.4. Adicionar 4mL de disolución de curcumina y agitar.
- 5.5. Poner capsulas en baño de agua caliente a $55^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- 5.6. Evaporar hasta sequedad.
- 5.7. Esperar 15 minutos.
- 5.8. Adicionar 10mL de alcohol etílico a cada capsula y agitar.
- 5.9. Lavar contenido con 10mL de alcohol etílico.
- 5.10. Registrar absorbancia a 540nm.

CÁLCULOS

La concentración de la muestra se calcula a partir de la ecuación obtenida en la curva de calibración;

$$Y = mX + b$$

Donde:

Y es la absorbancia

m es la pendiente

b es la ordenada al origen

X es la concentración en mg/L

Anexo 8. Técnica determinación de dureza total

DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL. NMX-AA-072-SCFI-2001.

El método se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético con los iones de calcio y magnesio presentes en el agua. El método consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final (negro de eriocromo T), el cual es de color rojo en la presencia de calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran acomplejados o ausentes. El complejo EDTA con el calcio y el magnesio es más fuerte que el que estos iones forman con el negro de eriocromo T, por lo tanto la competencia de 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
- Bureta
- Material volumétrico

PROCEDIMIENTO

1.- Titulación de muestras

1.1. Colocar 50 mL de muestra en matraz Erlenmeyer de 250 mL

1.2. Añadir 1 mL o 2 mL de disolución amortiguadora (16.9 g de cloruro de amonio disueltos en 143 mL de amoniaco concentrado, adicionando 1.25 g de sal de magnesio de EDTA y diluido hasta 250 mL con agua), hasta pH de 10.0 a 10.1.

1.3. Agregar el indicador de eriocromo negro T (0.2 g). La muestra toma color vino-rojizo.

1.4. Titular con la disolución de EDTA 0.01 M (3.723 g de sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético dihidratada, en 1L de agua), agitando continuamente hasta desaparecer color rojizo y observar cambio de color rojizo a azul.

CÁLCULOS

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

Donde:

A son los mL de EDTA gastados en la titulación de la muestra

B son los mL de EDTA gastados en la titulación del blanco

C son los mg de CaCO₃ equivalentes a 1 mL de EDTA

D son los mL de muestra

La dureza total se expresa como mg/L CaCO₃.

ANEXO

DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD. NMX-AA-036-SCFI-2001.

La alcalinidad se refiere a la presencia de sustancias hidrolizables en agua, que como producto de hidrolisis generan el ion hidroxilo (OH^-), como las bases fuertes y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos principalmente, aunque también contribuyen a la alcalinidad los carbonatos y fosfatos, los boratos y silicatos pueden contribuir si se encuentran en concentraciones altas.

La alcalinidad total del medio es la cantidad de ácido fuerte necesaria para llevar el pH de la muestra a un valor predeterminado coincidente con el vire del naranja de metilo. El método se basa en la medición de la alcalinidad por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante ácido de concentración conocida.

MATERIAL Y EQUIPO

- Balanza analítica
- Estufa
- Bureta
- Material volumétrico

PROCEDIMIENTO

1.- Valoración de ácido sulfúrico o clorhídrico (0.02 N).

- 1.1. Pesar 0.0265 g del patrón primario de carbonato de sodio, secado a 105°C .
- 1.2. Añadir 25 mL de agua y unas gotas de disolución de naranja de metilo
- 1.3. Valorar con el ácido hasta el vire del indicador (de canela a amarillo)
- 1.4 Calcular normalidad

2.- Alcalinidad

- 2.1. Transferir 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- 2.2. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína.
- 2.3 Titular con disolución valorada de ácido hasta el vire de la fenolftaleína (de rosa a incoloro), registrar mL gastados.
- 2.4. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de naranja de metilo.
- 2.5. Titular hasta alcanzar el vire del naranja de metilo; de canela a amarillo (alcalinidad total).

2.6. Registrar volúmenes para ambos puntos finales

2.7. Calcular alcalinidad, tomando en cuenta el vire de los indicadores.

CÁLCULOS

1.- Calculo de la normalidad

$$N = \frac{A}{B \times 204.2} \times 1000$$

Donde:

N es la normalidad del NaOH, equivalentes/L

A son los gramos de biftalato de potasio

B son los mL de hidróxido de sodio utilizados

204.2 son los gramos por equivalente de biftalato de potasio

2.- Calculo de Alcalinidad

$$\text{Alcalinidad total como } CaCO_3 \text{ en } \frac{mg}{L} = \frac{A \times N}{100} (50)(1000)$$

Donde:

A es el volumen total gastado de ácido en la titulación al vire del naranja d metilo en mL

N es la normalidad de la disolución de acido

100 es el volumen de la muestra en mL

50 es el factor para convertir eq/L a mg CaCO₃/L

1000 es el factor para convertir mL a L

Reportar alcalinidad en mg CaCO₃/L con la precisión correspondiente.

Anexo 9. Técnica determinación de sólidos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales.

DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES, SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES Y SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES. NMX-AA-034-SCFI-2001.

El método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.

MATERIAL Y EQUIPO

- Capsulas de evaporación
- Desecador
- Crisol Gooch
- Matraz kitazato de 1L a 2L
- Filtro de fibra de vidrio con porosidad de 2 μm o menor
- Bomba de vacío
- Estufa
- Balanza analítica
- Mufla
- Material de protección

PROCEDIMIENTO

Tener capsulas y crisoles a peso constante

1.- Determinación para sólidos totales

1.1. Agitar muestras para asegurar homogeneización

1.2. En función de la cantidad de sólidos probables tomar una cantidad de muestra que contenga como mínimo 25 mg/L de sólidos totales (100 mL de muestra es un adecuado)

1.3. Transferir muestra a capsula de porcelana

1.4. Llevar la muestra a sequedad en estufa a 103°C-105°C

1.5. Enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y determinar peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G1.

2.- Determinación de sólidos suspendidos totales (SST)

2.1. Medir con probeta aproximadamente 100 mL de muestra homogeneizada

2.2. Filtrar muestra con crisol Gooch, lavar disco 3 veces con 10 mL de agua.

2.3. Suspender el vacío y secar crisol en estufa a 103°C-105°C durante hora aproximadamente.

2.4. Sacar crisol, atemperar y determinar su peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G4.

2.5. Introducir crisol con residuo a la mufla a una temperatura de 550°C ± 50°C durante 20 minutos. Sacar y atemperar, determinar peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G5

3.- Sólidos disueltos totales (SDT). Se obtiene por diferencia entre los sólidos totales menos los sólidos suspendidos totales.

CÁLCULOS

1.- Cálculo para sólidos totales

$$ST = (G1 - G) \times 1000/V$$

Donde:

ST son los sólidos totales en mg/L

G1 es el peso de la capsula con el residuo, después de evaporación, en mg

G es el peso de la capsula vacía, en mg a peso constante

V es el volumen de muestra en mL

2.- Cálculo para sólidos disueltos totales (SST)

$$SST = (G4 - G5) \times 1000/V$$

Donde:

SST son los sólidos suspendidos totales en mg/L

G4 es el peso del crisol con el disco y el residuo seco, en mg

G5 es el peso del crisol con el residuo, después de calcinación, en mg

V es el volumen de la muestra en mL

3.- Cálculo de sólidos disueltos totales (SDT)

$$SDT = ST - SST$$

Donde:

SDT son los sólidos disueltos totales en mg/L

ST son los sólidos totales en mg/L

SST son los sólidos suspendidos totales en mg/L

Los resultados se reportan en mg/L.

Anexo 10. Técnica determinación de organismos coliformes

DETECCIÓN Y ENUMERACIÓN DE ORGANISMOS COLIFORMES. NMX-AA-102-SCFI-2006.

El método se basa en la filtración de una muestra directa a través de una membrana celulósica que retiene a los organismos, colocando la membrana en un medio de cultivo selectivo de agar lactosado, se lleva a cabo una incubación durante 24 horas a 35°C-37°C. Posterior a esto se realiza la cuenta directa de las colonias características desarrolladas sobre la membrana, algunas de las colonias se resiembran para pruebas confirmativas para producción de gas e indol, y finalmente se hace el cálculo del número de organismos coliformes que pueden estar presentes en 100 mL de la muestra.

MATERIAL Y EQUIPO

- Membranas filtrantes estériles de aproximadamente 47 mm de diámetro
- Pinzas de bordes lisos para manejar membranas
- Tubos de fermentación (tipo Duham)
- Asas de inoculación
- Autoclave
- Incubadora a 35°C-37°C
- Medidor de pH
- Equipo para filtración con membrana
- Bomba o sistema de vacío

PROCEDIMIENTO

1.- Se requiere como mínimo 100 mL de muestra

2.- Filtración de la muestra

2.1. Colocar las bases en la unidad filtrante

2.2. Colocar la membrana con ayuda de pinzas estériles, la cuadrícula de la membrana debe quedar visible.

2.3. Colocar embudo y sujetarlo

2.4. Agitar vigorosamente la muestra, verter en el embudo y filtrar con ayuda del vacío.

3.- Transferencia de la membrana

3.1. Quitar el embudo y con ayuda de pinza esteril, levantar membrana y sobreponerla en caja Petri con medio de agar.

3.2. Observar no haya burbujas de aire atrapadas entre la membrana y el medio.

4.- Incubación

4.1. Invertir las cajas de Petri y colocarlas en incubadora a 35°C- 37°C

5.- Examen de las membranas

5.1. Después de la incubación, se examinan las membranas inmediatamente, de no ser posible, almacenarse entre 4°C y 5°C durante periodos cortos.

5.2. Examinar membranas y contar como organismos coliformes presuntivos todas las colonias con características específicas después del tiempo de incubación.

5.3. Realizar pruebas confirmativas.

CÁLCULOS

A partir del número de colonias características contadas en las membranas calcular el número de organismos coliformes presentes en 100 mL de la muestra. El resultado se expresa como NMP/ 100 mL.

Anexo 11. Técnica determinación de ion sulfato

DETERMINACIÓN DEL ION SULFATO. NMX-AA-074-1981.

El método se basa en la precipitación del ion sulfato, y el peso como sulfato de bario después de eliminar la sílice y materia insoluble.

MATERIAL Y EQUIPO

- Papel filtro de poro fino con contenido de cenizas conocido
- Baño de vapor
- Horno de secado
- Mufla
- Desecador
- Balanza analítica
- Capsula de platino

PROCEDIMIENTO

1.- Eliminación de sílice

2.- Transferir un volumen de muestra clarificada que contenga no más de 50 mg de ion sulfato y ajustar a un volumen de 250 mL.

3.- Llevar a un pH de 4.5-5.0 con solución de HCl 1:1

4.- Adicionar de 1-2 mL de solución de HCl 1:1, calentar la solución a ebullición y agitar lentamente, agregar lentamente solución de cloruro de bario caliente hasta precipitación

completa. Añadir aproximadamente 2 mL en exceso de solución de cloruro de bario. Si la cantidad de precipitado es pequeña, agregar un total de 5 mL de solución de cloruro de bario.

5.- Digerir precipitado a 80°C -90°C durante 10 a 12 horas.

6.- Mezclar pequeña cantidad de la pulpa del papel filtro de cenizas conocidas con el precipitado de sulfato de bario y filtrar a temperatura ambiente. La filtración de la pulpa facilita y reduce la tendencia del precipitado a separarse.

7.- Lavar precipitado con agua caliente, para que los lavados estén libres de cloruros y hasta que 10 mL de las aguas de lavado no produzcan turbiedad al adicionarles 1 mL de AgNO₃.

8.- Secar papel filtro y precipitado en estufa, pasar a la mufla a 800°C durante 1 hora.

9.- Enfriar en desecador y pesar.

CÁLCULOS

La concentración del ion sulfato en mg/L se obtiene aplicando la fórmula siguiente:

1 mg de BaSO₄ = 0.4115 mg de SO₄²⁻

$$mg\ de\ \frac{SO_4^{2-}}{L} = \frac{A \times 0.4115 \times 1000}{B}$$

Donde:

A es el peso del sulfato de bario en mg

B es el volumen de la muestra original en mL

Anexo 12. Técnica determinación de cloruros totales

DETERMINACIÓN DE CLORUROS TOTALES. NMX-AA-073-SCFI-2001.

El método se basa en una valoración con nitrato de plata utilizando cromato de potasio como indicador. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. Al agotarse el ion cloruro antes del punto de equivalencia, comienza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata se identifica 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

- Bureta
- Balanza analítica
- Potenciómetro para medición de pH

PROCEDIMIENTO

1.- Acondicionamiento de la muestra

1.1. Utilizar un volumen de muestra de 100 mL. Ajustar el pH entre 7 y 10, utilizando las disoluciones de NaOH 0.1 N y/o H₂SO₄ 0.1 N.

1.2. Si la muestra tiene mucho color, añadir de 3 a 5 mL de suspensión de Al(OH)₃, antes de acondicionar. Mezclar, dejar sedimentar y filtrar con papel filtro cualitativo.

2.- Valoración

2.1. A 100 mL de muestra acondicionada, adicionar 1 mL de disolución indicadora de cromato de potasio

2.2. Valorar con disolución patrón de nitrato de plata hasta el vire de amarillo a naranja rojizo

2.3. Titular un blanco con las muestras

CÁLCULOS

La concentración de iones cloruro en mg/L se calcula con la siguiente ecuación:

$$Cl^- \frac{mg}{L} = \frac{[(A - B) \times N \times 35.450]}{mL \text{ de muestra}}$$

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