



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS  
DE HIDALGO**

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

**Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental**

*“Estudio de la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea  
en la zona urbana de Zamora, Michoacán”*

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Presenta:

**I.Q. Claudia Alejandra Reyes Toscano**

Directores de Tesis:

**Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva  
Dr. Otoniel Buenrostro Delgado**

Morelia, Michoacán, noviembre 2019

## **DEDICATORIA**

## **AGRADECIMIENTOS**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
2. INTRODUCCIÓN	3
3. JUSTIFICACIÓN	5
4. HIPÓTESIS	6
5. OBJETIVOS	6
5.1 Objetivo general	6
5.2 Objetivos particulares	6
6. MARCO TEÓRICO	7
6.1 El agua	7
6.2 Disponibilidad de agua	7
6.3 Ciclo hidrológico	8
6.4 Calidad del agua	9
6.4.1 Tipos de agua	10
6.5 Contaminación del agua	10
6.5.1 Causas de contaminación en los cuerpos de agua	11
6.5.2 Contaminación del agua subterránea	11
6.6 Elementos traza	12
6.7 Iones mayoritarios	21
6.8 Parámetros fisicoquímicos	23
6.9 Parámetros bacteriológicos	25
7. ANTECEDENTES	26
8. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
8.1 Ubicación	30
8.2 Fisiografía	31
8.3 Geología e hidrogeología	31
8.4 Orografía	34
8.5 Hidrografía, clima y ecosistemas	34
8.6 Edafología	34
8.7 Uso de suelo	34
9. METODOLOGÍA	36
9.1 Selección de los sitios de estudio	36
9.2 Colecta de muestras	37

9.2.1	Toma de muestras para parámetros fisicoquímicos	37
9.2.2	Toma de muestras para elementos traza	37
9.2.3	Toma de muestras para coliformes fecales	38
9.3	Material y equipo	38
9.4	Análisis de parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y de elementos traza	39
9.5	Balance iónico	39
9.6	Facies hidroquímicas	40
9.7	Diagramas hidrogeoquímicos	44
9.7.1	Diagrama Durov	44
9.7.2	Diagrama Giggenbach	45
9.7.3	Diagrama Schoeller	46
9.7.4	Diagrama de Gibbs	47
9.8	Relaciones o índices hidrogeoquímicos	48
9.9	Índice de calidad del agua subterránea	50
10.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
10.1	Análisis de parámetros	54
10.1.1	Parámetros in situ	54
10.1.2	Parámetros fisicoquímicos	58
10.1.3	Iones mayoritarios	64
10.1.4	Balance iónico	71
10.1.5	Coliformes fecales	73
10.1.6	Elementos traza	74
10.1.7	Especiación química	76
10.2	Distribución espacial de los parámetros de calidad del agua subterránea	86
10.2.1	Parámetros de campo	86
10.2.2	Parámetros fisicoquímicos	90
10.2.3	Iones mayoritarios	97
10.2.4	Coliformes fecales	105
10.2.5	Elementos traza	107
10.3	Análisis hidrogeoquímico	110
10.3.1	Diagrama de Piper	110
10.3.2	Diagrama de Stiff	111
10.3.3	Otros diagramas hidrogeoquímicos	113
10.3.4	Relaciones hidrogeoquímicas	120

10.3.5	Intercambio iónico	125
10.4	Índice de Calidad del Agua Subterránea	127
11.	CONCLUSIONES	129
12.	RECOMEDACIONES	131
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
14.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	141
15.	ANEXOS	142
15.1	ANEXO A: Resultados parámetros in situ	142
15.1	ANEXO B: Valores de parámetros fisicoquímicos	143
15.1	ANEXO C: Valores de iones mayoritarios	144
15.1	ANEXO D: Valores de elementos traza	145

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-1994 (elementos traza)_____	21
Tabla 2 Límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-1994 (iones mayoritarios) _____	23
Tabla 3 Límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-1994 (coliformes) _____	25
Tabla 4 Columna litológica del municipio de Zamora, Michoacán _____	33
Tabla 5 Coordenadas de localización de los sitios de estudio _____	36
Tabla 6 Equipo y material requerido durante la investigación_____	38
Tabla 7 Ponderaciones de los parámetros para evaluar el Índice de Calidad del Agua _____	51
Tabla 8 Límites máximos permitidos por estándares nacionales e internacionales _____	52
Tabla 9 Categorías del Índice de Calidad del Agua _____	53
Tabla 10 Valor del ICA en la zona de estudio (mayo)_____	128
Tabla 11 Valor del ICA en la zona de estudio (noviembre)_____	128
Tabla 12 Resultados de los parámetros de campo en los sitios de estudio_____	142
Tabla 13 Resultados de parámetros fisicoquímicos y coliformes fecales en los sitios de estudio_	143
Tabla 14 Resultados de iones mayoritarios y balance iónico_____	144
Tabla 15 Resultados de elementos traza en los sitios de estudio _____	145
Tabla 16 Valores de las relaciones iónicas de los sitios de estudio _____	146

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 El ciclo hidrológico, cantidades en agua en miles de millones de litros por día _____	9
Fig. 2 Macrolocalización de la zona de estudio _____	30
Fig. 3 Mapa de la geología del municipio de Zamora, Michoacán _____	33
Fig. 4 Mapa de los usos de suelo del municipio de Zamora, Michoacán _____	35
Fig. 5 Localización de los sitios de estudio _____	36
Fig. 6 Diagrama de clasificación hidroquímica para aguas naturales usando el diagrama de Piper _____	41
Fig. 7 Diagrama de Stiff típicos _____	42
Fig. 8 Zonas de profundidad de acuíferos _____	43
Fig. 9 Diagrama Durov _____	44
Fig. 10 Típico diagrama de Giggenbach _____	46
Fig. 11 Diagrama Schoeller _____	47
Fig. 12 Diagrama de Gibbs (Cationes) _____	48
Fig. 13 Diagrama de Gibbs (Aniones) _____	48
Fig. 14 Valores de Temperatura (°C) de los sitios de estudio _____	55
Fig. 15 Valores de pH en los sitios de estudio _____	56
Fig. 16 Valores de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de los sitios de estudio _____	57
Fig. 17 Valores de oxígeno disuelto (mg/L) en los sitios de estudio _____	58
Fig. 18 Valores de la dureza (mg/L) en los sitios de estudio _____	59
Fig. 19 Valores de Sólidos Totales (mg/L) en los sitios de estudio _____	60
Fig. 20 Valores de los Sólidos Disueltos Totales (mg/L) en los sitios de estudio _____	61
Fig. 21 Valores de Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) en los sitios de estudio _____	61
Fig. 22 Valores de alcalinidad total (mg/L) en los sitios de estudio _____	62
Fig. 23 Valores de $\text{DBO}_5$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	63
Fig. 24 Valores de DQO (mg/L) en los sitios de estudio _____	63
Fig. 25 Valores de $\text{Ca}^{2+}$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	64
Fig. 26 Valores de $\text{Mg}^{2+}$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	65
Fig. 27 Valores de $\text{Na}^+$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	66
Fig. 28 Valores de $\text{HCO}_3^-$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	67
Fig. 29 Valores de $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	68
Fig. 30 Valores de $\text{Cl}^-$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	69
Fig. 31 Valores de $\text{NO}_3^-$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	70
Fig. 32 Valores de $\text{N-NH}_3$ (mg/L) en los sitios de estudio _____	71

Fig. 33 Representación gráfica del balance iónico	72
Fig. 34 Valores de coliformes fecales (UFC/100 ml) en los sitios de estudio	73
Fig. 35 Valores de As ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios de estudio	74
Fig. 36 Valores de Fe ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios de estudio	75
Fig. 37 Valores de Mn ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios de estudio	76
Fig. 38 Especies predominantes de As presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018	78
Fig. 39 Especies predominantes de As presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018	78
Fig. 40 Especies predominantes de As presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018	79
Fig. 41 Especies predominantes de As presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018	79
Fig. 42 Especies predominantes de Fe presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018	81
Fig. 43 Especies predominantes de Fe presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018	81
Fig. 44 Especies predominantes de Fe presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018	82
Fig. 45 Especies predominantes de Fe presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018	82
Fig. 46 Especies predominantes de Mn presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018	84
Fig. 47 Especies predominantes de Mn presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018	84
Fig. 48 Especies predominantes de Mn presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018	85
Fig. 49 Especies predominantes de Mn presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018	85
Fig. 50 Mapa de distribución espacial de temperatura en la zona de estudio (mayo)	86
Fig. 51 Mapa de distribución espacial de temperatura en la zona de estudio (noviembre)	87
Fig. 52 Mapa de distribución espacial de pH en la zona de estudio (mayo)	87
Fig. 53 Mapa de distribución espacial de pH en la zona de estudio (noviembre)	88
Fig. 54 Mapa de distribución espacial de conductividad eléctrica en la zona de estudio (mayo)	88
Fig. 55 Mapa de distribución espacial de conductividad eléctrica en la zona de estudio (noviembre)	89
Fig. 56 Mapa de distribución espacial de oxígeno disuelto en la zona de estudio (mayo)	89
Fig. 57 Mapa de distribución espacial de oxígeno disuelto en la zona de estudio (noviembre)	90
Fig. 58 Mapa de distribución espacial de dureza en la zona de estudio (mayo)	90
Fig. 59 Mapa de distribución espacial de dureza en la zona de estudio (noviembre)	91
Fig. 60 Mapa de distribución espacial de sólidos totales (ST) en la zona de estudio (mayo)	91
Fig. 61 Mapa de distribución espacial de Sólidos Totales (ST) en la zona de estudio (noviembre)	92
Fig. 62 Mapa de distribución espacial de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en la zona de estudio (mayo)	92
Fig. 63 Mapa de distribución espacial de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en la zona de estudio (noviembre)	93

Fig. 64 Mapa de distribución espacial de Sólidos Suspendidos (SS) en la zona de estudio (mayo)	94
Fig. 65 Mapa de distribución espacial de Sólidos Suspendidos (SS) en la zona de estudio (noviembre)	94
Fig. 66 Mapa de distribución espacial de Alcalinidad total en la zona de estudio (mayo)	95
Fig. 67 Mapa de distribución espacial de Alcalinidad Total en la zona de estudio (noviembre)	95
Fig. 68 Mapa de distribución espacial de DBO <sub>5</sub> en la zona de estudio (mayo)	96
Fig. 69 Mapa de distribución espacial de DBO <sub>5</sub> en la zona de estudio (noviembre)	96
Fig. 70 Mapa de distribución espacial de DQO en la zona de estudio (mayo)	97
Fig. 71 Mapa de distribución espacial de DQO en la zona de estudio (noviembre)	97
Fig. 72 Mapa de distribución espacial de Ca <sup>2+</sup> en la zona de estudio (mayo)	98
Fig. 73 Mapa de distribución espacial de Ca <sup>2+</sup> en la zona de estudio (noviembre)	98
Fig. 74 Mapa de distribución espacial de Mg <sup>2+</sup> en la zona de estudio (mayo)	99
Fig. 75 Mapa de distribución espacial de Mg <sup>2+</sup> en la zona de estudio (noviembre)	99
Fig. 76 Mapa de distribución espacial de Na <sup>+</sup> en la zona de estudio (mayo)	100
Fig. 77 Mapa de distribución espacial de Na <sup>+</sup> en la zona de estudio (noviembre)	100
Fig. 78 Mapa de distribución espacial de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en la zona de estudio (mayo)	101
Fig. 79 Mapa de distribución espacial de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en la zona de estudio (noviembre)	101
Fig. 80 Mapa de distribución espacial de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> en la zona de estudio (mayo)	102
Fig. 81 Mapa de distribución espacial de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> en la zona de estudio (noviembre)	102
Fig. 82 Mapa de distribución espacial de Cl <sup>-</sup> en la zona de estudio (mayo)	103
Fig. 83 Mapa de distribución espacial de Cl <sup>-</sup> en la zona de estudio (noviembre)	103
Fig. 84 Mapa de distribución espacial de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en la zona de estudio (mayo)	104
Fig. 85 Mapa de distribución espacial de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en la zona de estudio (noviembre)	104
Fig. 86 Mapa de distribución espacial de N NH <sub>3</sub> en la zona de estudio (mayo)	105
Fig. 87 Mapa de distribución espacial de N-NH <sub>3</sub> en la zona de estudio (noviembre)	105
Fig. 88 Mapa de distribución espacial de Coliformes fecales en la zona de estudio (mayo)	106
Fig. 89 Mapa de distribución espacial de Coliformes fecales en la zona de estudio (noviembre)	106
Fig. 90 Mapa de distribución espacial de As en la zona de estudio (mayo)	107
Fig. 91 Mapa de distribución espacial de As en la zona de estudio (noviembre)	107
Fig. 92 Mapa de distribución espacial de Fe en la zona de estudio (mayo)	108
Fig. 93 Mapa de distribución espacial de Fe en la zona de estudio (noviembre)	108
Fig. 94 Mapa de distribución espacial de Mn en la zona de estudio (mayo)	109
Fig. 95 Mapa de distribución espacial de Mn en la zona de estudio (noviembre)	109
Fig. 96 Diagrama de Piper de la campaña mayo-18 en la zona de estudio	110

Fig. 97 Diagrama de Piper de la campaña noviembre-18 en la zona de estudio	110
Fig. 98 Diagrama de Stiff de la campaña de mayo-18 en la zona de estudio	112
Fig. 99 Diagrama de Stiff para la campaña noviembre-18 en la zona de estudio	113
Fig. 100 Diagrama Durov para primera campaña de colectas (mayo-18)	114
Fig. 101 Diagrama Durov para segunda campaña de colectas (noviembre-18)	114
Fig. 102 Diagrama Giggenbach de la campaña mayo-18	116
Fig. 103 Diagrama Giggenbach de la campaña noviembre-18	116
Fig. 104 Diagrama Schoeller de la campaña mayo-18	117
Fig. 105 Diagrama Schoeller de la campaña noviembre-18	118
Fig. 106 Diagrama de Gibbs (Cationes)	119
Fig. 107 Diagrama de Gibbs (Aniones)	119
Fig. 108 Representación gráfica de la relación $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ en los sitios de estudio	120
Fig. 109 Representación gráfica de la relación $\text{Na}^+/\text{K}^+$ en los sitios de estudio	121
Fig. 110 Representación gráfica de la relación $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ en los sitios de estudio	122
Fig. 111 Representación gráfica de la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ en los sitios de estudio	122
Fig. 112 Representación gráfica de la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ en los sitios de estudio	123
Fig. 113 Representación gráfica de la relación $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ en los sitios de estudio	123
Fig. 114 Diagrama hidrogeoquímico binario $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$	124
Fig. 115 Diagrama hidrogeoquímico binario $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$	125
Fig. 116 Índice Cloro Alcalino 1	126
Fig. 117 Índice Cloro Alcalino 2	126

## RESUMEN

La creciente población, la contaminación y el uso indebido de agua dulce en todo el mundo requieren el desarrollo de estrategias eficientes para proteger los recursos vitales de agua subterránea (Ruiz-Pico et al., 2019). En las últimas décadas este tipo de agua ha representado un problema a nivel mundial a consecuencia de su contaminación física, química y biológica por factores naturales o antropogénicos.

En México, particularmente en el Estado de Michoacán, existen zonas que registran elevadas concentraciones de metales pesados, que se encuentran por encima de los límites permitidos por los estándares nacionales, ocasionando diversos problemas de salud a la población (Alfaro, 2000) (Alfaro, 2000). Por lo anterior, en este trabajo se evaluó la calidad del agua subterránea de 10 pozos que abastecen a la zona urbana de Zamora, Michoacán en 2 periodos de muestreo (mayo-2018 y noviembre-2018), en los cuales se determinaron sus parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica, dureza, alcalinidad, SDT,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N-NH}_3$ ), iones mayoritarios (cationes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , aniones:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) la presencia de elementos traza (Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Zn) comparándolos con los estándares mexicanos e internacionales.

Los 10 sitios de estudio presentaron únicamente un tipo de facie hidroquímica  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{HCO}_3^-$ , lo que conlleva a que toda esta agua proviene de un mismo acuífero y que, además, es de reciente infiltración, por lo que se establece una sobreexplotación en éste. El diagrama de Giggenbach demostró que todas las aguas subterráneas son inmaduras, es decir, que no han llegado al equilibrio, por lo que se demuestra que no han permanecido mucho tiempo en el acuífero. De los parámetros evaluados, el único que excedió los límites máximos permisibles por la normatividad mexicana fue el  $\text{N-NH}_3$  en 3 sitios de estudio en los 2 periodos de muestreo, esto generado principalmente por la actividad agrícola de la zona ya que la presencia de este elemento es señal de contaminación reciente.

*Palabras clave:* Hidrogeoquímica, agua subterránea, Zamora, calidad del agua, elementos traza

## **ABSTRACT**

The growing population, pollution and misuse of fresh water worldwide require the development of efficient strategies to protect vital groundwater resources (Ruiz-Pico et al., 2019). In recent decades, this type of water has represented a global problem as a result of its physical, chemical and biological contamination by natural or anthropogenic factors.

In Mexico, particularly in the State of Michoacán, there are areas that register high concentrations of heavy metals, which are above the limits allowed by national standards, causing various health problems for the population (Alfaro, 2000). Therefore, in this work the groundwater quality of 10 wells that supply the urban area of Zamora, Michoacán in 2 sampling periods (May-2018 and November-2018), in which their physicochemical parameters were determined, was evaluated. (pH, temperature, electrical conductivity, hardness, alkalinity, SDT,  $\text{NO}_3^-$ , N-NH<sub>3</sub>), major ions (cations:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , anions:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) presence of trace elements (Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Zn) comparing them with Mexican and international standards.

The 10 study sites presented only one type of hydrochemical faction  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{HCO}_3^-$ , which means that all this water comes from the same aquifer and, moreover, is recently infiltrated, so overexploitation is established in this. The Giggenbach diagram showed that all groundwater is immature, that is, it has not reached equilibrium, so it is shown that it has not remained in the aquifer for a long time. Of the parameters evaluated, the only one that exceeded the maximum limits allowed by Mexican regulations was N-NH<sub>3</sub> in 3 study sites in the 2 sampling periods, this mainly generated by the agricultural activity in the area since the presence of this element is a sign of recent contamination.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El agua subterránea es uno de los recursos naturales más valiosos, que desempeña un papel fundamental en la salud y bienestar humano, en el desarrollo socioeconómico y en el funcionamiento de los ecosistemas. Además, es usada ampliamente para diversas actividades domésticas, industriales y de riego (Ruiz-Pico et al., 2019). En las últimas décadas, la contaminación del agua subterránea se ha convertido en uno de los problemas más graves a nivel mundial, debido a que ésta puede afectarse a partir de fuentes naturales o de numerosos tipos de actividades humanas, las cuales pueden dar como resultado una mala calidad del agua potable, pérdidas del suministro de agua, altos costos de limpieza y/o posibles problemas de salud (Busico et al., 2018). La calidad del agua subterránea está en función de parámetros físicos y químicos que se encuentran influenciados por las formaciones geológicas, por la precipitación atmosférica, las aguas superficiales continentales, por los procesos geoquímicos al estar en contacto el agua con la roca y por las diversas actividades antropogénicas (Saravanan et al., 2015). Además, proporciona información valiosa para determinar el origen, tiempo de tránsito, patrones de flujo y regímenes de agua, estructura geológica y mineralogía de los acuíferos, así como procesos hidrogeoquímicos. Por eso ha recibido una atención especial, ya que se requiere agua de alta calidad para las necesidades domésticas y de riego. Su monitoreo y evaluación son imprescindibles para diseñar medidas preventivas sobre la salud de las personas, la vida animal y la vegetación (Salcedo et al., 2017).

Los procesos hidrogeoquímicos como intercambio iónico, oxidación, reducción, desorción, precipitación y disolución controlan la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas (Wu et al., 2018). Por lo que se requiere llevar a cabo estudios hidrogeoquímicos en las zonas de estudio con el fin de determinar la calidad química de las aguas subterráneas como consecuencia de la meteorización de las rocas, relacionada directamente con la geología, el régimen de intemperie, la calidad y cantidad de agua de recarga y la interacción agua-roca (Sethy et al., 2016).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), juegan un papel muy importante en la administración de recursos hídricos y en el estudio de su contaminación que, junto con los estudios hidrogeoquímicos, sirven como indicadores de precaución de posibles problemas de salud ambiental (Gnanachandrasamy et al., 2018).

El área de estudio de esta investigación, Zamora, Michoacán cuenta con un acuífero formado por derrames basálticos, piroclásticos, materiales aluviales y depósitos lacustres (CONAGUA, 2015), en los que en estudios previos (Vázquez et al., 2015) se ha detectado la presencia de elevadas concentraciones de elementos traza que rebasan los límites establecidos por las normas nacionales, y que ocasionan problemas de salud a la población. También es necesario añadir que en esta ciudad se utiliza el agua subterránea como agua potable, extrayéndola mediante el bombeo en pozos para llevar a cabo sus diversas actividades cotidianas. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de evaluar críticamente la calidad del agua subterránea en Zamora con el fin de garantizar su utilización sostenible. Debido a que las aguas subterráneas de esta zona son la principal fuente para uso doméstico, es necesario llevar a cabo un análisis más detallado de su composición química y de las fuentes de los metales tóxicos y elementos traza que posiblemente se encuentren en esta área; con la finalidad de identificar problemas de salud por el consumo de este recurso hídrico por la comunidad. El objetivo de esta investigación fue llevar a cabo un estudio hidrogeoquímico y de calidad del agua subterránea de la zona, analizando diversos parámetros fisicoquímicos, iones mayoritarios y elementos traza, en donde se incluyó el tipo de facie hidroquímica, la especiación química, las relaciones y diagramas hidrogeoquímicos, así como diversas interpolaciones realizadas mediante SIG plasmadas en mapas de distribución espacial.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

La República Mexicana posee fuentes de agua subterránea que son aprovechadas por la población como agua potable. Debido al crecimiento poblacional en la actualidad, existe una mayor presión sobre los recursos de agua en los acuíferos.

En Michoacán, estudios sobre la composición química de las aguas subterráneas de la cuenca del río Duero, en la que se encuentra la ciudad de Zamora, Michoacán, muestran evidencias de elevadas concentraciones de algunos elementos traza que pueden llegar a ser tóxicos para la salud humana, como Boro y Plomo y que rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994.

Es importante resaltar que muy poco se conoce sobre las características fisicoquímicas del agua subterránea de la ciudad de Zamora Michoacán.

Además, las aguas provenientes del acuífero que se encuentra en esta zona, no se les ha realizado ningún tipo de tratamiento, ni monitoreo medioambiental que incluya análisis fisicoquímicos, bacteriológicos y de elementos traza, mucho menos estudios hidrogeoquímicos que revelen las diversas interacciones entre el agua y la roca, por lo que será de gran importancia la realización de un estudio que permita determinar la hidrogeoquímica y la calidad de esta agua, con el fin de servir como base para el control y tratamiento de éstas.

Hasta la fecha se cuenta con pocos artículos publicados sobre la calidad del agua subterránea en zonas cercanas a la ciudad de Zamora, Michoacán por lo que toda información obtenida durante la realización de esta investigación será una gran aportación, la cual servirá como fuente de consulta para estudios futuros.

Además, este proyecto constituirá una oportunidad para la población zamorana para que conozca las características del agua que han estado utilizando a lo largo del tiempo para los quehaceres domésticos y actividades productivas. También beneficiará a quienes requieran mejorar las condiciones medioambientales en esta ciudad y sentará las bases para una posible determinación del riesgo a la salud de las personas que usen y consuman este recurso natural.

Aunado a lo anterior, el conocimiento de los niveles de contaminación por cualquier parámetro previamente evaluado, permitirá la toma de decisiones adecuadas en el campo de la salud, el medio ambiente y en general en el plano social repercutiendo positivamente en la población zamorana.

### **3. HIPÓTESIS**

La identificación de procesos hidrogeoquímicos, el análisis de la calidad del agua y su distribución espacial en el área de estudio permitirán interpretar la composición química de las muestras de agua subterránea analizadas y, si es el caso, identificar zonas en las que haya contaminación por causas naturales o antropogénicas.

### **4. OBJETIVOS**

#### *4.1 Objetivo general*

Evaluar la química del agua en pozos de agua potable que abastecen a la ciudad de Zamora, Michoacán, mediante estudios fisicoquímicos, bacteriológicos y de elementos traza.

#### *4.2 Objetivos particulares*

- Determinar la movilidad de las especies predominantes en el agua mediante una modelación química, con el fin de establecer la forma química de los elementos traza.
- Establecer el tipo de facie hidroquímica a partir de las concentraciones de los iones mayoritarios presentes en el agua, mediante la construcción de un diagrama de Piper.
- Determinar la hidrogeoquímica del agua subterránea a partir de relaciones iónicas y diagramas que muestren las interacciones entre el agua subterránea y la roca.
- Establecer mapas de distribución espacial de los parámetros y elementos traza analizados, a partir de técnicas de interpolación en los que se utilicen los Sistemas de Información Geográfica.
- Establecer el diagnóstico de la calidad del agua subterránea a partir del Índice de Calidad del agua en la zona de estudio en función del análisis y correlación de sus parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y de elementos traza mediante el cumplimiento de los límites establecidos en la normatividad nacional.

## 5. MARCO TÉORICO

### 5.1 *El agua*

El agua es esencial para la vida y fundamental para mantener el equilibrio ecológico del planeta. Ha sido un factor fundamental en el asentamiento y crecimiento de grandes civilizaciones, culturas y creencias (Chavez Soto, 2010). Cuenta con características únicas, de gran significación para la vida. Es el líquido más abundante en la naturaleza y determinante en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan el medio natural (García et al., 1998) Además es incolora, inodora e insípida que está compuesto por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (Contreras et al., 2008).

El agua es un recurso natural cuya finitud y vulnerabilidad resultan de fundamental importancia, ya que sin ella no podría existir la vida en la Tierra (Masten, 2005). Además, se combina con ciertas sales para formar hidratos, reacciona con los óxidos de los metales formando ácidos y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas importantes (Contreras et al, 2008). Desde el punto de vista químico, es excepcional su importancia, ya que casi la totalidad de los procesos químicos que ocurren en la naturaleza tienen lugar en sustancias disueltas en ella. El agua es un medio de transporte de nutrientes; se trata de una cualidad muy importante para la vida ya que, para algunos ecosistemas, el agua sirve de recipiente de sustancias vitales para su existencia (García et al., 1998)

### 5.2 *Disponibilidad de agua*

El agua es uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta. Los seres humanos dependemos de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales (SEMARNAT, 2012).

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1 386 billones de  $\text{hm}^3$ , de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 billones de  $\text{hm}^3$ , es agua dulce, de esta cantidad casi el 70% no es de fácil para consumo humano porque se encuentra en glaciares, nieve y hielo. Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo

y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o vuelve imposible su utilización efectiva. Se estima que solamente el 0.77% se encuentra como agua dulce accesible al ser humano. De este porcentaje existente en el planeta, el 30% corresponde a agua subterránea, 0.8 % a Permafrost y sólo el 0.4% a aguas superficiales y en la atmósfera (CONAGUA, 2016).

En México, se encuentran organizadas las cuencas en 37 regiones hidrológicas, y a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA). En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos (CONAGUA, 2016), mientras que su disponibilidad natural media es de 460 km<sup>3</sup> de agua en promedio al año, valor superior al de la mayoría de los países europeos, pero muy inferior si se compara con el de Estados Unidos (3 051 km<sup>3</sup>), Canadá (2 902 km<sup>3</sup>) o Brasil (8 233 km<sup>3</sup>) (FAO, 2015).

### 5.3 Ciclo hidrológico

El movimiento del agua a través de las diversas fases del ciclo hidrológico es muy complejo, dada su naturaleza errática en lo temporal y espacial. Abarca toda el agua presente sobre la superficie del planeta o debajo de ella, es decir, el agua de mar y dulce, agua subterránea y superficial, agua presente en las nubes y la atrapada en rocas por debajo de la superficie terrestre (Masten, 2005)

El agua de los océanos es la reserva más grande, la atmosfera la reserva más pequeña y las reservas más grandes de agua del subsuelo son los mantos acuíferos, estratos porosos del subsuelo, a menudo de piedra caliza, arena o grava, limitados por rocas impermeables o barro que retiene el agua, como si fuesen una tubería gigante o una gran cisterna De manera simple podemos mencionar que las consideraciones básicas de este ciclo son:

- i) La radiación solar promueva la evaporación.
- ii) El enfriamiento de las masas de aire húmedo promueve la condensación del vapor de agua, acción contraria a la evaporación, es decir el vapor se transforma en gotas (estado líquido).
- iii) Para que el agua retorne a la atmosfera, puede seguir infinidad de rutas.

El ciclo del agua incluye la evaporación, transpiración, condensación, precipitación e infiltración de este líquido (Odum, 2006).

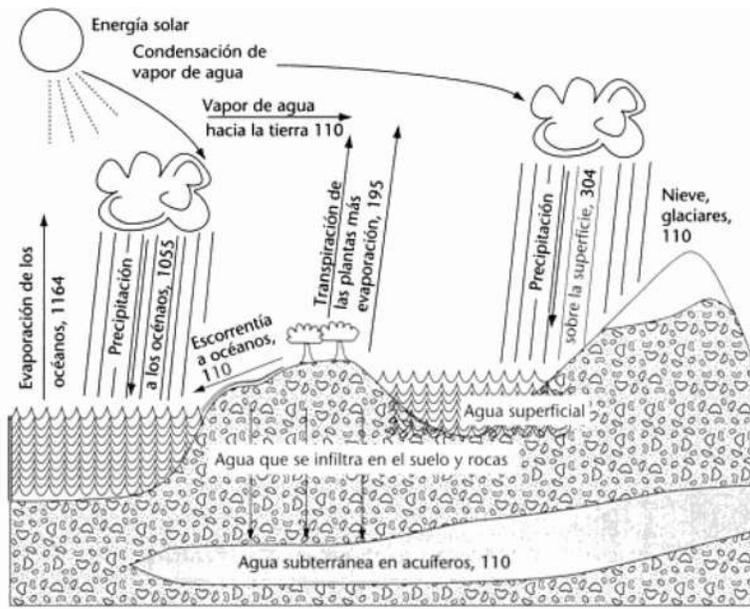


Fig. 1 El ciclo hidrológico, cantidades en agua en miles de millones de litros por día

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, 2012).

#### 5.4 Calidad del agua

El agua salubre y fácilmente accesible es importante para la salud pública, ya sea que se utilice para beber, para uso doméstico, para producir alimentos o para fines recreativos. La mejora del abastecimiento de agua, del saneamiento y de la gestión de los recursos hídricos puede impulsar el crecimiento económico de los países y contribuir en gran medida a la reducción de la pobreza (OMS, 2005).

La disponibilidad del agua depende no sólo de la cantidad, sino también de su calidad. Aunque haya agua, si está contaminada y se encuentra en una condición tal que sea no acorde con el uso que se le quiera dar, su empleo lo limita (Jiménez, 2010).

El agua potable segura es una necesidad absoluta para el desarrollo sostenible, ya que se requiere para el sustento, la salud pública, el crecimiento industrial, desarrollo económico y seguridad alimentaria (Sojobi, 2016). Pero la falta de disponibilidad de datos fiables sobre la calidad del agua también es uno de los principales inconvenientes, debido a que la gestión de los recursos hídricos ha sido un foco principal en todo el mundo en la formulación de políticas (Yehia et al., 2017)

#### 5.4.1 Tipos de agua

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

- ✚ **Aguas superficiales.** Esta agua se origina a partir de la precipitación atmosférica, de afloraciones de agua subterránea o bien de la fusión de masas. Comprenden los cauces (ríos), océanos, lagos y aguas embalsadas.
- ✚ **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. Su composición química es variable, dependiendo de la localización y profundidad que se considere.
- ✚ **Aguas meteorológicas.** Corresponde al agua líquida natural presente en la atmósfera. Además, es la precipitada sobre la tierra en forma de lluvia, nieve y granizo, originada por la condensación del vapor acuoso de la atmósfera.

#### 5.5 Contaminación del agua

Modificación, generalmente provocada por el hombre o por la misma naturaleza, de la calidad del agua haciéndola impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca y las actividades recreativas, así como para los animales domésticos y la vida natural (Sawyer et al., 2003).

### 5.5.1 Causas de contaminación en los cuerpos de agua

Según Sawyer (2003), existen diversos motivos por los que se contaminan los cuerpos de agua, tomando en cuenta los desechos producidos:

- ✚ *Contaminantes naturales:* A través de su ciclo natural, el agua puede entrar en contacto con ciertos constituyentes que se vierten en las aguas, atmósfera y en la corteza terrestre.
  - ✓ Sustancias minerales y orgánicas, disueltas o en suspensión, tales como: arsénico, cadmio, flúor.
  - ✓ Gases provenientes de la atmósfera (lluvias) o de las transformaciones bacterianas de la materia orgánica.
- ✚ *Contaminantes antropogénicos:* Su origen es causado por el hombre, y son productos de desechos líquidos o sólidos que se vierten en las aguas
  - ✓ Sustancias provenientes de desechos sanitarios.
  - ✓ Sustancias provenientes de desechos industriales
  - ✓ Sustancias provenientes del uso de plaguicidas, fertilizantes, insecticidas.

### 5.5.2 Contaminación del agua subterránea

La calidad y cantidad de los recursos de aguas subterráneas son hoy en día un riesgo debido al rápido crecimiento de la población, la industrialización, intensiva agricultura, urbanización y patrones cambiantes de uso de la tierra (Tirkey et al., 2017). Por lo tanto, determinar la composición química del agua subterránea es esencial para una gestión adecuada de la misma y una protección eficiente de recursos (Ayuba, et al., 2013).

La calidad del agua subterránea puede degradarse como resultado de procesos naturales o actividades humanas. Su evaluación determina su idoneidad para diferentes propósitos dependiendo de los específicos estándares establecidos por varios organismos, incluidos los estándares de la OMS (Ayuba, et al., 2013).

La contaminación de las aguas subterráneas que logra afectar su química puede tener lugar ya sea de fuentes tan diversas y amplias como percolación de los campos agrícolas con motivo de la aplicación de fertilizantes y plaguicidas, o de una fuente puntual como sitios de disposición de residuos, o de un número de factores en los que se incluyen la naturaleza de la recarga, gradiente hidrológico, tiempo de residencia del agua subterránea en el acuífero, la contaminación por las actividades antropogénicas y las interacciones roca-agua debajo de la superficie (Krishna, et al., 2011)

En México, las aguas subterráneas son una importante fuente de suministro; éstas son utilizadas principalmente para riego, población e instalaciones industriales. Las fuentes de agua subterránea son el medio más importante para cumplir las necesidades de agua del país, además de ser una fuente de agua para el 70% de los millones de habitantes (CONAGUA, 2016)

### *5.6 Elementos traza*

Una de las definiciones de metales pesados o elementos traza se basa en la gravedad específica: “es aquel metal con gravedad específica  $> 5\text{g/cm}^3$ ”, sin embargo, esta definición no es útil respecto al estudio de los efectos toxicológicos que algunos metales tienen sobre el ambiente y los seres vivos, así que otra definición de metal pesado que se ha adoptado es “grupo de metales o metaloides asociados con contaminación y toxicidad potencial” (Davor, 2003)

Las fuentes antropogénicas más importantes son la extracción de minerales, desde hace 10,000 años el hombre comenzó la minería, fundición y manufactura de metales utilizados para producir utensilios, herramientas, armas y ornamentos (Jiménez, 2010).

En las prácticas agrícolas, el uso de químicos para combatir plagas y fertilizar el suelo aportan grandes cantidades de metales pesados como son cobre, cadmio, mercurio, cromo, arsénico, entre otros. Otras actividades son la fabricación de plásticos, recubrimientos anticorrosivos, alimentos, manufactura de plaguicidas, baterías, soldaduras, pigmentos, producción de acero, curtidoras de piel, entre otras (Mancilla-Villa et al., 2011).

La presencia de algunos metales y/o metaloides en el agua puede ocurrir de forma natural por dilución de minerales y erosión. Además, se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos, que pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas (Rooney, et al., 2006); pasar a la atmósfera por volatilización y moverse hacia el agua superficial o subterránea. No son degradados fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Mancilla-Villa et al., 2011).

Como contaminantes importantes en las aguas subterráneas se presentan los elementos traza. Son elementos o compuestos químicos que existen a niveles muy bajos del orden de partes por millón (ppm) en un sistema dado incluyéndose elementos como el As, B, Cd, Cu, Cr, F, Fe, Mn, Hg, Pb y Zn (Manahan, 2007).

#### *Arsénico (As).*

Es un elemento ampliamente distribuido en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera, el cual está presente en cuatro estados de oxidación As (V), As (III), As (0) y As(-III). Las especies formadas según el estado de oxidación son variadas y pueden ser de origen inorgánico u orgánico. El As(III) puede provenir de la reducción biológica del As (V), y predomina en zonas cercanas a industrias con efluentes ricos en As(III), aguas geotermales y ambientes reductores (Smedley et al., 2002). En general, en aguas superficiales, el As(V) predomina sobre el As (III) especie de mayor toxicidad. En aguas subterráneas pueden encontrarse ambos estados de oxidación ya que las concentraciones de As(III) y As(V) dependen de la entrada del As al sistema, de las condiciones redox y de la actividad biológica (Reyes et al., 2016).

El arsénico puede circular en los ecosistemas naturales por un largo periodo de tiempo y puede ser incorporado en suelos, aguas subterráneas y litologías hospedantes (Smedley et al., 2002).

Los efectos toxicológicos del As no son bien conocidos y se especula sobre el proceso de transferencia a los seres humanos. La arsenicosis o hidroarsenicismo crónico es una

enfermedad que se presenta por elevadas concentraciones de As inorgánico y presenta diferentes afectaciones en la salud humana tales como problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares, gastrointestinales y efectos cancerígenos (pulmón, vejiga y piel) entre otras (Reyes et al., 2016).

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 este componente en aguas son necesarios tres factores (Revuelta, 2003):

- (a) *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 arseniats, especialmente los óxidos de hierro.
- (b) *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.
- (c) *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 rédox.

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, 2004).

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 arsenato y puede ser absorbido con facilidad en el tracto gastrointestinal en una proporción entre 40 y 100% (Mancilla-Villa et al., 2011).

#### ✚ Aluminio (Al):

El Al es el tercer elemento más abundante de la tierra y se encuentra en el hombre a niveles de ppb. Constituye aproximadamente el 8% de su corteza. Sólo el silicio y el oxígeno son más abundantes. Existe en la naturaleza en combinación con otros materiales, como silicatos y óxidos, muy estables, que dificultaron el desarrollo de métodos para obtener el aluminio en un estado razonablemente puro.

Se encuentra normalmente en forma de silicato de aluminio puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio y magnesio, pero nunca como metal libre. Entre estas combinaciones naturales destacan: ortosa o feldespato potásico  $[KAlSi_3O_8]$ , albita o feldespato sódico  $[NaAlSi_3O_8]$ , anortita o feldespato cálcico  $[CaAl_2Si_2O_8]$ , moscovita o mica de potasio  $[KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2]$ .

#### ✚ Antimonio (Sb):

El Sb se encuentra en la naturaleza en numerosos minerales, aunque es un elemento poco abundante, es posible encontrarlo libre, pero normalmente está formando sulfuros. Es un metaloide que puede estar presente en una variedad de estados de oxidación (-III, 0, III, V), pero en muestras ambientales comúnmente lo encontramos en 2 de ellos (III y V). El Sb (III) usualmente está presente como antimonita y el Sb (V) como antimoniato, en condiciones reductores y oxidantes respectivamente. Estas 2 formas tienen comportamientos analíticos muy diferentes, toxicidad y movilidad. Las especies trivalentes reportan ser más tóxicas que las pentavalentes. El comportamiento biogeoquímico del antimonio es similar a otros elementos del grupo VI en la tabla periódica, como lo es el arsénico y el fósforo.

La preocupación por las concentraciones de antimonio en el ambiente, ha sido por su reciente incremento debido a actividades antropogénicas y al extenso uso de componentes de Sb. Las fuentes antropogénicas más importantes de emisiones de Sb al suelo son los vehículos, fundidoras y la quema de residuos municipales. Clínicamente, la intoxicación por Sb es muy similar a la de As. En pequeñas dosis causa fuertes y violentos vómitos y puede provocar la muerte en cuestión de días.

#### *Bario (Ba):*

Es un elemento metálico que es muy parecido químicamente al calcio, pero más reactivo, constituye el 0.0425% en peso de la corteza terrestre. Siempre se encuentra en la naturaleza, siendo la baritina (sulfato) el mineral más importante; le sigue la whiterita (carbonato). También puede aparecer como trazas en minerales esenciales de las rocas, como, por ejemplo, los fedelpatos.

Reacciona con el cobre y se oxida con mucha facilidad cuando se encuentra expuesto al aire y es muy reactivo cuando hay presencia de alcohol y agua, donde se disuelve con mucha facilidad y hace que se encuentre en lagos, ríos y arroyos.

Los efectos sobre la salud del Ba dependen de la solubilidad de los compuestos. Pequeñas cantidades de Ba soluble en agua pueden causar en las personas problemas respiratorios, incremento en la presión sanguínea, alteración en el ritmo del corazón, irritabilidad estomacal, debilidad en los músculos, cambios en los reflejos nerviosos, edema cerebral y daño en los riñones. Todos los compuestos solubles del Ba son tóxicos y fácilmente absorbidos en el tracto gastrointestinal, y posteriormente acumulados en los huesos.

#### *Cadmio (Cd):*

El cadmio forma parte de la composición natural de algunas rocas y suelos y provoca una liberación al medio ambiente cercana a 25000 toneladas. De otra parte, por vía antrópica las concentraciones en el ambiente pueden ser incrementadas considerablemente. (Velázquez et al., 2011).

El cadmio que ingresa por vía respiratoria o por vía oral, se transporta a la sangre y se concentra en el hígado y el riñón. Tiene la capacidad de acumularse en estos órganos vitales lo que produce daños irreversibles aún para concentraciones reducidas. Por otra parte, el tiempo de permanencia en estos órganos puede ser muy elevado. Así, el tiempo de vida media del cadmio en el riñón puede alcanzar los 30 años (Velázquez et al., 2011).

#### *Cobalto (Co):*

Su símbolo es Co, su número atómico 27 y su masa atómica 58.93 g/mol. A temperatura ambiente no se oxida en contacto con el aire ni es atacado por el agua, pero reacciona con facilidad con el arsénico, el antimonio y el fósforo.

El cobalto se parece al hierro y al níquel, tanto en estado libre como combinado. Se encuentra distribuido con amplitud en la naturaleza y forma, aproximadamente, el 0.001% del total de las rocas ígneas de la corteza terrestre, en comparación con el 0.02% del níquel. Se halla en meteoritos, estrellas, en el mar, en aguas dulces, suelos, plantas, animales y en los nódulos de manganeso encontrados en el fondo del océano. Se observan trazas de cobalto en muchos minerales de hierro, níquel, cobre, plata, manganeso y zinc; pero los minerales de cobalto importantes en el comercio son los arseniuros, óxidos y sulfuros. El Cobalto está ampliamente dispersado en el ambiente de los humanos por lo que estos pueden ser expuesto a él por respirar el aire, beber agua y comer comida que contengan Cobalto. El Contacto cutáneo con suelo o agua que contenga Cobalto puede también aumentar la exposición.

El Cobalto es un elemento que ocurre de forma natural en el medio ambiente en el aire, agua, suelo, rocas, plantas y animales. Este puede también entrar en el aire y el agua y depositarse sobre la tierra a través del viento y el polvo y entrar en la superficie del agua a través de la escorrentía cuando el agua de lluvia corre a través del suelo y rocas que contienen Cobalto.

#### *Cobre (Cu):*

El cobre es un mineral indispensable por las funciones que cumple en nuestro organismo. Al igual que los demás minerales, no puede ser fabricado por los organismos vivos. Como consecuencia de que es un elemento que naturalmente se encuentra en las rocas y el suelo, las aguas superficiales y subterráneas contienen este mineral.

Las aguas potables tienen un contenido de cobre bastante bajo (habitualmente menor de 0.1 mg/L); sin embargo, algunas aguas no tratadas, especialmente las de pozo, pueden tener

condiciones que promuevan una liberación excesiva de cobre desde el suelo y especialmente por corrosión de las cañerías de cobre (Leibbrandt, 2001).

#### *Cromo (Cr):*

Es un elemento natural ubicuo, que se encuentra en rocas, plantas, suelos, animales y en los humos y gases volcánicos. Puede funcionar con distintas valencias y en el ambiente se encuentra en varias formas; las más comunes son las derivadas del cromo trivalente, o cromo (III), y las del cromo hexavalente, o cromo (VI). El cromo (III) es un nutriente esencial para los seres humanos, en los que promueve la acción de insulina. El cromo metálico, o cromo (0), y los derivados del cromo (VI), usualmente son de origen antropogénico (Albert, 1997).

Normalmente las concentraciones de cromo total en el agua potable son inferiores a 2 µg/L. Sin embargo, el agua de pozos puede tener concentraciones mayores si está contaminada con cromo (VI) de fuentes industriales o si la zona tiene depósitos importantes de minerales de cromo (Albert, 1997).

#### *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<sup>-</sup>) 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, 2012).

La proporción de flúor que ingresa en los recursos hídricos procedente del mar o por la contaminación atmosférica es extremadamente pequeña en comparación con la procedente de rocas y suelos (Gómez, 2002).

#### *Hierro (Fe) y Manganeseo (Mn):*

El hierro es un elemento esencial que produce problemas de aceptación (color y sabor) a concentraciones muy inferiores a las tóxicas (Etxabe, et al, 2010).

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).

Estos 2 elementos 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 Fe y Mn que las aguas superficiales, debido al bajo pH, a la alta concentración de CO<sub>2</sub> y al escaso contenido de oxígeno disuelto (Restrepo, 2007).

#### *Níquel (Ni):*

Se encuentra en la naturaleza, en minerales que contienen también hierro y magnesio, y en estado libre en algunos meteoritos. Químicamente tiene valencia +2 y +3. Es atacado por los ácidos diluidos y reacciona con numerosos no metales para formar compuestos binarios.

Las cantidades pequeñas de níquel son necesitados por el cuerpo humano para producir las células de sangre rojas, sin embargo, en cantidades excesivas, pueden llegar a ser suavemente tóxicos. La sobreexposición a corto plazo de níquel no se sabe qué problemas de salud puede causar, pero la exposición a largo plazo causa daño al corazón y al hígado. El EPA no regula actualmente niveles del níquel en agua potable.

En los sistemas acuáticos, el níquel habitualmente se encuentra en su forma Ni<sup>2+</sup>. La forma en que se encuentra dentro del agua depende, entre otros factores, del pH. Los compuestos de níquel en los cuerpos de agua superficiales o subterráneos se registran por regla general como "níquel total" y los resultados se presentan de la misma manera, si bien el espectro de los compuestos que se introducen en los cuerpos de agua por acción antrópica abarca desde sales solubles y óxidos insolubles hasta polvo de níquel metálico. Hasta ahora no se tiene conocimiento de compuestos de níquel que se encuentren exclusivamente en el agua.

#### ✚ Plomo (Pb):

El plomo se encuentra de manera natural en la corteza terrestre de manera relativamente abundante, en promedio de 16 mg/kg. 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 (Etxabe et al, 2010).

Es absorbido por inhalación, ingestión y a través de la piel. Las principales vías de exposición son: i) inhalación de partículas de plomo generadas por combustión de algunos materiales. ii) La ingestión de polvo, agua o alimentos contaminados (Reyes et al., 2016).

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 es de 0.01 mg/L.

#### ✚ Talio (Tl):

Se trata de un elemento muy móvil y poco sensible a las variaciones de pH. En la corteza terrestre se presenta con una concentración de 0.6 mg/kg. Aunque es generalmente admitida la peligrosidad de este elemento, apenas si queda recogido en las normativas actuales.

#### ✚ Vanadio (V):

Este elemento se encuentra naturalmente en minerales; hay cerca de 65 diferentes tipos y en los depósitos de combustibles fósiles. El vanadio puede encontrarse en diferentes organismos, siendo usado por algunos como centro activo de enzimas. También viene usado en los catalizadores en la producción de algunos compuestos, sobre todo el V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> o pentaóxido de vanadio, que es muy utilizado en la cerámica. En los seres humanos el vanadio se acumula en el organismo debido a la ingestión de comidas como el trigo, soya o aceite de oliva, pero a pesar de ser esencial, cuando se ingiere en concentraciones muy elevadas puede causar efectos sobre la salud.

Los efectos toxicológicos finales motivo de preocupación para las personas son la genotoxicidad y la irritación de las vías respiratorias. Puesto que no es posible determinar un

nivel de exposición sin efectos adversos, la OMS recomienda reducir los niveles en la medida de lo posible. También existe la posibilidad de una contaminación ambiental accidental o intencional cuando se produce una quema masiva o un derrame de petróleo crudo y en estos casos los efectos podrían ser dramáticos sobre ciertos ecosistemas confinados.

 **Zinc (Zn):**

Este metal se encuentra en el agua en el estado de oxidación 2+, es un contaminante común 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).

Tabla 1 Límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-1994 (elementos traza)

<b>ELEMENTO TRAZA</b>	<b>LÍMITE PERMISIBLE (mg/L)</b>
Aluminio (Al)	0.2
Arsénico (As)	0.025
Bario	0.7
Cadmio (Cd)	0.005
Cobre (Cu)	2.00
Cromo total (Cr)	0.05
Fierro (Fe)	0.30
Fluoruros (F <sup>-</sup> )	1.50
Manganeso (Mn)	0.15
Mercurio (Hg)	0.001
Plomo (Pb)	0.01
Zinc (Zn)	5.00

### 5.7 Iones mayoritarios

En el agua subterránea las especies disueltas predominantes son los iones; Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> en cantidades entre 1 y 1000 mg/L, estos son conocidos como constituyentes o iones mayoritarios (Páez, 2008).

- *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 en altas concentraciones en toda el agua (CNA, 2007).
- *Calcio ( $Ca^{2+}$ )*; es un catión encontrado a grandes 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).  
Las concentraciones de Ca en aguas varían mucho, estando asociadas al nivel de mineralización; por esto mismo, las aguas subterráneas presentan comúnmente más altos contenidos que las superficiales. La presencia de Ca en agua potable la dota de "sabor" que dependerá del anión mayoritario presente (Cañada, 2010)
- *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 ( $Cl^-$ )*; Son 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 ( $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ )*; 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 calcáreo y de la degradación de la materia orgánica (Doménech, 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).

Tabla 2 Límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-1994 (iones mayoritarios)

COMPONENTES MAYORES	LÍMITE PERMISIBLE (mg/L)
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	250.00
Sodio (Na <sup>+</sup> )	200.00
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	400.00

### 5.8 Parámetros fisicoquímicos

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 et al., 2007). Los principales parámetros a evaluar para la determinación de la calidad del agua subterránea son los siguientes:

- Temperatura:** Influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos y en el desarrollo de la vida. La temperatura no tiene efectos sobre la salud (Jiménez, 2010).  
La temperatura de las aguas subterráneas depende del terreno que drenan, naturaleza de las rocas, profundidad de la surgencia y fenómenos magmáticos que puedan existir. En este sentido, "son aguas termales aquéllas cuya temperatura de sugerencia sea superior en 4°C a la media anual del lugar donde alumbren".
- pH:** Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El agua pura tiene un pH neutro de 7, lo que significa que no es ácida ni básica (CNA, 2007).
- Alcalinidad:** Capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Expresa la capacidad que tiene un agua de mantener su pH a pesar de recibir una solución ácida o alcalina. Corresponde principalmente a los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, los más comunes son los de calcio y magnesio (Jiménez, 2010)

- *Dureza Total*: se define como la suma de cationes polivalentes (principalmente calcio y magnesio), se expresa en ( $\text{mg/L}^{-1}$ ).
- *Conductividad eléctrica*: mide la capacidad del agua para transportar una corriente eléctrica, el resultado expresa la concentración total de sales presentes en el agua.
- *Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $\text{DBO}_5$ )*: Medida de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica en el agua en 5 días a  $20^\circ\text{C}$ . Sólo se evalúa la demanda ejercida por la fracción carbonada, la de los sulfuros y del ion ferroso; excluye la fracción nitrogenada (Jiménez, 2010).
- *Demanda Química de Oxígeno ( $\text{DQO}$ )*: Es una medida de la concentración de sustancias que en agua pueden ser atacadas por un oxidante fuerte (Dicromato de potasio  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) en altas temperaturas ( $350^\circ\text{C}$ ). Esta prueba toma alrededor de 3 horas en el laboratorio (Jiménez, 2010).
- *Nitrógeno Amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ )*: Las descargas de aguas residuales y domésticas incrementan las concentraciones de nitrógeno amoniacal en las aguas superficiales y subterráneas, afectando la calidad de las mismas. En condiciones normales, la fuente de nitrógeno amoniacal en aguas superficiales proviene de la degradación natural de la materia orgánica presente en la naturaleza. Es uno de los componentes transitorios en el agua, porque es parte del ciclo del nitrógeno, y se ve influido por la actividad biológica. En ambos casos el nitrógeno amoniacal se origina de la degradación del nitrógeno orgánico y, éste a su vez, por la acción bacteriana, se va oxidando gradualmente a nitritos y finalmente a nitratos. Las aguas subterráneas también se pueden ver afectadas, ya que cuando hay un exceso de nitrógeno amoniacal, por ende, de nitratos, las plantas no pueden absorber este exceso y los suelos no son capaces de retenerlo, por lo cual, los nitratos se pueden ir filtrando a aguas subterráneas. Las concentraciones típicas de amoniacal de las aguas naturales, en términos de nitrógeno, son menores de  $0.1 \text{ mg/L}$ . Concentraciones superiores podrían ser indicativas de contaminación debida a aportes antropogénicos y desechos animales.

### 5.9 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).

Tabla 3 Límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-1994 (coliformes)

<b>PARÁMETRO</b>	<b>LÍMITE PERMISIBLE (NMP/100mL)</b>
Organismos coliformes totales.	Ausencia o no detectables.
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termo tolerantes.	Ausencia o no detectables.

## 6. ANTECEDENTES

Thi Thu Giang Luu en el 2008 estudió las concentraciones de arsénico y de otros elementos traza en el agua subterránea en Kandal, provincia de Camboya. Los resultados obtenidos mostraron una concentración mayor de As III que la estipulada en la OMS. También se encontraron otros elementos traza como Bario, Manganeso y Plomo en concentraciones mayores que las establecidas por la OMS. Por lo que concluyeron que, debido a la contaminación de estos elementos traza, el agua subterránea podría causar daños severos a la salud de las personas que están en contacto con ella. (Thu et al., 2009)

En el 2008 se llevaron a cabo estudios en la ciudad de Konya, ubicada en la parte central de Turquía, en la que evaluaron la calidad del agua subterránea de 177 pozos, donde se tenía como propósitos lo siguiente: (1) Proporcionar una visión general de la calidad del agua subterránea actual, (2) determinar la distribución espacial de los parámetros de calidad del agua subterránea, tales como pH, conductividad eléctrica, cloruros, sulfatos, dureza y nitratos, y (3) realizar mapas de calidad del agua subterránea en el área de estudio mediante el uso de SIG y técnicas geoestadísticas. Al final de la investigación se concluyó que el mapa mostró un nivel óptimo de calidad del agua subterránea. (Nas, et. al., 2010)

Vasant en el 2008 evaluó la calidad del agua subterránea y su idoneidad para el consumo de agua mediante el desarrollo de un Índice de calidad del agua (ICA) para Nanded Tehsil, Maharashtra en la India, en donde se obtuvieron 50 muestras representativas. Mediante el uso del análisis hidroquímico y la técnica IDW basada en SIG se utilizaron para representar la variación espacial de ICA en el área de estudio. Los resultados mostraron que el índice de calidad del agua en 14% de las muestras son excelentes, el 84% de las muestras son buenas y el 2% malas para el consumo. (Vasant et al. 2008)

En el 2010 en Rajasthan, en el oeste de la India se llevó a cabo una evaluación y caracterización basadas en SIG de la calidad del agua subterránea en un terreno semiárido de roca dura. Las variaciones espacio-temporales de los parámetros de calidad del agua en el área de estudio se analizaron mediante técnicas SIG. La calidad del agua subterránea se evaluó con base a un Índice de calidad del agua subterránea (GWQI) basado en SIG. La calidad del agua subterránea del área de estudio resultó ser adecuada para beber. El mapa de

GWQI indicó que existe agua subterránea de relativamente alta calidad en las partes noroeste y sureste del área de estudio. (Machiwal, et. al, 2011)

Velázquez en 2010, analizó la distribución del B en las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca del río Duero y su potencial efecto tóxico en la salud humana y en los cultivos de la zona, se colectaron 49 muestras de agua de pozos agrícolas y urbanos, norias, manantiales y río Duero. Las muestras fueron analizadas para pH, conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, metales pesados disueltos, fósforo y boro. Concluyendo que el uso de esta agua en el riego agrícola representa un peligro de acumulación de B en los vertisoles de la región, el cual deriva en efectos tóxicos y disminución de rendimientos en cultivos sensibles como la fresa. Las elevadas concentraciones de B en algunos pozos urbanos confirman el peligro sanitario potencial para las poblaciones que usan esta agua para consumo humano (Velázquez et al., 2011).

Se evaluó la hidroquímica de las aguas subterráneas en el 2011 de la cuenca del río Duero, determinando las concentraciones de metales pesados y relacionándolos con los peligros potenciales a la salud humana. Se analizó la composición fisicoquímica del agua en 17 sitios. Los datos se procesaron usando análisis estadístico multivariado. La concentración de Zn, Mn, Cu y Fe se encontró dentro de los límites permitidos para agua de uso y consumo humano. Los factores asociados al origen de los componentes químicos del agua fueron: rocas basálticas con minerales tipo olivino, feldespatos y calcita. La concentración de Pb se asoció a clastos volcánicos (arenas silíceas) donde posiblemente se encuentren filones de PbS en concentraciones que rebasan lo establecido en la normatividad mexicana (Velázquez et al., 2011).

KSHETRIMAYUM en el 2012 realizó estudios de calidad del agua subterránea en la cuenca del río Markanda, al noroeste de la India, en los cuales llevó a cabo evaluaciones de calidad del agua subterránea, la cual es utilizada para riego agrícola, haciendo análisis hidroquímico con base en las concentraciones de los iones mayores como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Además, se utilizaron diagramas trilineales que revelaron las facies hidroquímicas de la zona. Concluyendo que el agua de esta cuenca es de buena calidad y adecuada para todos los usos (Kshetrimayum, et.al., 2012).

En México, concretamente en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León en el 2012 se llevaron a cabo estudios de calidad de agua subterránea debido a que es la tercera ciudad más grande y la segunda más industrial de México. Determinando el contenido de elementos traza en el agua subterránea que es utilizada para beber, para fines domésticos e industriales. Además, se establecieron sus principales propiedades hidroquímicas y así establecer si representa una amenaza para la población. Por conclusión, detallaron que, a pesar de ser una zona altamente industrial, la calidad del agua subterránea resultó ser óptima para llevar a cabo todas las actividades previamente mencionadas (Mora et al., 2017).

Sadat-Noori en el 2013 estudió la calidad del agua subterránea del acuífero Saveh-Nobaran, así como la distribución de los parámetros de calidad para identificar los lugares con la mejor calidad de agua para consumir en la zona de estudio. También se detalló el índice de calidad de agua subterránea junto con un SIG. Se colectaron 58 muestras, donde se analizaron los principales aniones y cationes. La interpolación de los datos, para llevar a cabo los mapas de distribución de contaminantes se realizaron bajo la técnica geoestadística kriging, dando como resultado que sólo las aguas del centro y noreste del acuífero no son aptas para beber (Sadat-Noori et al., 2014).

En el 2014 se llevó a cabo una investigación en las aguas subterráneas al norte de la península de Baja California, México, en las que se colectaron muestras y se analizaron parámetros fisicoquímicos y los componentes principales de iones y cationes. Además, con los resultados obtenidos, analizaron la hidrogeoquímica en la zona de estudio para determinar las reacciones que se estaban llevando a cabo al momento de entrar en contacto el agua y la roca, antes de que ésta surgiera a la superficie (Ledesma-Ruiz et al., 2017).

En Bangladesh en el 2016 se investigó la calidad del agua subterránea en el distrito de faridpur, donde se colectaron 60 muestras. Además, se detallaron las concentraciones de algunos elementos traza como As y Fe, obteniendo el índice de contaminación por metales pesados, el grado de contaminación y el índice de evaluación de metales pesados, aunque las muestras hayan revelado un bajo nivel de contaminación. Concluyendo que, la geología de la zona influye directamente en la calidad del agua y en la presencia de este tipo de elementos traza (Chakraborti et al., 2015).

En el 2017 se llevó a cabo un estudio de las aguas subterráneas en la Cuenca del Río Tamirapani al sur de la India, en donde evaluó la concentración de elementos traza como Fe, Mn, Cu, Cr, Pb, Zn y Ni, a partir de técnicas geoestadísticas como el kriging. Concluyendo que los elementos en el agua subterránea son de origen natural, excepto el cobre, el cromo y el plomo, ya que éstos se derivan de actividades antropogénicas (Yehia et al., 2017).

En el acuífero del Valle de Puebla se evaluó en el 2017 los cambios hidrogeoquímicos en sus aguas subterráneas, debido a que ésta es la cuarta ciudad más grande con zonas industriales muy importantes y puede representar riesgos potenciales a la salud. Se realizó la hidrogeoquímica de la zona, ya que se sabe cuenta con diversas rocas mineralizadas que afectan la calidad del agua de la zona. Se evaluaron las facies hidroquímicas, elementos traza y componentes mayores de cationes y aniones (Salcedo Sánchez et al., 2017).

Mahmoudi, también en el 2017 investigó la hidrogeoquímica y la contaminación del acuífero profundo Varamin ubicado en el sureste de la provincia de Teherán, Irán. El estudio evaluó la idoneidad del agua subterránea para usos de riego. El estudio hidrogeoquímico se realizó mediante la recopilación y el análisis de 154 muestras de aguas subterráneas. Dando como resultado que los principales procesos que rigen la química del agua subterránea son la disolución de calcita, dolomita y yeso a lo largo de la trayectoria del flujo, y el intercambio iónico directo (Mahmoudi et al., 2017).

El estudio geoquímico más reciente se refiere al hecho por Mushtaq en el 2018, en el cual delimitó los factores responsables de la movilidad del Arsénico (As) en las aguas subterráneas del acuífero en Punjab, Pakistán. Realizó estudios de química del agua y con los resultados obtenidos de los análisis encontró que este elemento supera en 59% de las muestras la concentración establecida por la OMS (Mushtaq et al., 2018).

Uno de los estudios más recientes de este tema se realizó en el 2019 en la cuenca de Loja en Ecuador, en donde se llevaron a cabo análisis químicos en muestras de agua subterránea, y con los datos obtenidos, se plasmaron en diagramas bivariados, los que permitieron determinar los procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición de las aguas subterráneas de la cuenca. Además, se encontró que el ion predominante era el  $\text{HCO}_3^-$ , seguido del  $\text{Cl}^-$ , proveniente de la intemperización de la calcita, dolomita y yeso (Ruiz-Pico et al., 2019).

## 7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 7.1 Ubicación

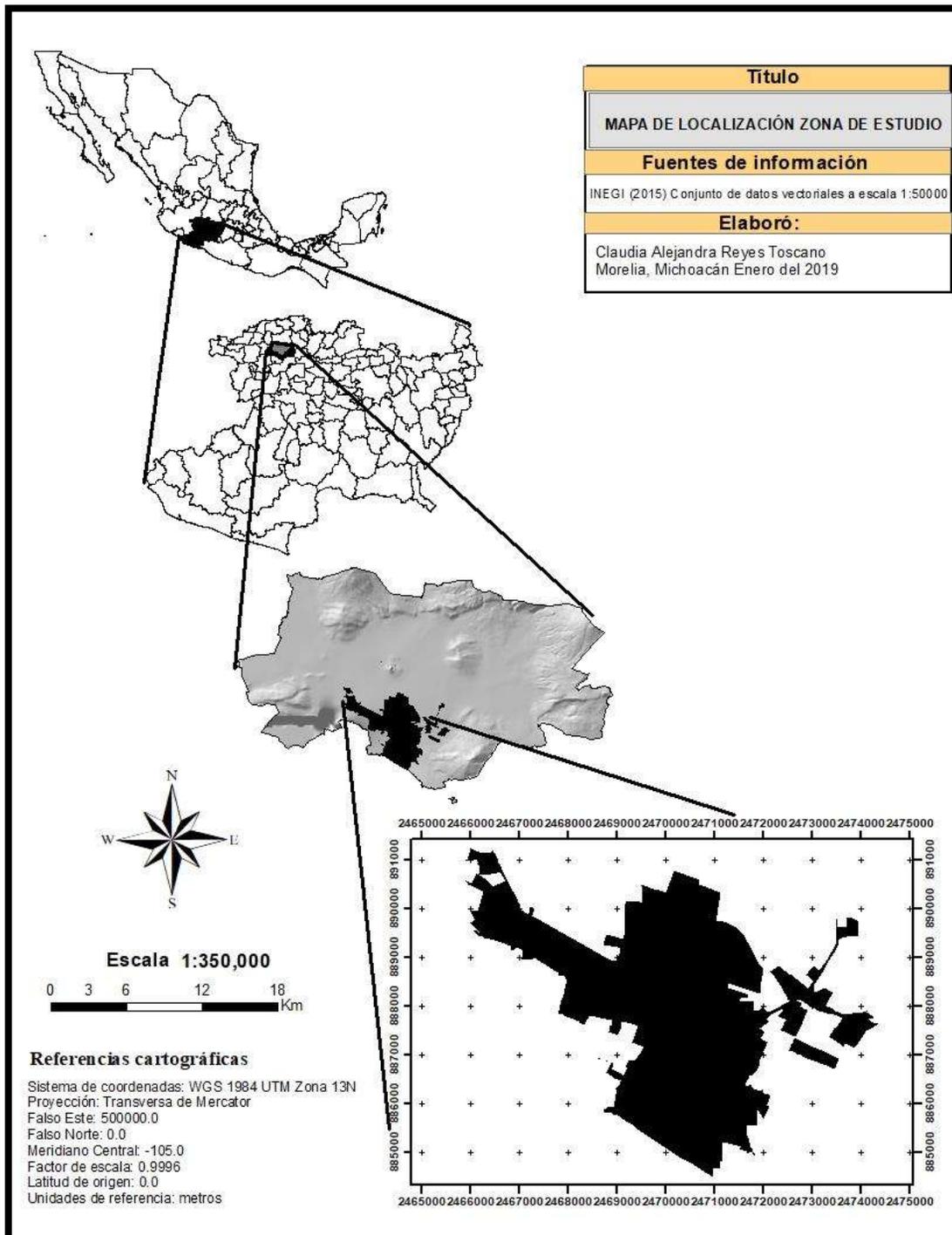


Fig. 2 Macrolocalización de la zona de estudio

La ciudad de Zamora de Hidalgo pertenece a la Región del Bajío del Estado de Michoacán, se ubica entre los paralelos 19°56' y 20°07' de latitud norte; los meridianos 102°07' y 102°25' de longitud oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 1580 m. Colinda al norte con los municipios de Ixtlán y Ecuandureo; al este con los municipios de Ecuandureo, Tlazazalca y Tangancícuaro; al sur con los municipios de Tangancícuaro y Jacona; al oeste con los municipios de Jacona, Tangamandapio, Chavinda e Ixtlán. Presenta una distancia de 150 km a Morelia, capital del Estado de Michoacán. Cuenta con una superficie de 335.55 km<sup>2</sup>, ocupando el 0.56% de la superficie total del estado. Posee 166 localidades y una población total de 186 102 habitantes (INEGI, 2010). Por su población ocupa el tercer lugar entre las ciudades del estado. Asimismo, es el principal polo de desarrollo del poniente de Michoacán. Asentada en un valle muy fértil, Zamora siempre ha sido el centro de una zona económica fundamental para Michoacán. La región es importante productora de cultivos de zarzamora y fresa; destaca por su actividad industrial con procesadoras y empacadoras de esos frutos, que exporta principalmente al extranjero, además de ser una zona de importancia nacional por sus empresas, conocidas en todo el mundo. Su localización geográfica ha permitido que la ciudad se caracterice por ser un enlace comercial y económico muy importante entre la capital del estado (Morelia) y la ciudad de Guadalajara (Jalisco) (INEGI, 2010).

## 7.2 Fisiografía

*Provincia:* Eje Neovolcánico (100%)

*Subprovincia:* Chapala (76.14%) y Sierras y Bajíos Michoacanos (23.86%)

*Sistema de topomorfias:* Llanura aluvial (58.70%), Sierra volcánica de laderas tendidas con lomerío (23.85%), Escudo volcanes (11.32%) y Sierra con laderas de escarpa de falla (6.13%) (INEGI, 2010).

## 7.3 Geología e hidrogeología

El área de estudio está localizada en la subprovincia de “Zonas de Fosas Tectónicas”, ubicada al noroeste del estado de Michoacán, la cual se caracteriza por el alineamiento de sus cuencas, en este caso fosas tectónicas rellenadas, sensiblemente este-oeste. Así mismo, su constante actividad volcánica, reflejada por innumerables aparatos volcánicos y rocas extrusivas, conformadas esencialmente por rocas basálticas y andesíticas (CONAGUA, 2015).

Cuenta con altitudes entre 1,530 y 1,600 msnm, desarrollado en una antigua cuenca lacustre, con espesores de más de 300 m; rodeado por conos cineríticos, que sobresalen del piso del valle; al norte, se distinguen alineamientos debidos a los esfuerzos ejercidos sobre las rocas ígneas extrusivas, de composición andesítica que constituyen el basamento de la región. Las rocas más antiguas andesíticas y basálticas, se consideran como impermeables por su estructura masiva. En las sierras que rodean al valle afloran basaltos del Cuaternario, subyaciendo a rocas volcánicas de menor permeabilidad. Por su textura vesicular y denso fracturamiento, tienen permeabilidad y capacidad de infiltración muy altas, por tanto, son excelentes receptores de recarga y constituyen acuíferos muy permeables en el subsuelo de la porción sur del valle, donde están cubiertos por depósitos aluviales. Por el contrario, los basaltos del Terciario son de capacidad de infiltración y permeabilidad muy bajo, debido a que su estructura es masiva y poco fracturada. En el subsuelo del valle presentan una configuración escalonada, a causa del tectonismo, y constituyen el basamento geohidrológico del acuífero (CONAGUA, 2015).

El acuífero principal del valle está formado por derrames basálticos, piroclásticos, materiales aluviales y depósitos lacustres. Los tres primeros son los elementos más permeables, y los últimos constituyen acuitardos de permeabilidad media a baja. Su espesor aumenta de los bordes hacia el centro del valle, donde alcanza valores hasta de 350 m; está limitado inferiormente por depósitos lacustres antiguos, y en las porciones bajas del valle está semiconfinado por los depósitos lacustres recientes (CONAGUA, 2015).

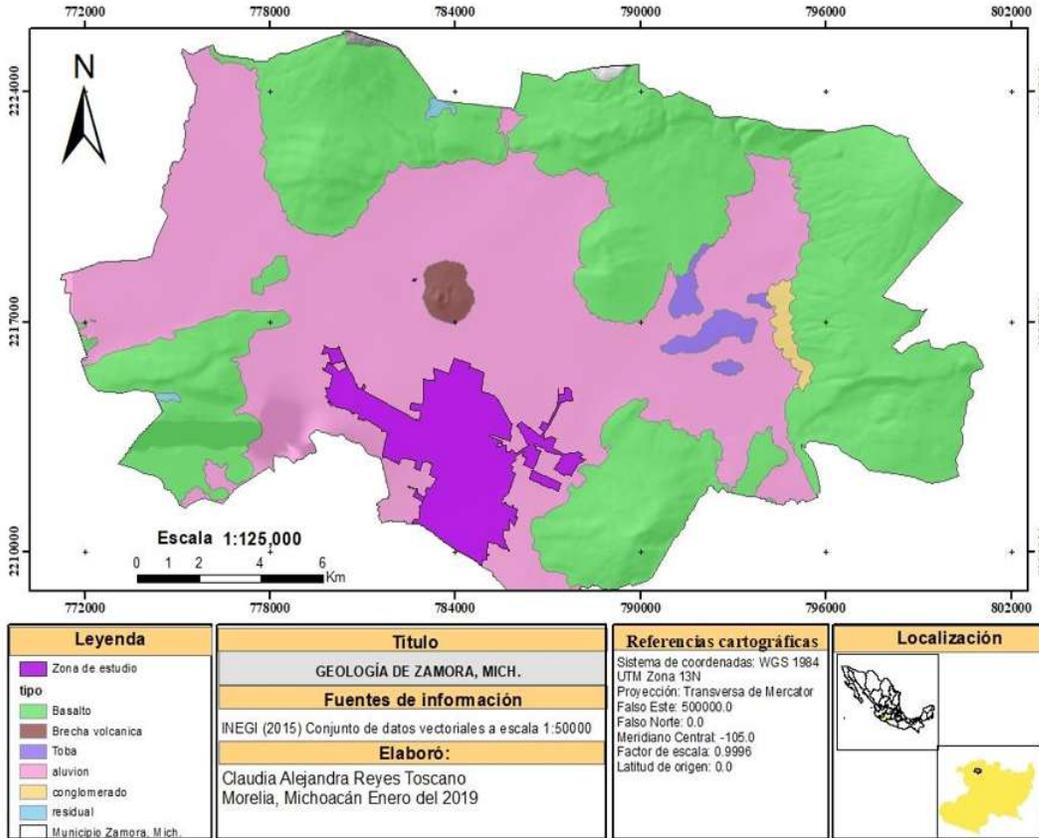


Fig. 3 Mapa de la geología del municipio de Zamora, Michoacán

Tabla 4 Columna litológica del municipio de Zamora, Michoacán

Capa No.	Profundidad (m)	Descripción litológica
1	1.5	Clastos y fragmentos de roca con escorias y arenas arcillosas, sin saturación
2	17	Depósitos con materiales cenagosos, con limos y arcillas, interactuados con sedimentos silíceos y materiales clásticos de granulometría fina sin saturación
3	45	Material clástico con fragmentos, pedacería de roca, escorias y material cinerítico, con sedimentos areno-arcilloso, con bajo grado de saturación
4	150	Rocas extrusivas de composición básica (basaltos) fracturadas, con posibilidades en saturación.
5	250	Rocas ígneas extrusivas de composición básica, compactos a ligeramente fracturadas, con trazas en saturación
6	>250	Cuerpos de rocas ígneas extrusivas de composición básica (Basaltos), fracturados, alterados con brechas volcánicas, con posibilidades de saturación

#### 7.4 Orografía

Su relieve lo constituyen el Sistema Volcánico Transversal y los cerros de la Beata, la Beatilla, el Encinar, Tecari, el Ario y el Grande (INAFED, 2010).

#### 7.5 Hidrografía, clima y ecosistemas

Su hidrografía está constituida por la Región hidrológica Lerma-Santiago (100%), su cuenca es la Lerma-Chapala (100%). Sus principales ríos son: Duero y Celio, los arroyos Prieto, Hondo y Blanco, las presas de Álvarez, del Colorín y la de Abajo. Además, hay algunos arroyos intermitentes (INAFED, 2010).

Su clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad. Tiene una precipitación pluvial anual de entre 700 y 1,000 mm y temperaturas que oscilan entre 16 y 22°C. En el municipio domina la pradera, con huisache, mezquite, cardonal, nopal y matorrales espinosos. Su fauna se conforma por paloma, codorniz, tordo, urraca, coyote, tlacuache, zorra y tejón (INEGI, 2010)

#### 7.6 Edafología

Los suelos dominantes son: Vertisol (73.93%) y Phaeozem (15.56%). Su uso es primordialmente ganadero y agrícola en menor proporción forestal (INEGI, 2010).

#### 7.7 Uso de suelo

El uso de suelo en el municipio de Zamora, Michoacán está formado principalmente por la agricultura (49.11%), mientras que la zona urbana ocupa (9.42%), la selva (34.81%), bosque (3.94%) y Pastizal (1.11%) (INEGI,2010)

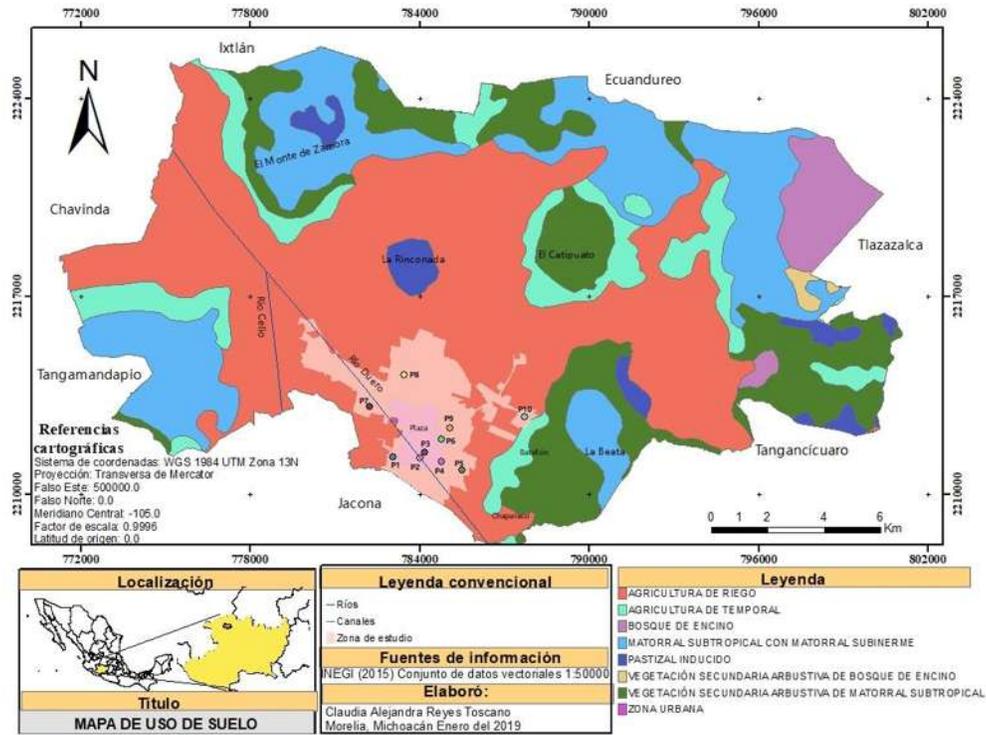


Fig. 4 Mapa de los usos de suelo del municipio de Zamora, Michoacán

## 8. METODOLOGÍA

### 8.1 Selección de los sitios de estudio

Se seleccionaron 10 sitios de muestreo representativos del área de estudio en mención, los cuales se localizan en zonas estratégicas como: zonas de cultivo, zonas colindantes al río Duero, zonas con alto índice poblacional y por último en zonas de marginación con deficiente o nula infraestructura sanitaria.

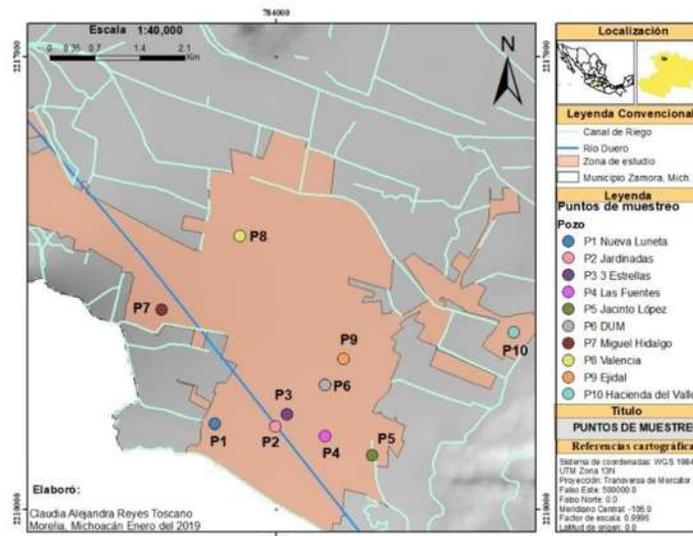


Fig. 5 Localización de los sitios de estudio

Tabla 5 Coordenadas de localización de los sitios de estudio

SITIO	NOMBRE	COORDENADAS	PROFUNDIDAD
P1	Pozo Nueva Luneta	19°58'40.5"N 102°17'43.2"W	55 m
P2	Pozo Jardinadas	19°58'38.5"N 102°17'10.7"W	40 m
P3	Pozo 3 Estrellas	19°58'44.7"N 102°17'04.4"W	60 m
P4	Pozo Las Fuentes	19°58'33.3"N 102°16'44.4"W	90 m
P5	Pozo Jacinto López	19°58'23.2"N 102°16'19.6"W	150 m
P6	Pozo D.U.M	19°58'59.3"N 102°16'44.0"W	150 m
P7	Pozo Miguel Hidalgo	19°59'38.4"N 102°18'10.7"W	180 m
P8	Pozo Valencia	20°00'14.7"N 102°17'28.0"W	120 m
P9	Pozo Ejidal	19°59'12.2"N 102°16'33.8"W	140 m
P10	Pozo Hacienda del Valle	19°59'24.0"N 102°15'02.5"W	130 m

## 8.2 *Colecta de muestras*

Las muestras de agua subterránea se colectaron en 2 campañas de colecta. La primera fue en mayo del 2018 (periodo de estiaje), mientras que la segunda colecta fue en noviembre del mismo año (periodo al finalizar lluvias). Un total de 20 muestras de agua subterránea se seleccionaron para llevar a cabo la caracterización de la química del agua subterránea en la zona de estudio.

### 8.2.1 *Toma de muestras para parámetros fisicoquímicos*

La colecta de muestras se realizó en botellas de polietileno de 2L que se llenaron tratando de minimizar la presencia de aire con el objeto de evitar cambios químicos. Se marcaron todas con la fecha y el sitio de muestreo y se siguió el procedimiento indicado en la normatividad mexicana (DOF, 2002). En cada sitio se tomaron 3L 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 se midieron en campo (APHA-AWWA-WPCF 1995).

### 8.2.2 *Toma de muestras para elementos traza*

Se utilizarán recipientes de polietileno de 125 ml previamente descontaminados de la siguiente manera: cada frasco con su tapa y contratapa serán introducidos en una solución de HNO<sub>3</sub> al 10% durante una semana. Posteriormente se cambiaron a una solución de HNO<sub>3</sub> 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, indicando correctamente el blanco. Las muestras se depositaron en una hielera para su traslado al laboratorio (Alfaro, 2000); (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

### 8.2.3 Toma de muestras para coliformes fecales

Se tomaron aproximadamente 200 ml de cada uno de los sitios de muestreo y se colocaron en bolsas estériles completamente selladas. Estas bolsas se manejaron con precaución para evitar cualquier tipo de contaminación que pudiera afectar los resultados. Si el pozo contaba con bomba manual se dejó fluir el agua 5 minutos libremente antes de tomar la muestra. Si tenía bomba mecánica se flameó una llave de descarga, se dejó fluir el agua 5 minutos y se tomó la muestra. Si no tenía sistema de bombeo, se tomó la muestra directamente del pozo utilizando frasco estéril con lastre. Se tomaron las precauciones debidas para mantener al máximo las condiciones de asepsia. Todas las botellas 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 (DOF, 2006).

### 8.3 Material y equipo

El equipo que se utilizará en las pruebas de campo y de laboratorio se indica en la Tabla siguiente:

Tabla 6 Equipo y material requerido durante la investigación

PARÁMETRO	EQUIPO
Fisicoquímicos ( <i>in situ</i> )	Termómetro de inmersión (Branan) Maleta de campo (Thermo Scientific Orion Star serie A320)
Fisicoquímicos (laboratorio)	Técnicas establecidas por las Normas Mexicanas (Laboratorio de CONAGUA)
Elementos traza	Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)
Coliformes	Incubadora, autoclave

#### 8.4 *Análisis de parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y de elementos traza*

En este trabajo se determinaron los parámetros fisicoquímicos tanto en campo (temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) como en laboratorio (dureza y alcalinidad total, DBO, DQO,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y elementos traza). 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; DOF, 2001g) 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.

El análisis de elementos traza (Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Zn) se realizó mediante espectrometría masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). El análisis de coliformes se llevó a cabo mediante la técnica de cuenta en placa, establecida en la NMX-AA-042-SCFI-2015 y los resultados se expresaron en UFC/100 ml.

#### 8.5 *Balance iónico*

Frente a la necesidad del aseguramiento/control de calidad del trabajo analítico en la química del recurso hídrico, el cálculo del balance de iones resulta un procedimiento simple, preciso y cuyos datos son fáciles de interpretar; el mismo que provee una medida clara de la calidad analítica y, en algunos casos, permite ubicar errores analíticos al comparar los balances y datos de regresión inter-iones (Voutsis et al., 2015).

El balance de iones es la verificación de que la suma de mili-equivalentes (meq) de aniones es aproximadamente igual a la suma de mili-equivalentes de cationes; esto último aprovechando la electro-neutralidad del agua, propiedad que puede distorsionarse si existen ciertos fenómenos, ocasionando el conocido y problemático imbalance de iones. El error que resulta de dicho balance se expresa por la diferencia de iones.

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, 2000).

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

### 8.6 Facies hidroquímicas

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 (Chakraborti et al., 2015).

La caracterización hidroquímica de las aguas y su distribución espacial y temporal aportan información sobre su origen, los procesos fisicoquímicos que las afectan y la calidad (degradación y presencia de contaminantes). Con esa información es posible establecer la evolución del acuífero en el tiempo y el espacio, evaluar su vulnerabilidad, detectar afectaciones y establecer medidas correctivas, es decir, contribuye a que se pueda hacer una mejor gestión de los recursos hídricos (Hidalgo 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 de Stiff. 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 (López-Álvarez et al., 2013).

El diagrama triangular de Piper permite conocer el carácter del agua en sus fases químicas y expresa muy bien las relaciones entre los diferentes grupos de agua, su evolución y las posibles mezclas que pueda haber entre distintos tipos de aguas. Está compuesto por tres partes principales de graficación, dos triángulos y un rombo central. Los valores se expresan en miliequivalentes por litros. En el triángulo de la derecha se representan los aniones, mientras que los cationes se encuentran en el de la izquierda. Sobre estos triángulos se grafican los datos del contenido iónico de los análisis y se obtiene un único punto; la proyección de ambos en el diagrama rómbico dará un tercero que indica la composición porcentual relativa en términos de pares de aniones y pares de cationes (Tineo, 2015).

La figura 6 muestra el diagrama trilineal de Piper, con su respectiva clasificación de las diferentes facies hidroquímicas del agua.

Otra herramienta fundamental para la clasificación del tipo de agua subterránea son los diagramas de Stiff, en los cuales se representa la composición del agua según los iones mayoritarios presentes. Estos diagramas permiten visualizar el grado de mineralización de las masas de agua. La gráfica resultante está compuesta de 3 ejes horizontales, donde cada uno une un catión y un anión, dispuestos de la siguiente forma: cationes ubicados al lado izquierdo del costado y aniones ubicados al lado derecho, donde ion  $\text{Na}^+$  confronta al  $\text{Cl}^-$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  al  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  al  $\text{SO}_4^{2-}$ . Dando como resultado una figura cuya forma indica las proporciones relativas en (meq/L) de los diferentes iones, mientras el tamaño indica la concentración total en la que están presentes los mismos (Ramírez, 1989).

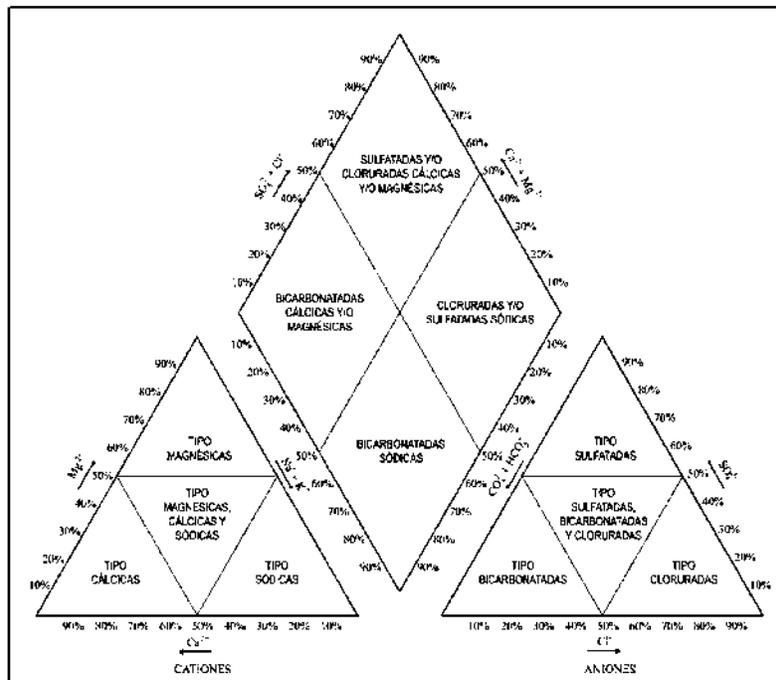


Fig. 6 Diagrama de clasificación hidroquímica para aguas naturales usando el diagrama de Piper

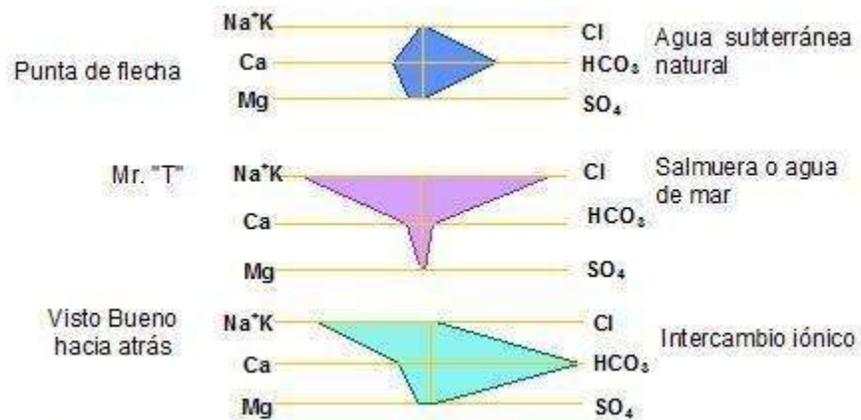


Fig. 7 Diagrama de Stiff típicos

Como regla general se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente las bicarbonatadas, después predominan las sulfatadas, y las aguas con mayor tiempo en el acuífero son las cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chevotareb. En la composición catiónica la secuencia análoga sería: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y al final el Na<sup>+</sup>. Esta secuencia se debe a 2 causas: solubilidad y abundancia en el subsuelo de las distintas sales (Sanchez, 2012).

- La solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos que, a su vez, son menos solubles que los cloruros. Por lo tanto, primero se alcanza el tope para los bicarbonatos, después para los sulfatos y finalmente para los cloruros.
- La abundancia, se refiere a la diferente probabilidad que existe de que un agua encuentre minerales que le aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros. Si un agua estuviera en contacto simultáneamente desde su infiltración, con minerales que le aportaran todos esos iones, no se produciría la secuencia de Chevotareb, sino que, desde el primer momento, las aguas serían cloruradas, puesto que son las sales más solubles (Sanchez, 2012).

En las grandes cuencas se distinguen 3 zonas en profundidad (Fig. 8):

- Una zona superior, con flujo activo, generalmente con recorridos cortos y tiempos de permanencia de años o decenas de años. Aguas bicarbonatadas y poco salinas.
- Una zona intermedia, con flujo menos activo, recorridos más largos y tiempos de permanencia de cientos a miles de años. Aguas más salinas y sulfatadas.

- Una zona inferior, con flujo muy lento, con largos recorridos y tiempos de miles a millones de años. La salinidad es elevada y el agua es clorurada.

Para entender mejor lo anterior, en la siguiente figura (Fig. 8) el sondeo A capta un flujo regional mientras que el sondeo B intercepta un flujo local, de modo que su química puede ser diferente (Sanchez, 2012).

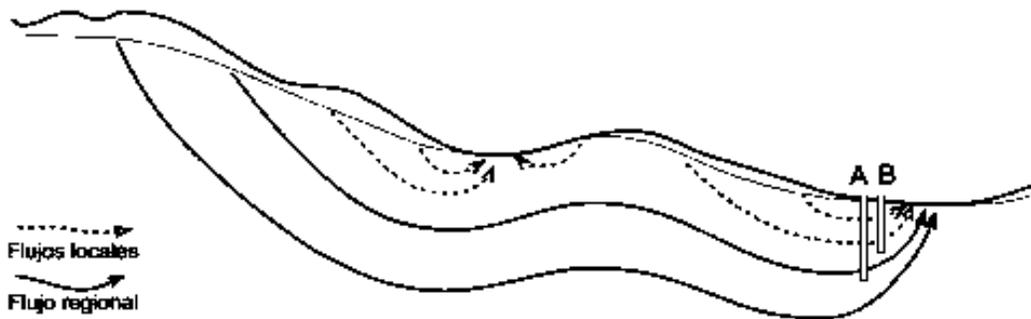


Fig. 8 Zonas de profundidad de acuíferos

En los acuíferos carbonatados, la facie predominante es la bicarbonatada cálcica o cálcica-magnésica, dependiendo de la preponderancia de materiales calizos o dolomíticos. La mineralización es generalmente ligera, las aguas son perfectamente aptas para su uso en abastecimiento y riego, tienen valores de pH entre 4 y 8, con valores de la relación  $Na/Cl \approx 1$  y con valores de la relación  $Cl^-/SO_4^{2-} \gg 1$ . Por tanto, estas aguas son resultado de la interacción agua-roca en áreas de recarga, donde los flujos son predominantemente verticales descendentes (Sanchez, 2012).

## 8.7 Diagramas hidrogeoquímicos

### 8.7.1 Diagrama Durov

El gráfico trilineal de Durov se basa en el porcentaje de miliequivalentes de iones principales. Los valores de cationes y aniones se trazan en dos gráficos triangulares separados y los puntos de datos se proyectan en una cuadrícula cuadrada en la base de cada triángulo.

Los cationes especifican los parámetros del triángulo izquierdo. Los ajustes predeterminados son los cationes principales  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , sin embargo, se puede seleccionar cualquier otro parámetro (por ejemplo, composición del gas, elementos traza, etc.). Los aniones generalmente especifican los parámetros para el triángulo superior. Los ajustes predeterminados son los aniones principales  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , sin embargo, se puede seleccionar cualquier otro parámetro.

Dado que los puntos de datos se proyectan a lo largo de la base del triángulo, que se encuentra perpendicular al tercer eje en cada triángulo, la información sobre la concentración del elemento del vértice (el tercer elemento) se pierde en la cuadrícula cuadrada. Cambiar la orientación de los parámetros en ambos triángulos puede mejorar su capacidad para detectar grupos distintos. Además, el gráfico de Durov permite la comparación directa de otros dos parámetros de agua subterránea, típicamente pH y el total de sólidos disueltos (SDT). Esta gráfica es una alternativa a la gráfica de Piper (Pacheco, 2015)

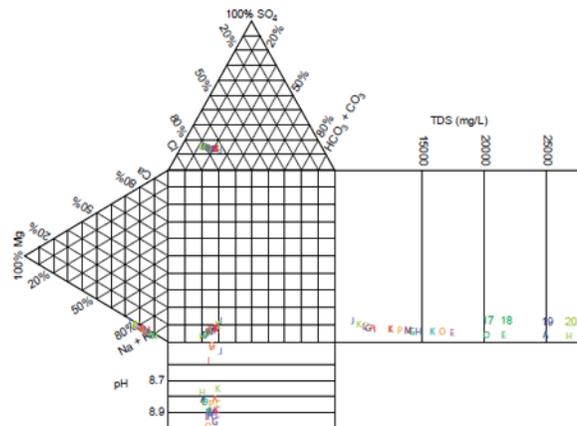


Fig. 9 Diagrama Durov

### 8.7.2 Diagrama Giggenbach

El triángulo Giggenbach proporciona una ayuda visual para determinar el equilibrio agua-roca. Giggenbach (1986) propuso la combinación de los geotermómetros de  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  y  $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$  en un diagrama triangular, a partir del cual se pueden clasificar las aguas y extrapolar la probable temperatura del reservorio, de una manera más sencilla y directa. En este diagrama los 2 sistemas están representados por 2 conjuntos de líneas, uno para las razones de  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  y otro para las razones de  $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ , donde cada valor representa líneas isotermas. La intersección de las isotermas de  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  y  $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ , referidas a la misma temperatura, corresponden a la composición del agua en equilibrio con las fases minerales controlando ambos geotermómetros y delineando la llamada “curva de equilibrio total” (Díaz-González et al., 2008).

La zona de equilibrio parcial sugiere ya sea un mineral que se ha disuelto, pero no ha alcanzado el equilibrio (por ejemplo, agua geotérmica) diluido con agua no equilibrada (por ejemplo, agua subterránea fría).

Puntos cerca de la esquina  $\sqrt{\text{Mg}}$  generalmente sugieren una alta proporción de las aguas subterráneas relativamente frías, no necesariamente “inmaduras” (Díaz-González et al., 2008).

Además, la representación del Triángulo Giggenbach (Triángulo K-Mg-Na) le permite verificar hasta qué punto se ha alcanzado el equilibrio agua-roca (San Juan, 2015).

El triángulo se compone de tres zonas:

- Aguas inmaduras (en la base);
- Aguas parcialmente equilibradas (en el medio); y
- Aguas totalmente equilibradas (a lo largo de la curva).

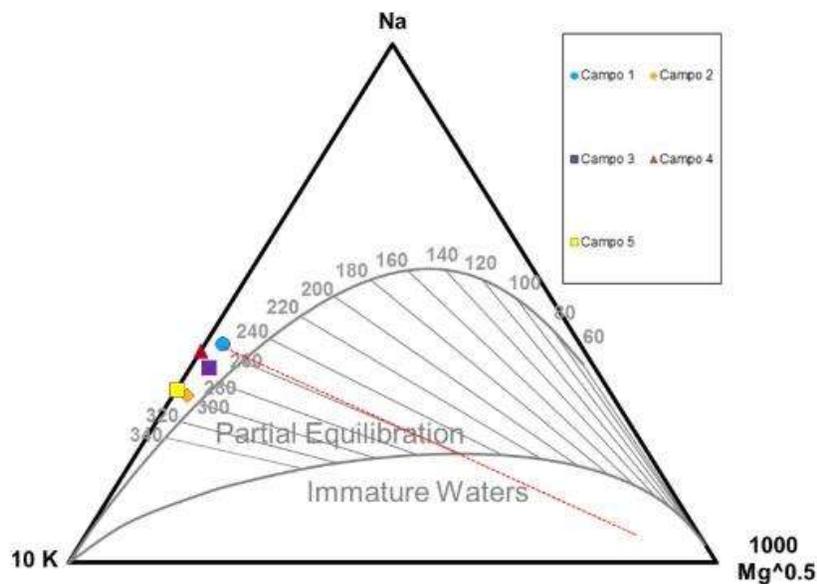


Fig. 10 Típico diagrama de Giggenbach

### 8.7.3 Diagrama Schoeller

Schoeller (1962) desarrolló diagramas semi-logarítmicos para representar los principales análisis de iones en meq/L para demostrar diferentes tipos de agua de tipo hidroquímico en el mismo esquema. El número de análisis que se pueden ilustrar a la vez es limitado debido a las líneas. En los Diagramas de Schoeller o de Columnas Verticales se representa el valor en miliequivalentes por litro (meq/l) de distintos aniones, cationes o una suma de ellos, utilizando una escala logarítmica, y uniendo los puntos mediante una secuencia de líneas.

El gráfico tiene la ventaja de que, a diferencia de los gráficos trilineales, se muestran las concentraciones reales de los parámetros. Permite representar varias muestras en un mismo diagrama para su comparación. Es apropiado para estudiar evoluciones temporales de aguas en un mismo punto y variaciones composicionales en muestras de diferentes localidades. Es útil para representar en un mismo diagrama aguas de baja y de alta salinidad, y observar la relación entre iones asociada con la inclinación de las líneas.

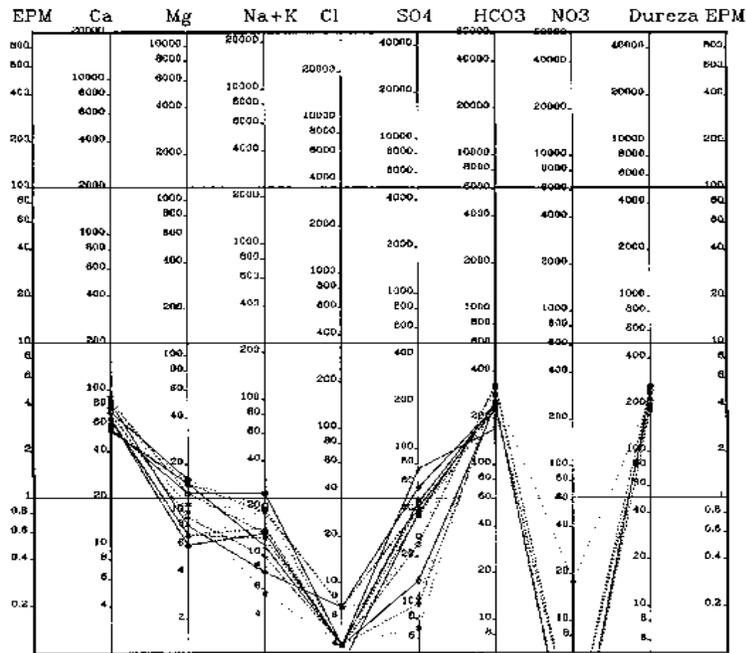


Fig. 11 Diagrama Schoeller

### 8.7.4 Diagrama de Gibbs

El diagrama de Gibbs permite analizar los procesos que están ocurriendo dentro del acuífero, donde la química de las aguas superficiales y subterráneas está determinada por tres factores: lluvia (en el dominio de precipitación e infiltración), proceso de intemperismo (interacción agua-roca) y el dominio de evaporación–cristalización (parámetro temperatura como factor) (Gaikwad et al., 2019). Además, su gráfica se basa en plasmar en el eje de las Y la concentración de los Sólidos Disueltos Totales, mientras que el eje de las X está en función de las 2 relaciones de cationes y aniones presentadas a continuación: (Mahmoudi et al., 2017).

$$\frac{Na^{+}+K^{+}}{Na^{+}+K^{+}+Ca^{2+}} \quad \text{ó} \quad \frac{Cl^{-}}{Cl^{-}+HCO_{3}^{-}}$$

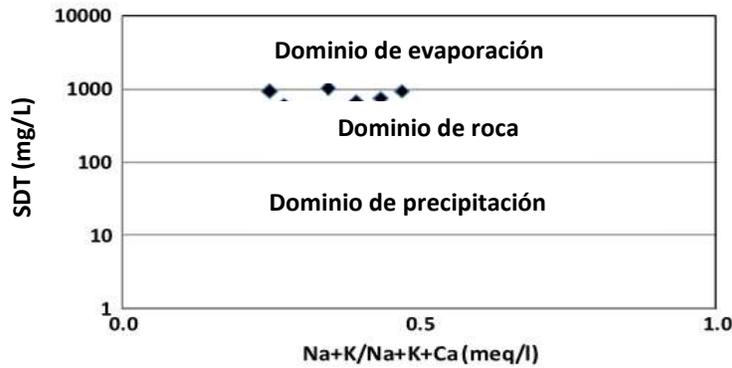


Fig. 12 Diagrama de Gibbs (Cationes)

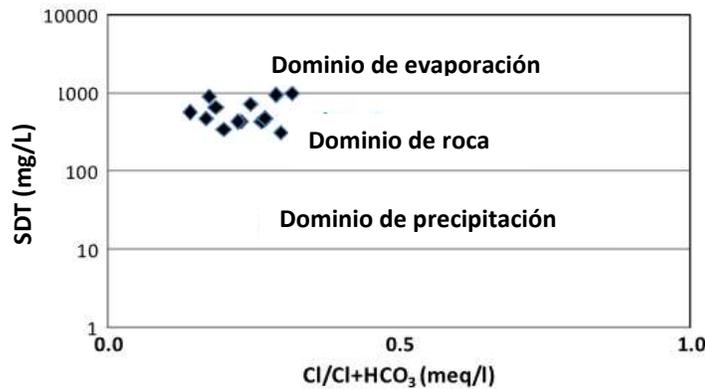


Fig. 13 Diagrama de Gibbs (Aniones)

### 8.8 Relaciones o índices hidrogeoquímicos

El origen y las interacciones agua-roca, se determinaron por las relaciones hidrogeoquímicas. El movimiento y dirección de las aguas subterráneas se determinaron por la concentración de sales totales disueltas (Custodio et al., 1996). Estas relaciones son una herramienta útil para determinar el origen de la composición de las aguas subterráneas, además, permiten comprender las reacciones fisicoquímicas que afectan a las aguas subterráneas en su camino desde las áreas de recarga, y tienen directa relación con los materiales a través de los cuales circula el agua y/o fenómenos modificadores que cambian su composición. Las relaciones calculadas fueron las siguientes:  $rNa^+/rCl^-$ ,  $rNa^+/rK^+$ ,  $rMg^{2+}/rCl^-$ ,  $rCa^{2+}/rMg^{2+}$ ,  $rCa^{2+}/rSO_4^{2-}$ ,  $rHCO_3^-/rCl^-$  ( $r=meq/L$ ).

**$r_{Na^+}/r_{Cl^-}$ :** El valor de esta relación está asociado a la existencia de procesos de cambio de bases, debido a que el ion cloruro no es afectado por la retención con el terreno y el ion sodio sí. También el valor de esta relación puede verse alterado por la meteorización que afecta a algunos silicatos, los cuales podrían liberar sodio al agua. Si el valor de esta relación es  $>1$  se deduce que el  $Na^+$  se libera de una reacción de intemperización con silicatos (Abadi Berhe et al., 2017) En el agua de mar esta relación tiene un valor aproximado de 0.82, mientras que en el agua de lluvia alcanza un valor medio de 0.86. En el agua subterránea el valor de esta relación es más alto, alcanzando un valor medio de 1.1.

**$r_{Na^+}/r_{K^+}$ :** En agua dulce los valores más frecuentes de esta relación suelen estar comprendidos entre 2 y 250, mientras que en el agua marina varía entre 40 y 50 (Custodio et al., 1967). En el agua subterránea en general se observa que el valor de esta relación tiende a crecer a medida que aumenta la salinidad. Los valores más altos de esta relación pueden ser explicados por la interacción agua-roca, donde tras la alteración de los silicatos existe una sorción preferente del  $K^+$  en los minerales de alteración. Baja razón permite delimitar áreas de alta temperatura o zonas de directa migración, no responde tan rápidamente al enfriamiento con indicadores que utilizan sílice, alta razón puede indicar rutas indirectas que permiten reacciones agua roca o enfriamiento (Fernández, 2015). Depende de la composición de la roca, disminuyendo cuando aumenta la acidez de la misma. En general, cuanto más salina sea el agua más elevada es esta relación, debido a la menor solubilidad y mayor adsorción selectiva del  $K^+$  respecto al  $Na^+$ . El valor de esta relación en aguas subterráneas es, en ausencia de contaminación agrícola por exceso de abono con sales potásicas, siempre mayor de 1 (Custodio et al., 1996; Marrero, 2010)

**$r_{Mg^{2+}}/r_{Cl^-}$ :** Esta relación tiene cierto interés para evaluar la posible mezcla de agua de origen meteórico con agua marina. Sin embargo, el estudio de esta relación debe ser tomado con precaución debido a posibles aportes de magnesio al agua como consecuencia de la alteración de silicatos magnésicos (Custodio et al., 1996). Si la relación es mayor a 1 resalta el efecto de la interacción agua-roca, lo que indica una mayor aportación de magnesio al agua como consecuencia de la alteración de silicatos magnésicos.

**$rCa^{2+}/rMg^{2+}$ :** Esta relación señala que, los puntos trazados en esta relación con valor  $\approx 1$ , indican aguas subterráneas controladas por la disolución de dolomita, mientras que la relación que varía de 1 a 2, caracteriza la reacción de la calcita. En aguas naturales, donde esta proporción es mayor a 2, se debe principalmente a la disolución de minerales de silicato que contribuyen al  $Ca^{2+}$  y al  $Mg^{2+}$  en las aguas subterráneas.

**$rCa^{2+}/rSO_4^{2-}$ :** Los valores más bajos de esta relación indican la eliminación de calcio, ya sea por precipitación como carbonatos de calcio y / o por procesos de intercambio iónico. Estos dos procesos son más abundantes en las aguas subterráneas poco profundas que en las profundas. Las muestras que tienen relaciones de  $Ca^{2+}/SO_4^{2-}$  más altas indican la adición de calcio por la meteorización de minerales ricos en este elemento que no sean yeso (Salem et al., 2017).

**$rHCO_3^-/rCl^-$ :** Los valores altos de esta relación se presentan con mayor frecuencia en aguas subterráneas frías, donde reflejan una trayectoria de flujo más corta y, por lo tanto, una circulación más rápida. Caso contrario, cuando se tienen valores bajos o muy bajos de esta proporción, se establece que son aguas calientes (termales), las cuales indican una trayectoria de flujo subsuperficial larga y una circulación profunda (Cuoco et al., 2010).

### *8.9 Índice de calidad del agua subterránea*

El ICA o GWQI (Índice de Calidad del Agua Subterránea) implica la integración de muchos parámetros de calidad del agua, los cuales permitan mostrar una idea más cercana con la situación real de la calidad del agua subterránea en una zona en particular (MacHiwal et al., 2011). Este índice fue desarrollado por Brown et al. (1970) y mejorado por Deininger para el Departamento de Desarrollo de Escocia (1975). El método es ampliamente utilizado para la evaluación de la calidad del agua subterránea en todo el mundo debido a la capacidad de expresar plenamente la información sobre la calidad del agua. Además, es una de las herramientas más efectivas con parámetros importantes para la evaluación y gestión de la calidad del agua subterránea (Sadat-Noori et al., 2014).

El procedimiento de cálculo consta de tres etapas.

En la primera etapa, cada uno de los 13 parámetros (pH, SDT, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Dureza, F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y N-NH<sub>3</sub>) se le ha asignado un peso (wi) en función de sus efectos percibidos en la salud humana.

El peso máximo de 5 ha sido asignado a parámetros tales como sólidos totales disueltos, nitratos, cloruros y sulfatos debido a su gran importancia en la evaluación de la calidad del agua (Saravanan et al., 2015). A los demás parámetros como pH, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Dureza, F<sup>-</sup>, y N-NH<sub>3</sub> se les asignó un peso entre 1 y 5 dependiendo de su importancia en la calidad general del agua potable.

Tabla 7 Ponderaciones de los parámetros para evaluar el Índice de Calidad del Agua

Parámetros	Peso (wi)	Peso relativo (Wi)
pH	4	0.089
SDT	5	0.111
Cl <sup>-</sup>	3	0.067
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5	0.111
Na <sup>+</sup>	3	0.067
K <sup>+</sup>	2	0.044
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	0.022
Ca <sup>2+</sup>	3	0.067
Mg <sup>2+</sup>	3	0.067
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5	0.111
Dureza	4	0.089
F <sup>-</sup>	5	0.111
N-NH <sub>3</sub>	2	0.044
<b>TOTAL</b>	<b>45</b>	<b>1</b>

En la segunda etapa, el peso relativo (Wi) de cada parámetro se calcula usando Ecuación (1):

**Ecuación (1)**

$$Wi = \frac{wi}{\sum_{i=1}^n wi}$$

Donde:

Wi: Peso relativo

wi: Peso de cada parámetro

n: Número de parámetros

En la segunda etapa, se calcula la escala de calificación de calidad para cada parámetro mediante la siguiente ecuación:

**Ecuación (2)**

$$qi = \left( \frac{Ci}{Si} \right) \times 100$$

Donde:

qi: Calificación de calidad,

Ci: Concentración de cada parámetro químico,

Si: Concentración de los estándares establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y por la OMS.

Tabla 8 Límites máximos permitidos por estándares nacionales e internacionales

Parámetro	Estándar NOM-127-SSA1-1994	Estándar OMS
pH	6.5-8.5	6.5-8.5
SDT	1000	1000
Cl <sup>-</sup>	250	250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	400	250
Na <sup>+</sup>	200	200
K <sup>+</sup>	-	12
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	120
Ca <sup>2+</sup>	-	75
Mg <sup>2+</sup>	-	50
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	45
Dureza	500	500
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-	10
N-NH <sub>3</sub>	0.5	1.5
<b>TOTAL</b>	<b>45</b>	<b>1</b>

En la tercera etapa, se calcula una escala de calificación de calidad ( $q_i$ ) para cada parámetro usando Ecuación. (3):

**Ecuación (3)**

$$SI_i = W_i \times q_i$$

Donde:

$SI_i$ : Subíndice del  $i$ -ésimo parámetro

$q_i$ : Calificación de la calidad

$W_i$ : Peso relativo

Para calcular el GWQI, se utiliza la siguiente Ecuación (4):

$$ICA = \sum SI_i$$

Los valores de GWQI calculados generalmente se clasifican en cinco categorías (Tabla 8): excelente, bueno, pobre, muy pobre e inadecuado para el consumo humano (Sadat-Noori et al., 2014).

Tabla 9 Categorías 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

## 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 Análisis de parámetros

Se llevaron a cabo 2 campañas de colecta de muestras en los 10 sitios descritos anteriormente, en los meses de mayo y noviembre debido a que en el primero se presenta la época de estiaje y en el segundo finaliza la época de lluvias, con el fin de obtener el análisis de los siguientes resultados:

#### 9.1.1 Parámetros in situ

La tabla (Anexo A) muestra los resultados obtenidos de los parámetros in situ de las colectas de muestras realizadas en los 2 periodos (mayo y noviembre) y la figura 14 representa estos valores.

#### **Temperatura**

El primer parámetro de campo medido fue la temperatura, la cual mostró diversas variaciones y no presentó un comportamiento similar en los 2 muestreos. La temperatura más alta encontrada fue en el sitio P6-DUM (mayo-18) y la más baja se observó en el sitio P5-Jacinto López (noviembre-18). En la colecta de mayo-18 se presentó la mayor temperatura en el pozo P6-DUM y la más baja en el P1-Nueva Luneta, mientras que en la colecta de noviembre-18 se encontró la mayor temperatura en el pozo P4-Las Fuentes y la temperatura más baja en el pozo P5-Jacinto López. Como se observa en la figura 14, la primera campaña se caracterizó por contar con la presencia de temperaturas más elevadas en comparación con la segunda campaña, lo que significa que la temperatura del agua subterránea está en función de las condiciones climáticas de la zona, ya que mayo es considerado el mes más caluroso de todo el año. De esta manera, se coincide que, para efectos prácticos, puede considerarse que en los acuíferos existe una “zona neutra”, de temperatura constante, por encima de la cual la influencia térmica más significativa es la de las variaciones diarias o estacionales de la temperatura ambiente (Donado, 2009).

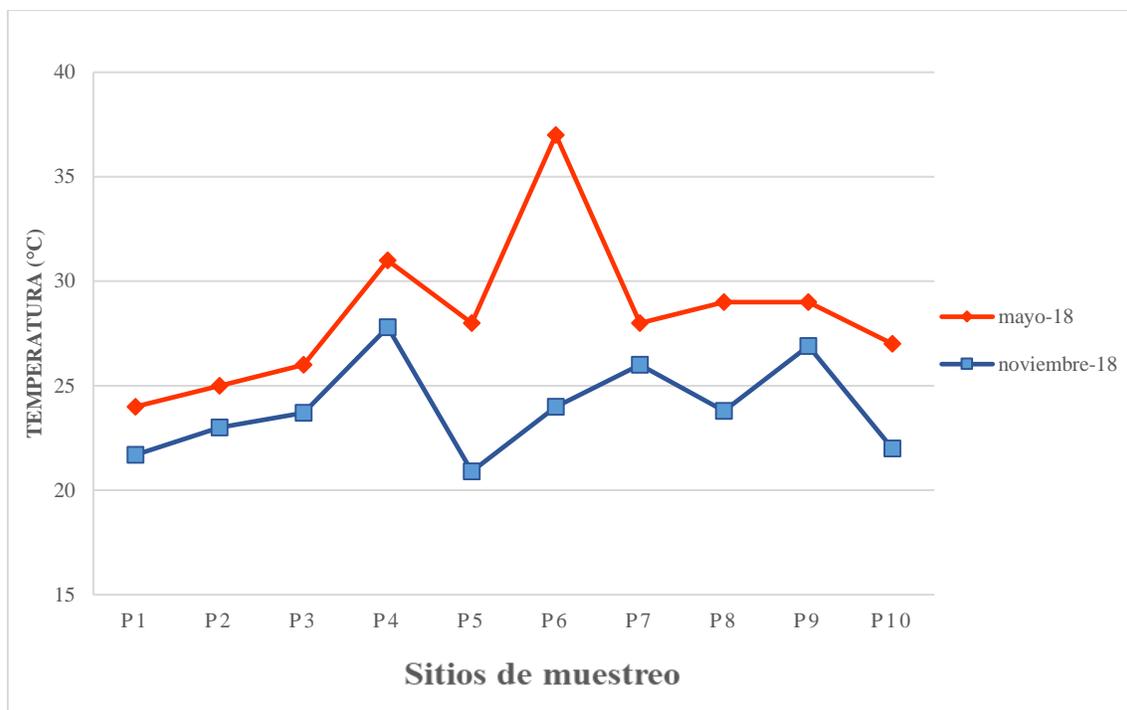


Fig. 14 Valores de Temperatura (°C) de los sitios de estudio

### pH

El siguiente parámetro *in situ* medido fue el pH, el cual juega un papel muy importante en diversos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas, además de ser fácilmente alterable, por lo que su determinación debe realizarse en el momento de la toma de muestras. También se encuentra relacionado con la mineralización elevada del agua, favoreciendo la presencia de los iones bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, la ausencia del ácido carbónico y el incremento de la alcalinidad del agua. La figura 15 presenta pH dentro de los límites que establece la NOM-127-SSA1-1994 (6.5-8.5). En la campaña de mayo-18 se observaron pH con tendencia alcalina; esto se debe principalmente al incremento de minerales carbonatados en las aguas subterráneas por el descenso del agua en el acuífero y por la falta de precipitación por la época de estiaje. Por otro lado, en la segunda campaña, la tendencia fue neutra, con excepción del sitio P3-3 Estrellas, que mostró una tendencia ligeramente ácida. El sitio que presentó el pH más elevado fue P6-DUM (mayo-18), mientras que el sitio que mostró el pH menor fue P3-3 Estrellas (noviembre-18). El sitio P6-DUM coincide en los 2 muestreos con el mayor pH de la colecta.

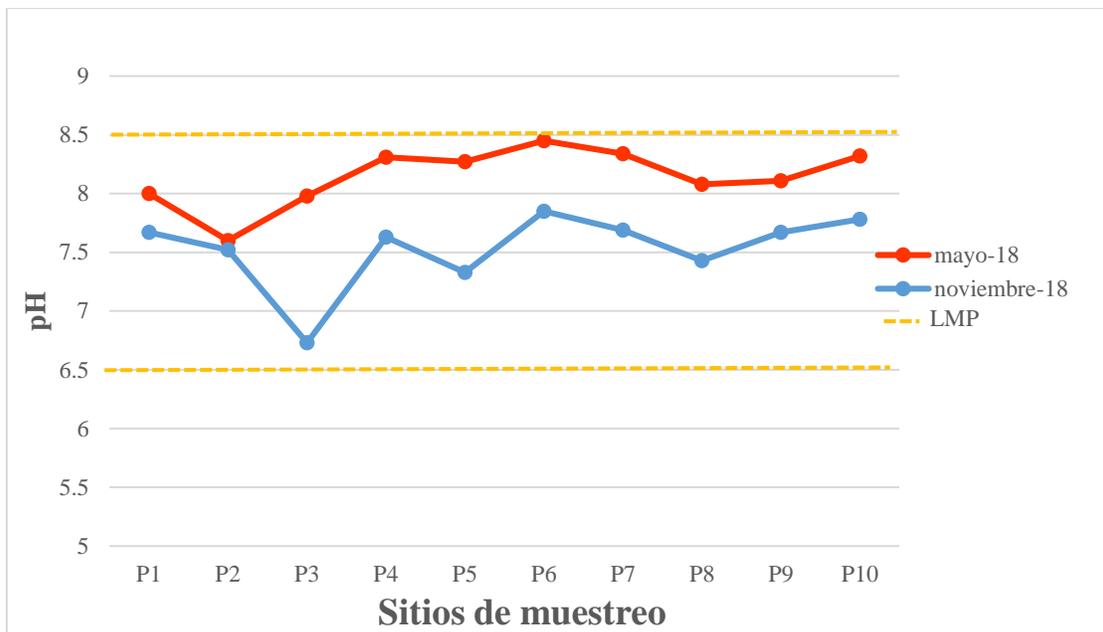


Fig. 15 Valores de pH en los sitios de estudio

### Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es el siguiente parámetro de campo evaluado, el cual es representado en la figura 16. Ahí se puede observar una tendencia similar de comportamiento entre las 2 campañas de colectas, en donde coincide el P3-3 Estrellas como el sitio que presentó la mayor conductividad del muestreo, mientras que el que mostró la menor conductividad eléctrica fue el P10-Hacienda del Valle (mayo-18). Es importante señalar que, en la mayoría de las aguas subterráneas, que corresponden a soluciones muy diluidas, la conductividad varía directamente con la cantidad de minerales disueltos en éstas, es decir, en el actual muestreo el sitio P3-3 Estrellas fue el que presentó la mayor cantidad de sólidos disueltos y la mayor conductividad eléctrica. Los valores de conductividad de las aguas subterráneas varían de entre 100 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

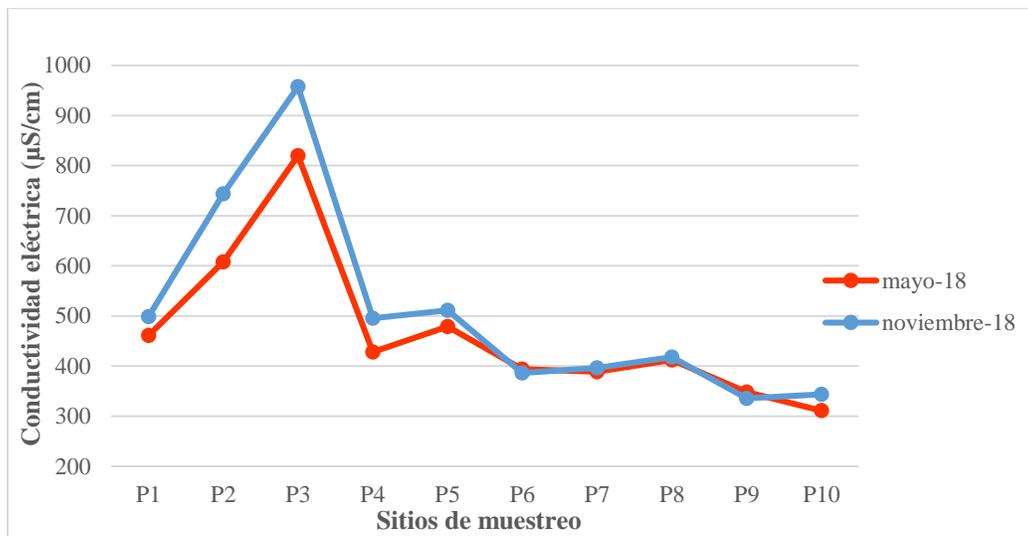


Fig. 16 Valores de conductividad eléctrica (µS/cm) de los sitios de estudio

### Oxígeno Disuelto

El oxígeno es el gas más importante en el agua e indispensable para mantener las formas de vida. Los valores del oxígeno disuelto medido en campo están representados en la figura 17. La tendencia del comportamiento de este parámetro es muy diferente, ya que, en los acuíferos, la presencia de oxígeno disuelto debería ser mínima, sin embargo, al momento de que el agua surge a la superficie, ésta se airea, provocando una elevación en la concentración del oxígeno, por lo tanto, se establece que es un parámetro poco fiable. En la campaña de mayo cuando se registraron las temperaturas más elevadas y una elevada mineralización en la mayoría de los pozos, objeto de estudio, la concentración de oxígeno disuelto disminuyó en casi todos los sitios de muestreo. La mayor concentración de oxígeno disuelto encontrada en las 2 campañas de colectas fue en el sitio P1-Nueva Luneta (mayo-18) al igual que la menor temperatura, lo que quiere decir que, a menor temperatura, habrá una mayor concentración de oxígeno disuelto, y viceversa, a mayor temperatura, una menor concentración de oxígeno disuelto, esto debido a que la temperatura afecta directamente la solubilidad de los gases.

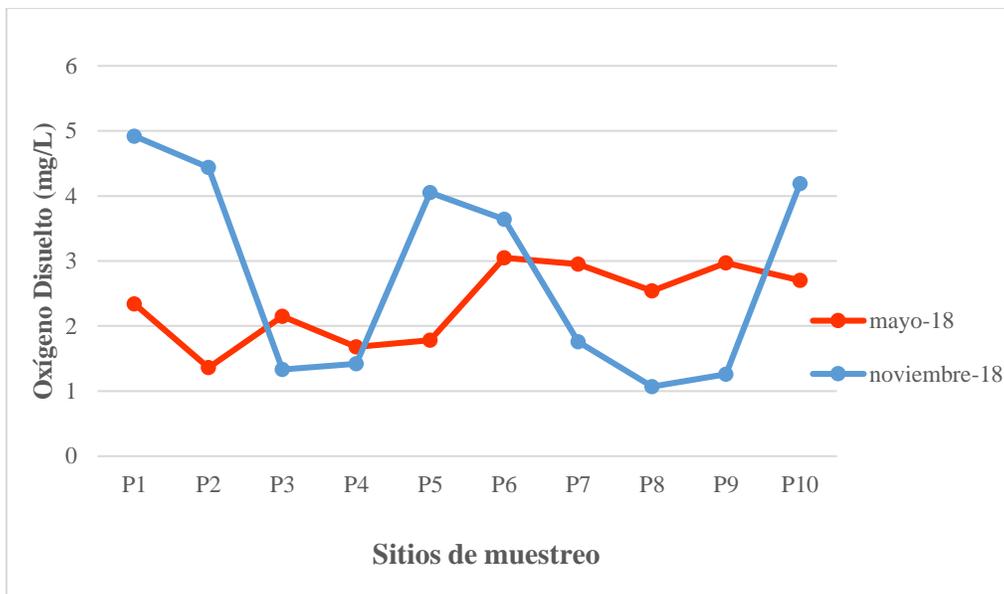


Fig. 17 Valores de oxígeno disuelto (mg/L) en los sitios de estudio

### 9.1.2 Parámetros fisicoquímicos

El agua subterránea natural, como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas, presenta una serie de propiedades o características fisicoquímicas como: dureza, alcalinidad, sólidos disueltos, nitratos, entre otros que varían en el espacio y en el tiempo (Donado, 2009). Los parámetros fisicoquímicos permiten conocer toda la información sobre el transporte de contaminantes en el agua (Arreola, 2015).

En el Anexo B y en la figura 18 se puede observar los resultados analizados de estos parámetros, los cuales la mayoría se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana correspondiente al uso y consumo humano, con excepción del nitrógeno amoniacal ( $N-NH_3$ ) el cual rebasa hasta 8 veces su concentración máxima permitida en 3 sitios en las 2 campañas de colectas.

### Dureza

La dureza total es la característica del agua que representa la concentración total del calcio y magnesio expresadas como  $\text{CaCO}_3$  (DOF 2004). Las aguas subterráneas tienen una dureza que varía generalmente entre 10 y 300 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , pudiendo alcanzar a 2000 mg/L o más (Donado, 2009).

Los resultados obtenidos de este parámetro fueron representados en la figura 18 de acuerdo con el muestreo realizado en mayo-18 y noviembre-18, en donde se puede observar una tendencia similar en las 2 campañas, destacando que el sitio P3-3 Estrellas es el que presentó la mayor dureza total en los 2 muestreos, con un valor de 325.56 mg/L y 320 mg/L respectivamente. Por lo tanto, todos los valores están dentro del límite máximo permisible que establece la normatividad mexicana (NOM-127-SSA1-1994). El sitio que mostró la menor dureza total fue P9-Ejidal (noviembre-18) con un valor de 120 mg/L.

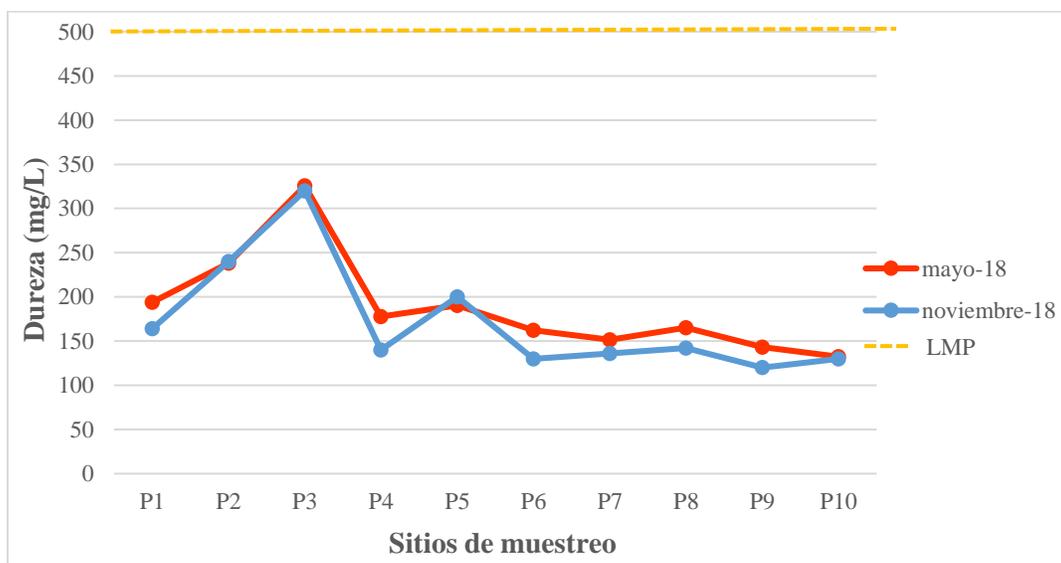


Fig. 18 Valores de la dureza (mg/L) en los sitios de estudio

### Sólidos Totales

Los sólidos totales están representados en la figura 19, la cual presenta una tendencia similar en las 2 campañas de colecta de muestras, donde el sitio P3-3 Estrellas mostró la mayor concentración de este parámetro, mientras que el sitio P9-Ejidal presentó la menor en los 2 muestreos. Los valores de los sólidos totales oscilaron entre 254 y 646 mg/L.

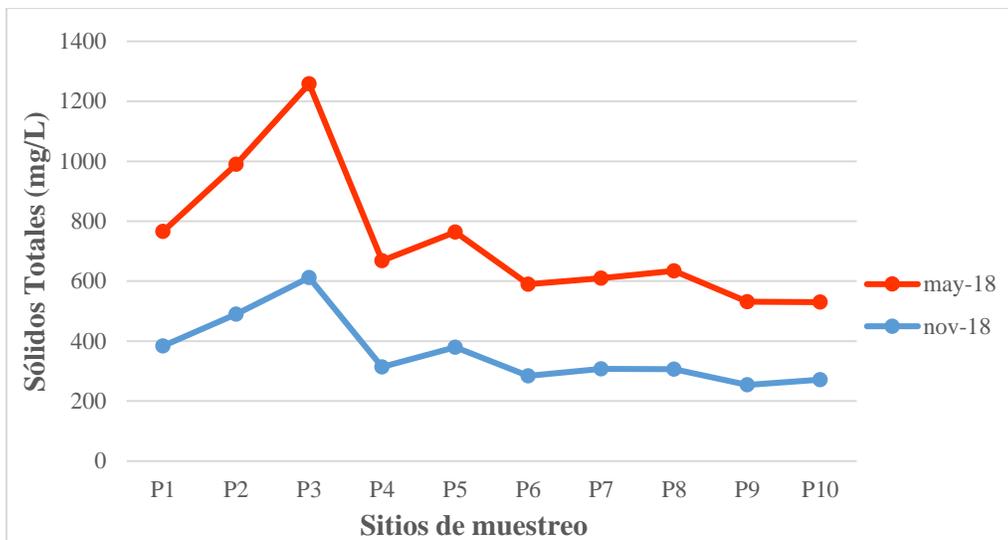


Fig. 19 Valores de Sólidos Totales (mg/L) en los sitios de estudio

### Sólidos Disueltos Totales

Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) miden la cantidad de sustancias disueltas en el agua, sean o no volátiles, y están relacionadas directamente con la conductividad eléctrica y la dureza, es decir, entre mayor sea la conductividad eléctrica de una sustancia, mayor será su dureza, por lo que ésta contendrá una mayor concentración de sólidos disueltos o minerales. Los resultados obtenidos de este parámetro se muestran en la figura 20, en la cual se puede observar que todos los sitios cumplen con el límite que establece la NOM-127-SSA1-1994. Además, el sitio que presentó la mayor concentración de SDT fue el P3-3 Estrellas en las 2 campañas con un valor de 644 y 608 mg/L en el primer y segundo muestreo respectivamente. Por otro lado, el sitio P9-Ejidal fue el que mostró la concentración más baja de SDT con un valor de 252 mg/L (noviembre-18), al igual que la dureza y la conductividad eléctrica en la misma campaña de colectas. Por lo que se confirma el principio de la relación entre la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y la dureza fundamentado en el párrafo anterior.

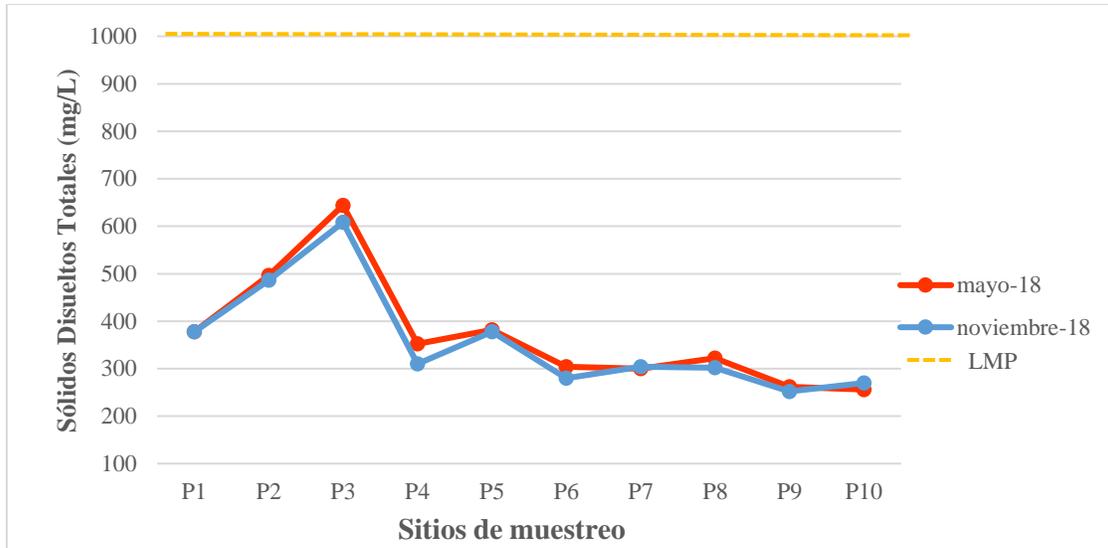


Fig. 20 Valores de los Sólidos Disueltos Totales (mg/L) en los sitios de estudio

### Sólidos Suspendidos Totales

Los valores obtenidos de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se muestran en la figura 21, en donde se puede observar una concentración máxima en el sitio P9-Ejidal de 16 mg/L (mayo-18) y una concentración mínima de 2 mg/L en los sitios P3-3 Estrellas (mayo-18), P4-Las Fuentes (mayo-18), P5-Jacinto López (mayo-18 y noviembre.18), P6-DUM (mayo-18) y P7-Miguel Hidalgo (mayo-18).

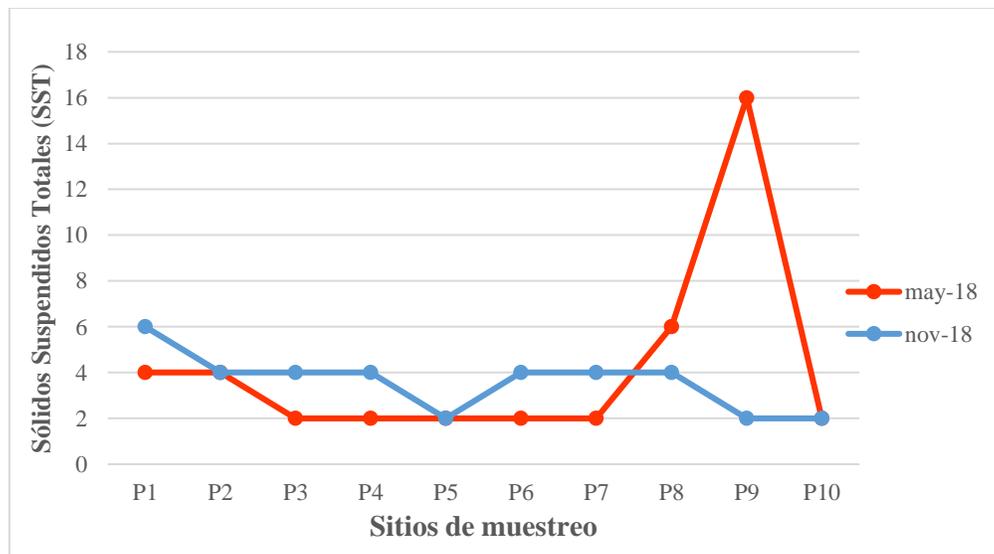


Fig. 21 Valores de Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) en los sitios de estudio

### Alcalinidad total

La alcalinidad de un agua determina su capacidad para neutralizar ácidos. En la mayoría de las aguas naturales, ésta depende prácticamente de los iones carbonato y bicarbonato.

Los resultados del análisis de este parámetro se encuentran establecidos en la figura 22. El sitio que presentó la mayor alcalinidad fue P3-3 Estrellas en los 2 muestreos, con un valor de 312 y 300 mg/L respectivamente. El sitio con la alcalinidad más baja fue P9-Ejidal (noviembre-18), por lo que se puede establecer que este parámetro también está relacionado directamente con los sólidos disueltos totales, la conductividad eléctrica y la dureza total, ya que estos 3 parámetros se presentaron en mayor cantidad en este pozo de abastecimiento.

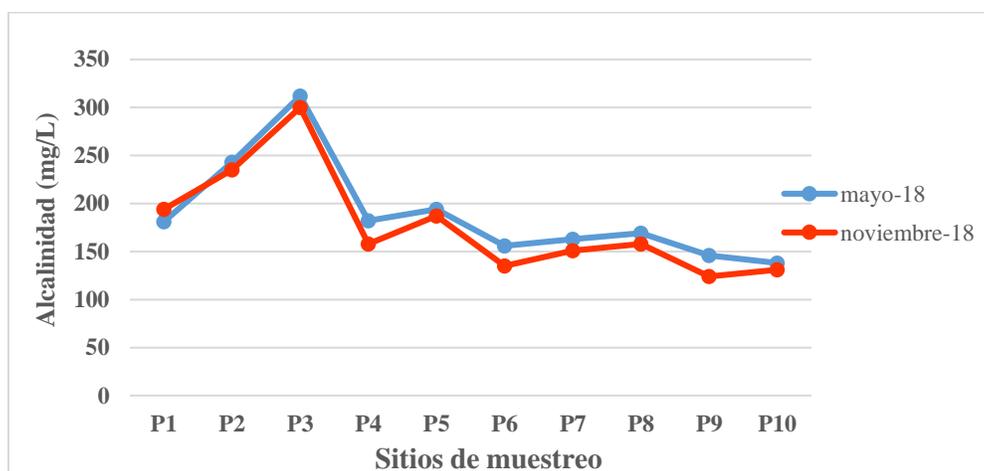


Fig. 22 Valores de alcalinidad total (mg/L) en los sitios de estudio

### Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), es una de las pruebas más importantes para medir el grado de contaminación en materia orgánica biodegradable de un agua residual, pero también es un parámetro de importancia en aguas potables. Las aguas subterráneas generalmente tienen valores bajos de DBO, pero es muy conveniente medir este parámetro, sobre todo cuando la fuente de suministro es un agua de dudosa calidad.

Este parámetro es especificado en la figura 23, en la cual se observa que el rango de concentraciones de DBO<sub>5</sub> van desde 0.91 hasta 12.5 mg/L de O<sub>2</sub>. Además, el sitio P8-Valencia fue el que presentó la mayor concentración (mayo-18) y la menor fue en el sitio P6-DUM (mayo-18). Además, este parámetro está relacionado con el N-NH<sub>3</sub>, por la presencia de materia orgánica presente en el agua, objeto de estudio.

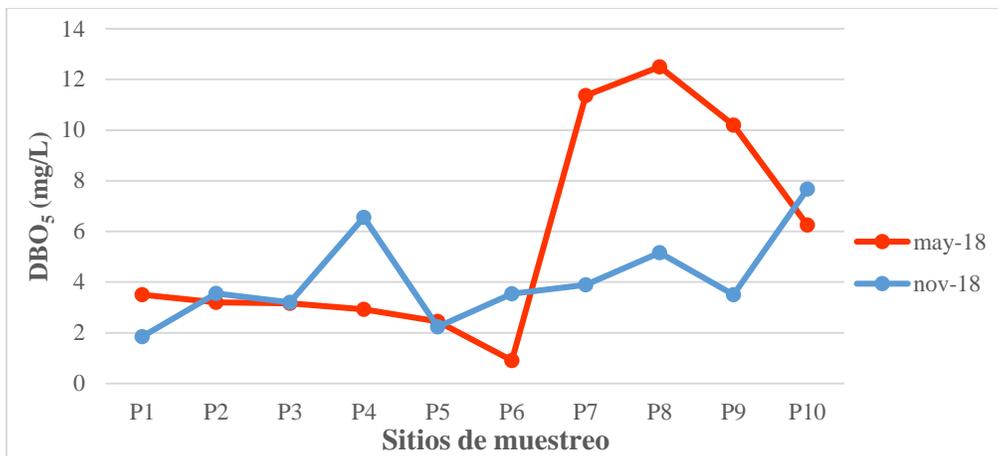


Fig. 23 Valores de DBO<sub>5</sub> (mg/L) en los sitios de estudio

### Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Los valores obtenidos de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se presentan en el Anexo B mientras que en la figura 24 estos valores son plasmados para un mejor entendimiento. Este parámetro está directamente relacionado con la DBO<sub>5</sub>, ya que, al observar las 2 tendencias, el sitio P8-Valencia mostró la mayor concentración en la primera campaña, mientras que el sitio P9-DUM, en esa misma colecta, mostró la menor concentración de todo el muestreo.

Es importante señalar que los valores de la DQO son siempre mayores a los mostrados por la DBO, debido a la mayor cantidad de sustancias biodegradables y no biodegradables que se puede oxidar en esta prueba.

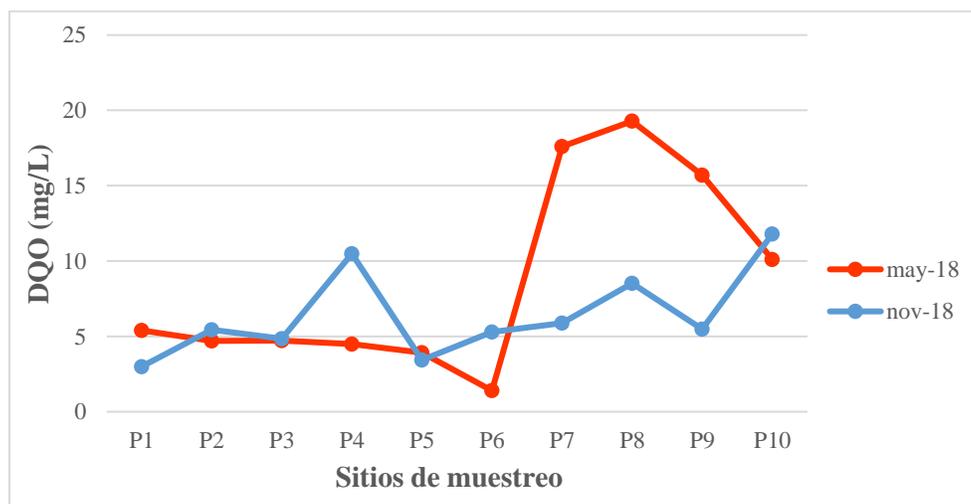


Fig. 24 Valores de DQO (mg/L) en los sitios de estudio

### 9.1.3 Iones mayoritarios

La mayoría de las sustancias disueltas en el agua subterránea se encuentran en estado iónico. Algunos iones casi siempre están presentes y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos. Estos iones mayoritarios son los cationes: calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , magnesio  $\text{Mg}^{2+}$ , sodio  $\text{Na}^+$  y potasio  $\text{K}^+$ ; y los aniones: carbonatos  $\text{CO}_3^{2-}$  bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$ , sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  y cloruros  $\text{Cl}^-$ .

En el Anexo C se presentan las concentraciones de los cationes y aniones mayoritarios correspondiente a las 2 campañas de colectas (mayo-18 y noviembre-18), en donde todos cumplen con los límites máximos permitidos por la normatividad nacional (DOF, 1994).

#### $\text{Ca}^{2+}$

El  $\text{Ca}^{2+}$  suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas subterráneas debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Su concentración para este tipo de aguas puede variar ampliamente de entre 10 hasta 250 mg/L (Donado, 2009). En esta investigación, el catión predominante fue el  $\text{Ca}^{2+}$ , el cual se representa en la figura 25. Este esquema muestra que el sitio que presentó la mayor concentración de este parámetro fue el P3-3 Estrellas en las 2 colectas. Además, el rango de concentraciones abarcó desde 15.2 hasta 118.02 mg/L, encontrándose dentro de los límites del tipo de agua subterránea.

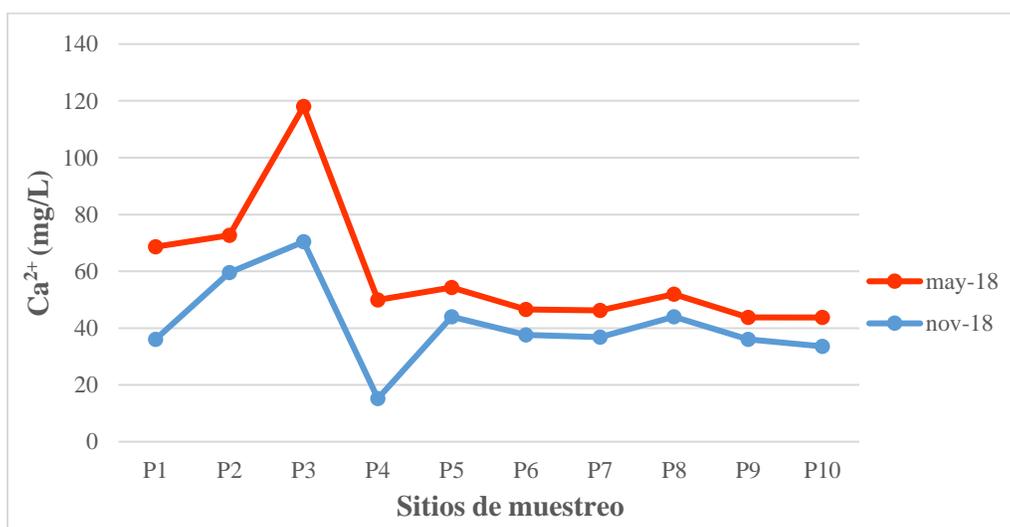


Fig. 25 Valores de  $\text{Ca}^{2+}$  (mg/L) en los sitios de estudio

### Mg<sup>2+</sup>

El Mg<sup>2+</sup>, menos abundante que el Ca<sup>2+</sup> en las aguas subterráneas, procede de la disolución de rocas carbonatadas, evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos. Su concentración en este tipo de aguas no suele superar los 40 mg/L (Donado, 2009).

En la figura 26 se representan los valores del catión Mg<sup>2+</sup>, en donde se puede observar que el sitio P3-3 Estrellas presenta la máxima concentración (noviembre-18) y el sitio P1-Nueva Luneta la mínima (mayo-18). El rango de concentraciones de este parámetro va desde 5.47 hasta 35.02 mg/L.

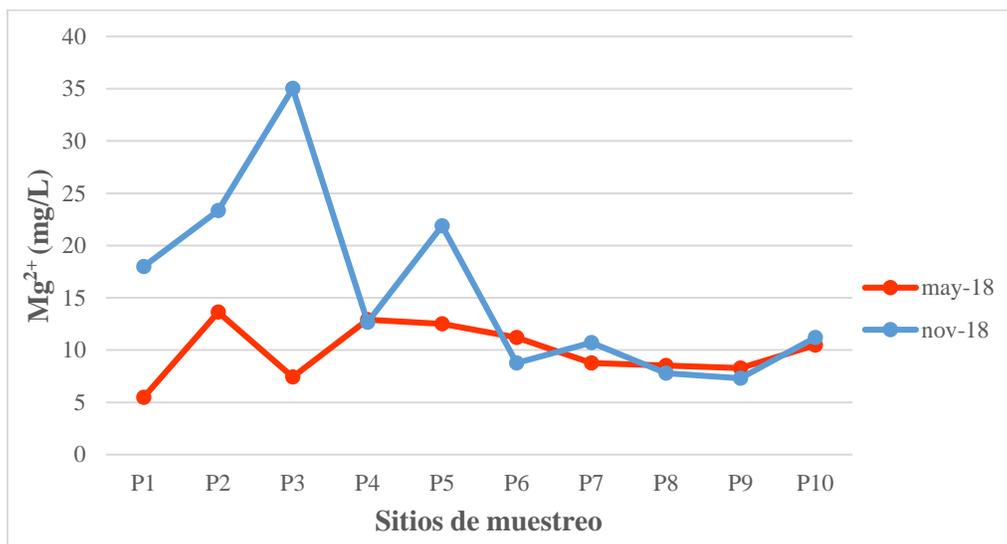


Fig. 26 Valores de Mg<sup>2+</sup> (mg/L) en los sitios de estudio

### Na<sup>+</sup>

Las sales de Na<sup>+</sup> son altamente solubles y tienden a permanecer en solución debido a que no se producen entre ellas reacciones de precipitación como ocurre en el caso del Ca<sup>2+</sup>. Sin embargo, el Na<sup>+</sup> puede ser absorbido en arcilla de alta capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado por Ca<sup>2+</sup> provocando una disminución de la dureza de las aguas (ablandamiento natural) (Donado, 2009).

Este parámetro se ve reflejado en la gráfica 27, la cual muestra que el rango de concentraciones osciló desde 17.71 hasta 52.44 mg/L, lo que significa que todos los sitios se encuentran dentro del límite estipulado por las normas oficiales mexicanas (DOF, 2004). El sitio P3-3 Estrellas coincide en ser el que presentó la mayor concentración de este catión en

las 2 campañas de colectas y el sitio P9-Ejidal el que mostró la concentración mínima también en los 2 muestreos.

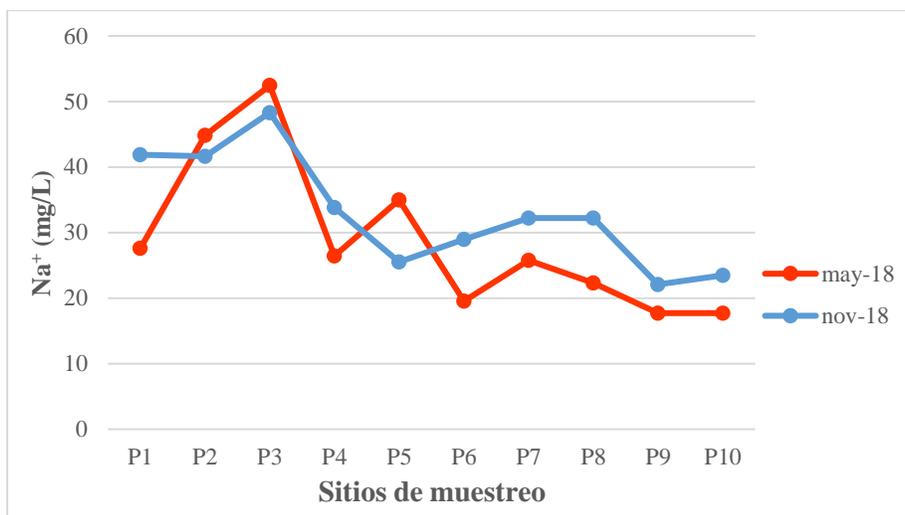


Fig. 27 Valores de Na<sup>+</sup> (mg/L) en los sitios de estudio

### Bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

En aguas con pH inferior a 8.3, como la mayoría de las aguas subterráneas, la especie carbonatada dominante es el ion bicarbonato, mientras que el ion carbonato se empieza a presentar en valores superiores a este pH. En estas aguas la concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> suele variar entre 50 y 400 mg/L, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/L.

El HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> observado a lo largo de los 2 muestreos se encontró en el rango de 110 a 312 mg/L, especificando que el sitio P3-3 Estrellas fue el que presentó la mayor concentración en las 2 campañas, mientras que el P9-Ejidal manifestó las concentraciones mínimas de este parámetro. Por otro lado, las concentraciones no presentaron una variación notable a lo largo de los 2 muestreos.



Fig. 28 Valores de  $HCO_3^-$  (mg/L) en los sitios de estudio

### Sulfatos ( $SO_4^{2-}$ )

El ion  $SO_4^{2-}$  procede fundamentalmente de los procesos de disolución de yesos ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), sin olvidar las cantidades procedentes de la oxidación bacteriana de sulfuros. La concentración de sulfatos en aguas subterráneas es variable, oscilando entre 2 y 150 mg/l, mientras que la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 400 mg/L.

Los resultados obtenidos al evaluar este anión mayoritario se encuentran en el Anexo B, mientras que su representación se observa en la figura 29, en donde se manifiesta una tendencia similar de concentraciones en las 2 campañas de colectas, destacando que en el sitio P3-3 Estrellas se encontró la mayor concentración de  $SO_4^{2-}$  en los 2 muestreos, y la menor en el sitio P-10 Hacienda del Valle. El rango de estas concentraciones fue de 24.94 a 85.12 mg/L, por lo que se concluye que éstas se encuentran dentro de lo que fundamenta la norma mexicana (DOF,1994) y las concentraciones son típicas de las aguas subterráneas.

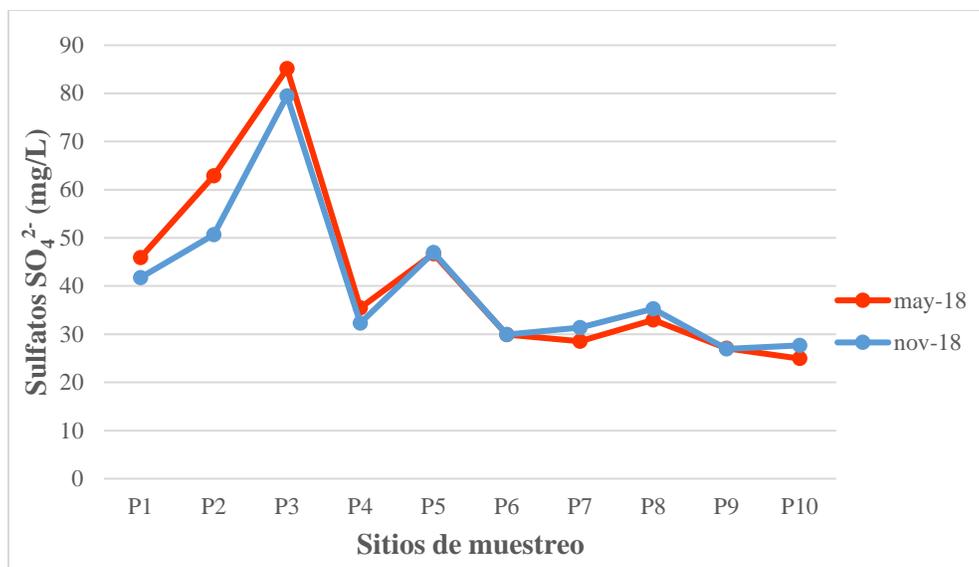


Fig. 29 Valores de  $SO_4^{2-}$  (mg/L) en los sitios de estudio

### Cloruros ( $Cl^-$ )

Con excepción de las evaporitas y las rocas de origen marino, las rocas por lo general presentan escasa proporción de cloruros. Además, este ion no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas subterráneas, no es absorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador ideal. La concentración de este ion para aguas subterráneas se encuentra entre 10 a 2000 mg/L.

Los resultados de este parámetro se representan en la figura 30, la cual refleja una tendencia similar en los 2 muestreos, con una diferencia del doble de concentración en la segunda colecta con respecto de la primera, es decir, aumentó la cantidad de cloruros en la campaña de lluvias (noviembre-18) en comparación con la campaña de estiaje (mayo-18). El sitio que presentó la mayor concentración en los 2 periodos de muestreo fue P3-3 Estrellas, y el menor fue P10-Hacienda del Valle.

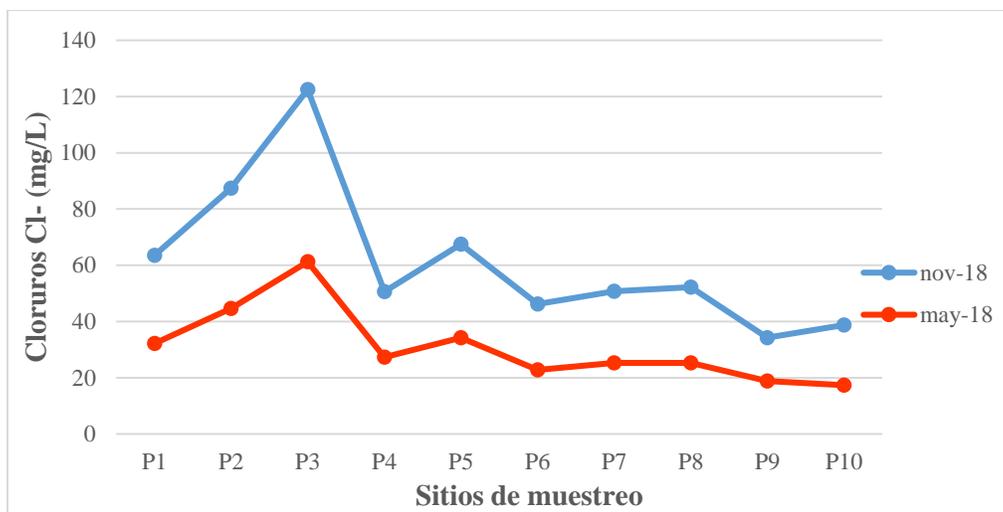


Fig. 30 Valores de Cl(mg/L) en los sitios de estudio

En general, el orden de los cationes determinados en la mayoría de los sitios de estudio con respecto a su concentración es el siguiente:  $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+} > K^{+}$ ; y de acuerdo a los aniones, el orden fue el siguiente:  $HCO_3^{-} > SO_4^{2-} > Cl^{-}$ ; partiendo de esto, se pueden construir un gran número de diagramas con el objetivo de conocer más a fondo diferentes características de este tipo de agua.

### Nitratos ( $NO_3^{-}$ )

Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas como resultado de la disolución de rocas que los contengan. Su concentración en este tipo de aguas no contaminadas varía ampliamente, aunque no suele pasar de los 10 mg/L. La importancia en la determinación de N- $NO_3^{-}$  y N- $NH_3$  radica en que son algunos de los principales indicadores de contaminación orgánica antigua ( $NO_3^{-}$ ) y reciente (N- $NH_3$ ), la cual expresa la buena oxidación que se ha presentado.

Los resultados de este parámetro se representan en la figura 31, la cual muestra que, en todos los sitios durante las 2 campañas, los valores no rebasaron lo mencionado por la normatividad mexicana. Además, la concentración máxima se encontró en el sitio P3-3 Estrellas en los 2 muestreos, 1.1333 y 1.7642 mg/L respectivamente, y la concentración mínima se observó en el sitio P4-Las Fuentes de 0.0228 mg/L (noviembre-18).

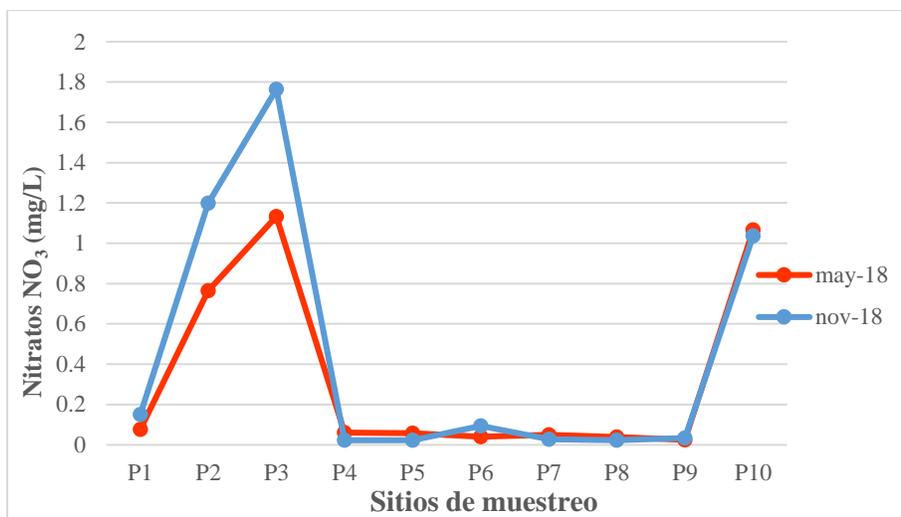


Fig. 31 Valores de  $\text{NO}_3^-$  (mg/L) en los sitios de estudio

### Nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ )

El nitrógeno amoniacal  $\text{N-NH}_3$  aparece como traza en aguas subterráneas naturales, aumentando su concentración cuando el medio es fuertemente reductor. Este compuesto es el producto final de la reducción de sustancias orgánicas o inorgánicas nitrogenadas que naturalmente se incorporan al agua subterránea. Por otro lado, debido a que la presencia del amonio favorece la multiplicación microbiana, su detección en cantidad significativa en el agua se considera como un indicativo de contaminación reciente.

La figura 32 muestra la representación de los valores de nitrógeno amoniacal encontrados durante las 2 campañas de colectas. También se puede apreciar una tendencia similar en los 2 muestreos, debido a que 3 sitios mostraron una concentración de hasta 8 veces por encima de lo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 (P7-Miguel Hidalgo, P8-Valencia y P9-Ejidal). Los resultados analizados van desde un rango de 0.0596 hasta 4.473 mg/L. Por lo que se establece que el proceso de nitrificación no se llevó a cabo y por esto se tiene una elevada concentración de  $\text{N-NH}_3$  ya que el contenido de oxígeno es bajo en estos 3 últimos sitios de estudio.

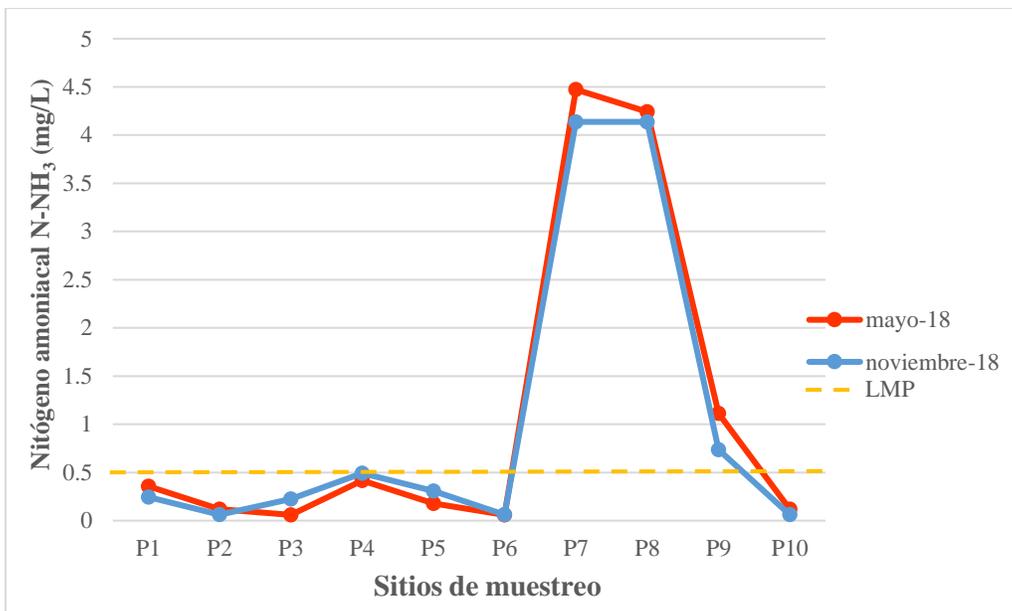


Fig. 32 Valores de N-NH<sub>3</sub> (mg/L) en los sitios de estudio

### 9.1.4 Balance iónico

Se estimó el porcentaje de error, mediante la ecuación del balance iónico para comprobar el balance de cargas para las 20 muestras analizadas durante las campañas de muestreo (2 periodos y 10 sitios). La electroneutralidad de los resultados muestra un balance muy aceptable para la mayoría de los sitios de muestreo. Únicamente el sitio P10-Hacienda del Valle de la primera campaña de colectas presenta un porcentaje superior con respecto a los demás sitios, pero sigue estando dentro del % aceptable de error, el cual es +/- 10%. Esto como consecuencia de un error de medición o a la influencia de otros cationes. Además, se puede observar que la única medición del balance iónico negativa fue la del sitio P4-Las Fuentes, la cual es influenciada por la presencia de un exceso de otros aniones.

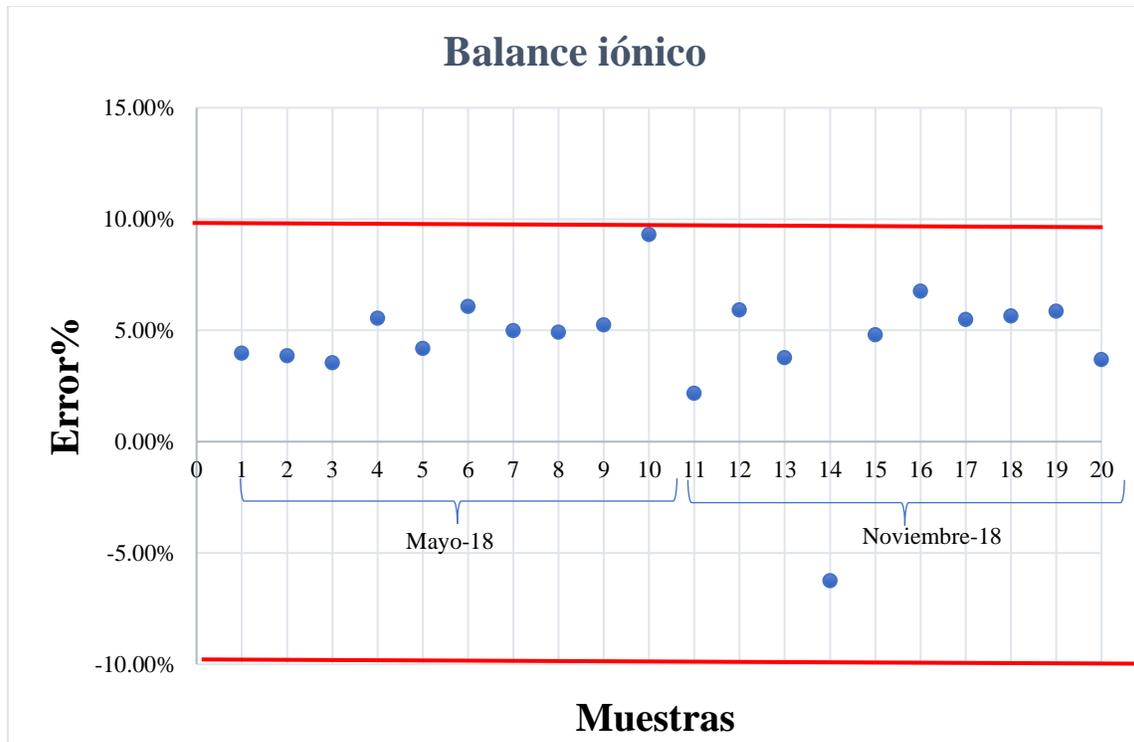


Fig. 33 Representación gráfica del balance iónico

### 9.1.5 Coliformes fecales

El Anexo B expresa los resultados obtenidos del análisis de coliformes fecales de los 10 sitios de los 2 periodos de colecta. El análisis bacteriológico se llevó a cabo mediante la técnica que establece la NMX-AA-102-SCFI-2006. En la figura 34 se puede apreciar que los coliformes fecales están presentes en los 10 sitios en las 2 campañas de colectas, destacando el sitio P5-Jacinto López como el que presentó la mayor cantidad de microorganismos (210 UFC/100 ml). Es importante resaltar que la campaña de noviembre-18 presentó un aumento notorio en la cantidad de coliformes fecales en todos sus sitios, con excepción de pozo P8-Valencia, en el cual se mostró una disminución de éstos, por lo que este parámetro no estaría cumpliendo con lo que establece la normatividad nacional (DOF, 2004), la cual establece que el límite máximo permisible para este tipo de microorganismos es cero UFC/100 ml.

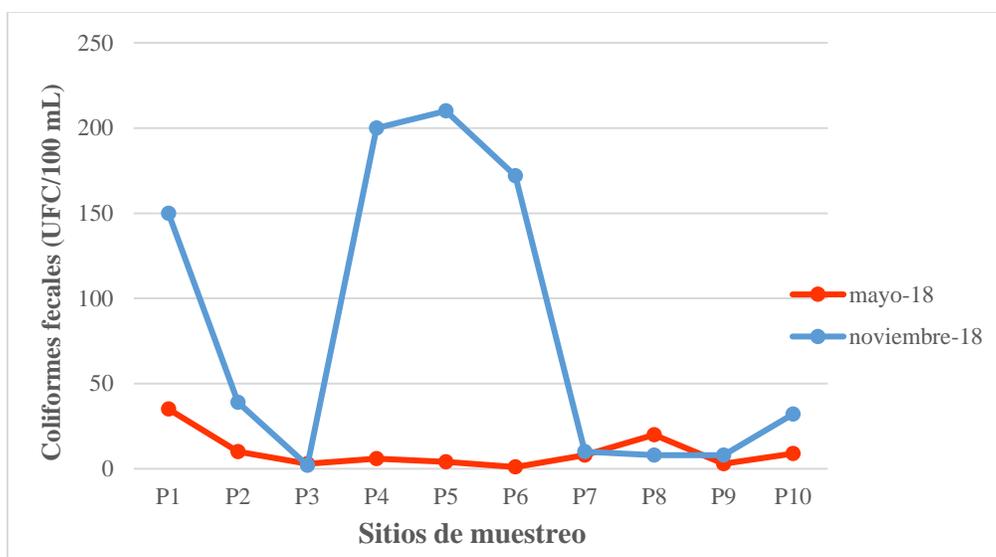


Fig. 34 Valores de coliformes fecales (UFC/100 ml) en los sitios de estudio

### 9.1.6 Elementos traza

Los elementos traza determinados en esta investigación fueron: Al, As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl, V y Zn, por medio de la técnica ICP-MS (Espectrometría Masas por Plasma Acoplado Inductivamente, por sus siglas en inglés), encontrando que ninguno de estos metales se encuentra por encima de lo que establece la NOM-127-SSA1-1994 en los 10 sitios de muestreo. La mayoría de las muestras colectadas en el área de estudio presentaron concentraciones detectables de los siguientes elementos traza: As, Ba, Co, Fe, Mn, Sb y V, haciendo énfasis únicamente en 3: As, Fe y Mn, por su relación directa con la geología de la zona, mientras que los elementos traza que mostraron una concentración por debajo del límite de detección de la técnica utilizada previamente fueron: Al, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Tl y Zn.

#### As

Los resultados de As se representan en la figura 35, en donde se observa que el sitio P10-Hacienda del Valle manifestó la mayor concentración de este elemento en el periodo (noviembre-18), mientras que el sitio de menor concentración fue P10-Jacinto López (noviembre-18). El rango de concentraciones que presentó este elemento traza abarcó desde 0.032 hasta 1.244  $\mu\text{g/L}$ , lo que significa que no rebasó el límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de 25  $\mu\text{g/L}$ .

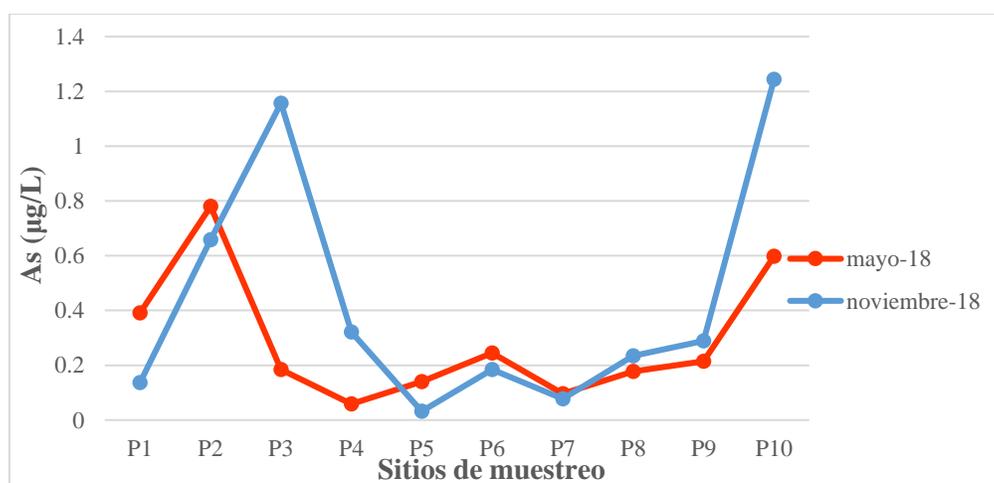


Fig. 35 Valores de As ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios de estudio

### Fe

El Fe es un elemento traza presente en la mayoría de las aguas subterráneas. En la figura 36 se puede observar sus resultados, los cuales muestran que en la campaña del mes de noviembre se presentaron las mayores concentraciones, mientras que, en la campaña de mayo, 2 sitios P9-Ejidal, P10-Hacienda del Valle su concentración se detectó por debajo del límite de detección establecido previamente (Tabla 1). El sitio P5-Jacinto López fue el que manifestó la mayor concentración de los muestreos (232.026  $\mu\text{g/L}$ ) y el de menor fue P3-3 Estrellas (2.474  $\mu\text{g/L}$ ), por lo que se establece que todos los sitios están dentro del límite que establece la norma mexicana de 300  $\mu\text{g/L}$  ó 0.3mg/L.

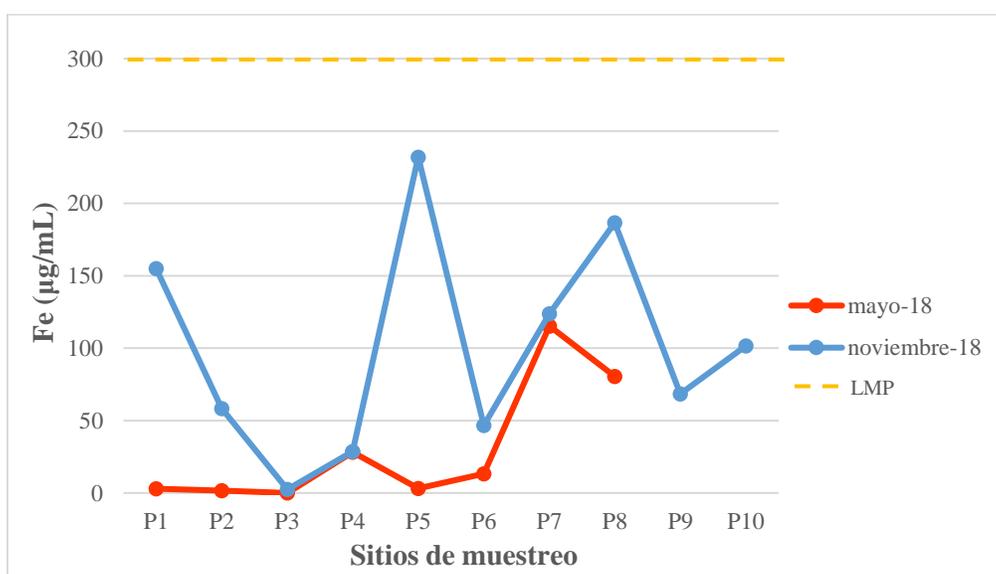


Fig. 36 Valores de Fe ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios de estudio

### Mn

De amplia difusión en la naturaleza, el manganeso es uno de los metales más importantes en la dinámica de aguas naturales. Así, en aguas oxigenadas no presenta alta concentración. Las sales de  $\text{Mn}^{2+}$  sí tienen mayor solubilidad, pero en medios aireados se oxidan precipitando oxihidróxidos. La dinámica del Mn es similar a la del Fe descrita. De este modo, únicamente existen contenidos significativos de Mn en aguas subterráneas cuando en ausencia de  $\text{O}_2$  se produce la disolución química y microbiana del metal.

La figura 37 muestra los valores obtenidos del Mn en los 2 muestreos, destacando principalmente la presencia en mayor concentración en el sitio P5-Jacinto López, al igual que con el Fe, mientras que el sitio que manifestó la mínima concentración fue P7-Miguel Hidalgo. El mes de noviembre, fue el periodo en el que se visualizó la mayor concentración de este elemento en todos los sitios de colectas. Por otro lado, el rango de concentraciones fue de 0.382 hasta 87.275  $\mu\text{g/L}$ , por lo que se establece que este parámetro, en todos los pozos, está dentro del límite que marca la norma mexicana (DOF, 2004).

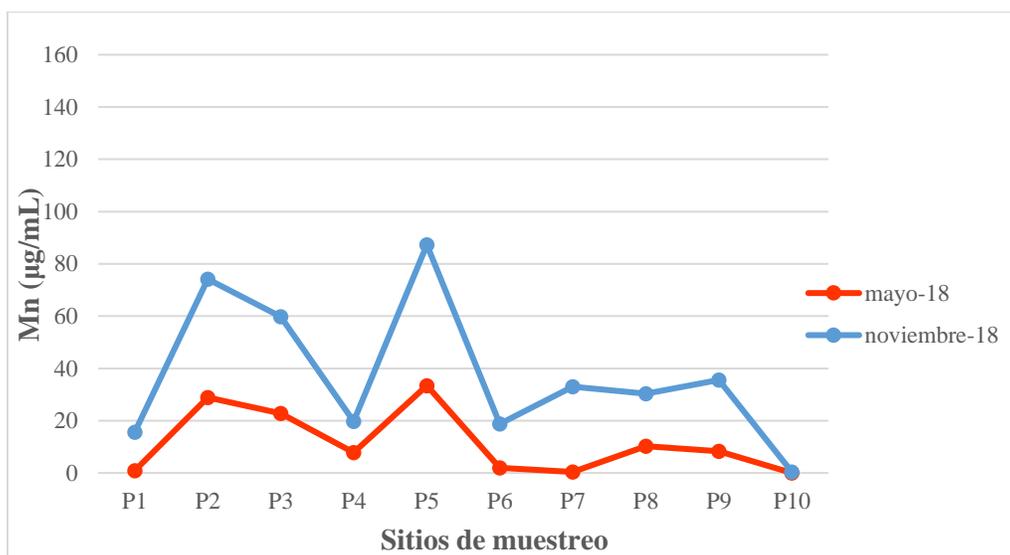


Fig. 37 Valores de Mn ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios de estudio

### 9.1.7 Especiación química

Cuando los metales se encuentran unidos fuertemente a la especie química su estabilidad es muy alta y para que se conviertan a formas solubles se necesitarían condiciones ambientales muy drásticas, que normalmente no ocurren en la naturaleza. Si la mayor concentración de los metales se encuentra en esta fracción, indica una muy baja biodisponibilidad y en consecuencia el peligro de toxicidad se reduce. Esta información sólo es posible obtenerla con un estudio de especiación química.

La especiación química se define como el proceso de identificación y cuantificación de las formas químicas de un mismo elemento en una muestra dada (Gonzalez et al., 2009)

Para llevar a cabo este procedimiento se utilizó el Programa Visual MINTEQ (versión 3.1) y únicamente se representaron 3 elementos traza, As, Fe y Mn, los cuales presentaron concentraciones mayores, en comparación con los demás elementos traza analizados previamente.

### As

El arsénico se encuentra en las aguas naturales como especie disuelta, la cual presenta por lo común como oxianiones con arsénico en 2 estados de oxidación, arsénico trivalente As (III) y arsénico pentavalente As (V). El As (V) aparece como  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  y sus correspondientes productos de disociación ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{AsO}_4^{3-}$ ), As (III) aparece como  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  y sus correspondientes productos de disociación ( $\text{H}_4\text{AsO}_3^+$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ,  $\text{HAsO}_3^{3-}$ ). Aunque tanto As (V) como As (III) son móviles en el medio, es precisamente el As (III) el estado más lábil y biotóxico.

El As es un elemento singular entre los elementos formadores de oxianiones por su sensibilidad a movilizarse en los valores de pH típicos de las aguas subterráneas (pH 6.5-8.5). Su estado de oxidación está controlado por las condiciones rédox (potencial rédox, Eh) y por el pH. Además, en condiciones oxidantes, el estado As (V) predomina sobre As (III), encontrándose fundamentalmente como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  a valores de pH bajos (inferiores a 6.9), mientras que, a pH más alto, la especie predominante es  $\text{HAsO}_4^{2-}$ .

Hay diferentes mecanismos de movilización de As en las aguas subterráneas, Smedley and Kinniburgh (2002) señalaron que, la naturaleza anóxica de algunas aguas subterráneas reduce al As (V) a As (III) lo que causaría la disolución del arsénico porque el As (III) es absorbido menos frecuentemente por los oxihidróxidos; sin embargo, bajo condiciones oxidantes predomina el As (V) y a valores altos de pH se movilizaría.

### Mayo-18

Las figuras 38 y 39 representan la forma química en la que se encuentra el As en los 10 sitios de muestreo en la primera campaña de colecta (mayo-18). El As (V) es la forma en la que se encuentra este elemento debido a la presencia de valores de pH con tendencia alcalina. En el primer muestreo se encontró ion hidrógeno arseniato ( $\text{HAsO}_4^{2-}$ ) de forma predominante en todos los sitios de estudio, seguido del ion dihidrógeno arseniato ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ). Por lo que se concluye que se presenta un sistema oxidante.

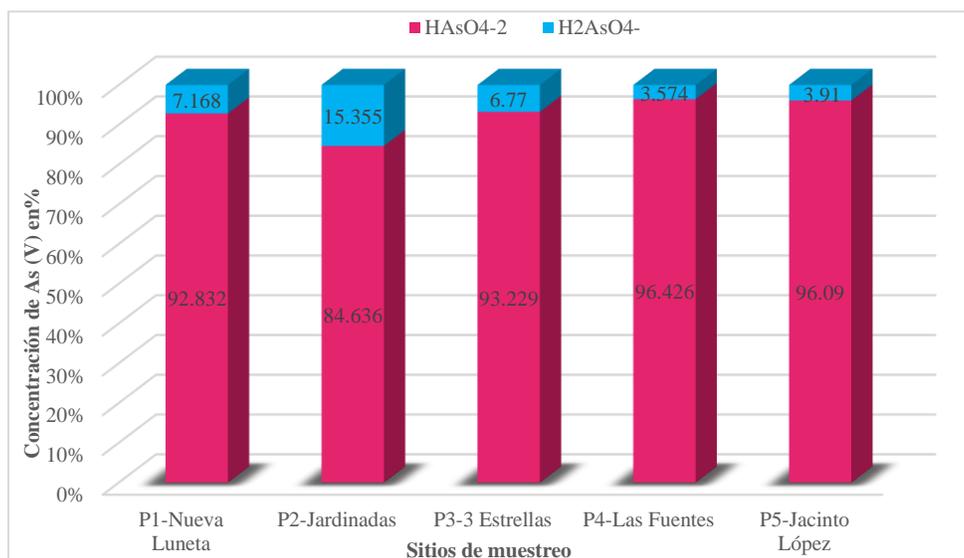


Fig. 38 Especies predominantes de As presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018

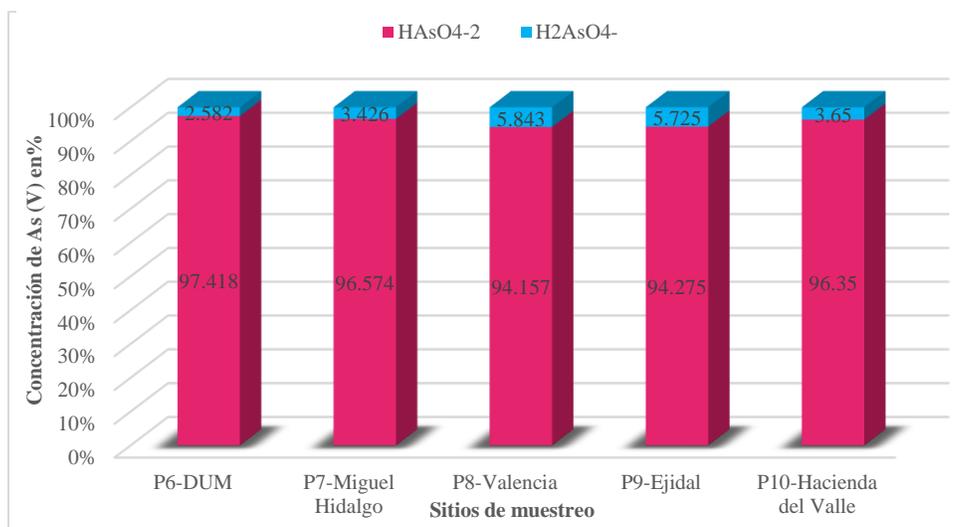


Fig. 39 Especies predominantes de As presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018

### Noviembre-18

Las figuras 40 y 41 representan la especiación química del As (V) de la segunda campaña, en la cual el ion hidrógeno arseniato ( $\text{HAsO}_4^{2-}$ ) se vuelve a presentar en mayor proporción en comparación con el ion dihidrógeno arseniato ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ), sin embargo, en esta colecta se observó un aumento en la concentración de este ion en los 10 sitios, esto debido a la disminución del pH encontrado en la zona de estudio.

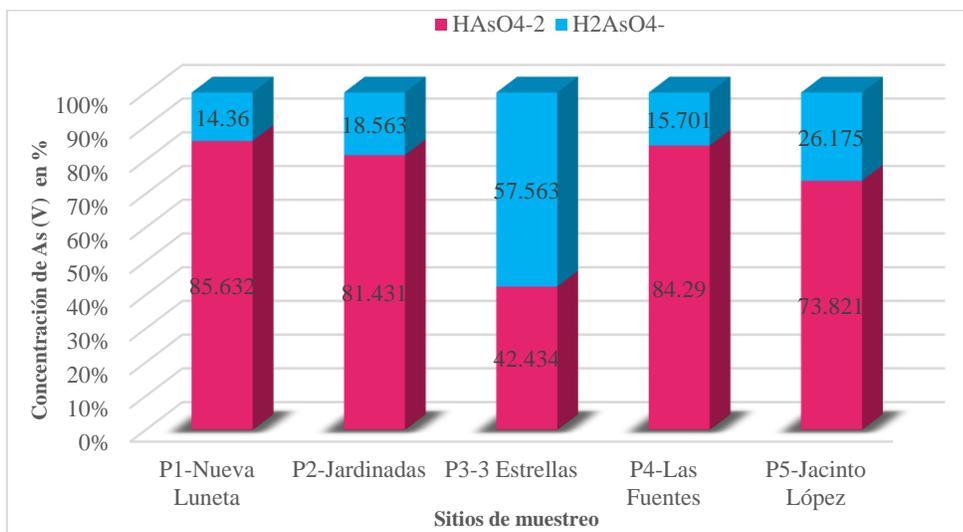


Fig. 40 Especies predominantes de As presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018

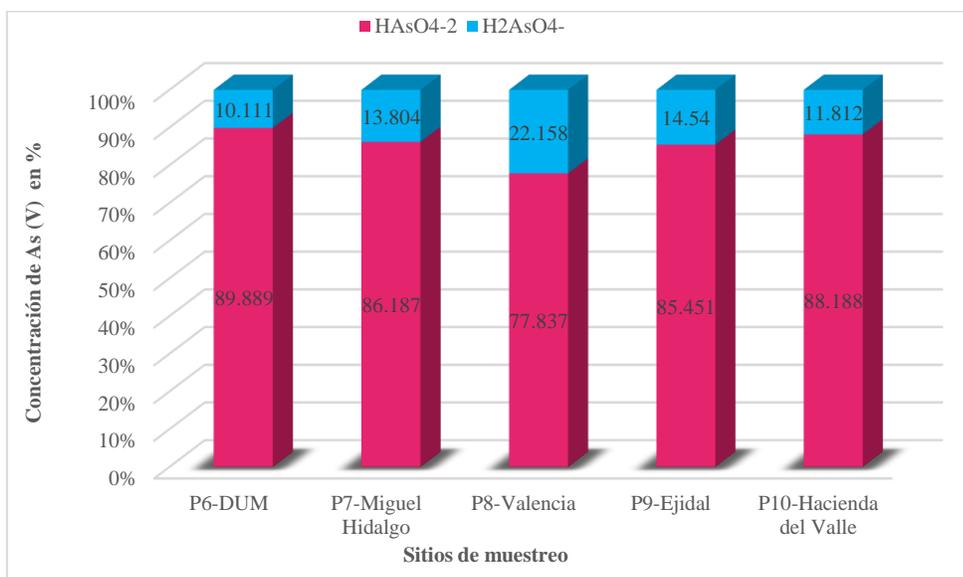


Fig. 41 Especies predominantes de As presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018

## Fe

El Fe en aguas subterráneas suele encontrarse en forma de  $\text{Fe}^{2+}$  aunque puede presentarse como  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{FeOH}^+$ , en función del pH, contenido de oxígeno y, a menudo, del contenido del agua en otros elementos (carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, etc).

Dependiendo del valor de pH y de la concentración de oxígeno, el Fe puede estar presente bajo la forma ferrosa y férrica. A pH neutro y en presencia de oxígeno, el hierro ferroso  $\text{Fe}^{2+}$  es oxidado a hierro férrico  $\text{Fe}^{3+}$ , el mismo que rápidamente es hidrolizado bajo la forma de un precipitado insoluble como hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . A valores de pH por debajo de 6, la tasa de oxidación del  $\text{Fe}^{2+}$  hacia  $\text{Fe}^{3+}$  es extremadamente lenta.

El Fe se puede encontrar bajo diferentes formas en el agua. En las condiciones habituales de pH (4.5-9), el Fe soluble está presente generalmente en estado ferroso. Si el medio es reductor, como en la mayoría de las aguas subterráneas, el hierro ferroso puede alcanzar concentraciones elevadas. Además, el Fe se oxida bajo la acción del aire o por la adición de cloro, pasando al estado férrico pudiendo así hidrolizarse para dar un hidróxido de hierro insoluble (Valencia, 2010).

### Mayo-18

En este estudio se realizó la especiación química del hierro férrico  $\text{Fe}^{3+}$ , debido a la oxidación que sufrió el  $\text{Fe}^{2+}$ , proveniente del acuífero, al momento de que el agua colectada entrara en contacto con el oxígeno proveniente de la superficie. Lo que propició a pasar del  $\text{Fe}^{2+}$  al  $\text{Fe}^{3+}$ . En la primera campaña de mayo-18 se observó la presencia del  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  como especie predominante en todos los sitios de estudio, con excepción de los pozos P3-3 Estrellas y P4-Las Fuentes, en los cuales fue el  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ ; en los pozos P9-Ejidal y P10-Hacienda del Valle, la concentración del Fe se encontró por debajo del límite de detección, por lo tanto no fue posible cuantificar su especiación química. Por último, con un % menor, en comparación con las primeras dos especies, se encontró en los sitios el hidróxido férrico acuoso  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{aq})$ .

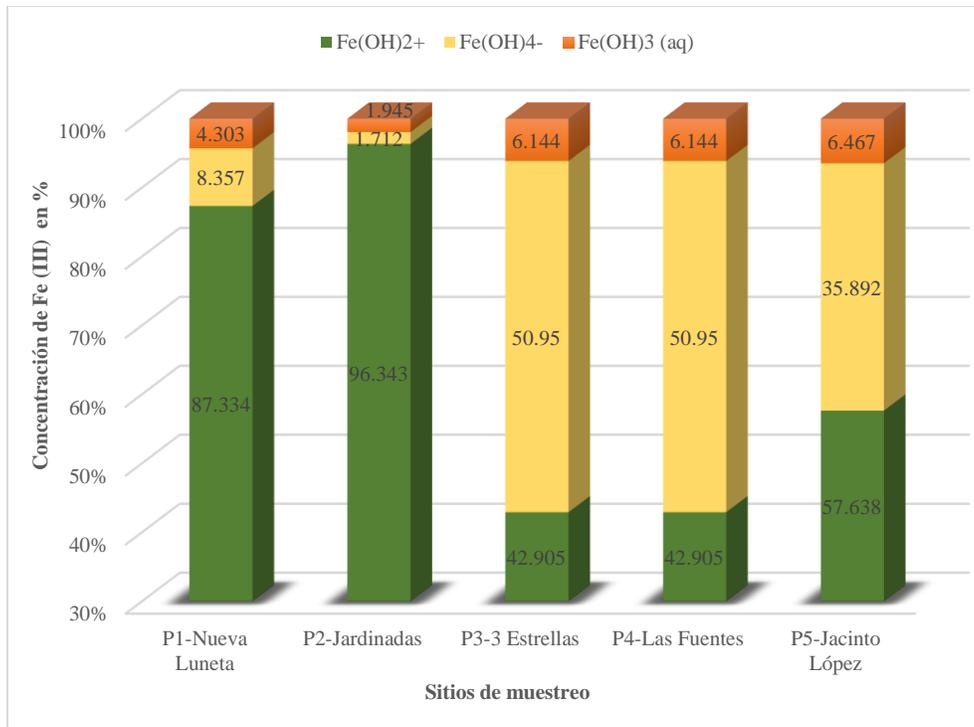


Fig. 42 Especies predominantes de Fe presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018

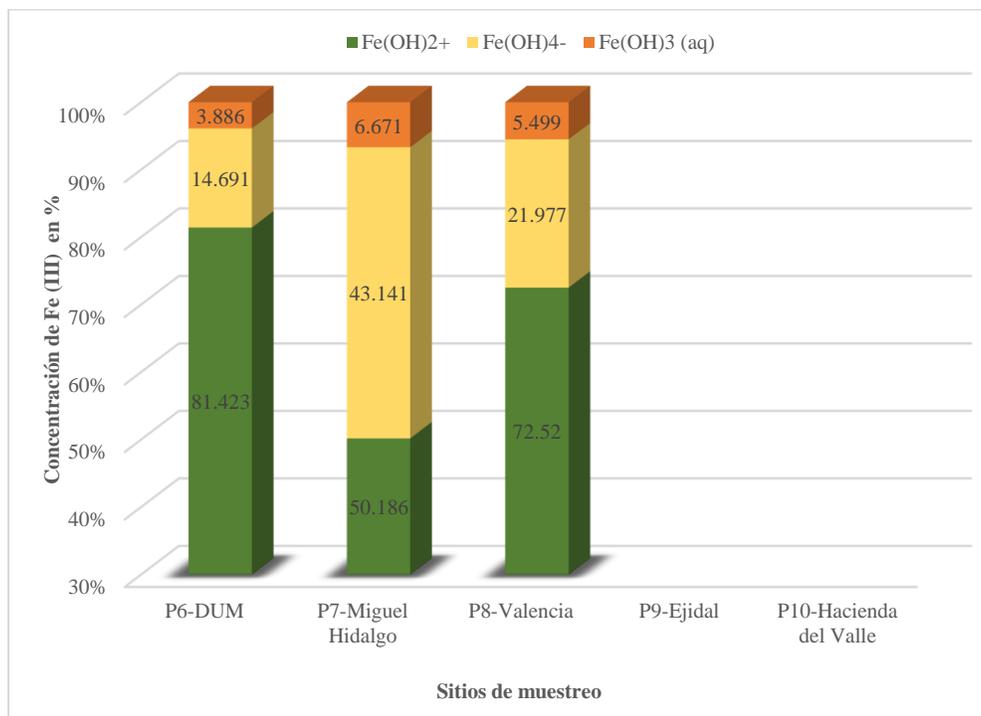


Fig. 43 Especies predominantes de Fe presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018

### Noviembre

En la segunda campaña de colecta (noviembre-18) se volvió a observar la presencia en mayor proporción del  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  en todos los sitios de estudio (figuras 44 y 45). En este muestreo sí se logró encontrar una concentración por encima del límite de detección para los sitios P9-Ejidal y P10-Hacienda del Valle, esto como consecuencia de la época de lluvias que se estableció en los meses de junio a septiembre, los cuales contribuyeron al desprendimiento de este elemento de la roca hacia el agua subterránea. Las demás especies que se presentaron en este estudio fueron las mismas observadas en la campaña de mayo-18:  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{aq})$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ .

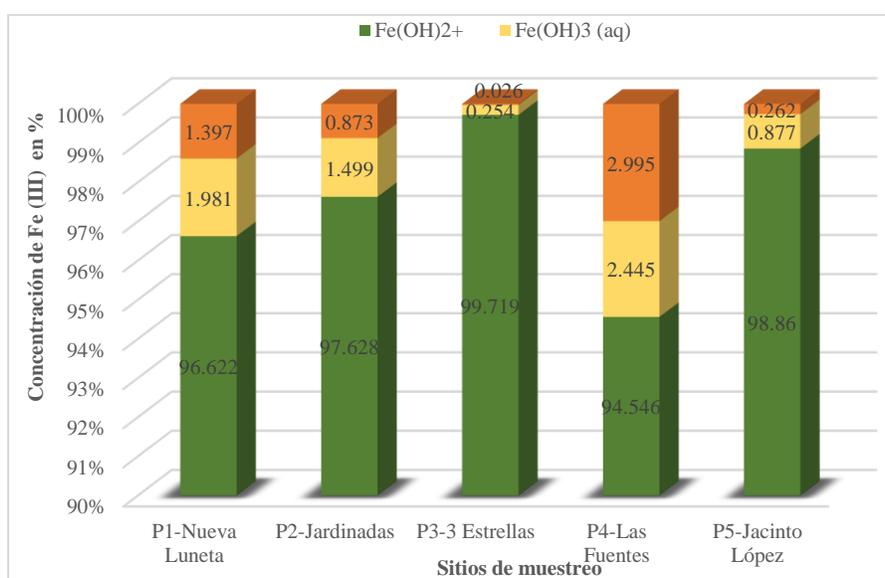


Fig. 44 Especies predominantes de Fe presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018

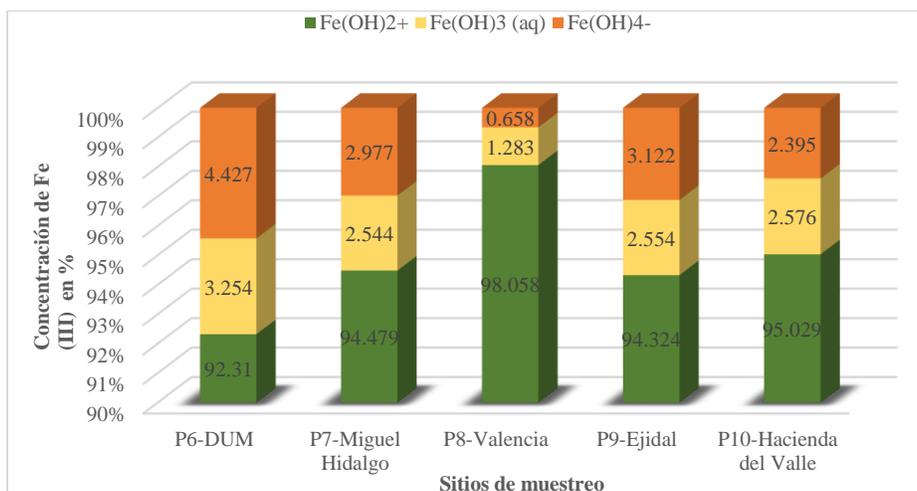


Fig. 45 Especies predominantes de Fe presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018

## **Mn**

El manganeso (Mn) se puede encontrar en forma de  $Mn^{2+}$  o en forma de complejo ( $MnHCO_3^+$ ). Por regla general, se encuentra en concentraciones inferiores a las del hierro (Fe) (Valencia, 2010).

Este elemento se manifiesta frecuentemente en el agua como ion manganoso ( $Mn^{2+}$ ). Las sales de manganeso son generalmente más solubles en soluciones ácidas que en soluciones alcalinas. En pozos poco profundos se puede encontrar compuestos orgánicos y coloides de manganeso.

La exposición al manganeso en el agua ocurre debido a que éste forma parte natural del ambiente. Es común que el agua subterránea, agua potable y el suelo contengan bajos niveles de manganeso

### **Mayo-18**

En la campaña de mayo-18 se observó la presencia en mayor concentración del  $Mn^{2+}$  en 9 sitios, con excepción del pozo P10-Hacienda del Valle, debido a que la concentración de este lugar se encontró por debajo del límite de detección del equipo que se utilizó para medirlo (ICP-MS). Las otras especies encontradas en menor concentración fueron: Carbonato manganoso ( $MnCO_3$  (aq)), sulfato manganoso acuoso ( $MnSO_4$  (aq)) y el complejo  $MnHCO_3^+$ .

En el pozo P3-3 Estrellas se manifestó una mayor proporción del  $MnCO_3$  (aq) debido a la alta concentración de bicarbonatos  $HCO_3^-$  en la muestra, en comparación con los demás sitios de estudio.

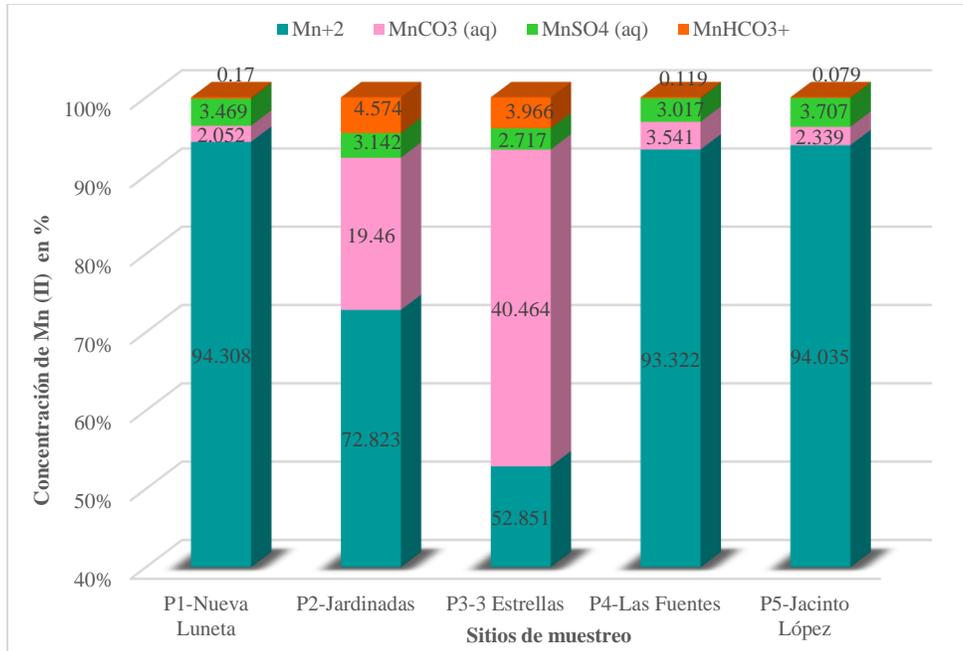


Fig. 46 Especies predominantes de Mn presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018

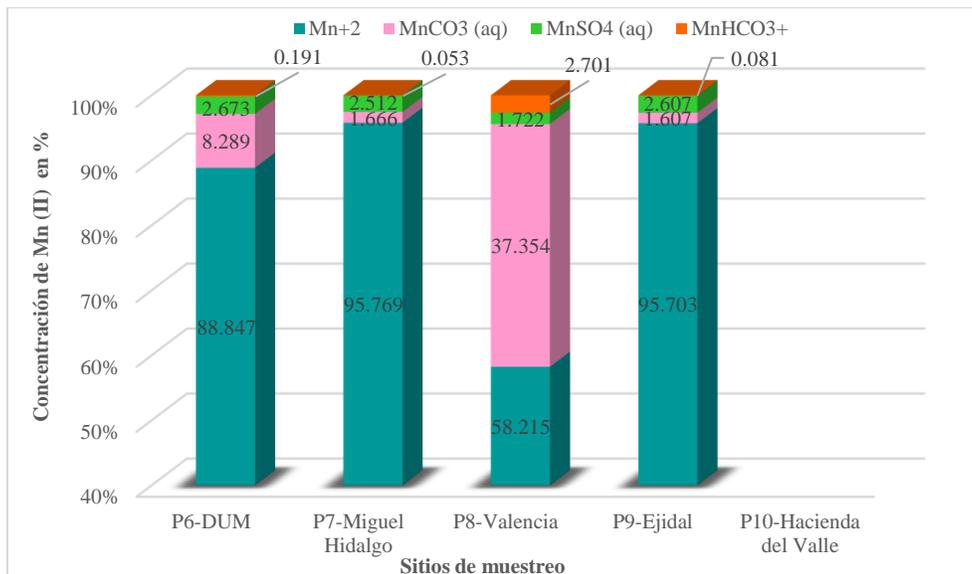


Fig. 47 Especies predominantes de Mn presentes en 5 sitios de estudio en mayo 2018

### Noviembre-18

En la segunda colecta de muestras, al igual que en la primera, se observó una mayor concentración en la especie  $Mn^{2+}$  y la presencia de compuestos como:  $MnCO_3$  (ac),  $MnSO_4$  (ac) y  $MnHCO_3^+$ .

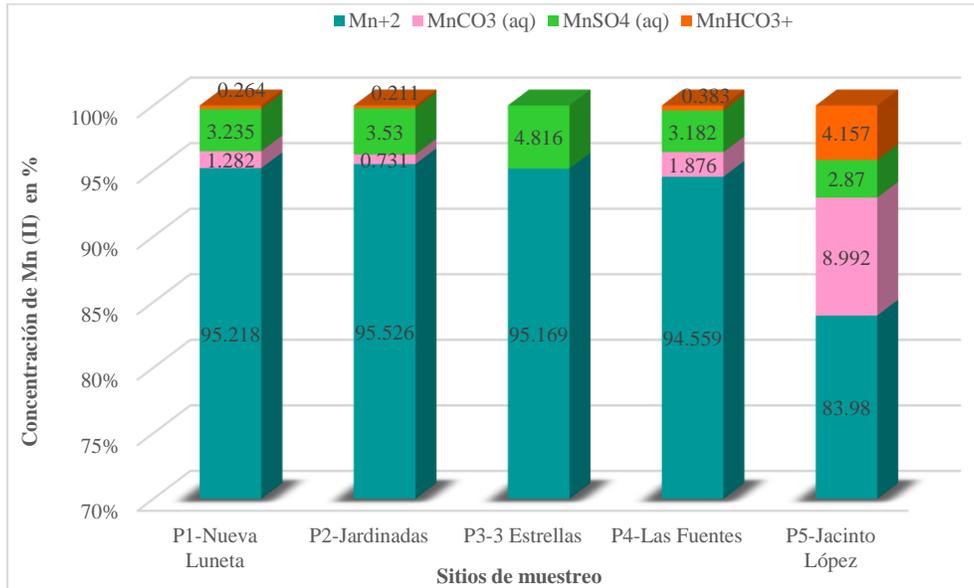


Fig. 48 Especies predominantes de Mn presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018

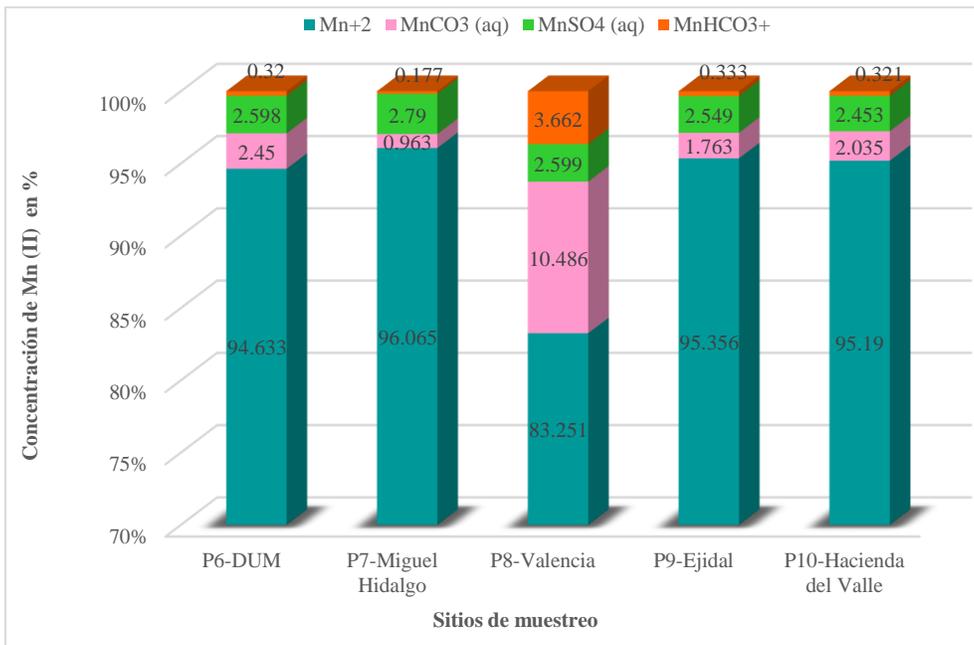


Fig. 49 Especies predominantes de Mn presentes en 5 sitios de estudio en noviembre 2018

## 9.2 Distribución espacial de los parámetros de calidad del agua subterránea

Las aplicaciones de los SIG son variadas y respaldan la gestión de los recursos naturales, la planificación y el desarrollo, la gestión ambiental, la investigación oceánica y marina, el cambio climático y muchas otras áreas en las que participan personas y la sociedad (Mahmoudi et al., 2017). El método que se utilizó para la interpolación de los datos de calidad del agua fue la herramienta Spline con barreras, encontrado en el software ArcGis 10.6.1, el cual es un sistema de curvatura mínima, que inicia con el promedio de los datos de entrada, a través de una serie de cuadrículas más finas hasta que se produce una aproximación de una superficie de curvatura mínima en el espaciado de fila y columna deseadas. A continuación, se muestran los mapas interpolados a partir de esta técnica que indican la distribución espacial de algunos parámetros analizados de calidad del agua subterránea en la zona de estudio, así como de las relaciones molares representativas de la hidrogeoquímica del lugar.

### 9.2.1 Parámetros de campo

#### Temperatura

En los mapas presentados en las figuras 50 y 51 se observa la distribución de las temperaturas a lo largo de toda la zona urbana de Zamora, Michoacán, en la que se aprecia que las más bajas prevalecieron en la zona sur de esta ciudad en las 2 campañas de colectas, debido a la cercanía que existe con el río Duero. Por otra parte, las temperaturas más altas se encontraron en la parte central de la ciudad, esto propiciado por el horario en el que se llevó a cabo el muestreo.

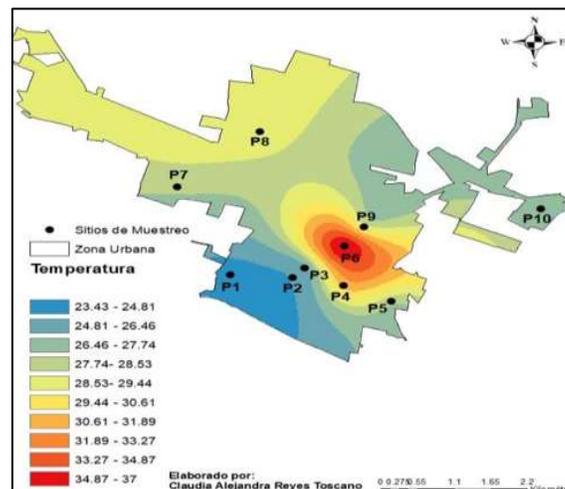


Fig. 50 Mapa de distribución espacial de temperatura en la zona de estudio (mayo)

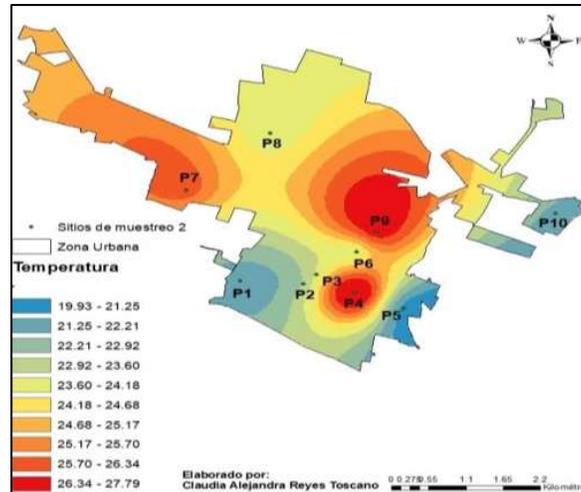


Fig. 51 Mapa de distribución espacial de temperatura en la zona de estudio (noviembre)

## pH

En los mapas que se muestran en las figuras 52 y 53 se puede apreciar un pH muy cercano al neutro en la zona norte y centro de la zona de estudio. Mientras que los pH alcalinos se presentaron en las 2 campañas de colectas en las direcciones noroeste y sureste de la ciudad, lo que indica una influencia directa del Río Duero.

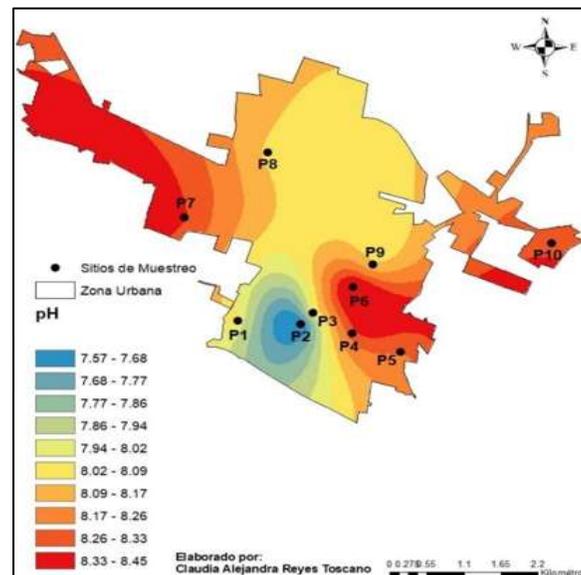


Fig. 52 Mapa de distribución espacial de pH en la zona de estudio (mayo)

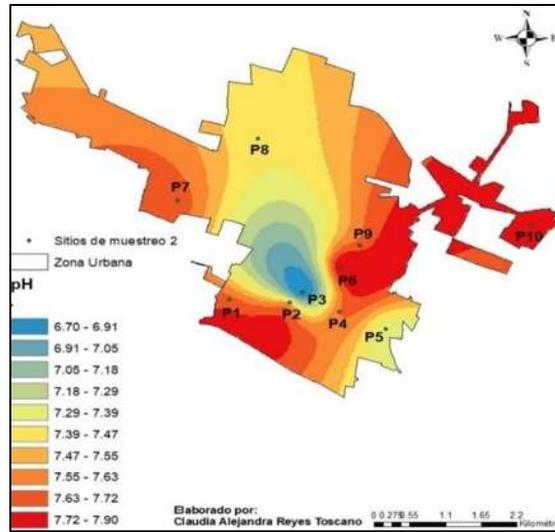


Fig. 53 Mapa de distribución espacial de pH en la zona de estudio (noviembre)

### Conductividad eléctrica

Los mapas presentados en las figuras siguientes muestran una distribución de la conductividad eléctrica igual en las 2 campañas de colectas, únicamente con diferentes rangos, estableciendo que noviembre fue el mes en el que se presentaron las mayores conductividades, concretamente en la zona central de esta ciudad, mientras que en la parte norte se encontraron las menores conductividades eléctricas.

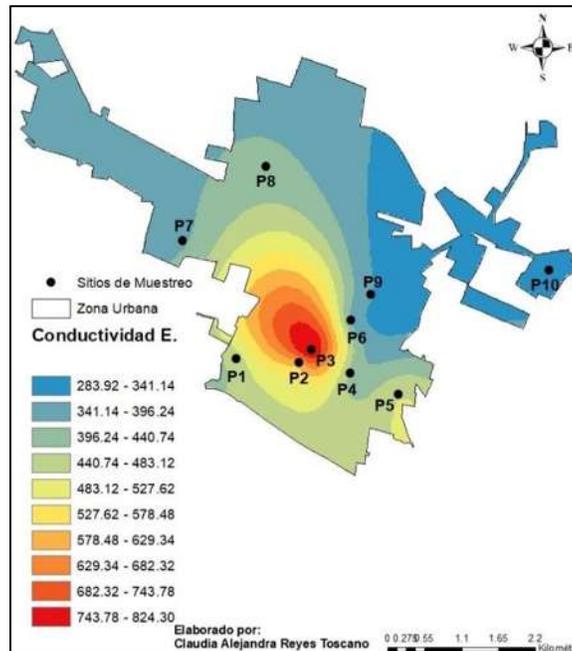


Fig. 54 Mapa de distribución espacial de conductividad eléctrica en la zona de estudio (mayo)

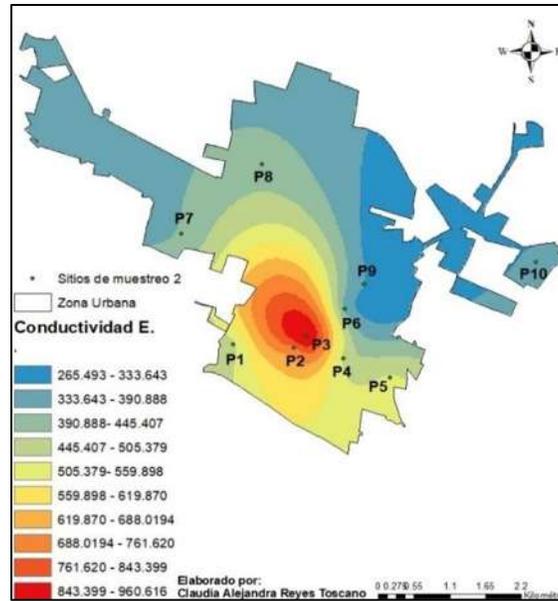


Fig. 55 Mapa de distribución espacial de conductividad eléctrica en la zona de estudio (noviembre)

### Oxígeno disuelto

En los mapas que se mostraron en las figuras 56 y 57 se puede apreciar una relación con temperatura, debido a que en el mes de mayo las concentraciones de oxígeno disuelto más elevadas se presentaron en la parte norte de la zona de estudio, mientras que, en esa misma zona, en esa campaña, las temperaturas disminuyeron. En el mes de noviembre se puede apreciar que las concentraciones mayores se distribuyeron hacia la zona suroeste, mientras que las menores se observaron hacia la zona norte de esta zona urbana.

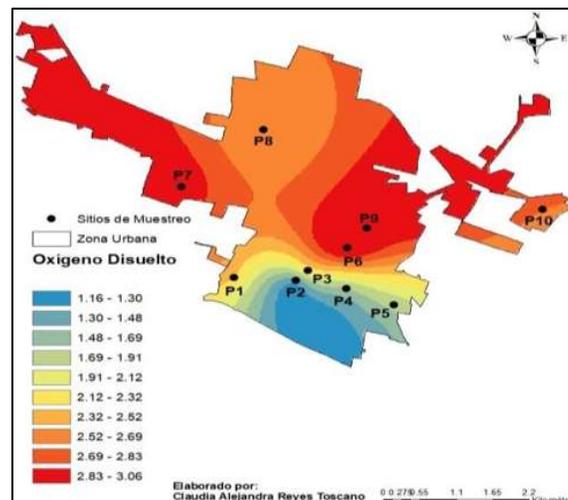


Fig. 56 Mapa de distribución espacial de oxígeno disuelto en la zona de estudio (mayo)

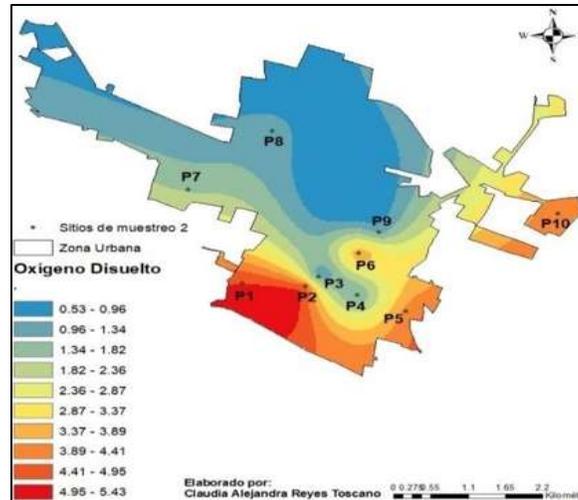


Fig. 57 Mapa de distribución espacial de oxígeno disuelto en la zona de estudio (noviembre)

### 9.2.2 Parámetros fisicoquímicos

#### Dureza

Los mapas que se presentan en las figuras 58 y 59 se puede ver que la distribución de este parámetro es la misma en las 2 campañas de colectas, únicamente con un rango más pequeño en la concentración del mes de noviembre en todos los sitios de muestreo, y eso debido al grado de mineralización que aumenta en la época de estiaje. Las concentraciones mayores se ubicaron en la zona centro de la ciudad, mientras que las menores se observaron en la parte norte de la misma.

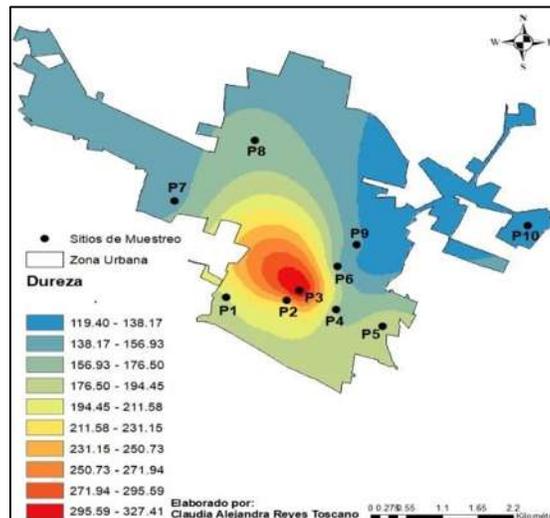


Fig. 58 Mapa de distribución espacial de dureza en la zona de estudio (mayo)

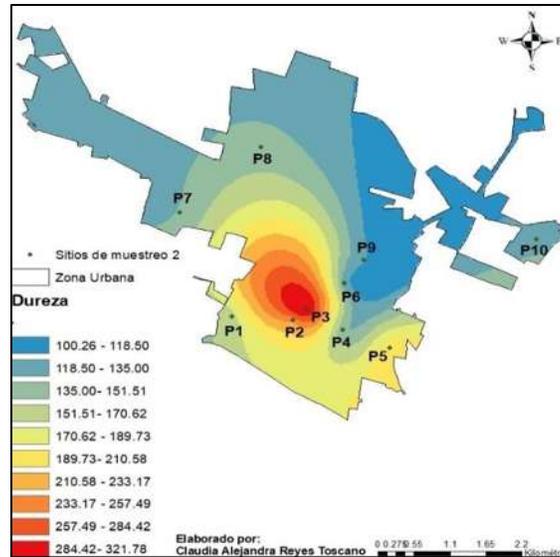


Fig. 59 Mapa de distribución espacial de dureza en la zona de estudio (noviembre)

### Sólidos Totales

Los sólidos totales se representaron en los mapas de las figuras 60 y 61, en los cuales hay coincidencia en la distribución del mismo a lo largo de las 2 campañas, destacando que la zona en la que se presentaron las mayores concentraciones fue la central, mientras que la que presentó las menores concentraciones fue la zona norte de esta cabecera municipal. El muestreo de mayo estableció un rango más elevado de concentraciones con respecto al muestreo de noviembre.

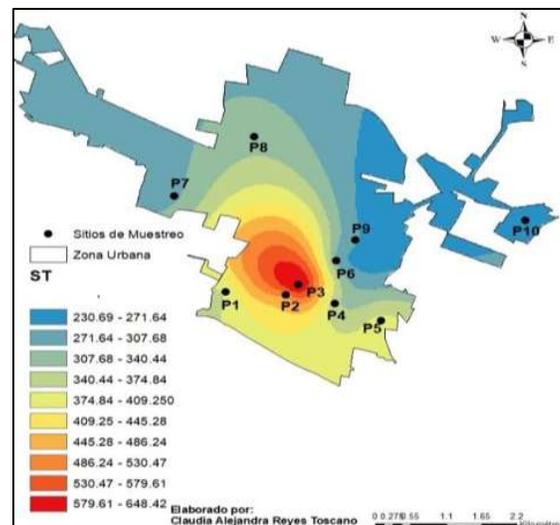


Fig. 60 Mapa de distribución espacial de sólidos totales (ST) en la zona de estudio (mayo)

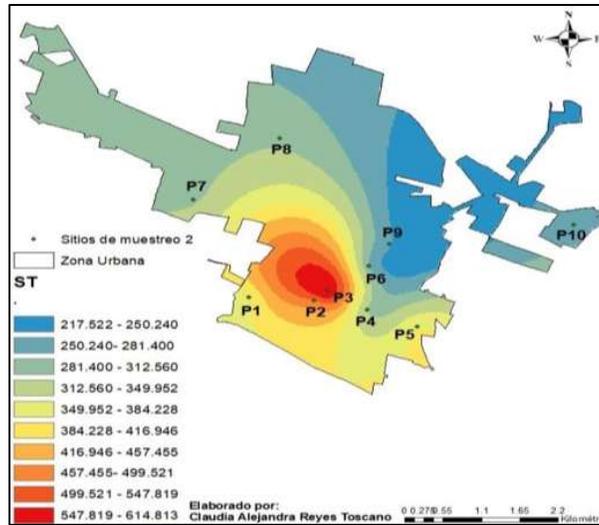


Fig. 61 Mapa de distribución espacial de Sólidos Totales (ST) en la zona de estudio (noviembre)

### Sólidos Disueltos Totales

Para representar visualmente la distribución de lo Sólidos Disueltos Totales, las figuras 62 y 63 muestran que éstos se encontraron en una mayor concentración en la zona centro, en los 2 muestreos, y la menor se presentó hacia la zona norte de esta zona de estudio, coincidiendo con la distribución presentada de la conductividad eléctrica, debido a que, como se mencionó anteriormente, son parámetros que se relacionan directamente.

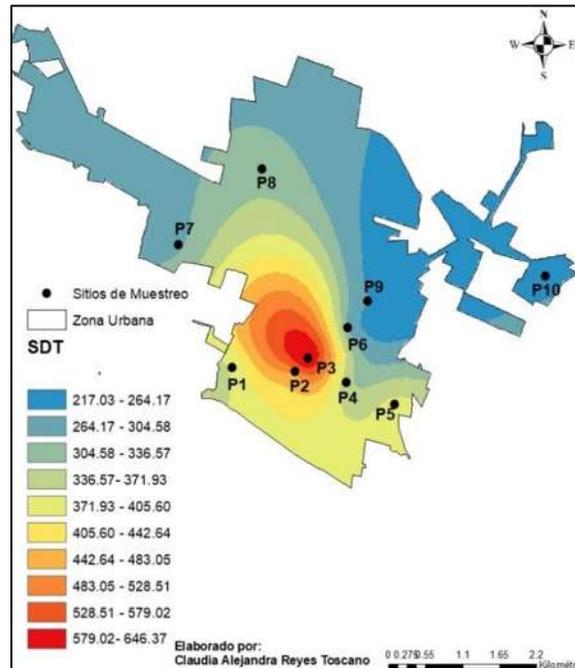


Fig. 62 Mapa de distribución espacial de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en la zona de estudio (mayo)

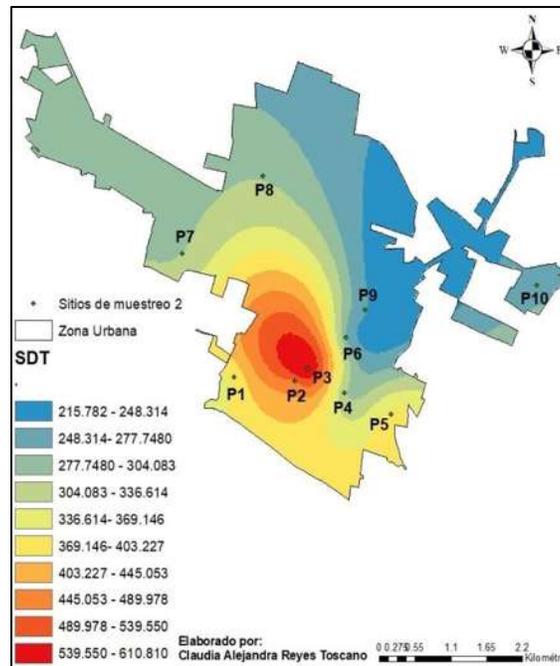


Fig. 63 Mapa de distribución espacial de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en la zona de estudio (noviembre)

### Sólidos Suspendedos

La representación de los Sólidos Suspendedos se puede visualizar en las figuras 64 y 65, donde se aprecia que hubo un aumento en el rango de concentraciones en el mes de noviembre, esto debido a las lluvias que se presentaron en meses anteriores y que arrastraron partículas suspendidas. La distribución de los SST no es constante en los 2 muestreos, ya que en el mes de mayo las mayores concentraciones se observaron en la zona Noreste y las menores en la zona Noroeste y Sureste, mientras que en la segunda campaña las mayores concentraciones se percibieron en la parte suroeste de la zona de estudio y las menores en la Este. Además, se puede percibir que las concentraciones aumentaron considerablemente en la segunda campaña con respecto a la primera.

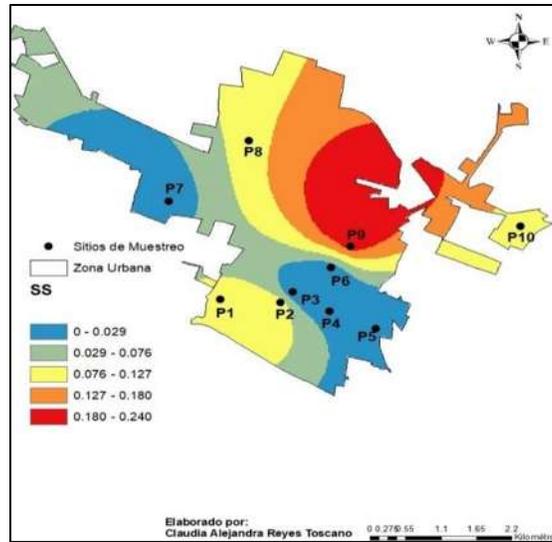


Fig. 64 Mapa de distribución espacial de Sólidos Suspendedos (SS) en la zona de estudio (mayo)

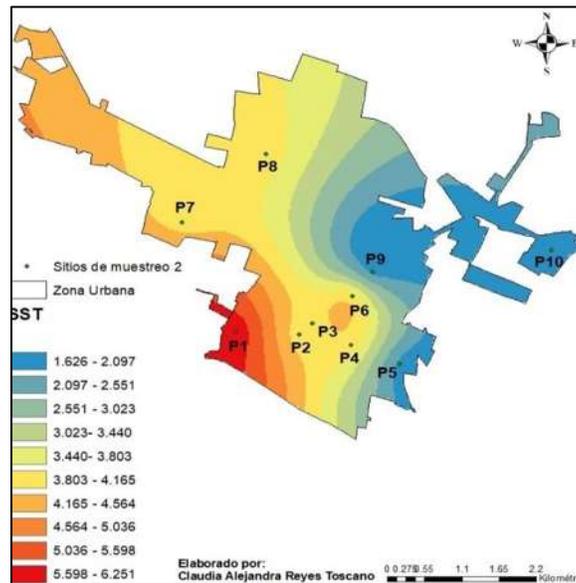


Fig. 65 Mapa de distribución espacial de Sólidos Suspendedos (SS) en la zona de estudio (noviembre)

### Alcalinidad

Los mapas de las figuras 66 y 67 son una representación de la interpolación de la alcalinidad total, la cual está relacionada con los iones mayoritarios, dureza y pH, demostrando que su distribución a lo largo de toda la zona urbana de Zamora, Michoacán en los 2 muestreos coincide con la mostrada en la dureza, en donde la zona centro presentó la concentración mayor, y la menor en zona norte.

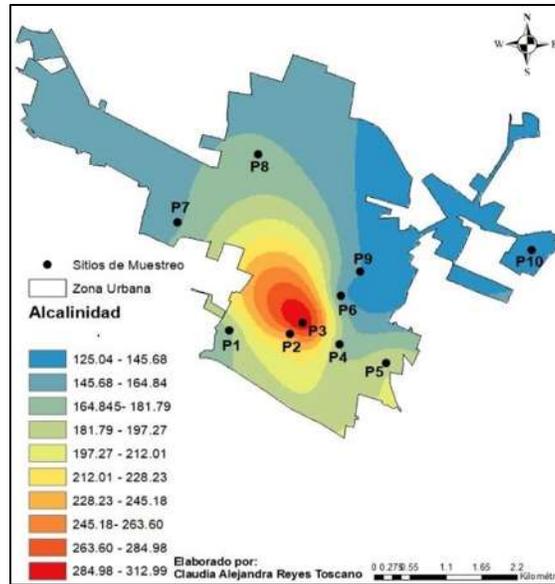


Fig. 66 Mapa de distribución espacial de Alcalinidad total en la zona de estudio (mayo)

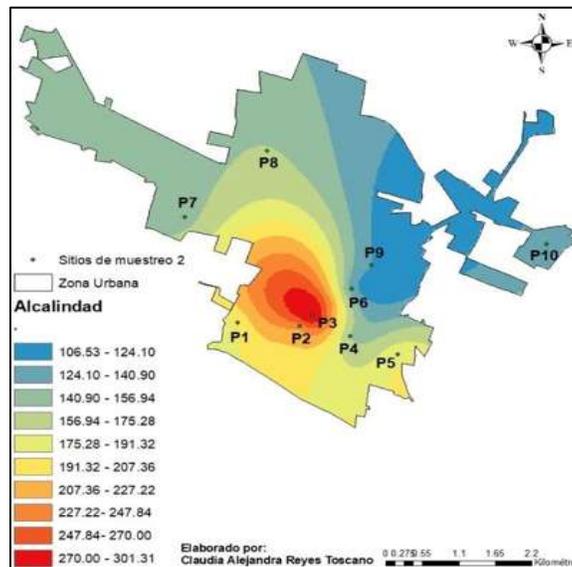


Fig. 67 Mapa de distribución espacial de Alcalinidad Total en la zona de estudio (noviembre)

### DBO<sub>5</sub>

Las figuras 68 y 69 representan los mapas de distribución de DBO<sub>5</sub>, en donde se puede apreciar que, en la primera campaña, la concentración aumentó en dirección Sureste a Noroeste, mientras que en la segunda campaña la dirección en la que aumentó la concentración de este parámetro a lo largo de la zona urbana fue de Suroeste a Noreste.

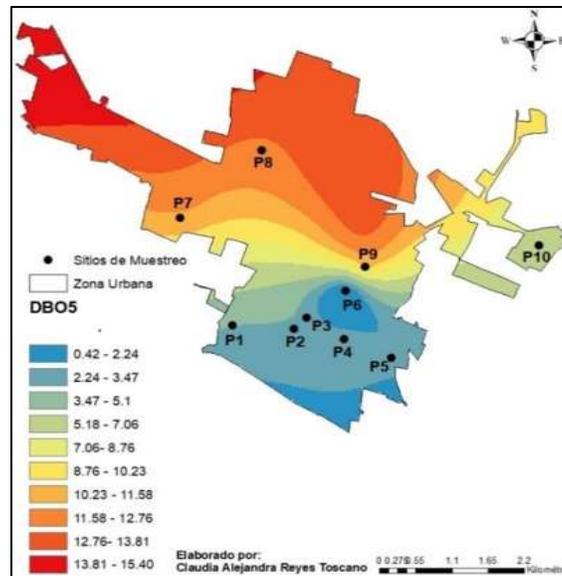


Fig. 68 Mapa de distribución espacial de DBO<sub>5</sub> en la zona de estudio (mayo)

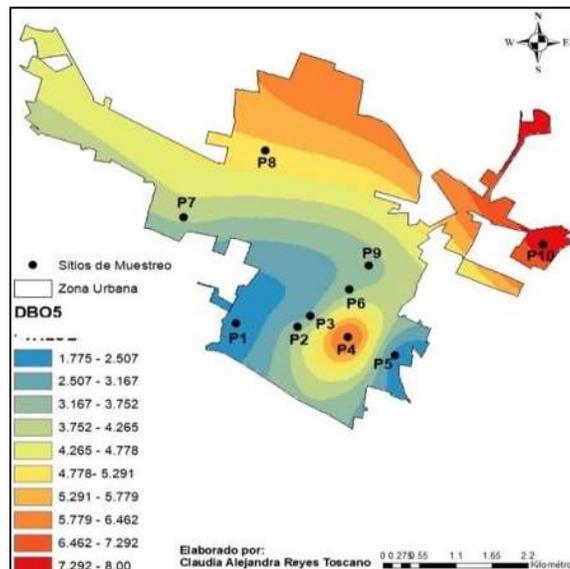


Fig. 69 Mapa de distribución espacial de DBO<sub>5</sub> en la zona de estudio (noviembre)

## DQO

En los mapas siguientes se puede apreciar que la distribución de DQO es similar a la presentada en la DBO<sub>5</sub>, donde se puede comprobar que estos dos parámetros se encuentran relacionados y que el rango de concentraciones de DQO es aproximadamente 2 veces mayor respecto al de DBO<sub>5</sub>. Además, es importante señalar que la campaña del mes de noviembre presentó mayor rango de concentraciones respecto a la del mes de mayo.

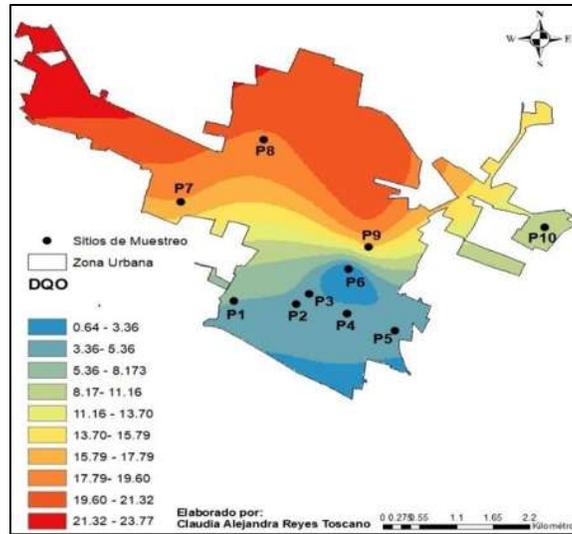


Fig. 70 Mapa de distribución espacial de DQO en la zona de estudio (mayo)

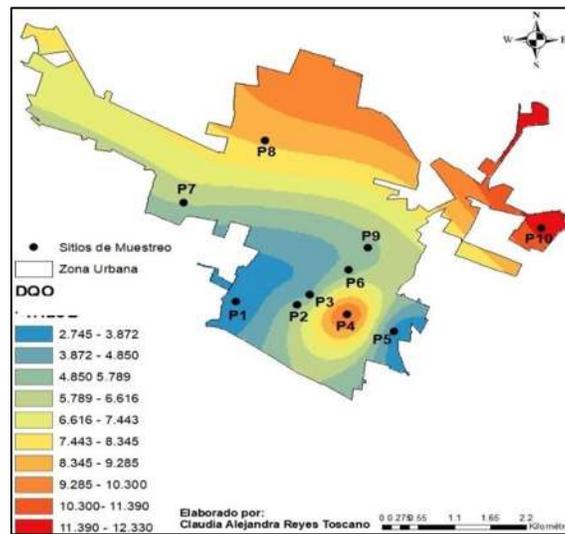


Fig. 71 Mapa de distribución espacial de DQO en la zona de estudio (noviembre)

### 9.2.3 Iones mayoritarios

#### Ca<sup>2+</sup>

La distribución de las mayores concentraciones del ion Ca<sup>2+</sup> se presentó en la zona central de la ciudad de Zamora, Michoacán en las 2 campañas de muestreo, mientras que la distribución de las concentraciones menores se presentó en la zona Norte y Este. El mayor rango de concentraciones se mostró en el mes de mayo, a consecuencia de la mineralización del lugar debido a la época de estiaje.

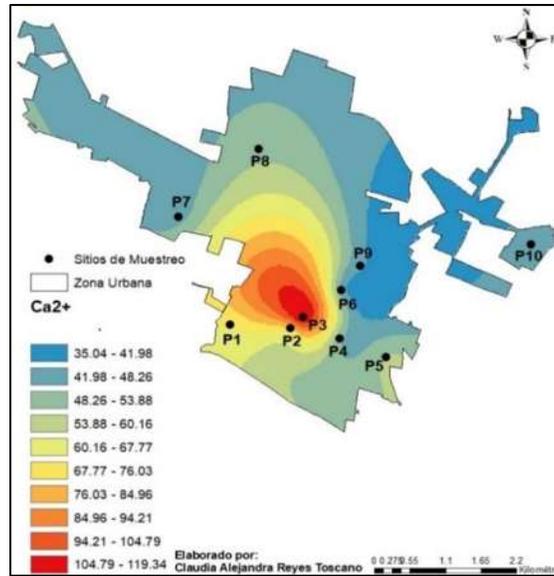


Fig. 72 Mapa de distribución espacial de Ca<sup>2+</sup> en la zona de estudio (mayo)

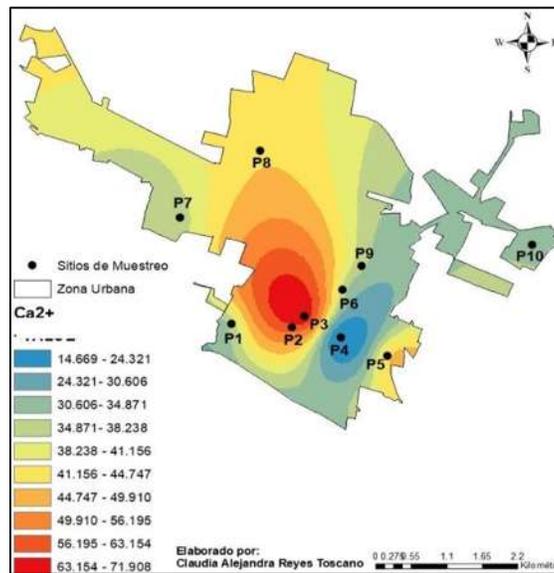


Fig. 73 Mapa de distribución espacial de Ca<sup>2+</sup> en la zona de estudio (noviembre)

### Mg<sup>2+</sup>

La distribución del ion Mg<sup>2+</sup> se puede observar en las figuras 74 y 75, en donde las concentraciones en la primera campaña se distribuyeron en dirección Sur-Norte, mientras que las de la segunda se distribuyeron en dirección Suroeste-Noreste.

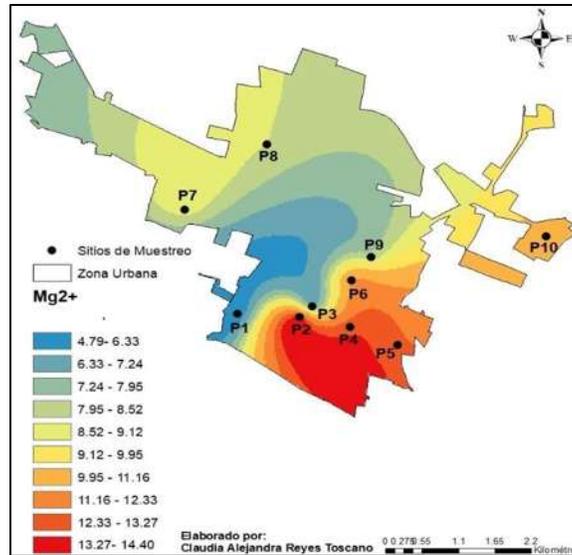


Fig. 74 Mapa de distribución espacial de Mg<sup>2+</sup> en la zona de estudio (mayo)

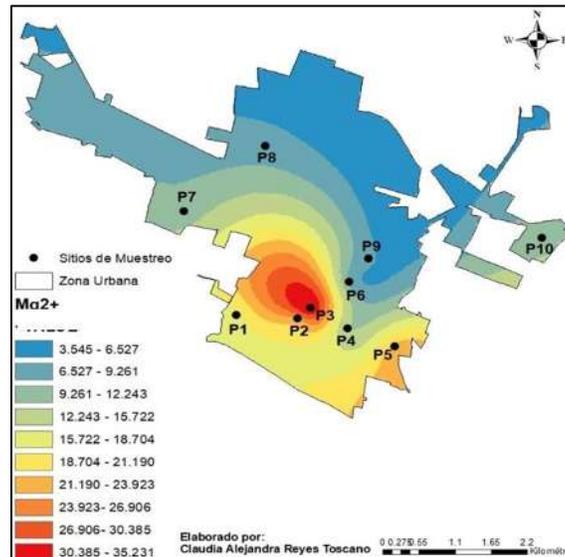


Fig. 75 Mapa de distribución espacial de Mg<sup>2+</sup> en la zona de estudio (noviembre)

### Na<sup>+</sup>

Los mapas que se encuentran a continuación representan la distribución del ion Na<sup>+</sup> a lo largo de las 2 campañas de colectas en toda la zona urbana de Zamora, Michoacán. En estas imágenes se aprecia que las mayores concentraciones en los 2 muestreos se presentaron en la zona centro, mientras que las menores en la zona Noreste y Este. Además, la presencia de este catión, en comparación con los demás fue menor.

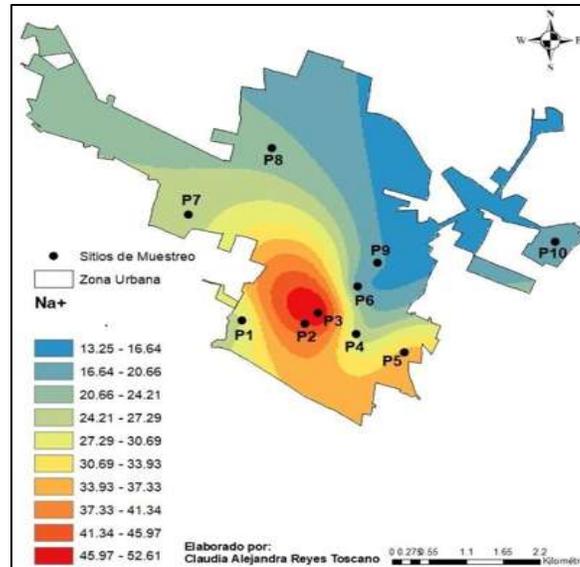


Fig. 76 Mapa de distribución espacial de  $\text{Na}^+$  en la zona de estudio (mayo)

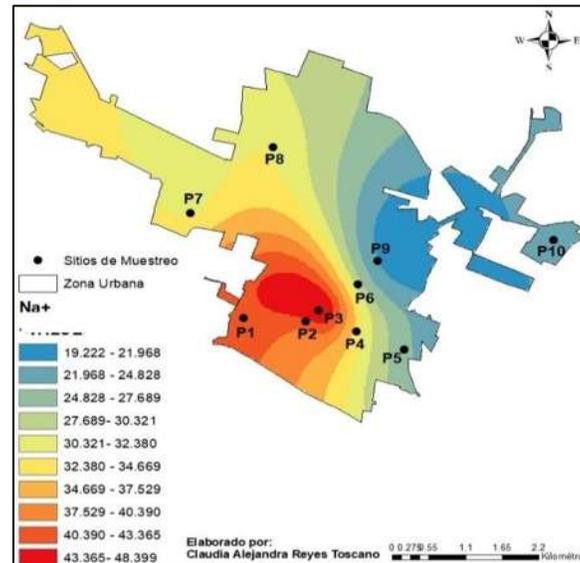


Fig. 77 Mapa de distribución espacial de  $\text{Na}^+$  en la zona de estudio (noviembre)

### $\text{HCO}_3^-$

La distribución de este ion se aprecia en las figuras 78 y 79 los cuales muestran que en las 2 campañas la concentración mayor se estableció en la zona central, mientras que la concentración menor se presentó hacia la zona Este. Es importante señalar que el rango mayor de concentraciones se presentó en el mes de mayo y que fue el anión predominante en todas las aguas de los sitios de muestreo.

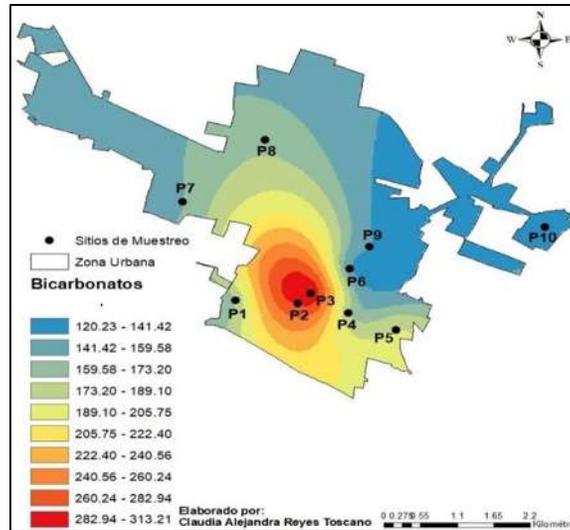


Fig. 78 Mapa de distribución espacial de  $HCO_3^-$  en la zona de estudio (mayo)

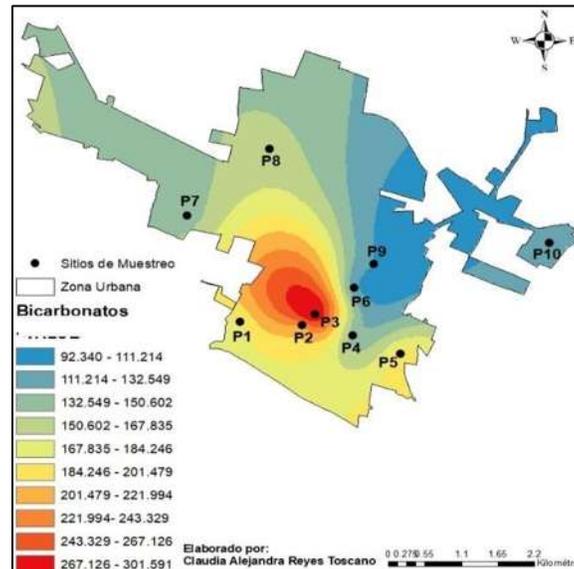


Fig. 79 Mapa de distribución espacial de  $HCO_3^-$  en la zona de estudio (noviembre)

## $SO_4^{2-}$

Los mapas 80 y 81 muestran una distribución espacial en la zona de estudio similar en las dos campañas de colectas, en donde la menor concentración se ubicó en la zona Noreste, incrementándose hacia la zona central de la ciudad de Zamora, Michoacán.

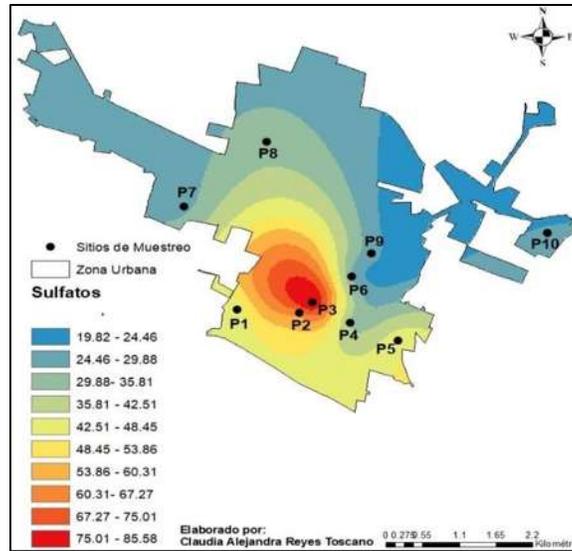


Fig. 80 Mapa de distribución espacial de  $SO_4^{2-}$  en la zona de estudio (mayo)

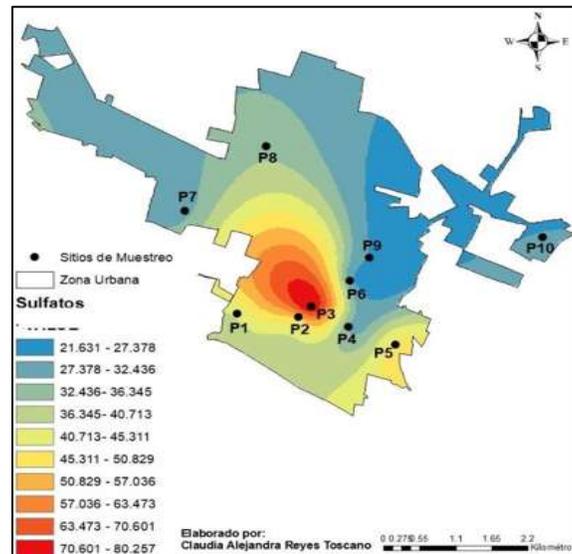


Fig. 81 Mapa de distribución espacial de  $SO_4^{2-}$  en la zona de estudio (noviembre)

### Cl<sup>-</sup>

La distribución espacial (figuras 82 y 83) de este anión se visualizó de manera similar en los 2 muestreos, localizando la mayor concentración en la zona centro de la ciudad, con un incremento hacia la dirección Noreste. Además, el rango que osciló las mayores concentraciones se presentó en la campaña de mayo.

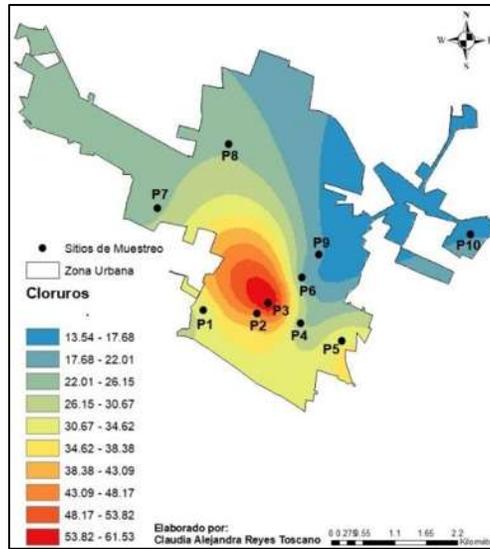


Fig. 82 Mapa de distribución espacial de Cl<sup>-</sup> en la zona de estudio (mayo)

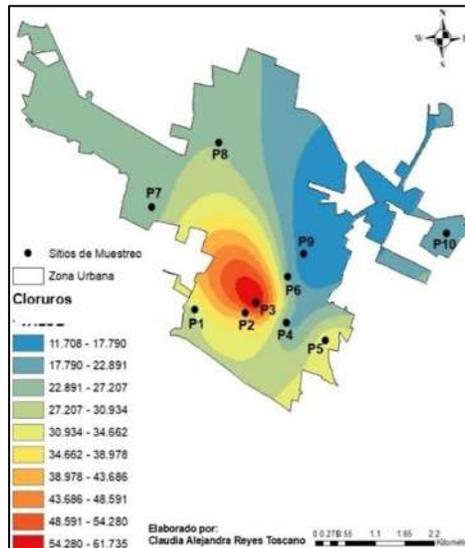


Fig. 83 Mapa de distribución espacial de Cl<sup>-</sup> en la zona de estudio (noviembre)

### NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

La representación de los nitratos se puede observar en las figuras 84 y 85, las cuales muestran mapas con una distribución espacial similar en las 2 campañas de colectas, en donde las concentraciones menores se localizaron en la zona Noroeste y Sureste, mientras que las mayores se mostraron en la zona central de esta localidad.

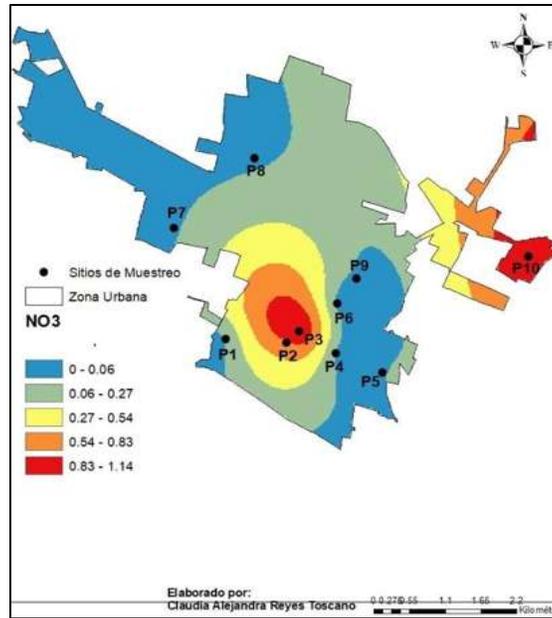


Fig. 84 Mapa de distribución espacial de  $\text{NO}_3^-$  en la zona de estudio (mayo)

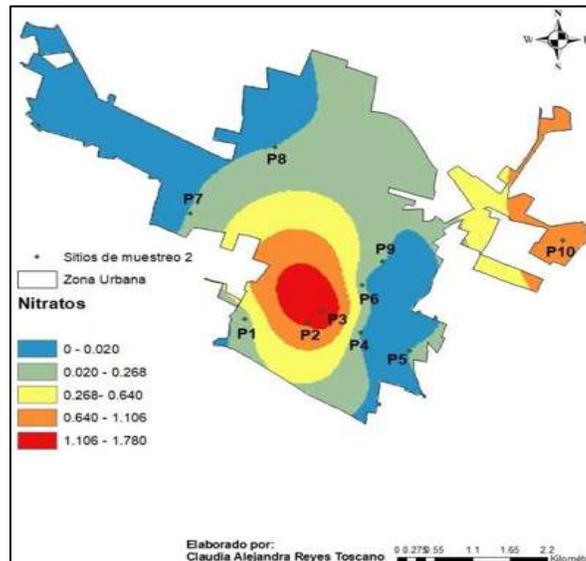


Fig. 85 Mapa de distribución espacial de  $\text{NO}_3^-$  en la zona de estudio (noviembre)

### N-NH<sub>3</sub>

Los mapas siguientes muestran una distribución espacial similar en los 2 muestreos, en donde las mayores concentraciones se ubicaron en una dirección de Sureste a Noroeste, en donde se establece la presencia de una zona agrícola de cultivo permanente, con los canales de riego principales de la zona urbana de Zamora, Michoacán.

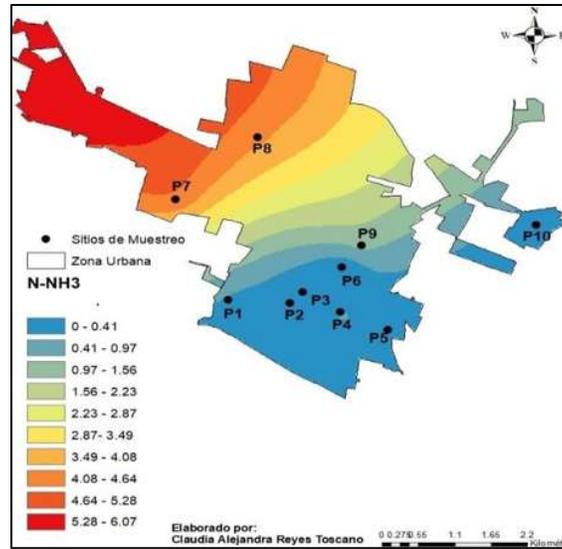


Fig. 86 Mapa de distribución espacial de  $N-NH_3$  en la zona de estudio (mayo)

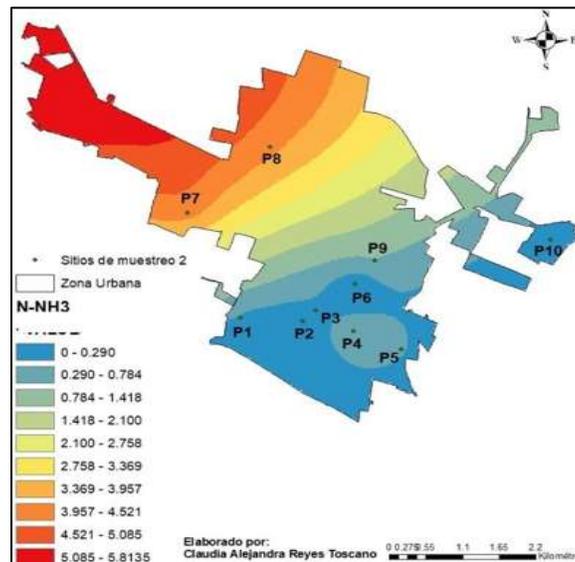


Fig. 87 Mapa de distribución espacial de  $N-NH_3$  en la zona de estudio (noviembre)

#### 9.2.4 Coliformes fecales

Las figuras 88 y 89 muestran la representación espacial a través de mapas en los que se observa cómo el rango del número de UFC/100 ml aumentó en la segunda campaña respecto a la primera. Además, es importante añadir que los pozos que presentaron la mayor cantidad de este tipo de microorganismos fueron los que se localizaron en puntos cercanos al Río Duero.

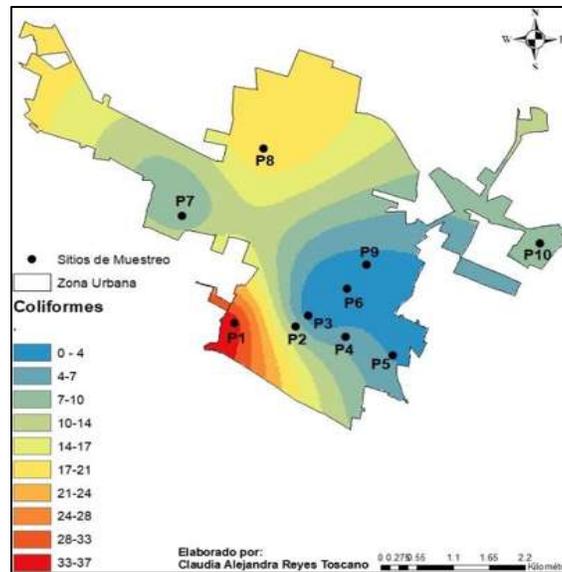


Fig. 88 Mapa de distribución espacial de Coliformes fecales en la zona de estudio (mayo)

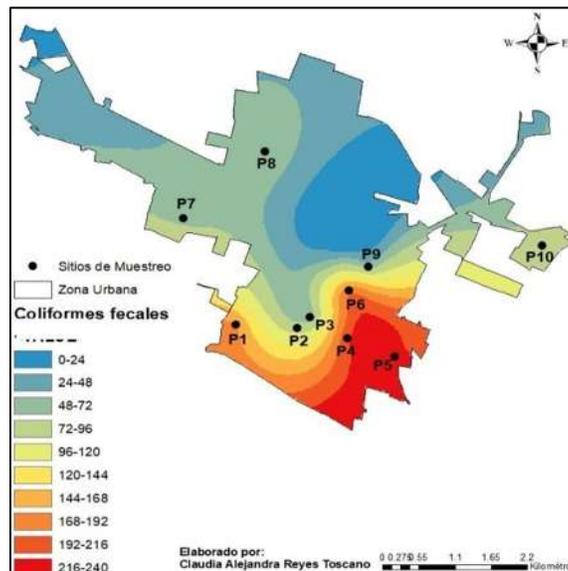


Fig. 89 Mapa de distribución espacial de Coliformes fecales en la zona de estudio (noviembre)

### 9.2.5 Elementos traza

#### As

Los mapas 90 y 91 muestran la distribución espacial del As en toda la zona urbana de Zamora, Michoacán, destacando que en las 2 campañas la mayor concentración de este elemento se presentó en la zona centro, mientras que la de menor concentración se estableció en la zona Noroeste de esta ciudad. En la mayoría de los sitios de estudio aumentó la concentración de este elemento traza en noviembre con respecto a mayo.

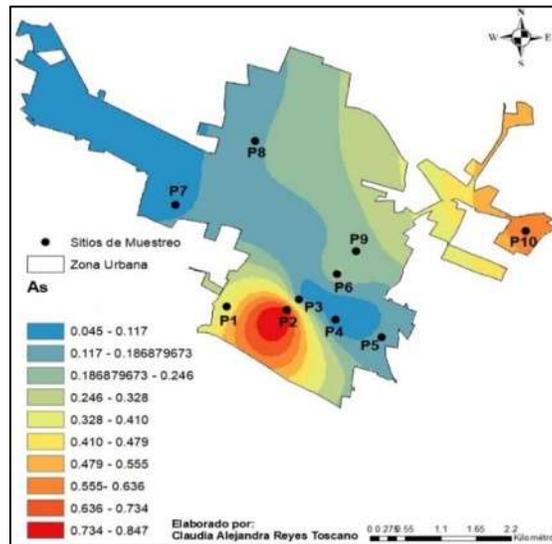


Fig. 90 Mapa de distribución espacial de As en la zona de estudio (mayo)

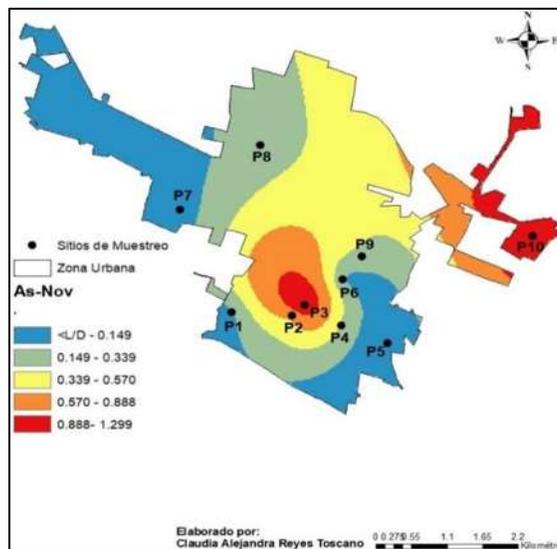


Fig. 91 Mapa de distribución espacial de As en la zona de estudio (noviembre)

## Fe

Los mapas de distribución espacial del Fe se presentan en las siguientes figuras, los cuales muestran que en la primera campaña la concentración menor se ubicó en la zona Sureste, incrementándose en dirección Noroeste de esta ciudad. Por otro lado, en la segunda campaña se visualizó la menor concentración en la zona central, con incrementos en la zona Noroeste y Sureste.

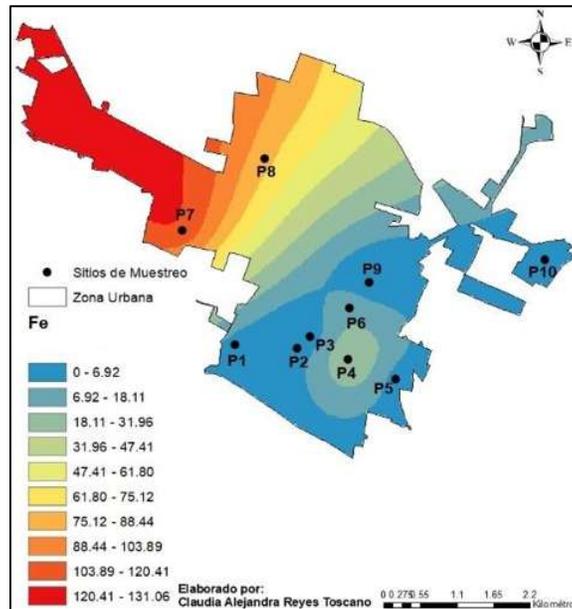


Fig. 92 Mapa de distribución espacial de Fe en la zona de estudio (mayo)

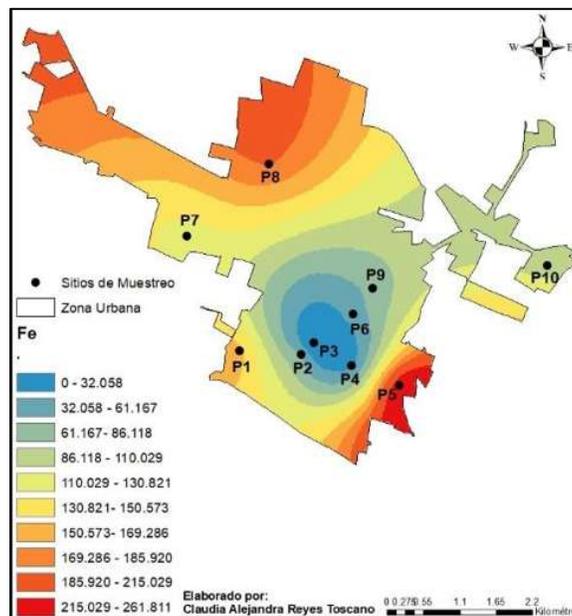


Fig. 93 Mapa de distribución espacial de Fe en la zona de estudio (noviembre)

## Mn

Este elemento traza se distribuyó espacialmente en la primera campaña desde la zona Noroeste en dirección a la zona Sureste, con una disminución en la zona central de esta localidad. En el segundo muestreo se observa que el Mn se mostró en menor concentración en la parte Noreste, mientras que la mayor, al igual que en la primera, en la parte Sureste.

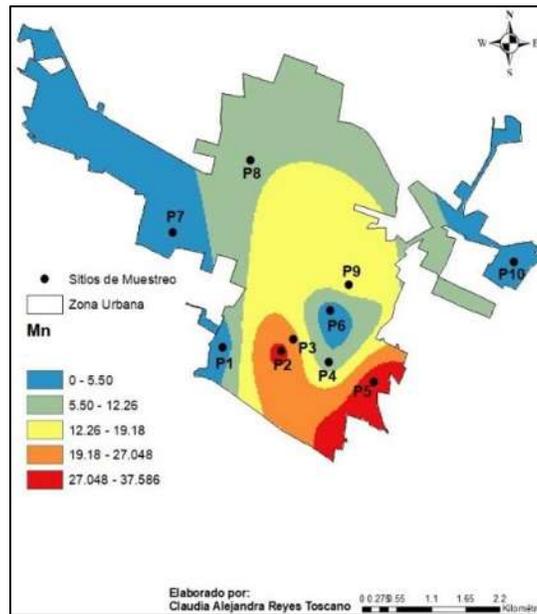


Fig. 94 Mapa de distribución espacial de Mn en la zona de estudio (mayo)

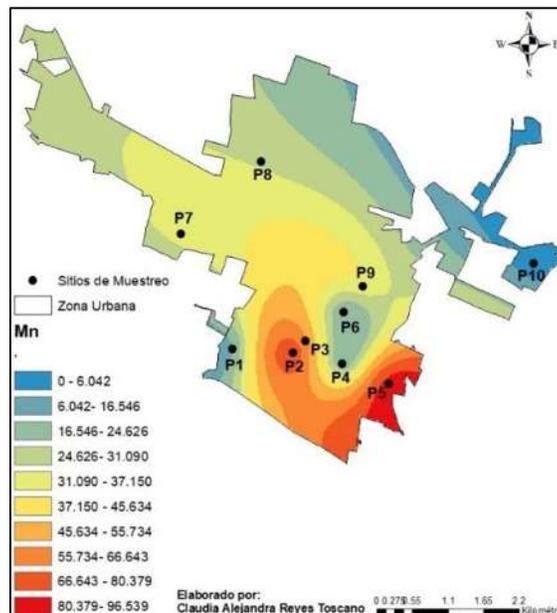


Fig. 95 Mapa de distribución espacial de Mn en la zona de estudio (noviembre)

### 9.3 Análisis hidrogeoquímico

#### 9.3.1 Diagrama de Piper

Este tipo de diagrama hidroquímico fue elaborado con ayuda del software AquaChem 2014.2. La figura 96, representa los tipos de agua para los 10 sitios de muestreo durante la campaña realizada en mayo-18, mientras que la figura 97 muestra los diferentes tipos de agua en los 10 sitios de muestreo durante la campaña de noviembre-18.

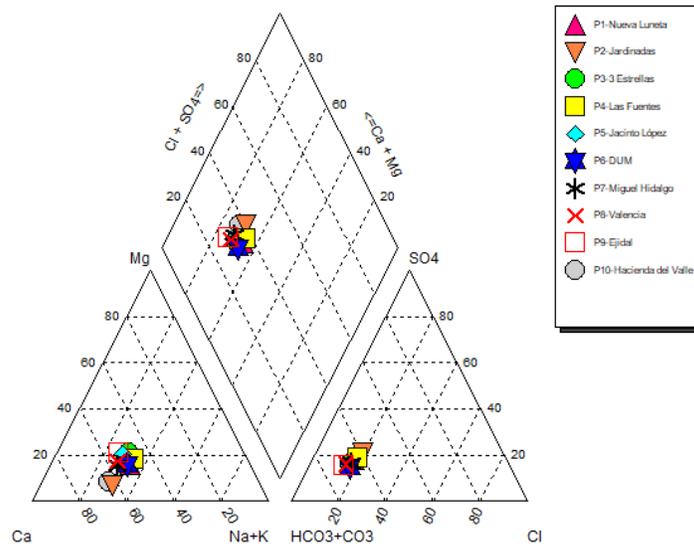


Fig. 96 Diagrama de Piper de la campaña mayo-18 en la zona de estudio

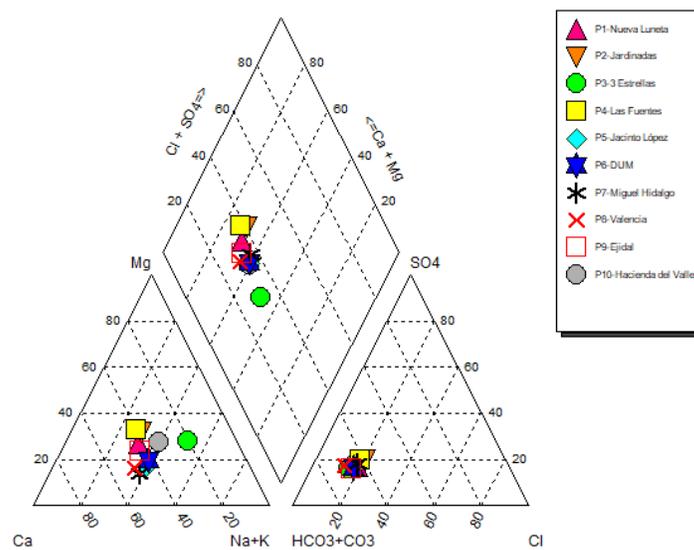


Fig. 97 Diagrama de Piper de la campaña noviembre-18 en la zona de estudio

El tipo de agua encontrado en la zona de estudio en los dos periodos (mayo-18 y noviembre-18) de muestreo fue la bicarbonatada cálcica y/o magnésica, con excepción del pozo 3, en el segundo muestreo (noviembre-18), el cual tuvo una facie bicarbonatada sódica. Esto significa que el tipo de agua encontrada en los primeros pozos es de baja mineralización, baja alcalinidad, y con un corto tiempo de permanencia en el acuífero. En el pozo 3 se presenta otro tipo de facie hidroquímica debido a la forma en la que se extrae continuamente el agua de este lugar, ya que existen 3 zonas de profundidad de los acuíferos, y los primeros son extraídos de la zona superior y el pozo P3 de la zona intermedia. Esto quiere decir que en una misma área puedan extraerse aguas de composición muy distintas, aunque la litología sea relativamente homogénea. Es decir, en los pozos P1, P2, P4, P5, P6, P7, P8, P9 y P10 se está extrayendo continuamente el agua para uso humano, por lo que el agua subterránea permanece poco tiempo en los acuíferos, mientras que en el pozo P3 la actividad del mismo es menor y su profundidad es mayor en comparación con la de los pozos colindantes.

Todo lo anterior se basa en una regla general, la cual establece que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente las bicarbonatadas, después predominan las sulfatadas, y las aguas con mayor tiempo en el acuífero son las cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chevotareb. En la composición catiónica la secuencia análoga sería:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y al final el  $\text{Na}^+$  (Custodio et al., 1996)

### 9.3.2 Diagrama de Stiff

Los diagramas de Stiff, presentados en las figuras 98 y 99 fueron elaborados con ayuda del software AquaChem 2014.2. En las 2 campañas de colecta, muestran una forma de punta de flecha, hacia el  $\text{Ca}^{2+}$ , lo que establece que todos los puntos de muestreo tienen un comportamiento regular para ser un agua de tipo natural, en este caso agua subterránea. Además, coincide con el diagrama de Piper, en que todos los sitios presentan una mayor concentración de cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y de aniones  $\text{HCO}_3^-$ .

En la primera campaña (mayo-18) se tiene un comportamiento constante en la mayoría de los pozos, en donde se denota una mayor concentración de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y de iones  $\text{HCO}_3^-$ , respecto a la segunda campaña (noviembre-18), en la que ya hay variaciones en los

comportamientos que presentan los diagramas de Stiff, debido a que los sitios P1-Nueva Luneta y P4-Las Fuentes fueron los únicos que presentaron una mayor concentración de iones  $\text{Na}^+$ , prevaleciendo la constante de que los aniones  $\text{HCO}_3^-$  se mantienen en todas las muestras en mayor proporción. Este diagrama complementa lo establecido en el diagrama de Piper, con respecto al tipo de facie hidroquímica presente en este acuífero.

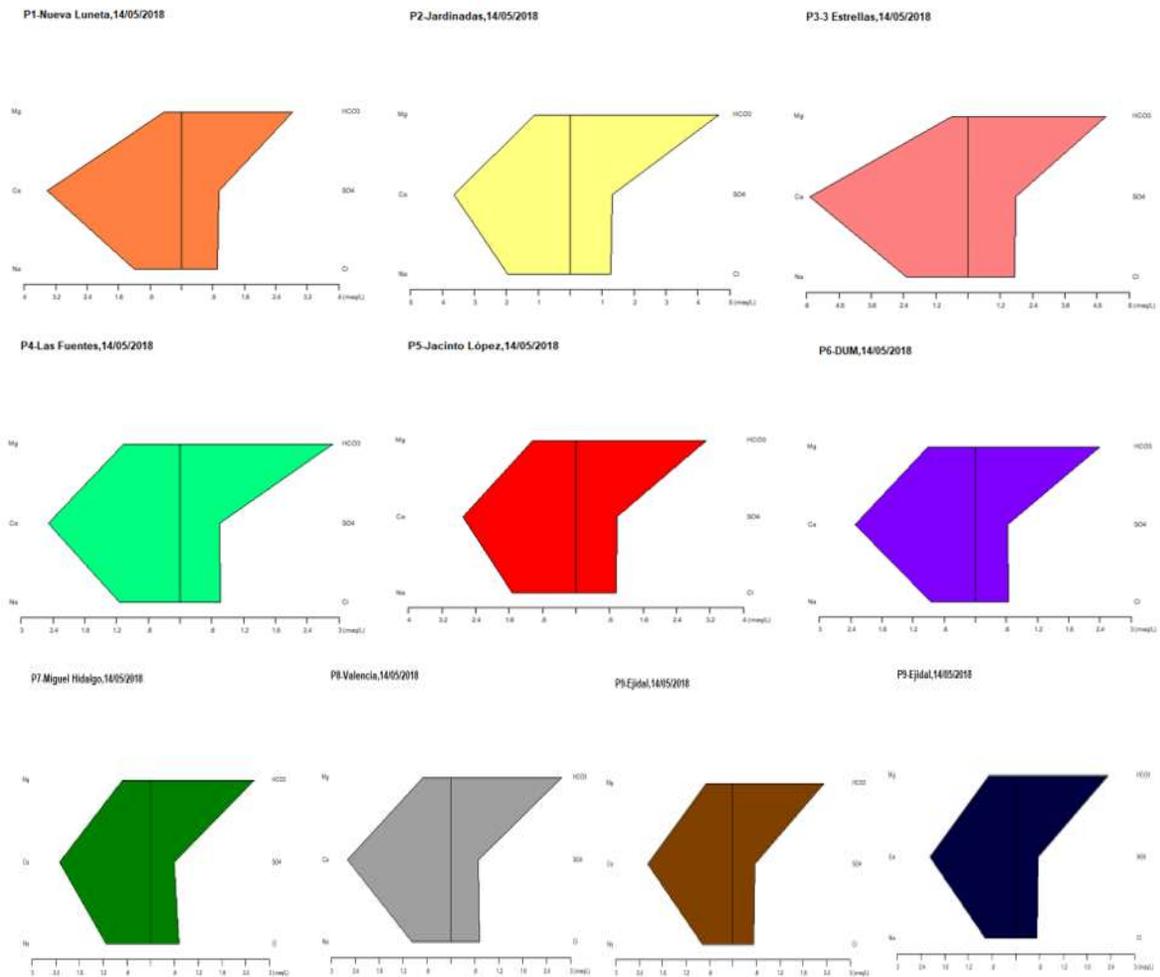


Fig. 98 Diagrama de Stiff de la campaña de mayo-18 en la zona de estudio

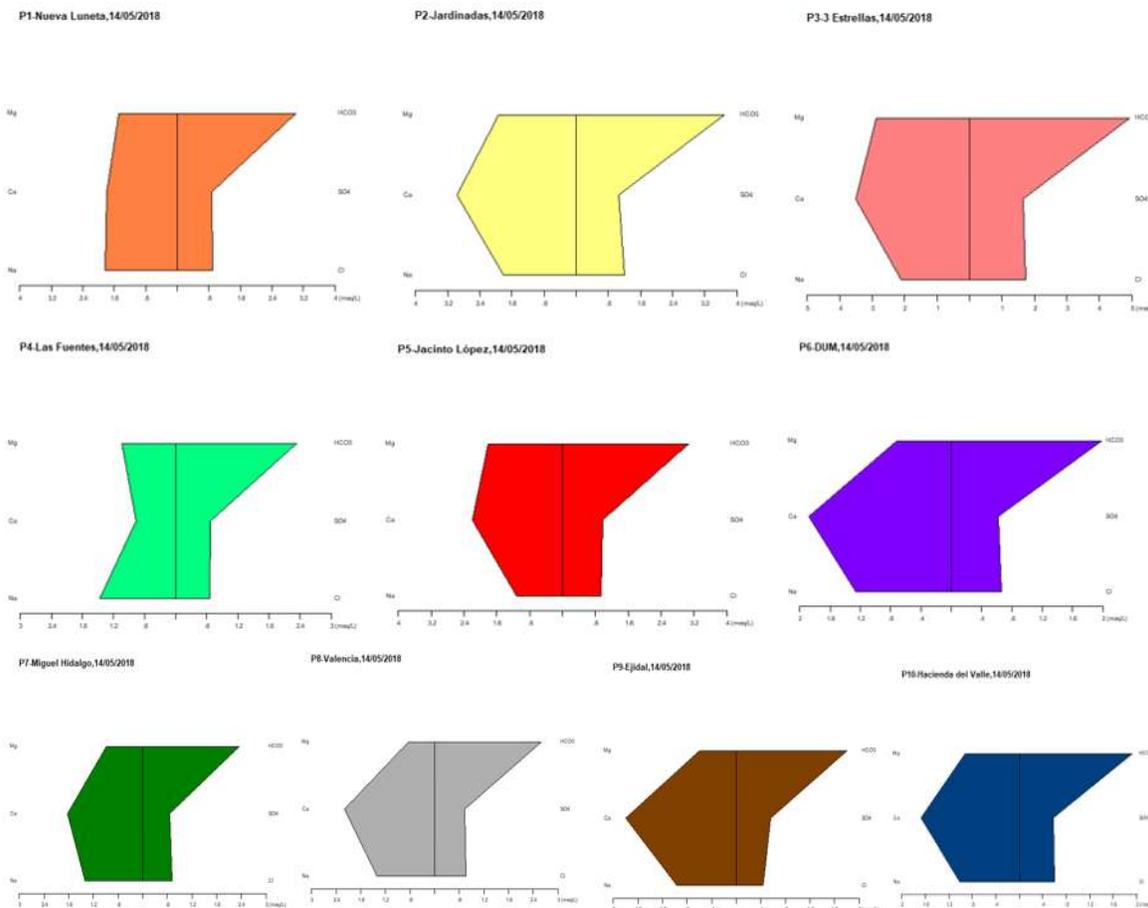


Fig. 99 Diagrama de Stiff para la campaña noviembre-18 en la zona de estudio

### 9.3.3 Otros diagramas hidrogeoquímicos

Los diagramas hidrogeoquímicos presentados a continuación se elaboraron con ayuda del programa AquaChem 2014.2.

#### Diagrama Durov

La figura 100 muestra el diagrama Durov, el cual establece la correlación que existe entre diversos parámetros hidroquímicos en la campaña de mayo como, por ejemplo: los cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), aniones ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ), pH y conductividad eléctrica. En esta colecta se puede apreciar que la mayoría de los sitios tiene una conductividad entre 400 y 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que en el pH tomado en campo se puede visualizar diferentes cantidades

de este parámetro. Además, sitios como P3-3 Estrellas y P4-Las Fuentes presentan conductividades y pH similares entre sí, esto se debe principalmente a la ubicación de los mismos, ya que éstos se encuentran localizados al sureste de la localidad de Zamora. Lo mismo sucede con los sitios P8-Valencia y P9-Ejidal, los cuales presentaron conductividades y pH similares.

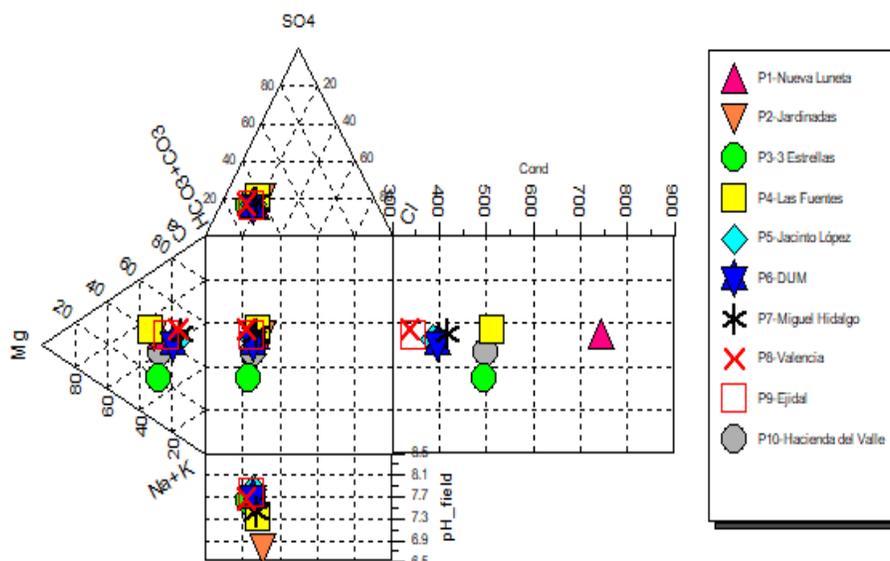


Fig. 100 Diagrama Durov para primera campaña de colectas (mayo-18)

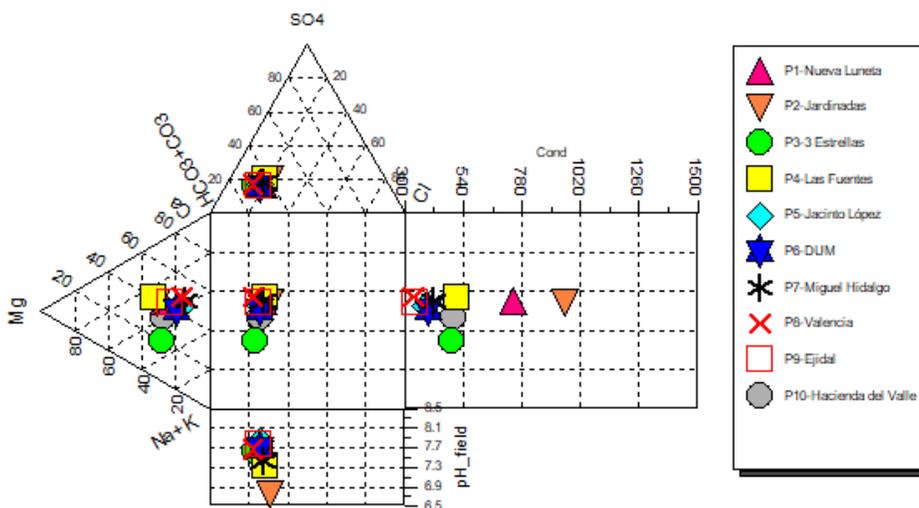


Fig. 101 Diagrama Durov para segunda campaña de colectas (noviembre-18)

La figura 101 muestra el diagrama Durov, de la campaña de noviembre. En esta colecta se puede apreciar que la mayoría de los sitios tiene una conductividad entre 300 y 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que en el pH tomado en campo se pudo visualizar diferentes cantidades de este parámetro. En este muestreo, el sitio P2-Jardinadas presentó la mayor conductividad eléctrica y el menor pH. Además, sitios como P3-3 Estrellas y P4-Las Fuentes coinciden con la campaña anterior en presentar conductividades y pH similares entre sí, y con los iones mayoritarios previamente establecidos en los diagramas triangulares. Lo mismo sucede con los sitios P8-Valencia y P9-Ejidal, los cuales presentaron conductividades y pH parecidos, comprobando lo establecido en la campaña del mes de mayo.

### **Diagrama Giggenbach**

Las figuras 102 y 103 muestran la posición de los sitios de muestreo en el diagrama triangular Giggenbach, específicamente con los cationes mayoritarios en sus vértices. En este esquema se aprecia que todas las muestras, en las 2 campañas, de mayo y noviembre se localizaron en la zona de aguas inmaduras, una de las propiedades principales de las aguas subterráneas frías, como las que se analizaron para este trabajo de investigación. Este tipo de aguas se caracterizan por no haber llegado al equilibrio. Según Giggenbach (1988) las aguas inmaduras son inadecuadas para la evaluación de las temperaturas de equilibrio. Este resultado confirma que la composición química de las aguas subterráneas está controlada principalmente por la disolución isoquímica de las rocas.

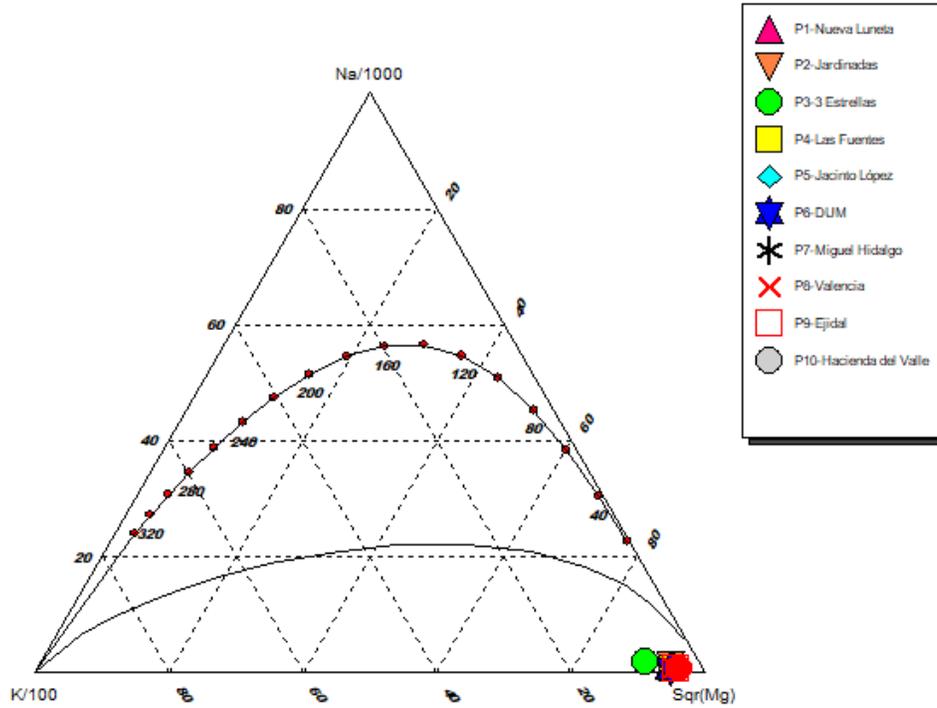


Fig. 102 Diagrama Giggenbach de la campaña mayo-18

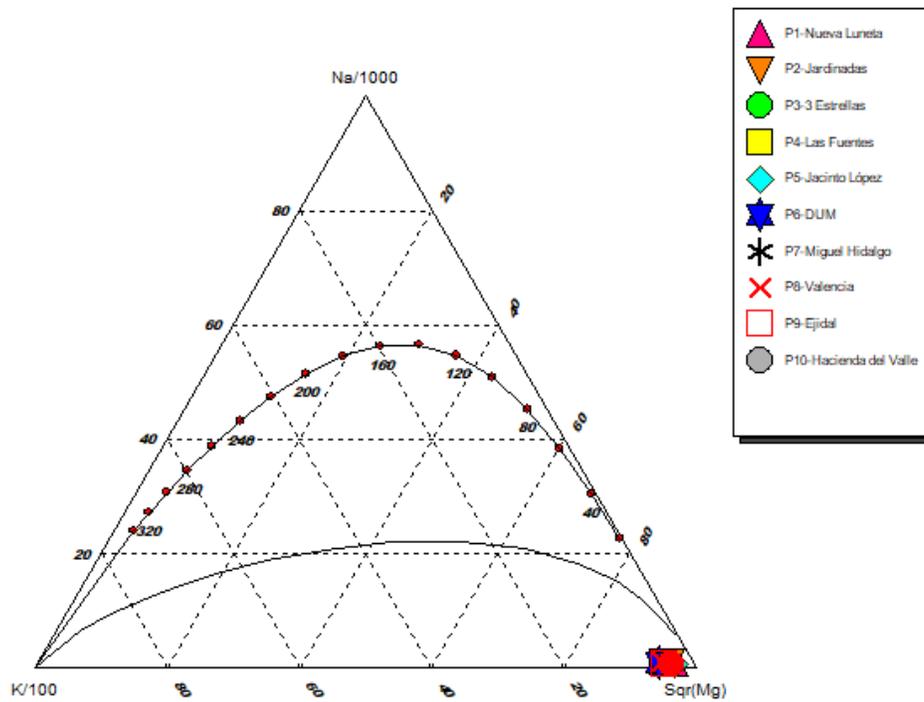


Fig. 103 Diagrama Giggenbach de la campaña noviembre-18

### Diagrama Scholler

Este diagrama es una representación de los 6 iones mayoritarios en meq/L, que plasma el comportamiento de los mismos en los 10 pozos de muestreo de esta investigación. Este esquema tiene la característica de ser de fácil visualización para encontrar características típicas de los sitios de estudio con respecto a sus concentraciones de iones mayoritarios.

En la campaña del mes de mayo se puede observar que los sitios P2-Jardinadas y P8-Valencia tuvieron un comportamiento diferente en comparación con los otros 8 sitios restantes, es decir, la tendencia de los meq/L de estos sitios es muy similar en todos sus componentes mayoritarios, destacando que los iones  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Ca}^{2+}$  fueron los que presentaron las mayores concentraciones, mientras que el anión  $\text{SO}_4^{2-}$  mostró las mínimas concentraciones en la mayoría de los sitios estudiados.

Para la segunda campaña (noviembre-18), la tendencia del comportamiento que aparece en la figura\_ muestra que fue ligeramente parecida en la mayoría de los sitios, con excepción del pozo P3-3 Estrellas. Además, se coincide con el primer muestreo en que la mayor concentración de aniones la tuvo el  $\text{HCO}_3^-$  y de cationes el  $\text{Ca}^{2+}$ .

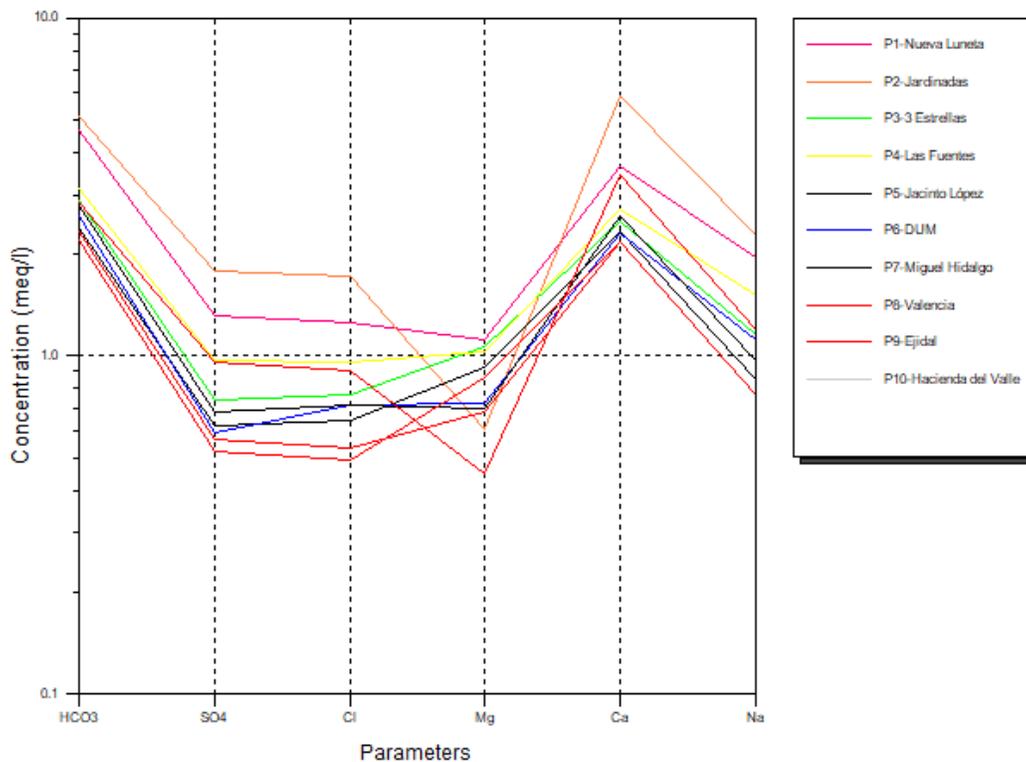


Fig. 104 Diagrama Schoeller de la campaña mayo-18

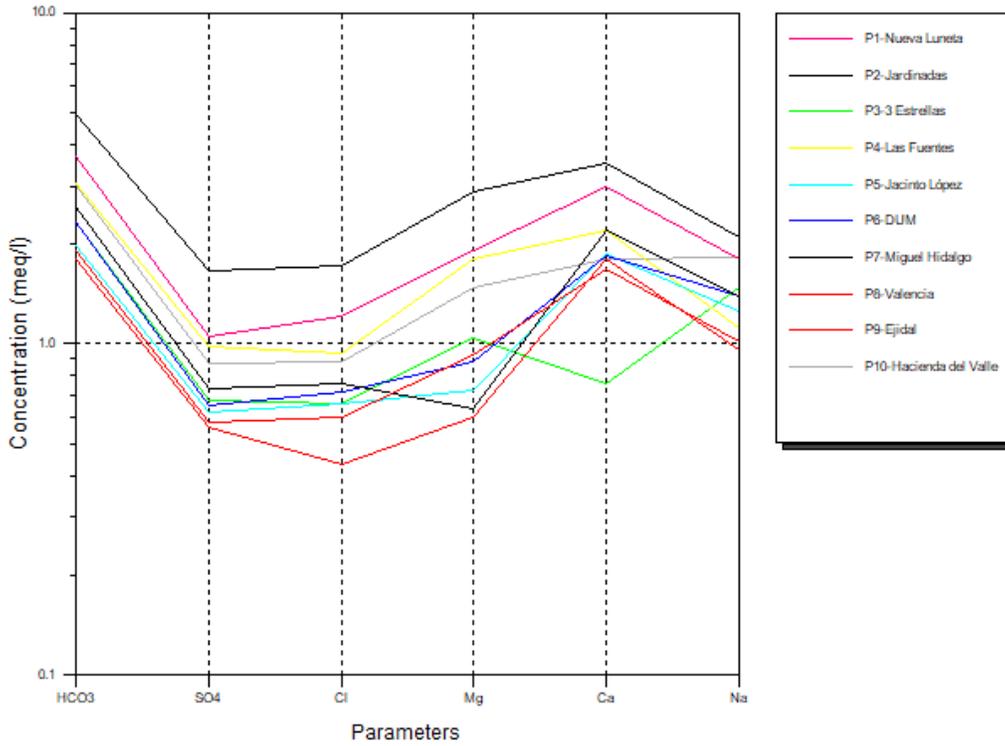


Fig. 105 Diagrama Schoeller de la campaña noviembre-18

### Diagrama de Gibbs

En los diagramas de Gibbs presentados anteriormente se observa que todas las muestras en las 2 campañas entran dentro de la categoría de dominio de roca, es decir, que el mecanismo controlador de la química en las aguas subterráneas se refiere a un intemperismo tanto para aniones como para cationes en la zona de estudio, donde la interacción agua-roca se está llevando a cabo.

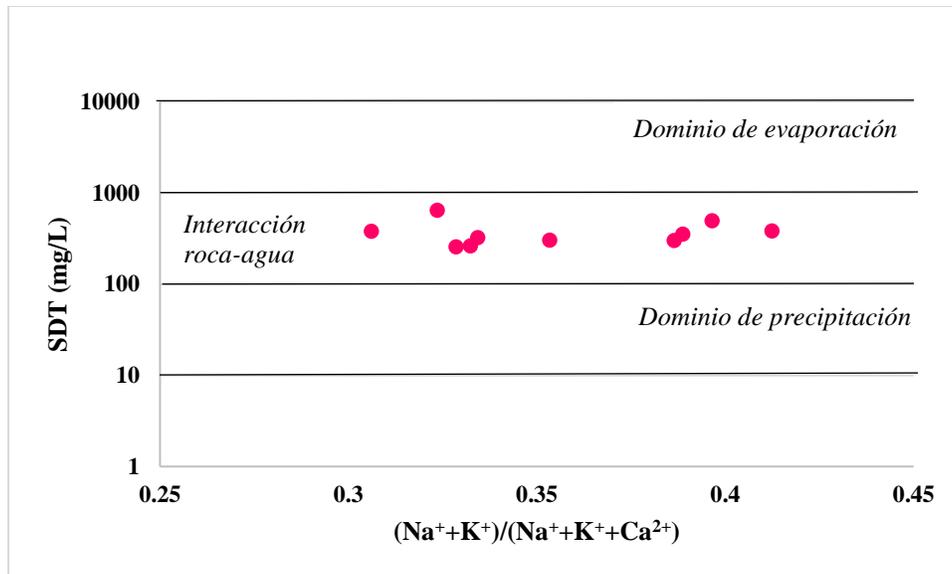


Fig. 106 Diagrama de Gibbs (Cationes)

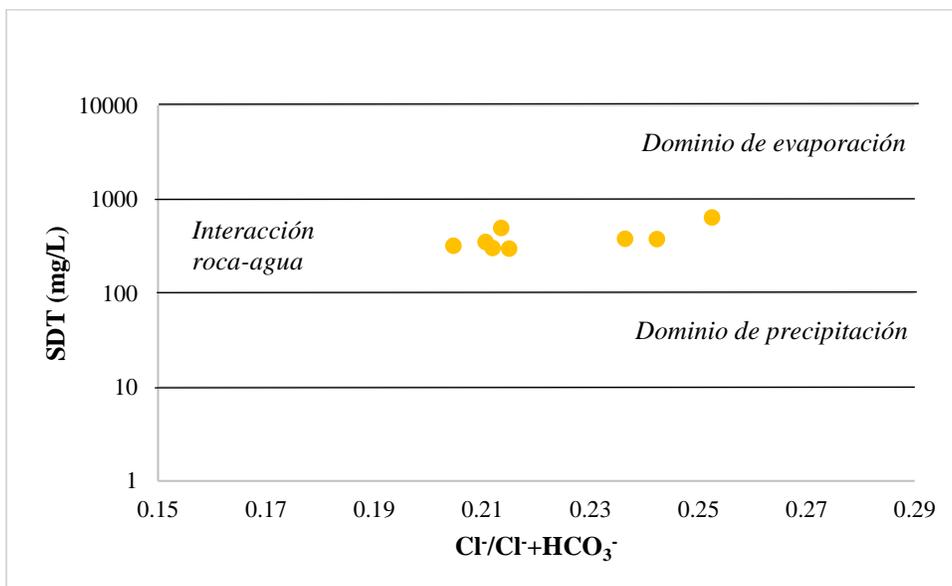


Fig. 107 Diagrama de Gibbs (Aniones)

### 9.3.4 Relaciones hidrogeoquímicas

**rNa<sup>+</sup>/rCl<sup>-</sup>:** La gráfica que se muestra a continuación refleja que todos los sitios de estudio tienen este tipo de relación con un valor mayor a 1, el cual puede ser interpretado como un exceso de sodio producto de la meteorización de silicatos (San Juan, 2015), o como un proceso de intercambio iónico que se está llevando a cabo. Además, al realizarse una disolución de silicatos, la cual es una fuente probable de sodio, que se relaciona directamente con la abundancia del ion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, como se expresa anteriormente en el diagrama de Piper.

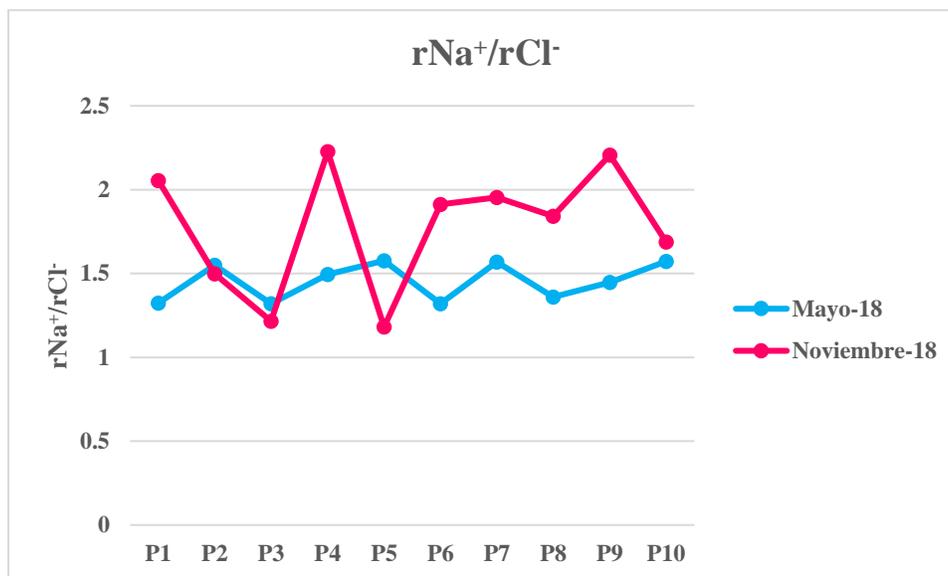


Fig. 108 Representación gráfica de la relación Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> en los sitios de estudio

**rNa<sup>+</sup>/rK<sup>+</sup>:** Esta relación se representa en la figura 109, la cual se muestra por encima de 1, típico de un agua subterránea. Además, se establece una relación de este índice con la temperatura, debido a que los sitios P1-Nueva Luneta y P2-Jardinadas mostraron las temperaturas más bajas y las relaciones de este tipo más altas en los 2 muestreos a consecuencia de los procesos de intercambio iónico, así como del tipo de minerales estables a esa temperatura, en este caso los basaltos. Es importante señalar que ésta también depende de la alcalinidad debido a la composición química de la roca, es decir, a medida en que va aumentando la alcalinidad, este índice también lo hace.

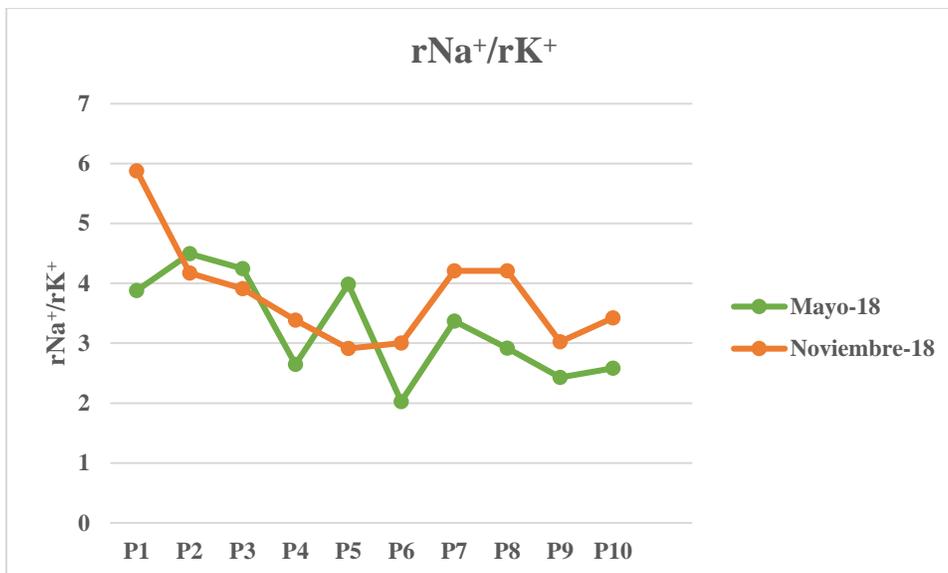


Fig. 109 Representación gráfica de la relación Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> en los sitios de estudio

**rMg<sup>2+</sup>/rCl<sup>-</sup>:** El índice rMg<sup>2+</sup>/rCl<sup>-</sup> representado en la figura 110 muestra 2 grupos importantes, el primero está conformado por todos los sitios cuya relación se encontró por debajo de 1, mientras que el segundo grupo lo integran los sitios en los que su relación se mantuvo por encima de 1. Este último grupo resalta el efecto del proceso de interacción agua-roca, lo que indica una mayor aportación de Mg<sup>2+</sup> al agua como consecuencia de la alteración de silicatos magnésicos presentes en este tipo de roca. En el primer grupo se establece que sí hay interacción agua-roca, pero la aportación de Mg<sup>2+</sup> es menor en comparación con los Cl<sup>-</sup>. Además, el primer muestreo fue el que mostró la menor aportación de Mg<sup>2+</sup> al agua debido a la mineralización causada por las mayores concentraciones del catión Ca<sup>2+</sup>, debido a que los sitios P1-Nueva Luneta, P2-Jardinadas y P3-3 Estrellas fueron los pozos que presentaron la mayor concentración de Ca<sup>2+</sup> y la menor concentración de Mg<sup>2+</sup> en la época de estiaje.

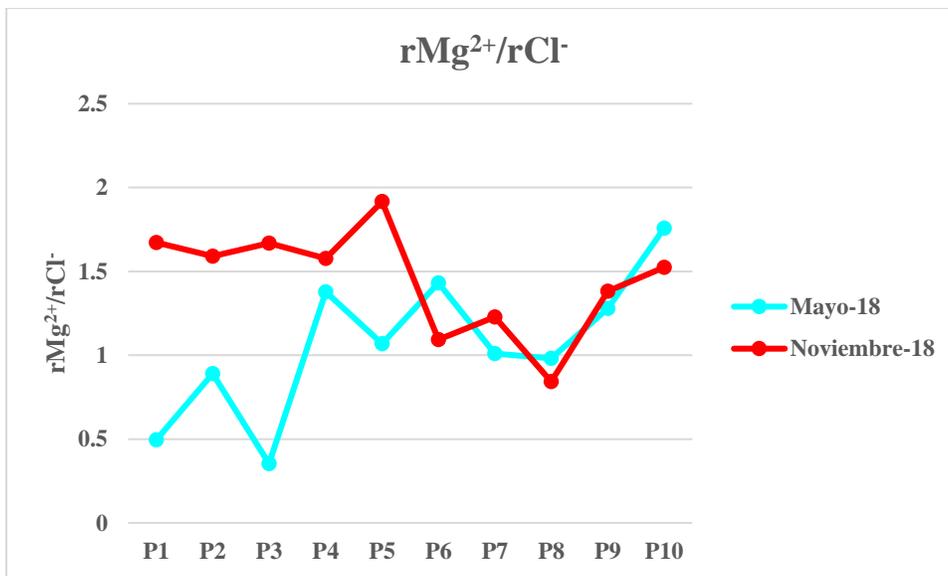


Fig. 110 Representación gráfica de la relación  $Mg^{2+}/Cl^{-}$  en los sitios de estudio

**$rCa^{2+}/rMg^{2+}$ :** Esta relación representada en la figura 111 muestra que todos los sitios de estudio presentaron una relación  $rCa^{2+}/rMg^{2+}$  mayor a 1 o muy cercana, por lo que se indica que existe la presencia del tipo de roca llamado calcita, la cual está influyendo en el aporte de iones  $Ca^{2+}$  al agua subterránea.

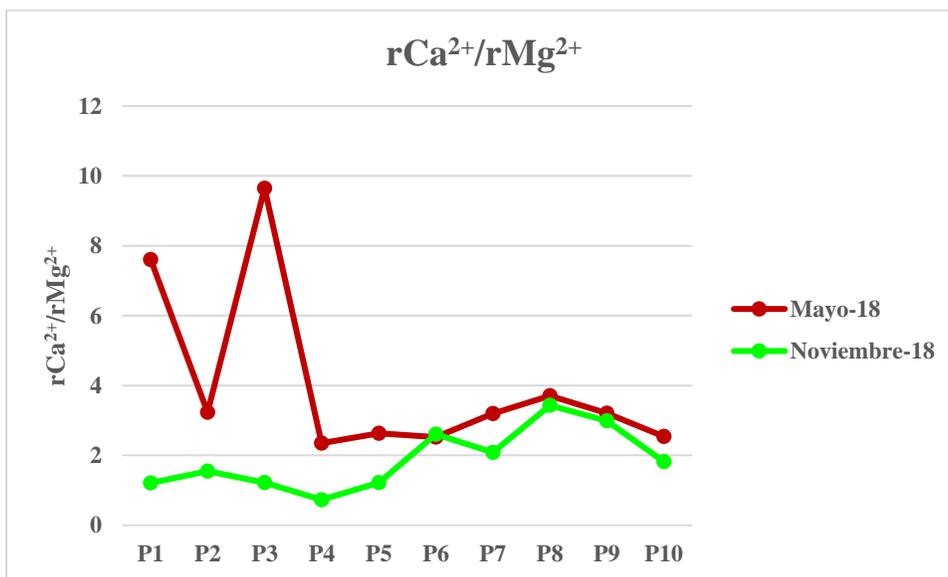


Fig. 111 Representación gráfica de la relación  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  en los sitios de estudio

**$rCa^{2+}/rSO_4^{2-}$ :** En la zona de estudio se obtuvieron valores de esta relación en un rango de 2.249 a 3.555, con un promedio de 3.031 lo que establece un proceso de meteorización de minerales de  $Ca^{2+}$  provenientes de las rocas del acuífero, con excepción del yeso, debido a la sobreexplotación de estos reservorios.

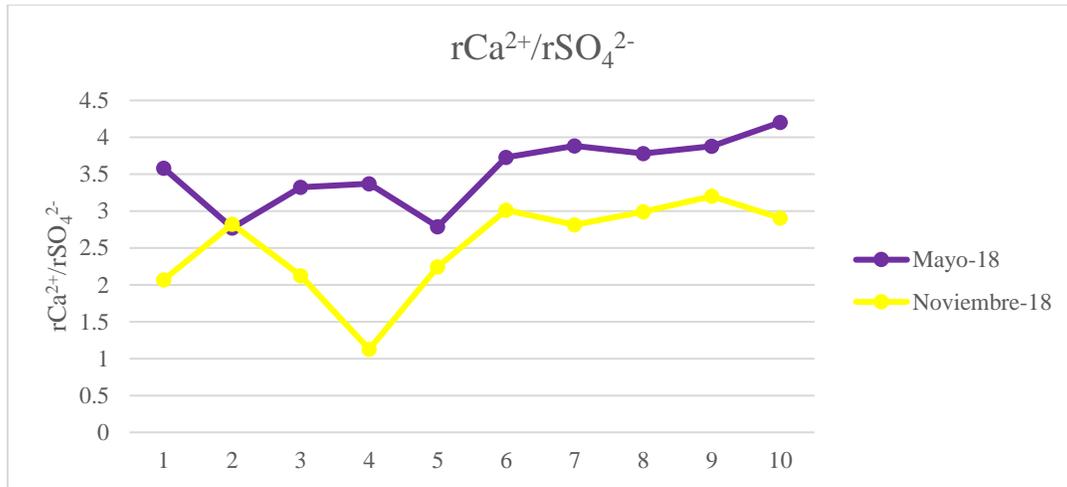


Fig. 112 Representación gráfica de la relación  $Ca^{2+}/SO_4^{2-}$  en los sitios de estudio

**$rHCO_3^-/rCl^-$ :** En la zona de estudio se reportaron valores en un rango de 2.903 a 4.260, lo que quiere decir que todas las aguas analizadas son aguas frías, y que presentan una trayectoria corta y rápida, ya que éstas no permanecen mucho tiempo en el acuífero.

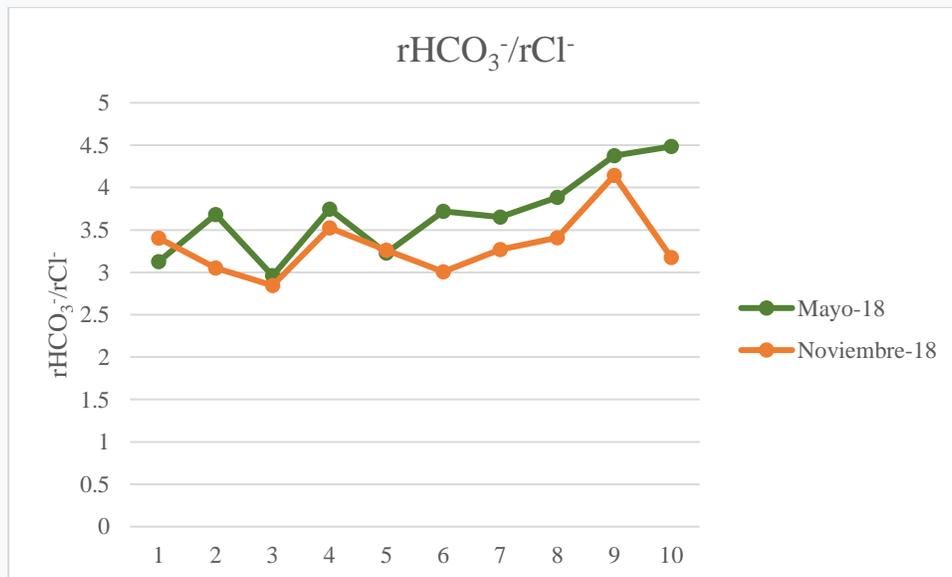


Fig. 113 Representación gráfica de la relación  $HCO_3^-/Cl^-$  en los sitios de estudio

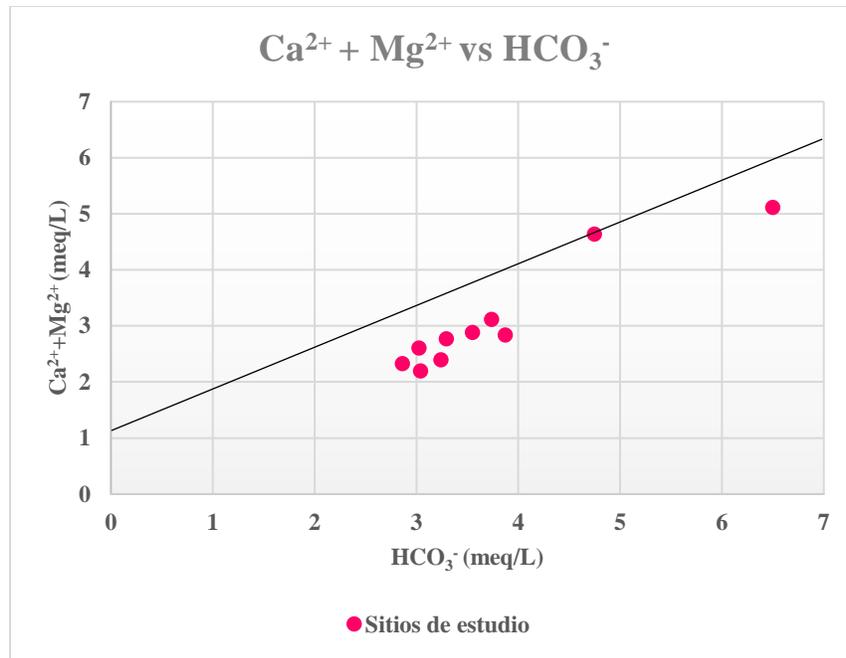


Fig. 114 Diagrama hidrogeoquímico binario  $Ca^{2+}+Mg^{2+}/HCO_3^-$

La gráfica mostrada en la figura 112 muestra que el 100% de las muestras analizadas se ubican por debajo de la pendiente 1:1, esto indica la deficiencia del  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  con respecto al  $HCO_3^-$ , por lo que se confirma que el  $HCO_3^-$  también proviene de procesos distintos a la disolución de la calcita o la dolomita, en este caso, y como lo establece las relaciones iónicas, es suministrado por la intemperización de los silicatos.

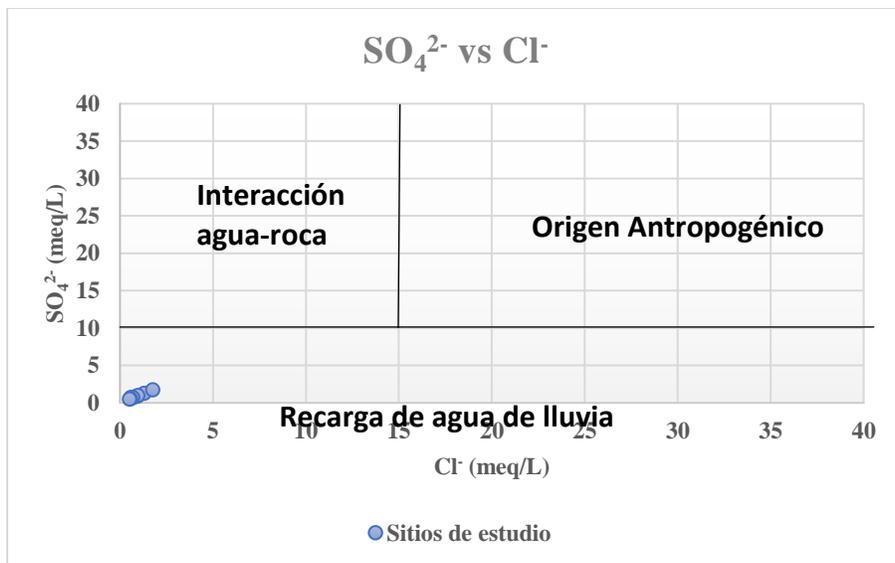


Fig. 115 Diagrama hidrogeoquímico binario  $SO_4^{2-}/Cl^-$

El diagrama presentado en la figura 115, establece que todas las muestras adquieren el anión sulfatos a consecuencia de la aportación de agua de lluvia, ya que, debido a la composición de la roca de la zona, no existe interacción entre el  $SO_4^{2-}$  y el  $Cl^-$ , y menos existe contaminación de origen antropogénico, ya que las concentraciones que se manejan en los sitios de estudios son relativamente bajas.

### 9.3.5 Intercambio iónico

Schoeller en 1977 estableció un índice para identificar los procesos de intercambio iónico entre el agua subterránea y sus alrededores durante la residencia o viaje en el acuífero. El CAI positivo indica el intercambio de  $Na^+$  y  $K^+$  del agua con  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  (Mahmoudi et al., 2017) de las rocas, y el negativo indica que hay un intercambio de  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  del agua con  $Na^+$  y  $K^+$  de las rocas (Abadi Berhe et al., 2017). En la zona de estudio se encontró en todos los pozos de muestreo un índice de cloro alcalino negativo, lo que indica el intercambio iónico directo de  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  del agua con  $Na^+$  y  $K^+$  de las rocas, debido a que no es una

zona de intrusión salina, si no hubiera sido el otro caso, y además se considera que son aguas jóvenes que han permanecido poco tiempo en el acuífero.

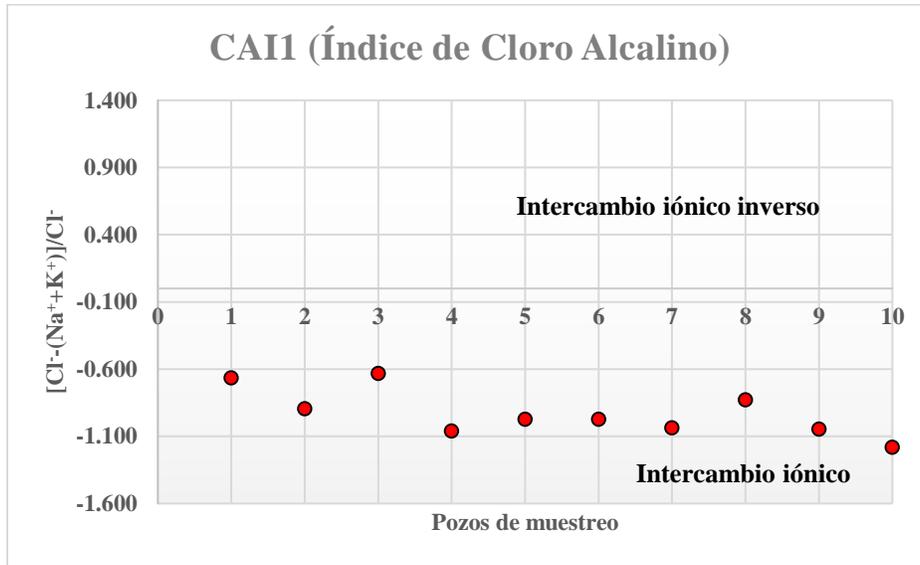


Fig. 116 Índice Cloro Alcalino 1

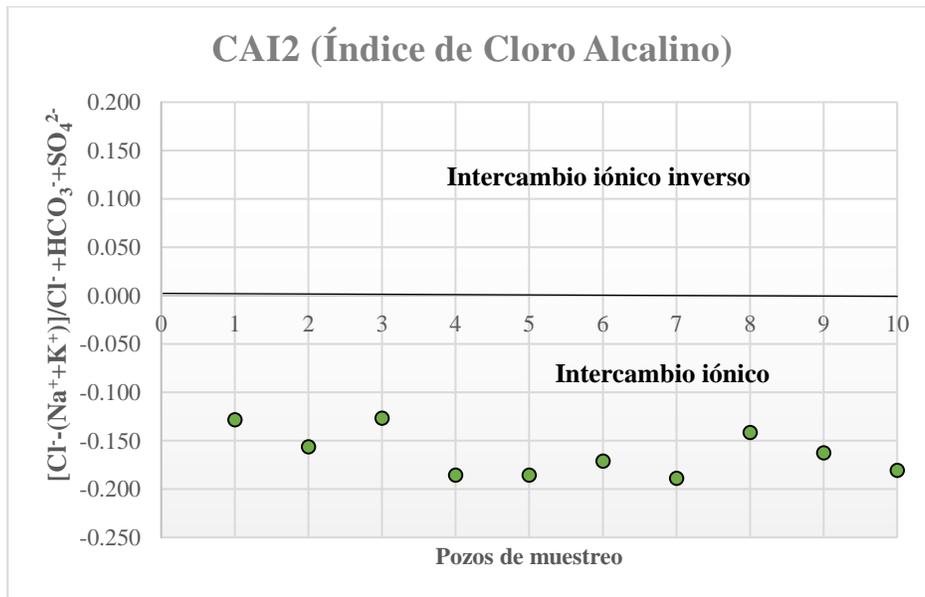


Fig. 117 Índice Cloro Alcalino 2

#### 9.4 Índice de Calidad del Agua Subterránea

Los indicadores de calidad del agua son parámetros que proporcionan información del estado de calidad de las aguas que se está estudiando, los cuales son fáciles de interpretar y capaces de mostrar los cambios en el ambiente y las actividades humanas relacionadas, además, proporcionan una base para las comparaciones aplicables a escala nacional e internacional.

Los ICAs generalmente son diseñados para atender problemáticas ambientales de cada región, aunque muchos países adoptan metodologías ajenas para implementarlas en sus territorios.

El diseño adecuado de un ICA debe incorporar los límites permisibles y descritos por la norma, los criterios para los usos específicos del agua y el potencial uso del recurso. También debe integrar un número reducido de parámetros pero que sean de gran importancia o los que el científico considere importantes para llevar a cabo su propia investigación.

El método que se utiliza en esta investigación es el “Método del Promedio Aritmético Ponderado”, el cual tiene diversas ventajas en comparación con los otros ICA, destacando: que es un método simple y conciso, ya que los pasos para desarrollarlo son muy sencillos y de fácil entendimiento, es un método que incluye los límites máximos permisibles por cualquier tipo de normatividad, ya sea nacional (NOM-127-SSA1-11994) o internacional (OMS, USEPA), proporciona un resumen general de los datos previamente obtenidos y se puede adaptar a las necesidades del tipo de estudio que se esté llevando a cabo. Sin embargo, tiene ciertas limitaciones, entre las cuales destacan: que no proporcionan información completa sobre la calidad del agua de la zona de estudio, no se pueden evaluar todos los riesgos que se encuentran presentes en el agua, la ponderación que se requiere para cada parámetro de acuerdo a su importancia llega a ser subjetiva y a criterio de quien lo está implementando, por lo que algunos científicos tienden a rechazar y criticar este tipo de métodos como una herramienta de gestión del recurso hídrico (Tambo, 2015)t.

El resultado del ICA en la zona de estudio oscila entre el rango que va desde 31.13 hasta los 73.40 en la colecta del mes de mayo, (Tabla 9) lo que significa que en esta zona se manifiestan 2 tipos de calidad del agua, excelente y buena calidad. El sitio que presenta una calidad excelente, por encima de los demás pozos es P10-Hacienda del Valle y el sitio P9-Valencia,

presenta la más baja calidad de los 10 pozos estudiados en la colecta del mes de mayo. No obstante, los únicos sitios que presentan una calidad de tipo buena, por debajo de la excelente son: P3-3 Estrellas, P7-Miguel Hidalgo y P8-Valencia.

En la segunda colecta (noviembre) se manifiestan también 2 tipos de calidad del agua (Tabla 10), excelente y buena calidad, que van desde 29.83 hasta 71.48. El sitio que presenta una calidad excelente por encima de los demás sitios es el P10-Hacienda del Valle y la de menor calidad es P8-Valencia. Es importante señalar que los únicos 3 sitios P3-3 Estrellas, P7-Miguel Hidalgo y P8-Valencia reportan una calidad del agua subterránea como buena, coincidiendo con la que se presenta en la primera campaña (mayo).

Tabla 10 Valor del ICA en la zona de estudio (mayo)

Sitio de muestreo	Valor del ICA	Calidad del Agua
P1-Nueva Luneta	39.16	Excelente
P2-Jardinadas	46.86	Excelente
P3-3 Estrellas	59.99	Buena Calidad
P4-Las Fuentes	41.86	Excelente
P5-Jacinto López	41.50	Excelente
P6-DUM	35.03	Excelente
P7-Miguel Hidalgo	72.12	Buena Calidad
P8-Valencia	73.40	Buena Calidad
P9-Ejidal	37.56	Excelente
P10-Hacienda del Valle	31.13	Excelente

Tabla 11 Valor del ICA en la zona de estudio (noviembre)

Sitio de muestreo	Valor del ICA	Calidad del Agua
P1-Nueva Luneta	37.42	Excelente
P2-Jardinadas	45.08	Excelente
P3-3 Estrellas	58.06	Buena Calidad
P4-Las Fuentes	35.84	Excelente
P5-Jacinto López	40.52	Excelente
P6-DUM	32.10	Excelente
P7-Miguel Hidalgo	70.59	Buena Calidad
P8-Valencia	71.48	Buena Calidad
P9-Ejidal	34.77	Excelente
P10-Hacienda del Valle	29.83	Excelente

## 10. CONCLUSIONES

- Este estudio permite conocer la hidrogeoquímica y calidad del agua del área de estudio, así como la movilidad y la disponibilidad de especies tóxicas, el cual será de gran utilidad para la población de la localidad debido a que no se cuenta con un estudio publicado de este tema.
- Las concentraciones de los elementos traza analizados no rebasan los límites establecidos por los estándares mexicanos ni internacionales.
- El pH encontrado tuvo una ligera tendencia alcalina, el cual es típico de las aguas subterráneas, debido a que se manifiesta una alta estabilidad química.
- Únicamente en 3 sitios de estudio el nitrógeno amoniacal sobrepasa los límites máximos permisibles por la normatividad mexicana, en dirección hacia la zona norte de esta zona urbana, debido principalmente a la incorporación de materia orgánica fresca, además de ser una zona altamente agrícola, la incorporación e infiltración de nitrógeno al agua es constante, ya que en las 2 campañas de colectas se presentó este fenómeno en los mismos 3 sitios de estudio.
- En los cationes, la mayor concentración la tuvo el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , con respecto al  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . En los aniones, quien tuvo la mayor concentración en todos los sitios de estudio fue el  $\text{HCO}_3^-$ , seguido del  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ .
- En la campaña de colectas de mayo se observaron las concentraciones más elevadas de los iones mayoritarios, esto a consecuencia de la mineralización proveniente de la roca y a la disminución de la cantidad del agua que se encuentra en los acuíferos.
- El sitio P3-3 Estrellas fue el pozo que presentó las mayores concentraciones en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos analizados.
- El sitio P5-Jacinto López manifestó las mayores concentraciones de elementos traza en el mes de noviembre.
- Respecto a la especiación química para el As, Fe y Mn, se aprecia que no son especies químicas tóxicas para la población que utiliza esta agua como potable en la zona de estudio.
- El As se encuentra en estado de oxidación (V), el Fe en (III) y el Mn en (II).

- Con la construcción del diagrama de Piper se establece que el tipo de agua en los 10 sitios de estudio de la zona urbana de Zamora, Michoacán es Bicarbonatada cálcica ( $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ ), lo que significa que todas estas aguas subterráneas provienen de un mismo acuífero. Además, es importante señalar que al encontrar a los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  indica que las aguas son de reciente infiltración, por lo tanto, este acuífero que abastece a los pozos, actualmente sufre un proceso de sobreexplotación.
- Otros diagramas hidrogeoquímicos presentados en esta investigación muestran el comportamiento y las características de las aguas subterráneas en el acuífero.
- El diagrama de Giggenbach establece que las aguas de la zona son jóvenes o inmaduras, lo que indica que no han llegado al equilibrio por permanecer poco tiempo en el acuífero.
- Por otro lado, el diagrama de Gibbs explica el proceso químico que llevan a cabo las aguas subterráneas al estar en contacto el agua con la roca, destacando que, en esta área de estudio, las aguas están realizando un proceso de meteorización o de interacción agua-roca.
- Otra herramienta muy útil utilizada en este estudio fueron las relaciones hidrogeoquímicas, las cuales sirven para determinar el origen de las aguas subterráneas, junto con sus las reacciones fisicoquímicas. Estas proporciones concluyen que las aguas están llevando a cabo un proceso de meteorización de los silicatos y de interacción agua-roca.
- Además, se comprueba que se realiza un proceso de intercambio iónico directo en el que hay un intercambio de  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  del agua con  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  de las rocas, por eso existe una concentración mayor de  $\text{Ca}^{2+}$  y menor del  $\text{Na}^+$  en el agua de estudio, por el proceso de dilución.
- En conclusión, se determina que la calidad del agua subterránea de la zona urbana de Zamora, Michoacán es apta para uso y consumo humano, según lo que establecen los estándares mexicanos, únicamente se recomienda tener en cuenta la sobreexplotación del acuífero que se está llevando a cabo y el cuidado con el uso de fertilizantes en las zonas agrícolas para disminuir la concentración de nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ).

## 11. RECOMEDACIONES

- Es necesario continuar con el monitoreo de los sitios analizados y de ser posible incluir todos los pozos que abastecen a esta zona urbana.
- Continuar con el análisis de parámetros fisicoquímicos, elementos traza y bacteriológicos, como lo establece la normatividad mexicana o al menos 2 veces por año, uno en época de estiaje y otro en época de lluvias.
- Identificar los principales factores que ocasionan el incremento en la concentración del nitrógeno amoniacal en 3 sitios de estudio únicamente.
- Monitorear principalmente a los sitios P7-Miguel Hidalgo, P8-Valencia y P9-Ejidal.
- Identificar las fuentes principales de contaminación fecal en todos los sitios de estudio los sitios con el fin de disminuir o erradicar el índice de organismos coliformes.
- Llevar a cabo el cálculo del ICA con datos de al menos diez años para corroborar el índice que se obtuvo en este proyecto de investigación.
- Complementar esta investigación con un estudio hidrológico de la zona para identificar zonas de recarga, zonas de infiltración y zonas en las que la contaminación ambiental es más relevante.
- Promover la conciencia ecológica y ambiental en toda la población zamorana para evitar que aporten contaminación a sus aguas subterráneas.
- Continuar con los estudios hidrogeoquímicas y de mejoras medioambientales, a través de los Sistemas de Información Geográfica para identificar con precisión el valor de la calidad del agua en cualquier punto de la zona de estudio, haciendo uso de las técnicas geoestadísticas.

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abadi Berhe, B., Erdem Dokuz, U., Çelik, M., 2017. Assessment of hydrogeochemistry and environmental isotopes of surface and groundwaters in the Kütahya Plain, Turkey. *J. African Earth Sci.* 134, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.015>
- Albert, L.A., 1997. Cromo. *Introd. a la Toxicol. Ambient.*
- Alfaro, R., 2000. Determinación de la calidad del agua y contenido de radón en pozos localizados en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán 98–101.
- Arreola, M., 2015. Evaluación de la calidad del agua subterránea en función de la presencia de arsénico, flúor y boro en Ciudad Hidalgo, Michoacán. *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.*
- Ayora Cañada, M.J., 2010. Análisis De Aguas. *Dep. Química Física y Analítica · Univ. Jaén* 1–47.
- Ayuba, R., Omonona, O. V., Onwuka, O.S., 2013. Assessment of groundwater quality of Lokoja basement area, North-Central Nigeria. *J. Geol. Soc. India* 82, 413–420. <https://doi.org/10.1007/s12594-013-0168-6>
- Busico, G., Cuoco, E., Kazakis, N., Colombani, N., Mastrocicco, M., Tedesco, D., Voudouris, K., 2018. Multivariate statistical analysis to characterize/discriminate between anthropogenic and geogenic trace elements occurrence in the Campania Plain, Southern Italy. *Environ. Pollut.* 234, 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.053>
- C Revuelta, B J Álvarez, A M Benitez, M P Diez, B.S.R., 2003. Contaminación por As en aguas subterráneas en la provincia de Valladolid: variaciones estacionales. *Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León.*
- Chakraborti, D., Rahman, M.M. ahmudu., Mukherjee, A., Alauddin, M., Hassan, M., Dutta, R.N. at., Pati, S., Mukherjee, S.C. handr., Roy, S., Quamruzzman, Q., Rahman, M., Morshed, S., Islam, T., Sorif, S., Selim, M., Islam, M.R. azau., Hossain, M.M. onowe., 2015. Groundwater arsenic contamination in Bangladesh-21 Years of research. *J. Trace*

- Elem. Med. Biol. 31, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2015.01.003>
- Chavez 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.
- Cisneros, B.E.J., 2010. La contaminación ambiental en México. Limusa, México.
- CNA, 2007. Diseño de plantas potabilizadoras tipo tecnología simplificada.
- CONAGUA, 2016. Atlas del Agua en México 2016. Com. Nac. del Agua. Subdirección Gen. Planeación. 135. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CONAGUA, 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zamora (1608), Estado de Michoacán. Zamora, Michoacán.
- Cuoco, E., Verrengia, G., de Francesco, S., Tedesco, D., 2010. Hydrogeochemistry of Roccamonfina volcano (Southern Italy). Environ. Earth Sci. 61, 525–538. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0363-3>
- Custodio, E., Llamas, M., 1996. Hidrología subterránea, 2 ed. ed. Omega.
- Díaz-González, L., Santoyo, E., Reyes-Reyesfile:///D:/Descargas/Hidrogeoquimica/Caracterizacion-hidrogeoquimica-de-recursos-hidricos-de-la-cuenca-de-Santiago.pdf, J., 2008. Tres nuevos geotermómetros mejorados de Na/K usando herramientas computacionales y geoquimiométricas: Aplicación a la predicción de temperaturas de sistemas geotérmicos. Rev. Mex. Ciencias Geol. 25, 465–482.
- DOF, 2006. NMX-AA-102-SCFI-2006 CALIDAD DEL AGUA – DETECCIÓN Y ENUMERACIÓN DE ORGANISMOS COLIFORMES, ORGANISMOS COLIFORMES TERMOTOLERANTES Y Escherichia coli PRESUNTIVA – MÉTODO DE FILTRACIÓN EN MEMBRANA.
- DOF, 2004. Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2004. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Fede.

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.

Doménech X., P.P., 2006. Química Ambiental de los sistemas terrestres. Reverté.

Donado, L., 2009. Hidrogeoquímica.

Etxabe Z.I., Cotín C.K., Olalde O.C., y A.V.J., 2010. Cesión de plomo y otros metales desde las tuberías al agua de consumo en la Comunidad Autónoma del País Vasco 460–465.

FAO, 2015. Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html>

Fernández, D., 2015. Procesos hidrogeoquímicos en el acuífero de Balanegra (España).

Gaikwad, Satyajit, Gaikwad, Suryakant, Meshram, D., Wagh, V., Kandekar, A., Kadam, A., 2019. Geochemical mobility of ions in groundwater from the tropical western coast of Maharashtra, India: implication to groundwater quality, Environment, Development and Sustainability. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00312-9>

García, M., Sánchez, F.D., Marín, R., Guzmán, H., Verdugo, N., Dominguez, E., Vargas, O., Panizzo, L., Sánchez, N., Gómez, J., Cortés, G., 1998. El agua. El medio Ambient. en Colomb. 35–189.

Ghosh A., Kakali M., Ghosh S.K., B. s, 2012. Sources and toxicity of fluoride in the environment. Springer Sci. Bussines Media Dordrecht, Res Chem Intermed 10(1007).

Gnanachandrasamy, G., Dushiyanthan, C., Jeyavel Rajakumar, T., Zhou, Y., 2018. Assessment of hydrogeochemical characteristics of groundwater in the lower Vellar river basin: using Geographical Information System (GIS) and Water Quality Index (WQI), Environment, Development and Sustainability. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0219-7>

Gómez, Gladys, Gómez, D., 2002. Flúor y fluorosis.

Gonzalez, Eduardo; Tornero, M., 2009. Concentración total y especiación de metales pesados

- en biosólidos de origen urbano. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 5.
- Hidalgo, Y.G., Espinosa, C.B., Rodríguez, H.V., 2012. Caracterización hidroquímica de las aguas de riego de la cuenca del río Naranjo , municipio Majibacoa , provincia Las Tunas Hydrochemical characterization of irrigation water of the Naranjo river watershed , municipality Majibacoa , province Las Tunas. *Rev. Ciencias Tècnicas Agropecu.* 21, 29–34.
- I. Restrepo, D. Sánchez, A. Galvis, J. Rojas, I.S., 2007. Avances en Investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio, Primera. ed. Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- INAFED, 2010. Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [WWW Document]. URL <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16108a.html>
- INEGI, 2010. Compendio de información geográfica municipal 2010 Zamora, Michoacán de Ocampo.
- K. Contreras, J.contreras, M. Corti, J. De Sousa, M. Durán, M.E., 2008. El agua un recurso para preservar. *Univeridad Los Andes Fac. Med. Escuela Med.* 27.
- KrishnaS.K., C., N., Seralathan P., P.S.G. y M., S, N., 2011. Hydrogeochemical study of shallow carbonate aquifers, Rameswaram Island, India. 184, 4127–4138.
- Kshetrimayum, K.S., Bajpai, V.N., 2012. Assessment of groundwater quality for irrigation use and evolution of hydrochemical facies in the Markanda river basin, northwestern India. *J. Geol. Soc. India* 79, 189–198. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0024-0>
- Ledesma-Ruiz, R., Mahlkecht, J., 2017. Geochemical and Isotopic Characterization of Groundwater in Tecate, Baja California, Mexico. *Procedia Earth Planet. Sci.* 17, 516–519. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.130>
- Leibbrandt, A., 2001. Foreword to Civilization and Copper. Transl. by Int. Copp. Assoc.
- López-Álvarez, B., Ramos-Leal, J.A., Moran-Ramírez, J., Benavides, A.C., Garcia, G.H.,

2013. Origin of water quality of a hanging aquifer and its relation with changes in land use in the San Luis Potosi valley | 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. *Bol. la Soc. Geol. Mex.* 65.
- MacHiwal, D., Jha, M.K., Mal, B.C., 2011. GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard-rock hilly terrain of Western India. *Environ. Monit. Assess.* 174, 645–663. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1485-5>
- Mahmoudi, N., Nakhaei, M., Porhemmat, J., 2017. Assessment of hydrogeochemistry and contamination of Varamin deep aquifer, Tehran Province, Iran. *Environ. Earth Sci.* 76, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6698-2>
- Manahan, S.E., 2007. No Title, Reverté. ed. D.F. México.
- Mancilla-Villa, Ó.R., Ortega-Escobar, H.M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., Reyes-Ortigoza, A.L., 2011. Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 28, 39–48. <https://doi.org/0188-499>
- Manuel, P., 2015. Metodología geoquímica aplicada a fluidos geotermales. Universidad de El Salvador.
- Manuela de Jesús Vázquez Vázquez, Raúl Cortés-Martínez, R.A.-C.-V., 2015. Arsenic occurrence and water quality in recreational thermal springs at 5, 1–5.
- Marrero, R., 2010. Modelo hidrogeoquímico del acuífero de las Cañadas del Teinde Telerife, Islas Canarias.
- Masten Susan, D.M., 2005. Ingeniería Y Ciencias Ambientales.
- Mora, A., Mahlknecht, J., Rosales-Lagarde, L., Hernández-Antonio, A., 2017. Assessment of major ions and trace elements in groundwater supplied to the Monterrey metropolitan area, Nuevo León, Mexico. *Environ. Monit. Assess.* 189. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6096-y>
- Mushtaq, N., Younas, A., Mashiatullah, A., Javed, T., Ahmad, A., Farooqi, A., 2018.

- Hydrogeochemical and isotopic evaluation of groundwater with elevated arsenic in alkaline aquifers in Eastern Punjab, Pakistan. *Chemosphere* 200, 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.154>
- Nas, B., Berktaý, A., 2010. Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. *Environ. Monit. Assess.* 160, 215–227. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0689-4>
- Odum EP, B.G., 2006. *Fundamentos de ecología*. CENGAGE Learning, México.
- OMS, 2005. *Agua, Saneamiento y Salud*.
- 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. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- R., D., 2003. Heavy metals distribution in agricultural top soils in urban area 795–805.
- Ramalho, R.S., 1996. *Tratamiento de Aguas Residuale*. Reverté, Barcelona, España.
- Ramírez, J., 1989. *Diagrama Stiff.pdf*.
- Reyes, Y.C., Vergara, I., Torres, O.E., Díaz, M., González, E.E., 2016. Contaminación Por Metales Pesados: Implicaciones En Salud, Ambiente Y Seguridad Alimentaria. *Ing. Investig. y Desarro.* 16, 66–77. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>
- Rooney C.P., Z.F.J. y M.S.P., 2006. Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of European soils. 726–732.
- Ruiz-Pico, Á., Cuenca, Á.P., Agila, R.S., Criollo, D.M., Leiva-Piedra, J., Salazar-Campos, J., 2019. Hydrochemical characterization of groundwater in the Loja Basin (Ecuador). *Appl. Geochemistry* 104, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.02.008>
- Sadat-Noori, S.M., Ebrahimi, K., Liaghat, A.M., 2014. Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environ. Earth Sci.* 71, 3827–3843. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2770-8>
- Salcedo, E.R., Garrido, S.E., Vicenta, M., Martínez, M., Ocampo, A., 2017. Hydrogeochemistry and water-rock interactions in the urban area of Puebla Valley

- aquifer ( Mexico ). J. Geochemical Explor. 181, 219–235.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.016>
- Salcedo Sánchez, E.R., Garrido Hoyos, S.E., Esteller, M.V., Martínez Morales, M., Ocampo Astudillo, A., 2017. Hydrogeochemistry and water-rock interactions in the urban area of Puebla Valley aquifer (Mexico). J. Geochemical Explor. 181, 219–235.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.016>
- Salem, Z.E.S., Osman, O.M., 2017. Use of major ions to evaluate the hydrogeochemistry of groundwater influenced by reclamation and seawater intrusion, West Nile Delta, Egypt. Environ. Sci. Pollut. Res. 24, 3675–3704. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8056-4>
- Samboni R.N., Carvajal E.Y, E.J., 2007. A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators. Universidad Nacional de Colombia.
- San Juan, A., 2015. Caracterización hidrogeoquímica de recursos hídricos de la cuenca de Santiago.
- Sanchez, J., 2012. Evolución geoquímica de las aguas subterráneas 9.
- Saravanan, K., Srinivasamoorthy, K., Prakash, R., Gopinath, S., Suma, C.S., 2015. An Evaluation of Hydrogeochemistry of Groundwater in Upper Vellar Sub – Basin Using Mineral Stability and Solute Transport Modelling. Aquat. Procedia 4, 1119–1125.  
<https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.142>
- Sawyer, C. And Mc Carty, P. And Parkin, G., 2003. Chemistry For Environmental Engineering And Science. McGraw Hill.
- Sefie, A., Aris, A.Z., Ramli, M.F., Narany, T.S., Shamsuddin, M.K.N., Saadudin, S.B., Zali, M.A., 2018. Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of the multilayered aquifer in Lower Kelantan Basin, Kelantan, Malaysia. Environ. Earth Sci. 77, 0. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7561-9>
- SEMARNAT, 2012. Agua. Inf. la situación del medio Ambient. en México. 258–316.
- Sethy, S., Syed, T., Kumar, A., Sinha, D., 2016. Hydrogeochemical characterization and quality assesment of groundwater in parts of southern Gangetic plain. Environ. Earth

Sci. 75, 232.

- Sheikh, M.A., Azad, C., Mukherjee, S., Rina, K., 2017. An assessment of groundwater salinization in Haryana state in India using hydrochemical tools in association with GIS. *Environ. Earth Sci.* 76. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6789-0>
- Smedley, P.L. & Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 517–568.
- Sojobi, A.O., 2016. Evaluation of groundwater quality in a rural community in North Central of Nigeria. 188–192.
- Tambo, C., 2015. Propuesta de un índice de calidad del agua como herramienta de gestión para humedales capitalinos. Universidad Santo Tomás-Bogotá.
- Thu, T., Luu, G., Sthiannopkao, S., Kim, K., 2009. Arsenic and other trace elements contamination in groundwater and a risk assessment study for the residents in the Kandal Province of Cambodia. *Environ. Int.* 35, 455–460. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.013>
- Tineo A., R.A., 2015. Cuenca hidrológica Valle del Río Santa María. Universidad Nacional de Tucumán - San Miguel de Tucumán.
- Tirkey, P., Bhattacharya, T., Chakraborty, S., Baraik, S., 2017. Assessment of groundwater quality and associated health risks: A case study of Ranchi city, Jharkhand, India. *Groundw. Sustain. Dev.* 5, 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.05.002>
- Valencia, C., 2010. Química del hierro y manganeso en el agua, métodos de remoción. Universidad del la Cuenca-Ecuador.
- Vasant, W., Dipak, P., Aniket, M., Ranjitsinh, P., Shrikant, M., Nitin, D., Manesh, A., Abhay, V., n.d. GIS and Statistical Approach to Assess the Groundwater Quality of Nanded 1, 409–417. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30933-0>
- Velázquez, M.A., Pimentel, J.L., Ortega, M., 2011. Estudio de la distribución de boro en fuentes de agua de la cuenca del río duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 27, 19–30.

Voutsis, N., Kelepertzis, E., Tziritis, E., Kelepertsis, A., 2015. Assessing the hydrogeochemistry of groundwaters in ophiolite areas of Euboea Island, Greece, using multivariate statistical methods. *J. Geochemical Explor.* 159, 79–92. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.08.007>

WHO, 2004. Chemical safety for drinking-water. World Heal. Organ.

Wu, C., Wu, X., Qian, C., Zhu, G., 2018. Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of high fluoride levels in the Yanchi endorheic region, northwest China. *Appl. Geochemistry* 98, 404–417. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.10.016>

Yehia, M., Baghdady, A., Howari, F.M., Awad, S., Gad, A., 2017. Natural radioactivity and groundwater quality assessment in the northern area of the Western Desert of Egypt. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 12, 331–344. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.002>

### 13. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Cronograma de Actividades Para el Proyecto de Tesis de la MCIA 2017-2019																								
ACTIVIDAD	2017				2018												2019							
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Revisión Bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Selección de sitios de estudio		■																						
Elaboración de protocolo		■	■	■	■																			
Colecta de muestras									■						■									
Análisis de parámetros										■	■				■	■	■							
Análisis de resultados													■	■	■	■	■	■						
Redacción y envío de artículo																					■			
Redacción de tesis						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Conclusiones y recomendaciones																			■	■				
Revisión del documento final																					■	■		
Trámites de titulación																								■
Examen recepcional																							■	

## 14. ANEXOS

### 14.1 ANEXO A: Resultados parámetros in situ

Tabla 12 Resultados de los parámetros de campo en los sitios de estudio

Sitio	Campaña de colectas	pH	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)
P1	mayo-18	8.0000	24.000	508.000	2.34
	noviembre-18	7.67	21.7	498.6	4.92
P2	mayo-18	7.600	25	671	1.36
	noviembre-18	7.52	23	743.9	4.44
P3	mayo-18	7.980	23	879	2.15
	noviembre-18	6.73	23.7	957.6	1.33
P4	mayo-18	8.310	31	470	1.68
	noviembre-18	7.63	27.8	495.3	1.42
P5	mayo-18	8.270	28	532	1.78
	noviembre-18	7.33	20.9	511.4	4.05
P6	mayo-18	8.45	37	410	3.050
	noviembre-18	7.85	24	386.5	3.64
P7	mayo-18	8.34	28	415	2.95
	noviembre-18	7.69	26	396.2	1.76
P8	mayo-18	8.08	33	427	2.54
	noviembre-18	7.43	23.8	418.2	1.07
P9	mayo-18	8.11	26	363	2.97
	noviembre-18	7.67	26.9	335.6	1.26
P10	mayo-18	8.32	26	342	2.7
	noviembre-18	7.78	22	343.6	4.19

## 14.1 ANEXO B: Valores de parámetros fisicoquímicos

Tabla 13 Resultados de parámetros fisicoquímicos y coliformes fecales en los sitios de estudio

Sitio	Campaña de colectas	Turbiedad (UTN)	Color (Pt-Co)	Sólidos sedimentables (mg/L)	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Nitrógeno de nitratos (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Alcalinidad total (mg/L)	Coliformes fecales (UFC/100ml)
P1	mayo-18	1.4	5	0.1	382	4	378	0.3578	0.076	3.5	5.4	193.8	181	35
	noviembre-18	4.6	10	0	384	6	378	0.2452	0.1514	1.85	3	164	194	150
P2	mayo-18	1.66	5	0.1	500	4	496	0.1193	0.765	3.2	4.7	238.08	243	10
	noviembre-18	2.4	5	0	490	4	486	0.0613	1.1985	3.55	5.45	240	235	39
P3	mayo-18	1.35	5	0	646	2	644	0.0596	1.133	3.17	4.725	325.56	312	3
	noviembre-18	2.4	5	0.1	612	4	608	0.226	1.7642	3.2	4.85	320	300	2
P4	mayo-18	1.41	5	0	354	2	352	0.4175	0.061	2.92	4.5	177.8	182	6
	noviembre-18	2.5	5	0	314	4	310	0.4905	0.0228	6.55	10.48	140	158	200
P5	mayo-18	1.5	5	0	384	2	382	0.1789	0.058	2.45	3.91	190.2	194	4
	noviembre-18	4.1	10	0	380	2	378	0.3066	0.0237	2.24	3.44	200	187	210
P6	mayo-18	2.4	5	0	306	2	304	0.0596	0.04	0.91	1.4	162.36	156	1
	noviembre-18	2.5	5	0	284	4	280	0.0613	0.0938	3.54	5.3	130	135	172
P7	mayo-18	2.5	5	0	302	2	300	4.473	0.05	11.36	17.6	151.44	163	8
	noviembre-18	2.8	5	0	308	4	304	4.1376	0.0282	3.89	5.88	136	151	10
P8	mayo-18	3	10	0.1	328	6	322	4.244	0.039	12.5	19.285	165.08	169	20
	noviembre-18	3.9	10	0	306	4	302	4.1376	0.0237	5.16	8.52	142	158	8
P9	mayo-18	4	10	0.2	278	16	262	1.113	0.025	10.2	15.71	143.28	146	3
	noviembre-18	2.5	5	0	254	2	252	0.7358	0.0335	3.5	5.48	120	124	8
P10	mayo-18	2.3	5	0.1	258	2	256	0.119	1.066	6.25	10.1	132.36	138	9
	noviembre-18	3.6	5	0	272	2	270	0.0613	1.0372	7.67	11.8	130	131	32

## 14.1 ANEXO C: Valores de iones mayoritarios

Tabla 14 Resultados de iones mayoritarios y balance iónico

Sitio	Campaña de colectas	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	Balance Iónico (%)
P1	mayo-18	0.0587	32.14	45.9	8	173	68.58	5.47	27.6	3.98%
	noviembre-18	0.027	31.41	41.73	12	184	36	17.997	41.86	2.17%
P2	mayo-18	0.0771	44.63	62.86	0	243	72.7	13.62	44.85	3.87%
	noviembre-18	0.139	42.82	50.63	10	225	59.6	23.35	41.63	5.92%
P3	mayo-18	0.103	61.23	85.12	0	312	118.02	7.42	52.44	3.55%
	noviembre-18	0.011	61.26	79.48	0	300	70.4	35.02	48.3	3.77%
P4	mayo-18	0.1079	27.28	35.5	6	176	49.92	12.89	26.45	5.54%
	noviembre-18	0.068	23.4	32.33	16	142	15.2	12.646	33.81	-6.24%
P5	mayo-18	0.0862	34.18	46.68	4	190	54.29	12.52	34.96	4.20%
	noviembre-18	0.061	33.32	46.95	0	187	44	21.888	25.53	4.80%
P6	mayo-18	0.1019	22.81	29.91	10	146	46.53	11.19	19.55	6.08%
	noviembre-18	0.048	23.37	29.9	14	121	37.6	8.76	28.98	6.77%
P7	mayo-18	0.0447	25.3	28.52	4	159	46.22	8.76	25.76	4.99%
	noviembre-18	0.086	25.4	31.34	8	143	36.8	10.7	32.2	5.49%
P8	mayo-18	0.2221	25.27	32.95	0	169	51.98	8.51	22.31	4.92%
	noviembre-18	0.334	26.93	35.26	0	158	44	7.78	32.2	5.65%
P9	mayo-18	0.1593	18.85	27.05	4	142	43.77	8.27	17.71	5.25%
	noviembre-18	0.071	15.42	26.95	14	110	36	7.3	22.08	5.86%
P10	mayo-18	0.116	17.36	24.94	4	134	43.74	10.46	17.71	9.31%
	noviembre-18	0.099	21.41	27.7	14	117	33.6	11.19	23.46	3.69%

### 14.1 ANEXO D: Valores de elementos traza

Tabla 15 Resultados de elementos traza en los sitios de estudio

Sitio	Campaña de colectas	Al (µg/L)	V (µg/L)	Cr (µg/L)	Mn (µg/L)	Fe (µg/L)	Co (µg/L)	Ni (µg/L)	Cu (µg/L)	Zn (µg/L)	As (µg/L)	Cd (µg/L)	Sb (µg/L)	Ba (µg/L)	Tl (µg/L)	Pb (µg/L)
P1	mayo-18	<L.D.	0.393	<L.D.	0.937	2.93	0.0147	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.3915	0.0228	1.1753	13.807	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	<L.D.	0.301	<L.D.	15.648	154.97	0.016	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.137	<L.D.	0.499	28.514	<L.D.	<L.D.
P2	mayo-18	<L.D.	4.274	<L.D.	28.894	1.589	0.154	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.78	<L.D.	1.166	36.71	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	<L.D.	6.884	0.076	74.198	58.415	0.153	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.658	<L.D.	0.586	77.725	<L.D.	<L.D.
P3	mayo-18	<L.D.	9.005	<L.D.	22.816	0	0.424	<L.D.	0.565	<L.D.	0.184	<L.D.	0.648	61.797	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	<L.D.	11.333	0.111	59.8	2.474	0.446	<L.D.	0.933	<L.D.	1.157	<L.D.	0.602	125.462	<L.D.	<L.D.
P4	mayo-18	<L.D.	0.365	<L.D.	7.865	28.172	0.0066	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.0587	<L.D.	0.4244	6.992	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	<L.D.	0.395	<L.D.	19.775	28.554	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.321	<L.D.	0.427	13.34	<L.D.	<L.D.
P5	mayo-18	<L.D.	0.169	<L.D.	33.435	3.061	0.0104	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.1402	<L.D.	0.4625	13.992	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	<L.D.	0.044	<L.D.	87.275	232.026	0.017	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.032	<L.D.	0.429	28.834	<L.D.	<L.D.
P6	mayo-18	<L.D.	0.85	<L.D.	1.929	13.191	0.0336	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.2446	<L.D.	0.3649	9.716	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	<L.D.	0.59	<L.D.	18.826	46.762	0.03	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.184	<L.D.	0.484	10.734	<L.D.	<L.D.
P7	mayo-18	<L.D.	0.023	<L.D.	0.382	115.33	0.0269	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.0963	<L.D.	0.3695	8.793	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	<L.D.	0.034	<L.D.	32.952	123.732	0.046	<L.D.	2.196	<L.D.	0.078	<L.D.	0.491	17.683	<L.D.	<L.D.
P8	mayo-18	<L.D.	0.223	0.0178	10.285	80.422	0.0834	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.178	<L.D.	0.337	7.497	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	0.4847	0.181	0.027	30.319	186.653	0.102	<L.D.	19.882	1.371	0.234	<L.D.	0.476	21.003	<L.D.	<L.D.
P9	mayo-18	1.244	1.686	0.002	16.729	<L.D.	0.0244	<L.D.	18.141	<L.D.	0.2147	<L.D.	0.4379	9.152	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	1.8238	0.071	<L.D.	35.529	68.328	0.015	<L.D.	17.42	<L.D.	0.289	<L.D.	0.376	12.273	<L.D.	<L.D.
P10	mayo-18	<L.D.	6.555	0.496	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.522	<L.D.	0.5975	<L.D.	0.5161	5.668	<L.D.	<L.D.
	noviembre-18	122.747	9.958	0.545	0.404	101.523	0.033	<L.D.	1.564	6.248	1.244	<L.D.	0.489	17.157	<L.D.	<L.D.

### 14.1 ANEXO E: Valores de las relaciones hidrogeoquímicas:

Tabla 16 Valores de las relaciones iónicas de los sitios de estudio

Sitio	Campaña de colectas	$rNa^+/rCl^-$	$rNa^+/rK^+$	$rMg^{2+}/rCl^-$	$rCa^{2+}/rMg^{2+}$	$rCa^{2+}/rSO_4^{2-}$	$rHCO_3^-/rCl^-$
P1	mayo-18	1.3236	3.877	0.496	7.604	3.5810	3.1271
	noviembre-18	2.0541	5.880	1.671	1.213	2.0676	3.4033
P2	mayo-18	1.5489	4.494	0.890	3.238	2.7729	3.6839
	noviembre-18	1.4985	4.172	1.590	1.548	2.8213	3.0527
P3	mayo-18	1.3200	4.244	0.353	9.647	3.3231	2.9603
	noviembre-18	1.2152	3.909	1.667	1.219	2.1229	2.8450
P4	mayo-18	1.4944	2.649	1.378	2.349	3.3700	3.7481
	noviembre-18	2.2270	3.386	1.576	0.729	1.1268	3.5255
P5	mayo-18	1.5765	3.988	1.068	2.630	2.7874	3.2294
	noviembre-18	1.1810	2.912	1.916	1.219	2.2461	3.2605
P6	mayo-18	1.3210	2.027	1.431	2.522	3.7285	3.7185
	noviembre-18	1.9113	3.005	1.093	2.603	3.0139	3.0080
P7	mayo-18	1.5693	3.368	1.010	3.200	3.8841	3.6511
	noviembre-18	1.9539	4.210	1.229	2.086	2.8143	3.2707
P8	mayo-18	1.3608	2.917	0.982	3.705	3.7819	3.8853
	noviembre-18	1.8429	4.210	0.843	3.430	2.9908	3.4085
P9	mayo-18	1.4481	2.427	1.280	3.210	3.8781	4.3764
	noviembre-18	2.2070	3.026	1.381	2.991	3.2015	4.1443
P10	mayo-18	1.5724	2.584	1.757	2.536	4.2034	4.4843
	noviembre-18	1.6889	3.422	1.524	1.821	2.9072	3.1748