



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

DINÁMICA DE ACUÍFEROS QUE ABASTECEN LA CIUDAD DE MORELIA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA
LEOPOLDO GÓMEZ SANDOVAL

DIRECTOR DE TESIS
DR. VÍCTOR HUGO GARDUÑO MONROY
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA, UMSNH

MORELIA, MICHOACÁN A 15 DE ENERO DE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, por darme la oportunidad de crecer académicamente, por permitirme conocer la investigación científica y alentarme a continuar con mis estudios. De igual manera agradecer al laboratorio de análisis isotópico del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) por el apoyo en el análisis de muestras.

También agradecer a mi tutor el Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy, y a mis revisores la M.C. Rosaura Páez Bistrain, la M.C. María Estela Carmona Jiménez, el Dr. Jesús Arturo Muñiz Jauregui y al Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto, quienes académicamente me acompañaron en este trabajo, así como a mis profesores de la maestría.

De igual forma agradecer a mis compañeros de clase, quienes nos apoyábamos mutuamente para crecer juntos en este camino llamado posgrado.

Dedicatoria

A mi madre, quien dio todo por mí,

Gracias por tu amor incondicional

RESUMEN

De acuerdo con la WWDR (2016) se estima que aproximadamente la mitad de la población mundial depende del agua subterránea para consumo humano, lo cual lleva a un gran interés hacia el entendimiento de dicho recurso y su manejo adecuado. Para el caso de la ciudad de Morelia, existen muchos estudios sobre la geología, sin embargo, aún no se cuenta con suficiente información sobre el acuífero que abastece a la ciudad. El objetivo de la presente investigación es conocer la dinámica de este sistema acuífero, identificar las principales zonas de recarga, caracterizar geoquímicamente el agua e identificar si existe contaminación por metales pesados. Para ello se tomaron muestras de 23 aprovechamientos de agua subterránea dentro de la ciudad durante la temporada de estiaje y de nuevo durante la temporada de lluvias. En todos los sitios de muestreo se realizaron mediciones de pH, oxígeno disuelto, conductividad y temperatura. Además se muestreó para la determinación de aniones (NO_3 , NO_2 , SO_4 , Cl, F), elementos mayores y menores (Be, Ti, V, Cr, Mn, Co, Cu, Mo, Cd, Sb, Pb, As, Cu, Fe, Sr, Zn, Na, Ca, K y Mg), Isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), Análisis Bacteriológicos (coliformes totales, coliformes fecales y bacterias Mezoflicas), así como dureza y alcalinidad. El análisis de los aniones y elementos mayores arrojó que existen tres familias de agua en el sistema acuífero, 1) bicarbonatada sódica y potásica, 2) bicarbonada cálcica y magnésica y 3) clorurada y sulfatada cálcica y magnésica, las primeras dos indican que los flujos de agua subterránea es de *tipo local*, debido a la presencia de bicarbonato, la tercera familia solo se encontró en uno de los puntos de muestreo y este indica un largo recorrido subterráneo del agua. El análisis de isótopos estables indica que el agua subterránea se recarga en zonas aledañas y dependen completamente de la precipitación. De acuerdo con las interpolaciones de los parámetros fisicoquímicos se observa que la *Secuencia Fluvio Lacustre del Mioceno Plioceno* se recarga de dos unidades geológicas, *del Corredor Tacarsco y de la Cantera de Morelia* siendo la unidad que más aporta flujo subterráneo el *C. del Águila*. El análisis de los elementos traza devela que existen pozos de agua subterránea que se encuentran contaminados con Arsénico, Hierro y Manganeso, los cuales exceden el límite máximo permisible en la norma mexicana. Mismo que podría presentar un riesgo a la salud de los habitantes.

Palabras clave: *Agua subterránea, flujos de agua, área de recarga, contaminación por metales pesados.*

ABSTRACT

According to the WWPA (2016) it is estimated that approximately half of the world's population depends on groundwater for human consumption, which leads to a great interest in understanding that resource and its proper management. In the case of the city of Morelia, there are many studies on geology, however, there is still not enough information about the aquifer that supplies the city. The objective of this research is to know the dynamics of this aquifer system, identify the main recharge zones, geochemically characterize the water and identify if there is contamination by heavy metals. To this end, samples were taken of 23 underground springs and water wells within the city during the dry season and again during the rainy season. Measurements of pH, dissolved oxygen, conductivity and temperature were made in all the sampling sites. In addition, it was sampled for the determination of anions (NO₃, NO₂, SO₄, Cl, F), major and minor elements (Be, Ti, V, Cr, Mn, Co, Cu, Mo, Cd, Sb, Pb, As, Cu, Fe, Sr, Zn, Na, Ca, K and Mg), stable isotopes ($\delta^{18}O$ and $\delta^{18}O$), bacteriological analysis (total coliforms, total coliforms and Mezoflicas bacteria), as well as hardness and alkalinity. The analysis of the anions and major elements showed that there are three families of water in the aquifer system, 1) bicarbonate sodium and potassium, 2) bicarbonate calcium and magnesium and 3) chloride and sulphate calcium and magnesium, the first two indicate that flows of groundwater is local, due to the presence of bicarbonate, the third family was only found in one of the sampling points and this indicates a long underground route of the water. The analysis of stable isotopes indicates that groundwater is recharged in nearby areas and completely dependent on precipitation. According to the interpolations of the physicochemical parameters, it is observed that the Miocene-Pliocene lacustrine fluvium sequence is recharged from two geological units, the Corredor Tarasco and the Cantera de Morelia, being the unit that most contributes to underground flow the Cerro del Águila. The analysis of the trace elements reveals that there are wells of groundwater that are contaminated with Arsenic, Iron and Manganese, which exceed the maximum permissible limit in the Mexican norm. Same that could present a risk to the health of the inhabitants.

Keywords: *Groundwater, water flows, recharge area, heavy metal contamination.*

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	15
II.	OBJETIVOS	18
	II.I OBJETIVO GENERAL Y PARTICULARES	18
III.	ÁREA DE ESTUDIO	19
	III.I LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	19
	III.II CLIMA.....	20
	III.III HIDROLOGÍA	21
	III.IV SUELOS.....	23
	III.V GEOLOGÍA LOCAL	24
	III.VI CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LA CIUDAD DE MORELIA.....	26
	III.VI.I Explotación de acuíferos	26
	III.VI.II Flujo subterráneo	27
	III.VI.III Recarga de los principales acuíferos locales.....	28
	III.VI.IV Caracterización hidráulica del acuífero Morelia-Queréndaro.....	29
	III.VI.V Piezometría del acuífero Morelia-Queréndaro	30
	III.VI.V Pruebas de bombeo en el acuífero Morelia-Queréndaro.....	31
IV	MARCO TEÓRICO	33
	IV.I SISTEMAS DE FLUJO.....	33
	IV.II SISTEMAS DE ACUÍFEROS.....	34
	IV.II TIPOS DE ACUÍFEROS.....	35
	IV.II.I Acuíferos desarrollados en sedimentos no consolidados	35
	IV.II.11 Acuíferos desarrollados en roca consolidada	37
	IV.II GEOQUÍMICA.....	38
	IV.III CONSTITUYENTES PRIMARIOS.....	40
	IV.IV CONSTITUYENTES SECUNDARIOS.....	41
	IV.V LEGISLACIÓN EN MÉXICO SOBRE CONTAMINANTES DEL AGUA SUBTERRÁNEA	43
	VI.VI EFECTOS A LA SALUD DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS	53
	VI.VI.I Intoxicación por Arsénico	53
	VI.VI.II Intoxicación por hierro.....	53
	VI.VI.III Intoxicación por Manganeso	54
V	METODOLOGÍA	55
	V.I MUESTREO	55
	V.II PARÁMETROS ANALIZADOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA MUESTREADA EN LA CIUDAD DE MORELIA ..	59
	V.III ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN CAMPO	60
	V.IV ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN EL LABORATORIO	61
	V.V ANÁLISIS DE ANIONES (NO ₂ ⁻), (NO ₃ ⁻), (Cl), (SO ₄ ⁻²), (Fl) Y PO ₄ ⁻³	61
	V.VI ANÁLISIS DE ISÓTOPOS ESTABLES Y ANÁLISIS DE ELEMENTOS MAYORES Y MENORES	62
	V.VII ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO.....	63
	V.VIII PROCESAMIENTO DE DATOS.....	64
	V.IX MÉTODO DE INTERPOLACIÓN TIPO KERNEL CON BARRERAS.....	64
	V.X GENERACIÓN DE MODELOS DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS (MANGANESO, HIERRO Y ARSÉNICO) PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA.	66
	V.X.I Ley de potencia	66
	V.X.I Ley de potencia en los datos recabados	68
VI	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
	VI.I TEMPERATURA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	69
	VI.I.I Temperatura del agua subterránea para un periodo de tres años de muestreo.....	69
	VI.I.II Estadística descriptiva de las temperaturas del agua subterránea	70
	VI.I.II.I Temporada de estiaje	70

VI.I.II.II Temperatura del agua subterránea en la temporada de lluvias	72
VI.I.III <i>Distribución de temperaturas en la temporada de lluvias y estiaje en la ciudad de Morelia, y su relación con los sistemas de flujo de agua subterránea.</i>	74
VI.I.III.I Distribución geográfica de temperaturas en la temporada de estiaje	74
VI.I.III.II Distribución geográfica de la temperatura en la temporada de lluvias	75
VI.I.III.III La temperatura y el acuífero local de la <i>Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno</i>	75
VI.I.III.III.I Temperaturas bajas en la <i>Secuencia fluvio-lacustre</i>	76
VI.I.III.III.II Temperaturas altas en la <i>Secuencia fluvio-lacustre</i>	76
VI.I.III.III.III La temperatura intermedia en la <i>Secuencia fluvio-lacustre</i>	77
VI.I.III.IV La temperatura y el acuífero de semi escudo de la <i>Secuencia volcánica pleistocénica-Holocénica del Corredor Tarasco</i>	78
VI.I.III.V La temperatura y el acuífero profundo de los Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)	78
VI.II pH DEL AGUA SUBTERRÁNEA	79
VI.II.I <i>Estadística descriptiva del pH del agua subterránea</i>	80
VI.II.I.I Temporada de estiaje	80
VI.II.I.II Temporada de lluvias.....	82
VI.II.II <i>Distribución de pH en la temporada de lluvias y estiaje en la ciudad de Morelia, y su relación con los sistemas de flujo de agua subterránea</i>	84
VI.II.II.I Distribución geográfica del pH en la temporada de estiaje	84
VI.II.II.II Distribución geográfica del pH en la temporada de lluvias	85
VI.II.III <i>El pH y el acuífero de los volcanes de semi-escudo de la Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco</i>	85
VI.II.III.I Aporte de agua de la <i>Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco a la Secuencia fluvio-lacustre</i>	85
VI.II.III.I.I Diferencias de pH entre la temporada de lluvias y la de estiaje.....	86
VI.II.IV <i>El pH en los Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia) y acuífero profundo</i>	87
VI.II.IV.I pH en el acuífero local de la <i>Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno</i>	87
VI.III CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	88
VI.III .I <i>Estadística descriptiva de la conductividad del agua subterránea</i>	89
VI.III.I.I Temporada de estiaje.....	89
VI.III .I.II Temporada de lluvias.....	91
VI.III.II <i>Distribución de la conductividad en la temporada de lluvias y estiaje en la ciudad de Morelia, y su relación con los sistemas de flujo de agua subterránea</i> 93	
VI.III.II.I Distribución geográfica de la conductividad en la temporada de estiaje.....	93
VI.III.II.II Distribución geográfica de la conductividad en la temporada de lluvias.....	94
VI.III.II.III Conductividad y el acuífero de tipo semi-escudo de la <i>Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco</i>	94
VI.III.II.III.I La conductividad del agua subterránea del Cerro del Águila.....	94
VI.III.II.III.II La conductividad en la temporada de lluvias y en la temporada de estiaje ..	95
VI.III.II.VI La conductividad en el acuífero de los Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (Cantera de Morelia) y acuífero profundo	96
VI.III.II.VI.I Conductividad baja en la <i>Cantera de Morelia</i>	96
VI.III.II.V Conductividad en el acuífero local de la <i>Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno</i>	96
VI.III.II.V.I Conductividad baja en la <i>secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno</i>	97
VI.III.II.V.II Conductividad intermedia en la <i>secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno</i>	97
VI.III.II.V.III Conductividad intermedia en la <i>secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno</i>	97
VI.IV OXÍGENO DISUELTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	98
VI.IV.I <i>Estadística descriptiva del oxígeno disuelto</i>	99
VI.IV.I.I Temporada de estiaje	99
VI.IV.I.II Temporada de lluvias	101
VI.IV.II <i>Distribución del oxígeno disuelto en la temporada de lluvias y estiaje en la ciudad de Morelia, y su relación con los sistemas de flujo de agua subterránea</i>	103

VI.IV.II.I Oxígeno disuelto en el acuífero de los Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia).....	104
VI.IV.II.I.I La falla La Paloma como delimitante de la cantera de Morelia.....	104
VI.IV.II.I.II El oxígeno disuelto en el acuífero local de la <i>Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno</i>	105
VI.IV.II.I.I.I Oxígeno disuelto en baja concentración en la <i>secuencia fluvio lacustre</i>	105
VI.IV.II.I.I.II Oxígeno disuelto en concentración intermedia en la <i>secuencia fluvio lacustre</i>	105
VI.IV.II.I.I.III Oxígeno disuelto en concentración alta.....	106
VI.IV.II.I.IV Oxígeno disuelto y el acuífero de semi-escudo de la <i>Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco</i>	107
VI.V FACIES HIDROGEOQUÍMICAS.....	108
VI.V.I Familias de agua en la zona de estudio.....	109
VI.V.II Geoquímica del Agua.....	110
VI.V.III Familia de aguas en el acuífero de los Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia).....	111
VI.V.IV Familia de agua en el acuífero de semi-escudo de la <i>Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco</i>	112
VI.V.V Familia de aguas en el acuífero local de la <i>Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno</i>	113
VI.V.VI Tipos de flujo en la ciudad de Morelia.....	114
VI.V.VI.I Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia).....	114
VI.V.VI.II Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco.....	114
VI.V.VI.III Secuencia fluvio lacustre del Mioceno-Plioceno.....	115
VI.VII ANÁLISIS DE LOS METALES PESADOS CONTENIDOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CIUDAD DE MORELIA.....	117
VI.VII.I Concentración de Manganeso en el Agua subterránea de la ciudad de Morelia.....	117
VI.VII.I.I Modelos de concentración de Manganeso para el agua subterránea de la ciudad de Morelia en las seis campañas de muestreo y descripción estadística.....	119
VI.VII.I.I.I Primera campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn).....	119
VI.VII.I.I.II Segunda campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn).....	119
VI.VII.I.I.III Tercera campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn).....	120
VI.VII.I.I.IV Cuarta campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn).....	121
VI.VII.I.I.V Quinta campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn).....	122
VI.VII.I.I.VI Sexta campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn).....	122
VI.VII.II Distribución Geográfica de la concentración de Manganeso del agua subterránea de la ciudad de Morelia.....	127
VI.VII.II.I Concentración de Manganeso en temporada de lluvias.....	127
VI.VII.II.II Concentración de Manganeso en temporada de estiaje.....	129
VI.VII.II Concentración de Arsénico (As) en el Agua subterránea de la ciudad de Morelia.....	131
VI.VII.II.I Modelos de concentración de Arsénico para el agua subterránea de la ciudad de Morelia en las seis campañas de muestreo y descripción estadística.....	132
VI.VII.II.I.I Primera campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As).....	132
VI.VII.II.I.II Segunda campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As).....	133
VI.VII.II.I.III Tercera campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As).....	133
VI.VII.II.I.IV Cuarta campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As).....	134
VI.VII.II.I.V Quinta campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As).....	135
VI.VII.II.I.VI Sexta campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As).....	136
VI.VII.II.II Distribución Geográfica de la concentración de Arsénico del agua subterránea de la ciudad de Morelia.....	137
VI.VII.II.II.I Concentración de Arsénico en la temporada de estiaje.....	138
VI.VII.II.II.II Posibles fuentes de contaminación por Arsénico.....	138
VI.VII.II.II.III Concentración de Arsénico en la temporada de lluvias.....	139
VI.VII.III Concentración de Hierro en el agua subterránea de la ciudad de Morelia.....	141
VI.VII.III.I Modelos de concentración de Hierro para el agua subterránea de la ciudad de Morelia en las 6 campañas de muestreo y descripción estadística.....	142
VI.VII.III.I.I Primera campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe).....	142
VI.VII.III.I.II Segunda campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe).....	143

VI.VII.III.I.III Tercera campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe).....	144
VI.VII.III.I.IV Cuarta campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe).....	144
VI.VII.III.I.V Quinta campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe).....	145
VI.VII.III.II Concentración de Hierro en la temporada de estiaje.....	147
VI.VII.III.III Concentración de hierro en la temporada de lluvias.....	148
VI.VII.V <i>Población afectada por metales pesados en el agua subterránea</i>	150
VI.VII.V.I Población afectada por Manganeseo.....	150
VI.VII.V.II Población afectada por Arsénico.....	150
VI.VII.V.III Población afectada por Hierro.....	151
VI. VIII ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO.....	153
VI.VIII.I <i>Análisis bacteriológico para la temporada de estiaje</i>	153
VI.VIII.II <i>Análisis bacteriológico para la temporada de lluvias</i>	154
VI.VIII.III <i>Análisis de la concentración de bacterias en el agua subterránea de la ciudad de Morelia</i>	154
VI.VIII.IV <i>E. Coli en la temporada de estiaje en el agua subterránea de la ciudad de Morelia</i>	155
VI.VIII.V <i>E. Coli en la temporada de lluvias en el agua subterránea de la ciudad de Morelia</i>	157
VI.VIII.VI <i>E. Coli en la temporada de estiaje y lluvias en el agua subterránea de la ciudad de Morelia</i>	157
VI.IX ISÓTOPOS ESTABLES.....	159
VII CONCLUSIONES.....	162
VIII BIBLIOGRAFÍA.....	164
IX ANEXOS.....	171

INDICE DE FIGURAS

FIGURA.1 MAPA DE FLUJO SUBTERRÁNEO EN LA CIUDAD DE MORELIA (GARDUÑO-MONROY ET AL., 2014)	16
FIGURA 2: LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CIUDAD DE MORELIA.....	19
FIGURA 3: TIPOS DE CLIMA EN EL ESTADO DE MICHOACÁN DE OCAMPO	20
FIGURA 4. UBICACIÓN DE LA CIUDAD DE MORELIA DENTRO DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO (ISRADE-ALCÁNTARA ET AL., 2010).	22
FIGURA 5: GRUPOS DE SUELOS EN EL MUNICIPIO DE MORELIA	23
FIGURA 6: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA EN LA CIUDAD DE MORELIA, (GARDUÑO-MONROY ET AL., 2014).....	25
FIGURA 7: FLUJO SUBTERRÁNEO DE SO A NE EN LA CIUDAD DE MORELIA (GARDUÑO-MONROY ET AL., 2014).....	28
FIGURA 8: UBICACIÓN DE LOS POZOS EN EL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO, (CONAGUA, 2007)	29
FIGURA 9. LAS CURVAS DE IGUAL ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO EN METROS DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO (CONAGUA, 2007)	30
FIGURA 10. LOCALIZACIÓN DE APROVECHAMIENTOS CON PRUEBA DE BOMBEO (CONAGUA, 2007)	32
FIGURA 11: INTERACCIONES DE ACUÍFEROS (KRESIC, 2007).....	35
FIGURA 12: ACUÍFERO CONFINADO, LIBRE Y COLGADO (KRESIC, 2007)	36
FIGURA 13: ACUÍFERO BASIN FILLED (SERVICIO GEOLÓGICO DE LOS ESTADOS UNIDOS), ESTE ACUÍFERO SERÍA MUY SEMEJANTE AL DE CUITZEO/MORELIA.....	37
FIGURA 14: GEOQUÍMICA EL FLUJO SUBTERRÁNEO (TÓTH, 2000).....	39
FIGURA 15. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN	57
FIGURA 16. COMPARACIÓN ENTRE LAS DISTRIBUCIONES DE LA LEY DE POTENCIA NORMAL Y NORMAL-LOGARÍTMICA	67
FIGURA 17. TEMPERATURA EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO DE POZOS Y MANANTIALES DE LA CIUDAD DE MORELIA. SE OBSERVA UNA TEMPERATURA MEDIA DE 25.4 °C	69
FIGURA 18. HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA TEMPERATURA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE.....	70
FIGURA 19. GRÁFICO PP-PLOT DE LA TEMPERATURA DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA LA TEMPORADA DE ESTIAJE	71
FIGURA 20. DIAGRAMA DE CAJA DE LAS TEMPERATURAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS.....	71
FIGURA 21. HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIAS DE LA TEMPERATURA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	72
FIGURA 22. GRÁFICO PP-PLOT DE TEMPERATURA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN TEMPORADA DE LLUVIAS.....	73
FIGURA 23. DIAGRAMA DE CAJA DE LAS TEMPERATURAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	73

FIGURA 24. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN TEMPORADA DE ESTIAJE...	74
FIGURA 25. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS.	77
FIGURA 26. PH EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO DE POZOS Y MANANTIALES DE LA CIUDAD DE MORELIA.	79
FIGURA 27. HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIAS DEL PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	80
FIGURA 28. GRÁFICO PP-PLOT DE PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN TEMPORADA DE ESTIAJE	81
FIGURA 29. DIAGRAMA DE CAJA DE PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	81
FIGURA 30. HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIAS DEL PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	82
FIGURA 31. GRÁFICO PP-PLOT DEL PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	83
FIGURA 32. DIAGRAMA DE CAJA DE PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	83
FIGURA 33. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN, EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE.	84
FIGURA 34. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	86
FIGURA 35. CONDUCTIVIDAD EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO DE POZOS Y MANANTIALES DE LA CIUDAD DE MORELIA.	88
FIGURA 36. HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIAS DE LA CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	89
FIGURA 37. GRÁFICO PP-PLOT CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	90
FIGURA 38. DIAGRAMA DE CAJA DE CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN TEMPORADA DE ESTIAJE	90
FIGURA 39. HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIAS DE LA CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LLUVIAS	91
FIGURA 40. GRÁFICO PP-PLOT DE LA CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	92
FIGURA 41. DIAGRAMA DE CAJA DE CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS.	92
FIGURA 42. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE.	93
FIGURA 43. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS.	95

FIGURA 44. OXÍGENO DISUELTO EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO DE POZOS Y MANANTIALES DE LA CIUDAD DE MORELIA.....	98
FIGURA 45. HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIAS DEL OXÍGENO DISUELTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	99
FIGURA 46. GRÁFICO PP-PLOT OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE.....	100
FIGURA 47. DIAGRAMA DE CAJA DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE SECA	100
FIGURA 48. HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIAS DEL OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS.	101
GRÁFICO 49. GRÁFICO PP-PLOT OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	102
FIGURA 50. DIAGRAMA DE CAJA DEL OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	102
FIGURA 51. MAPA DE OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE.	103
FIGURA 52. MAPA DE OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS.	106
FIGURA 53: DIAGRAMA DE PIPER PARA LAS MUESTRAS DE AGUA DE LA CIUDAD DE MORELIA	108
FIGURA 54. CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO	118
FIGURA 55. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO.	119
FIGURA 56. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO.	120
FIGURA 57. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO.	121
FIGURA 58. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA CUARTA CAMPAÑA DE MUESTREO.	121
FIGURA 59. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA QUINTA CAMPAÑA DE MUESTREO .	122
FIGURA 60. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA SEXTA CAMPAÑA DE MUESTREO. ...	123
FIGURA 61. UNIDADES GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN (ELABORADO A PARTIR DE REGISTROS DE GARDUÑO-MONROY).....	126
FIGURA 62. MAPA DE CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	127
FIGURA 63. MAPA DE CONCENTRACIÓN DE MANGANESO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	129
FIGURA 64. CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO.....	131

FIGURA 65. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO.....	132
FIGURA 66. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO.	133
FIGURA 67. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO.....	134
FIGURA 68. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA CUARTA CAMPAÑA DE MUESTREO	135
FIGURA 69. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA QUINTA CAMPAÑA DE MUESTREO.....	135
FIGURA 70. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA SEXTA CAMPAÑA DE MUESTREO.....	136
FIGURA 71. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE.....	139
FIGURA 72. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS.....	140
FIGURA 73. CONCENTRACIÓN DE HIERRO ENTRE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO ..	141
FIGURA 74. CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL ÚLTIMO AÑO DE MUESTREO, CAMPAÑAS 5 Y 6	142
FIGURA 75. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO.....	143
FIGURA 76. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO	143
FIGURA 77. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO.....	144
FIGURA 78. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA CUARTA CAMPAÑA DE MUESTREO	145
FIGURA 79. MODELO DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA QUINTA CAMPAÑA DE MUESTREO.....	146
FIGURA 80. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	148
FIGURA 81. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS.....	149
FIGURA 82. AGEBS CON METALES PESADOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA	152
FIGURA 83. COLIFORMES TOTALES, BACTERIAS MESOFILICAS Y E. COLI EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	153
FIGURA 84. BACTERIAS MESOFÍLICAS, COLIFORMES TOTALES Y E.COLI EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	154
FIGURA 85. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE E. COLI EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE	156

FIGURA 86. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE E. COLI EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS	157
FIGURA 87. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE E. COLI EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS Y ESTIAJE	158
FIGURA 88. LÍNEA METEÓRICA DE LA REPÚBLICA MEXICANA CONTRASTADA CON LOS VALORES DE ISÓTOPOS ESTABLES OBTENIDOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	159
FIGURA 89. LÍNEA METEÓRICA PARA EL CENTRO DEL PAÍS CONTRASTADA CON LOS VALORES DE ISÓTOPOS ESTABLES OBTENIDOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	160
FIGURA 90. LÍNEA METEÓRICA PARA MICHOACÁN CONTRASTADA CON LOS VALORES DE ISÓTOPOS ESTABLES OBTENIDOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	161

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: <i>FLUJOS DE AGUA SUBTERRÁNEA: ELABORADO A PARTIR DE (ÁVILA-OLIVERA Y GARDUÑO-MONROY, 2007)</i>	26
TABLA 2: <i>INTERVALO DE PROFUNDIDAD DE LOS POZOS DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO (CONAGUA, 2007)</i>	31
TABLA 3: <i>TIPOS DE ACUÍFEROS (KRESIC, 2007)</i>	34
TABLA 4: <i>CONSTITUYENTES PRIMARIOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA (KRESIC, 2007)</i>	41
TABLA 5: <i>CONSTITUYENTES SECUNDARIOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA (KRESIC, 2007)</i>	42
TABLA 6. <i>LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES ESTABLECIDOS POR LA NOM-127-SSA1-1994</i>	43
TABLA 7. <i>CONSTITUYENTES PRIMARIOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA (HEM, 1989)</i>	49
TABLA 8: <i>CONSTITUYENTES SECUNDARIOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA (HEM, 1989)</i>	52
TABLA 9: <i>FECHAS DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO DE POZOS Y MANANTIALES</i>	55
TABLA 10: <i>PUNTOS DE MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN</i>	57
TABLA 11. <i>ANÁLISIS REALIZADOS A LAS MUESTRAS DE AGUA DE LA CIUDAD DE MORELIA</i>	59
TABLA 12. <i>CUARTILES Y MOMENTOS DE LA TEMPERATURA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE</i>	71
TABLA 13. <i>CUARTILES Y MOMENTOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA TEMPERATURA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS</i>	73
TABLA 14. <i>CUARTILES Y MOMENTOS DEL PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE</i>	80
TABLA 15. <i>CUARTILES Y MOMENTOS DEL PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS</i>	82
TABLA 16. <i>CUARTILES Y MOMENTOS DE LA CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE</i>	89
TABLA 17. <i>CUARTILES Y MOMENTOS DE LA CONDUCTIVIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS</i>	91
TABLA 18. <i>CUARTILES Y MOMENTOS DEL OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE</i>	99
TABLA 19. <i>CUARTILES Y MOMENTOS DEL OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA TEMPORADA DE LLUVIAS</i>	101
TABLA 20. <i>MODELOS DE CONCENTRACIÓN DE MN PARA TRES AÑOS DE MUESTREO</i>	124
TABLA 21. <i>MODELOS DE CONCENTRACIÓN PARA EL ARSÉNICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE MORELIA, MICHOACÁN</i>	137
TABLA 22. <i>MODELO DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CIUDAD DE MORELIA</i>	147

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la WWPA (2016) se estima que aproximadamente la mitad de la población mundial depende del agua subterránea para consumo humano, lo cual lleva a un gran interés hacia el entendimiento de dicho recurso y su manejo adecuado. De igual forma el agua subterránea es uno de los principales factores en el crecimiento económico y social de México (Salcedo-Sánchez *et al.*, 2017).

En México, el agua subterránea es de especial importancia, ya que abastece el 37% (29,500 Mm³ por año), del uso total de agua del país (79,800 Mm³ por año). El agua subterránea es principalmente usada para la agricultura (20,500 Mm³ por año), utilizada para el riego de cultivos en poco más de un tercio del área de riego total del país (acerca de 20 millones de hectáreas). También aproximadamente 75 millones de personas (55 millones en áreas urbanas y 20 millones en áreas rurales) dependen de esta fuente de suministro de agua (7,000 Mm³ por año). Adicionalmente, el 50 % de las industrias que se autoabastecen (que toman agua de ríos, corrientes o acuíferos) usan agua subterránea en sus procesos (1,900 Mm³ por año) (CNA, 2010).

Para el caso de Morelia, existen muchos estudios sobre la geología, sin embargo, aún no se cuenta con suficiente información sobre el acuífero de esta subcuenca, siendo los trabajos más significativos los de Garduño-Monroy *et al.* (2014), Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007), y algunos informes de la (CONAGUA, 2007) este último haciendo un estudio a nivel regional.

De acuerdo con Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007) existen tres grandes acuíferos en la ciudad de Morelia:

- 1) Acuífero profundo de flujo intermedio, el cual tiene gran conductividad hidráulica secundaria ya que este se encuentra ubicado dentro de un techo de andesitas muy fracturadas, este acuífero está bajo presión de ignimbritas, es un acuífero confinado y una estimación de la superficie freática que va de los 100 a los 150 metros.

- 2) Acuífero de flujo local, el cual es somero ya que su profundidad se encuentra desde algunos metros y puede llegar hasta los 80 metros. Se mantiene entre los poros de los depósitos lacustres y fluviolacustres del Mioceno-Plioceno. La superficie freática de este acuífero es capaz de subir y bajar entre los depósitos más permeables según la temporada

de lluvia o de estiaje, incluso de su explotación, lo cual lo clasifica en un acuífero de tipo libre o bien funciona como un acuitardo

3) El tercer acuífero abastece a los manantiales más importantes de la ciudad de Morelia, entre los que se encuentran; *La Mintzita*, los de *La Colina* y *Manantiales*. Este acuífero está localizado entre las lavas del vulcanismo tipo semi escudo y podría ser el más vulnerable de los tres debido a la estructura de las rocas que lo almacenan.

La elaboración de mapas de la superficie freática del sistema acuífero de la ciudad de Morelia, se ha podido llevar a cabo con datos proporcionados por el OOAPAS (Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia) entre los cuales están la profundidad del nivel freático y los valores de temperatura, con dicha información, Garduño-Monroy *et al.* (2014) han realizado interpolaciones del nivel freático con la finalidad de observar las líneas de flujo, sin embargo, por la falta de datos geoquímicos, solo se ha podido conjeturar un flujo generalizado de los acuíferos de la ciudad de Morelia (*figura 1*).

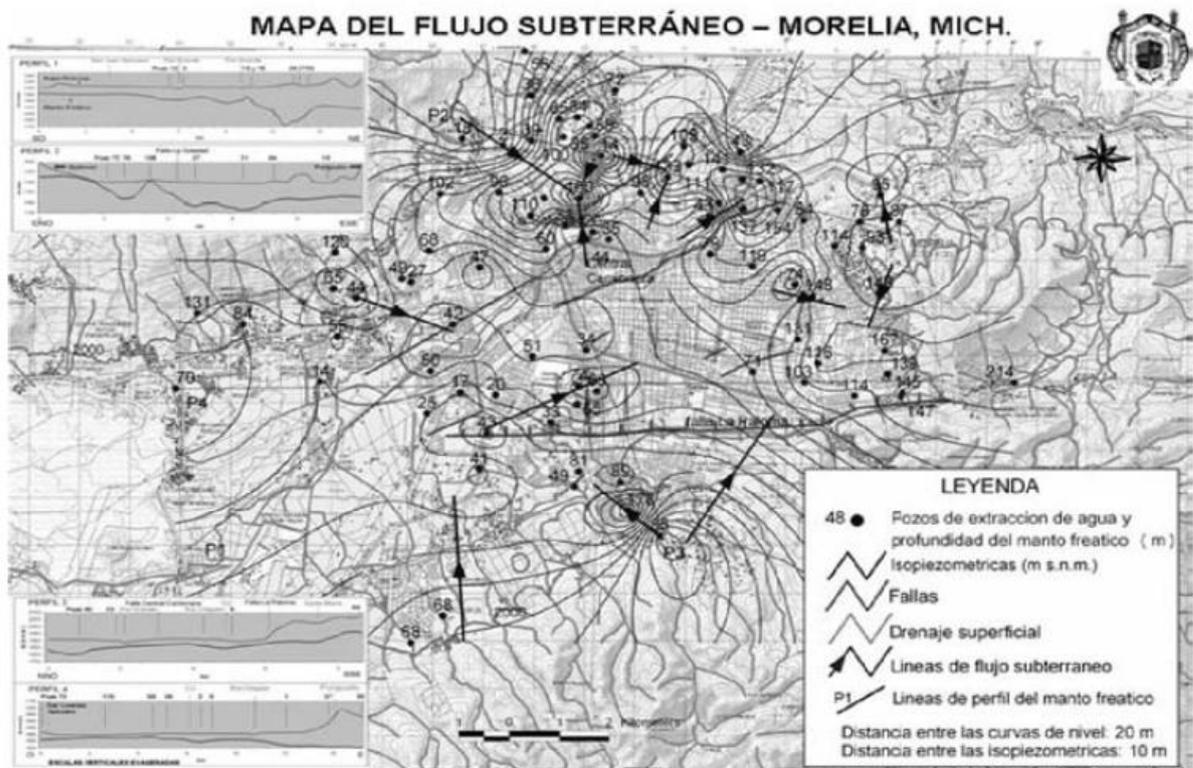


Figura.1 Mapa de flujo subterráneo en la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 2014)

Garduño-Monroy *et al.* (2014) han encontrado también abatimientos que van de pocas decenas hasta más de 150 metros y a partir de este y otros datos de problemas de subsidencia en la subcuenca de la ciudad de Morelia, consideran que, debido a la intensa extracción de agua, al sistema acuífero le es imposible recargarse en la temporada de lluvia, es decir, se encuentra sobreexplotado. Un estudio de la CONAGUA (2007), revela que existe un déficit de 3, 328, 771 m^3 anuales en el sistema acuífero de Morelia-Queréndaro.

La fuerte dinámica demográfica y la presión que esta ha generado en la urbanización de nuevos espacios en la periferia de la ciudad de Morelia, desde la década de los ochenta, reflejan las debilidades de los planes de desarrollo urbano, los cuales no han sido capaces de frenar la expansión de la ciudad. Situación acorde a las estimaciones demográficas, continuará durante los próximos 20 años (Hernández y Vieyra, 2010). Esta dinámica demográfica ha sido un factor que detona el déficit anual de agua en los acuíferos de Morelia.

En este trabajo se intentará conocer la dinámica de los acuíferos que abastecen a la ciudad de Morelia, mediante el análisis de algunas características geoquímicas, fisicoquímicas, isotópicas, aniónicas y de elementos mayores y menores, con las cuales se tendrá mayor información sobre el agua subterránea y los flujos de esta. Con esta información se tendrá un panorama más amplio sobre el tema, y la información puede ser utilizada para la toma de decisiones.

II. OBJETIVOS

II.I Objetivo general y particulares

1) Conocer la dinámica del sistema acuífero que abastece a la ciudad de Morelia, Michoacán

- Corroborar la existencia de tres grandes acuíferos que abastecen la ciudad de Morelia
- Identificar las principales zonas de recarga del sistema acuífero que abastece a la ciudad de Morelia
- Caracterizar geoquímicamente el agua de la ciudad.
- Identificar si existe contaminación por metales pesados en el sistema acuífero que abastece a la ciudad de Morelia.
- Identificar si existe contaminación por *E.Coli* en el sistema acuífero

III. ÁREA DE ESTUDIO

III.I Localización geográfica

El área de estudio es la ciudad de Morelia, capital del estado de Michoacán, el cual colinda al norte con Jalisco, Guanajuato y Querétaro; al este con Querétaro, México y Guerrero; al sur con Guerrero y el océano Pacífico; y al oeste con el océano Pacífico, Colima y Jalisco (Figura 2). La localización del estado se encuentra al norte 20° 24'; al sur 17°55' latitud norte, al este 100°04'; al Oeste 103° 44' de longitud Oeste (INEGI, 2011).

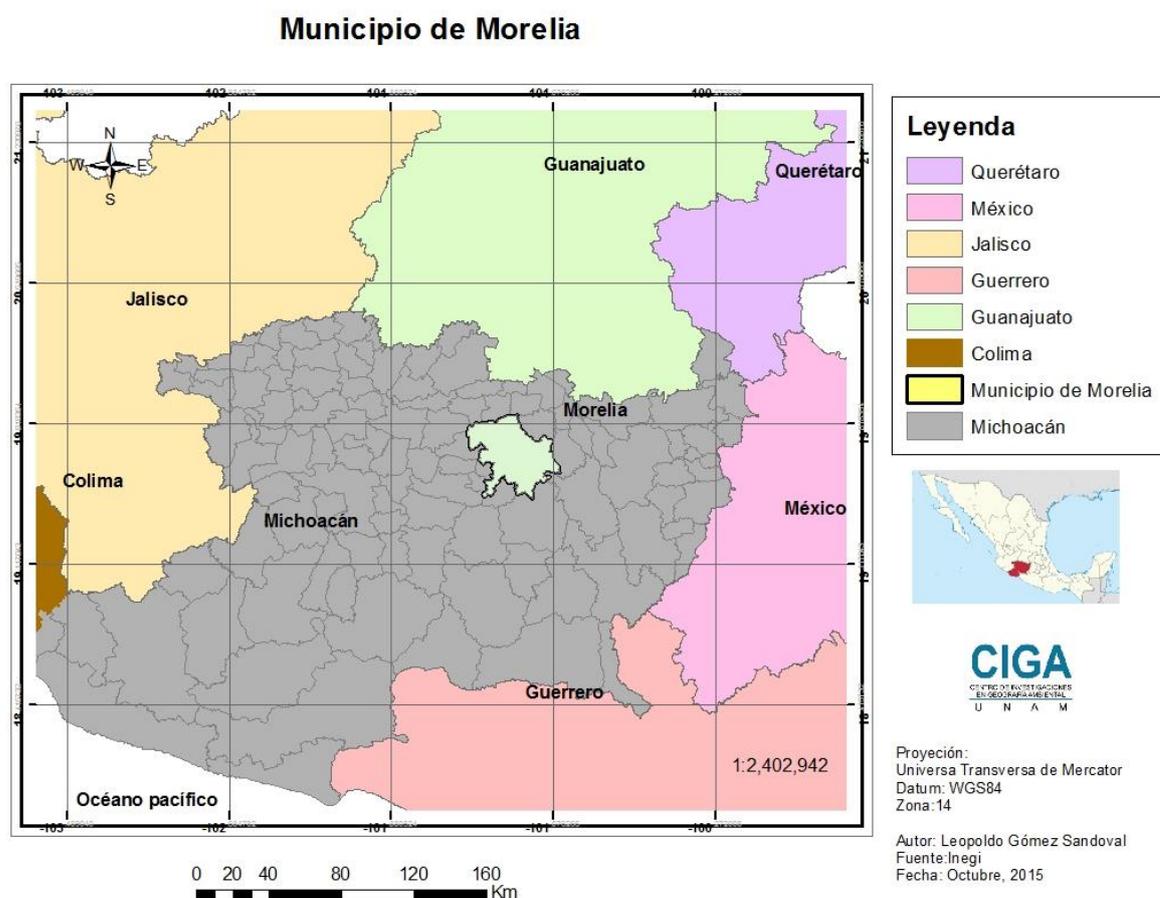


Figura 2: Localización geográfica de la ciudad de Morelia

Morelia se localiza entre los paralelos 19°52' y 19°26' de latitud norte (figura 2); los meridianos 101°02' y 101°31' de longitud oeste; altitud entre 1,500 y 3,000 metros. La ciudad colinda al norte con los municipios de Huaniqueo, Chucándiro, Copándaro y Tarímbaro; al este con los municipios de Tarímbaro, Charo, Tzitzio y Madero; al sur con los municipios, Acuitzio, Pátzcuaro y Huiramba; al oeste con los municipios de Huiramba, Lagunillas, Tzintzuntzan, Quiroga, Coeneo y Huaniqueo. La ciudad ocupa el

2.04% de la superficie del estado. Cuenta con 207 localidades y una población total de 784 776 habitantes (INEGI, 2015).

III.II Clima

Existen varios tipos de clima en el Estado de Michoacán (Figura 3), entre los cuatro principales de acuerdo con la clasificación de Köppen se encuentran; al suroeste de la ciudad el (Aw) Tropical lluvioso con lluvias predominantes en verano, en la depresión del Río Tepalcatepec se encuentra el clima (Bs) seco estepario, al norte el (Cw) templado con lluvias en verano y en las partes más altas del Sistema Volcánico Transversal el (Cf) templado con lluvias todo el año (Antaramián, 2012).

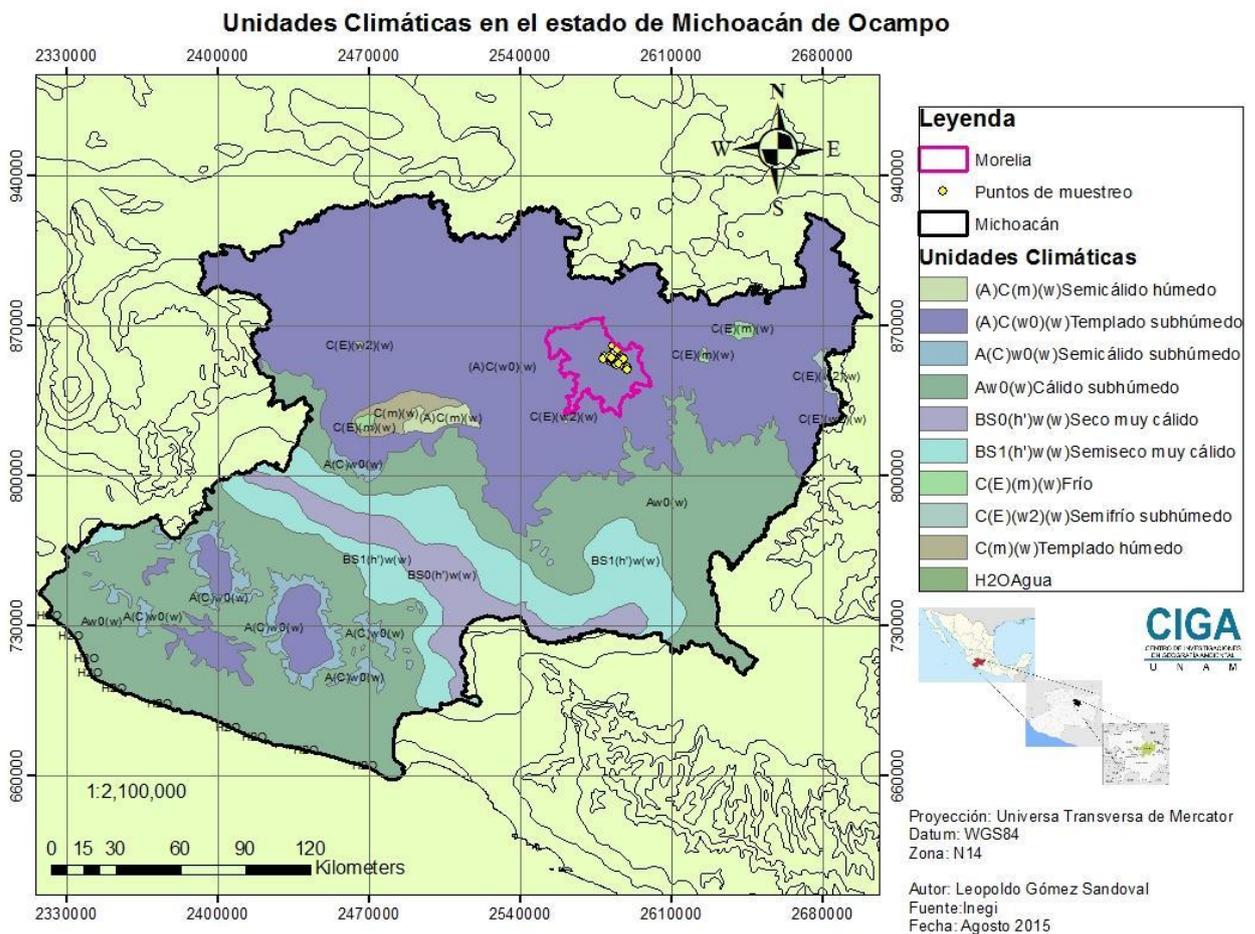


Figura 3: Tipos de clima en el Estado de Michoacán de Ocampo

La amplitud altitudinal de 2°28' que tiene Michoacán respecto al sur del trópico de cáncer influye poco en la variación climática, sin embargo, la variación altitudinal es la que

genera los diferentes tipos de clima en el estado, ya que la variación va desde el nivel del mar hasta el punto más alto (volcán de Tancítaro) a 3 840 metros, Morelia se encuentra a una altura de entre 1980 y 2100 de acuerdo con Google earth.

La época de estiaje de la zona se presenta en el periodo de octubre a mayo, mientras que la temporada de lluvias se presenta de junio a septiembre, con valores máximos de precipitación en el mes de julio (CONAGUA, 2007), la precipitación media anual es de 741 mm (INEGI, 2011). Las temperaturas más altas se presentan de abril a septiembre, el promedio de temperatura anual para Morelia es de 18.7 (INEGI, 2011). Los vientos dominantes provienen del suroeste y del noroeste, con variables en julio, agosto y octubre, con intensidad de 2 a 14.5 km por hora. (CONAGUA, 2007).

De acuerdo con el régimen térmico para Michoacán se conocen tres zonas generales 1) Tropical en altitudes menores a 1300 metros 2) Templada subtropical de 1300 a 1800 metros y 3) Templada, mayor a 1800 metros (Huaruntunián, 2012).

III.III Hidrología

En el Estado de Michoacán se encuentran dos de las tres cuencas hidrológicas húmedas más importantes del país: el sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago y el río Balsas, áreas que sustentan una alta densidad de población humana. (Israde-Alcántara, 2005). La cuenca Lerma-Chapala-Santiago es de peculiar importancia, pues esta es drenada por el segundo río más largo del país, solo superándolo el Río Bravo (Tamayo, 1946).

A causa de la sobreexplotación de los acuíferos y a la contaminación, la cuenca Lerma-Chapala-Santiago se encuentra en crisis, ya que presenta escasez de agua. (Schoendube, 2005).

La ciudad de Morelia se localiza en una sub-cuenca-fluvio-lacustre comprendida dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo (Garduño-Monroy, 2014), la cual es parte de la región hidrológica número 12 (RH12), conocida como Lerma-Chapala (CONAGUA, 2007).

En la figura 4 se puede observar la ubicación de la ciudad de Morelia dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo, sus dos principales ríos, y el desemboque del río grande al lago de Cuitzeo.

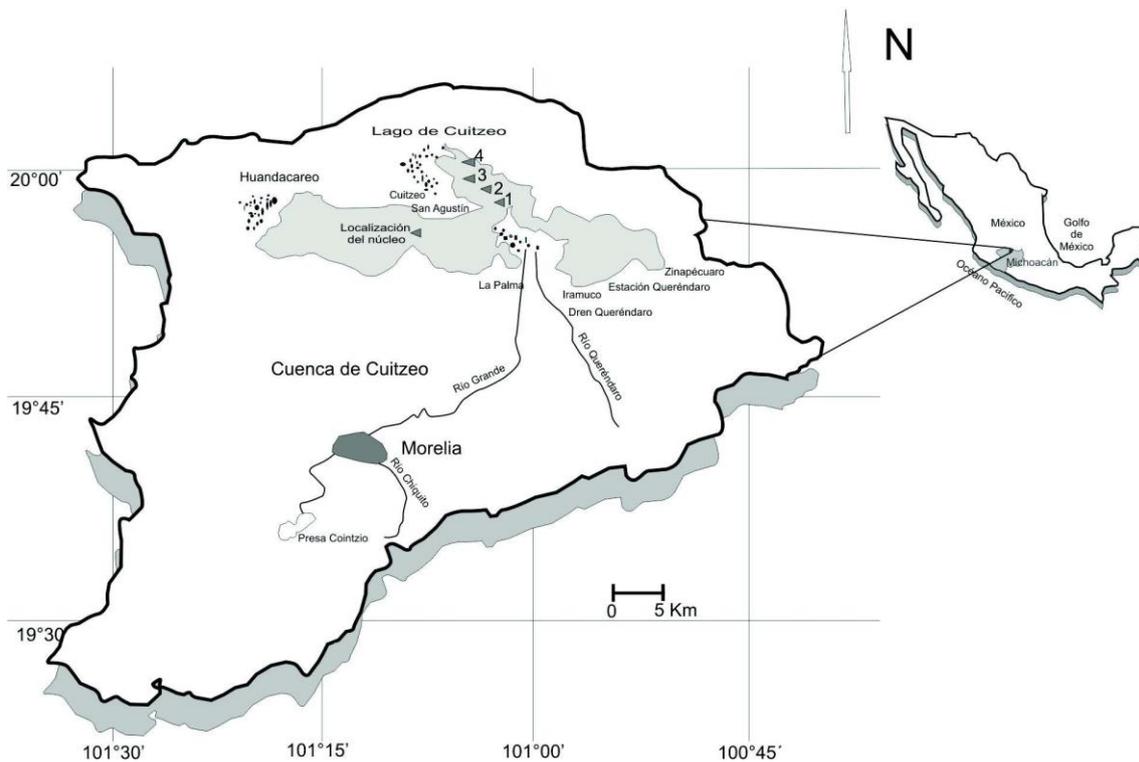


Figura 4. Ubicación de la ciudad de Morelia dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo (Israde-Alcántara et al., 2010).

El *Río Grande*, el *Río Chiquito* y el *Río La Hoya* o *Arroyo de Tierras* son los tres ríos que constituyen la red hidrográfica de la ciudad de Morelia. El *Río Grande* nace por la unión de varios arroyos de la zona montañosa al sur de la ciudad, su curso se mantiene suroeste-noreste (CONAGUA, 2007). La escorrentía del *Río Chiquito* y *La Hoya* o *Arroyo de Tierras* nacen en la Sierra de Mil Cumbres, corren sureste-noreste y se unen al *Río Grande* después de recorrer la zona urbana (Arreygue-Rocha et al., 2004).

Entre las principales corrientes de agua perennes se encuentran el *Río Grande*, *Tupataro*, *El Tejocote* y *Los Sauces*, entre las corrientes intermitentes del municipio se pueden encontrar las corrientes; *Río Chiquito*, *Santa Inés*, *Los Huiramos*, *El Tecolote*, *Los pirules*, *San José*, *El Guayabito*, *Loma larga*, *La Higuera*, *Jaripeo*, *La joya*, *La Tinaja* y *San Andrés*. Los cuerpos de agua perennes son: *El Padre*, *Amando*, *Loma Caliente*, *Cointzio*, *El Bañito*, *La Mintzita*, *Los Venares* y *Umécuaro*. (INEGI, 2009). Los arroyos más conocidos en la ciudad de Morelia son *La Zarza*, *La Pitaya*, su presa más importante es la de *Cointzio* y otras más pequeñas como *Laja Caliente* y *La Mintzita*.

III.IV Suelos

Debido a la variada riqueza de aspectos físicos, biológicos, geológicos y de relieve de Michoacán, se han desarrollado en el estado 14 de las 18 unidades de suelo reportadas para la República Mexicana (Ortiz y García, 1993). De las cuales siete son las más importantes por la superficie que ocupan (leptosol, regosol, luvisol, acrisol, andosol, vertisol, phaozem) y los restantes son cambisol, fluvisol, planosol, gleysol, solonchack, castañozem e histosol se presentan en menor proporción (González *et al.*, 2005).

En el municipio de Morelia, se presentan 7 grupos de suelos, los cuales son: andosol, leptosol, luvisol, phaozem, planosol, unbrisol, y vertisol. En la figura 5 se puede observarse la distribución espacial de estas unidades de suelo en Morelia, así como la zona urbana.

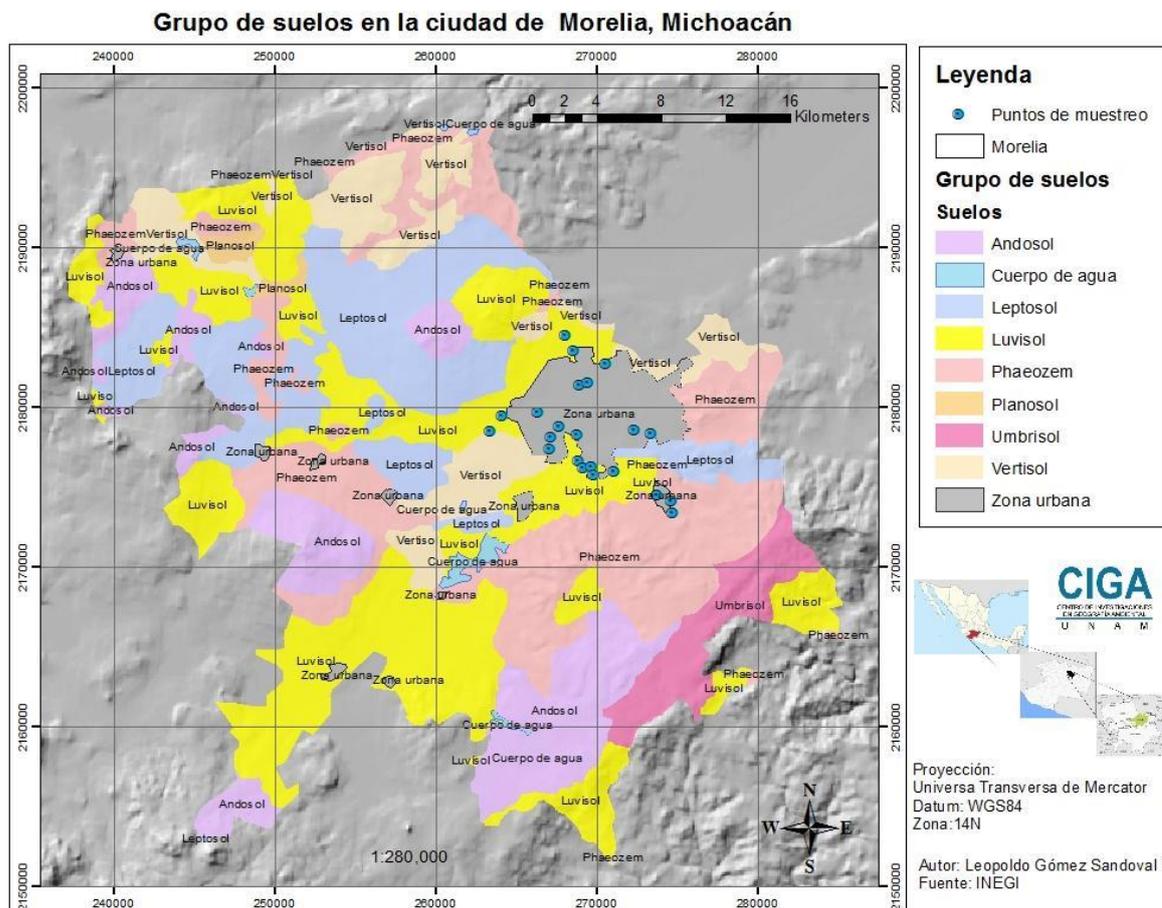


Figura 5: Grupos de suelos en el municipio de Morelia

III.V Geología local

Existen diferentes trabajos que han descrito la Geología de Morelia, se ha considerado que los descritos por Garduño-Monroy (2014), sintetiza lo más importante para un estudio de Geohidrología, dividiendo en cinco siguientes unidades geológicas.

1.- Andesitas de Mil-Cumbres del Mioceno medio-superior (>19 Ma.)

Esta unidad se encuentra aflorando en la cañada del Río Chiquito al sureste de la ciudad y se caracteriza por un paquete de lavas andesíticas gris-verdosas intensamente alteradas y fracturadas con presencia de ventilas de calcita o calcedonia. Se les asigna un espesor superior a 200 metros (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2005). Los flujos piroclásticos blancos y niveles soldados color vino sobreyacen las andesitas, en la zona de Ocolusen se observan intercalaciones con brechas y productos piroclásticos alterados de color rojo-amarillo.

2.- Flujos Piroclásticos Ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia) (19Ma)

A los productos piroclásticos de composición riolítica generalmente de color rosa se les llama cantera, estos productos son ricos en líticos de andesitas, dacitas, ignimbritas y pómez. Esta unidad tiene un espesor de 200 metros, esta roca piroclástica se denomina ignimbrita, se puede dividir en varios horizontes (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2005). Sus mejores exposiciones se encuentran en (figura 6) edificio volcánico de la caldera de Atecuaro, la zona del club campestre de Morelia, escarpe de la falla La Paloma, Loma de Santa María y Tecnológico de Monterrey (Garduño-Monroy, 2014).

3.- Complejo Volcánico Miocénico del cerro Punhuato

Este complejo es una secuencia de rocas constituida por derrames de lava y brechas andesíticas y dacíticas, a veces soldadas ya que su estructura y su morfología está asociada a un complejo de domos. Dicho complejo de domos presenta una estructura de herradura abierta hacia el oeste, el material acumulado después de la destrucción del cono forma un abanico al oriente de la ciudad, que evidencia una explosión lateral, la edad de la unidad está ubicada en el Mioceno (Israde-Alcántara, 1995). Estos domos están severamente afectados por fallas normales, algunas de ellas con evidencias de cortar a suelos recientes.

4.- Secuencia Fluvio-Lacustre del Mioceno-Plioceno

Esta secuencia aflora en la parte sur y oriente de Morelia, caracterizada por limos y arcillas, cuyo espesor es de 60 metros y presenta basculamiento de 5° grados hacia el sur. En la colonia “La Huerta” ubicada al suroeste de la ciudad, la secuencia se compone de cenizas volcánicas con matriz arcillosa, alternada con niveles arcillo-limosos. En el libramiento norte y altura del *Río Grande* se presentan conglomerados y niveles de arenas y limos afectados por la falla de “La Central Camionera”, una de las más importantes de la ciudad de dirección WSW_ENE y que se encuentra en el centro de la ciudad. En la zona industrial, la cual se encuentra al noreste de Morelia, la secuencia fluvio-lacustre está caracterizada por arcillas y limos cafés y cenizas blancas que sobreyacen a las brechas y lavas del Punhuato. Es allí donde esa secuencia presenta su máxima expresión (Israde-Alcántara, 1995).

5.- Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco (<3Ma)

Esta secuencia corresponde a los productos del volcanismo monogenético del CVTM y es la unidad volcánica más reciente. Está conformada por lavas andesíticas y eventualmente andesítico-basálticas que provienen de los volcanes *El Quinceo*, *Las Tetillas*, *el Cerro del Águila*. El volcán *Las Tetillas* es más joven que *El Quinceo* y ambos son de tipo semi-escudo (Garduño *et al.*, 2014).

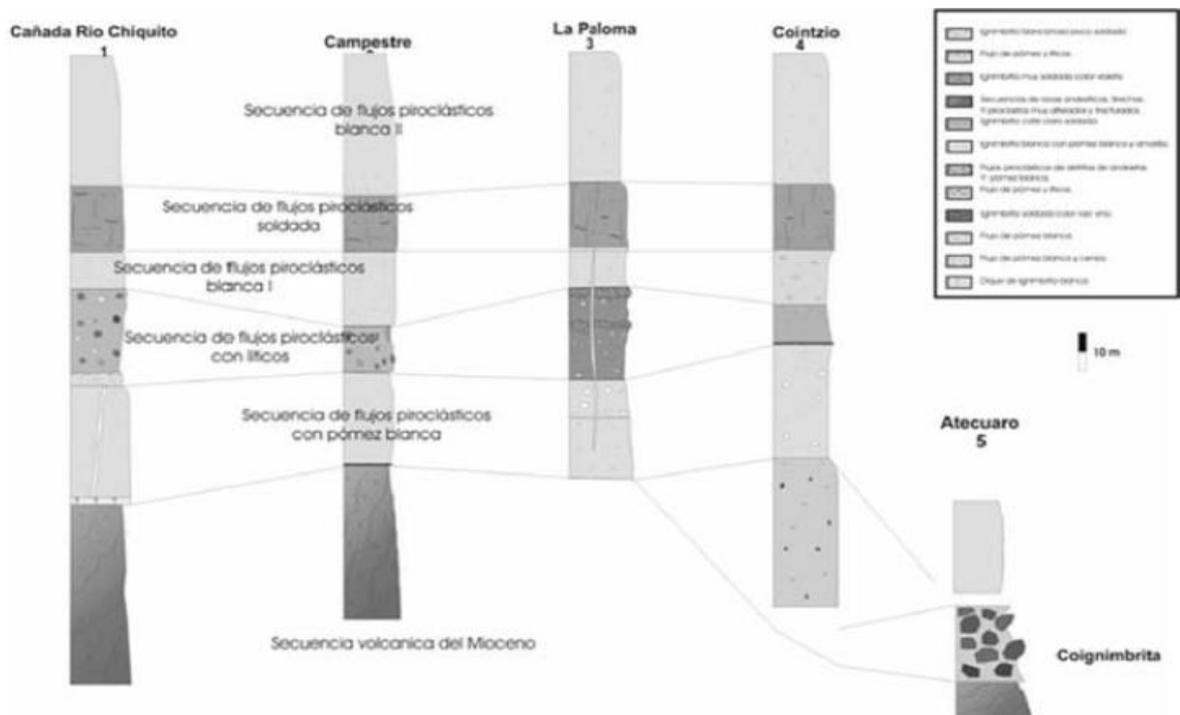


Figura 6: Columna estratigráfica en la ciudad de Morelia, (Garduño-Monroy *et al.*, 2014).

III.VI Caracterización geohidrológica de la ciudad de Morelia

La CONAGUA (2007) identificó tres acuíferos en la ciudad de Morelia, sin embargo, Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007) hacen un análisis más amplio sobre la geohidrología de dichos acuíferos, en el cual también encontraron tres acuíferos, uno profundo, uno somero y otro alojado en los volcanes de semi-escudo (tabla 1).

	Acuífero 1	Acuífero 2	Acuífero 3
Tipo de Acuífero	Profundo	Somero	Libre
Flujo	Intermedio	Local	Intermedio
Geología	Techo de andesitas fracturadas, bajo presión de ignimbritas	Depósitos lacustres y fluviolacustres del Mioceno-Plioceno	Ignimbritas y andesitas
Tipo	Confinado	Libre	Libre
Superficie freática (profundidad)	100 y 150 m	Hasta 80 m aproximadamente	
Origen			Quinceo
Da lugar a			Manantial la Mintzita, La colina y Manantiales.

Tabla 1: *Flujos de agua subterránea: Elaborado a partir de (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007)*

III.VI.I Explotación de acuíferos

El agua subterránea es generalmente de buena calidad, requiere de menos tratamiento, por lo cual está creciendo su explotación, comparada con el agua superficial para el abasto de agua para tomar (Marinov *et al.*, 2017).

De acuerdo con (CNA, 2010) el número de acuíferos sobreexplotados ha incrementado de 32 en 1975 a 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2011, y 101 en 2008, los cuales están localizados en el centro, norte y noroeste de México, una región semi-árida y árida, la cual posee el 31% del agua total disponible en el país, pero concentra el 77% de la población total de México, incluyendo los principales centros de población.

En el caso de la ciudad de Morelia, la mayor explotación del sistema acuífero se presenta en el área norte y noreste de la ciudad de Morelia, en particular en los sectores Nueva España, República Norte y Revolución Norte, lugar donde se instalaron los primeros

pozos. Los niveles freáticos en estas colonias a lo largo de los últimos 17 años llegan a un abatimiento de hasta 100 metros. (Garduño *et al.*, 2014). Si el bombeo es excesivo puede bajar el nivel freático (*water table*), tanto que los pozos no podrían suministrar más agua (Marinov, Marinov, y Diminescu, 2017). Es importante implementar extracción sustentable y condiciones de operación, para los pozos localizados en la zona urbana (Salcedo-Sánchez *et al.*, 2016).

Por el diseño de la red de pozos, la parte norte de la ciudad estaría explotando los tres acuíferos, mientras que en la parte sur se estaría explotando a los acuíferos de la secuencia lacustre y el acuífero profundo en las ignimbritas y andesitas (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007). En una escala mayor, el déficit de agua del acuífero Morelia-Queréndaro según la CONAGUA (2007) es de -3.328771 hm^3 anuales.

La dinámica de explotación y no recarga en el área norte y noreste de la ciudad se acentúa debido a los diseños de pozos (lainer ranurado a todo lo largo del pozo), generando los grandes abatimientos observados desde 1999, los cuales son uno de los responsables de los Procesos de Subsistencia Creep Falla (PSCF) que vienen afectando la ciudad de Morelia desde 1983 (Garduño-Monroy *et al.*, 2014).

III.VI.II Flujo subterráneo

Por medio de mediciones del nivel freático y valores de temperatura Garduño *et al.* (2014) realizaron una interpolación del nivel freático en metros sobre el nivel de mar para encontrar las líneas de flujo, lo cual por falta de datos geoquímicos solo se pudo conjeturar (figura 1); sin embargo, con base a la geología y datos piezométricos se pudieron hacer varias consideraciones.

Por la geología del subsuelo y los datos piezométricos se puede afirmar que; 1) El acuífero formado por lavas del vulcanismo monogenético, tiene un flujo que comienza en el sector noroeste (Quinceo-Las Tetillas) y da lugar al surgimiento de agua en *Manantiales y La Colina*. 2) Los flujos del acuífero somero provenientes del cerro *El Águila*, estarían asociados con el manantial de *La Mintzita* y 3) El acuífero profundo, localizados en andesitas, tiene un flujo que comienza en el sur o suroeste, este acuífero se mezcla con el de la secuencia lacustre, debido al diseño de los pozos, ya que tiene tubos ranurados a lo largo de sus columnas (de 10 a 200 metros). En este acuífero la falla geológica *La Paloma* lejos de ser una barrera para la recarga es una aportadora de flujo subterráneo (Garduño-

Monroy *et al.*, 2014). La dirección principal del flujo subterráneo va desde el Oeste y Sur de la ciudad hacia el Noreste (Garduño-Monroy *et al.*, 2014) (figura 1).

III.VI.III Recarga de los principales acuíferos locales

El principal eje de drenaje que sigue el flujo subterráneo de la ciudad de Morelia tiene dirección SO-NE lo cual puede apreciarse en la *figura 7*. Las flechas oscuras son de la recarga proveniente del sur de Morelia y las más claras del Cerro del Quinceo-Las Tetillas. Cabe resaltar que los abatimientos registrados en ocho años ponen en claro la falta de equilibrio entre recarga y explotación.

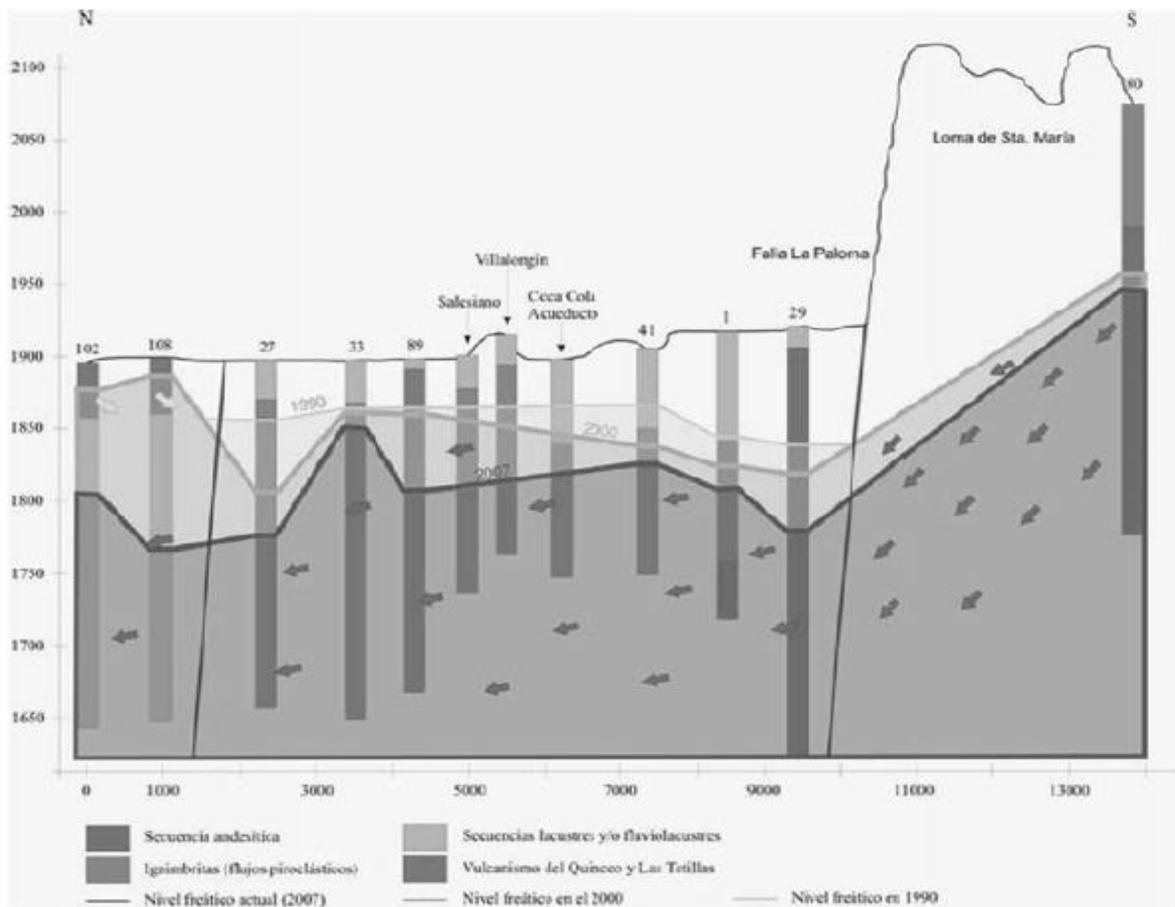


Figura 7: Flujo subterráneo de SO a NE en la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 2014).

La recarga de agua subterránea más importante esta al sur de la ciudad, en donde se encuentran la caldera de Atecuaro y las subcuencas de los ríos Grande y Chiquito. Otro flujo de recarga lo podemos encontrar en las lavas de *El Quinceo-Las Tetillas* y el *C. del Águila*.

Debido a la dirección de flujo subterráneo de agua *de* SO a NE, es posible afirmar que el área de descarga del sistema acuífero se encuentra al NE es decir hacia el Lago de Cuitzeo (Garduño-Monroy *et al.*, 2014).

III.VI.IV Caracterización hidráulica del acuífero Morelia-Queréndaro

Se localizan 963 pozos y 23 manantiales en el acuífero Morelia-Queréndaro (figura 8), el 52% de estos pozos pudo ser sondeado por la CONAGUA (2007) y con ello se conoce la profundidad del nivel estático (41.46%) y/o profundidad del nivel dinámico.

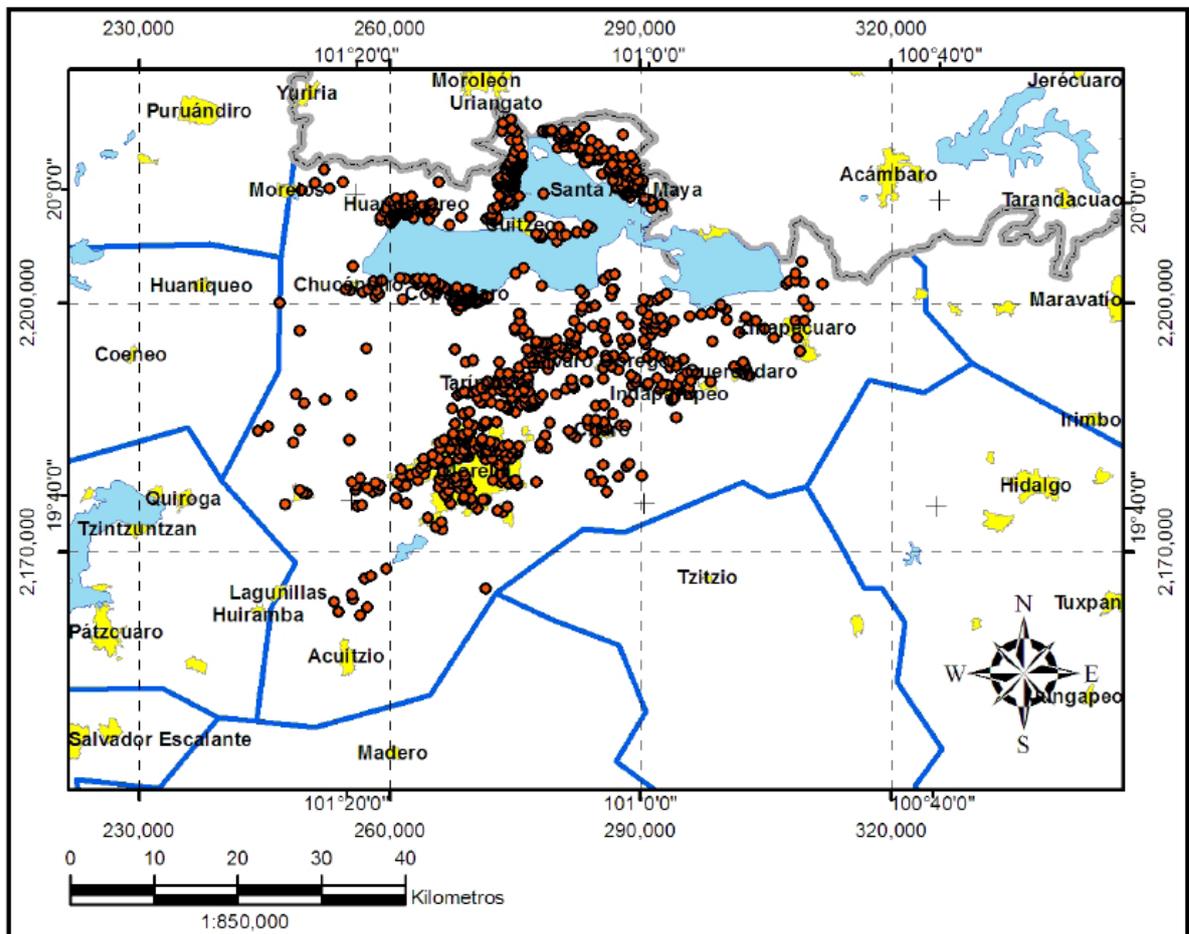


Figura 8: Ubicación de los pozos en el acuífero Morelia-Queréndaro, (CONAGUA, 2007)

III.VI.V Piezometría del acuífero Morelia-Queréndaro

En el acuífero Morelia-Queréndaro existen 88 pozos con una profundidad igual o menor a 10 metros, existen 135 pozos que tienen una profundidad de 10 a 25 metros, 54 pozos tienen una profundidad de los 20 a los 40 metros, 32 pozos que tienen una profundidad de los 30 a los 55 metros, 44 pozos que tienen una profundidad de 50 a 100 metros y, 29 pozos que reportan profundidades mayores a 100 metros, sin rebasar los 160. Los pozos de mayor profundidad son 4, sus rangos oscilan de los 167 a los 214 metros (CONAGUA, 2007).

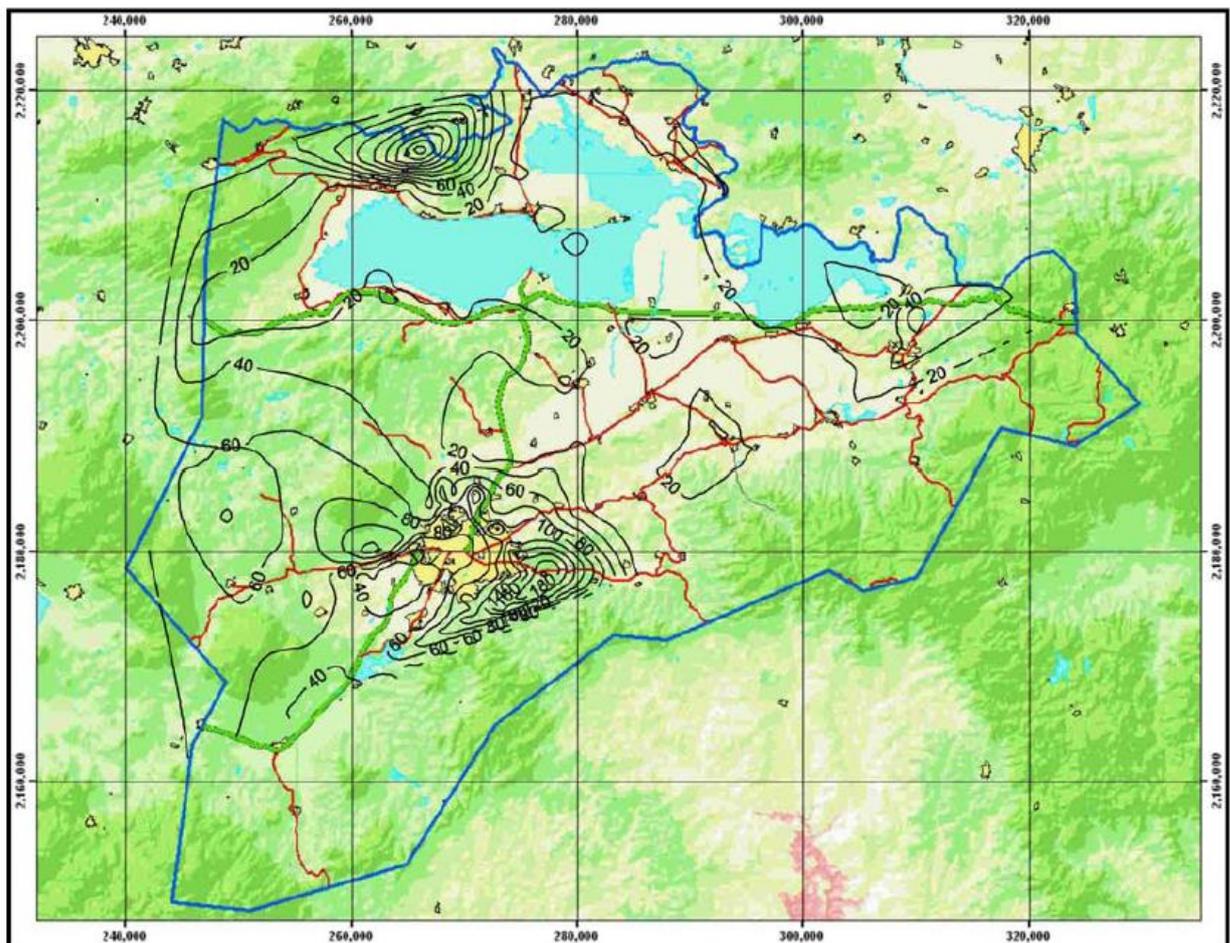


Figura 9. Las curvas de igual elevación del nivel estático en metros del acuífero Morelia-Queréndaro (CONAGUA, 2007)

La profundidad de los pozos a alto riesgo de contaminación va de los 30 a los 200 metros, es decir que los pozos más profundos tienen una mayor habilidad de filtrar contaminantes mediante diferentes capas de suelo, aunque, aun así, la mayoría de los pozos presenta contaminación microbiana (Elangovan *et al.*, 2018). Estos sistemas subterráneos

superficiales particularmente en regiones semi-áridas con bajas tasas de recarga, so generalmente más vulnerables que los sistemas profundos para dispersar los contaminantes (Esteller *et al.*, 2012) y (Lapworth *et al.*, 2017). Las curvas de elevación del nivel estático aparecen en la *figura 9* y *Tabla 2*

Profundidad de los pozos	
Rango de profundidad (metros)	Cantidad de pozos
0-10	88
10-25	135
25-40	54
40-55	32
50-100	44
100-160	29
160-214	4

Tabla 2: Intervalo de profundidad de los pozos del acuífero Morelia-Queréndaro (CONAGUA, 2007)

III.VI.V Pruebas de bombeo en el acuífero Morelia-Queréndaro

Uno de los aspectos fundamentales en las investigaciones relacionadas con los recursos de agua subterránea, es la determinación de las características hidráulicas del medio por el que se desplaza el agua subterránea, la CONAGUA (2007) caracterizó hidráulica e hidrológicamente el acuífero Morelia-Queréndaro mediante siete pruebas de bombeo en el acuífero, la ubicación de los pozos donde se llevaron a cabo las pruebas, puede observarse en la *figura 10*.

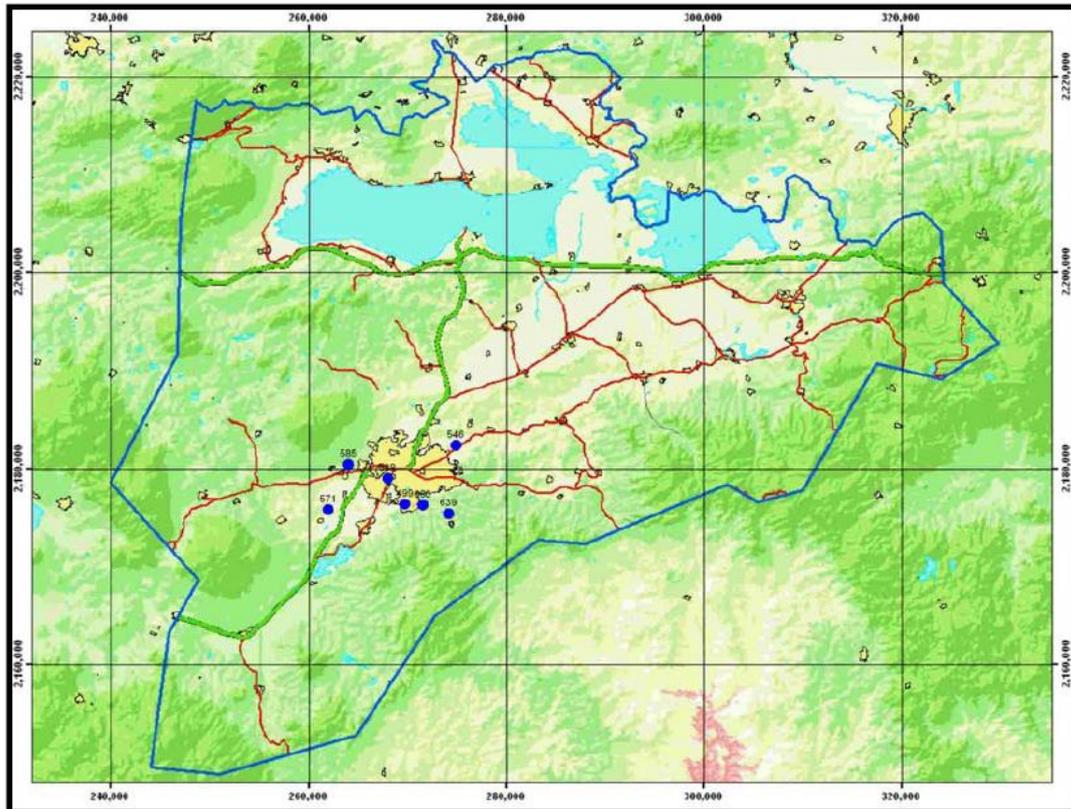


Figura 10. Localización de aprovechamientos con prueba de bombeo (CONAGUA, 2007)

En el estudio de la CONAGUA se concluye que el acuífero Morelia-Queréndaro corresponde a uno de tipo libre, lo cual significa que la superficie del agua subterránea se encuentra en equilibrio con la atmósfera.

Los resultados muestran que los valores de T (prueba de abatimiento) varían de 1.900×10^{-3} a 0.083×10^{-3} m²/s y de T (prueba de recuperación) varían de 3.42×10^{-3} a 0.80×10^{-3} m²/s, en tanto que para K se obtuvieron valores que oscilan entre 0.10 y 3.99 m/d en las pruebas de abatimiento.

En el acuífero no se identificaron pozos brotantes, donde la presión a la que está sometida el agua subterránea sea mayor que la atmosférica, por consiguiente, la elevación del agua subterránea puede llegar a rebasar la superficie del terreno.

La distribución de las unidades geológicas permitió definir un marco de referencia que controla el flujo del agua subterránea en el acuífero Morelia-Queréndaro. Con base en la información disponible de la interpretación geológica, se definió que los medios poroso y fracturado conforman un sistema acuífero en la zona.

IV MARCO TEÓRICO

IV.I Sistemas de flujo

La necesidad de información para llevar a cabo modelos sobre el comportamiento del agua subterránea, llevó a varios investigadores a realizar diversos estudios, entre los que se encuentran Plotinkov y Bogolov (1958) quienes comenzaron a hacer distinciones entre dos zonas subterráneas que poseían características distintas, en la primera zona existían fluctuaciones en su nivel de agua y se sometía a la variación estacional, esta *zona de oscilación* fue llamada “Control de reservas de agua subterránea”. La segunda zona estaría situada por debajo de la primera e incluye el agua existente debajo de la zona de oscilación a la cual se le llamaría “Reservas seculares”.

Posteriormente Norvatov y Popov (1961) reconocen tres zonas verticales pronunciadas del agua subterránea, la zona superior, cuya zonalidad coincide con los cinturones climáticos. La zona media, cuyo flujo estaría sujeto al menor cambio climático y también sería afectada por la zonalidad, los límites inferiores de los grandes ríos son el límite inferior de esta zona. Y la zona inferior geográficamente azonal, la cual estaba tendida bajo la base de los grandes sistemas de corrientes.

Sin embargo, Toth (1963) integra el conocimiento obtenido anteriormente y hace una clasificación de tres sistemas de flujo de agua subterránea que pueden existir en una cuenca, los cuales son; *local*, *intermedio* y *regional*.

Un sistema de *flujo local* se caracteriza por tener un área de recarga situada en una altura topográfica, y un área de descarga situada en una depresión topográfica. Se encuentra cuando existe un relieve pronunciado y es por ello que el origen del agua de diferentes puntos en la cuenca no necesariamente está relacionado una con otra. Este sistema es el más afectado por la recarga y descarga estacional.

En un sistema de *flujo intermedio* de agua subterránea se pueden identificar varios flujos locales, ya que, en este sistema, al tener una extensión territorial más grande se pueden encontrar varias elevaciones y depresiones topográficas que respectivamente son el área de recarga y descarga de los flujos locales.

El *Sistema regional* de agua subterránea, es el flujo más profundo de una cuenca, entre más incrementa la profundidad del flujo, más lento será el movimiento del agua, y un movimiento lento resulta en una mineralización más alta del agua subterránea.

IV.II Sistemas de acuíferos

El flujo de agua subterránea entre las áreas de recarga y descarga de un acuífero pueden durar generalmente desde pocos meses, hasta años, milenios o más, dependiendo de la geometría del acuífero (tabla 3), características del promedio del tamaño de los poros, e interacciones con acuitardos y acuíferos adyacentes (Kresic, 2007).

Diferencias		
Acuífero	Acuitardo	Acuicludo
Es una formación geológica o un grupo de formaciones geológicas hidráulicamente conectadas, que almacena y transmite cantidades significativas de agua subterránea.	Está estrechamente relacionado con el acuífero, el cual almacena agua y es capaz de transmitirla, pero a una tasa mucho más lenta que un acuífero, por lo tanto, no puede proveer cantidades significativas de agua potable subterránea a los pozos.	Es el equivalente a un acuitardo de muy baja permeabilidad, el cual, para todos los procesos prácticos, actúa como una barrera impermeable para el agua subterránea. En consecuencia, la capa semiconfinada correspondería a un acuitardo agujerado (leaky).

Tabla 3: Tipos de acuíferos (Kresic, 2007)

El *área de recarga* es la superficie terrestre por medio de la cual el acuífero recibe agua de la precipitación, escorrentía superficial o directamente de los cuerpos de agua superficiales como corrientes o lagos, esta superficie también puede recibir agua de acuíferos adyacentes, sin embargo, no se considera como área de recarga (o descarga). El *área de descarga* es donde el acuífero pierde agua descargandola a los cuerpos de agua superficiales (corrientes, lagos, humedales, océanos), la pérdida de agua también sucede por evaporación directa, aprovechamiento de las raíces de las plantas, la cual puede ser significativa si la vegetación riparia es abundante. (Kresic, 2007).



Figura 11: Interacciones de acuíferos (Kresic, 2007).

La capa freática (water table) es el tope de la zona saturada de un acuífero no confinado y está directamente expuesta a la presión atmosférica. Existe otra capa llamada superficie piezométrica; sin embargo, esta es una superficie imaginaria de la presión hidráulica del acuífero. El acuífero confinado se encuentra bajo presión, de tal modo que el nivel estático estaría a alguna distancia por encima del acuífero. Si el nivel del agua se eleva sobre la superficie de la tierra el pozo es llamado artesiano (Kresic, 2007).

Una capa impermeable o de baja permeabilidad de extensión limitada y encima de la capa freática, puede causar la acumulación del agua subterránea formando así un acuífero colgado (perched aquifer), ilustrado en la *figura 11* (Kresic, 2007).

IV.II Tipos de acuíferos

IV.II.I Acuíferos desarrollados en sedimentos no consolidados

Existen varios tipos de acuíferos, en esta sección se abordarán los *acuíferos aluviales*, *acuíferos cuenca llena (basin-filled)*, los cuales son *acuíferos intergranulares*, y que están desarrollados en **sedimentos no consolidados**. Los acuíferos no consolidados están compuestos por varias mezclas granulares de diferentes formas y tamaños, como la arcilla, limo y grava. Su nombre depende de la predominancia de la fracción granular, acuífero de arena, de arena-grava, etc. Es común llamar a este tipo de acuíferos por el

proceso geomorfológico por el cual fue creado, por ejemplo, el *acuífero aluvial* o el *acuífero cuenca llena (basin-filled)*(Kresic, 2007).

Los *acuíferos aluviales* se desarrollan en superficies de inundación de ríos y están entre los más abundantes y ampliamente usados como reservas de agua en todo el mundo, estos *acuíferos* están en la mayoría de la conexión hidráulica en el afluente, lo cual provee agua al afluente constantemente (Kresic, 2007).

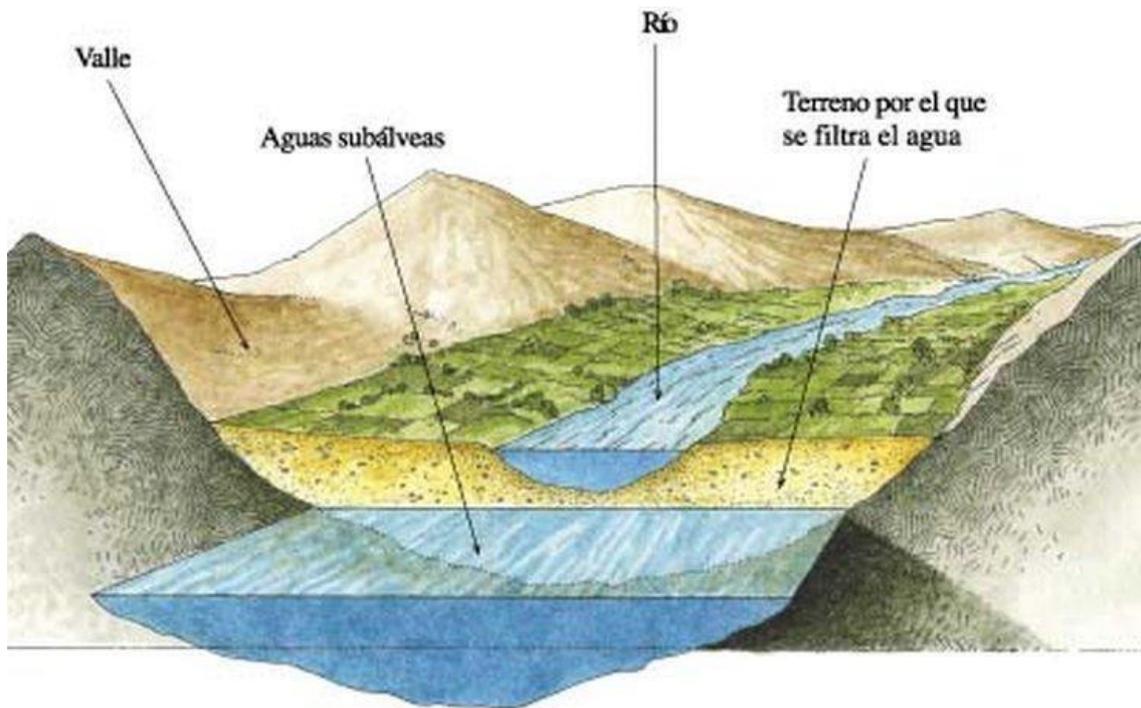


Figura 12: *Acuífero confinado, libre y colgado (Kresic, 2007)*

Los *acuíferos cuenca llena (basin-filled)* son otro grupo de acuíferos presentes en todos los continentes, se encuentran entre las montañas y están compuestos por sedimentos consolidados y no consolidados, lo grueso de estos depósitos puede exceder los varios cientos de metros debido al constante hundimiento tectónico de la cuenca por acción de las fallas geológicas, los procesos fluviales y coluviales son los que incorporan la reserva de sedimentos. Cuando la precipitación es significativa en las montañas circundantes existe alta recarga en el acuífero como se muestra en la *figura 12* (Kresic, 2007).

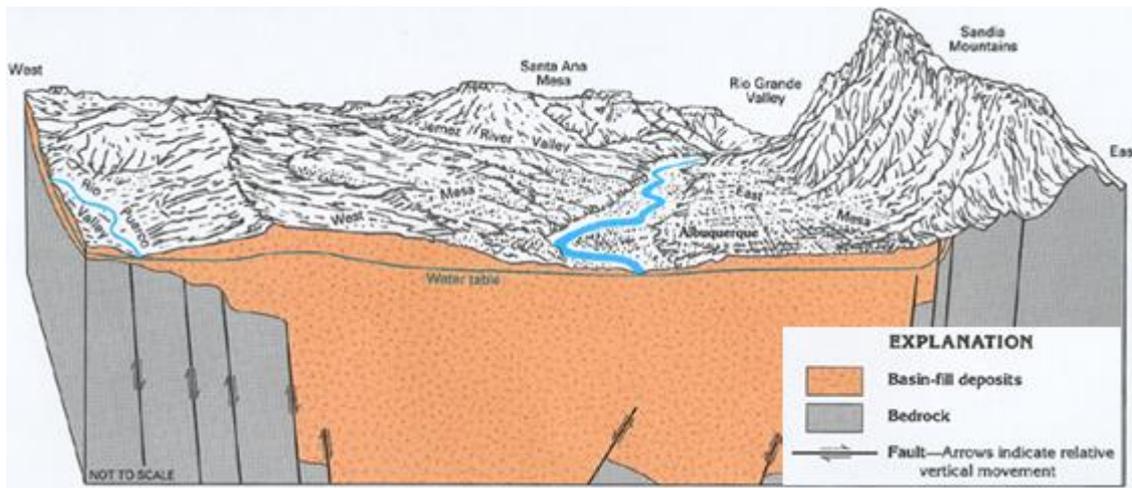


Figura 13: Acuífero Basin filled (Servicio Geológico de los Estados Unidos), este acuífero sería muy semejante al de Cuitzeo/Morelia

IV.II.1I Acuíferos desarrollados en roca consolidada

Los acuíferos desarrollados **en roca consolidada** están divididos en dos grandes grupos, en el primero se encuentran rocas sedimentarias fracturadas, principalmente de arenisca y carbonato (caliza y dolomita), en el segundo grupo se encuentran la mayoría de las rocas magmáticas y metamórficas (Kresic, 2007).

Entre los principales acuíferos se tienen a los acuíferos de caliza, acuíferos de carbonato, acuíferos kársticos, acuíferos de roca fracturada y acuíferos basálticos y de otras rocas volcánicas. Las fallas geológicas pueden permitir la infiltración rápida de agua al sistema acuífero, si el agua que se infiltra mediante la falla es agua contaminada, esta contaminará el acuífero y sus alrededores, de igual manera las fallas geológicas pueden recargar el acuífero con agua de buena calidad (Cervantes-Medel y Armienta, 2004).

Los *acuíferos kársticos y de carbonato* se forman por la solubilidad de los depósitos de carbonato como la caliza y la dolomita, ya que estas rocas al exponerse a la infiltración directa se solubilizan creando una porosidad secundaria por donde se conduce el agua subterránea (Kresic, 2007). Tienen una escala de cientos a miles de kilómetros y miles de metros de profundidad. Se encuentran adyacentes a océanos y mares, así como en el interior de los continentes.

El alta capacidad de infiltración de sedimentos de carbonato en las áreas costeras o islas significa que el agua subterránea puede ser la única reserva de agua disponible ya que existirán pocos escurrimientos o ríos (Kresic, 2007).

Los *acuíferos en basalto y otras rocas volcánicas*, son ampliamente distribuidos en todo el mundo, a veces generados en depósitos piroclásticos, los cuales tienen una porosidad y permeabilidad característica, que pueden actuar como acuitardos regionales, ya que el material piroclástico puede ser casi impermeable (Kresic, 2007). Las lavas de sílice como la riolita o la dacita, tienden a ser gruesas, de flujo denso y baja permeabilidad excepto si están fracturadas. Las lavas basálticas tienden a ser fluidas y forman flujos delgados que tienen una cantidad considerable de espacio de poroso primario.

Los *acuíferos fracturados* se desarrollan en rocas metamórficas y magmáticas intermedias o cristalinas, con porosidad primaria baja o sin ella, y el agua subterránea está presente sólo en las fracturas y las capas intemperizadas cerca de la superficie (Kresic, 2007). En algunos casos la roca madre se desintegra en una capa gruesa de roca no consolidada altamente intemperizada con residuos arcillosos de baja permeabilidad como la regolita. Bajo esta zona la roca se vuelve progresivamente más consolidada y la roca madre entra a una transición de fractura.

Los *acuíferos de arenisca* cuya consistencia está débilmente cementada, retienen una significativa porosidad primaria (intergranular) mientras la porosidad secundaria (de fractura) puede ser más importante para areniscas bien cementadas (generalmente más viejas), en ambos casos la capacidad de almacenaje en dichos depósitos es alta por el espesor de la mayoría de dichas cuencas (Kresic, 2007).

Los acuíferos en la ciudad de Morelia están alojados en rocas fracturadas y en rocas granulares.

IV.II Geoquímica

La composición química del agua no puede permanecer estática ya que esta se encuentra en contacto con materiales solubles, cuyo tipo y proporción tomados del material rocoso genera una relación entre la composición química de la roca y el agua. Esta relación según Chebotarev (1955) dependerá de factores como el tipo de formaciones geológicas, las características estructurales del área, la temperatura del agua, la concentración de salinidad y la abundancia de iones particulares y compuestos en el agua, la cantidad de agua moviéndose, y la velocidad del flujo.

De acuerdo con Gibbs (2012) existen tres grandes mecanismos que controlan la química del agua superficial, los cuales son la precipitación atmosférica, la dominancia de las

rocas y el proceso de evaporación-cristalización. Sin embargo, para el agua subterránea se tiene procesos más complejos, ya que esta tiende a evolucionar químicamente.

La tendencia del agua a evolucionar químicamente en los flujos largos fue reconocida en primera instancia por Chebotarev (1955) quien llamó a este cambio *ciclo de metamorfismo* del agua, cuya secuencia comienza con los tipos de agua más jóvenes, las bicarbonatadas HCO_3 que evolucionarán a agua Sulfatada SO_4^{2-} y por último llegará al agua clorada Cl^- la cual tiene mayor tiempo de residencia (figura 14). Así, entre más bicarbonatadas son las aguas son más jóvenes y superficiales, entre más cloruradas, las aguas son más viejas.

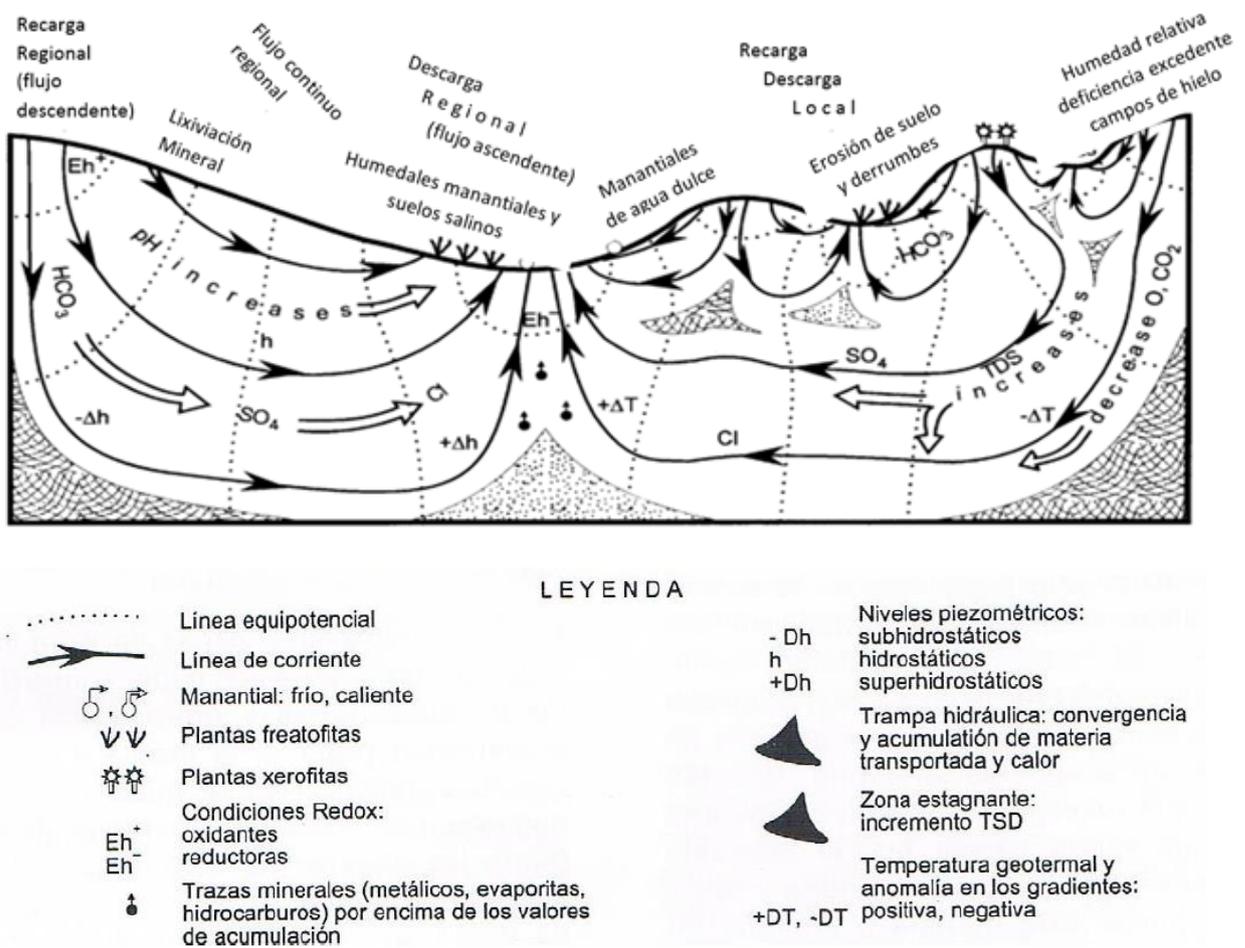


Figura 14: Geoquímica el flujo subterráneo (Tóth, 2000)

Los cambios sistemáticos en las facies de aniones, de HCO_3 hacia el SO_4 y finalmente hacia el Cl^- están ilustrados en la *figura 14* en donde la teoría de flujos de Toth (1962) incluye la secuencia de Chebotarev (1955). En la *figura 14* se puede observar la dirección del flujo del área de recarga al área de descarga, así como las condiciones químicas de oxidación y reducción cercanas a la superficie de las áreas de recarga y descarga respectivamente.

La evolución del potencial de óxido-reducción (Eh) a lo largo de la línea de flujo, se puede resumir de la siguiente manera: el agua de reciente infiltración contiene oxígeno en concentraciones muy cercanas a la saturación (11.3 mg/l a 10 °C). A medida de que el agua subterránea se desplaza en el sentido del flujo, el oxígeno disuelto se reduce aceptando electrones derivados de reacciones de oxidación. Mientras exista oxígeno disuelto, el Eh se mantendrá en valores de alrededor de 200-400 mV (Cardona y Hernández, 1995).

Parte de los componentes químicos del agua se adquieren en el área de recarga, mientras que otros se obtienen en el largo recorrido del flujo del agua subterránea hasta que ésta es captada y emerge en la zona de descarga a través de un manantial o es captada por pozos (González-Abraham *et al.*, 2012).

En el agua subterránea no solo se encuentra carbonato, sulfato y cloro, sino un gran número de elementos naturales disueltos, ya que el agua es el solvente más efectivo de los diferentes materiales geológicos inorgánicos. Las concentraciones de estos elementos varían de acuerdo con las condiciones geológicas locales y los minerales contenidos en el medio poroso (minerales de la roca) y pueden ser constituyentes primarios y secundarios o trazas (González-Abraham *et al.*, 2012).

IV.III Constituyentes primarios

Los constituyentes que son comúnmente encontrados en concentraciones mayores a 1 mg/L son llamados **constituyentes mayores, macro constituyentes, o constituyentes primarios** (Tabla 4) del agua subterránea, generalmente representan más del 90% del total de sólidos disueltos en las muestras de agua (Kresik, 2007). Estos componentes del agua reflejan el tipo de rocas presentes en el acuífero y por lo tanto son utilizados en general para comparar los tipos genéticos del agua subterránea.

Constituyentes primarios del agua subterránea			
Aniones		Cationes	
Cloruro	Cl ⁻	Calcio	Ca ²⁺
Sulfato	SO ₄ ²⁻	Magnesio	Mg ²⁺
Bicarbonato	HCO ₃	Sodio	Na ⁺
Carbonato	CO ₃	Potasio	K ⁺
Nitrito	NO ₃	Hierro	Fe ²⁺

Tabla 4: *Constituyentes primarios del agua subterránea (Kresic, 2007)*

IV.IV Constituyentes secundarios

Los **constituyentes secundarios** (tabla 5) son definidos como los elementos que siempre o casi siempre existen en concentraciones menores que 1.0 mg/L (kresic, 2007). Para algunos elementos con concentraciones por debajo de los 1.0 mg/L ó 0.01 µg/L es posible usar la espectrometría de masas o técnicas radioquímicas para su análisis. Los elementos metálicos que son comúnmente encontrados en concentraciones menores que 0.001 mg/L son a veces llamados **constituyentes traza**.

Constituyentes secundarios del agua					
Elementos y aniones		Metales y no metales		Elementos radioactivos	
Boro	B	Aluminio	Al	Radio	Ra
Bromo/ Bromuro	Br	Antimonio	Sb	Uranio	U
Fluoruro	F	Arsénico	As	Partículas Alfa	
Yodo/Yoduro	I	Bario	Ba	Partículas Beta	
Fosforo/ Fosfato	P	Berilio	Be		
		Cesio	Cs		

		Cromo	Cr		
		Cobre	Cu		
		Plomo	Pb		
		Litio	Li		
		Manganeso	Mn		
		Mercurio	Hg		
		Rubidio	Rb		
		Selenio	Se		
		Estroncio	Sr		
		Zinc	Zn		

Tabla 5: *Constituyentes secundarios del agua subterránea (Kresik, 2007)*

La gran importancia de los constituyentes secundarios o traza en el agua subterránea es debido a que la historia de las investigaciones puntualiza importantes efectos en la salud humana que tienen estos elementos a pesar de tener supuestamente una concentración insignificante en el agua (Hem, 1989).

IV.V Legislación en México sobre contaminantes del agua subterránea

En México, la *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Establece los límites máximos permisibles para los constituyentes químicos.

Característica	Límite permisible	Característica	Límite permisible
Aluminio	0.2	Clordano (total de isómeros)	0.3
Arsénico	0.05	DDT (total de isómeros)	1
Bario	0.7	Gamma-HCH (Lindano)	2
Cadmio	0.005	Hexaclorobenceno	0.01
Cianuros (como CN-)	0.07	Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Cloro residual libre	0.2-1.50	Metoxicloro	20
Cloruros (como Cl-)	250	2,4-D	50
Cobre	2	Plomo	0.025
Cromo total	0.05	Sodio	0.025
Dureza total (como CaCO₃)	500	Sólidos disueltos totales	1000
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001	Sulfatos (como SO₄)	400
Fierro	0.3	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5
Fluoruros (como F-)	1.5	Trihalometanos	0.2
Manganeso	0.15	Zinc	5
Mercurio	0.001	Nitratos (como N)	10
Nitritos (como N)	0.05	Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5	Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03

Tabla 6. Límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994

Constituyentes primarios del agua subterránea					
Constituyente y formas en las que parece	Rocas en las que se encuentra	Características	Valor promedio en agua subterránea	Procedencia en agua subterránea	Efectos
Calcio Ca ²⁺	<p>Rocas ígneas</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Piroxena ● Anfíbol ● Feldespatos <p>Rocas metamórficas</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Minerales de silicato con calcio 	<p>Esencial en las formas de vida de plantas y animales.</p> <p>Se genera una porosidad secundaria (huecos) cuando el agua subterránea fluye por un medio poroso con calcita soluble, generando así los terrenos Kársticos.</p>	<p>Entre 10 y 100 mg/L</p> <p>Se encuentran concentraciones más altas en rocas sedimentarias carbonatadas como; la caliza y el yeso.</p>	<p>Sólidos solubles que contienen calcio, como rocas carbonatadas como; <i>Caliza</i> (CaCO₃), <i>dolomita</i> (CaMg(CO₃)₂) <i>Anhidrita de sulfato de calcio</i> (CaSO₄) <i>Yeso</i> (CaSO₄*2H₂O).</p>	<p>Dureza del agua la cual es atribuida a la suma de calcio y magnesio en el agua.</p>
Magnesio Mg ²⁺	<p>Rocas Magmáticas</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Olivino ● Piroxeno ● Anfíboles ● Micas <p>Rocas metamórficas</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Clorito ● Seprenitino 	<p>Esencial en la nutrición de plantas y animales</p> <p>Las aguas subterráneas maduras en terrenos de carbonato sedimentario tienen un alto radio de Mg:Ca</p>	<p>Su concentración es menor que la del calcio, ya que el Mg es menos abundante.</p> <p>Algunas excepciones existen en acuíferos ricos en magnesio como</p>	<p>Existe en cantidades significativas en la mayoría de las calizas, en especial de las dolomitas.</p>	<p>Dureza del agua la cual es atribuida a la suma de calcio y magnesio en el agua.</p>

	<p>Rocas sedimentarias Magnesita (MgCO₃) Dolomita carbonatada doble Calcio-Magnesio (CaCO₃ x MgCO₃)</p>		<p>los de Olivino-basalto, serpentinos y de rocas de dolomita.</p>		
<p>Sodio (Na) y potasio (K)</p>	<p>El potasio es ligeramente menos común que el sodio en las rocas ígneas pero más abundante en todas las rocas sedimentarias</p>	<p>El sodio puede ser retenido por la adsorción de minerales de la superficie, especialmente por las arcillas, las cuales tienen una alta capacidad de intercambio catiónico.</p>	<p>En acuíferos de agua dulce si la concentración del sodio excede 10 Mg/L, la concentración del potasio es comúnmente la mitad o un décimo que la del sodio.</p>	<p>Los Feldespatos de potasio ortoclasa y microlinas (KAlSi₃O₈) son menos solubles que los feldespatos con sodio, y son menos solubles que el sodio plagioclasa albita (NaAl-Si₃O₈).</p>	<p>El contenido excesivo de sodio en el agua subterránea usado para el riego, puede dañar la estructura del suelo, ya que el sodio reemplaza al calcio y al magnesio, adsorbidos por las arcillas y los coloides del suelo. Dos efectos son la reducción de la permeabilidad y el</p>

					endurecimiento del suelo.
Hierro (Fe ³⁺) (Fe ²⁺)	Abundante en rocas magmáticas como <ul style="list-style-type: none"> ● Piroxeno ● Anfíboles ● Biotita ● Magnetita ● Olivino 	Su disponibilidad está fuertemente afectada por el pH y las condiciones redox, donde las acciones catalíticas de los microorganismos juegan un rol importante en la oxidación a hierro férrico (Fe ³⁺) bajo condiciones aeróbicas ó a la reducción a hierro ferroso (Fe ²⁺) bajo condiciones anaeróbicas.	La forma más común del hierro en solución es Fe ²⁺ Las concentraciones de hierro ferroso en condiciones reductoras son comúnmente entre 1 y 10 mg/L. El agua subterránea con un pH entre 6 y 8 puede ser suficientemente reductora para retener 50 mg/L.	En el olivino como; Forsetita (Mg ₂ SiO ₄) Fayalita (Fe ₂ SiO ₄) encontrándose como forma ferrosa (Fe ²⁺). El hierro férrico (Fe ³⁺) está presente en la magnetita como Fe ₃ O ₄ .	Un incremento en el hierro ferroso disuelto puede indicar la presencia de sustancias orgánicas incluyendo la contaminación por actividades humanas.
Carbonato y bicarbonato	El carbonato y el bicarbonato en el agua subterránea en su mayoría es derivado del CO ² del suelo y de la atmósfera. También de la disolución de las rocas de carbonato,		El agua subterránea generalmente contiene más de 10 mg/L pero menos de 800 mg/L de bicarbonato, generalmente entre 50 y 400 mg/L		El termino alcalinidad es seguido usado como sinónimo de la medida del contenido de carbonato y bicarbonato en el agua subterránea.

	como el carbonato de calcio.				
Sulfato	El azufre es extensamente distribuido en forma reducida, tanto en rocas sedimentarias como en magmáticas, como sulfuros metálicos. La pirita en particular constituye una fuente mayor de iones tanto de sulfatos como de ferrosos.	El ion sulfato SO_4^{2-} es una forma oxidada del azufre, producida principalmente por los minerales de sulfuro sometidos al intemperismo en contacto con agua airada.	El contenido de sulfato del agua subterránea en rocas magmáticas y en rocas intergranular sedimentarias es menos de 30 mg/L. En depósitos de yeso y anhidrita la concentración del sulfato puede alcanzar cerca de 1360 mg/L, el punto de saturación del yeso. Si las concentraciones son cercanas a cero se debe a la reducción por bacterias.	El sulfato existe en minerales de roca magmática del grupo de los feldespatos, pero la mayor aportación está en la evaporación de sedimentos, como el sulfato de calcio o la anhidrita. Toda la precipitación atmosférica contiene sulfato, el cual es uno de los mayores constituyentes de la lluvia y de la nieve.	Emisiones antropogénicas de azufre como la quema de combustibles fósiles o el derretimiento de minerales son los mayores factores en la producción de lluvia ácida, la cual tiene muchos indeseables efectos ecológicos. En algunas áreas los óxidos de nitrógeno tiene la misma importancia en la lluvia ácida.

<p>Cloruro Cl⁻</p>	<p>Rocas sedimentarias particularmente las evaporitas.</p>	<p>Una vez disuelto el cloruro permanece en el agua y su comportamiento es referido como “conservativo” los iones de cloruro no entran significativamente a las reacciones de óxido reducción, no forman solutos complejos con otros iones, al menos que su concentración sea extremadamente alta. No forman sales ni son absorbidos por minerales y no tienen tanta importancia bioquímica, es por ello que han sido usados como trazas conservativas.</p>	<p>El valor promedio para el agua subterránea común es menos de 30 mg/L. Valores más altos indican agua mezclada, mineralizada o contaminación antropogénica.</p>	<p>Cloro de antigua agua de mar atrapada en sedimentos. Solución de halito y minerales relacionados en evaporitas. Concentración por evaporación de cloruro contribuido a la lluvia o a la nieve. Lluvia seca de la atmósfera Desperdicio de materiales y fertilizantes.</p>	
<p>Nitrato Amoniaco (NH₃) Nitrito (NO₂) Nitrato (NO₃) Amonio (NH₄) Cianuro (CN⁻) En gas gas Nitrógeno elemental Óxido nitroso</p>					<p>Los nitratos son generalmente considerados como contaminación por agua residual o desperdicios orgánicos, fertilizantes, óxidos de nitrógeno en la atmosfera por</p>

Oxido nítrico					quema de combustible,
---------------	--	--	--	--	-----------------------

Tabla 7. *Constituyentes primarios del agua subterránea (Hem, 1989)*

Constituyentes secundarios del agua subterránea					
Constituyente y formas en las que parece	Rocas en las que se encuentra	Características	Valor promedio en agua subterránea	Procedencia en agua subterránea	Efectos
Fosfato H_3PO_4 Disociado en; $H_2PO_4^-$ HPO_4^{2-} PO_4^{3-}	Elemento común de rocas ígneas y sedimentarias, sin embargo, de baja solubilidad, por ello su baja concentración.	Es usado por la biota como nutriente esencial, la cual es otra razón de su bajo contenido y movilidad en el agua subterránea. Y lo cual explica su gran uso como fertilizante. Sin embargo, el fósforo disuelto es precipitado rápidamente o adsorbido por arcillas y óxidos de metal, por lo cual no permanece disponible por largos periodos de tiempo. Algunos químicos sintéticos orgánicos usados en insecticidas pueden permanecer mayor tiempo.	Decenas de miles de miligramos por litro.	Varias formas del fosfato en fertilizantes, detergentes, líquidos y erosión del suelo en tierras cultivadas proveen una fuente mayor de fosfato en el agua.	Causa efectos negativos como la eutrofización.
Fluoruro	La fluorita y apatita son minerales de fluoruro comunes en rocas magmáticas, sedimentarias, y los	Es usado por formas de vida más elevadas en la estructura de los huesos y los dientes. Es el más electronegativo de todos los elementos y su ion	Menos de 1 mg/L aunque	La ceniza volcánica reciente puede ser bastante rica en fluoruro, así como la ceniza	En concentraciones altas puede causar enfermedades

	anfíboles y micas pueden contener fluoruro el cual ha reemplazado parte del hidróxido. Rocas ricas en metales alcalinos tiene mayor contenido de fluoruro que muchas magmáticas.	F-forma fuerte solutos complejos con muchos cationes particularmente con Aluminio, berilio y hierro férrico.		intercalada con otros sedimentos. Entra también por fertilizantes y procesamiento de minerales.	óseas y dientes moteados en los niños.
Arsénico Arsenato (As(V)) En condiciones aeróbicas Arsenito (As(III)) En condiciones reductoras Trióxido de arsénico As_2O_3 Pentóxido de arsénico As_2O_5	Pirita Arsenopirita Galena Esfalerita Marcasita Calcopirita Las cuatro últimas pueden contener más del 1% de arsénico como impureza.	Usado en baterías de plomo, diodos, pinturas, tintes, metales, farmacéuticos, pesticidas, herbicidas, jabones entre otros. Fácilmente cambia de estados de valencia y reacciona formando especies de diferentes toxicidades y movilidad.	Análisis de Arsénico en los Estados Unidos de América, en promedio muestran niveles de arsénico de; igual o menos de 1 $\mu g/L$ solo un 10 % excediendo los 10 $\mu g/L$.	Resultado del intemperismo de minerales como; As_2S_3 , As_4S_4 y $FeAsS$ Minería, operaciones de fundición, uso en la agricultura (pesticidas, herbicidas), disposición de residuos con Arsénico. La disolución del óxido de hierro es responsable de las altas concentraciones de arsénico.	El creciente uso del fosfato a relativamente altas tasas de aplicación ha sido adoptado para disminuir la toxicidad del arsénico en huertas replantadas. Sin embargo, esta práctica incrementa las concentraciones de arsénico en el subsuelo y agua subterránea superficial.

					Ha incrementado las tasas de cáncer.
--	--	--	--	--	--------------------------------------

Tabla 8: *Constituyentes secundarios del agua subterránea (Hem, 1989)*

VI.VI Efectos a la salud de la contaminación por metales pesados

La toxicidad de los metales sobre la salud es ocasionada al menos de dos maneras, la primera mediante transporte medio-ambiente en el aire, agua, polvo y comida, la segunda por alterar la forma bioquímica de los elementos (Beijer y Sources, 1986). La vida silvestre tiene la habilidad de acumular y concentrar metales pesados, lo cual incrementa el riesgo de toxicidad sobre la cadena trófica, siendo la alimentación uno de los principales medios de exposición a metales (Nava-Ruíz y Méndez-Armenta, 2011).

VI.VI.I Intoxicación por Arsénico

Este metal ha sido catalogado como un cancerígeno, principalmente relacionado con cáncer de pulmón, riñón, vesícula y piel, cuando el organismo absorbe el arsénico, este se almacena principalmente en el hígado, riñón, corazón y pulmón, otras cantidades más bajas se almacenan en músculo y tejido nervioso (Nava-Ruíz y Méndez-Armenta, 2011).

Cuando una persona se intoxica con arsénico, se presentan diferentes síntomas, entre ellos: vómito profuso, diarrea, cólicos, salivación excesiva, fiebre, alteraciones en el sistema cardiovascular y sistema nervioso central, llegando incluso a causar la muerte (ATSDR, 2006). Por otro lado, los síntomas de una intoxicación crónica son; cambios en la piel con hiperqueratosis, formación de verrugas y granos en las palmas y plantas de los pies, con grandes áreas de hiperpigmentación intercalados entre pequeñas áreas de hipopigmentación en la cara, cuello y espalda (Gwaltney-Brant, 2002).

VI.VI.II Intoxicación por hierro

El hierro es un elemento presente en el cuerpo humano, sin embargo los niveles de entre 20-40 mg/kg de hierro causan toxicidad gastrointestinal, una concentración de entre 40-60 mg/kg se podría considerarse una toxicidad moderada o severa, por otro lado, encima de los 60 mg/kg se considera una concentración letal (Cuba y Cossio, 2008).

La intoxicación por hierro se divide en tres fases, el primer de ellos es el gastrointestinal y se presenta en las primeras 6 horas, manifestándose en forma de vómitos, dolor abdominal, diarreas hematemesis o hematoquencias, variando de leve a grave. La segunda fase es asintomática, esta puede durar de entre 6 y 24 horas. La tercera fase es un estado de shock y puede presentarse a las 6 y 72 horas después de la ingesta, esta fase es de riesgo mortal. (Sánchez, Ortega, y Blázquez, 2009).

VI.VI.III Intoxicación por Manganeso

El manganeso es considerado un nutriente esencial para el cuerpo humano por su participación en reacciones de óxido reducción en el hígado; sin embargo, la exposición a concentraciones altas puede causar enfermedades neurológicas como el manganismo, el cual se manifiesta mediante los siguientes síntomas: cefalea, cansancio, trastornos del sueño e irritabilidad, lo cual conlleva posteriormente a un estado psicótico llamado, locura mangánica. (Bueno-Brito *et al.*, 2005).

Otras de las manifestaciones que se pueden observar simultanea o subsecuentemente es la disfunción motora extra piramidal de tipo de la enfermedad de Parkinson, rigidez muscular, inexpresividad facial y temblores finos, la recuperación es poco frecuente (Bueno *et al.*, 2005).

V METODOLOGÍA

V.I Muestreo

En la presente investigación se muestrearon 23 sitios dos veces, una vez en la temporada de estiaje y otra vez en la temporada de lluvias del mismo año, de los cuales 20 fueron pozos de agua operados por el OOAPAS (Organismo Operador de Agua Potable, alcantarillado y Saneamiento de Morelia), y tres sitios fueron manantiales ubicados dentro de la ciudad de Morelia. También se contó los datos de Estrada-Murillo (2015) de 15 sitios que también fueron muestreados en este trabajo, son 4 datos por sitio, dos en la temporada de lluvias y dos en la temporada de estiaje, recabados durante dos años de muestreo. En la *tabla 9* se observan las fechas de cada campaña de muestreo.

Fechas de las campañas de muestreo		
Campaña de muestreo	fecha	Realizado por
Primera campaña	Septiembre-octubre de 2013	Estrada (2015)
Segunda Campaña	Enero-febrero de 2014	Estrada (2015)
Tercera Campaña	Abril-mayo de 2014	Estrada (2015)
Cuarta Campaña	Agosto de 2014	Estrada (2015)
Quinta Campaña	Abril-Mayo 2015	En este trabajo
Sexta Campaña	Agosto-septiembre 2015	En este trabajo

Tabla 9: Fechas de las campañas de muestreo de pozos y manantiales

Para facilitar la identificación de los 23 sitios de muestreo se agrega una tabla con sus nombres, acrónimos y coordenadas (tabla 10). Su ubicación geográfica puede visualizarse en la *figura 5*.

Puntos de muestreo de Agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán				
	Pozo	Acrónimo	X	Y
1	Rinconada del valle	RDV	267060.48	2177317.62

2	Mariano Escobedo II	ME2	269026.77	2181434.91
3	Ampliación Torreón Nuevo	ATN	268589.00	2183587.00
4	Villas del Real IV	VDR4	267949.52	2184477.14
5	CU	CU	268642.96	2178325.91
6	Cosmos II	COS2	267252.50	2178162.09
7	Prados Verdes Galeana	PVG	269500.00	2181433.00
8	San Juanito Itzicuaró	SJI	264140.47	2179420.46
9	Mariano Abasolo	MA	263398.47	2178574.44
10	6 de Julio	6J	272362.10	2178655.89
11	Boulevard	BOUL	273390.36	2178427.24
12	La Soledad 1	LS1	270674.00	2182741.00
13	Adolfo López Mateos	ALM	266399.83	2179650.82
14	Manantial la Mintzita	MM	262094.00	2174547.03
15	Fuentes de Morelia	FM	268925.96	2176590.45
16	Arroyo de agua clara	AAC	269547.17	2176394.14
17	Santa Cecilia	SC	269740.00	2176324.00
18	Peña Blanca	PB	269952.72	2176021.30
19	Los Sauces	LS	271689.00	2176483.00

20	Mastranto	JJM	273819.00	2174545.00
21	Depósitos	DJM	274690.00	2174152.00
22	Pozo Profundo	PPM	274793.00	2173414.00
23	Toreo	TOR	267729.00	2178837.00

Tabla 10: Puntos de muestreo de agua subterránea de la ciudad de Morelia, Michoacán.

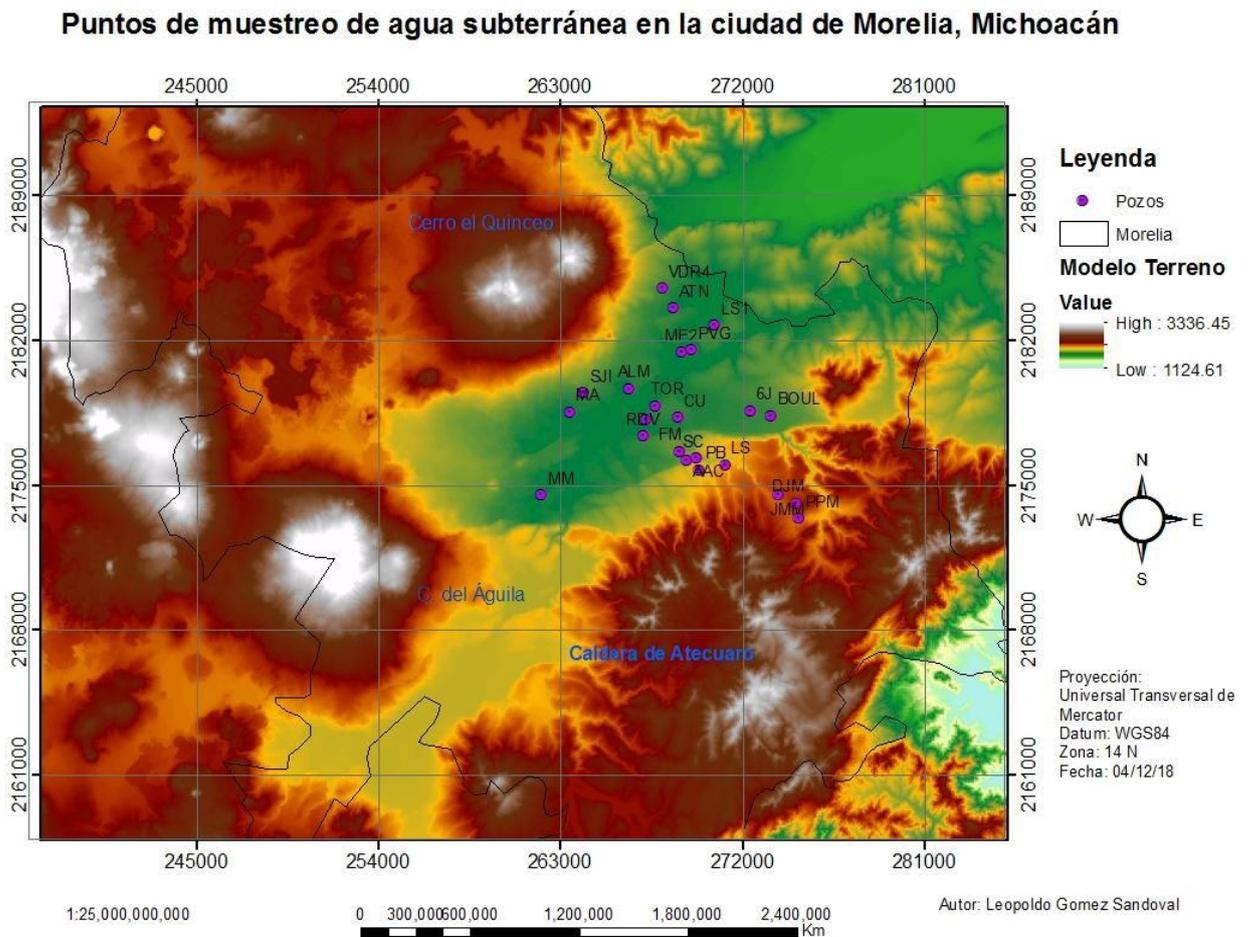


Figura 15. Distribución geográfica de los puntos de Muestreo en la ciudad de Morelia, Michoacán

Los 23 puntos de muestreo pueden observarse en la *figura 15*, se tomaron dos muestras de agua subterránea por cada punto, una en la temporada de estiaje y otra en la temporada de lluvias del mismo año. Como puede observarse en la *figura 15*, los puntos de muestreo se encuentran flanqueados por el *Cerro del Quinceo*, el *Cerro del Águila* y la *Caldera de Atecuaro*, al noreste del municipio, se encuentra el *Lago de Cuitzeo*, en donde el *Río Chiquito* y el *Río Grande* desembocan, acarreando sedimentos a esta zona de descarga.

Cabe mencionar que el punto de muestreo TOR, solo pudo muestrearse en la temporada de lluvias, y el punto PPM solo pudo muestrearse en la temporada de estiaje, sin embargo, para el punto TOR así como para otros 15 puntos muestreados en este trabajo, se cuentan con otras cuatro campañas de muestreo previas a este trabajo, dos de ellas en la temporada de estiaje y otras dos en la temporada de lluvias para cada pozo, es decir que en total se tienen 6 datos de cada pozo, estos datos fueron obtenidos por Estrada-Murillo (2015).

V.II Parámetros analizados del agua subterránea muestreada en la ciudad de Morelia

Análisis de parámetros fisicoquímicos en campo

Temperatura
Oxígeno Disuelto
Conductividad
Salinidad
pH
Sólidos disueltos

Análisis de parámetros fisicoquímicos en laboratorio

Dureza
Alcalinidad

Aniones

Nitrato (NO_3)
Nitrito (NO_2)
Fosfato (PO_4)
Sulfato (SO_4)
Cloruro (Cl)
Fluoruro (F)

Isotopos Estables

$\delta^{18}\text{O}$
 δD

Elementos Mayores y Menores

Be, Ti, V, Cr, Mn, Co, Cu, Mo, Cd, Sb, Pb, As, Cu, Fe, Mn, Sr, Zn
Na, Ca, K, Mg

Análisis Bacteriológico

Coliformes totales
Escherichia coli
Bacterias Mezoflicas

Tabla 11. *Análisis realizados a las muestras de agua de la ciudad de Morelia*

V.III Análisis de parámetros fisicoquímicos en campo

Es importante realizar las mediciones de los parámetros físico-químicos *in-situ* ya que algunos parámetros como el pH, el oxígeno disuelto y las condiciones redox cambian por la alteración de las condiciones de presión y temperatura al extraer el agua de las profundidades del pozo. Estos parámetros fueron medidos con un equipo multiparamétrico electrónico marca HACH modelo HDQ/IntelliCAL 8505400. Los parámetros medidos con el multiparamétrico electrónico fueron; conductividad, temperatura, pH, oxígeno disuelto, salinidad y sólidos suspendidos.



El análisis de pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y sólidos suspendidos con el multiparamétrico electrónico, se realizó en un recipiente de polietileno con capacidad para 100 ml que incluía el equipo multiparametrico.

Para tomar la muestra de agua proveniente de los pozos, se abrió la llave de paso de agua, que está a un costado de la bomba de extracción de agua subterránea, se dejó correr el agua sobre el suelo, durante 5 minutos para eliminar alguna fuente de contaminación proveniente del tubo por donde esta pasa. Posterior a esto se llenó un recipiente de plástico de aproximadamente 100 ml que traía consigo el equipo multiparamétrico. Se llenó el recipiente en su totalidad y se introdujeron las sondas del multiparamétrico electrónico para analizar los parámetros mencionados. Se esperó durante un par de minutos, mientras el multiparamétrico procesaba la información y se registró en una libreta de campo.

Se hicieron dos mediciones de cada uno de los 6 parámetros por sitio y se anotaron los resultados arrojados por el multiparamétrico electrónico para promediarlos posteriormente, en caso de que hubiera diferencia de 0.5 unidades o mayor en el resultado arrojado por el equipo multiparamétrico en las mediciones, se tomaba una

tercera medida, en el caso de la conductividad se tomó una tercera medida solo en el caso que la diferencia fuera igual o mayor a diez unidades.

V.IV Análisis de parámetros físico-químicos en el laboratorio

La toma de muestra para análisis de alcalinidad y dureza se realizó en recipientes de polietileno con capacidad para 125 ml previamente lavados con jabón libre de sulfatos, enjuagados con agua corriente y posteriormente con agua destilada. Para tomar la muestra de cada pozo, se abrió la llave de paso de agua del pozo y se dejó correr el agua a muestrear cinco minutos sobre el suelo, posteriormente se llenó un recipiente con esta agua. Se llenó el recipiente en su totalidad evitando la formación de burbujas de aire al interior y posteriormente se cerró herméticamente, el conjunto de muestras se etiquetó y fue guardado en una hielera para conservar una baja temperatura hasta su análisis. Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Análisis de Agua y Suelos (LASA) del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM campus Morelia. La dureza fue determinada bajo los estándares y metodología de la NMX-AA-072-SCFI-2001 y la alcalinidad mediante un Titulador Automático 848 Titrino plus.



V.V Análisis de Aniones (NO_2^-), (NO_3^-), (Cl), (SO_4^{2-}), (F) y PO_4^{3-}

La toma de muestra para análisis de aniones y cationes se realizó en recipientes de polietileno con capacidad para 125 ml previamente lavados con jabón libre de sulfatos y enjuagados con agua corriente y desionizada posteriormente. Para tomar la muestra se abrió la llave de paso del agua y se dejó correr el agua por cinco minutos sobre el suelo, posteriormente se llenó un recipiente con capacidad de 125 ml. Se evitó la formación de burbujas de aire al interior y finalmente se cerraron herméticamente y se etiquetó. El conjunto de muestras fue guardado en una hielera para conservar una baja temperatura hasta su análisis.

El conjunto de muestras se analizó en el laboratorio de Agua y Suelos del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM campus Morelia para el análisis de Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), Cloruro (Cl), sulfato (SO_4^{2-}), fluoruro (F) y fosfato



(PO_4^{3-}). Las muestras se congelaron inmediatamente para su conservación y posteriormente se analizaron con un Cromatógrafo Iónico Intellect Model 883 Basic IC plus marca Metrohm en el Laboratorio de Análisis de Agua y suelos (LASA) del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) de la UNAM.

De acuerdo con las curvas de calibración del equipo de cromatografía del Laboratorio de Análisis de Agua y Suelos del CIGA, se tuvieron que realizar diluciones de 10 muestras, ya que estas presentaron una alta concentración. La muestra RDV se diluyó dos veces, las muestras FM, PPM, SC, AAC, PPM, JMM y 6 DE JULIO se diluyeron 4 veces y las muestras ME2 y LS1 se diluyeron 20 veces.

V.VI Análisis de Isótopos Estables y Análisis de elementos mayores y menores



Para cada sitio de muestreo se obtuvieron dos viales con capacidad de 125 ml, un vial con agua del aprovechamiento y otro con agua desionizada el cual sirvió como testigo en caso de que alguna variable ambiental externa pudiera modificar las características químicas de la muestra de agua recolectada.

Los viales de polietileno utilizados fueron nuevos y se sometieron a un tratamiento previo para eliminación de impurezas, el cual consistió en sumergirlos en HNO_3 (Ácido Nítrico) concentrado al 10% durante una semana, posteriormente se cambió la concentración del ácido a 1% y se dejaron sumergidos una semana más, por último, se enjuagaron los viales con agua desionizada para eliminar cualquier rastro de ácido nítrico.

Para tomar la muestra se dejó correr sobre el suelo el agua del aprovechamiento durante cinco minutos, se enjuagó un vial tres veces con agua del aprovechamiento y

posteriormente se llenó el recipiente en su totalidad evitando la formación de burbujas de aire, posteriormente se acidificó la muestra con tres gotas de ácido nítrico puro en campo, se cerró herméticamente y se etiquetó. El conjunto de muestras fue guardado en un refrigerador a 4 °C para conservar una baja temperatura.

El conjunto de muestras se analizó en laboratorio de Isótopos Estables del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (*CeMIE-Geo*), en Baja California. El análisis de Isótopos Estables fue mediante espectrofotometría de masas de relación isotópica (TC/EA-IRMS).

V.VII Análisis Bacteriológico

La toma de muestra para los análisis microbiológicos se realizó en recipientes esterilizados de HDPE con capacidad para 100 ml. Para tomar la muestra de un pozo se abrió la llave de paso de agua, se dejó correr el agua durante cinco minutos y se llenó un frasco de boca ancha estéril en el sitio de muestreo. Antes de llenar el recipiente HDPE con el agua del aprovechamiento, se mojó algodón con alcohol y se encendió una llama de fuego a unos centímetros del flujo de agua que salía de la llave, lo anterior proporcionó un ambiente estéril durante la toma de la muestra. Se llenó el recipiente en su totalidad evitando la formación de burbujas de aire y posteriormente se cerró herméticamente, se etiquetó el conjunto de muestras y se guardaron en una hielera para conservar una baja temperatura durante su transporte al laboratorio.



El conjunto de muestras se envió al laboratorio *SERVI-MED Dr. Miguel Silva* en Morelia, Michoacán, para el análisis de coliformes totales, coliformes fecales (*Escherichia Coli*), bacterias mesofílicas aerobias, cloro residual y pH. La técnica utilizada para el análisis de bacteriológico fue el

conteo de unidades formadoras de colonias en medio enriquecido lactosa bilis verde brillante. El laboratorio Servi-Med cuenta con un certificado internacional ISO-9001:2008 hasta la fecha en todos sus procesos subrayando que esta empresa es certificadora BSI, primera empresa en certificación de calidad.

V.VIII Procesamiento de datos

En el software *ArcMAP 10.1* se elaboró el *modelo de terreno*, en cuya elaboración se realizó un mosaico con imágenes LIDAR a una resolución espacial de 10 metros que cubre la totalidad de la extensión de la ciudad de Morelia.

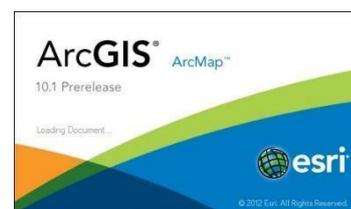
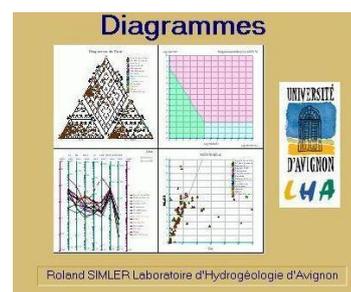
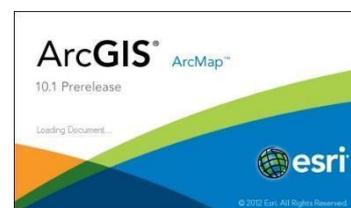
Para obtener el diagrama de Piper, así como algunas estadísticas de importancia, que permitieron conocer la familia de agua subterránea de las muestras, se utilizó el software Diagrammes versión 6.52,

En el software *ArcMap 10.1* se realizaron los mapas de *interpolación tipo Kernel con barreras* de los parámetros fisicoquímicos Temperatura, pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto, Dureza y Alcalinidad. En este programa también se realizaron los mapas de la distribución geográfica de los metales pesados que sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-027-SSA1-1994, los metales pesados que no sobrepasan la norma pero que se utilizaron de control, así como los mapas de la distribución geográfica de E. Coli en los pozos de agua de la ciudad.

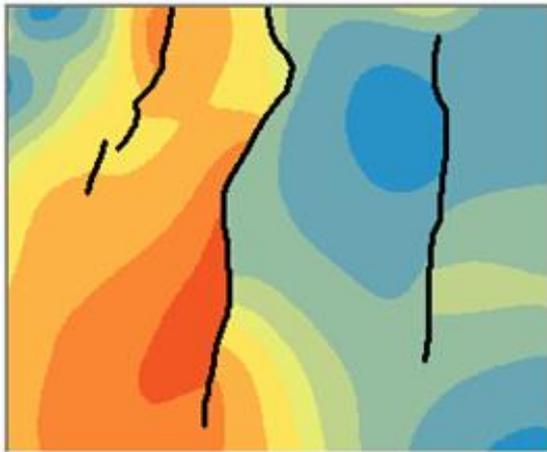
Se utilizó el programa *Excel* para realizar los *análisis estadísticos* de los metales pesados que sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-026-SSA1-1993, de esta manera se lograron generar varios modelos.

V.IX Método de Interpolación tipo Kernel con Barreras

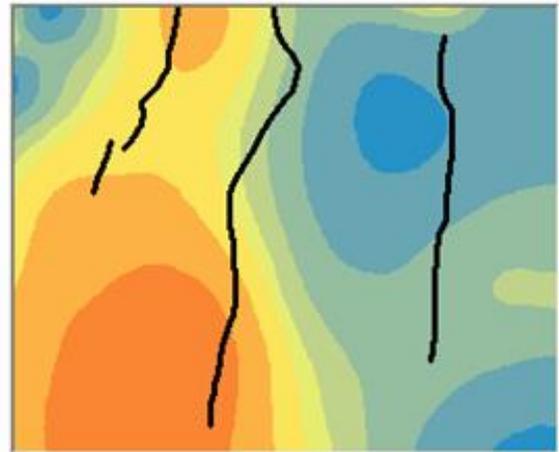
Debido a que el sitio de estudio se encuentra en una zona con varias fallas geológicas, se utilizó la Interpolación Kernel con Barreras, ya que esta permite ingresar las fallas geológicas dentro de la interpolación, las cuales funcionan como barreras en el flujo de agua subterránea, obteniendo así un mejor modelo del flujo subterráneo, ya que este no es constante, sino que en su camino se encuentra con varias barreras geológicas.



A continuación se comparan predicciones de la Interpolación kernel con barreras absolutas, a la izquierda sin ellas y a la derecha con ellas. Se observa cómo las curvas de nivel cambian bruscamente en las barreras del gráfico de la izquierda, mientras que las curvas de nivel fluyen suavemente sobre las barreras del gráfico de la derecha. Lo anterior se aplica al flujo de agua subterránea cuando este viaja hasta toparse con una falla geológica, la cual funciona como una barrera para este flujo.



Predicciones de la interpolación Kernel con barreras absolutas (ArcGis, 2019).



Predicciones de la interpolación Kernel sin barreras absolutas (ArcGis, 2019)

De acuerdo con ArcGIS (2019), el principio con el cual trabaja la Interpolación kernel es una variante de la *Interpolación polinómica local* de primer orden, en la cual se evita la inestabilidad en los cálculos gracias a un método similar al utilizado en la regresión de la cresta para calcular los coeficientes de regresión. En la interpolación kernel se utilizan los siguientes kernels de simetría radial: Exponential, Gaussian, Quartic, Epanechnikov, Polynomial of Order 5 y Constant.

Mientras que la *interpolación polinomial global* se ajusta a un polinomio en toda la superficie, la interpolación polinomial local se adapta a muchos polinomios, cada uno dentro de vecindarios específicos superpuestos. El entorno de búsqueda se puede definir utilizando el tamaño y la forma, el número de vecinos y la configuración del sector. Alternativamente, el parámetro Análisis de superficie de tendencia exploratoria se puede usar para variar simultáneamente el ancho de banda, el número de condición espacial (si está habilitado) y los valores de búsqueda de vecindario.

De acuerdo con ArcGIS (2019), los errores en la predicción de la Interpolación polinómica local se calculan dando por supuesto que el modelo es correcto; es decir, que el número de la condición espacial es reducido en todos los casos. Normalmente, esta suposición se infringe y el número de condición espacial resalta áreas en las que los errores de predicción y los errores estándar de la predicción son inestables.

En el modelo de Suavizado de kernel, el problema con el exceso de errores estándar de la predicción y las predicciones cuestionables se corrigen con el parámetro de cresta, introduciendo una pequeña cantidad de sesgo a las ecuaciones. De este modo, el mapa del número de condición espacial ya no es necesario. Por lo tanto, la Interpolación kernel ofrece solamente errores de predicción y errores estándar de la predicción para el tipo de superficie de salida. Dado que el parámetro de cresta introduce un sesgo con el fin de estabilizar las predicciones, el parámetro de cresta debería ser lo más reducido posible sin dejar de mantener la estabilidad del modelo (Gribov y Krivoruchko, 2011).

El método de *interpolación kriging* no pudo utilizarse en la generación de mapas, debido a que en el programa utilizado ArcMap 10.1 no permite la entrada de barreras dentro de las interpolaciones, en este caso fallas geológicas. Dejando al método de Interpolación tipo Kernel como la alternativa para realizar los mapas.

V.X Generación de modelos de concentración de Metales pesados (Manganeso, Hierro y Arsénico) para el agua subterránea.

Para generar los modelos de concentración de metales pesados (tablas 11, 12 y 13 así como las figuras 30, 31, 32, 33, 34, 35, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 50, 51, 52, 53 y 54), se tomaron el total de mediciones de la concentración del elemento en cada pozo, estas mediciones fueron tomadas a lo largo de tres años, muestreando dos veces por año, dando un total de 6 mediciones por pozo muestreado. Para la realización de dichos modelos se utilizó la ley de potencias, la cual se explica posteriormente.

V.X.I Ley de potencia

La ley de potencia es miembro de la familia de distribuciones sesgadas hacia los valores extremos, de tal forma que eventos de gran tamaño tienen una probabilidad relativamente alta de ocurrencia. Bajo la perspectiva de la teoría de la complejidad se explica los posibles mecanismos que generan este tipo de distribuciones. En otras palabras, la ley de potencia es el resultado de la auto-organización o patrones emergentes que se dan en procesos complejos en los que los agentes interactúan en un entorno de incertidumbre,

los cuales en su interacción produce un comportamiento colectivo que se presenta a través de una regularidad estadística, conocida como ley de potencia.

Una de las principales propiedades de la ley de potencia es que la distribución de probabilidad no se encuentra alrededor de su valor medio. La presencia de esta propiedad la distingue de la distribución normal-logarítmica (Watts, 2003, encontrado en Lugo, 2008). Para observar las diferencias y similitudes entre estas distribuciones se puede utilizar un histograma, así como su transformación en escala logarítmica. En la ley de potencia la probabilidad de ocurrencia de pequeños eventos es relativamente alta, mientras que la probabilidad de ocurrencia de grandes eventos es relativamente baja (Adamic, 2000, encontrado en Lugo, 2008).

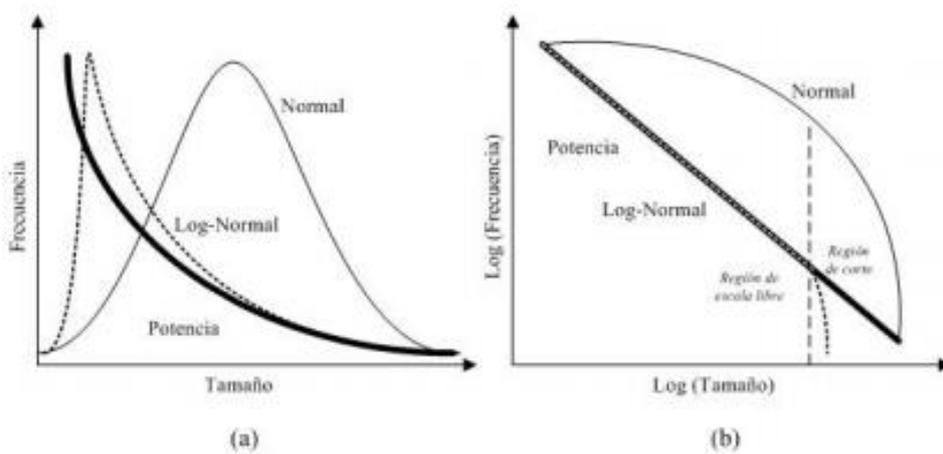


Figura 16. Comparación entre las distribuciones de la ley de potencia normal y normal-logarítmica

Las gráficas (a) y (b) muestran las tres distribuciones en su escala original y logarítmica, respectivamente. Se puede observar que la distribución de potencia y normal-logarítmica difieren en mucho de la distribución normal. En ambas distribuciones existe un sesgo hacia los valores extremos, La diferencia observada en ambas distribuciones se debe esencialmente a los valores extremos de la cola con mayor frecuencia (Batty, 2005, encontrado en Lugo, 2008). Tradicionalmente la ley de potencia se identifica por medio de la gráfica (b), la cual señala que la distribución en escala logarítmica se caracteriza por tener una forma de línea recta con pendiente negativa.

La Ley de potencia se define por medio de una función de probabilidad acumulada, la cual se especifica como la probabilidad que un evento tenga un tamaño mayor o igual a un cierto valor, $P(X \geq x)$. La versión discreta de la ley sería entonces $p_x = Cx^{-h}$

Una vez encontrada la mejor distancia se escoge la ley de potencia que mejor se ajusta a los datos empíricos. El análisis en escala logarítmica corrobora aproximadamente la forma lineal en la distribución de las muestras.

V.XI Ley de potencia en los datos recabados

Para aplicar la ley de potencias en los datos, se ordenaron los resultados de menor a mayor concentración de la variable de estudio, posteriormente se sacó el logaritmo de cada concentración. En otra columna se ordenaron el número de observaciones, en forma descendente (de 22 a 1) y se sacó el logaritmo de la frecuencia acumulada de la observación. Obteniendo así dos columnas de datos transformados. Posteriormente se construyó una gráfica de log concentración vs log de frecuencia acumulada para buscar una ley de potencia (LP) que describa la distribución de las concentraciones, obteniendo una dimensión fractal que es la pendiente de la recta de tendencia de la distribución.

Una vez que se obtuvo el logaritmo de la concentración y de la frecuencia acumulada, se eliminaron las colas pesadas, ya que estas no son representativas de lo que sucede en la mayoría de los datos, pues están asociadas a errores de muestreo, valores extremos, y a una baja probabilidad de ocurrencia (Mochales, 2013).

Se hicieron clusters de 7 datos para obtener diferentes modelos. El primer cluster realizado fue de los primeros siete datos, el segundo cluster fue del segundo dato al octavo, el tercer cluster fue del tercer dato al noveno, y así sucesivamente hasta obtener 17 modelos de concentración sin colas pesadas. Lo anterior para analizar el comportamiento colectivo de los datos, y así obtener el mejor modelo, el que tuviera la R^2 más cercana a 1.

En las gráficas de los modelos de concentración de metales pesados se muestra en azul el modelo que contiene las 22 observaciones (concentración del elemento) y en rojo el modelo sin colas pesadas que presentó la mejor R^2 de los 17 clusters realizados anteriormente.

VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.I TEMPERATURA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

VI.I.I Temperatura del agua subterránea para un periodo de tres años de muestreo

Se tienen mediciones de temperatura de seis campañas de muestreo para 14 pozos y un manantial en la ciudad de Morelia, estas seis campañas de muestreo corresponden a una medicione en 2013 y tres mediciones en 2014 realizadas por Estrada-Murillo (2015), así como dos mediciones en 2015, en donde se muestreo una vez en la temporada de estiaje y una vez en la temporada de lluvias en cada año.

En la *figura 17* se observan las seis campañas de muestreo, siendo la campaña primera tomada en la temporada de lluvias del año 2013, la campaña segunda tomada en la temporada de estiaje del 2014, la campaña tercera tomada en la temporada de estiaje del 2015, la campaña cuarta tomada en la temporada de lluvias de 2014, la campaña quinta tomada en la campaña de estiaje del 2015 y la campaña sexta tomada en la temporada de lluvias del 2015.

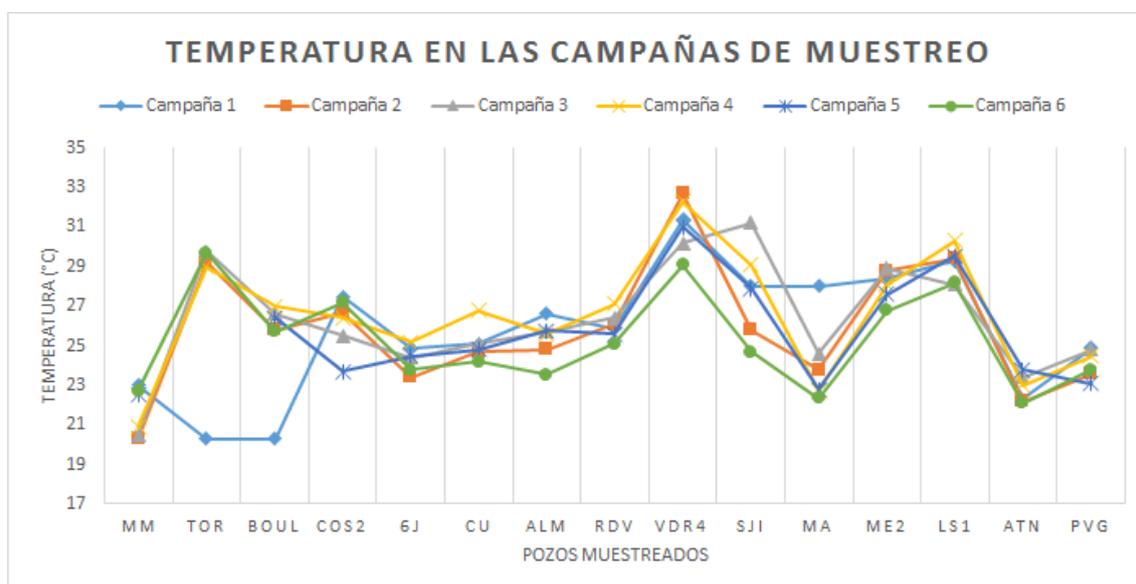


Figura 17. Temperatura en las campañas de muestreo de pozos y manantiales de la ciudad de Morelia. Se observa una temperatura media de 25.4 °C

En la *figura 17*, puede observarse la fluctuación de la temperatura en cada pozo a lo largo de tres años de muestreo tanto en las temporadas de lluvias y las de estiaje de cada pozo. En general todos los pozos y el manantial mantienen la misma temperatura en todas las

campañas de muestreo, a excepción de los pozos TOR y BOUL que en la primera campaña de muestreo presentaron temperaturas más bajas que en el resto de las campañas. En las siguientes secciones se analizará a profundidad la distribución de temperaturas en la temporada de lluvias y estiaje del último año de monitoreo.

VI.I.II Estadística descriptiva de las temperaturas del agua subterránea

VI.I.II.I Temporada de estiaje

En la *figura 18* se puede observar el histograma con la distribución de frecuencias registradas en marcas de clase, así como el polígono de frecuencias de las temperaturas del agua subterránea para la temporada de estiaje, correspondiente a la quinta campaña de muestreo, graficada en la *figura 17*. Como puede apreciarse, la distribución de los datos es bimodal, siendo las clases 24-25.9 y 26-27.9 las que presentan la moda. La media de los datos es 25.4 °C, la mediana es 25.05 °C y la desviación estándar es de 2.63

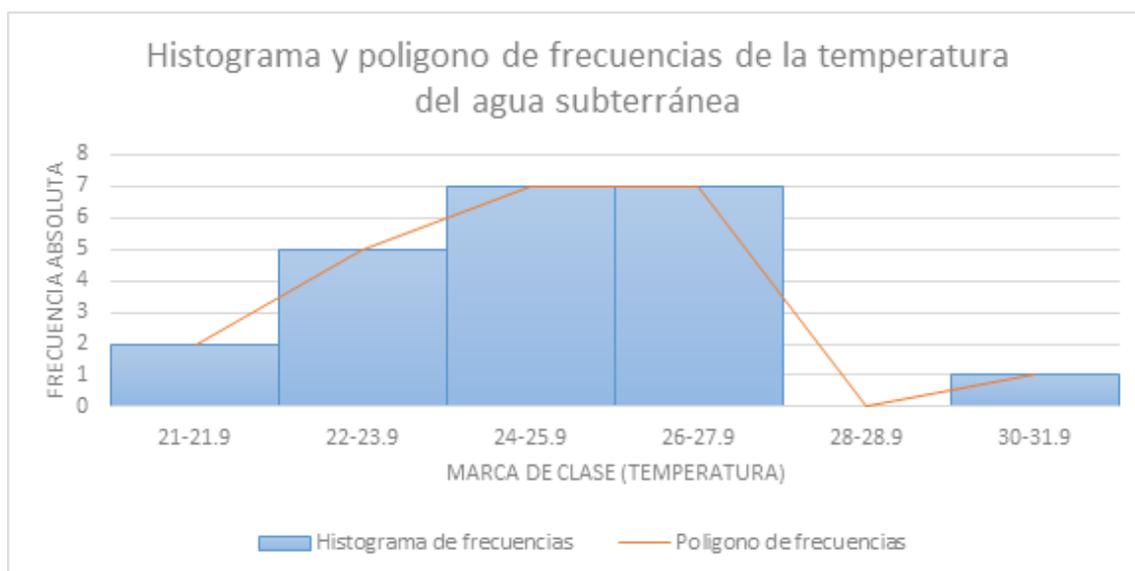


Figura 18. Histograma y polígono de frecuencias del agua subterránea de la temperatura en la temporada de estiaje

Como puede observarse en la *tabla 12* sobre los cuartiles y momentos, se tiene que el 25 % de los datos son iguales o menores a 23.7 °C, el 50% de los datos son iguales o menores a 25.05 °C y el 75 % de los datos son iguales o menores a 27.2 °C y la mediana es de 24.8 °C. En la *figura 19* pueden observarse los valores de temperatura ajustándose a la línea de normalidad.

Momentos y cuartiles para la temporada de estiaje			
Cuartiles		Momentos	
Mínimo	21.15 °C	Media	25.4 °C
Q1	23.7 °C	Desviación estándar	2.63
Q2 (mediana)	25.05 °C	Tamaño de muestra	22
Q3	27.2 °C		
Máximo	31 °C		

Tabla 12. Cuartiles y momentos de la temperatura del agua subterránea en la temporada de estiaje

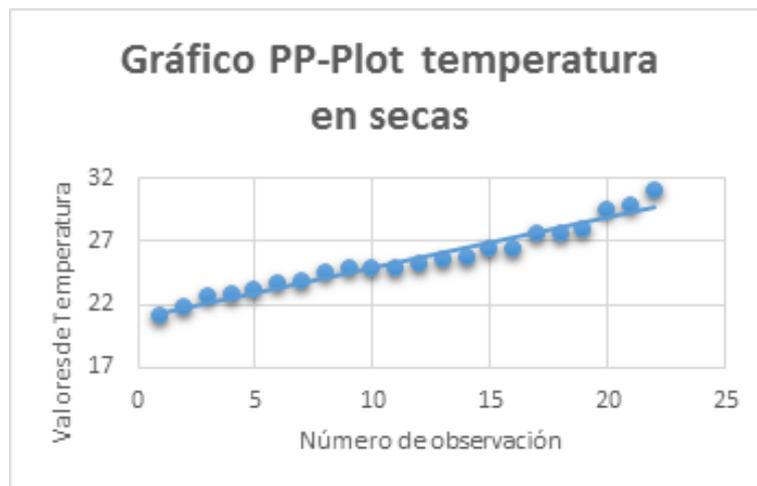


Figura 19. Gráfico PP-Plot de la temperatura del agua subterránea para la temporada de estiaje

En la *figura 20* se puede observar el diagrama de caja de las temperaturas del agua subterránea en la temporada de estiaje, en donde se puede apreciar que el 50% de las observaciones se encuentra entre el rango 23.7 °C y 27.2 °C

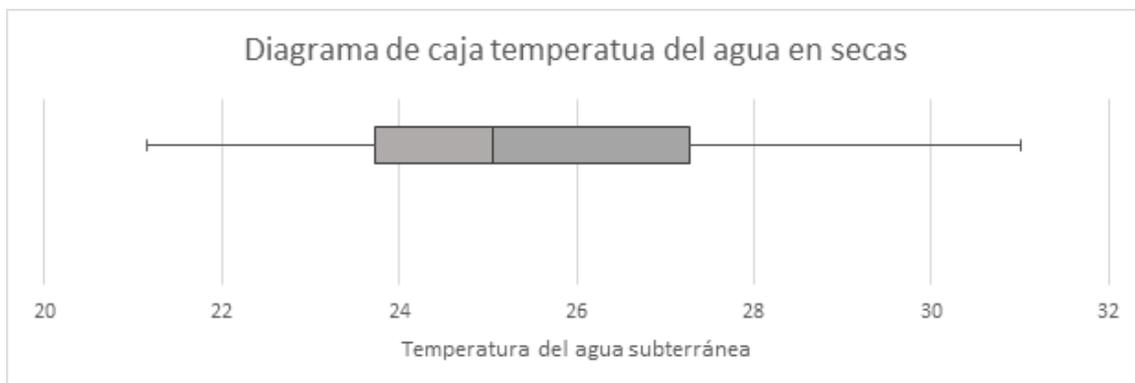


Figura 20. Diagrama de caja de las temperaturas del agua subterránea en la temporada de lluvias

VI.I.II.II Temperatura del agua subterránea en la temporada de lluvias

En la *figura 21* se puede observar el histograma con la distribución de frecuencias registradas en marcas de clase, así como el polígono de frecuencias de las temperaturas del agua subterránea para la temporada de lluvias, medición correspondiente a la sexta campaña de muestreo ilustrada en la *figura 17*.

Como puede apreciarse, la distribución de los datos es bimodal, siendo las clases 22°C - 23.9°C y 24°C - 25.9°C las que presentan la moda. La media de los datos es 24.7°C , la mediana es 24.8°C y la desviación estándar es de 2.88

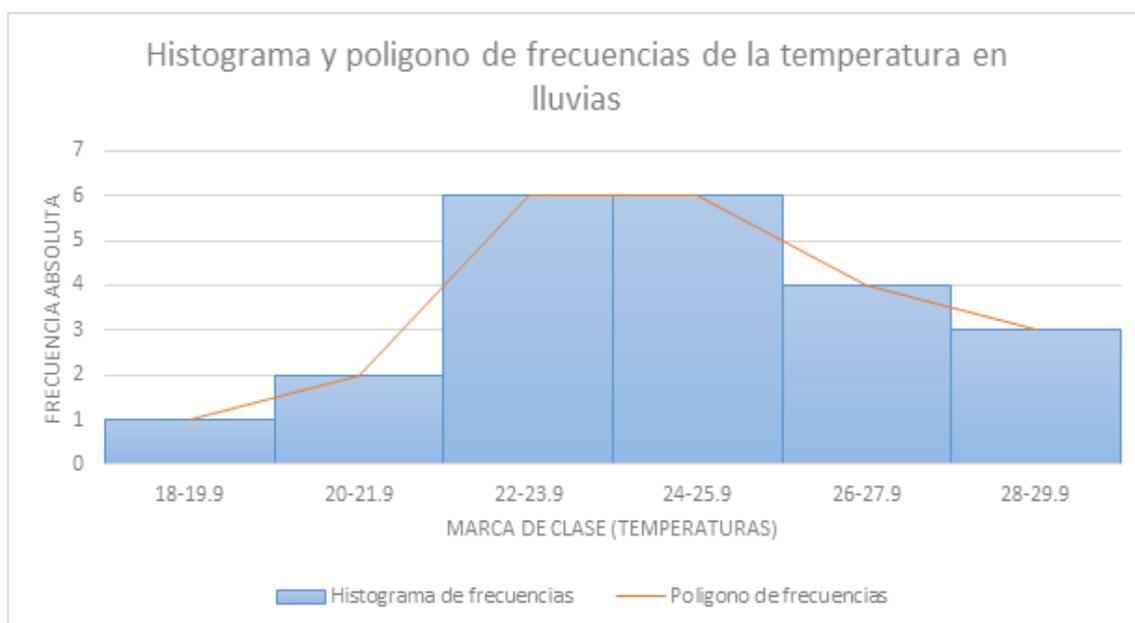


Figura 21. Histograma y polígono de frecuencias de la temperatura en la temporada de lluvias

Como puede observarse en la tabla 13 sobre los cuartiles, se tiene que el 25 % de los datos son iguales o menores a 22.9°C , el 50% de los datos son iguales o menores a 24.8°C y el 75 % de los datos son iguales o menores a 26.7°C y la mediana es de 24.8°C .

En la *figura 22*, pueden observarse los valores de temperatura ajustándose a la línea de normalidad.

Momentos y cuartiles para la temporada de lluvias			
Cuartiles		Momentos	
Mínimo	18.4 °C	Media	24.7 °C
Q1	22.9 °C	Desviación estándar	2.88
Q2 (mediana)	24.8 °C	Tamaño de muestra	22
Q3	26.7 °C		
Máximo	29.7 °C		

Tabla 13. *Cuartiles y momentos del agua subterránea de la temperatura en la temporada de lluvias*



Figura 22. *Gráfico PP-plot de temperatura del agua subterránea en temporada de lluvias*

En la *figura 23*, se puede observar el diagrama de caja de las temperaturas del agua subterránea en la temporada de lluvias, en donde se puede apreciar que el 50% de las observaciones se encuentra entre el rango 22.9 °C y 26.7 °C

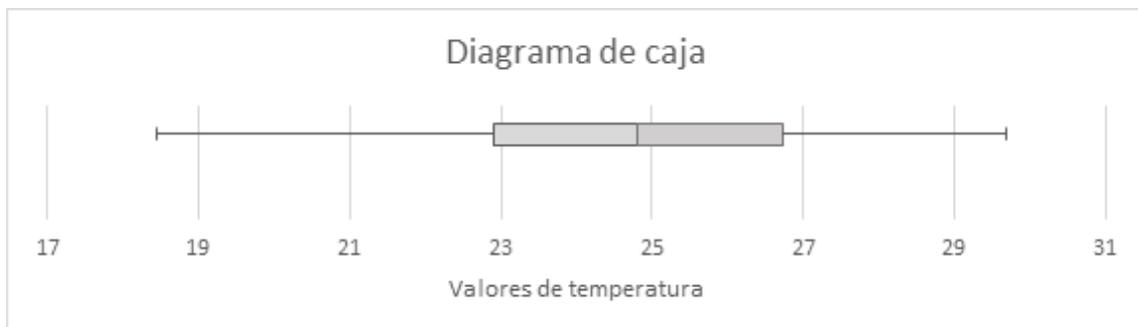


Figura 23. *Diagrama de caja de las temperaturas del agua subterránea en la temporada de lluvias*

VI.I.III Distribución de temperaturas en la temporada de lluvias y estiaje en la ciudad de Morelia, y su relación con los sistemas de flujo de agua subterránea.

VI.I.III.I Distribución geográfica de temperaturas en la temporada de estiaje

En la *figura 24*, se observa la temperatura del agua subterránea en la ciudad de Morelia, de acuerdo con la interpolación tipo Kernel con barreras, como se puede observar la temperatura al suroeste de la ciudad es la más baja, con valores de 22.3 °C a 23.7 °C, mientras que en la parte norte de la ciudad se encuentran las temperaturas más altas, oscilando entre las categorías de 26.6 °C a 31.7 °C, en el centro de la ciudad se encuentran temperaturas intermedias, en una categoría que agrupa temperaturas de 24.6 °C a 25.8 °C.

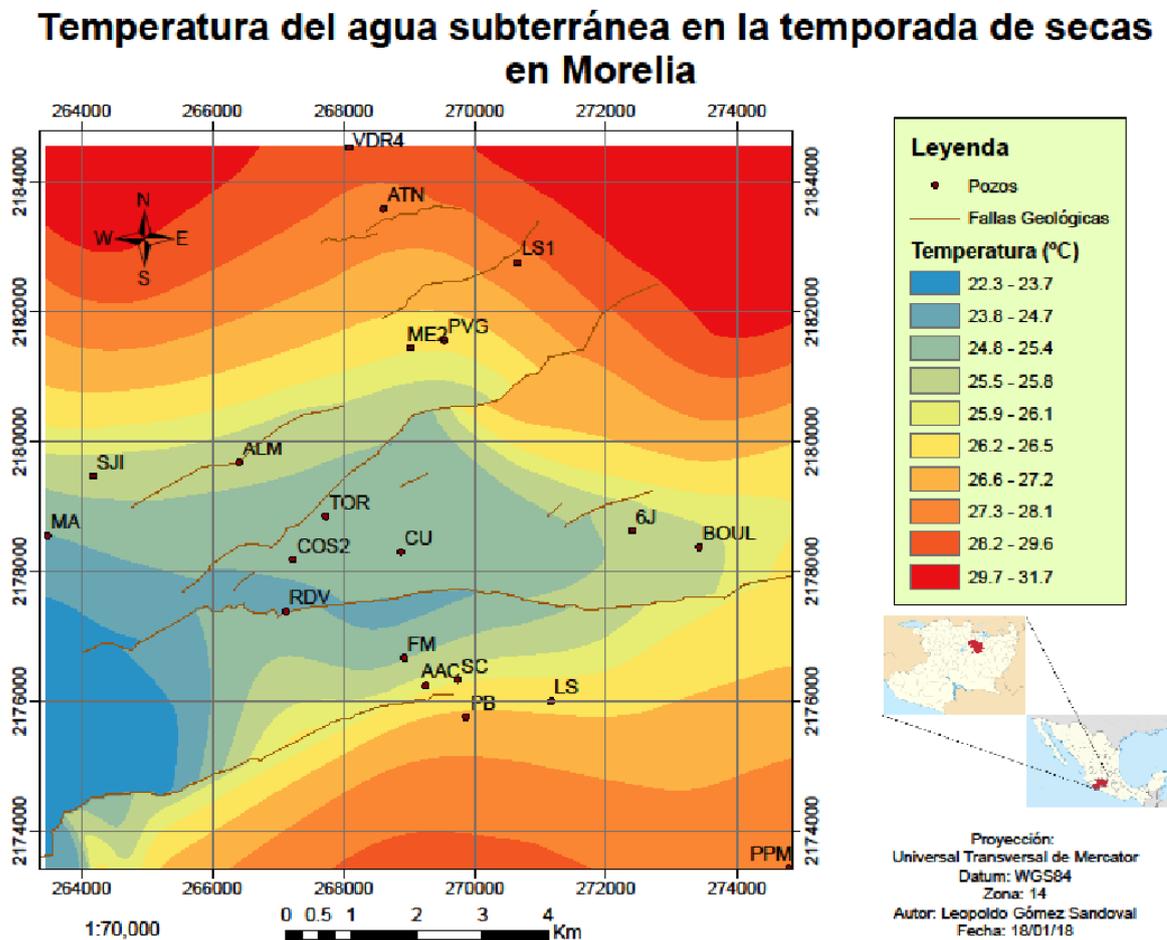


Figura 24. Mapa de distribución de temperaturas de agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en temporada de estiaje. En la figura se puede apreciar que las temperaturas más elevadas están hacia la zona sur de Morelia (Altozano Santa María) y en la zona norte de Morelia. Las temperaturas más bajas corresponden con la ubicación de la Ciudad de Morelia, el flujo de agua subterránea es de SW a NE.

VI.I.III.II Distribución geográfica de la temperatura en la temporada de lluvias

En la *figura 25*, se observa la temperatura del agua subterránea en la ciudad de Morelia en la temporada de lluvias, de acuerdo con la interpolación tipo Kernel con barreras, como se puede observar la temperatura al sureste y suroeste de la ciudad es la más baja, con valores de 19.1 °C a 24°C, mientras que en la parte norte de la ciudad se encuentran las temperaturas más altas, oscilando entre las categorías de 26 °C a 29.2 °C, en el centro de la ciudad se encuentran temperaturas intermedias, en una categoría que agrupa temperaturas de 24.1 °C a 25.9 °C, encontrando un pozo con el rango de temperaturas más alto, dicho pozo es el TOR, ubicado a un costado de Ciudad Universitaria.

VI.I.III.III La temperatura y el acuífero local de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

De acuerdo con la geología del área de estudio, el centro de la ciudad en donde se encontraron las temperaturas más bajas, corresponde a *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* descrita por Israde-Alcántara (1995), la cual aflora en la parte sur y oriente de Morelia, donde está caracterizada por limos y arcillas, cuyo espesor es de 60 metros, hacia La Huerta, esta secuencia se compone de cenizas volcánicas con matriz arcillosa, alternada con niveles arcillo-limosos. En el libramiento norte y altura del río Grande se presentan conglomerados y niveles de arenas y limos afectados por la falla de la central camionera, una de las más importantes de la ciudad. En la zona industrial la *Secuencia fluvio-lacustre* está caracterizada por arcillas y limos cafés y cenizas blancas que sobreyace a las brechas y lavas del Punhuato. Es allí donde esa secuencia presenta su máxima expresión.

En esta *secuencia fluvio-lacustre*, es en donde Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007) identifican un *acuífero de flujo local*, el cual es somero, ya que su profundidad se encuentra desde algunos metros y puede llegar hasta los 80 metros. Esta secuencia está entre los poros de los depósitos lacustres y fluviolacustres del Mioceno-Plioceno. La superficie freática de este acuífero es capaz de subir y bajar entre los depósitos más permeables según la temporada de lluvia o de estiaje, incluso de su explotación lo cual lo clasifica en un acuífero de tipo libre Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007).

VI.I.III.II.I Temperaturas bajas en la *Secuencia fluvio-lacustre*

El flujo de agua proveniente del *Cerro del Águila* ubicado en las lavas del vulcanismo tipo semi escudo, registra las temperaturas de agua más bajas de este estudio. Garduño-Monroy *et al.*, (2014) mencionan que el acuífero de la secuencia fluvio-lacustre recibe aportes del flujo del *Cerro del Águila* entre otros más, los cuales pueden observarse de mejor manera en las interpolaciones de temperatura generadas en este trabajo (*figuras 24 y 25*).

Aunado a lo anterior, la temperatura del manantial *La Mintzita*, originado por los flujos de agua asociados con el *Cerro del Águila*, fue de 22.5 °C en la temporada de estiaje y de 22.7 °C en la temporada de lluvias, esta agua “fría” como puede observarse en las *figuras 24 y 25* se encuentra a lo largo de la secuencia fluvio-lacustre, siendo proveída por los flujos del *Cerro del Águila*, el cual de acuerdo con esta información sería la zona que más agua “fría” asociada a flujos de agua locales, al *acuífero somero* en la *secuencia fluvio-lacustre* y a los manantiales dentro de la ciudad de Morelia.

VI.I.III.II.II Temperaturas altas en la *Secuencia fluvio-lacustre*

A pesar de que la *secuencia fluvio lacustre* se caracterizó por presentar temperaturas intermedias que van de 24.1 °C a 25.9 °C, en la temporada de lluvias se obtuvieron dos temperaturas atípicas para esta unidad geológica. La primera, en el pozo denominado TOR (en un fraccionamiento llamado *Toreo* al lado de Ciudad Universitaria), se registró una temperatura de 29.7 °C, la segunda, en el pozo COS2 para el cual se registró una temperatura de 27.2 °C.

Los registros anteriores de temperaturas, representan en la *secuencia fluvio lacustre* un punto de agua caliente, que se presenta en las temporadas de lluvia en los pozos TOR y COS2; sin embargo, para la temporada de estiaje las temperaturas registradas para este punto son intermedias que van de 24.1 °C a 25.9 °C. Lo anterior podría significar que existe una línea de flujo diferente en la temporada de lluvias que en la temporada de estiaje.

Esto significa que en la temporada de lluvias *figura 25*, el aporte de agua a la *secuencia fluvio-lacustre* proviene del sur, es decir de la caldera de Atecuaro y de los *flujos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* funcionando como una barrera la falla

La Paloma. De igual forma podemos apreciar en la *figura 24* que para la temporada de estiaje el flujo es de SW a NE el cual coincide con el de las fallas geológicas.

VI.I.III.III.III La temperatura intermedia en la *Secuencia fluvio-lacustre*

Las temperaturas intermedias de esta secuencia van de 24.1 °C a 25.9 °C, de acuerdo con Garduño-Monroy *et al.* (2014) este acuífero de flujo local recibe aportes de agua provenientes de la caldera de Atecuaro y de las subcuencas del *Río Grande* y del *Río Chiquito*, así como aportes de flujo intermedio de los mismos y del acuífero profundo ubicado en los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno* (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2005). Los aportes de agua caliente provenientes de la *Secuencia volcánica Pleistocénica-Holocénica del Corredor Tarasco* y de la *Secuencia volcánica Pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco* se mezclan con el agua fría que aporta el *Cerro del Águila*, las cuales generan las temperaturas intermedias registradas en la secuencia fluvio-lacustre.

Temperatura del agua subterránea en la temporada de lluvias en Morelia

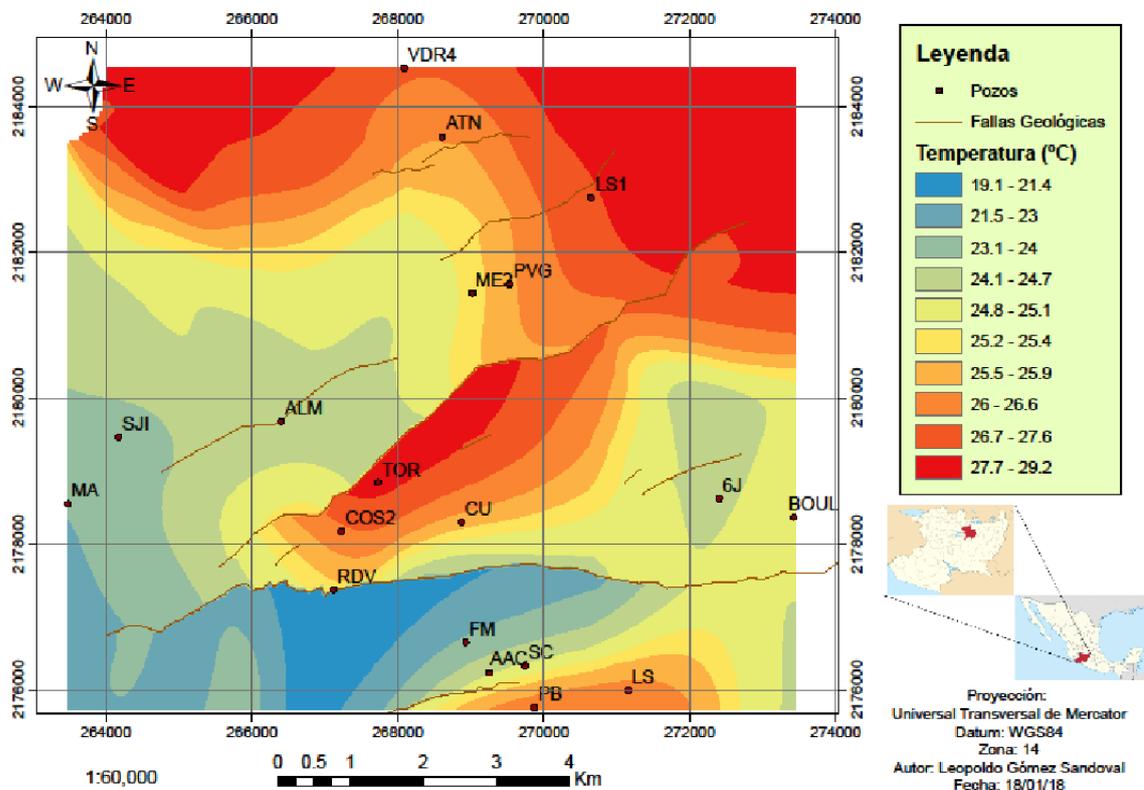


Figura 25. Mapa de distribución de temperaturas de agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias.

VI.I.III.IV La temperatura y el acuífero de semi escudo de la Secuencia volcánica Pleistocénica-Holocénica del Corredor Tarasco

En la parte noroeste de la ciudad se encuentra la denominada *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco* descrita por Garduño *et al.* (2014) la cual corresponde a los productos del vulcanismo monogenético del CVTM y es la unidad más reciente dicha secuencia está conformada por lavas andesíticas y eventualmente andesítico-basálticas que provienen de los volcanes *El Quinceo*, *Las Tetillas* y el *Cerro del Águila*. El volcán *Las Tetillas* es más joven que *El Quinceo* y ambos son de tipo semi escudo.

En el acuífero alojado en los volcanes tipo semi escudo que identificaron Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007) dentro de la denominada *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco*, registró temperaturas altas en el agua subterránea las cuales van de 26.6 °C a 31.7 °C.

VI.I.III.V La temperatura y el acuífero profundo de los Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)

En la parte Sur de la ciudad se encuentran los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* descritos por (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2005). La ubicación de estos flujos se encuentra en edificio volcánico de la caldera de Atecuaro, la zona del club campestre de Morelia, escarpe de la falla *La Paloma*, Loma de Santa María y Tecnológico de Monterrey (Garduño *et al.*, 2014).

Uno de los tres acuíferos descritos por Garduño *et al.* (2014), es el acuífero profundo, el cual tiene un flujo que comienza en el sur o suroeste, los flujos de este acuífero se mezclan con el de la *secuencia lacustre* porque en el diseño de sus pozos tiene tubos ranurados a lo largo de sus columnas.

Las altas temperaturas encontradas en la parte sur de la ciudad en este estudio, están asociados al acuífero profundo que identificaron Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007) en la unidad denominada *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* descritos por Israde-Alcántara y Garduño-Monroy (2005).

VI.II pH DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se tienen mediciones de pH de seis campañas de muestreo para 14 pozos y un manantial en la ciudad de Morelia, estas seis campañas de muestreo corresponden a una medición en 2013 y tres mediciones en 2014 realizadas por Estrada-Murillo (2015), así como dos mediciones en 2015 realizadas en este trabajo, en donde se muestreo una vez en la temporada de estiaje y una vez en la temporada de lluvias en cada año.

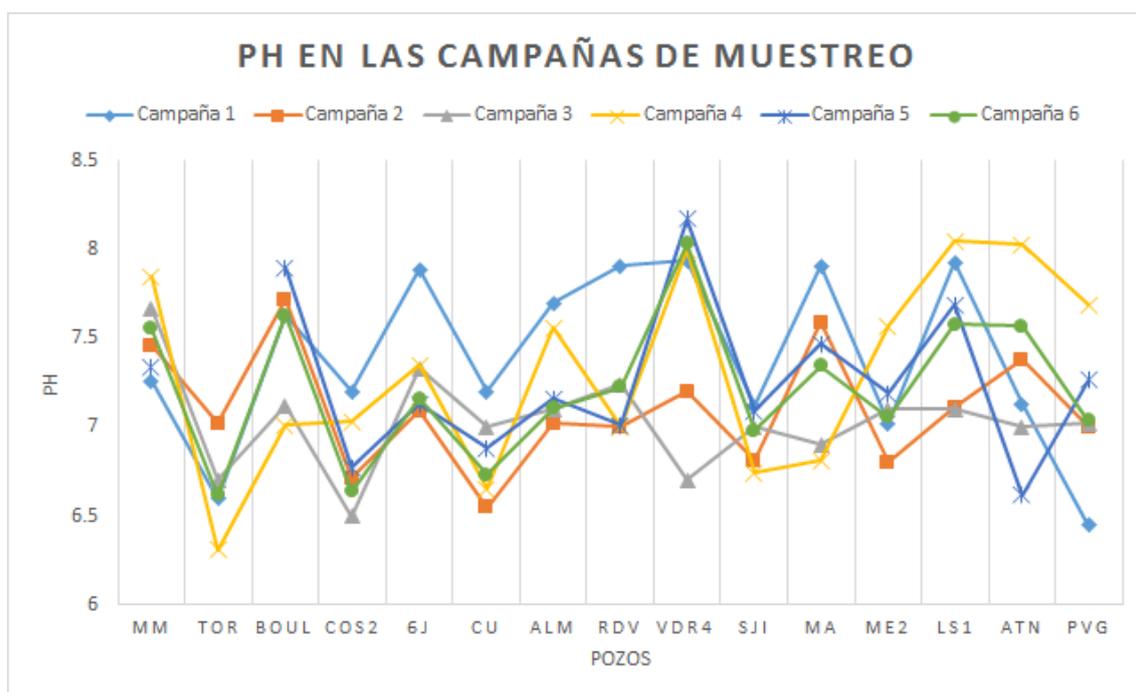


Figura 26. pH en las campañas de muestreo de pozos y manantiales de la ciudad de Morelia.

En la *figura 26*, puede observarse la fluctuación del pH en cada pozo a lo largo de tres años de muestreo en las temporadas de lluvias y de estiaje, en general la mayoría de los pozos conserva su valor de pH a lo largo de las seis campañas de muestreo, en los pozos donde se observa mayor fluctuación a lo largo del tiempo son los pozos VDR4, MA y PVG. También puede observarse que, en la primera campaña de muestreo, se obtuvieron valores de pH más alcalinos que en las demás campañas.

En las siguientes secciones se analizará a profundidad la distribución de los valores de pH en la temporada de lluvias y estiaje del último año de monitoreo.

VI.II.I Estadística descriptiva del pH del agua subterránea

VI.II.I.I Temporada de estiaje

En la *figura 27* se puede observar el histograma con la distribución de frecuencias de las marcas de clase, así como el polígono de frecuencias del pH del agua subterránea para la temporada de lluvias. Como puede apreciarse, la clase modal de pH en la distribución de los datos es de 7 a 7.49. La media de los datos es de 7.29, la mediana es de 7.3 y la desviación estándar es de 0.52.

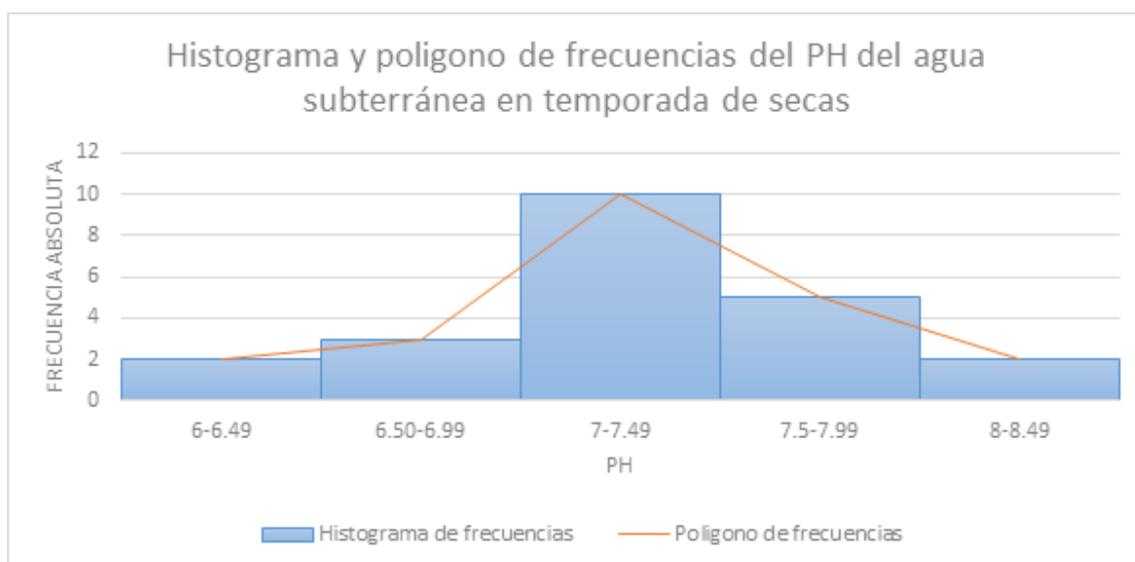


Figura 27. Histograma y polígono de frecuencias del pH del agua subterránea en la temporada de estiaje

Como puede observarse en la *tabla 14* sobre los cuartiles, se tiene que el 25 % de los pozos muestreados presentan un pH igual o menor a 7.03, el cual es un pH neutro, el 50% de pozos muestreados presentan un pH igual o menor a 7.3, el cual es ligeramente alcalino y el 75 % de los pozos muestreados presentan un pH igual o menor 7.62, la mediana de los datos es de 7.3. En la *figura 28*, pueden observarse los valores de pH ajustándose a la línea de normalidad.

Momentos y cuartiles para la temporada de estiaje			
Cuartiles		Momentos	
Mínimo	6.29	Media	7.29
Q1	7.03	Desviación estándar	0.52
Q2 (mediana)	7.3	Tamaño de muestra	22
Q3	7.62		
Máximo	8.22		

Tabla 14. *Cuartiles y momentos del pH del agua subterránea en la temporada de estiaje*

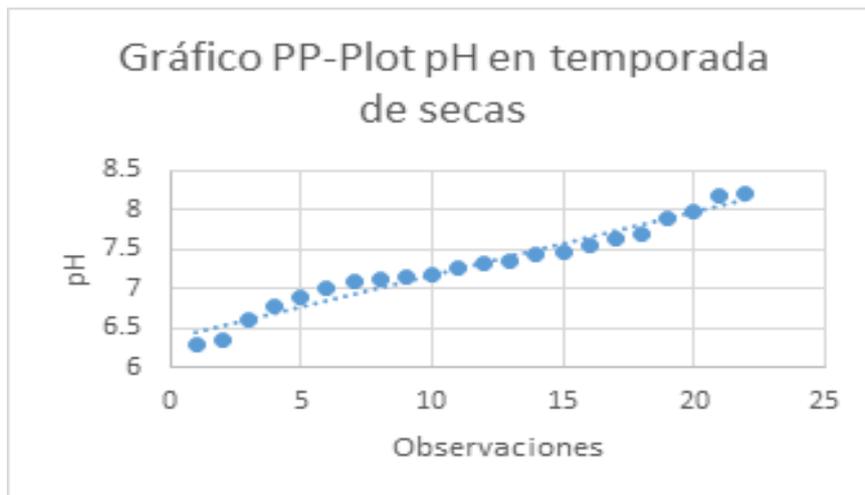


Figura 28. Gráfico PP-Plot de pH del agua subterránea en temporada de estiaje

En la figura 28, se puede observar el diagrama de caja de pH del agua subterránea en la temporada de estiaje, en donde se puede apreciar que el 50% de las observaciones se encuentra entre el rango 7.03 y 7.62, es decir que el 50% de los pozos muestreados en la ciudad tienen un pH que va de neutro a ligeramente básico en la temporada de estiaje. Sin embargo cinco de las observaciones presentan un pH menor a siete, estos valores bajos de pH pueden causar desordenes gastrointestinales y por lo tanto no podría ser usada para consumo humano (Nagarajan *et al.*, 2010), en la temporada de lluvias también se observan valores bajos de pH.

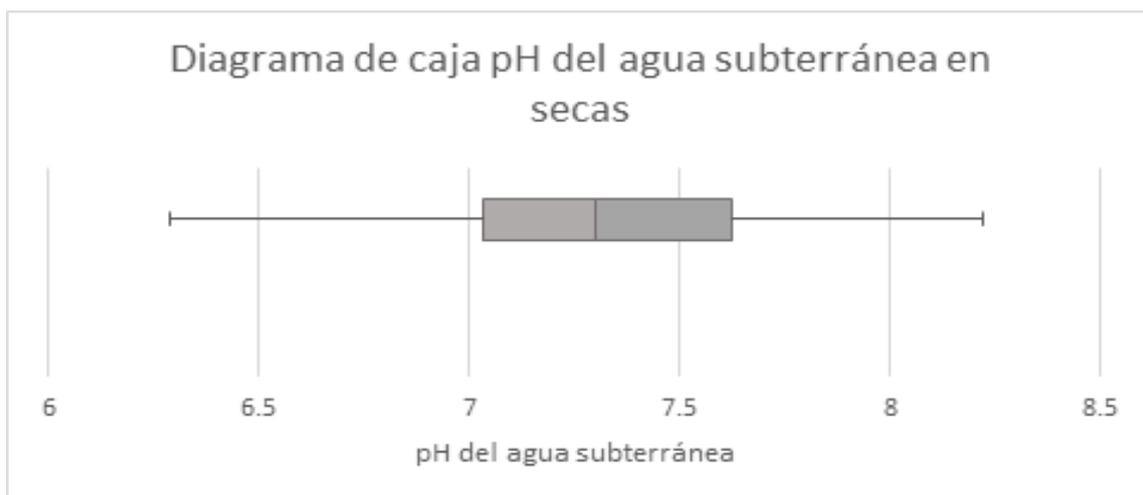


Figura 29. Diagrama de caja de pH del agua subterránea en la temporada de estiaje

VI.II.II Temporada de lluvias

En la figura 30 se puede observar el histograma con la distribución de frecuencias registradas en marcas de clase, así como el polígono de frecuencias del pH del agua subterránea para la temporada de lluvias. Como puede apreciarse, la clase modal de pH en la distribución de los datos es de 7 a 7.49. La media de los datos es de 7.24, la mediana es de 7.27 y la desviación estándar es de 0.450.

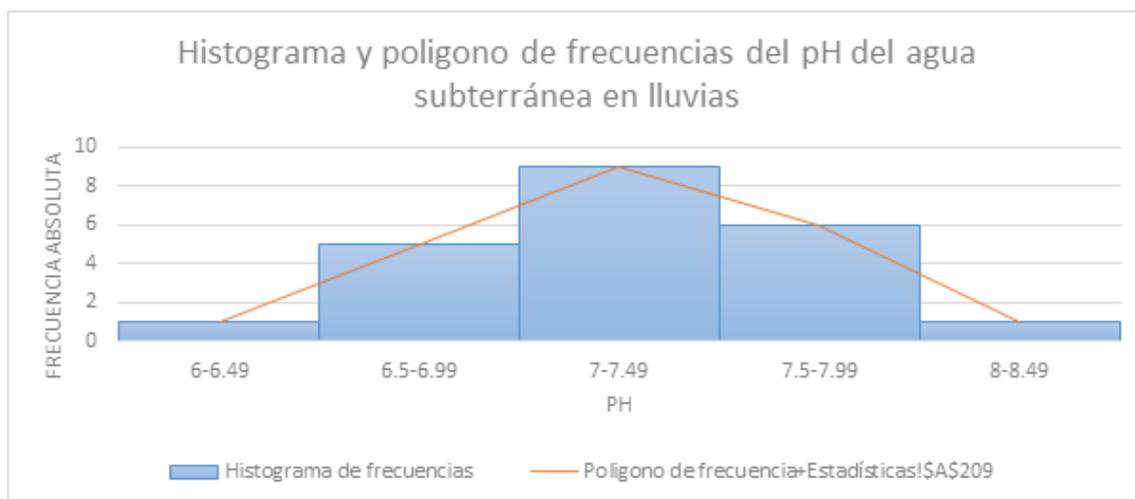


Figura 30. Histograma y polígono de frecuencias del PH del agua subterránea en la temporada de lluvias.

Como puede observarse en la *tabla 15* sobre los cuartiles y momentos, se tiene que el 25 % de los pozos muestreados presentan un pH igual o menor a 6.99, el cual es un pH casi neutro, el 50% de pozos muestreados, presentan un pH igual o menor a 7.27, el cual es ligeramente alcalino y el 75 % de los pozos muestreados presentan un pH igual o menor a 7.56 el cual también es ligeramente alcalino, la mediana de los datos es de 7.27. En la figura 31, pueden observarse los valores de pH ajustándose a la línea de normalidad.

Momentos y cuartiles para la temporada de lluvias			
Cuartiles		Momentos	
Mínimo	6.40	Media	7.24
Q1	6.99	Desviación estándar	0.450
Q2 (mediana)	7.27	Tamaño de muestra	22
Q3	7.56		
Máximo	8.03		

Tabla 15. Cuartiles y momentos del pH del agua subterránea en la temporada de lluvias

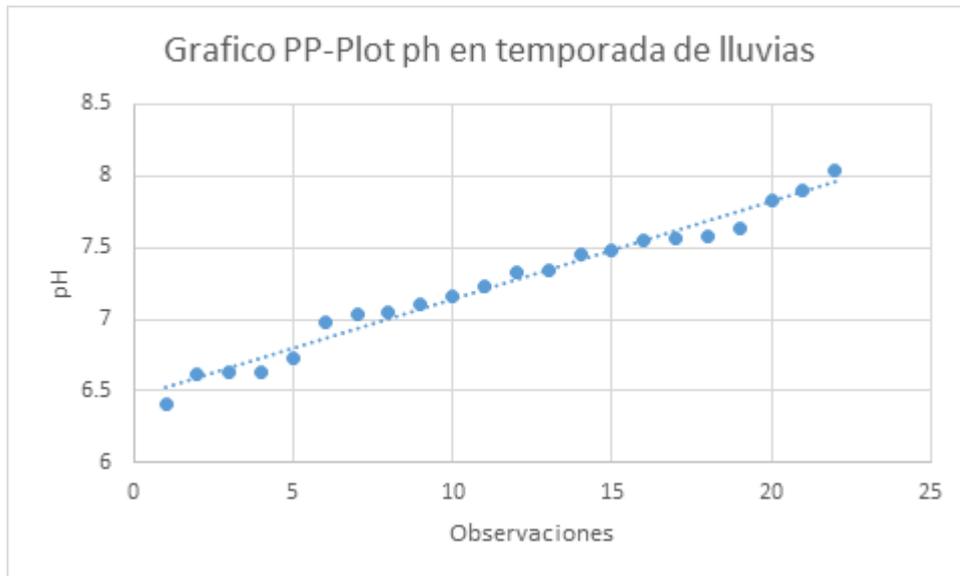


Figura 31. Gráfico PP-Plot del pH del agua subterránea en la temporada de lluvias

En la figura 32, se puede observar el diagrama de caja del pH del agua subterránea en la temporada de estiaje, en donde se puede apreciar que el 50% de las observaciones se encuentra entre el rango 6.99 y 7.56, es decir que el 50% de los pozos muestreados en la ciudad tienen un pH que va de neutro a ligeramente básico en la temporada de lluvias al igual que en la temporada de estiaje.

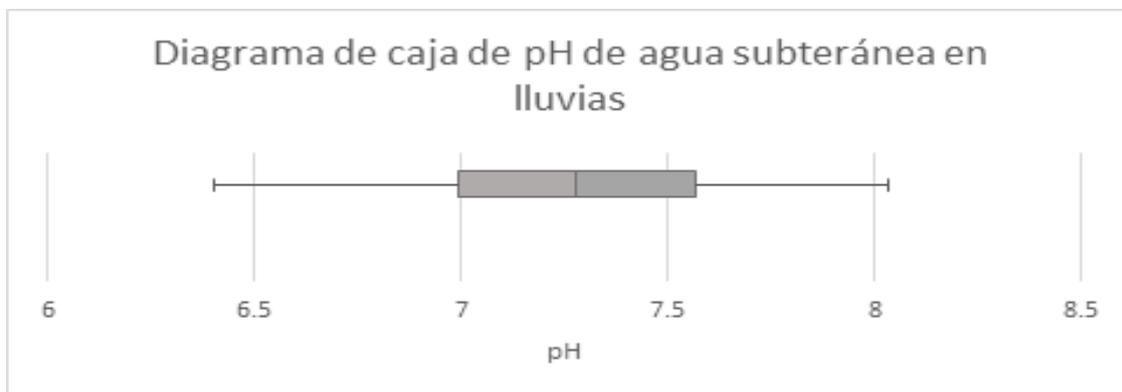


Figura 32. Diagrama de caja de pH del agua subterránea en la temporada de lluvias

VI.II.II Distribución de pH en la temporada de lluvias y estiaje en la ciudad de Morelia, y su relación con los sistemas de flujo de agua subterránea

VI.II.II.I Distribución geográfica del pH en la temporada de estiaje

En la *figura 33*, se observan los valores de pH del agua subterránea en la ciudad de Morelia para la *temporada de estiaje*. De acuerdo con la interpolación tipo Kernel con barreras, se puede observar que el pH en la *secuencia fluvio-lacustre* se presenta en valores neutros y ligeramente ácidos, encontrándose valores de pH de 6.8 a 7. Al sureste de la ciudad se encontraron valores de pH alcalino, variando estos de 7.6 a 8.3, mientras que al suroeste se encuentran valores más alcalinos, variando estos de 7.3 a 7.6. Al norte de la ciudad se observan valores de pH de mayores a 8

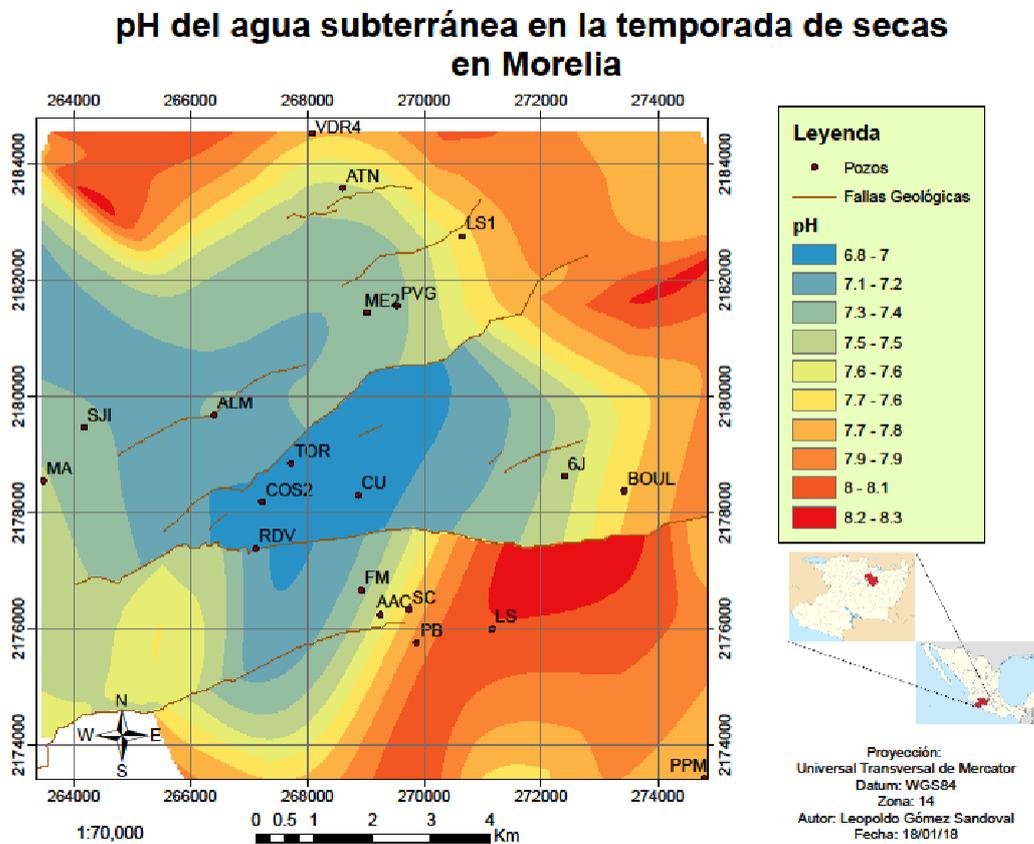


Figura 33. Mapa de distribución de valores de pH del agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán, en la temporada de estiaje.

Puede observarse que todos los valores de pH se encuentran por encima de 6.8, es decir son valores neutros o básicos, la *secuencia fluvio-lacustre* es en donde se presentan los valores más ácidos, mientras que al norte y al sur se encuentra los valores más alcalinos. Puede observarse que la falla geológica *La Paloma* funciona como una barrera.

VI.II.II.II Distribución geográfica del pH en la temporada de lluvias

En la *figura 34*, se observan los valores de pH del agua subterránea para la temporada de lluvias. De acuerdo con la interpolación tipo Kernel con barreras, se puede observar que el pH en el centro y al oeste de la ciudad presenta valores neutros y ligeramente ácidos variando estos de pH de 6.5 a 7, mientras que en la parte sureste de la ciudad se encontraron valores de pH por encima de 8, los cuales van decreciendo de Este a Oeste en la ciudad.

Al norte de la ciudad se observa el mismo comportamiento, es decir, valores de pH superiores a 8 y conforme se avanza hacia la *secuencia fluvio-lacustre*, el pH se acidifica gradualmente, hasta llegar al valor de 6.5 en el centro de la ciudad.

A diferencia de la temporada de estiaje en donde el valor de pH más ácido fue de 6.8 en la *Secuencia fluvio-lacustre*, los valores de pH en la temporada de lluvias cambian ligeramente ya que se registraron valores de pH de 6.5, lo cual podría ser indicador de que el aporte estacional de agua de lluvia es lo que podría estar acidificando ligeramente el agua del acuífero en la temporada de lluvias de esta unidad geológica, de ser así se corrobora que este acuífero es de *flujo local* (Tóth, 2000).

A pesar de la diferencia de pH en la *secuencia fluvio-lacustre* en temporada de lluvias y estiaje, el patrón de distribución geográfica de los valores de pH se mantiene estable tanto para la temporada de lluvias como para la temporada de estiaje.

VI.II.III El pH y el acuífero de los volcanes de semi-escudo de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco*

VI.II.III.I Aporte de agua de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco* a la *Secuencia fluvio-lacustre*

En la *secuencia fluvio-lacustre*, situada en el centro de la ciudad, se encontraron valores de pH neutros en el agua subterránea, los cuales, de acuerdo con la interpolación realizada, están asociados a los flujos de agua provenientes de la denominada *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco*, específicamente del *Cerro del Águila*, tanto en la temporada de lluvias como en la de estiaje. En las *figuras 24, 25, 33 y 34* puede observarse que existe el mismo patrón espacial de la temperatura y del pH en la

línea de flujo proveniente del *Cerro del Águila* que llega a la *secuencia fluvio-lacustre* tanto en lluvias como en estiaje.

VI.II.III.I.I Diferencias de pH entre la temporada de lluvias y la de estiaje

De acuerdo con las interpolaciones de pH (*figuras 33 y 34*), no existe un cambio de pH entre la temporada de lluvias y de estiaje, ambas conservan la misma distribución y patrón espacial, sin embargo, en la temporada de lluvias, en el acuífero libre de flujo local de la *Secuencia fluvio-lacustre* se identificaron valores de pH más ácidos, lo anterior debido al aporte constante de agua de lluvia (Tóth, 2000).

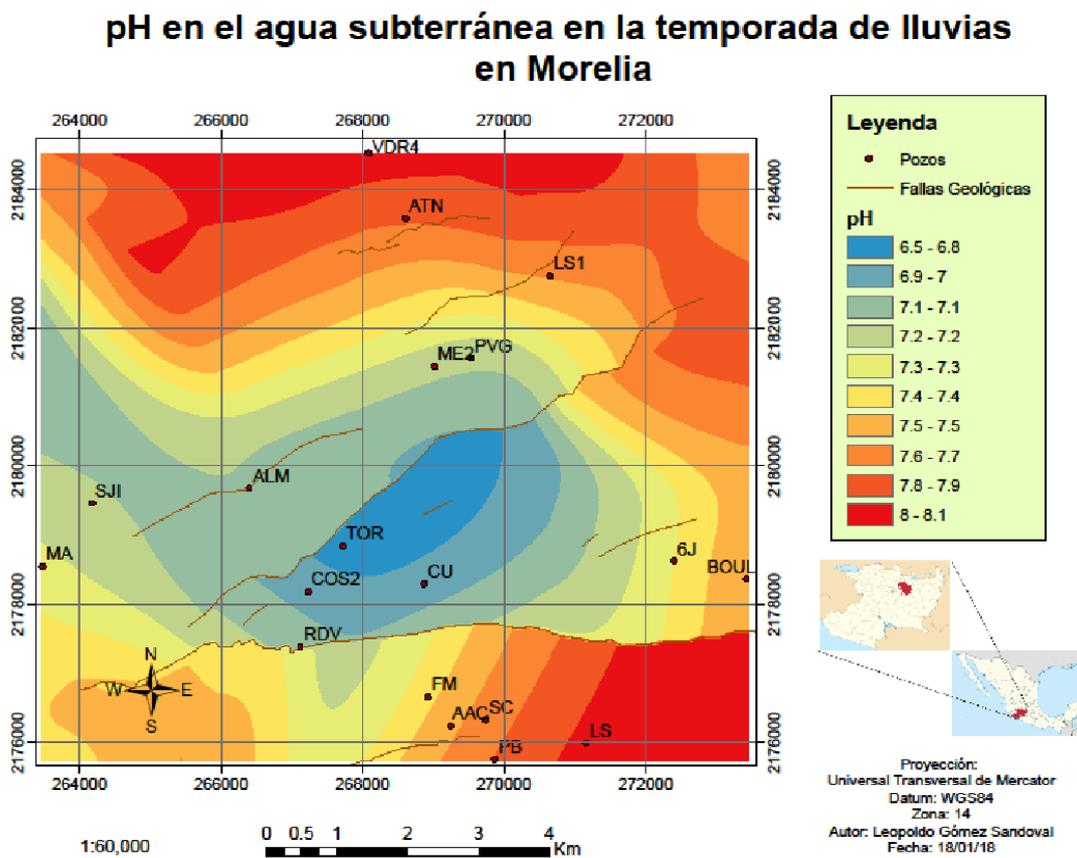


Figura 34. Mapa de distribución de valores de pH del agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias

VI.II.IV El pH en los *Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* y acuífero profundo

Los valores de pH alcalinos encontrados en la parte sureste de la ciudad en este estudio (*figuras 33 y 34*), y diferenciados del resto de los encontrados en la *secuencia fluvio-lacustre*, pertenecen al acuífero profundo que identificaron Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007) en la unidad denominada *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*. Estos valores de pH son los más alcalinos encontrados en toda la ciudad, se debe al contenido de calcio y magnesio de la plagioclasa, piroxeno y biótica, minerales que componen la roca ígnea.

En los mapas de interpolación del pH puede observarse que en la *cantera de Morelia* se tienen los valores de pH más alcalinos registrados al Este de esta secuencia, sin embargo, mientras se avanza al de Este a Oeste el pH se va neutralizando gradualmente (*figuras 33 y 34*).

El mismo patrón se observa en la parte norte en la temporada de lluvias, y noroeste en la temporada de estiaje (*figura 34*), en la parte noroeste se encontraron valores de pH superiores a 8 y a medida que avanza hacia la *Secuencia fluvio-lacustre* se acidifican gradualmente hasta llegar a un pH de 6.8. El mismo patrón espacial se presenta en la temporada de lluvias, con la diferencia de que el pH superior a 8 se localiza en todo el norte de la ciudad.

VI.II.IV.I pH en el acuífero local de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

Las valores de pH ligeramente ácidos encontrados en el agua subterránea de la ciudad, pertenecen a un acuífero de tipo local que identificaron Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007) en la parte centro de la *Secuencia fluvio-lacustre*, este acuífero recibe aportes de agua del acuífero de los volcanes semi escudo de del *corredor Tarasco* y del acuífero en la *cantera de Morelia*, al encontrarse estos flujos subterráneamente con la *secuencia fluvio-lacustre* se observa un cambio gradual de pH reflejado en las *figuras 33 y 34*

VI.III CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se tienen mediciones de conductividad eléctrica de seis campañas de muestreo para 14 pozos y un manantial en la ciudad de Morelia, estas seis campañas de muestreo corresponden a una medición en 2013 y tres mediciones en 2014 realizadas por Estrada-Murillo (2015), así como dos mediciones en 2015, en donde se muestreo una vez en la temporada de estiaje y una vez en la temporada de lluvias en cada año.

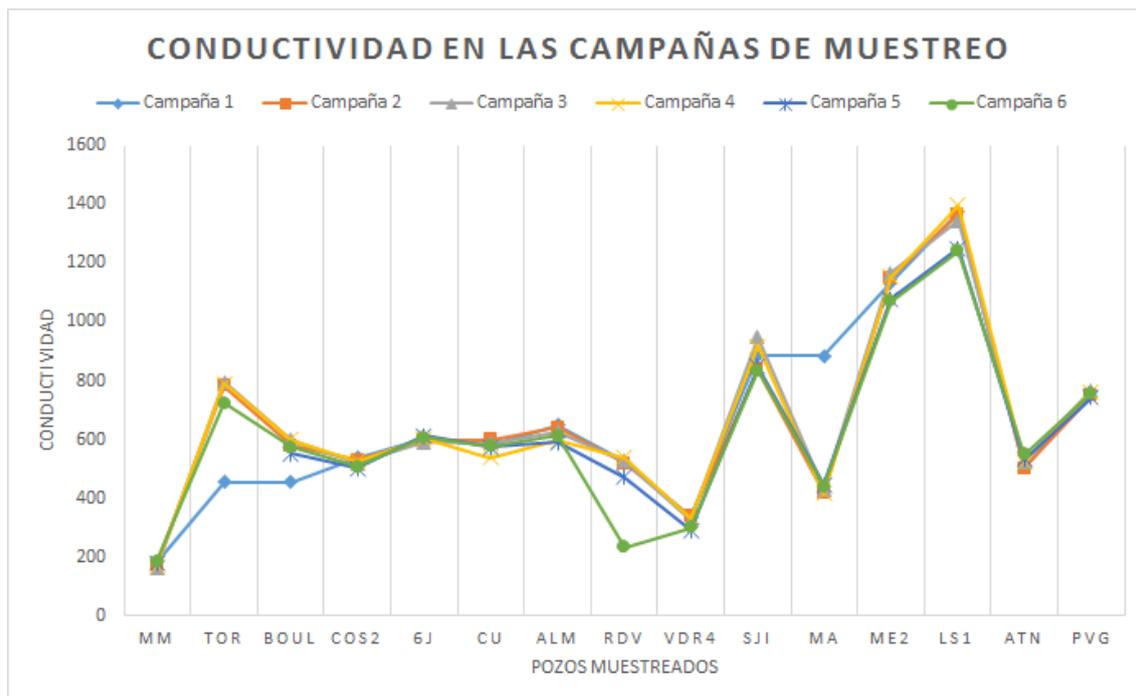


Figura 35. Conductividad en las campañas de muestreo de pozos y manantiales de la ciudad de Morelia.

En la figura 35, se puede observar la fluctuación de la conductividad en cada pozo a lo largo de tres años de muestreo en las temporadas de lluvias y de estiaje, en general la mayoría de los pozos conserva la misma conductividad a lo largo de las seis campañas de muestreo, en los pozos donde se observa mayor fluctuación a lo largo del tiempo es en el TOR, MA y RDV. La conductividad está asociada con contenido de sólidos que a su vez se relacionan con fluidos regionales cuando hay baja resistividad.

En las siguientes secciones se analizará a profundidad la distribución de los valores de pH en la temporada de lluvias y estiaje del último año de monitoreo.

VI.III .I Estadística descriptiva de la conductividad del agua subterránea

VI.III.I.I Temporada de estiaje

En la *figura 36* se puede observar el histograma con la distribución de frecuencias en las marcas de clase, así como el polígono de frecuencias de la conductividad del agua subterránea para la temporada de estiaje. Como puede apreciarse, la clase modal de conductividad en la distribución de los datos es de 100 μS a 299 μS . La media de los datos es de 503.82 μS , la mediana es de 487 μS y la desviación estándar es de 287.04

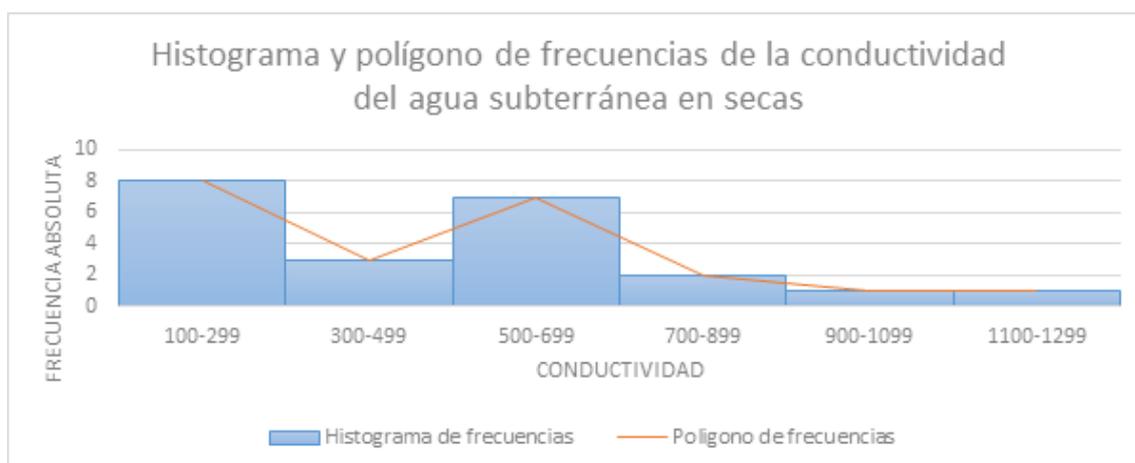


Figura 36. Histograma y polígono de frecuencias de la conductividad del agua subterránea en la temporada de estiaje.

Como puede observarse en la *tabla 16* sobre los cuartiles, se tiene que el 25 % de los pozos muestreados presentan una conductividad igual o menor a 277.75 μS , el 50% de los pozos muestreados, presentan una conductividad igual o menor a 487 μS y el 75 % de los pozos muestreados tienen una conductividad igual o menor a 607.25 μS , la mediana de los datos es de 487 μS . En la *figura 37*, pueden observarse los valores de conductividad ajustándose a la línea de normalidad.

Momentos y cuartiles para la temporada de estiaje			
Cuartiles		Momentos	
Mínimo	118.9 μS	Media	503.82 μS
Q1	277.75 μS	Desviación estándar	487
Q2 (mediana)	487 μS	Tamaño de muestra	22
Q3	607.25 μS		
Máximo	1250 μS		

Tabla 16. *Cuartiles y momentos de la conductividad del agua subterránea en la temporada de estiaje.*

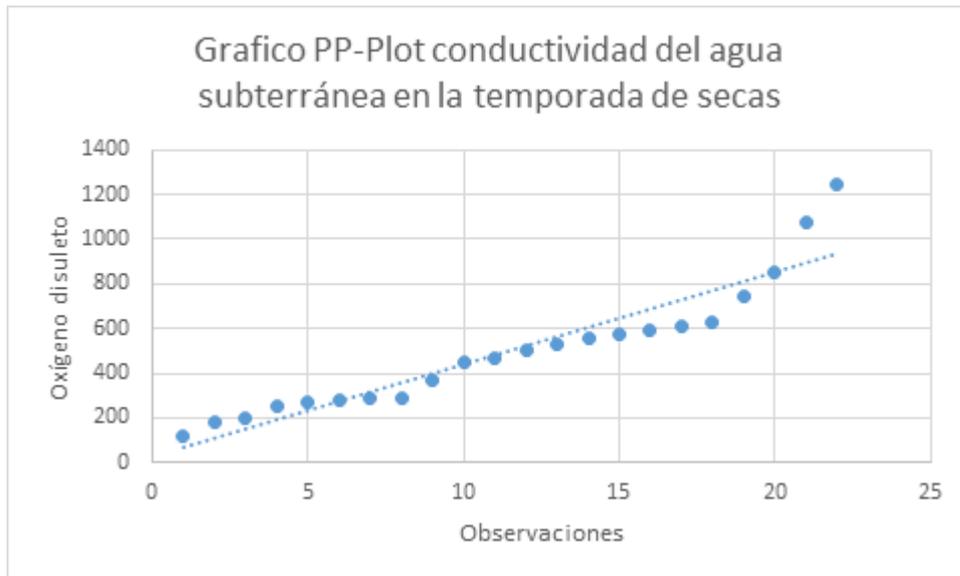


Figura 37. Gráfico PP-Plot conductividad del agua subterránea en la temporada de estiaje

En la figura 38, se puede observar el diagrama de caja de la conductividad en el agua subterránea en la temporada de estiaje, en donde se puede apreciar que el 50% de las observaciones se encuentra entre el rango 277.75 μ S y 607.25 μ S, es decir que el 50% de los pozos muestreados en la ciudad tienen esa conductividad en la temporada de estiaje.

Los pozos muestreados que presentaron una conductividad alta podría deberse al enriquecimiento de sal debido a la evaporación (Kumar *et al.*, 2007), aunque Li *et al.* (2018) proponen que no es la evaporación la que aumenta el contenido salino del agua, sino que esto se debe a la disolución de minerales de la roca. Los pozos que presentaron la conductividad más alta en la temporada de estiaje fueron el LS1 y el ME2.

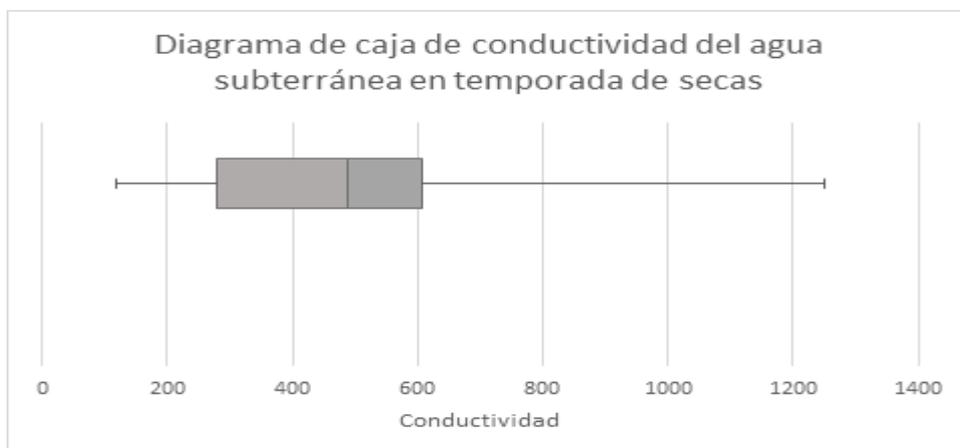


Figura 38. Diagrama de caja de conductividad del agua subterránea en temporada de estiaje

VI.III .I.1I Temporada de lluvias

En la *figura 39* se puede observar el histograma con la distribución de frecuencias de las marcas de clase, así como el polígono de frecuencias de la conductividad del agua subterránea para la temporada de lluvias. Como puede apreciarse, la clase modal de conductividad en la distribución de los datos es de 100 μS -300 μS . La media de los datos es de 510.7 μS , la mediana es de 528 μS y la desviación estándar es de 293.9 μS .

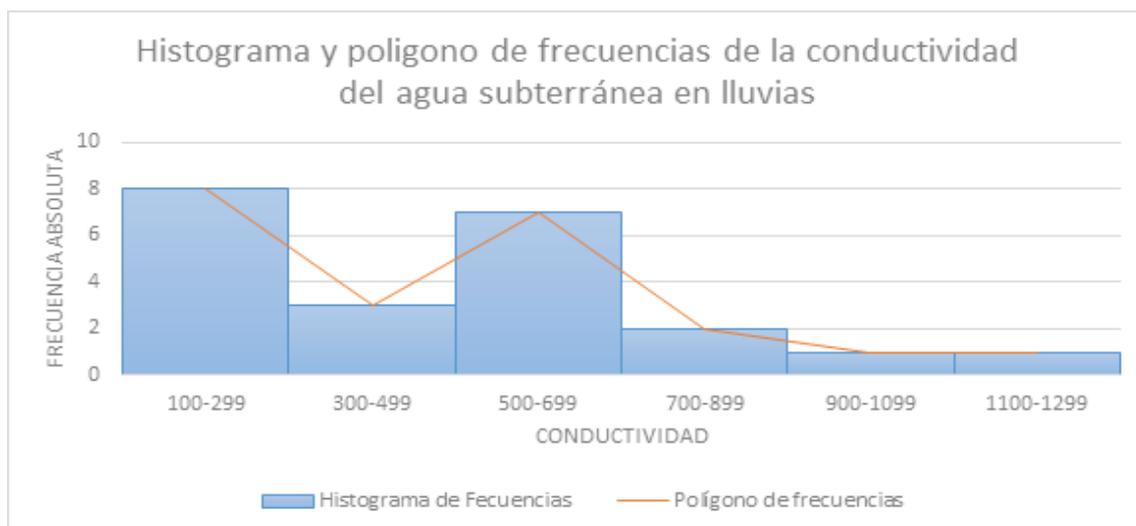


Figura 39. Histograma y polígono de frecuencias de la conductividad del agua subterránea en lluvias

Como puede observarse en la *tabla 17* sobre los cuartiles, se tiene que el 25 % de los pozos muestreados presentan una conductividad igual o menor a 267.62 μS , el 50% de pozos muestreados, presentan una conductividad igual o menor a 528 μS y el 75 % de los pozos muestreados tienen una conductividad igual o menor a 619.12 μS , la mediana de los datos es de 528 μS . En la *figura 40*, pueden observarse los valores de conductividad ajustándose a la línea de normalidad.

Momentos y cuartiles para la temporada de lluvias			
Cuartiles		Momentos	
Mínimo	117.95 μS	Media	510.7 μS
Q1	267.62 μS	Desviación estándar	293.9
Q2 (mediana)	528 μS	Tamaño de muestra	22
Q3	619.12 μS		
Máximo	1243 μS		

Tabla 17. Cuartiles y momentos de la conductividad del agua subterránea en la temporada de lluvias.

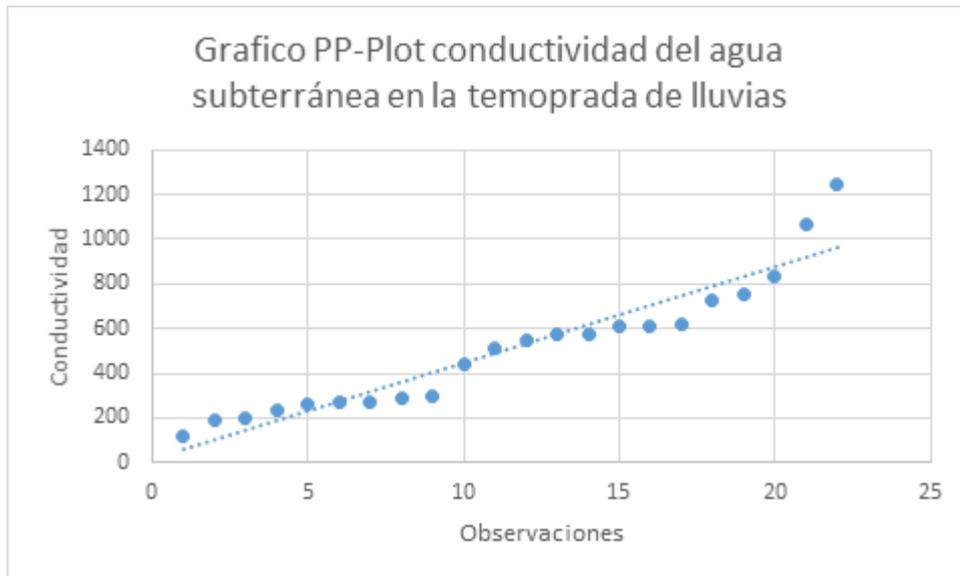


Figura 40. Gráfico PP-Plot de la conductividad del agua subterránea en la temporada de lluvias

En la figura 41, se puede observar el diagrama de caja de la conductividad en el agua subterránea en la temporada de lluvias, en donde se puede apreciar que el 50% de las observaciones se encuentra entre el rango 267.62 μS y 619.12 μS, es decir que el 50% de los pozos muestreados en la ciudad tienen esa conductividad en la temporada de lluvias.

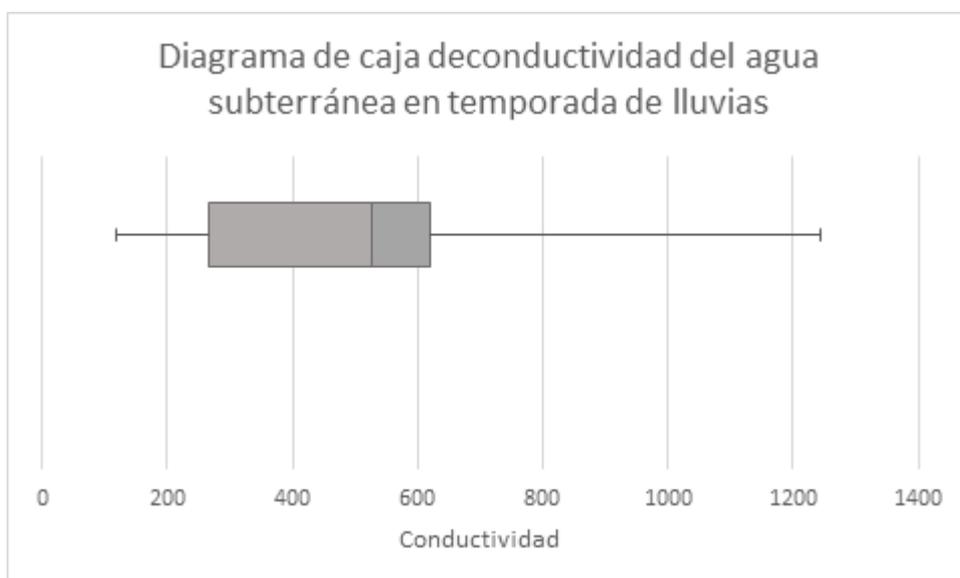


Figura 41. Diagrama de caja de conductividad del agua subterránea en la temporada de lluvias.

VI.III.II Distribución de la conductividad en la temporada de lluvias y estiaje en la ciudad de Morelia, y su relación con los sistemas de flujo de agua subterránea

VI.III.III.I Distribución geográfica de la conductividad en la temporada de estiaje

En la *figura 42* se observa la conductividad del agua subterránea en la ciudad de Morelia para la temporada de estiaje. Como se puede observar, la conductividad al sureste y al noroeste de la ciudad mantiene un rango de 162.4 μS a 277.5 μS , el rango de conductividad más bajo registrado, de igual manera se puede observar que en la parte noreste se encuentra el rango más alto para la conductividad 1,104.44 μS a 1,340.5 μS y valores intermedios en el centro de la ciudad en donde se encuentra la *secuencia fluvio-lacustre*.

Conductividad del agua subterránea en la temporada de secas en Morelia

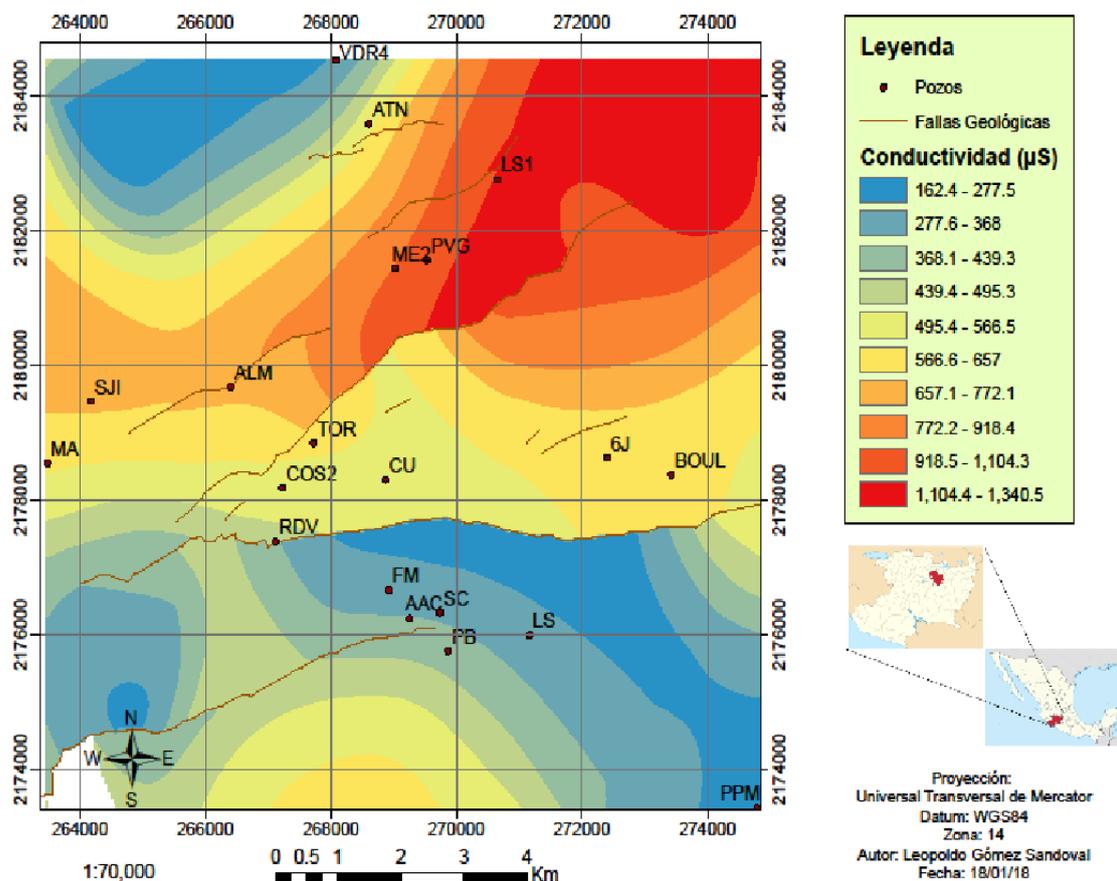


Figura 42. Mapa de distribución de valores de conductividad del agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de estiaje.

VI.III.II.II Distribución geográfica de la conductividad en la temporada de lluvias

En la *figura 43* se observan los valores de conductividad del agua subterránea en la ciudad de Morelia, para la temporada de lluvias. Como se puede observar la conductividad al sur y al noroeste de la ciudad es de 133.4 μS a 306.1 μS , los rangos de conductividad más bajos registrados, de igual manera se puede observar que en la parte noreste se encuentra el rango más alto para la conductividad, siendo este de 1,117.4 μS a 1,350.4 μS y valores medios al centro de la ciudad donde se encuentra la *secuencia fluvio-lacustre*.

VI.III.II.III Conductividad y el acuífero de tipo semi-escudo de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*

Uno de los tres acuíferos identificados por Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007), es el que se localiza entre las lavas del vulcanismo tipo semi escudo, este acuífero está formado por lavas del vulcanismo monogenético, tiene un flujo que comienza en el sector noroeste (Quinceo) y da lugar al surgimiento de agua en *Manantiales* y *La Colina*.

Los valores de conductividad encontrados en la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco* fueron valores de conductividad baja (133.4 μS y 303.1 μS) y conductividad intermedia (599.4 μS a 651.4 μS). Los valores de conductividad baja están asociados a los flujos de agua del *Cerro del Águila* y del *Quinceo*, mientras que los valores de conductividad intermedia, provienen del espacio entre estas dos elevaciones (*figuras 42 y 43*). El hecho de que la conductividad sea baja en el *Cerro del Águila*, es debido a que no tiene un alto contenido de sólidos, esta es una de las características de los flujos locales, como sería el caso del *Cerro del Águila* que al ser un área de recarga de flujo local no presenta una alta cantidad de sólidos (Tóth, 2000).

Los valores de conductividad intermedia (599.4 μS a 816.5 μS) se encuentran entre la elevación *Cerro del Águila* y el *Quinceo*, la cual tiene una línea flujo hacia la *Secuencia fluvio-lacustre*, unidad geológica que tiene los mismos valores de conductividad.

VI.III.II.III.I La conductividad del agua subterránea del Cerro del Águila

Los valores de temperatura sugieren que la mayor aportación de agua fría es por parte de los flujos asociados al *Cerro del Águila*, de igual forma los valores de pH demuestran que el agua subterránea del *Cerro del Águila* fluye hacia la *secuencia fluvio lacustre*, comportamiento que replican los valores de conductividad (*figuras 42 y 43*). Esto podría

corroborar el importante aporte de agua que proporciona el Cerro del Águila a la secuencia *fluvio-lacustre*.

VI.III.II.III.II La conductividad en la temporada de lluvias y en la temporada de estiaje

De acuerdo con los mapas de interpolación de conductividad (*figuras 42 y 43*) del agua subterránea, no existe un cambio de patrón entre la temporada de lluvias y la temporada de estiaje, ambas temporadas conservan la misma distribución y patrón geográfico, sin embargo, en la temporada de lluvias, las mediciones cercanas al *Cerro del Águila* presentaron una conductividad menor que en la temporada de estiaje (*figuras 42 y 43*), lo cual se debe al rápido aporte de agua de lluvia, el cual baja la conductividad.

Conductividad en el agua subterránea en la temporada de lluvias en Morelia

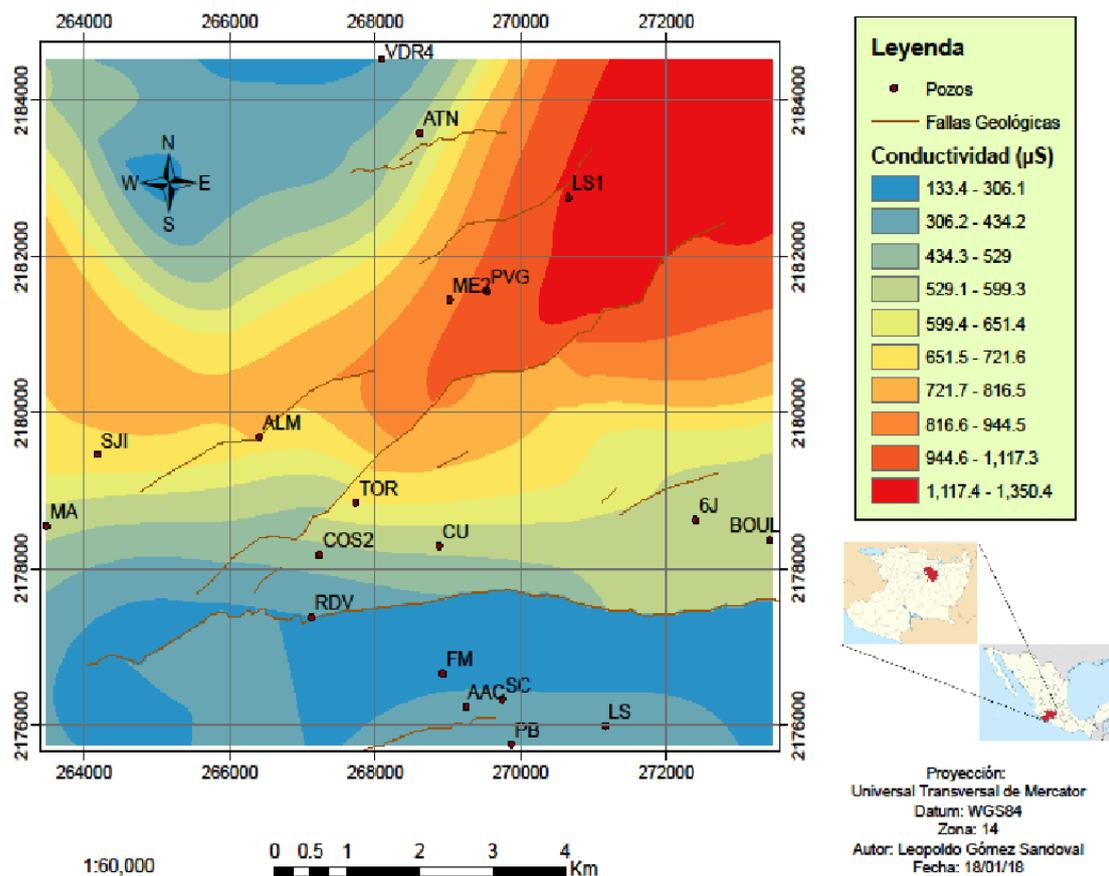


Figura 43. Mapa de distribución de valores de conductividad del agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias

VI.III.II.VI La conductividad en el acuífero de los Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (Cantera de Morelia) y acuífero profundo

VI.III.II.VI.I Conductividad baja en la *Cantera de Morelia*

Los valores de conductividad más bajos fueron encontrados en la parte sur y noroeste de la ciudad, en el Sur se encuentra el acuífero profundo (Garduño-Monroy *et al.*, 2014) en la unidad denominada *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*.

En los mapas de interpolación de conductividad se observó que la *Cantera de Morelia* se encuentra delimitada por la falla geológica de *La Paloma*, esta falla funciona como división de dos unidades geológicas, *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* y la *secuencia fluvio-lacustre*. Sin embargo, como se puede apreciar en las interpolaciones, el flujo del agua subterránea va de la *Cantera de Morelia* y del *Corredor Tarasco* hacia la *secuencia fluvio-lacustre*, lo anterior analizando el aumento gradual de la conductividad al acercarse a la *secuencia fluvio-lacustre*. Lo que confirma la teoría de Garduño *et al.* (2014) de que el acuífero de *flujo local* y somero es alimentado por estas dos unidades geológicas.

VI.III.II.V Conductividad en el acuífero local de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

Los valores de conductividad intermedia encontrados en la parte centro de la *Secuencia fluvio-lacustre*, pertenecen al acuífero de tipo local (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007) ubicado en esta secuencia.

Como se mencionó anteriormente, este acuífero de flujo local recibe aportes de agua del acuífero de vulcanismo de semi escudo del *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica (corredor Tarasco)* y de los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*, al encontrarse estos flujos de agua con la *secuencia fluvio-lacustre*, generan una conductividad que va creciendo conforme se acerca a la *secuencia fluvio lacustre*, la cual tiene conductividad más alta, ya que no existen barreras que puedan separar la conductividad de un lado y de otro, en el caso de la cantera de Morelia, en donde se encuentra la falla geológica *La paloma*, puede observarse que sigue existiendo un cambio gradual de conductividad, lo cual indicaría que esta no funciona como una barrera.

Los valores de conductividad encontrados en la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* se encuentran divididos en, valores de conductividad baja (133.4 μS a 303.1 μS), valores de conductividad intermedia (599.4 μS a 651.4 μS), valores de conductividad alta (1117.4 μS a 1350.4 μS).

VI.III.II.V.I Conductividad baja en la secuencia *fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

La *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* descrita por Israde-Alcántara (1995) aflora en la parte sur y oriente de Morelia, donde está caracterizada por limos y arcillas, cuyo espesor es de 60 metros, hacia la colonia “La huerta” la cual se encuentra al sureste de la ciudad, la secuencia se compone de cenizas volcánicas con matriz arcillosa, alternada con niveles arcillo-limosos. En esta parte de la secuencia es donde se encuentran los valores de conductividad más bajos registrados (133.4 μS y 303.1 μS).

VI.III.II.V.II Conductividad intermedia en la secuencia *fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

En el libramiento norte y a la altura del *Río Grande* se presentan conglomerados y niveles de arenas y limos afectados por la falla de la “Central Camionera”, la cual es una falla geológica que se encuentra en el centro de la ciudad de Morelia, justo al lado de la antigua central camionera, esta falla es una de las más importantes de la ciudad. En esta parte de la secuencia es en donde se encuentran los valores de conductividad intermedia (599.4 μS y 651.4 μS).

VI.III.II.V.III Conductividad intermedia en la secuencia *fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

En la zona industrial ubicada al noreste de la ciudad, la *secuencia fluvio-lacustre* está caracterizada por arcillas, limos cafés, y cenizas blancas que sobreyacen a las brechas y lavas del Cerro el Punhuato, el cual fue declarado como área natural protegida, estatal, específicamente como sitio de restauración y protección animal. En esta parte de la secuencia es en donde se encuentran los valores de conductividad más altos (1117.4 μS a 1350.4 μS).

Los valores de conductividad encontrados en este estudio, mantienen el mismo patrón de distribución geográfica tanto en la temporada de lluvias como en la temporada de estiaje, con algunas variaciones en la parte Suroeste.

VI.IV OXÍGENO DISUELTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se tienen mediciones de oxígeno disuelto de seis campañas de muestreo para 14 pozos y un manantial en la ciudad de Morelia, estas seis campañas de muestreo corresponden a una medición en 2013 y tres mediciones en 2014 realizadas por Estrada-Murillo (2015), así como dos mediciones en 2015, en donde se muestreo una vez en la temporada de estiaje y una vez en la temporada de lluvias en cada año.

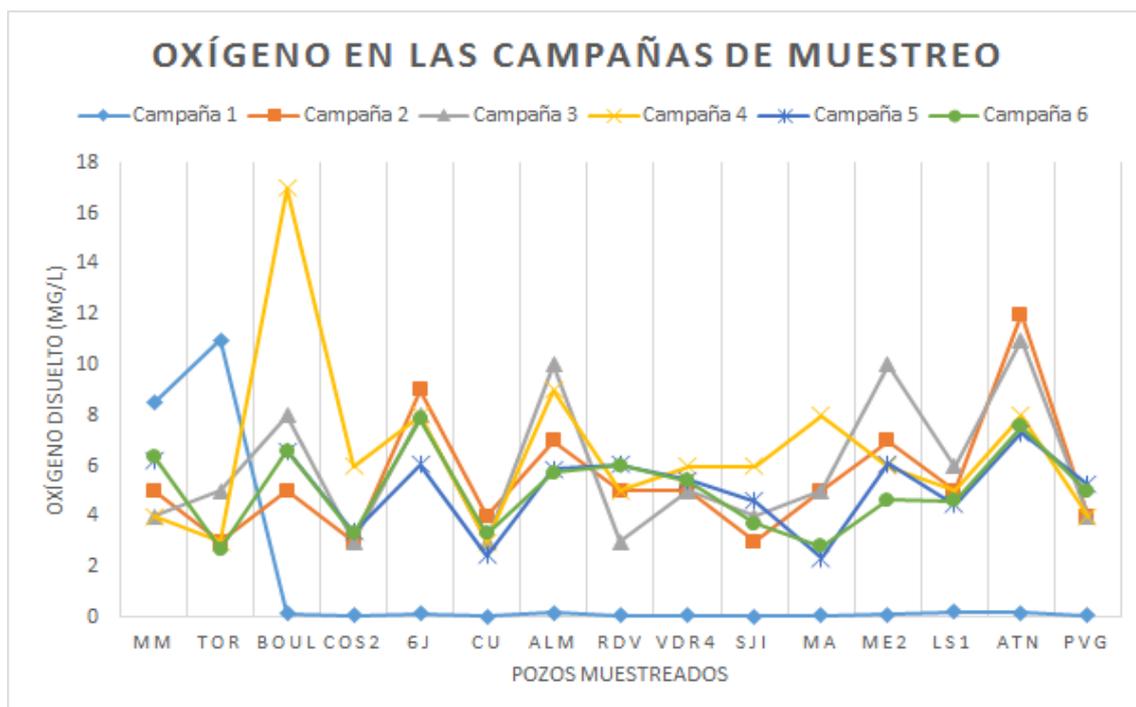


Figura 44. Oxígeno disuelto en las campañas de muestreo de pozos y manantiales de la ciudad de Morelia.

En la *figura 44*, se puede observar la fluctuación del oxígeno disuelto en cada pozo a lo largo de tres años de muestreo en las temporadas de lluvias y de estiaje, en general la mayoría de los pozos conserva la misma concentración de oxígeno a lo largo de las seis campañas de muestreo, en el pozo donde se observa mayor fluctuación a lo largo del tiempo es en el BOUL. De igual manera se puede observar que en la primera campaña de muestreo, las mediciones son muy cercanas o igual a cero, las cuales podrían deberse a alguna falla en el equipo de medición, pues no coincide con los demás valores encontrados. En las siguientes secciones se analizará a profundidad la distribución del oxígeno disuelto en la temporada de lluvias y estiaje del último año de monitoreo.

VI.IV.I Estadística descriptiva del oxígeno disuelto

VI.IV.I.I Temporada de estiaje

En la *figura 45* se puede observar el histograma con la distribución de frecuencias de marcas de clase, así como el polígono de frecuencias del oxígeno disuelto del agua subterránea para la temporada de estiaje. Como puede apreciarse, la clase modal de oxígeno disuelto en la distribución de los datos es de 6 mg/l a 6.99 mg/l. La media de los datos es de 7.24 mg/l, la mediana es de 5.69 mg/l y la desviación estándar es de 0.450

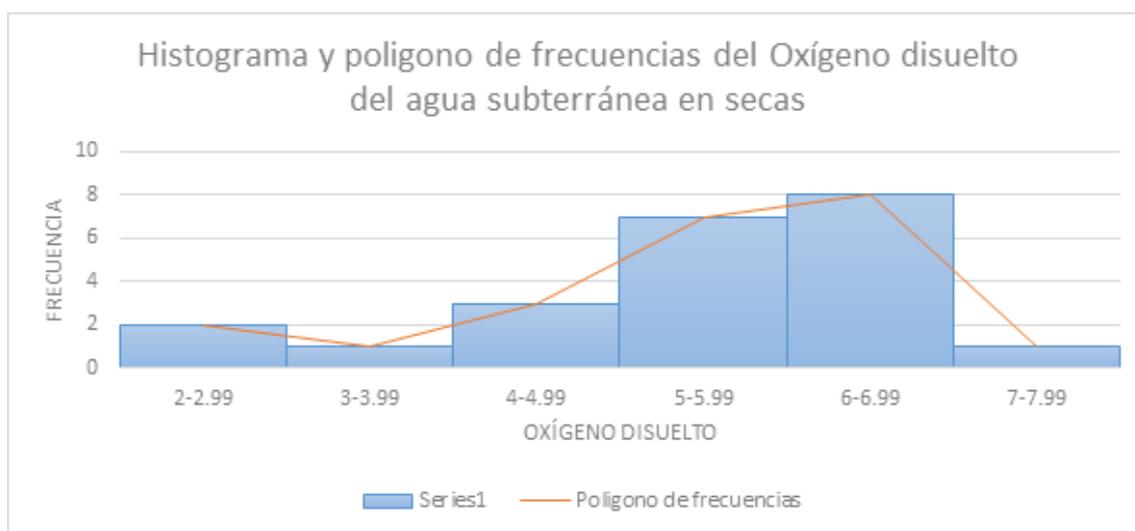


Figura 45. Histograma y polígono de frecuencias del oxígeno disuelto del agua subterránea en la temporada de estiaje

Como puede verse en la *tabla 18* sobre los cuartiles, se tiene que el 25 % de los pozos muestreados presentan una concentración de oxígeno disuelto igual o menor a 4.90 mg/l, el 50% de pozos muestreados, presentan oxígeno disuelto igual o menor a 5.69 mg/l y el 75 % de los pozos muestreados tienen una concentración de oxígeno disuelto igual o menor a 6.19 mg/l, la mediana de los datos es de 5.69 mg/l. En la *figura 46*, pueden observarse los valores de oxígeno disuelto ajustándose a la línea de normalidad.

Momentos y cuartiles para la temporada de estiaje			
Cuartiles		Momentos	
Mínimo	2.34 mg/l	Media	7.24 mg/l
Q1	4.90 mg/l	Desviación estándar	0.450
Q2 (mediana)	5.69 mg/l	Tamaño de muestra	22
Q3	6.19 mg/l		
Máximo	8.03 mg/l		

Tabla 18. *Cuartiles y momentos del oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de estiaje.*

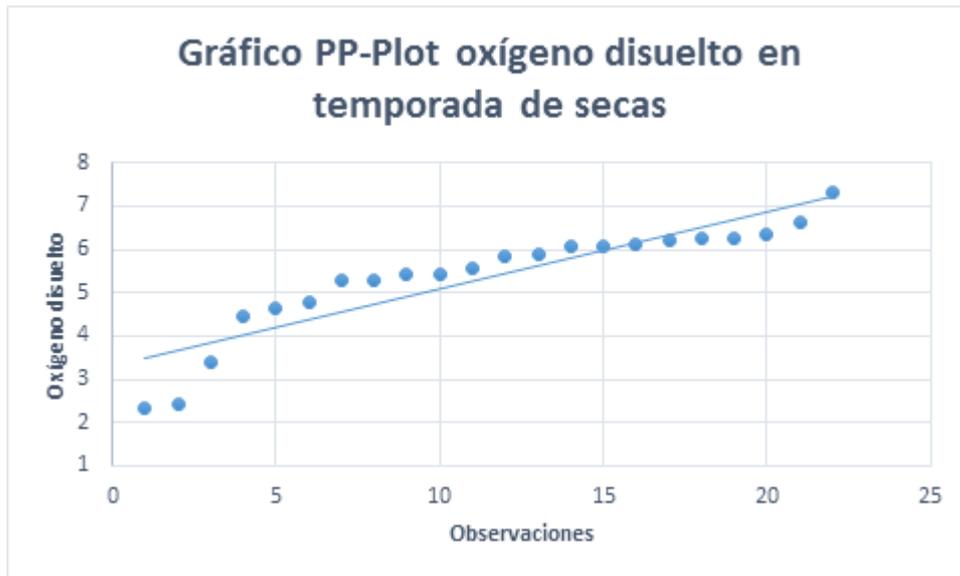


Figura 46. Gráfico PP-Plot oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de estiaje

En la figura 47, se puede ver el diagrama de caja del oxígeno disuelto del agua subterránea en la temporada de estiaje, en donde se puede apreciar que el 50% de las observaciones se encuentra entre el rango 4.90 mg/l y 6.19 mg/l, es decir que el 50% de los pozos muestreados en la ciudad tiene esta concentración de oxígeno disuelto en la temporada de estiaje.

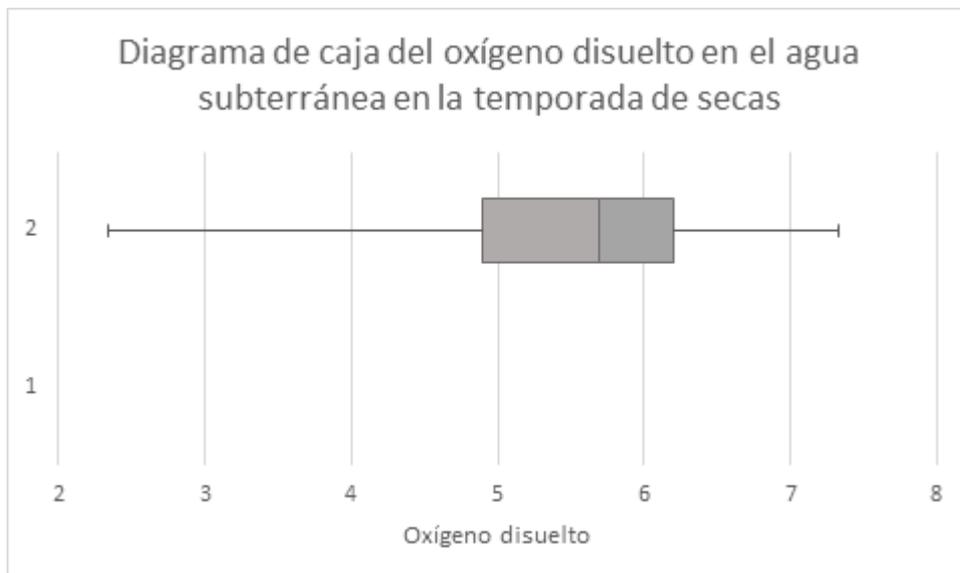


Figura 47. Diagrama de caja de la concentración de oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de seca

VI.IV.I.II Temporada de lluvias

En la *figura 48* se puede observar el histograma con la distribución de frecuencias de las marcas de clase, así como el polígono de frecuencias del oxígeno disuelto en agua subterránea para la temporada de lluvias. Como puede apreciarse, la clase modal del oxígeno disuelto en la distribución de los datos es de 5.5 mg/l a 6.49 mg/l. La media de los datos es de 5.41 mg/l, la mediana es de 5.75 mg/l y la desviación estándar es de 1.53

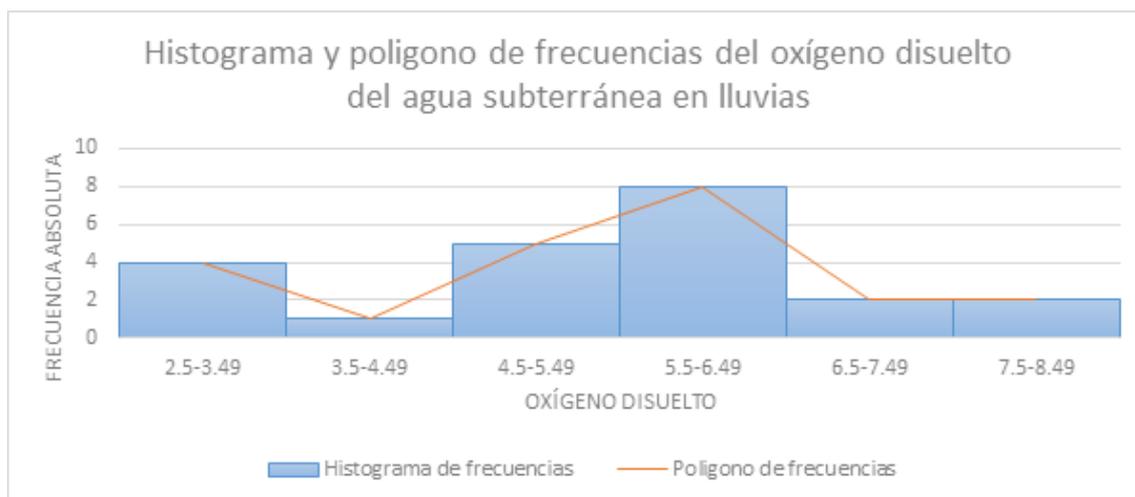


Figura 48. Histograma y polígono de frecuencias del oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de lluvias.

Como puede verse en la *tabla 19* sobre los cuartiles, se tiene que el 25 % de los pozos muestreados presentan una concentración de oxígeno disuelto igual o menor a 4.63 mg/l, el 50% de pozos muestreados, presentan oxígeno disuelto igual o menor a 5.75 mg/l y el 75 % de los pozos muestreados tienen una concentración de oxígeno disuelto igual o menor a 6.34 mg/l, la mediana de los datos es de 5.75. En la *figura 49*, pueden observarse los valores de oxígeno disuelto ajustándose a la línea de normalidad.

Momentos y cuartiles para la temporada de lluvias			
Cuartiles		Momentos	
Mínimo	2.7 mg/l	Media	5.41 mg/l
Q1	4.63 mg/l	Desviación estándar	1.53
Q2 (mediana)	5.75 mg/l	Tamaño de muestra	22
Q3	6.34 mg/l		
Máximo	8.1 mg/l		

Tabla 19. Cuartiles y momentos del oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de lluvias



Gráfico 49. Gráfico PP-Plot oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de lluvias

En la *figura 50*, se puede observar el diagrama de caja del oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de lluvias, en donde se puede apreciar que el 50% de las observaciones se encuentra entre el rango 4.63 y 6.34, es decir que el 50% de los pozos muestreados en la ciudad tienen esa concentración de oxígeno disuelto en la temporada de estiaje.

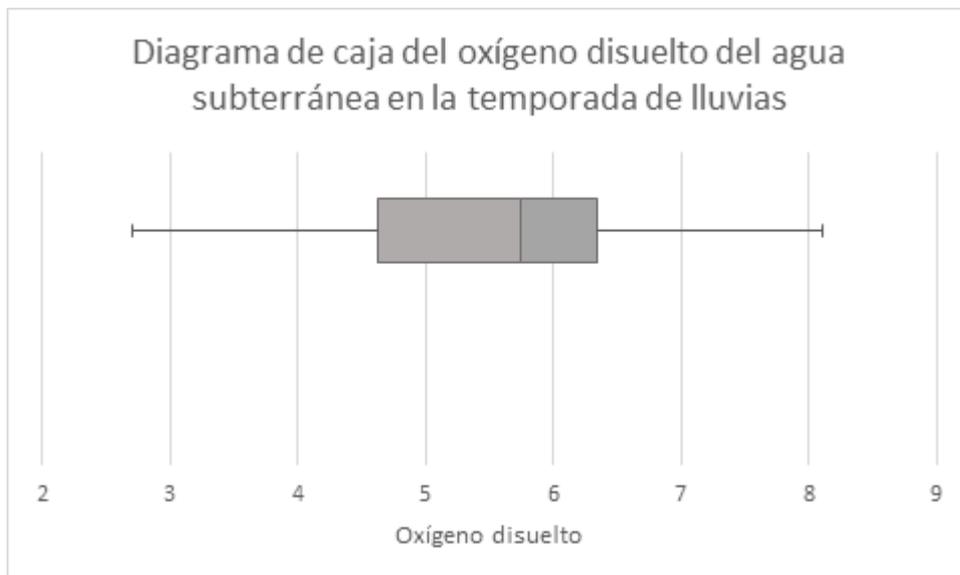


Figura 50. Diagrama de caja del oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de lluvias

VI.IV.II Distribución del oxígeno disuelto en la temporada de lluvias y estiaje en la ciudad de Morelia, y su relación con los sistemas de flujo de agua subterránea

En la *figura 51*, se observa la saturación de oxígeno disuelto en mg/l del agua subterránea en la ciudad de Morelia, para la temporada de *estiaje*. Como se puede verse a lo largo de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* (Israde-Alcántara, 1995) se presentan los valores de oxígeno disuelto más bajos registrados de oxígeno (2.3 mg/l a 3.2 mg/l).

En la *figura 52*, se observa el oxígeno disuelto del agua subterránea en la ciudad de Morelia, para la temporada de *lluvias*. Como se puede verse a lo largo de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* (Israde-Alcántara, 1995), se presentan los valores de oxígeno disuelto más bajos registrados de oxígeno (2.3 mg/l a 3.2 mg/l).

Oxígeno disuelto en el agua subterránea en la temporada de secas en Morelia

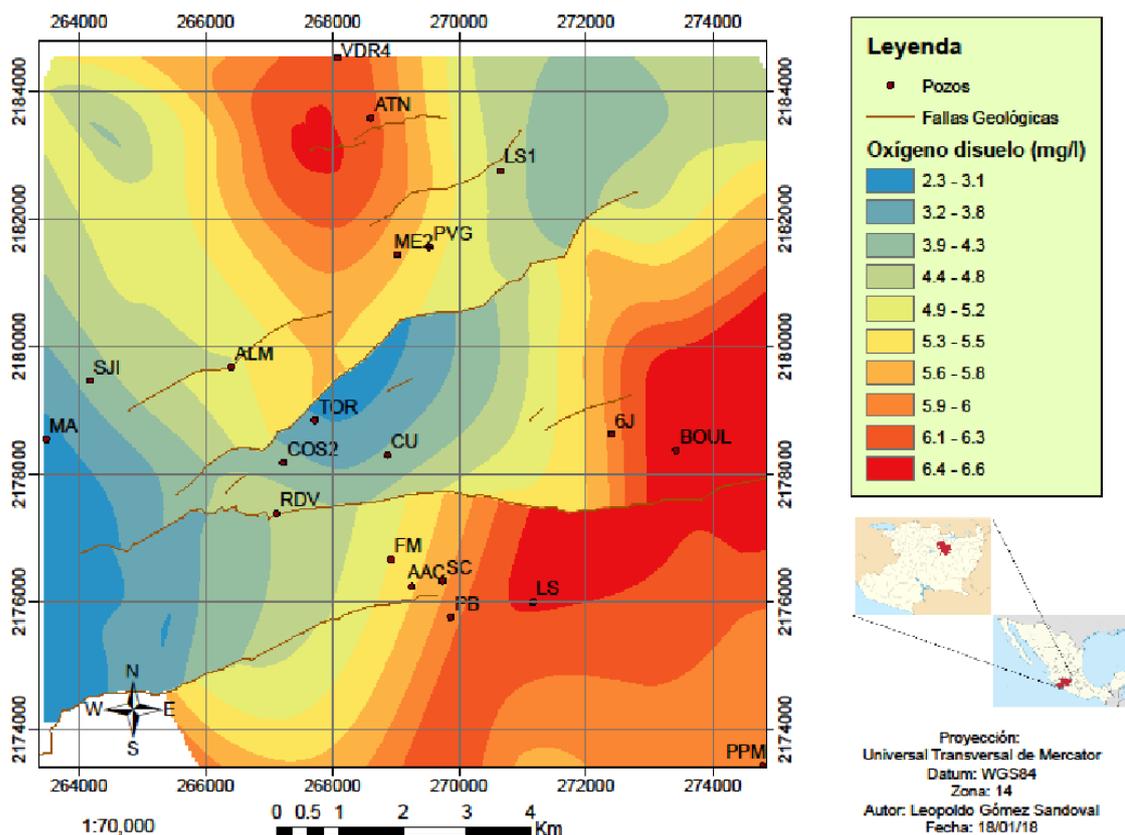


Figura 51. Mapa de oxígeno disuelto en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de estiaje.

VI.IV.II.I Oxígeno disuelto en el acuífero de los Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)

A los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* descritos por Israde-Alcántara y Garduño-Monroy (2005), los cuales son productos piroclásticos de composición riolítica generalmente de color rosa se les llama cantera y son ricos en líticos de andesitas y pómez, esta unidad tiene un espesor de 200 metros, a esta roca piroclástica se denomina ignimbrita, y se puede dividir en varios horizontes.

Las concentraciones de oxígeno disuelto en *La Cantera de Morelia* fueron las más altas de las tres unidades geológicas, superando los 8 mg/l en la temporada de lluvia (*figura 52*) y los 6 mg/l en la temporada de estiaje (*figura 51*) en esta unidad, lo cual es un dato peculiar, ya que este sitio registró las temperaturas de agua más altas y por ende se esperarían concentraciones de oxígeno disuelto más bajas.

VI.IV.II.I.I La falla La Paloma como delimitante de la cantera de Morelia

En los mapas de interpolación Kernel de conductividad (*figuras 51 y 52*) puede observarse que la concentración de oxígeno disuelto en los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* es más alta que la de la *secuencia fluvio lacustre*, y que la falla geológica de “*La Paloma*” delimita estas dos unidades geológicas, funcionando como una división al Este de *La Cantera de Morelia*.

Como se puede apreciar en las *figuras 51 y 52*, en el *Corredor Tarasco* se observa un flujo de agua hacia la *secuencia fluvio-lacustre*, el cual se ubica en el área comprendida entre los pozos FM y RDV, justo al terminar el decrecimiento gradual de la concentración de oxígeno de Este a Oeste en esta unidad geológica.

En la temporada de lluvias (*figura 52*) se observa con mejor claridad el decrecimiento gradual con el que las altas concentraciones de oxígeno disuelto en la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* van decreciendo de Este a Oeste. En la misma imagen puede observarse que el oxígeno disuelto A pesar de que existen algunas diferencias entre la temporada de lluvias y de estiaje, se presenta el mismo patrón de distribución geográfica en las concentraciones.

VI.IV.II.II El oxígeno disuelto en el acuífero local de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

Como se mencionó anteriormente, el acuífero local de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*, recibe aportes de agua del acuífero de vulcanismo de semi escudo de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* y de los *Flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007).

De igual manera en el mapa de interpolación de oxígeno disuelto en lluvias (*figura 52*) puede observarse que el acuífero de *flujo local* de la *Secuencia fluvio-lacustre* es en su mayoría alimentado por los flujos fríos provenientes del *Cerro del Águila*, el cual pertenece a la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*. Lo anterior analizando la distribución de valores de oxígeno disuelto.

Los valores de oxígeno disuelto encontrados en la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* se encuentran dividida en tres clases para la temporada de lluvias, concentraciones de oxígeno disuelto bajo (6.5 mg/l a 7.2 mg/l), concentraciones de oxígeno disuelto intermedio (7.3 mg/l a 7.5 mg/l), y oxígeno disuelto alto (7.6 mg/l a 8.1 mg/l), al final de la *Secuencia fluvio-lacustre* y donde se presenta su máxima expresión de acuerdo con Israde-Alcántara (1995).

VI.IV.II.II.I Oxígeno disuelto en baja concentración en la *secuencia fluvio lacustre*

Las concentraciones bajas de oxígeno disuelto en lluvias (6.5 mg/l a 6.8 mg/l) en la *secuencia fluvio lacustre*, se encuentran en el libramiento norte y altura del Río Grande, en donde esta *secuencia* presenta conglomerados y niveles de arenas y limos afectados por la falla de la central camionera, una de las más importantes de la ciudad. Como puede observarse en las *figuras 51 y 52* el agua subterránea de esta *secuencia*, proviene del flujo de agua del *Cerro del Águila*, flujo que entra a la *secuencia fluvio-lacustre* por en medio de las dos fallas geológicas adyacentes, la falla de la *central camionera* y la falla de *La paloma*.

VI.IV.II.II.II Oxígeno disuelto en concentración intermedia en la *secuencia fluvio lacustre*

Las concentraciones intermedias de oxígeno disuelto (7.3 mg/l a 7.5 mg/l) encontradas en la *Secuencia fluvio-lacustre*, se encuentran en donde aflora, en la parte sur y oriente

de Morelia, la cual está caracterizada por limos y arcillas, cuyo espesor es de 60 metros, hacia la colonia La Huerta, en esta parte la secuencia se compone de cenizas volcánicas con matriz arcillosa, alternada con niveles arcillo-limosos.

VI.IV.II.II.I Oxígeno disuelto en concentración alta

Las concentraciones altas de oxígeno disuelto (*figura 52*) en la temporada de lluvias van de 7.8 mg/l a 8.1 mg/l y fueron encontradas en la zona industrial asentada sobre la *secuencia fluvio-lacustre*, la cual está caracterizada por arcillas y limos cafés y cenizas blancas que sobreyacen a las brechas y lavas del Punhuato. Los valores de oxígeno disuelto encontrados en este estudio, mantienen el mismo patrón de distribución geográfica tanto en la temporada de lluvias como en la temporada de estiaje.

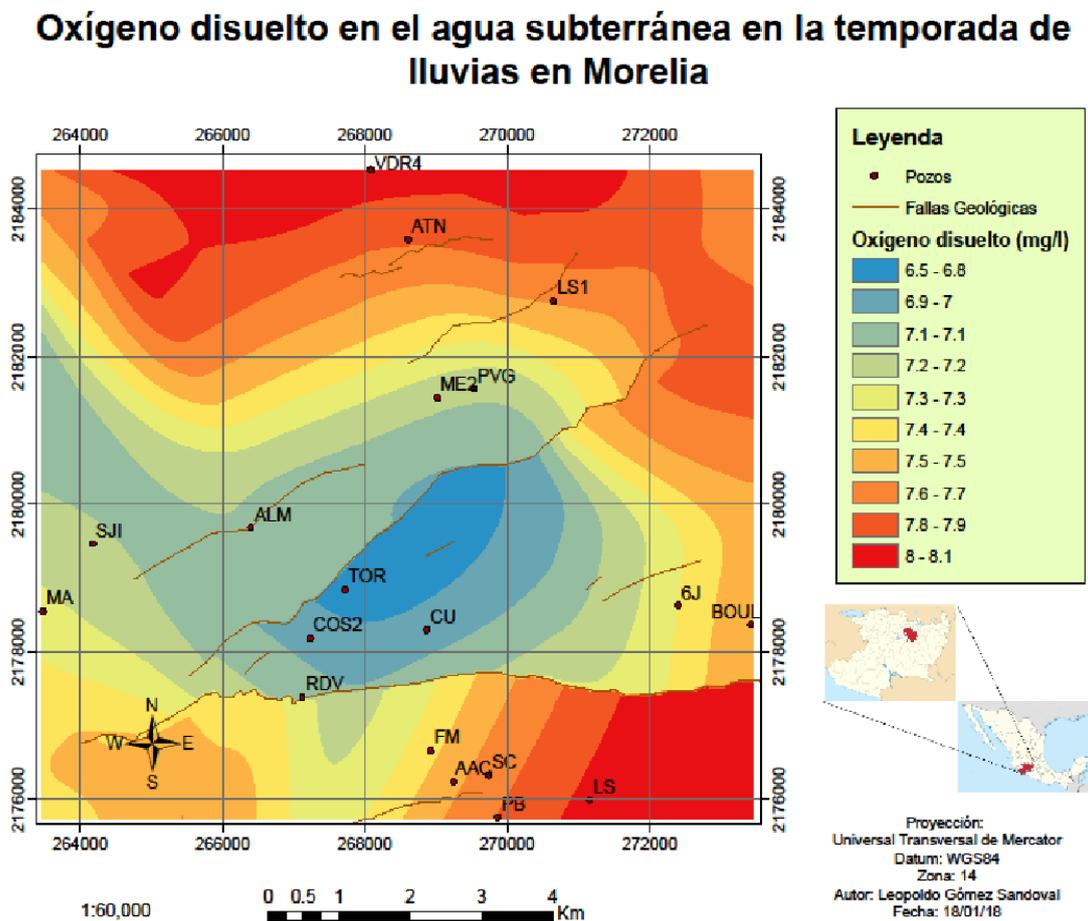


Figura 52. Mapa de oxígeno disuelto en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias.

VI.IV.II.III Oxígeno disuelto y el acuífero de semi-escudo de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*

Uno de los tres acuíferos identificados por Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007), es el que se localiza entre las lavas del vulcanismo tipo semi escudo, este acuífero está formado por lavas del vulcanismo monogenético tiene un flujo que comienza en el sector noroeste (*Quinceo*) y da lugar al surgimiento de agua en *Manantiales* y *La Colina*.

Como se mencionó anteriormente, en la *secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* (Israde-Alcántara, 1995), se encuentra contenido un acuífero, el cual es de flujo local y recibe aportes de agua de los flujos de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*, en gran parte del *Cerro del Águila*.

De acuerdo con las interpolaciones (*figuras 51 y 52*) de la concentración de oxígeno disuelto del agua subterránea para la temporada de lluvias y para la temporada de estiaje, no existe un cambio de patrón entre las dos temporadas, conservan la misma distribución y patrón geográfico, con algunas variaciones al norte de la ciudad.

VI.V FACIES HIDROGEOQUÍMICAS

De acuerdo con Guler y Thyne (2018) los siguientes factores combinados 1) Clima y composición química de la precipitación, 2) litología y mineralogía del acuífero, 3) topografía/fisiografía y 4) aspectos físicos del sistema hidrogeológico, crean diversos tipos de agua, que cambian en el carácter compositivo espacialmente y temporalmente, mientras la precipitación se infiltra en el suelo, y se mueve topográficamente la trayectoria de flujo, e interactúa con los minerales derivados principalmente de la roca.

Las facies hidrogeoquímicas, también conocidas como familias de agua, pueden ser identificadas a partir de diferentes métodos. Los iones mayores de las muestras, tomadas en la zona de estudio, fueron graficados con un diagrama de Piper (figura 53) un método gráfico cualitativo de identificación que, además, permite establecer la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea.

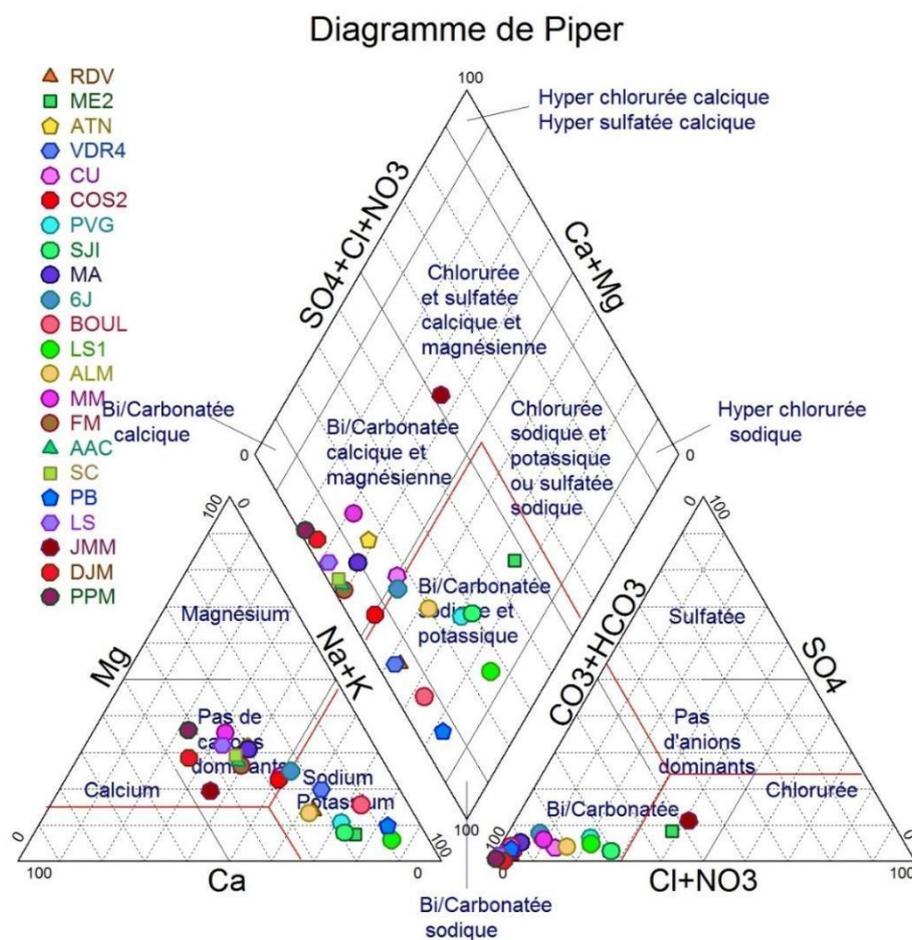


Figura 53: Diagrama de Piper para las muestras de agua de la ciudad de Morelia

En el *diagrama de Piper* se grafican las proporciones relativas de las concentraciones de los cationes y de los aniones mayores expresados como meq/L. Este diagrama está formado por dos triángulos inferiores y un diamante central, mediante los triángulos inferiores se identifica la evolución geoquímica de las aguas, en sus componentes catiónicos y aniónicos.

Los puntos graficados en los triángulos inferiores son extrapolados al diamante central para identificar las facies o familias químicas de las aguas subterráneas (Singhal y Grupta, 2010).

VI.V.I Familias de agua en la zona de estudio

En la *figura 53* se muestra la representación de las facies hidrogeoquímicas del agua de los 23 pozos muestreados, través del diagrama de Piper. En este diagrama se puede observar que predominan dos facies hidrogeoquímicas, 1) bicarbonatada sódica y potásica, la cual se presenta en 10 de las muestras analizadas y 2) bicarbonatada cálcica y magnésica encontrándose en 10 de las muestras analizadas del agua y en menor proporción se encuentra la clorurada y sulfatada cálcica y magnésica.

1) *Bicarbonatada sódica y potásica:* En esta facie hidrogeoquímica se encuentran las muestras de agua de los pozos ubicados al norte de Morelia, la cual abarca la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* y una parte de la *secuencia fluvio lacustre*, los pozos en los que se presentó esta facie son; ME2, SJI, LS1, PVG, ALM, BOUL, PB, VDR4, RDV y 6J

2) *Bicarbonatada cálcica y magnésica:* En esta facie hidrogeoquímica se encuentran los pozos; PPM, DJM, MM, ATN, LS, MA, FM, SC, CU, COS2 y AAC, pozos que se encuentran en la parte sur de Morelia, abarcando los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* y parte de la *secuencia fluvio lacustre*.

3) *Clorurada y sulfatada cálcica y magnésica:* En ésta facie hidrogeoquímica se encuentran la muestra del pozo JMM el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*, al norte de Morelia.

VI.V.II Geoquímica del Agua

La litología del yacimiento es el factor inicial del origen de la composición química, siendo la concentración el factor final y esencial que constituye las facies químicas, características de las diferentes zonas de estudio (González y Del Arenal, 2007). En esta sección se analizarán los pozos de agua para los cuales se tienen perfiles geológicos proporcionados por el Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS).

- Los pozos *Santa Cecilia (SC)* y *Los Sauces (LS)* se encuentran sobre ignimbrita en la mitad superior y andesitas en la mitad inferior de acuerdo con el perfil litológico elaborado por Estrada-Murillo (2015) y de acuerdo con este estudio el tipo de agua al que pertenecen es a la *Bicarbonatada cálcica y magnésica*, dicho tipo de agua se debe a los minerales de las rocas por las que fluye el agua subterránea.

Los cristales de cuarzo (SiO_2), biotita ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) y feldespatos ($(\text{Ca,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) de la ignimbrita, aportan el calcio y magnesio de esta agua.

Entre los minerales de andesita se encuentran la plagioclasa $(\text{Ca,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ y el piroxeno $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$, en menor proporción se encuentra el olivino $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ y la biotita $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

- El pozo de *Ciudad Universitaria (CU)* se encuentra sobre la secuencia fluvio-lacustre en su mitad superior y en ignimbrita en su mitad inferior de acuerdo con el perfil litológico elaborado por Estrada-Murillo (2015) y de acuerdo con este estudio el tipo de agua al que pertenecen es a la *Bicarbonatada cálcica y magnésica*.
- El pozo de *Adolfo López Mateos (ALM)* se encuentra sobre Arenas, Arcillas y partículas de diferentes tipos de basalto, riolita, cuarzo, calcita y cristales de vidrio volcánico, de acuerdo con el perfil litológico elaborado por el OOAPAS y de acuerdo con este estudio el tipo de agua al que pertenecen es a la *Bicarbonatada sódica potásica*.

Los minerales esenciales de la riolita son; el cuarzo (SiO_2) y el feldespato potásico $(\text{K,Na,Ca,Ba,NH}_4)(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$ que aportan el sodio (Na) y el potasio (K) de esta muestra

de agua. Los minerales esenciales del basalto son la augita y la plagioclasa $(Ca,Na)AlSi_3O_8$, los cuales aportan la concentración de sodio (Na) de este pozo.

- El pozo de *Mariano Abasolo (MA)* se encuentra sobre secuencia fluvio-lacustre en su mitad superior y en ignimbrita en su mitad inferior de acuerdo con el perfil litológico elaborado por Estrada-Murillo (2015) y de acuerdo con este estudio el tipo de agua al que pertenecen es la *Bicarbonatada cálcica magnésica*.
- El pozo de *Villas del Real IV (VDR4)* se encuentra sobre toba riolítica en su mayoría; sin embargo, existen algunos segmentos dentro del perfil que son de arenas y arcillas, de acuerdo con el perfil litológico elaborado por el OOAPAS y de acuerdo con este estudio el tipo de agua al que pertenecen es la *Bicarbonatada sódica y potásica*

Los minerales esenciales de la riolita son; el cuarzo (SiO_2) y el feldespato potásico $(K,Na,Ca,Ba,NH_4)(Si,Al)_4O_8$ que aportan el sodio (Na) y el potasio (K) de esta muestra de agua.

VI.V.III Familia de aguas en el acuífero de los Flujos piroclásticos ignimbriticos del Mioceno (cantera de Morelia)

De acuerdo con la clasificación de agua realizada en este estudio mediante el diagrama de Piper y de acuerdo con la información geológica y geohidrológica se puede afirmar que los pozos muestreados en los *flujos piroclásticos ignimbriticos del Mioceno (cantera de Morelia)* pertenecen a la facie hidrogequímica *Bicarbonatada cálcica y magnésica*, familia de agua que pertenece al acuífero profundo de flujo intermedio identificado por Garduño *et al.* (2014), el cual genera aportes de agua al acuífero local ubicado en la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*.

Todos los puntos muestreados en esa unidad geológica pertenecen a la misma familia de agua, el manantial de *La Mintzita* aunque no pertenece a los *flujos piroclásticos ignimbriticos del Mioceno (cantera de Morelia)* pertenece a la familia de agua *Bicarbonatada cálcica y magnésica*, podría deberse a que este manantial se encuentra ubicado al sur de la *secuencia fluvio-lacustre*, al igual que todos los demás pozos muestreados pertenecientes a la familia de agua *Bicarbonatada cálcica y magnésica* que se encuentran ubicados en la parte sur de la ciudad.

El punto PB (Peña Blanca) es el único punto de toda la parte sur de la ciudad que no es de la familia *Bicarbonatada cálcica y magnésica*, sino que pertenece a la familia de agua *Bicarbonatada sódica y potásica*, encontrada al norte de la ciudad.

Como se mencionó previamente, la *secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* recibe aportes de agua de *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*, los cuales se ven reflejados en los pozos CU y COS2 ya que presentan la misma familia de agua, la *Bicarbonatada cálcica y magnésica*.

VI.V.IV Familia de agua en el acuífero de semi-escudo de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*

De acuerdo con la clasificación de agua realizada en este estudio, mediante el diagrama de Piper y de acuerdo con la información geológica y geohidrológica se puede afirmar que, los pozos muestreados en la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* pertenecen a la facie hidrogequímica *Bicarbonatada sódica y potásica*, familia de agua que pertenece al acuífero de tipo semi-escudo de flujo intermedio identificado por Garduño *et al.* (2014), el cual genera aportes de agua al acuífero local ubicado en la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*.

Todos los puntos muestreados en la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* pertenecen a la misma familia de agua *Bicarbonatada sódica y potásica*, sin embargo, el punto ATN (Ampliación Torreón nuevo) no es de la misma familia de agua. El agua del pozo ATN pertenece a la familia de agua *Bicarbonatada cálcica y magnésica*, encontrada al sur de la ciudad.

En la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* se ven reflejados los aportes de agua de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*, expresándose estos aportes de agua en los pozos ME2, PVG, RDV y 6J los cuales se encuentran desde el afloramiento de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* hasta el punto en donde se encuentra en su máxima expresión, las faldas del cerro *Punhuato*.

VI.V.V Familia de aguas en el acuífero local de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

En la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* se ven reflejados los aportes de agua *Bicarbonatada sódica y potásica* provenientes de la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* en los pozos ME2, PVG, RDV y 6J los cuales se encuentran desde el afloramiento de la *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno* hasta el punto en donde se encuentra en su máxima expresión, las faldas del Cerro el *Punhuato*.

Los aportes de agua *Bicarbonatada cálcica y magnésica* provenientes de los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*, se ven reflejados en los pozos CU y COS 2 los cuales presentan la misma familia de agua.

VI.V.VI Tipos de flujo en la ciudad de Morelia

VI.V.VI.I Flujos piroclásticos ignimbriticos del Mioceno (cantera de Morelia)

Los flujos de agua provenientes de la cantera de Morelia, tienen una temperatura de entre 25.9 °C a 29.6 °C, la temperatura ambiente como lo es 25.9 °C es representativa de flujos de agua locales sin embargo, la temperatura de 29.6 °C es una medición más caliente encontrada en diferentes áreas de la cantera de Morelia. De acuerdo con Tóth (2000) temperaturas altas corresponden a flujos regionales y temperaturas bajas a flujos locales. El tipo de agua encontrada en esta unidad geológica es la Bicarbonatada cálcica y magnésica, la cual es característica de flujos de agua locales, pues no ha existido cambio químico en el agua subterránea en donde pueda identificarse sulfato o cloro (Chebotarev, 1955).

El oxígeno disuelto en esta área es de entre 4.9 mg/l a 6.6 mg/l, el alta concentración de oxígeno disuelto en el agua subterránea, significa que el agua ha sido infiltrada mediante recarga pluvial en un área a pocos kilómetros, y que el flujo es somero (Toth, 2000). La conductividad que es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, tiene el mismo comportamiento que el oxígeno disuelto, entre más profundo se encuentre el flujo mayor concentración de sólidos disueltos habrá (Toth, 2000), en la cantera de Morelia se encontró una conductividad baja en el agua subterránea.

El alta concentración de oxígeno disuelto, la baja temperatura del agua subterránea, el agua perteneciente a la familia de las bicarbonatadas y la baja conductividad concluye que el agua subterránea de los flujos piroclásticos ignimbriticos del Mioceno (cantera de Morelia) son de *tipo local*.

VI.V.VI.II Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco

Los flujos de agua provenientes del corredor Tarasco, tienen una temperatura de entre 23.3 °C encontrada en las cercanías del *Cerro del águila* y de 31.7 °C de lado del *Cerro el Quinceo* y del *Cerro Las Tetillas*, la baja temperatura es representativa de flujos de agua locales (Toth, 2000) como lo es la encontrada en los flujos provenientes del *Cerro del Águila*; sin embargo, 31.7 °C es una medición más caliente encontrada en los flujos de las otras dos elevaciones del *corredor Tarasco* de las cuales podría estar proviniendo otro flujo de agua, este de tipo intermedio. El tipo de agua encontrada en esta unidad geológica es la Bicarbonatada sódica y potásica, la cual es característica de flujos de agua locales, pues no ha existido cambio químico en el agua subterránea (Chebotarev, 1955).

El oxígeno disuelto en esta área es de 2.3 mg/l en los flujos de agua del cerro del águila, y 6.3 mg/l de lado del *Cerro el Quinceo* y del *Cerro Las Tetillas*, el alta concentración de oxígeno disuelto en el agua subterránea, significa que el agua ha sido infiltrada mediante recarga pluvial en un área a pocos kilómetros, ya que cuando se encuentra una baja concentración de oxígeno disuelto es porque el agua ha tenido más tiempo de recorrido subterráneo (Toth, 2000). La conductividad que es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, tiene el mismo comportamiento que el oxígeno disuelto, entre más profundo se encuentre el flujo mayor concentración de sólidos disueltos habrá (Toth, 2000), en el corredor Tarasco se encontró una conductividad baja en el agua subterránea.

El alta concentración de oxígeno disuelto, la baja temperatura del agua subterránea, el agua perteneciente a la familia de las bicarbonatadas y la baja conductividad, concluye que los flujos de la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* son de *tipo local*; Sin embargo, existe un área conformada por los pozos ME2, PVG y LS1 ubicados en las colonias al norte de la ciudad, que presentan características fisicoquímicas distintas, oxígeno disuelto bajo, alta temperatura y conductividad, de acuerdo con el diagrama de Piper, el anión predominante en el pozo ME2 es el cloro, no el bicarbonato, las cuales son características de *flujos intermedios*.

VI.V.VI.III Secuencia fluvio lacustre del Mioceno-Plioceno

Los flujos de agua subterránea en la *secuencia fluvio lacustre*, tienen una temperatura de entre 23.8 °C y 25.5 °C, la baja temperatura es representativa de flujos de agua locales (Toth, 2000), como es el caso de la temperatura encontrada en esta área. El tipo de agua encontrada en esta unidad geológica es la Bicarbonatada sódica y potásica, la cual es característica de flujos de agua locales, pues no ha existido cambio químico en el agua subterránea (Chevotareb, 1955).

El oxígeno disuelto en esta área es de entre 2.3 mg/l (en uno solo de los puntos) a 5.3 mg/l, el alta concentración de oxígeno disuelto en el agua subterránea, significa que esta ha sido infiltrada mediante recarga pluvial en un área a algunos kilómetros de distancia (Toth, 2000), distancia a la que se encuentra la cantera de Morelia y el corredor Tarasco. La conductividad que es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, tiene el mismo comportamiento que el oxígeno disuelto, entre más profundo se

encuentre el flujo mayor concentración de sólidos disueltos habrá (Toth, 2000), en el corredor Tarasco se encontró una conductividad baja en el agua subterránea.

El alta concentración de oxígeno disuelto, la baja temperatura del agua subterránea, el agua perteneciente a la familia de las bicarbonatadas y la baja conductividad, concluyen que los flujos de la secuencia fluvio lacustre del Mioceno-Plioceno son de *tipo local*.

VI.VII ANÁLISIS DE LOS METALES PESADOS CONTENIDOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CIUDAD DE MORELIA

Se analizaron las concentraciones de 21 elementos en el agua subterránea de los pozos en el sitio de estudio, 17 elementos menores y cuatro mayores. Los elementos menores que fueron analizados son: Berilio (Be), Vanadio (V), Cromo (Cr), Manganeseo (Mn), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Cadmio (Cd), Antimonio (Sb), Plomo (Pb), Arsénico (As), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Estroncio (Sr), Zinc (Zn). Los elementos mayores analizados son: Magnesio (Mg), Calcio (Ca), Sodio (Na) y Potasio (K).

Cada pozo se monitoreo una vez en la temporada de lluvias y una vez en la temporada de estiaje, sin embargo se obtuvieron datos de los mismos pozos en diferentes años (Estrada-Murillo, 2015), de cuatro campañas de muestreo previas, dos en lluvias y dos en estiaje, dando así un total de seis campañas de muestreo, tres en lluvias y tres en estiaje por pozo muestreado, estos datos corresponden a 14 pozos y un manantial muestreados en este estudio, no a los 23 aprovechamientos muestreados en este trabajo.

En esta sección se analizan las concentraciones de los tres pozos que sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano - Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el Agua para su Potabilización".

Los elementos que presentaron una concentración que está por encima de la NOM-127-SSA1-1994 en el sitio de estudio fueron Manganeseo (Mn), Arsénico (As) y Hierro (Fe), el arsénico fue encontrado solo en un pozo en una campaña de muestreo.

VI.VII.I Concentración de Manganeseo en el Agua subterránea de la ciudad de Morelia

Se realizaron seis campañas de muestreo, en donde se analizó la concentración de Manganeseo en 14 pozos y un manantial del área de estudio, los datos de las primeras cuatro campañas de muestreo pertenecen a Estrada-Murillo (2015), los demás datos fueron recopilados de campo para esta investigación.

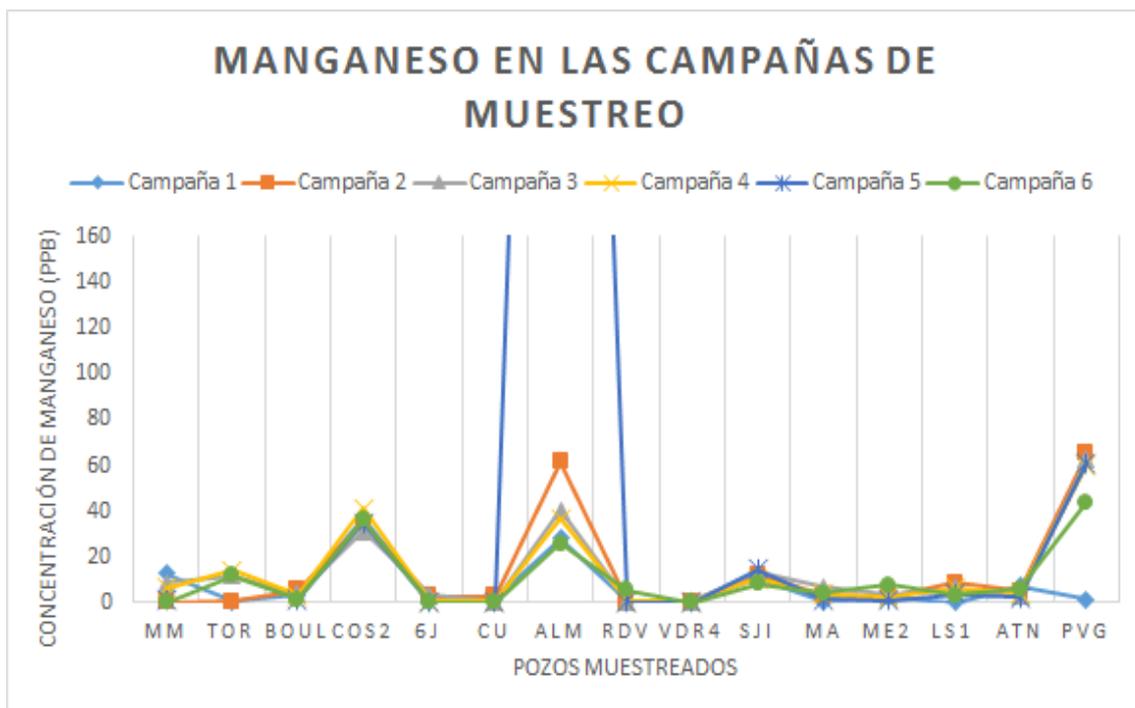


Figura 54. Concentración de manganeso en las campañas de muestreo

El Manganeso es uno de los elementos metálicos más abundantes en la tierra, está presente en rocas ígneas y metamórficas como elemento menor, es un constituyente significativo del basalto (Hem, 1989), roca en donde se encuentra uno de los tres grandes acuíferos de Morelia. La alta exposición al Mn ha sido asociada con toxicidad, causando problemas de salud (WHO, 2011a, WHO, 2011b)

El límite máximo permisible de concentración de manganeso es de 0.15 mg/l (150 ppb) de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, como puede observarse en la *figura 54*, el pozo ALM es el único que sobrepasa este límite y solamente lo hace en la quinta campaña de muestreo, ningún otro pozo o manantial sobrepasó el límite marcado por la norma en tres años de monitoreo. Siguiendo los pozos PVG y COS2 como los otros dos pozos con mayor concentración; sin embargo, estos últimos no se encuentran por arriba del límite máximo permisible por la norma. En las siguientes secciones se analiza el comportamiento del Mn en el área de estudio.

VI.VII.I.I Modelos de concentración de Manganeso para el agua subterránea de la ciudad de Morelia en las seis campañas de muestreo y descripción estadística.

VI.VII.I.I.I Primera campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn)

En la primera campaña de muestreo se tomaron los datos de 15 pozos de agua y se realizó un modelo de concentración de Manganeso. La ecuación para el modelo fue $y = -0.4713x + 0.9823$ con un $R^2 = 0.9277$; sin embargo, existe un cluster interno con un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -0.3124x + 0.9681$ con $R^2 = 0.9708$ (figura 55). Los datos utilizados en el segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos RDV, PVG, CU, ME2, BOUL y ATN, los cuales se encuentran dentro de la *secuencia fluvio lacustre del Mioceno-Plioceno*.

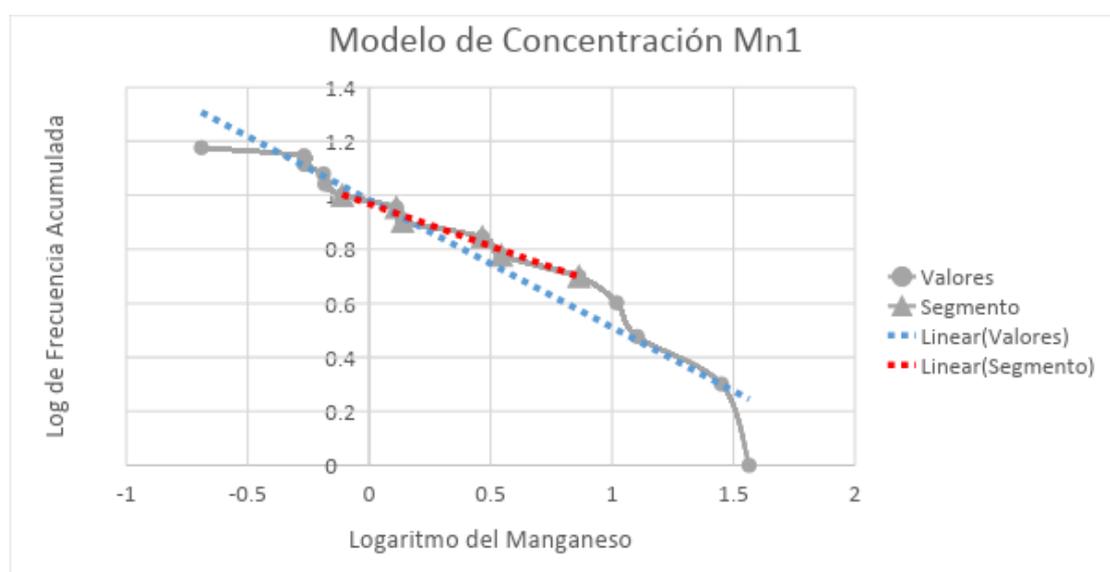


Figura 55. Modelo de concentración de Manganeso en el agua subterránea de Morelia en la primera campaña de muestreo.

VI.VII.I.I.II Segunda campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn)

En la segunda campaña de muestreo se obtuvo un modelo con 15 datos de concentraciones de Manganeso. La ecuación para el modelo fue $y = -0.4831x + 1.1315$ con $R^2 = 0.91$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -0.549x + 1.2084$ con $R^2 = 0.97$ (figura 56).

Los datos utilizados en el segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos ME2, MA, ATN, BOUL, LS1 y SJI; cuales se encuentran en la *secuencia fluvio lacustre*, con excepción del pozo SJI que se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

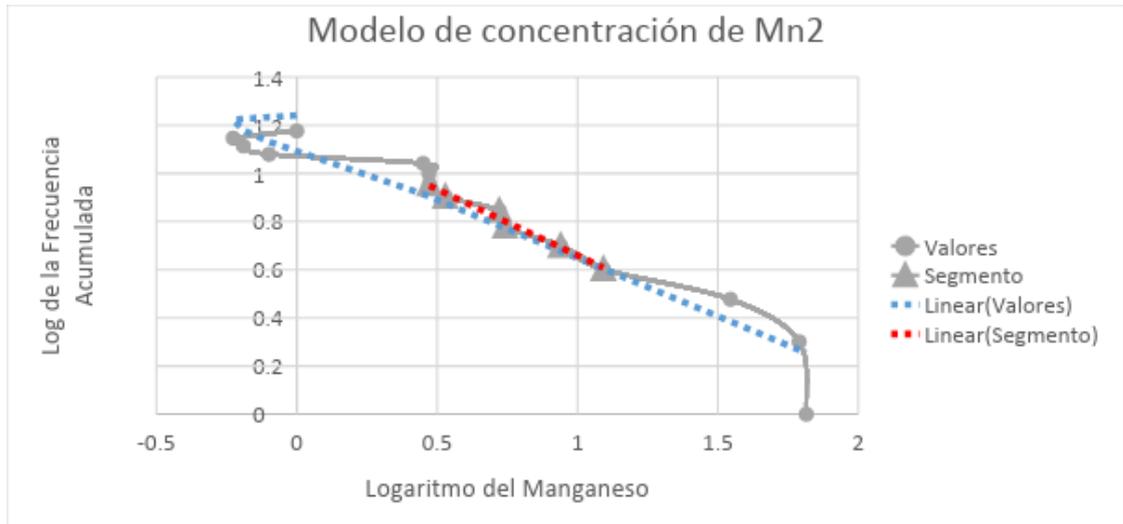


Figura 56. Modelo de concentración de Manganeso en el agua subterránea de Morelia en la segunda campaña de muestreo.

VI.VII.I.I.III Tercera campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn)

En la tercera campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Manganeso. La ecuación para el modelo fue $y = -0.4609x + 1.137$ con $R^2=0.83$; sin embargo, existe un cluster interno con un mejor modelo, siendo esta la ecuación $y = -0.6399x + 1.3701$ con $R^2 = 0.95$ (figura 57).

Los datos utilizados en el segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos MA, MM, TOR, SJI, COS2 y ALM. Los cuales se localizan en la *secuencia fluvio lacustre* con excepción del pozo SJI el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

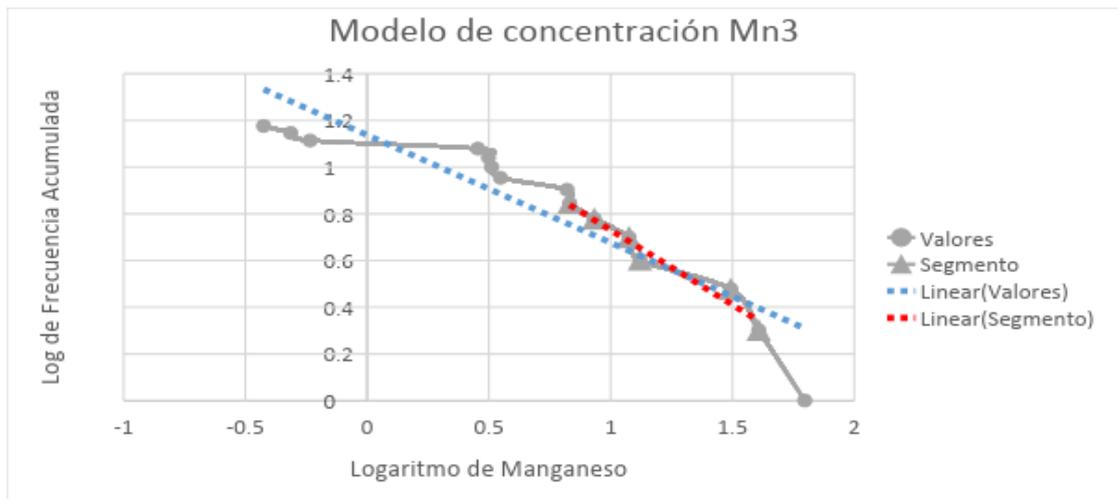


Figura 57. Modelo de concentración de Manganeseo en el agua subterránea de Morelia en la tercera campaña de muestreo.

VI.VII.I.IV Cuarta campaña de muestreo de concentración de Manganeseo (Mn)

En la cuarta campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Manganeseo. La ecuación para el modelo fue $y = -0.4349x + 1.0856$ con $R^2 = 0.86$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -0.5904x + 1.2874$ con $R^2 = 0.97$ (figura 58).

Los datos utilizados en el segundo modelo fueron los correspondientes a las concentraciones de los pozos MA, ATN, MM, LS1, SJI y TOR. Los cuales se localizan en la *secuencia fluvio lacustre* con excepción del pozo SJI el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

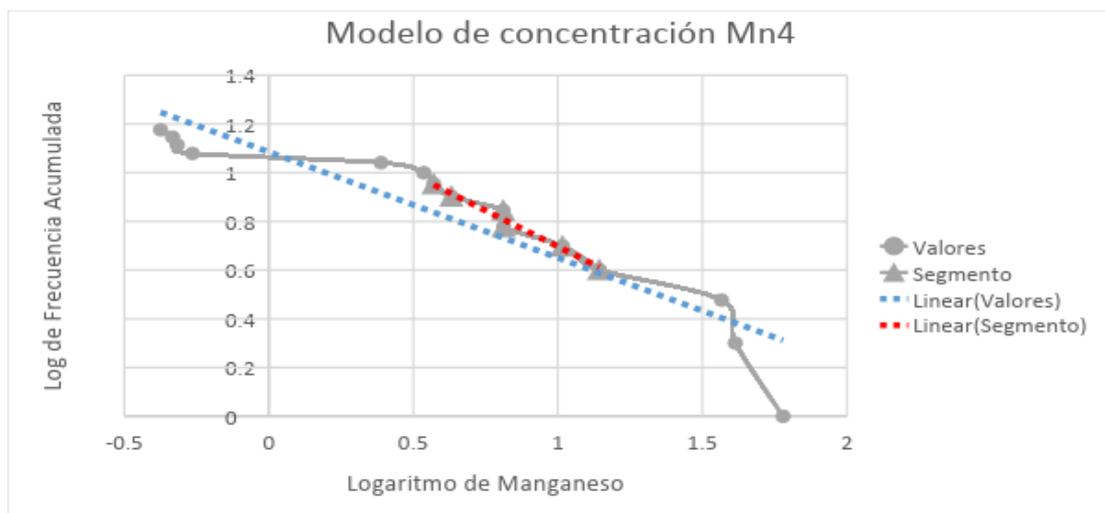


Figura 58. Modelo de concentración de Manganeseo en el agua subterránea de Morelia en la cuarta campaña de muestreo.

VI.VII.I.I.V Quinta campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn)

En la quinta campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Manganeso. La ecuación para el modelo fue $y = -0.3813x + 1.1879$ con $R^2 = 0.86$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -0.604x + 1.3803$ con $R^2 = 0.95$ (figura 59).

Los datos utilizados en este Segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos MA, CU, BOUL, ATN, VDR4 y LS1. Los cuales se localizan en la *secuencia fluvio lacustre* con excepción del pozo VDR4 el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

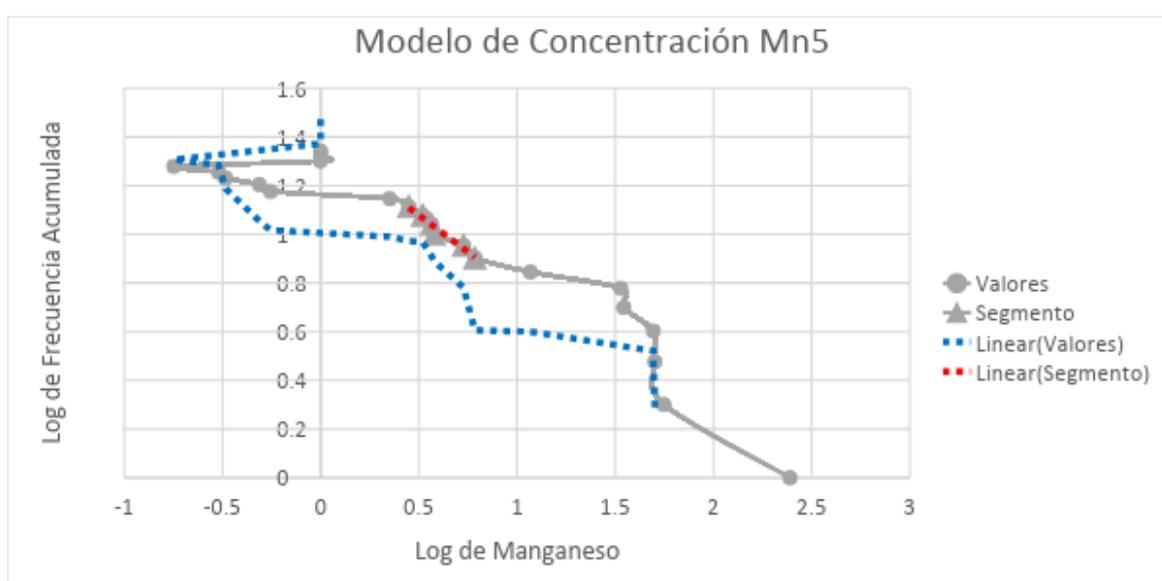


Figura 59. Modelo de concentración de Manganeso en el agua subterránea de Morelia en la quinta campaña de muestreo.

VI.VII.I.I.VI Sexta campaña de muestreo de concentración de Manganeso (Mn)

En la sexta campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Manganeso. La ecuación para el modelo fue $y = -0.4879x + 1.1993$ con $R^2 = 0.82$ sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -0.2566x + 1.1226$ con $R^2 = 0.95$ (figura 60)

Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos LS, BOUL, RDV, ATN, MA y SJI. Los cuales se localizan en la *secuencia*

fluvio lacustre con excepción del pozo SJI el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* y el pozo LS el cual se encuentra en los flujos piroclásticos del Mioceno (Cantera de Morelia).

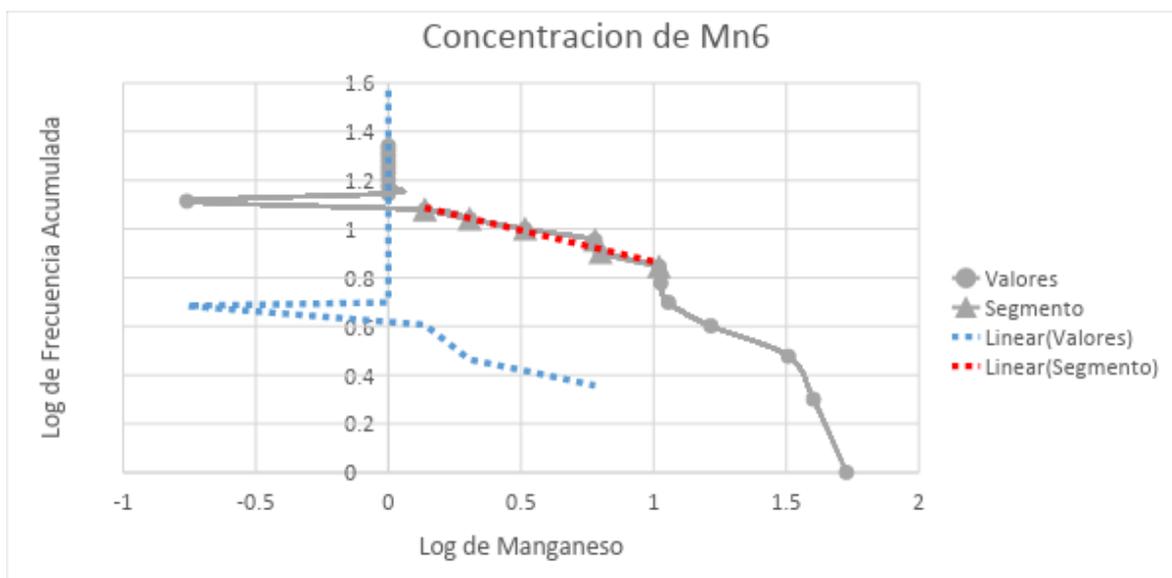


Figura 60. Modelo de concentración de Manganeso en el agua subterránea de Morelia en la sexta campaña de muestreo.

En la *tabla 20* pueden observarse los modelos de concentración de Manganeso en seis campañas de muestreo (tres años), teniendo tres campañas para la temporada de estiaje y tres campañas para la temporada de lluvias. El 81.2% de los pozos utilizados para los modelos se localizan en la secuencia fluvio-lacustre.

Modelos de Concentración de Manganeso					
No.	Modelo 1	R ²	Modelo 2	R ²	Pozos
Mn1	$y = -0.4713x + 0.9823$	0.92	$y = -0.3124x + 0.9681$	0.97	RDV, PVG, CU, ME2 BOUL, ATN
Mn2	$y = -0.4831x + 1.1315$	0.91	$y = -0.549x + 1.2084$	0.97	ME2, MA, ATN, BOUL, LS1, SJI

Mn3	$y = -0.4609x + 1.137$	0.83	$y = -0.6399x + 1.3701$	0.95	MA, MM, TOR, SJI, COS2, ALM
Mn4	$y = -0.4349x + 1.0856$	0.86	$y = -0.5904x + 1.2874$	0.97	MA, ATN, MM, LS1, SJI, TOR
Mn5	$y = -0.3813x + 1.1879$	0.86	$y = -0.604x + 1.3803$	0.95	MA, CU, BOUL, ATN, VDR4, LS1
Mn6	$y = -0.4879x + 1.1993$	0.82	$y = -0.2566x + 1.1226$	0.95	LS, BOUL, RDV, ATN, MA, SJI

Tabla 20. Modelos de concentración de Mn para tres años de muestreo

En la *figura 61* pueden observarse las unidades geológicas del área de estudio en la ciudad de Morelia, el 60.8 % de los pozos se encuentran dentro de la *secuencia fluvio-lacustre*.

Geología del área de estudio en Morelia

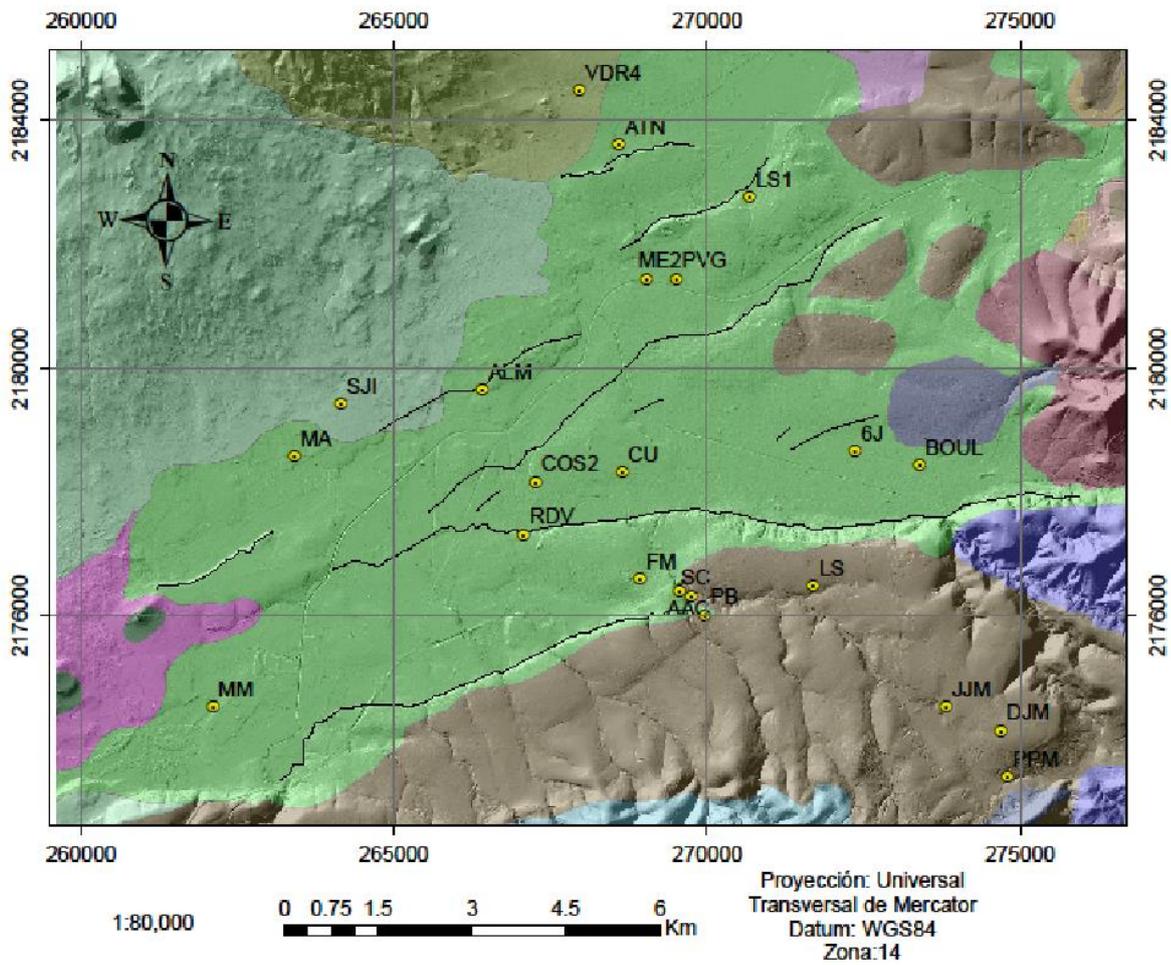


Figura 61. Unidades Geológicas del área de estudio en la ciudad de Morelia, Michoacán (elaborado a partir de registros de Garduño-Monroy).

Leyenda

- ! pozos
- Fallas Geológicas

Geología

Unidades Geológicas

- Flujos_dentríticos
- Fluvio-lacustre
- Productos_de_caida_aerea_del_Quinceo_Las_Tetillas
- Secuencia_andesítica_de_la_Caldera_de_Atécuaro
- Secuencia_andesítica_y_piroclástica_de_la_Escalera
- Secuencia_de_Charo_del_Mioceno-Plioceno
- Secuencia_piroclástica_de_la_Caldera_de_Atécuaro
- Secuencia_volcánica_andesítica_de_Mil_Cumbres-Cutizeo
- Volcanes_monogenéticos-escudo_del_Holoceno-Pleistoceno
- Volcanes_monogenéticos-semiescudo_del_Plioceno
- Volcanes_monogenéticos_del_Holoceno
- Volcanes_monogenéticos_del_Holoceno_c)_Conos
- Vulcanismo_andesito-dacítico_del_Plioceno

Modelo Digital de Elevación

- Value**
- High : 254
 - Low : 0

VI.VII.II Distribución Geográfica de la concentración de Manganeso del agua subterránea de la ciudad de Morelia

En esta sección se puede observar la distribución geográfica de la concentración de manganeso en el área de estudio para la temporada de lluvias (figura 63) y para la temporada de estiaje (figura 62), de los datos tomados en campo para este trabajo.

Concentración de Manganeso del agua subterránea en la temporada de lluvias en la ciudad de Morelia

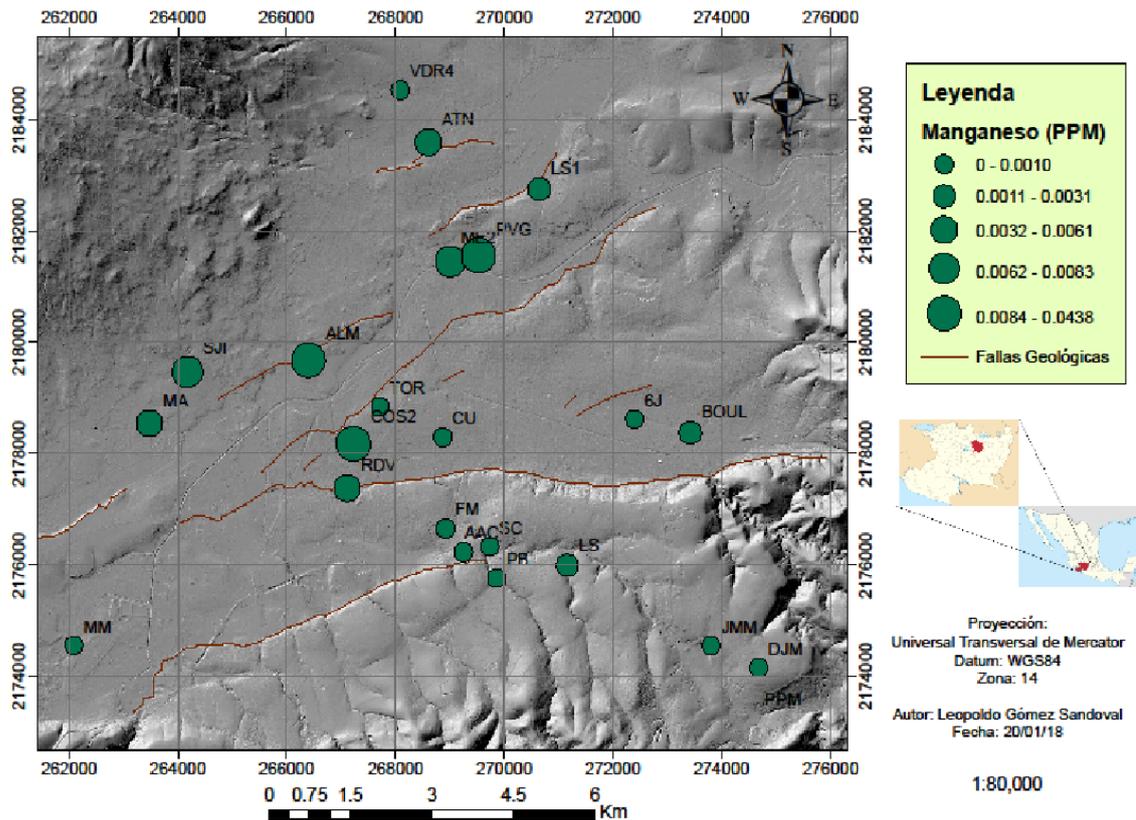


Figura 62. Mapa de concentración de manganeso en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias

VI.VII.II.I Concentración de Manganeso en temporada de lluvias

En la *figura 63* están representados los valores de manganeso obtenidos en el muestreo en la temporada de lluvias de la ciudad de Morelia, de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible de Manganeso en el agua es de 0.15 mg/l, concentración que no es superada por ningún pozo muestreado en la temporada de lluvias.

Aunado a lo anterior, puede apreciarse que de todos los pozos muestreados, los que presentaron concentraciones más altas fueron los pozos que se encuentran al oriente de la ciudad, hacia la salida Quiroga, misma salida en donde se encuentra el relleno sanitario de la ciudad.

A pesar de que en la temporada de lluvias ningún pozo sobrepasó la concentración máxima establecida por la norma, los pozos del lado oriente de la ciudad presentan concentraciones más altas que en otras partes de Morelia, esto podría estar asociado a la presencia de un relleno sanitario en la zona, el cual podría estar contaminando al agua subterránea mediante lixiviación.

Como puede observarse en la *figura 62*, el pozo RDV es uno de los pozos que tienen alta concentración de Manganeso (aunque no sobrepasa la norma), y se encuentra a unos metros del rastro de Morelia, el cual también podría estar siendo una fuente de contaminantes para el agua subterránea.

En la distribución de concentraciones de Mn se puede observar en las figuras 62 y 63, las concentraciones más bajas fueron encontradas en los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*, en donde se observa que todos los puntos muestreados en estos flujos, están dentro de la clase 0-0.0010 ppm de la concentración de Manganeso en el agua subterránea. Mientras que las concentraciones más altas (0.0084-0.0438 ppm) se encontraron al oriente de la *secuencia fluvio lacustre*.

Concentración de Manganeso del agua subterránea en la temporada de secas en la ciudad de Morelia

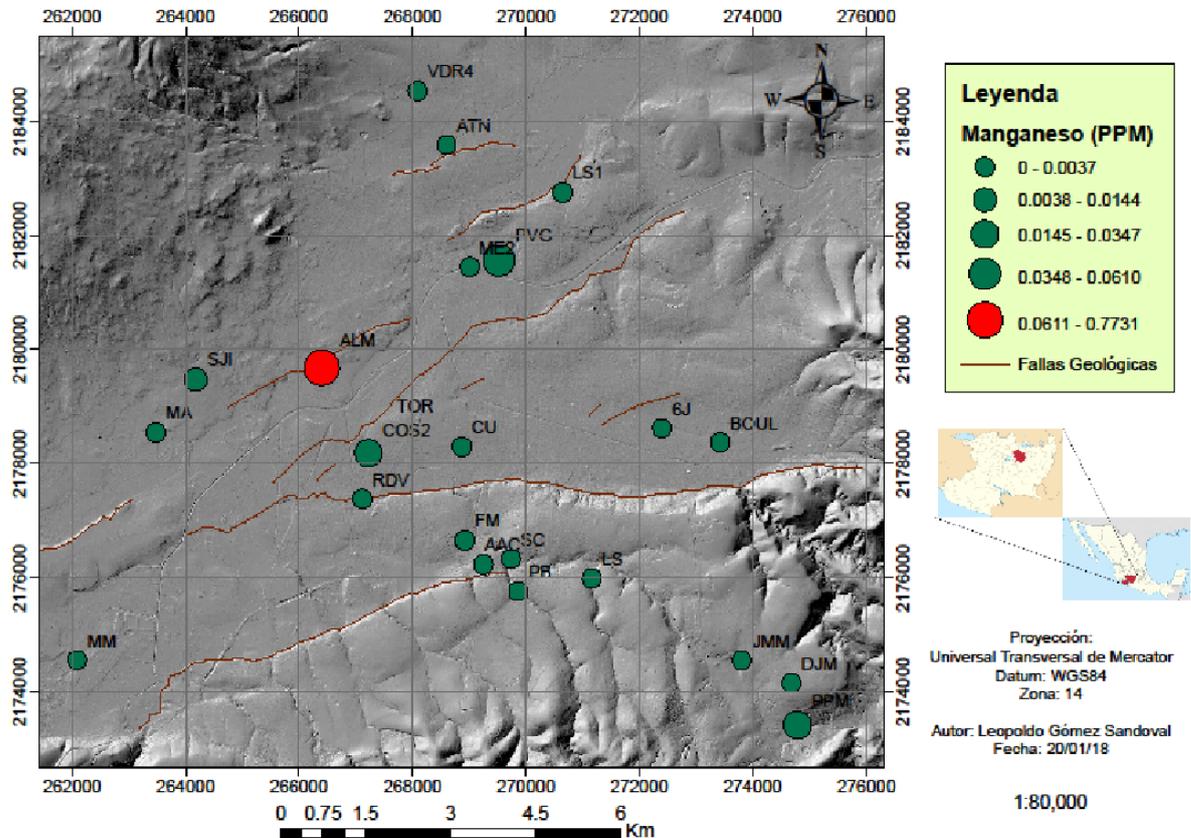


Figura 63. Mapa de concentración de Manganeso en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de estiaje

VI.VII.II.2 Concentración de Manganeso en temporada de estiaje

En la *figura 63* están representadas las concentraciones de manganeso obtenidas en el muestreo de la temporada de estiaje en la ciudad de Morelia, de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible de Manganeso en el agua es de 0.15 mg/l, cantidad superada por el pozo denominado ALM (Adolfo López Mateos), en el cual se registró una concentración de 0.272 ppm en la temporada de estiaje; sin embargo, en la temporada de lluvias este pozo estuvo fuera del límite máximo permisible, posiblemente por la dilución en mayor agua, tal como lo describe Chabukdhara *et al.* (2017) en estudios similares.

Es importante mencionar que este pozo se encuentra situado en la falla geológica de “La Colina”, lo cual podría estar relacionado con esta medición, ya que la falla podría estar

acarreando contaminantes de otros lugares, dejando vulnerable al pozo a diferentes agentes de contaminación (Cervantes-Medel y Armienta, 2004). Anteriormente se hace mención de que el pozo se encontraba contaminado al momento de la toma de muestra, lo que podría ser otra explicación a la concentración alta de Manganeso.

VI.VII.II Concentración de Arsénico (As) en el Agua subterránea de la ciudad de Morelia

En esta sección se analizan los resultados de la concentración de Arsénico para cada uno de los 15 pozos muestreados, en las seis campañas de muestreo, tomando como referencia los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Los datos de las primeras cuatro campañas de muestreo fueron tomados de Estrada-Murillo (2015).

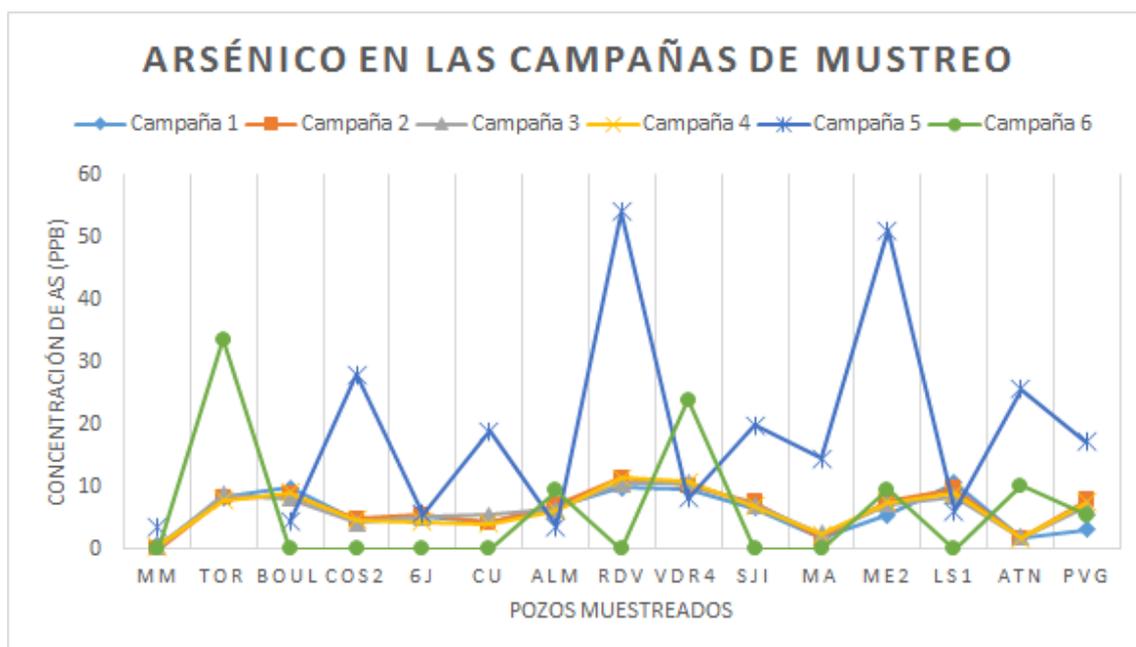


Figura 64. Concentración de arsénico en las campañas de muestreo

La exposición de niveles elevados de Arsénico en el agua potable es una preocupación mundial, las muestras de agua provenientes de los acuíferos en casi todos los países, han reportado contener concentraciones de Arsénico arriba de los 10 μl , el cual es el límite establecido por la Organización mundial de la salud (Meliker *et al.*, 2009).

El límite máximo permisible de concentración de arsénico es de 0.05 mg/l (50 ppb) de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, como puede observarse en la figura 64, los pozos RDV y ME2 sobrepasan este límite en la quinta campaña de muestreo, ningún otro pozo o manantial sobrepasó el límite marcado por la norma en tres años de monitoreo. Siguiendo los pozos TOR y VDR4 como los otros dos pozos con mayor concentración; sin embargo, estos últimos no se encuentran por arriba del límite máximo permisible por la norma. En las siguientes secciones se analiza el comportamiento del As en el área de estudio.

VI.VII.II.I Modelos de concentración de Arsénico para el agua subterránea de la ciudad de Morelia en las seis campañas de muestreo y descripción estadística.

VI.VII.II.I.I Primera campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As)

En la primera campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Arsénico, que corresponden a los 15 sitios muestreados en esa campaña de muestreo. La ecuación para el modelo fue $Y = -0.7946x + 1.3516$ con un $R^2 = 0.6142$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $Y = -1.2466x + 1.8416$ con $R^2 = 0.9861$ (figura 65).

Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos 6J, ME2, SJI, ALM, TOR, y VDR4. Localizados en la *secuencia fluvio lacustre* con excepción de los pozos SJI y VDR4 los cuales se encuentran en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

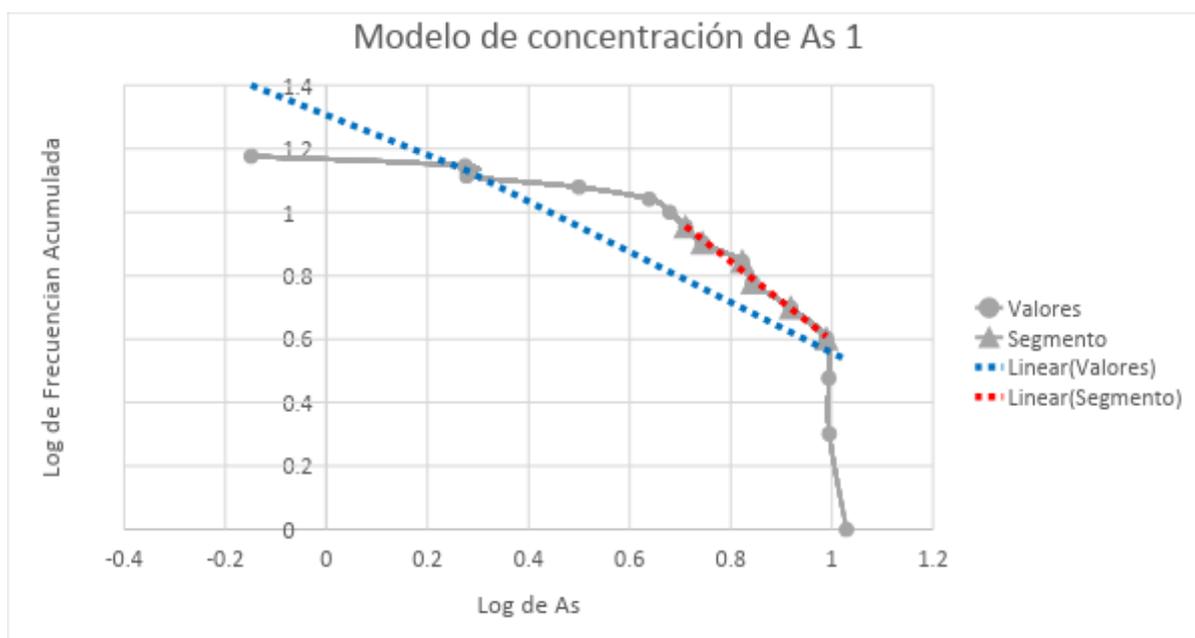


Figura 65. Modelo de concentración de Arsénico en el agua subterránea de Morelia en la primera campaña de muestreo.

VI.VII.II.I.II Segunda campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As)

En la segunda campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 14 datos de concentraciones de Arsénico. La ecuación para el modelo fue $Y = -0.8323x + 1.5174$ con $R^2 = 0.6305$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $Y = -3.1403x + 3.6624$ con $R^2 = 0.97$ (figura 66).

Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos PVG, TOR, BOUL, LS1, VDR4 y RDV. Localizados en la *secuencia fluvio lacustre* con excepción del pozo VDR4 el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

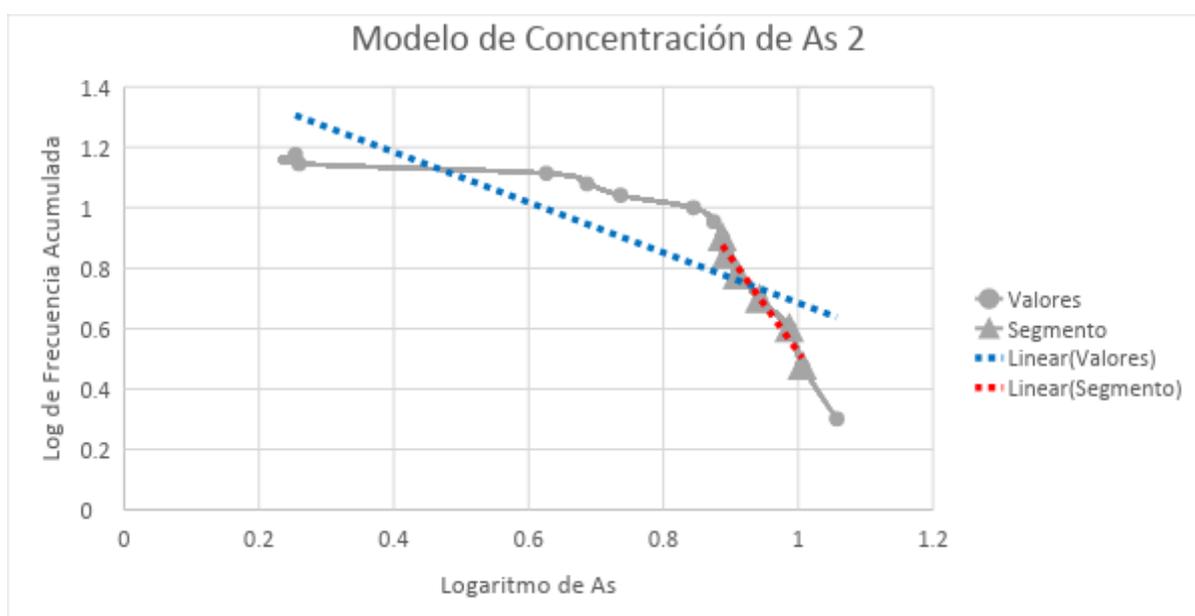


Figura 66. Modelo de concentración de Arsénico en el agua subterránea de Morelia en la segunda campaña de muestreo.

VI.VII.II.I.III Tercera campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As)

En la tercera campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Arsénico. La ecuación para el modelo fue $Y = -0.6027x + 1.2306$ con $R^2 = 0.44$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $Y = -2.8631x + 3.2773$ con $R^2 = 0.98$ (figura 67).

Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos ALM, PVG, SJI, ME2, BOUL y LS1. Localizados en la *secuencia fluvio*

lacustre con excepción del pozo SJI el cual se ubica en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

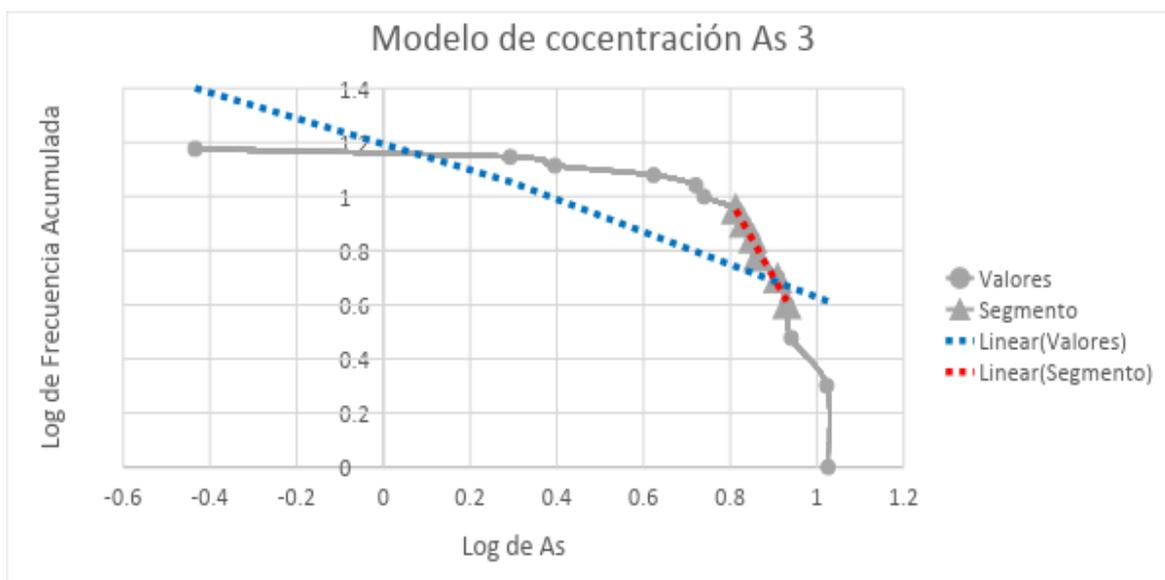


Figura 67. Modelo de concentración de Arsénico en el agua subterránea de Morelia en la tercera campaña de muestreo.

VI.VII.III.IV Cuarta campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As)

En la cuarta campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Arsénico. La ecuación para el modelo fue $Y = -0.6654x + 1.2743$ con $R^2 = 0.52$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $Y = -0.7978x + 1.5631$ con $R^2 = 0.95$ (figura 68).

Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos CU, 6J, COS2, ALM, SJI y ME2. Localizados en la *secuencia fluvio lacustre* con excepción del pozo SJI el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

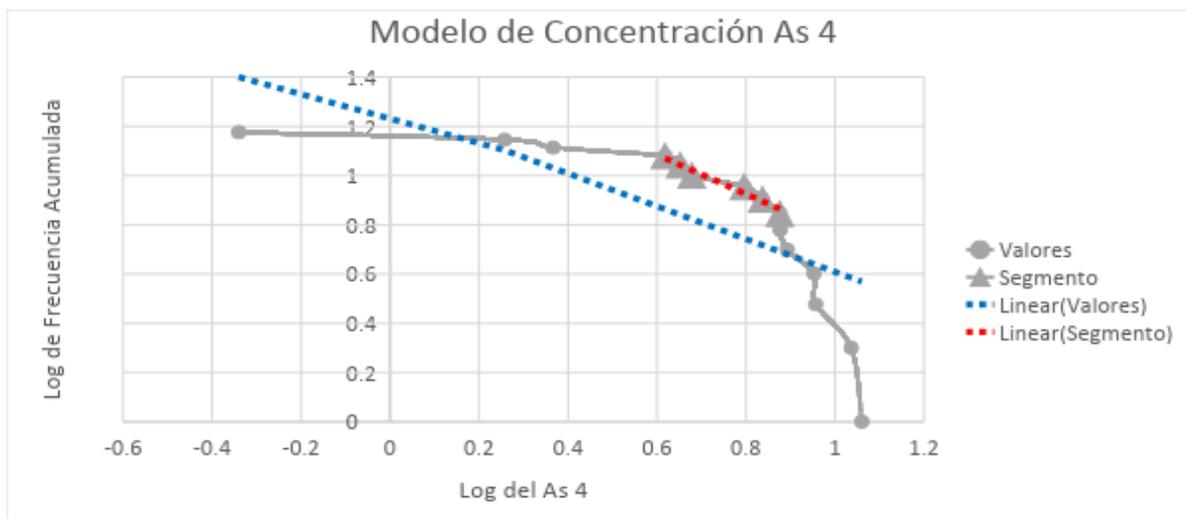


Figura 68. Modelo de concentración de Arsénico en el agua subterránea de Morelia en la cuarta campaña de muestreo

VI.VII.II.I.V Quinta campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As)

En la quinta campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Arsénico. La ecuación para el modelo fue $Y = -0.8581x + 1.768$ con $R^2 = 0.90$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $Y = -0.4471x + 1.4256$ con $R^2 = 0.97$ (figura 69).

Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos LS1, PB, VDR4, PPM, MA y PVG. Localizados en las tres unidades geológicas del área de estudio, en la *secuencia fluvio lacustre*, en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* y en los flujos piroclásticos del Mioceno.

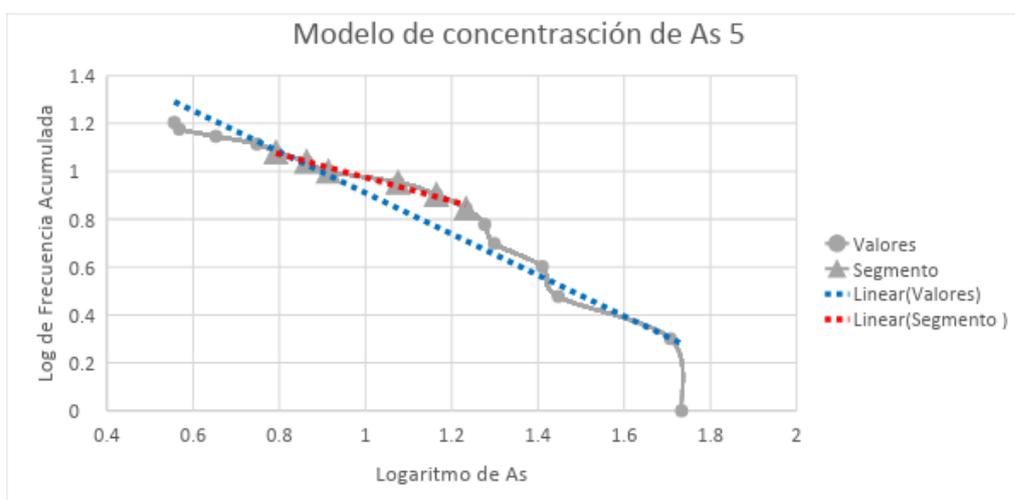


Figura 69. Modelo de concentración de Arsénico en el agua subterránea de Morelia en la quinta campaña de muestreo

VI.VII.II.I.VI Sexta campaña de muestreo de concentración de Arsénico (As)

En la sexta campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Arsénico. La ecuación para el modelo fue $Y = -0.9445x + 1.5175$ con $R^2 = 0.91$, en este caso se utilizaron todos los resultados obtenidos para realizar el modelo, es por ello que no se tiene un cluster interno (figura 70).

Los datos utilizados en este modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos PVG, ALM, ME2, ATN, VDR4 y TOR. Los cuales se encuentran en la *secuencia fluvio lacustre*, con excepción del pozo VDR4 el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

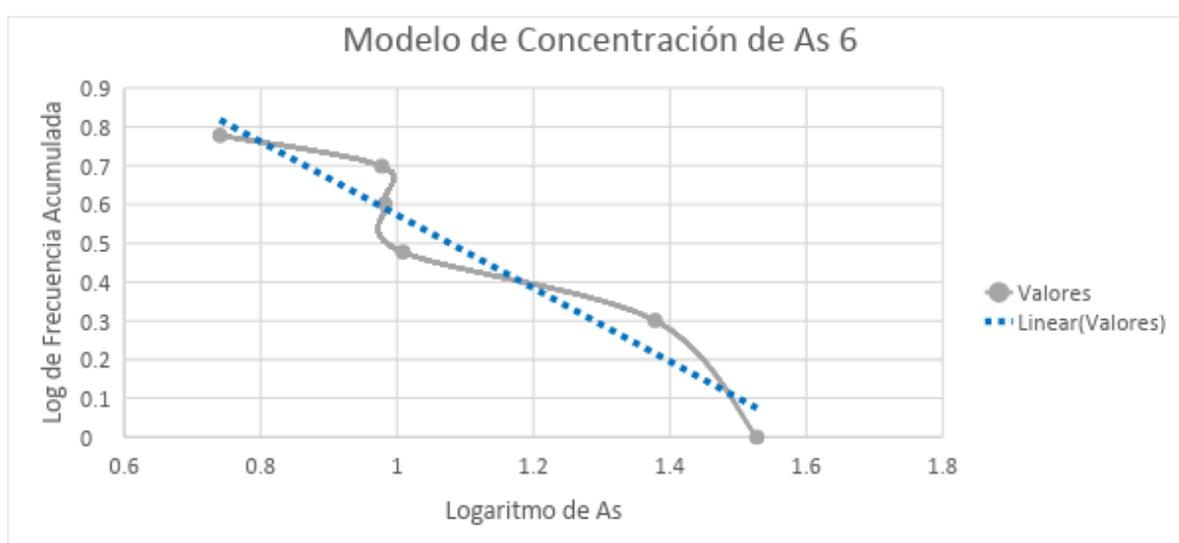


Figura 70. Modelo de concentración de Arsénico en el agua subterránea de Morelia en la sexta campaña de muestreo

En la *tabla 21* pueden observarse los modelos de concentración de Arsénico en las seis campañas de muestreo (tres años), teniendo tres campañas para la temporada de estiaje y tres campañas para la temporada de lluvias.

Modelos de Concentración de Arsénico					
No.	Modelo 1	R ²	Modelo 2	R ²	Pozos
As 1	$y = -0.7946x + 1.3516$	0.61	$y = -1.2466x + 1.8416$	0.97	6J, ME2, SJI, ALM, TOR y VDR4
As2	$y = -0.8323x + 1.5174$	0.63	$y = -3.1403x + 3.6624$	0.97	PVG, TOR, BOUL, LS1, VDR4 y RDV
As 3	$y = -0.6027x + 1.2306$	0.44	$y = -2.8631x + 3.2773$	0.98	ALM, PVG, SJI, ME2, BOUL y LS1
As 4	$y = -0.6654x + 1.2743$	0.52	$y = -0.7978x + 1.5631$	0.95	CU, 6J, COS2, ALM, SJI y ME2
As 5	$y = -0.8581x + 1.768$	0.90	$y = -0.4471x + 1.4256$	0.97	LS1, PB, VDR4, PPM, MA, y PVG
As 6	$y = -0.9445x + 1.5175$	0.91			PVG, ALM, ME2, ATN, VDR4 y TOR

Tabla 21. Modelos de concentración para el Arsénico del agua subterránea de Morelia, Michoacán

VI.VII.II.II Distribución Geográfica de la concentración de Arsénico del agua subterránea de la ciudad de Morelia

En esta sección se puede observar la distribución geográfica de la concentración de Arsénico en el área de estudio para la temporada de lluvias (*figura 72*) y para la temporada de estiaje (*figura 71*), de los datos tomados en campo para este trabajo.

VI.VII.II.II.I Concentración de Arsénico en la temporada de estiaje

En la *figura 71* están representados los valores de Arsénico obtenidos en el muestreo de la temporada de estiaje de la ciudad de Morelia, de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible de Arsénico en el agua es de 0.05 mg/l, cantidad que fue superada por dos pozos, el denominado RDV (Rinconada del Valle), en el cual se registró una concentración de As de 0.0541 ppm en la temporada de estiaje, y el pozo ME2 (Mariano Escobedo), en el cual se registró una concentración de As de 0.0510 ppm; sin embargo, en la temporada de lluvias no se encontró este mismo registro, en la temporada de lluvias la concentración de As no superó el límite máximo permisible por la norma, lo cual posiblemente se deba a la dilución de dicho elemento en el agua de lluvia.

VI.VII.II.II.II Posibles fuentes de contaminación por Arsénico

El flujo de agua subterránea en la ciudad va de SO-NE, partiendo de esta dirección, se puede observar que el flujo de agua subterránea, en su trayecto se encuentra con el pozo ME2 el cual está a unos metros de lado del *Río Grande*, y con el pozo RDV, el cual podría estar recibiendo aportes de agua subterránea del flujo del *Río Grande*, que se estaría filtrando por la falla geológica *La Paloma (figura 71)*, ya que el escarpe de esta termina justo en intersección con el mencionado Río.

La falla geológica *La Paloma* termina en la parte sur del *Río Grande*, y recibe las descargas de agua de la industria “Kimberly Clarck” industria que fabrica papel en la ciudad y que aprovecha el agua del manantial de la Mintzita, el arsénico que podría provenir de esta actividad industrial y viajaría a lo largo de la falla geológica de Oeste a Este, contaminando esta parte del acuífero, como lo sugieren Cervantes-Medel y Armienta (2004), lo anterior al observar la geología y el modelo de terreno de la ciudad en las *figuras 71 y 72*, hasta incorporarse al pozo RDV en la temporada de estiaje. Cuando llega la temporada de lluvias existe una mayor cantidad de flujo de agua subterránea, una mayor cantidad de agua podría estar diluyendo la concentración de Arsénico encontrada en el sitio, y esta podría ser la razón por la cual en temporada de lluvias este elemento no sobrepasa el límite máximo permisible de la norma.

Cerca del pozo RDV se muestreo también el pozo COS2 y el pozo y el pozo CU, estos tres presentan las concentraciones de arsénico más altas de la ciudad, pero sin superar los límites máximos permisibles de la norma, cabe mencionar que en un punto intermedio de estos tres puntos se encuentra situado el rastro de la ciudad y la empresa refresquera *Coca-*

Cola. En esta misma área, anteriormente existía un tiradero a cielo abierto, lo cual podría ser la explicación de las altas concentraciones de arsénico y otros contaminantes encontrados en esta zona de la ciudad, bajo este escenario, el arsénico podría estar siendo movilizado del material no consolidado (secuencia fluivo-lacustre), mediante la recarga de agua y transportado hacia los acuíferos como lo ha identificado Meliker *et al.* (2009) en otros estudios.

Concentración de Arsénico del agua subterránea en la temporada de secas en la ciudad de Morelia

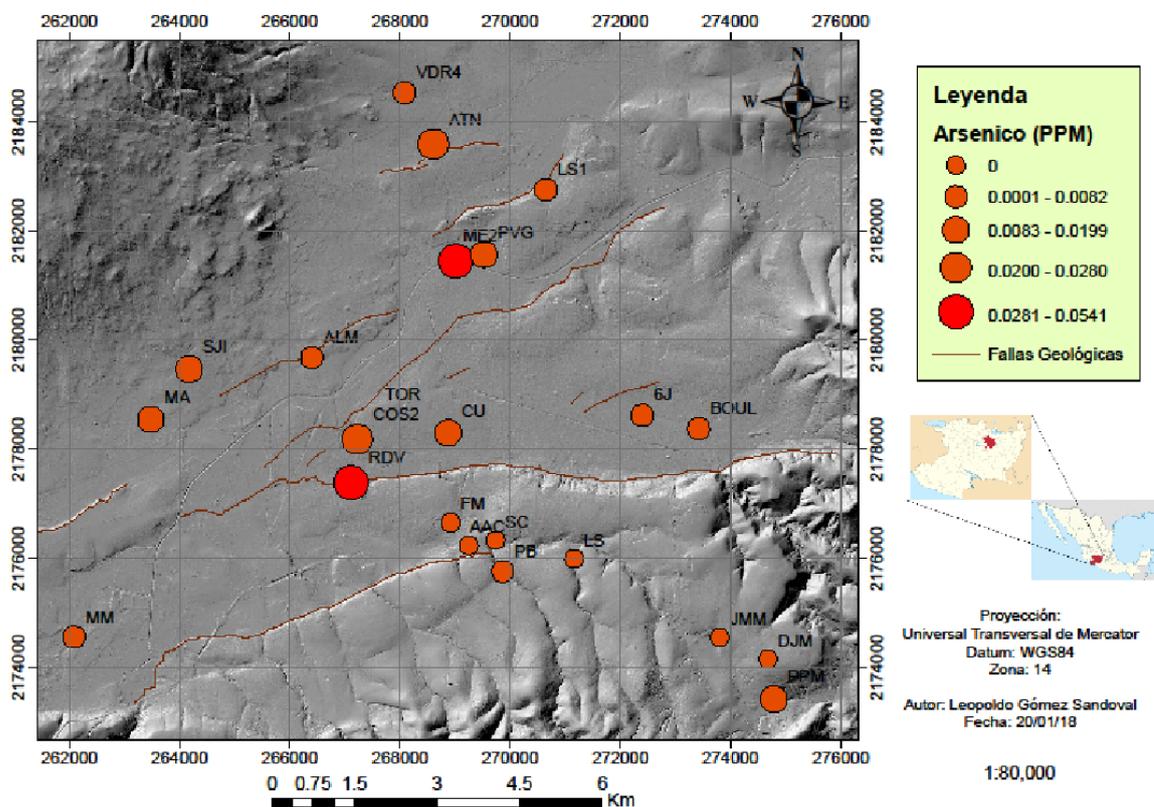


Figura 71. Mapa de distribución de concentración de Arsénico en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de estiaje.

VI.VII.II.II.III Concentración de Arsénico en la temporada de lluvias

En la *figura 72* están representados los valores de Arsénico obtenidos en el muestreo de la temporada de lluvias de la ciudad de Morelia, de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible de Arsénico en el agua es de 0.05 mg/l, cantidad que no fue superada por ningún pozo muestreado. En las figuras 71 y 72 puede observarse que no se detectó arsénico en los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* descritos por (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2005).

Concentración de Arsénico del agua subterránea en la temporada de lluvias en la ciudad de Morelia

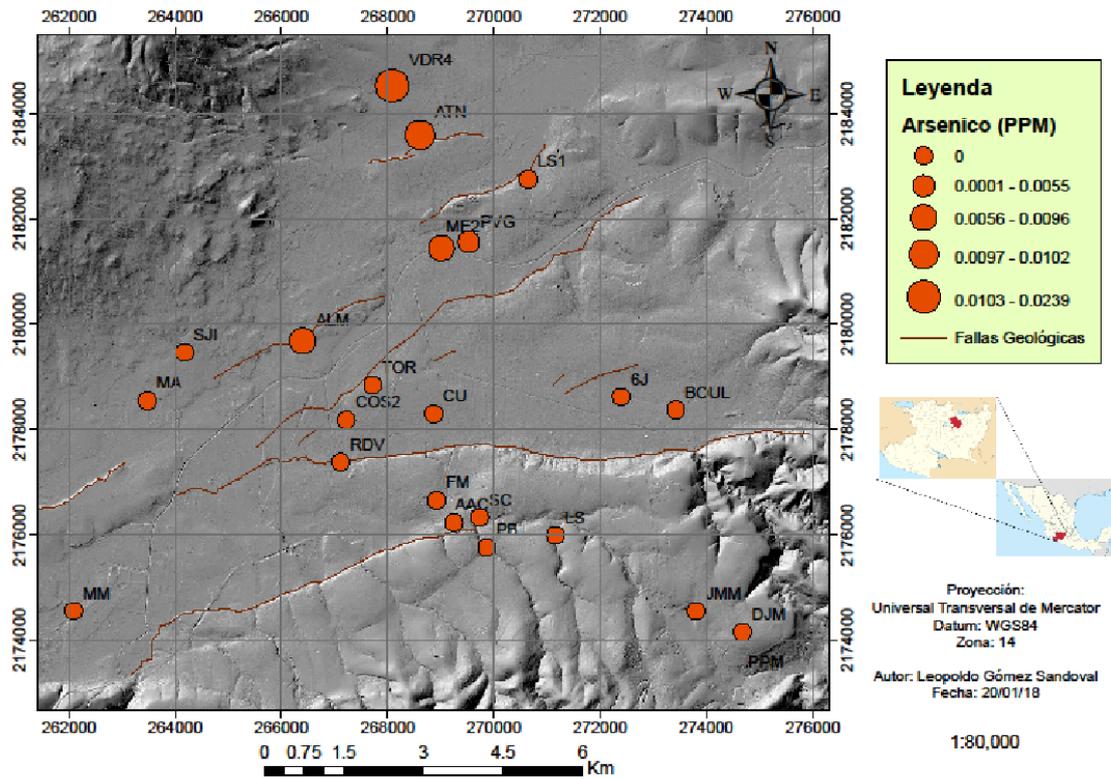


Figura 72. Mapa de distribución de concentración de Arsénico en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias.

VI.VII.III Concentración de Hierro en el agua subterránea de la ciudad de Morelia

En esta sección se analizan los resultados de la concentración de Hierro para cada uno de los 15 pozos muestreados, en las seis campañas de muestreo, tomando de referencia los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

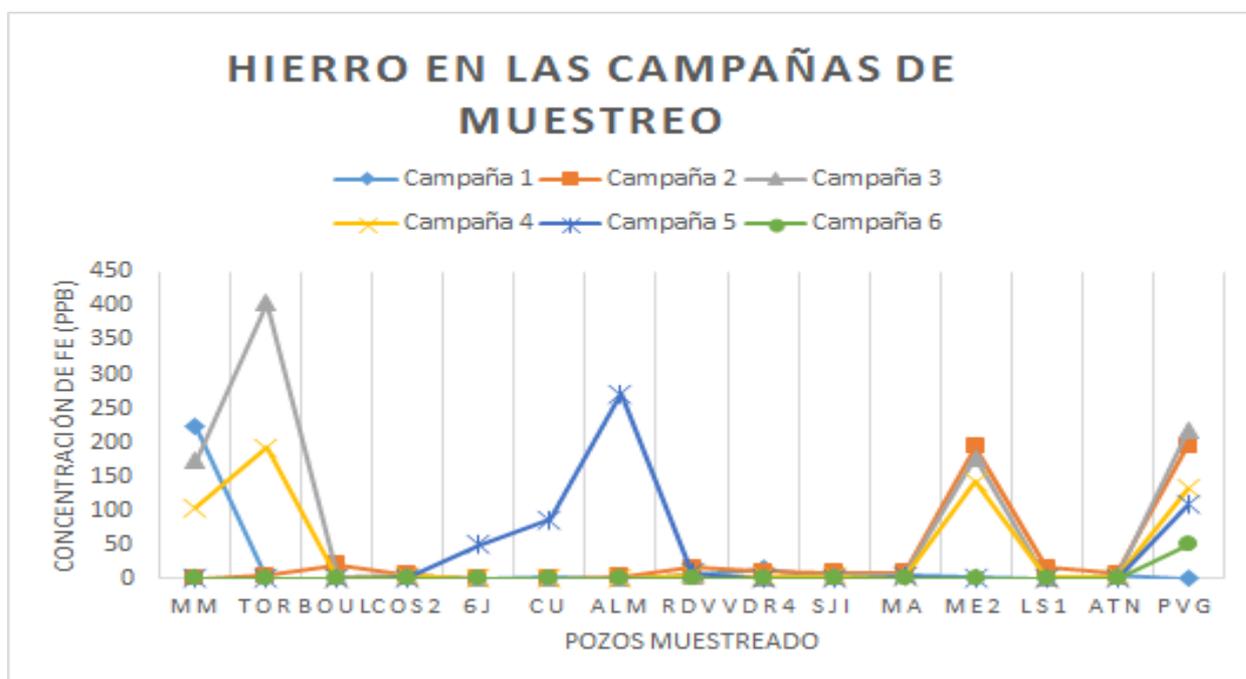


Figura 73. Concentración de Hierro entre las campañas de muestreo

El hierro es un elemento esencial en la nutrición humana, se estima que el requerimiento mínimo diario depende de la edad, sexo, fisiología, y disponibilidad de hierro, lo cual va de 10 a 50 mg por día (WHO, 2003a, WHO, 2003b); sin embargo, el exceso de este elemento es dañino para la salud. El límite máximo permisible de concentración de hierro en el agua es de 0.30 mg/l (300 ppb) de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, como puede observarse en la *figura 73*, ninguno de los pozos monitoreados en los tres años sobrepasan este límite, sin embargo, durante este trabajo se muestreó en el último año nueve pozos más, los cuales no se encuentran en la *figura 73*, ya que no existe información previa de esos pozos, uno de esos pozos muestreados es el PPM el cual se encuentra en la zona alta de la cuenca, en la localidad de San Miguel del Monte, este pozo presentó una concentración de hierro de 1.753 mg/l (1,753 ppb) el cual sobrepasó el límite máximo permisible de hierro en el agua de acuerdo con la citada norma, lo anterior puede observarse en la *figura 74*. En las siguientes secciones se analizó el comportamiento del Fe en el área de estudio.



Figura 74. Concentración de Hierro en el último año de muestreo, campañas 5 y 6

VI.VII.III.I Modelos de concentración de Hierro para el agua subterránea de la ciudad de Morelia en las 6 campañas de muestreo y descripción estadística.

VI.VII.III.I.I Primera campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe)

En la primera campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 15 datos de concentraciones de Hierro que corresponden a los 15 sitios muestreados en esa campaña. La ecuación para el modelo fue $y = -0.4957x + 1.0109$ con un $R^2 = 0.91$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo esta la ecuación $y = -1.0344x + 1.0988$ con $R^2 = 0.94$ (figura 75). Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos ALM, LS1, PVG, TOR, COS 2 y SJI. Localizados en la *secuencia fluvio lacustre* con excepción del pozo SJI el cual se encuentra en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

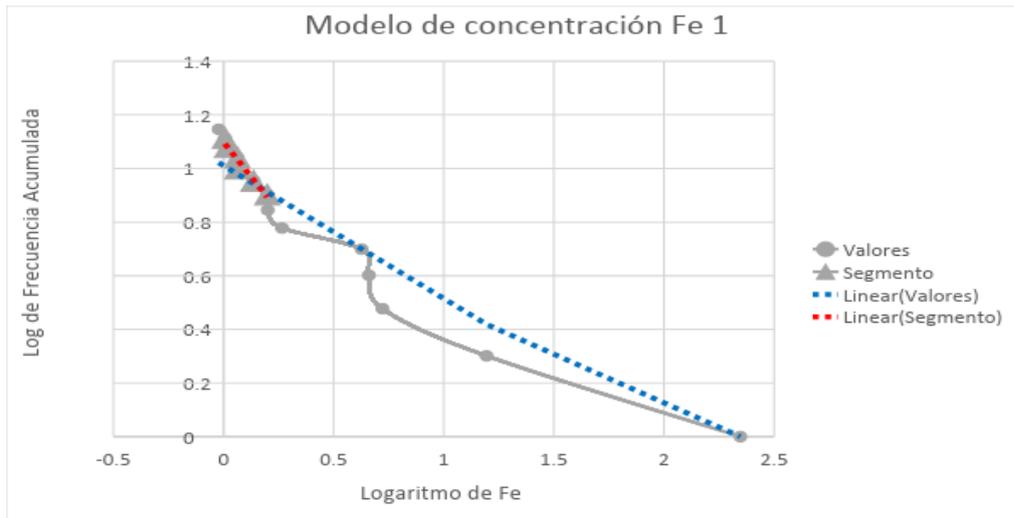


Figura 75. Modelo de concentración de Hierro en el agua subterránea de Morelia en la primera campaña de muestreo

VI.VII.III.I.II Segunda campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe)

En la segunda campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 14 datos de concentraciones de Hierro. La ecuación para el modelo fue $y = -0.5463x + 1.3654$ con $R^2 = 0.90$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -0.9683x + 1.7849$ con $R^2 = 0.92$ (figura 76).

Los datos utilizados en el segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos SJI, MA, VDR4, RDV, LS1 y BOUL. Localizados en la *secuencia fluvio lacustre* con excepción del pozo SJI y el pozo VDR4 los cuales se encuentran en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

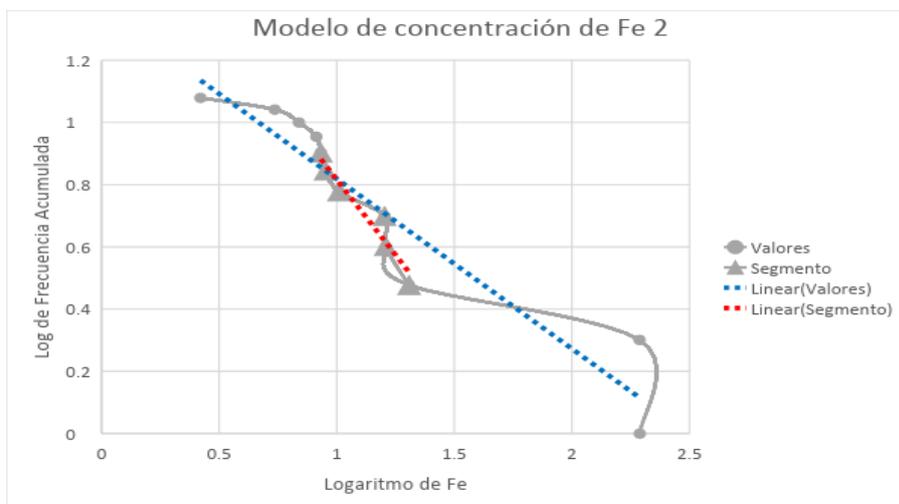


Figura 76. Modelo de concentración de Hierro en el agua subterránea de Morelia en la segunda campaña de muestreo

VI.VII.III.I.III Tercera campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe)

En la tercera campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 11 datos de concentraciones de Hierro. La ecuación para el modelo fue $y = -0.3317x + 1.1038$ con $R^2 = 0.84$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -0.7136x + 1.3305$ con $R^2 = 0.94$ (figura 77).

Los datos utilizados en el segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos VDR4, BOUL, ATN, COS2, SJI y RDV. Localizados en la *secuencia fluvio-lacustre* con excepción del pozo SJI y el pozo VDR4 los cuales se encuentran en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

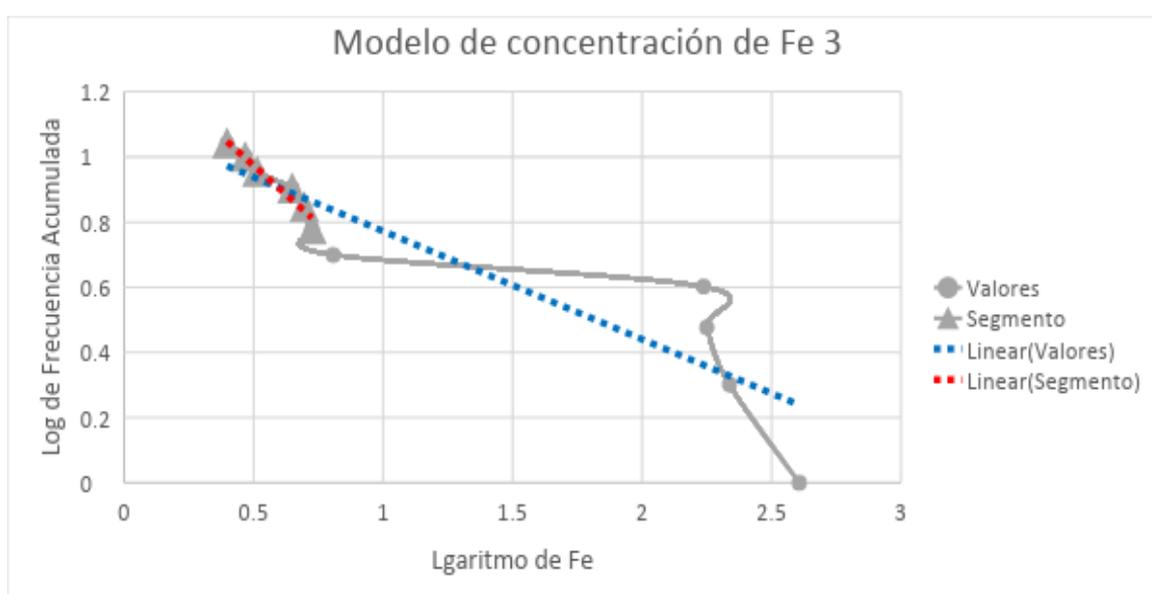


Figura 77. Modelo de concentración de Hierro en el agua subterránea de Morelia en la tercera campaña de muestreo

VI.VII.III.I.IV Cuarta campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe)

En la cuarta campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 10 datos de concentraciones de Hierro. La ecuación para el modelo fue $y = -0.3632x + 1.1041$ con $R^2 = 0.81$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -1.0406x + 1.4742$ con $R^2 = 0.88$ (figura 78).

Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos MA, ATN, SJI, VDR4, COS2 y RDV. Localizados en la *secuencia fluvio*

lacustre con excepción de los pozos SJI y VDR4 los cuales se encuentran en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*.

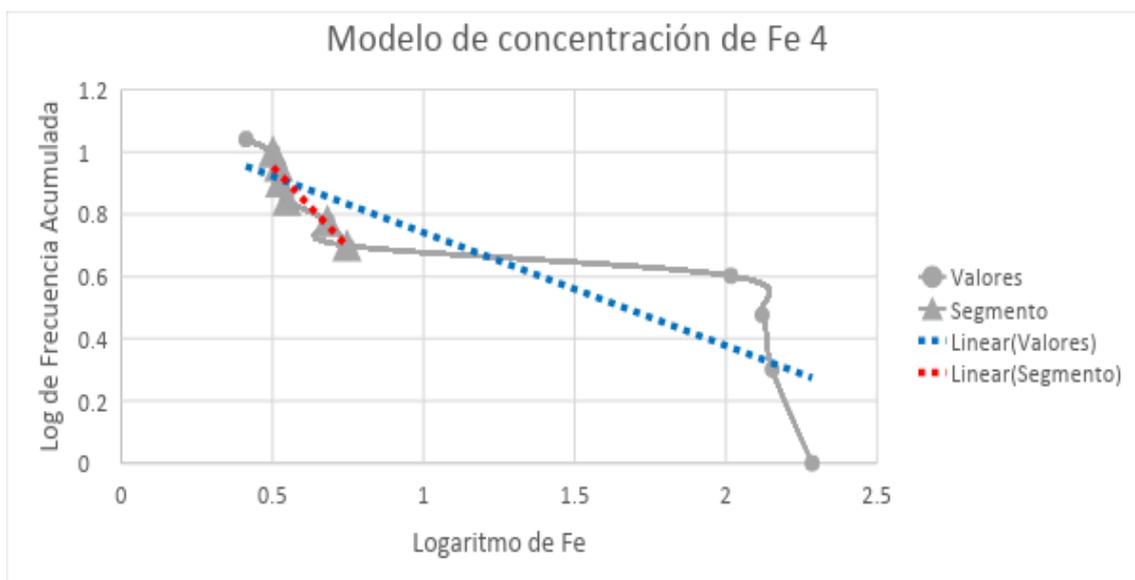


Figura 78. Modelo de concentración de Hierro en el agua subterránea de Morelia en la cuarta campaña de muestreo

VI.VII.III.I.V Quinta campaña de muestreo de concentración de Hierro (Fe)

En la quinta campaña de muestreo se obtuvo un modelo con los 9 datos de concentraciones de Hierro. La ecuación para el modelo fue $y = -0.27x + 1.0073$ con $R^2 = 0.91$; sin embargo, existe un cluster interno que tiene un mejor modelo, siendo la ecuación $y = -0.1596x + 0.9372$ con $R^2 = 0.97$ (figura 79).

Los datos utilizados en este segundo modelo fueron las concentraciones correspondientes a los pozos ME2, COS2, MA, RDV, 6J y CU. Los cuales se encuentran en la *secuencia fluvio-lacustre*.

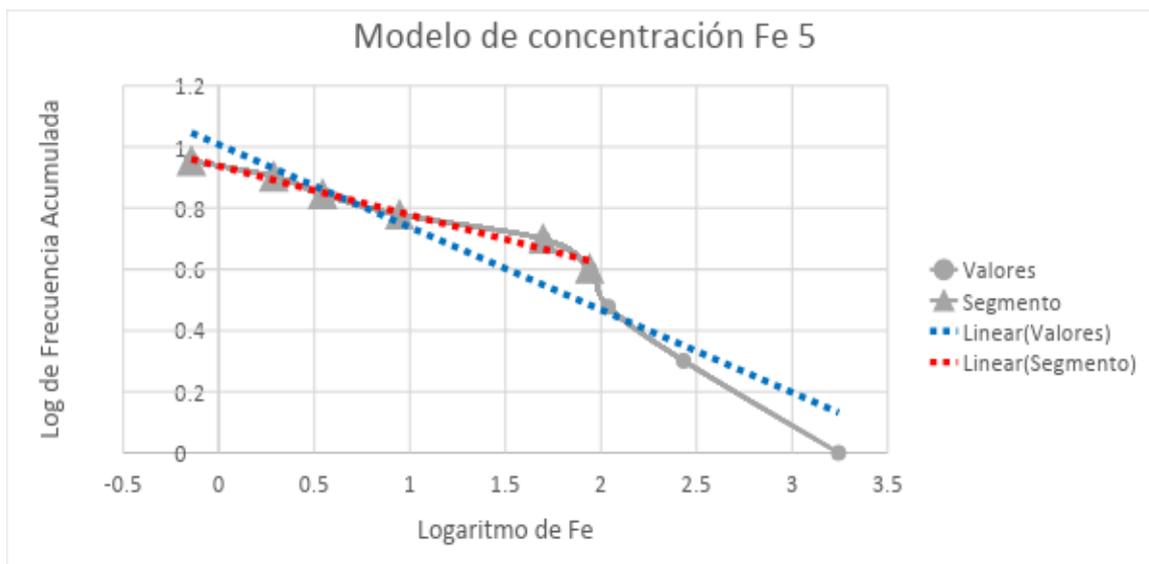


Figura 79. Modelo de concentración de Hierro en el agua subterránea de Morelia en la quinta campaña de muestreo

En la *tabla 22* pueden observarse los modelos de concentración de Hierro en las seis campañas de muestreo (tres años), teniendo tres campañas para la temporada de estiaje y tres campañas para la temporada de lluvias. En la sexta campaña de muestreo no se obtuvo ningún modelo ya que el nivel de hierro de todos los pozos estuvo fuera del límite de detección.

Modelos de Concentración de Hierro					
No.	Modelo 1	R ²	Modelo 2	R ²	Pozos
Fe 1	$y = -0.4957x + 1.0109$	0.91	$y = -1.0344x + 1.0988$	0.94	ALM, LS1, PVG, TOR, COS 2 y SJI
Fe 2	$y = -0.5463x + 1.3654$	0.90	$y = -0.9683x + 1.7849$	0.92	SJI, MA, VDR4, RDV, LS1 y BOUL
Fe 3	$y = -0.3317x + 1.1038$	0.84	$y = -0.7136x + 1.3305$	0.94	VDR4, BOUL, ATN, COS2, SJI y RDV

Fe 4	$y = -0.3632x + 1.1041$	0.81	$y = -1.0406x + 1.4742$	0.88	MA, ATN, SJI, VDR4, COS2 y RDV
Fe 5	$y = -0.27x + 1.0073$	0.91	$y = -0.1596x + 0.9372$	0.97	ME, COS2, MA, RDV, 6J y CU
Fe 6					

Tabla 22. *Modelo de concentración de Hierro del agua subterránea de la ciudad de Morelia*

VI.VII.III.II Concentración de Hierro en la temporada de estiaje

En el *figura 80* están representados los valores de Hierro obtenidos en el muestreo de la temporada de estiaje de la ciudad de Morelia, de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible de Hierro en el agua es de 0.30 mg/l, cantidad que es superada por un pozo muestreado en la temporada de lluvias, el pozo denominado PPM (Pozo Profundo de San Miguel del Monte), en el cual se encontró una concentración de Hierro de 1.7534 ppm sobrepasando los límites permisibles en el agua.

El pozo ALM no sobrepasó el límite establecido por la norma; sin embargo, se registró una concentración de 0.271 ppm, lo cual está muy cerca del límite permisible y es necesario monitorearlo, ya que este pozo se encuentra contaminado con Manganeso, como se describió anteriormente.

Concentración de Hierro del agua subterránea en la temporada de secas en la ciudad de Morelia

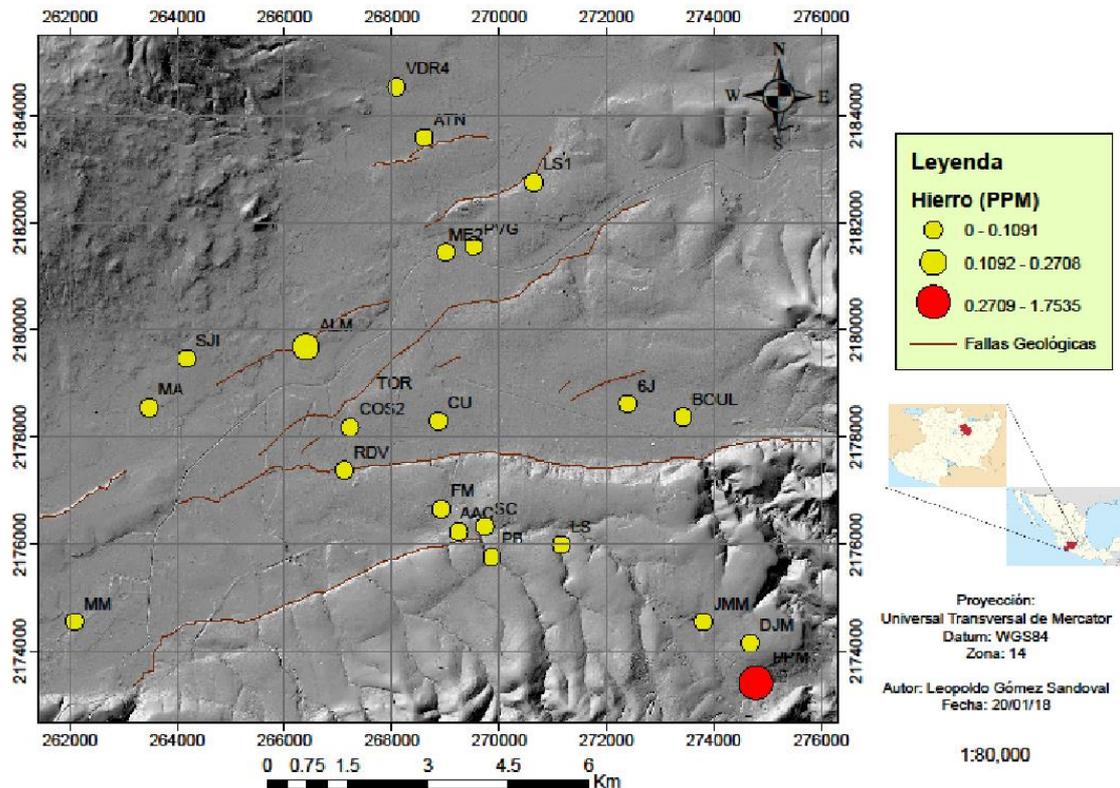


Figura 80. Mapa de distribución de concentración de Hierro en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de estiaje.

En la distribución de Fe se puede observar que los valores más bajos encontrados fueron en los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* descritos por (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2005), en donde se observa que todos los puntos muestreados en estos flujos, están dentro de la clase 0-0.0088 ppm de la concentración de Hierro en el agua subterránea. El pozo PPM el cual es el que tiene la concentración más alta, se encuentra dentro de la *secuencia andesítica y piroclástica de la escalera*, para la cual no se cuenta con ningún otro punto de muestreo.

VI.VII.III.III Concentración de hierro en la temporada de lluvias

En la *figura 81* están representados los valores de Hierro obtenidos en el muestreo de la temporada de lluvias de la ciudad de Morelia, de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible de Hierro en el agua es de 0.30 mg/l, cantidad que no es superada por ningún pozo muestreado en la temporada de lluvias. Se puede apreciar en

la figura 81 que los flujos piroclásticos ignimbriticos del Mioceno (cantera de Morelia) descritos por (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2005), presentan valores fuera del límite de detección.

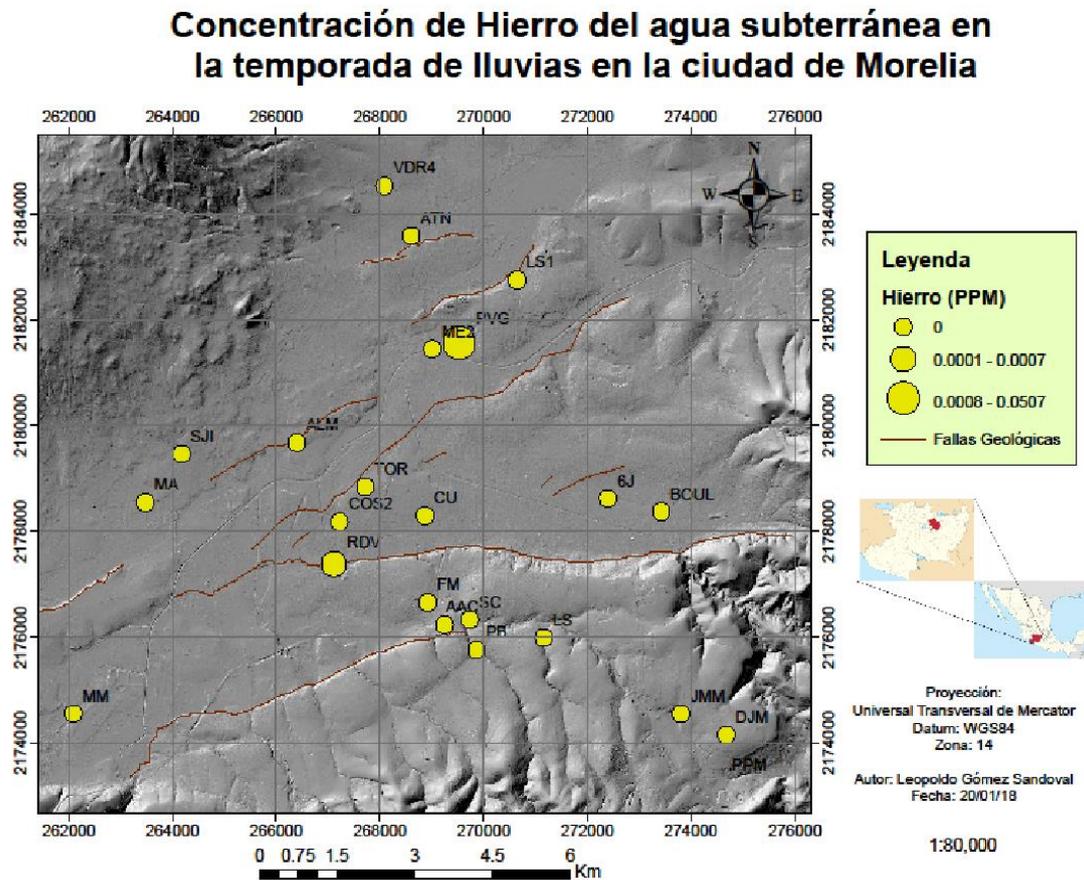


Figura 81. Mapa de distribución de concentración de Hierro en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias.

VI.VII.V Población afectada por metales pesados en el agua subterránea

VI.VII.V.I Población afectada por Manganeseo

La concentración de Manganeseo en el agua del pozo ALM en la ciudad de Morelia sobrepasó los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994. De acuerdo con el último censo del INEGI (2010), el AGEB (Área Geográfica Básica) en la que se encuentra este pozo ubicado en la colonia Adolfo López Mateos, se identifica con el número 1605300011253 y contiene una población total de 2,870 personas, las cuales podrían encontrarse en riesgo por el alta concentración de arsénico en su agua subterránea, lo anterior en caso de que el uso de agua sea para consumo, vease *figura 82*.

De esta población el 64.5% (1,850 personas) son derechohabientes a servicios de salud, mientras que el 28.7 % (825 personas) de ellas no lo son. Estas últimas son las que serían las mayores afectadas en caso de las concentraciones de Manganeseo causen un daño a la salud humana. De acuerdo con el Consejo Nacional de Población, este AGEB tiene un índice de marginación bajo.

VI.VII.V.II Población afectada por Arsénico

La concentración de Arsénico en el agua del pozo RDV en la ciudad de Morelia sobrepasó los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994. De acuerdo con el último censo del INEGI (2010), el AGEB en la que se encuentra este pozo ubicado en la colonia Rinconada del Valle, se identifica con el número 1605300012069 y contiene una población total de 3,957 personas, las cuales podrían encontrarse en riesgo por el alta concentración de arsénico en su agua subterránea, lo anterior en caso de que el uso de agua sea para consumo, vease *figura 82*.

De esta población el 65.6% (2,599 personas) son derechohabientes a servicios de salud, mientras que el 30.4 % (1,201 personas) de ellas no lo son. Estas últimas son las que serían las mayores afectadas en caso de las concentraciones de Arsénico causen un daño a la salud humana. De acuerdo con el Consejo Nacional de Población, este AGEB tiene un índice de marginación bajo.

Otro de los pozos que sobrepasó los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 es el ME2 (ubicado en la colonia Mariano Escobedo), este pozo se encuentra dentro del AGEB identificado con el número 1605300012374 y contiene una población de 4,617

personas, las cuales podrían encontrarse en riesgo por el alta concentración de Arsénico en su agua subterránea.

De esta población el 54.8% (2,528 personas) son derechohabientes a servicios de salud, mientras que el 42.7 % (1,973 personas) de ellas no lo son. Estas últimas son las que serían las mayores afectadas en caso de las concentraciones de Arsénico causen un daño a la salud humana.

Sumando la población de las AGEB en donde se encuentran los pozos conaminados con arsénico, se tiene que son 8,574 personas las que podrían encontrarse en riesgo de presentar alguna enfermedad por el consumo prolongado de agua contaminada con este metal.

VI.VII.V.III Población afectada por Hierro

La concentración de Hierro en el agua del pozo PPM en la ciudad de Morelia sobrepasó los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994. De acuerdo con el último censo del INEGI (2010), el AGEB en la que se encuentra este pozo (ubicado en localidad Jesús del Monte, área que comprende uno de los conjuntos habitacionales tipo residencial mas grandes de la ciudad), se identifica con el número 160530074 y contiene una población total de 4,182 personas, sin embargo el tamaño poblacional de la localidad entera es de 13, 565 personas, las cuales podrían encontrarse en riesgo por el alta concentración de hierro en el agua subterránea, lo anterior en caso de que el uso de agua sea para consumo humano, vease *figura 82*.

De las 4,182 personas que viven en el AGEB 160530074 el 47% (1,965 personas) son derechohabientes a servicios de salud, mientras que el 48.7 % (2,035 personas) de ellas no lo son. Estas últimas son las que serían las mayores afectadas en caso de que las concentraciones de Hierro causen un daño a la salud, debido a que no cuentan con atención médica gratuita.

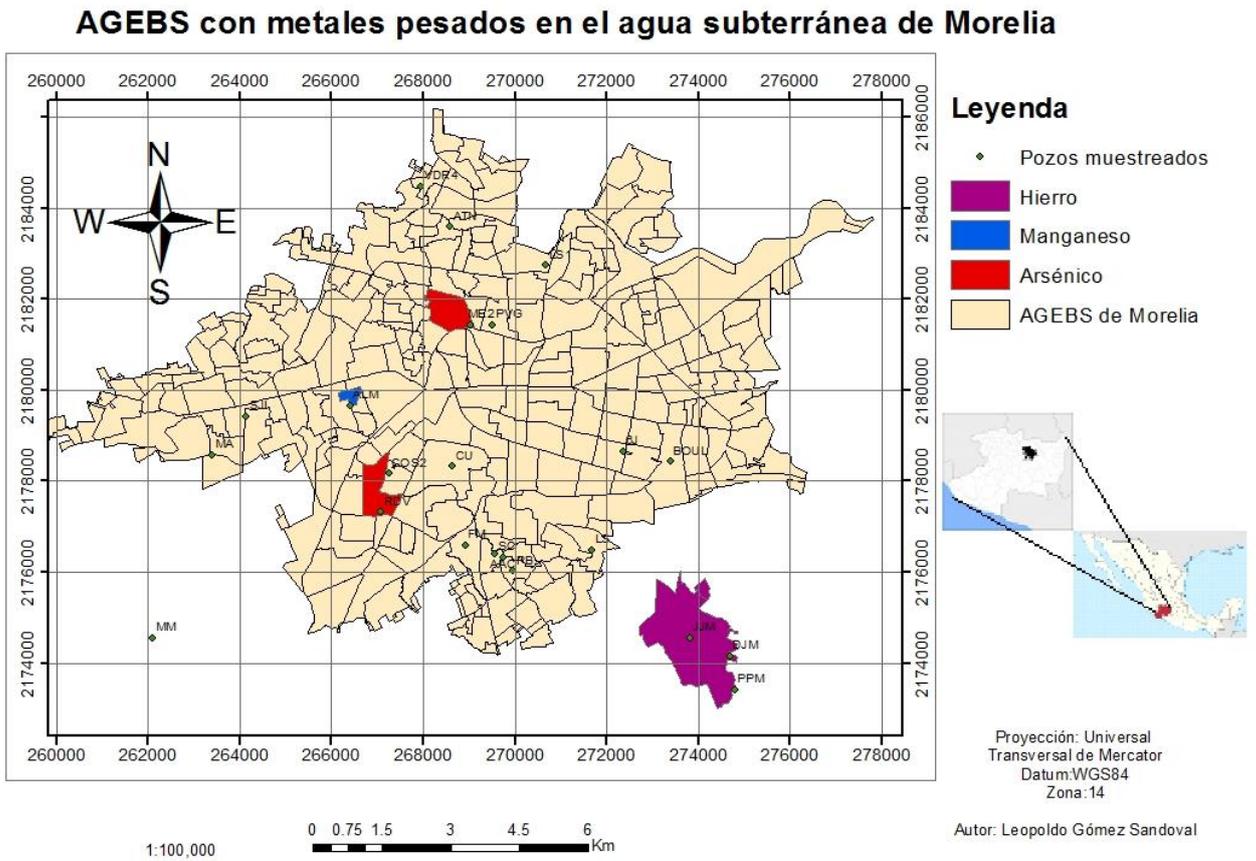


Figura 82. AGEBS con metales pesados en el agua subterránea de Morelia

VI. VIII ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO

VI.VIII.I Análisis bacteriológico para la temporada de estiaje

En la *temporada de estiaje* los pozos en los que se identificaron *bacterias mesofílicas* fueron; MM, ALM, CU, VDR4, PVG, SC, SJI, JMM, DJM, PPM, ATN, COS2, PB, AAC, RDV y FM, encontrándose así en 16 de los 22 sitios muestreados (*figura 83*), representando estos el 72.2% de los puntos, siendo los valores más altos en el manantial La Mintzita (MM) con 2000 Unidades Formadoras de Colonia (UFC) por 100 ml y el pozo Adolfo López Mateos (ALM) con 1000 UFC/100 ml.

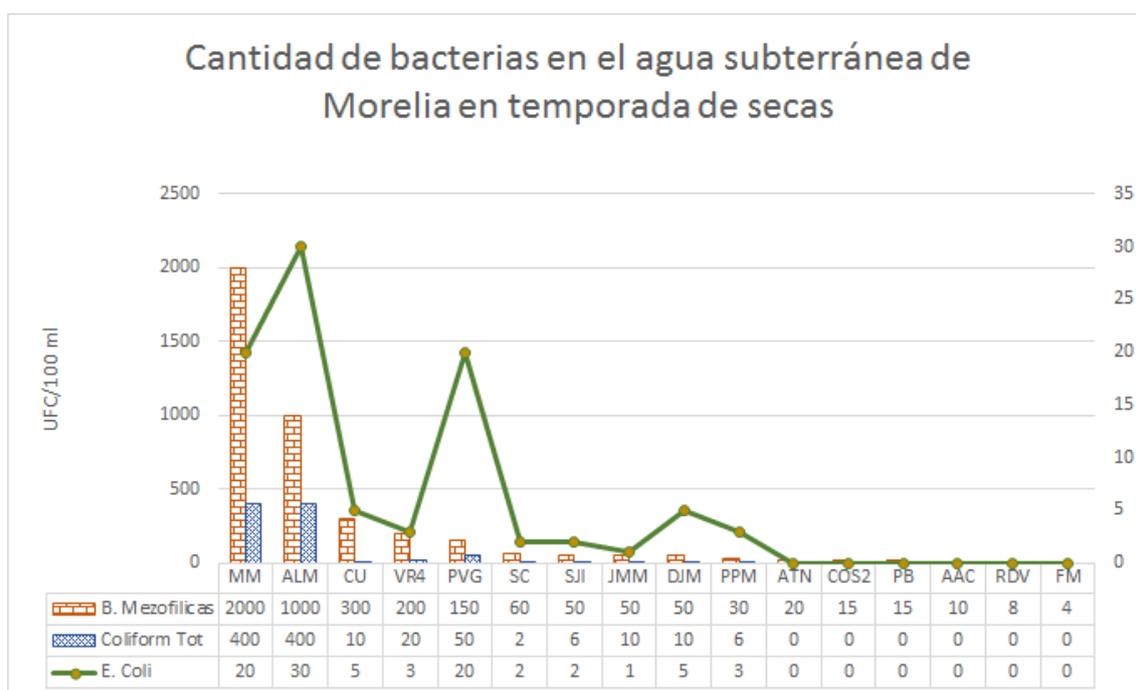


Figura 83. Coliformes totales, bacterias mesofílicas y *E. Coli* en el agua subterránea de Morelia en la temporada de estiaje

Los pozos en los que se identificaron *coliformes totales* son; MM, ALM, CU, VDR4, PVG, SC, SJI, JMM, DJM y PPM, encontrándose así en 10 de los 22 sitios muestreados, representando estos puntos el 45.4 % del total de pozos, obteniendo los valores más altos en el Manantial de la Mintzita (MM) con 400 UFC/100 ml y Adolfo López Mateos (ALM) con 400 UFC/100 ml.

Los pozos en los que se identificaron bacterias *E. Coli* son; MM, ALM, CU, VDR4, PVG, SC, SJI, JMM, DJM, y PPM, encontrándose en 10 de los 22 sitios muestreados, es decir en un 45.4 % del total de pozos, casi el 50% de los puntos en el área de estudio.

VI.VIII.II Análisis bacteriológico para la temporada de lluvias

En la *temporada de lluvias* los 12 pozos en los que se identificaron *bacterias mesofílicas* fueron; CU, LS1, ATN, MM, AAC, SC, PB, ALM, DJM, COS2, PVG, LS, JMM, 6J, FM, TOR y BOUL, encontrándose así en 17 de los 22 sitios muestreados (*figura 84*), representando estos el 77.2 % del total de puntos, los valores más altos fueron encontrados en los pozos; CU con 250 UFC/100 ml, LS1 con 120 UFC/100 ml y ATN con 100 UFC/100 ml.

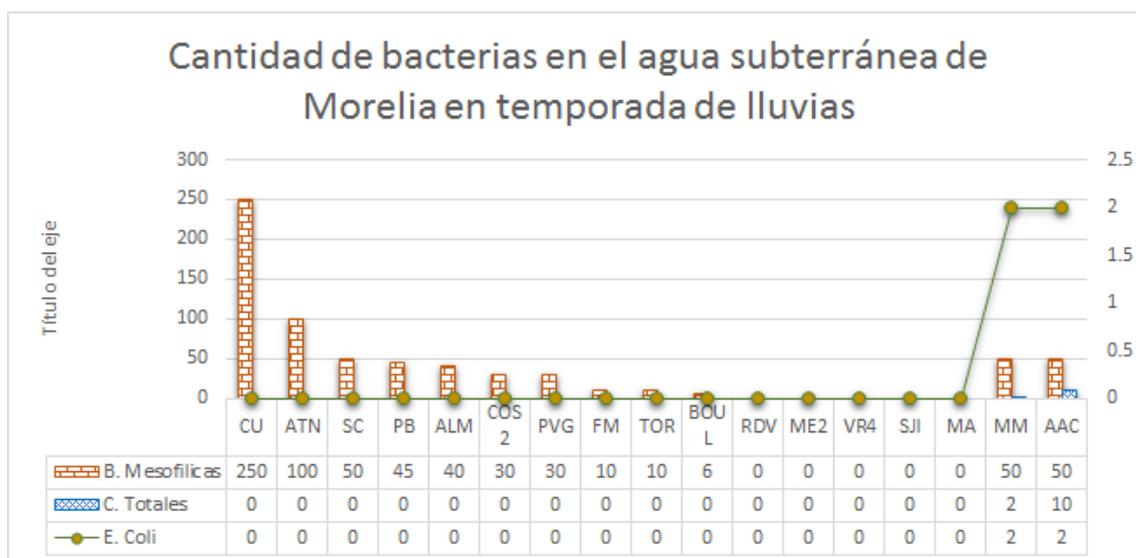


Figura 84. Bacterias mesofílicas, coliformes totales y *E. Coli* en el agua subterránea de Morelia en la temporada de lluvias

Los siete pozos en los que se identificaron *coliformes totales* son; LS1, MM, AAC, DJM, LS, JMM, representando el 31.8% del total de puntos muestreados. Los valores más altos fueron encontrados en los pozos LS1 con 40 UFC/100 ml y 6J con 14 UFC/100 ml. Mientras que la bacteria *E. Coli* se identificó en los siguientes siete pozos; MM, LS1, AAC, DJM, LS, JMM y 6J representando estos el 31.8 % de los pozos.

VI.VIII.III Análisis de la concentración de bacterias en el agua subterránea de la ciudad de Morelia

En general en las dos campañas de muestreo, los aprovechamientos de agua que representan la mayor cantidad de UFC/100 ml de *E. Coli* en la temporada de estiaje fueron ALM, MM, PVG y en la temporada de lluvias fue el pozo LS1, del mismo modo estos 4 pozos son los que presentan la mayor cantidad de coliformes totales.

La razón por la que del manantial de “La Mintzita”(MM) se tuviera un número tan grande de UFC/100 ml de bacterias, siendo este un manantial conocido por su buena calidad de agua, es porque el sitio de la toma de la muestra no fue en el punto donde brota el agua de la roca que alimenta el manantial, sino que fue en un sitio lejos de este lugar, localizado a la entrada de la unidad del OOAPAS que distribuye el agua del manantial a la ciudad, el punto muestreo fue, el agua ha recorrido varias fuentes de contaminación antropogénica.

Un caso similar sucedió en el pozo Adolfo López Mateos (ALM) en donde el agua de la bomba que extrae agua del aprovechamiento, proporcionaba agua con una gran cantidad de sólidos y lo que parecían óxidos de metal, posiblemente debido a algún arreglo previo a la bomba o debido a algún tipo de falla en la misma.

Los pozos de agua ATN, COS2, PB, RDV, FM, ME2, MA y BOUL no presentaron bacterias en la temporada de lluvias ni en la temporada de estiaje representando estos el 31.81 % de los puntos muestreados.

VI.VIII.IV E. Coli en la temporada de estiaje en el agua subterránea de la ciudad de Morelia

En la *figura 85*, mapa de distribución de *E. Coli* en el agua subterránea de la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de estiaje, parece no existir un patrón relacionado con el tipo de flujo o acuífero identificado por Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007); sin embargo, el 45.4 % del total de pozos muestreados en la temporada de estiaje presentaron la bacteria *E. Coli*, siendo los puntos que presentan la mayor cantidad de unidades formadoras de colonias (UFC), el manantial de la Mintzita (MM) y el pozo denominado Adolfo López Mateos (ALM), de los cuales a continuación se analizarán.

El caso del manantial de la Mintzita (MM) se explicó anteriormente, que el sitio de la toma de la muestra se encontraba contaminado.

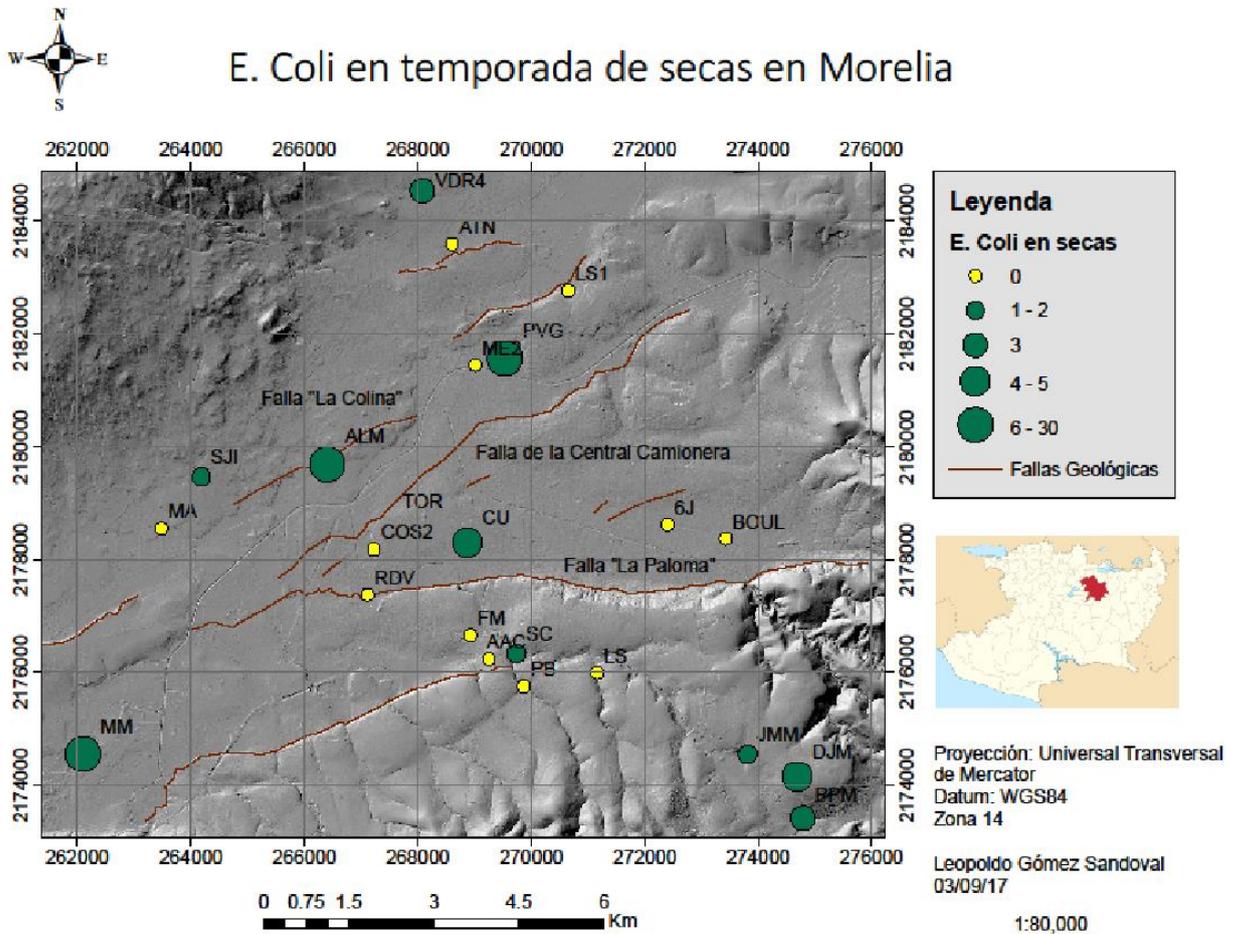


Figura 85. Mapa de distribución de *E. Coli* en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de estiaje

El caso del pozo ALM gran cantidad de sólidos de tierra y óxidos del metal fueron encontrados en el aprovechamiento; sin embargo, el alto contenido de bacterias de este pozo también podría estar siendo afectado por la falla geológica “La Colina” en la que se encuentra el pozo. Una de las teorías es que la red de drenaje local se fracturó a causa de la falla Geológica, y esto a su vez provocó que las aguas residuales de la zona entrarán en contacto con el agua del pozo y en general de la zona, tal y como lo describen Cervantes-Medel y Armienta (2004) en otros estudios.

El caso del pozo PVG podría estar siendo afectado tanto por el cauce del Río Chiquito, como por una falla geológica que se encuentra al norte del aprovechamiento, cayendo en el mismo supuesto que el pozo ALM mencionado en el párrafo anterior.

VI.VIII.V E. Coli en la temporada de lluvias en el agua subterránea de la ciudad de Morelia

En la *figura 86*, mapa de distribución de *E. Coli* en el agua subterránea de la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias, parece no existir un patrón relacionado con el tipo de flujo o acuífero identificado por Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007); sin embargo, el 30.4 % del total de pozos muestreados en la temporada de lluvias presentaron la bacteria *E. Coli*, siendo los puntos que presentan la mayor cantidad de unidades formadoras de colonias el LS1, 6J y DJM.

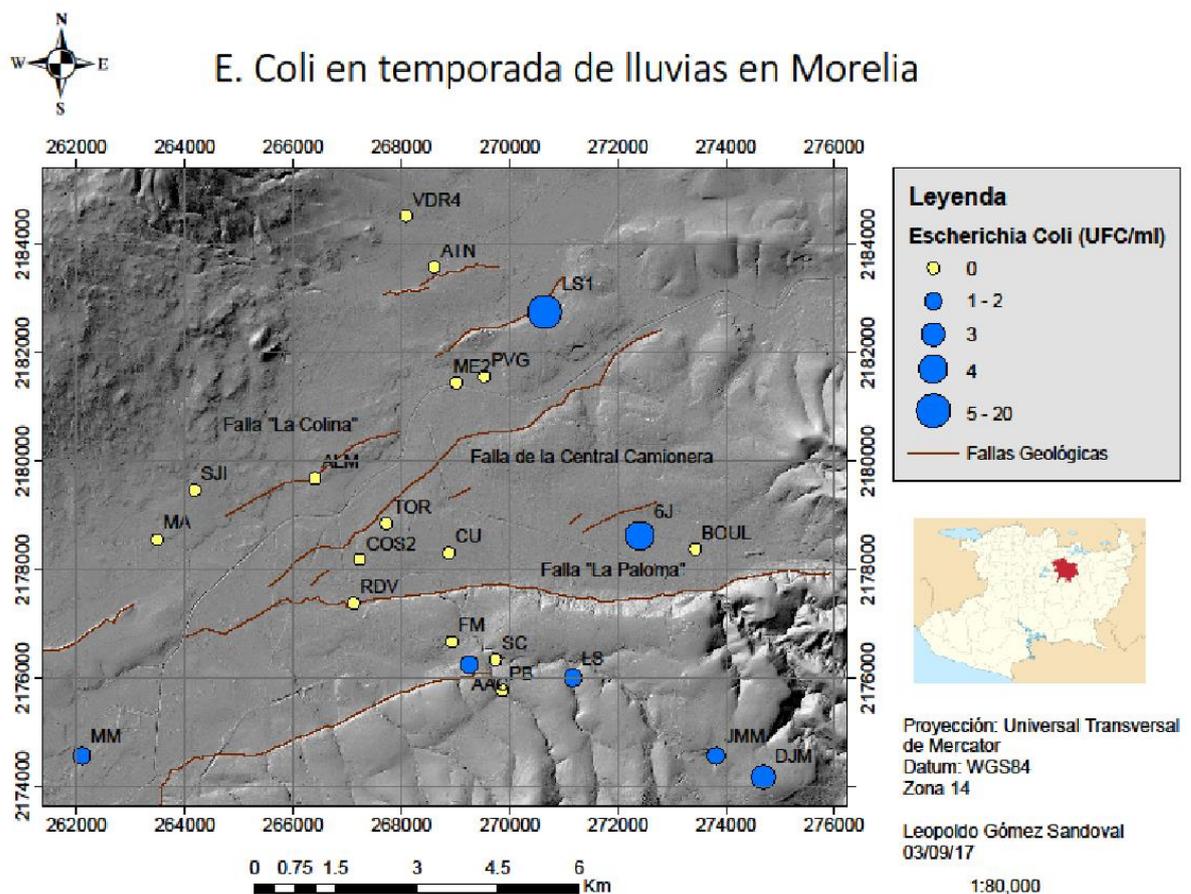


Figura 86. Mapa de distribución de E. Coli en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias

VI.VIII.VI E. Coli en la temporada de estiaje y lluvias en el agua subterránea de la ciudad de Morelia

En la *figura 87*, se puede observar que de los aprovechamientos que presentaron *E. Coli* tanto en la temporada de lluvias como en temporada de estiaje fueron los tres manantiales

muestreados, el de la Mintzita y dos en San Miguel del Monte en los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*. Los demás pozos, como se observa en la *figura 87* presentaron *E. Coli* solamente en una temporada, estando en verde los pozos que presentaron *E. Coli* en la temporada de secas y en azul los pozos que presentaron *E. Coli* en la temporada de lluvias. Las características físicas, químicas microbiológicas, del agua dulce pueden ser modificadas por debido a la contaminación, descargas residuales, generalmente resultan en el pH, temperatura, y concentración de metales, que presentan un peligro para la vida acuática (Jordao, 2007).

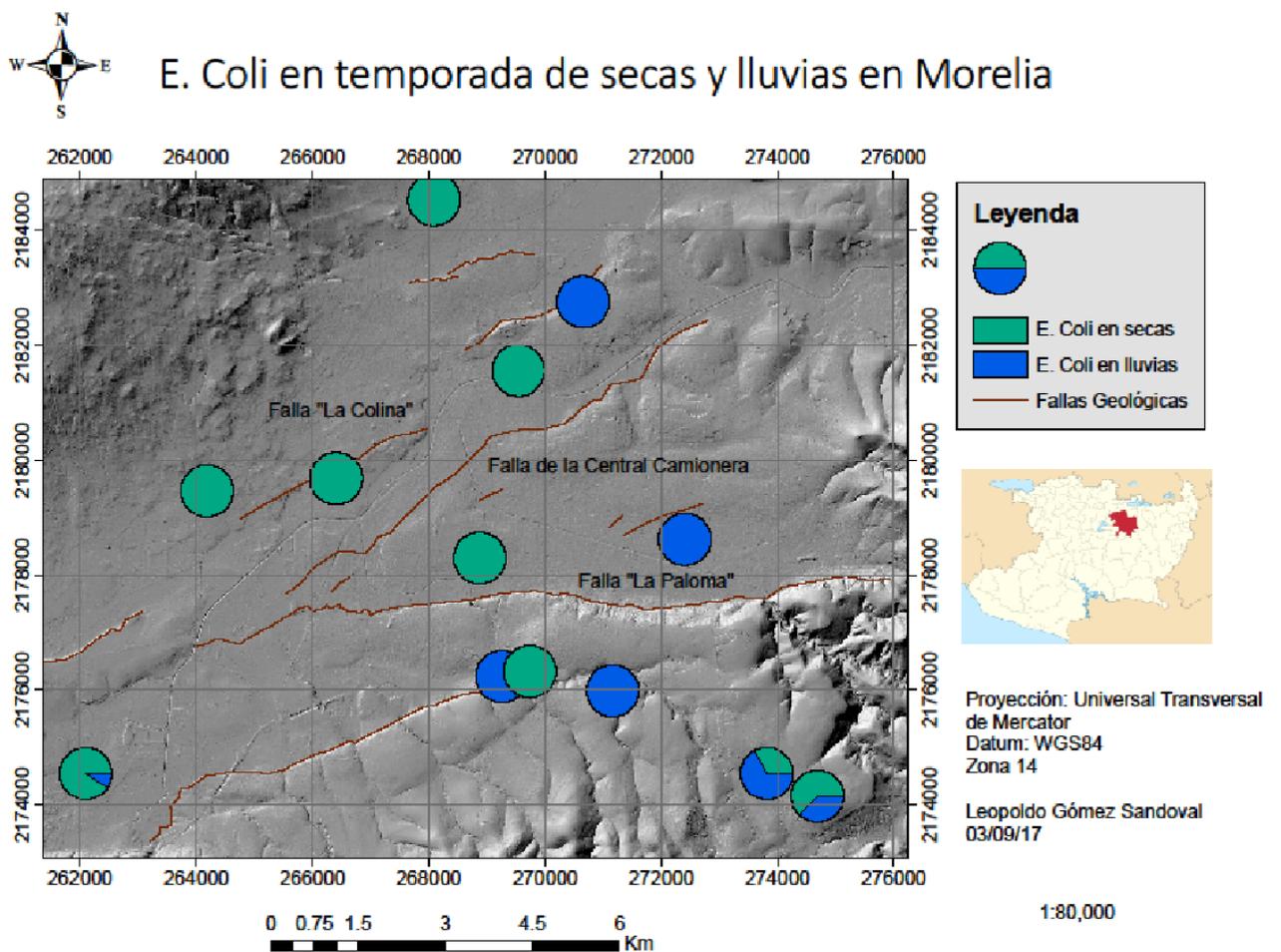


Figura 87. Mapa de distribución de *E. Coli* en el agua subterránea en la ciudad de Morelia, Michoacán en la temporada de lluvias y estiaje

VI.IX ISÓTOPOS ESTABLES

Wassenaar, Wilgenburg, Larson, y Hobson (2009) definieron la línea meteórica local (LML) para la república mexicana la cual es $\delta D = 7.5(\delta^{18}O) + 6.1\%$ ($n=228$, $r^2=0.96$) realizada a partir de datos de estaciones IAEA localizadas en Chihuahua, Veracruz y un lugar cerca de la ciudad de México a partir de datos de IAEA (2006), en comparación con la regresión lineal de mínimos cuadrados del agua subterránea superficial (5-20 m) de las estaciones muestreadas alrededor de la república, la cual arrojó la ecuación $\delta D = 7.9(\delta^{18}O) + 6.4\%$ ($n=234$, $r^2=0.95$). Como se puede observar en la *figura 88*.

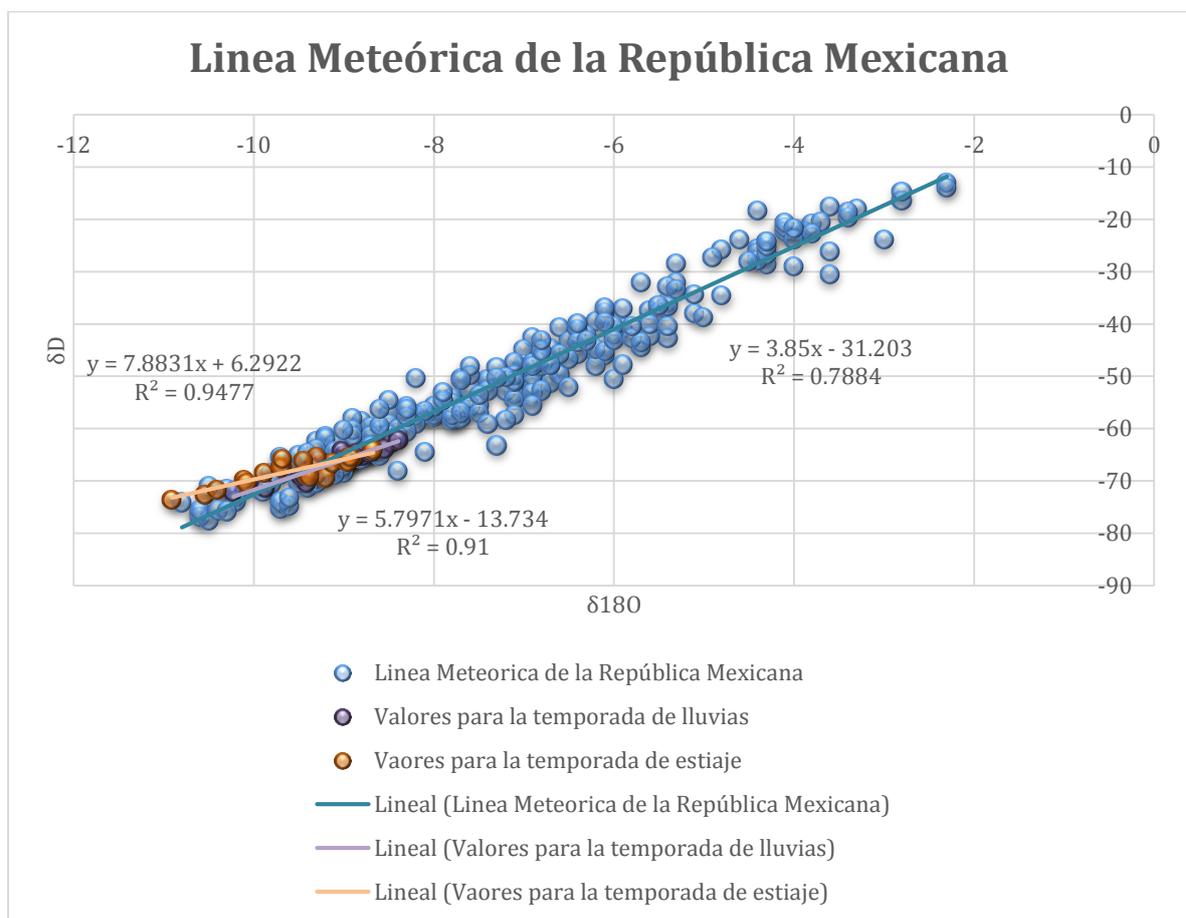


Figura 88. Línea meteórica de la República Mexicana contrastada con los valores de isótopos Estables obtenidos en el área de estudio

Los valores del agua subterránea muestreada en la ciudad de Morelia se localizan hacia la izquierda de la línea meteórica, en los valores más negativos.

Los valores más negativos de $\delta^{18}\text{O}$ están representados en los pozos DJM, PPM, LS1 y JMM, los cuales se encuentran ubicados en la parte alta de la microcuenca de Morelia, al sureste de la ciudad, en la unidad geológica *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*. En general, el valor de δD y $\delta^{18}\text{O}$ está disminuyendo gradualmente a medida que aumenta la recarga de la elevación de la montaña (Li *et al.*, 2018). A mayor elevación menores los valores de δD y $\delta^{18}\text{O}$.

Otro de los pozos en este grupo es el manantial de la Mintzita, el cual es el punto más cercano a la caldera de Atecuaro de los pozos muestreados.

Los valores menos negativos están representados por los pozos VDR4, PVG, CU, BOUL, 6J y RDV los cuales localizan la parte baja de la cuenca, en la secuencia *fluviolacustre del Mioceno-Plioceno*. Los demás pozos se encuentran en el intermedio de los valores más negativos y de los menos negativos.

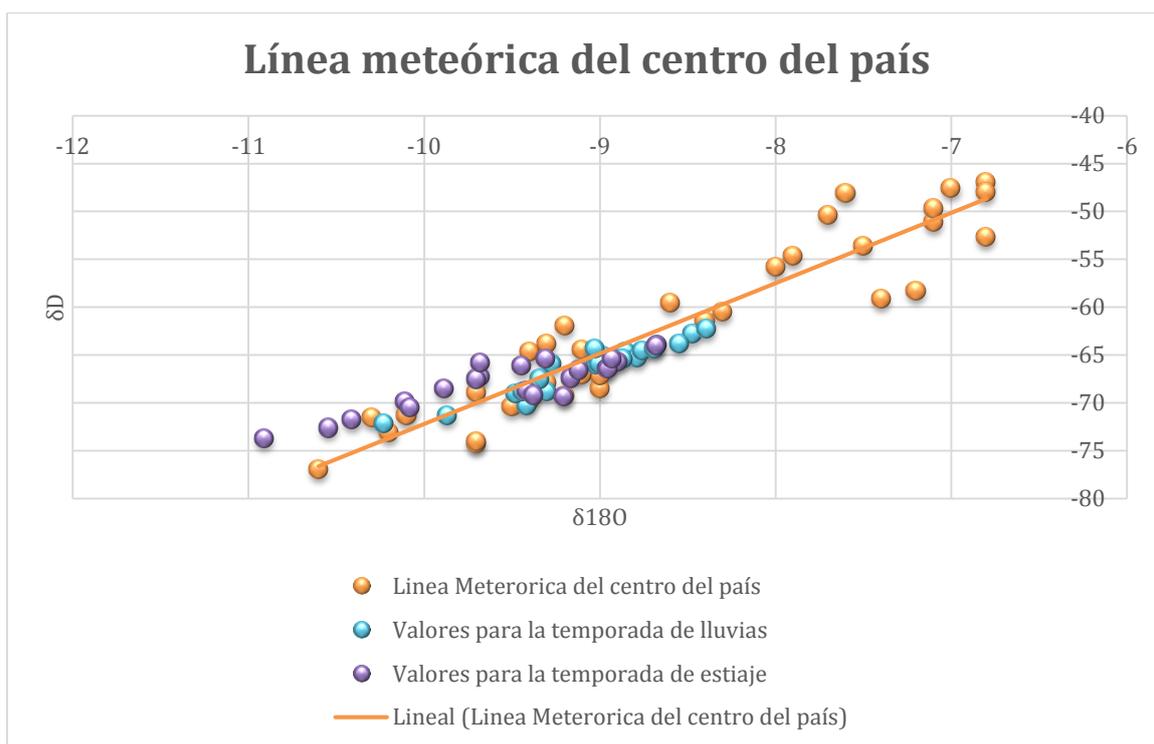


Figura 89. Línea meteórica para el centro del país contrastada con los valores de isótopos estables obtenidos en el área de estudio

Para la línea meteórica del centro del país, se observa en la *figura 89* que los pozos muestreados en la ciudad, están distribuidos de entre -75 a -60 δD y de -11 a -8 $\delta^{18}O$, encontrándose estos valores en la zona más negativa de la línea meteórica.

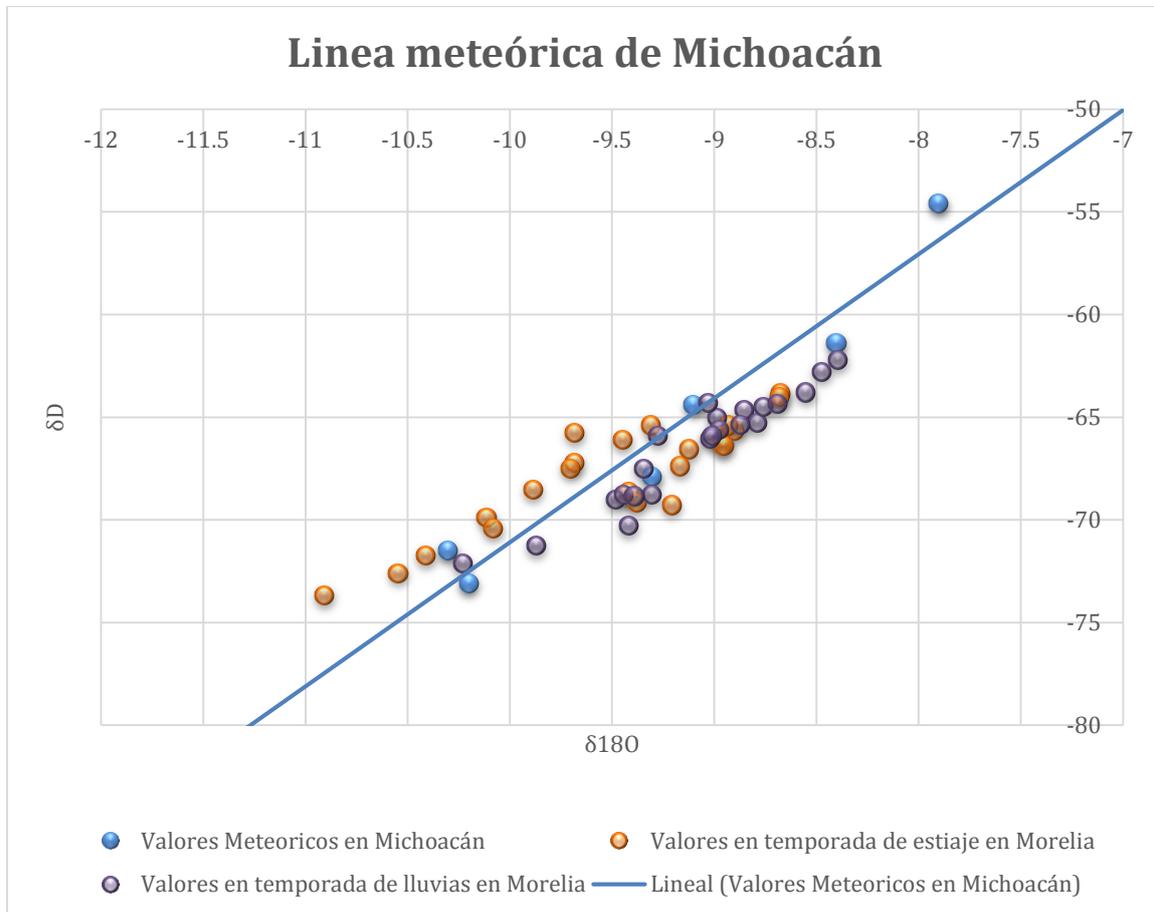


Figura 90. Línea meteórica para Michoacán contrastada con los valores de isótopos estables obtenidos en el área de estudio

Como se puede observar en la *figura 90*, los isótopos de oxígeno son en general más negativos en la temporada de estiaje que en la temporada de lluvias; sin embargo, estos se ajustan a la línea meteórica del para Michoacán. Las muestras cerca de la línea meteórica local, indican que el agua subterránea fue recargada mediante precipitación (Li *et al.*, 2018). Cuando un cuerpo de agua sufre evaporación, el exceso de deuterio decrece, y la salinidad incrementa (Li *et al.*, 2018).

VII CONCLUSIONES

De acuerdo con los valores de temperatura, pH, y conductividad, entre otros parámetros fisicoquímicos se concluye que una de las principales áreas de recarga del acuífero en la *secuencia fluvio-lacustre* se encuentra en la *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco*, puntualmente el *Cerro de Águila*. El agua *fría* que aporta el *Cerro del Águila* a la *secuencia fluvio-lacustre*, indica que se trata de un flujo local, lo anterior puede observarse en las interpolaciones de los parámetros fisicoquímicos realizadas.

De acuerdo con los valores de temperatura, podrían existir dos líneas de flujo de agua subterránea en la ciudad de Morelia, una de ellas con dirección SO-NE en estiaje y en la temporada de lluvias otra con dirección S-N hasta llegar a la *secuencia fluvio-lacustre* donde toma una dirección SO-NE, y posteriormente llega al lago de Cuitzeo como área de descarga.

Existen tres tipos de agua subterránea en la ciudad de Morelia, 1) *Bicarbonatada sódica y potásica*, la cual se encontró en la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco*, ubicada al norte de la ciudad 2) *Bicarbonatada cálcica y magnésica*, la cual se encontró en los pozos de los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* ubicados al sur de la ciudad y 3) *Clorurada sulfatada cálcica y magnésica*, la cual solo se encontró en un pozo, al sur en la *Cantera de Morelia*.

En esta investigación se corrobora que el acuífero libre de flujo local ubicado en la *secuencia fluvio-lacustre* recibe aportes de agua provenientes de *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)* y de la *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco*, lo anterior se corrobora observando que de la parte norte de la *secuencia fluvio lacustre* se observa el mismo tipo de agua que *secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del corredor Tarasco* y en la parte sur de esta *secuencia* se observa el mismo tipo de agua que en los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*, los cuales provienen de estas unidades hasta la *secuencia fluvio-lacustre* hasta llegar al centro de la misma, en donde se pueden encontrar ambas familias de agua.

En acuífero libre de flujo local ubicado en la *secuencia fluvio-lacustre*, se encuentra un área comprendida por los pozos Toreo (TOR), Cosmos II (COS2) y el pozo de la Ciudad

Universitaria (CU), dicha área presenta características distintas a los demás pozos de esta secuencia. Esta área tiene temperaturas altas y oxígeno disuelto bajo, en cuanto a la familia de agua, estos pozos pertenecen a la familia bicarbonatada cálcica y magnésica, la cual se encontró en los pozos ubicados al sur de la ciudad, dentro de los *flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno (cantera de Morelia)*, por lo que la mencionada área podría estar recibiendo aporte de agua caliente del Sur, en donde se encuentra el acuífero profundo de flujo intermedio.

El agua subterránea de la ciudad de Morelia no sobrepasa los límites máximos permisibles para el Be, Ti, V, Cr, Co, Cu, Mo, Mn, Cd, Sb, Pb, Sr y Zn, establecidos en la NOM-127-SSA1-1994; sin embargo, algunos pozos de agua si sobrepasaron los límites de Fe, As y Mn establecidos en la norma. Teniendo así que, de 23 pozos muestreados, el 17.3 % se encuentran contaminados con algún metal pesado, 8.6% de los pozos muestreados se encuentra contaminado con As (Arsénico), 8.6 % de los pozos muestreados se encuentra contaminado con Fe (Hierro) y 4.3 % de los pozos se encuentra contaminado por Mn (Manganeso).

En el caso de los análisis bacteriológicos, el 45.4 % del total de pozos muestreados, presentó la bacteria E. Coli en la temporada de estiaje, y 31.8 % de los pozos muestreados presentó E. Coli en la temporada de lluvias.

VIII BIBLIOGRAFÍA

- ArcGIS (15 de enero de 2019). *ArcGis for Desktop*. Funcionamiento de Interpolación Kernel con barreras, ArcMap 10.3.
- <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/extensions/geostatistical-analyst/how-kernel-interpolation-with-barriers-works.htm>
- ATSDR, A. (2006). *Toxicological Profile for Arsenic*. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Diseases Control, Atlanta, GA,.
- Ávila-Olivera, J. A., y Garduño-Monroy, V. H. (2007). Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia. *Ciencia Nicolaita*, 105-122
- Beijer, K., y Sources, J. A. (1986). Transport and transformation of metals in the environment. En L. Friberg, G. Nordberg, y V. Vouk, *Handbook on the Toxicology of metals. General Aspects*. (págs. 68-74). Amsterdam.
- Bueno-Brito, C., Sánchez-Ramos, A., y Adakatia Armenta-Solís, E. G.-V. (2005). Contenido de plomo y manganeso en despachadores de gasolina. *Bioquímica*, 41-46.
- Cardona, A., y Hernández, N. (1995). Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el Valle de México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 71-90.
- Cervantes-Medel, A., y Armienta, M. (2004). Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, Mexico. *Geofísica Internacional*, 477-493.
- Chebotarev, I. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochimica and Cosmochimica*, Vol. 8 pp. 22-48.
- Chabukdhara, M., Gupta, S. K., Kotecha, Y., y Nema, A. K. (2017). Groundwater quality in Ghaziabad district, Uttar Pradesh, India: Multivariate and health risk assessment. *Elsevier*, 167-178.
- CNA. (2010). *Statistics on Water in México (Estadísticas del agua en México)*. México: Comisión Nacional del Agua.

- CONAGUA. (2007). *Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el Estado de Michoacán*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Cuba, V. M., y Cossio, N. N. (2008). Intoxicación aguda por hierro en un lactante menor. *Revista de la Sociedad Boliviana de Pediatría*, v.47 n.2.
- Elangovan, N. S., Lavanya, V., y Arunthathi, S. (2018). Assessment of groundwater contamination in a suburban area of Chennai, Tamil Nadu, India. *Environ Dev Sustain*, 20:2609–2621.
- Esteller, M. V., Rodríguez, R., Cardona, A., y Padilla-Sánchez, L. (2012). Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: case studies from Mexico. *Environmental Monitoring Assessment*, 184:5725–5741.
- Estrada Murillo, M. A. (2015). *Análisis hidroquímico, modelación de flujo e interpretación del comportamiento del agua subterránea que abastece a la zona de Morelia, Michoacán, México*. Morelia: Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Garduño-Monroy, V. H., Giordano, N., Olivera, J. A., Madrigal, V. M., Nateras, A. S., y Calderón, J. E. (2014). Estudio Hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán para una correcta planificación del territorio. *Urbanización, vulnerabilidad y riesgo*, 193-218.
- Gibbs, R. J. (2012). Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *American Association for the Advancement of Science Stable*, 1088-1090.
- González, A. C., Cortés, J. C., y Gómez, J. M. (2005). Descripción física y biótica. Suelo. En L. V. Gómez, *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de estado* (págs. 29-32). Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad; Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- González, H. L., y Del Arenal, R. (2007). La distribución del agua subterránea en México. *Ciencia*.
- González-Abraham, A., Fagundo-Castillo, J. R., Carrillo-Rivera, J. J., y Rodríguez-Estrella, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en

- rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol.64 no.3 .
- Gribov, A., y Krivoruchko, K. (2011). Local polynomials for data detrending and interpolation in the presence of barriers. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*.
- Guler, C., y Thyne, G. D. (2018). Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Elsevier*, 202-2014.
- Gwaltney-Brant, S. (2002). Heavy Metals. En W. Haschek, C. Rosseaux, y A. Wallig, *Handbook of Toxicologic Pathology* (págs. 701-32). New York: Academic Press.
- HEM. (1989). *Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Waters*. US Geological Survey Water Supply Paper.
- Hernández, J., y Vieyra, A. (2010). Riesgos por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana. ¿El desastre nace o se hace? *Revista de Geografía Norte Grande*, 45-62.
- Harutunián, E. A. (2005). Descripción física y biótica (clima). En L. E. (editora), *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*. . México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- IAEA. (2006). *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina* . Vienna Austria: OIEA.
- INEGI. (2009). *Pontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Morelia, Michoacán de Ocampo*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de <http://gaia.inegi.org.mx/scince2/viewer.html>
- INEGI. (2011). *Perspectiva estadística. Michoacán de Ocampo*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- INEGI. (2015). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/territorio/div_municipal.aspx?tema=me
- Israde-Alcántara, I. (1995). *Bacini lacustri del settore centrale dell'Arco Vulcanico Mexicano; stratigrafia et evoluzione sedimentaria basata sulle diatomee*. Milano, Italia: Università degli studi de Milano, tesis de doctorado.
- Israde-Alcántara, Garduño-Monroy, V., Fisher, C., Pollard, H., y Rodríguez-Pazcua, M. (2005). Lake level change, climate, and the impact of natural events: the role of seismic and volcanic events in the formation of the Lake Patzcuaro Basin, Michoacán, Mexico. *Quaternary International*, 35-46.
- Israde-Alcántara, I. (2005). Descripción física y biótica. Los cuerpos de agua. En L. V. Gómez, *La biodiversidad en Michoacán estudio de estado* (págs. 32-38). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad; Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Israde-Alcántara, I., Velázquez-Durán, R., García, M. S., Bischoff, J., Vázquez, G. D., y Monroy, V. H. (2010). Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 345-357.
- Jordao, C. P. (2007). *Environmental assessment of watercourses of the Turvo Limpo River basin at the Minas Gerais State, Brazil*. 127, 315–326: Monitoring and Assessment.
- Kresic, N. (2007). *Hydrogeology and groundwater modeling*. New York: CRC Press.
- Kumar, M., Kumari, K., Ramanathan, A., y Saxena, R. (2007). A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India. *Environ Geol*, 53:553–574.
- Lapworth, D., Krishan, G., MacDonald, A., y Rao, M. (2017). Groundwater quality in the alluvial aquifer system of northwest India New evidence of the extent of anthropogenic and geogenic contamination. *Elsevier*, 1433–1444.

- Li, Z., Wang, G., Wang, X., Wan, L., Shi, Z., Wanke, H., Uahengo, C.-I. (2018). Groundwater quality and associated hydrogeochemical processes in Northwest Namibia. *Elsevier*, 202-214.
- Lugo, I. (2008). Distribución del sistema metropolitano de México y Ley de Potencia 1990-2005. *Universidad de las Americas*, Igor Lugo.
- Marinov, A. M., Marinov, I., y Diminescu, M. A. (2017). Groundwater quality in the proximity of a polluted lake: A joint experimental-modeling study. *Environmental Engineering and Management Journal*, 1081-1091.
- Meliker, J. R., Slotnick, M. J., Avruskin, G. A., Haack, S. K., y Nriagu, J. O. (2009). Influence of groundwater recharge and well characteristics on dissolved arsenic concentrations in southeastern Michigan groundwater. *Environ Geochem Health*, 31:147–157.
- Mochales, I. S. (2013). Modelos estadísticos para valores extremos y aplicaciones. *Universidad Autónoma de Barcelona*.
- Nagarajan, R., Rajmohan, N., Mahendran, U., y Senthamilkumar, S. (2010). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Thanjavur city, Tamil Nadu, India. *Environment Monitoring Assessment*, 171:289–308.
- Nava-Ruíz, C., y Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *INNN*, Vol. 16, No. 3: 140-147.
- NMX-AA-072-SCFI-2001 Análisis de agua – Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".
- Norvatov, A. M., y Popov, O. V. (1961). Laws of the formation of minimum stream flow. *Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, Vol 6. no.1 pp. 20-27.
- Ortiz, A. C., y García, J. L. (1993). *Los suelos de México. Proyecto de actualización del mapa mundial de suelos*. FAO-Colegio de posgraduados.

- Plotnikov, N. A., y Bogomolov, G. (1958). Classification of underground waters resources and their reflection on maps. *Intern. Assos. Sci. Hydrol., General Assembly of Toronto*, Vol.2 Num 44. 525pp.
- WWDR (2016). The United Nations World Water Development Report. (pág. 148). Paris: Water and Jobs.
- Rocha, E. A., Gómez, N. P., Negrete, C. C., y Ibarra, J. A. (2012). Estudio de las inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 103-110.
- Salcedo-Sánchez, E. R., Hoyos, S. E., Alberich, M. V., y Morales, M. M. (2016). Application of water quality index to evaluate groundwater quality (temporal and spatial variation) of an intensively exploited aquifer (Puebla valley, Mexico). *Environ Monit Assess* (, 188: 573.
- Sánchez, M. Á., Ortega, R. R., y Blázquez, R. P. (2009). Intoxicación por Sales de Hierro como gesto autolítico. *Revista Clínica de Medicina de Familia*, vol.2 no.7.
- Sánchez, E. R., Hoyos, S. E., Esteller, M. V., Esteller, M. V., y Astudillo, A. O. (2017). Hydrogeochemistry and water-rock interactions in the urban area of Puebla Valley aquifer (Mexico). *Elsevier*, 219-235.
- Schoendube, B. B. (2005). Agua, tecnología y sociedad en la cuenca Lerma-Chapala. Una historia regional global. *Scielo*, vol.19 no.64.
- Singhal, B., y Gupta, R. (2010). Applied hidrogeology of fractured rocks. *Springer Netherlands*.
- Tamayo, J. L. (1946). *Datos para la hidrología de la República mexicana*. México: Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Tóth, J. (1962). A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 4375-4388.
- Toth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical research*, 4795-4812 Vol. 68 No. 16.
- Tóth, J. (2000). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 1-14.

- Wassenaar, L. I., Wilgenburg, S. L., Larson, K. W., y Hobson, K. A. (2009). A groundwater isoscape ($\delta D, \delta^{18}O$) for Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*.
- WHO. (2003). *Barium in drinking-water background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2003a). *Iron in drinking-water background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. Geneva: World Health Organization.
- World Health Organization (2011b). *Manganese in Drinking Water. Background Document for WHO Guidelines for Drinking Water Quality*. .
- World Health Organization (2011a). *Guidelines for Drinking Water Quality, 4th edition*. Geneva, Switzerland.

IX Anexos

En esta sección se encuentran las concentraciones obtenidas de las mediciones referentes a pH, oxígeno disuelto, temperatura, conductividad, salinidad, sólidos disueltos, alcalinidad dureza, elementos mayores, elementos menores, isotopos estables y bacterias, para la temporada de lluvias y de secas del agua subterránea de la ciudad de Morelia Michoacán

Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea medidos en la temporada de estiaje

Acronimo	X	Y	pH	O₂ (mg/l)	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	Salinidad (%)	Solidos disueltos (mg/l)
RDV	267123	2177373	7.01	6.065	25.6	472	0.236	236
ME2	269022	2181439	7.19	6.1	27.6	1077	0.5385	538.5
ATN	268613	2183580	6.62	7.325	23.8	533	0.2665	266.5
VDR4	268089	2184522	8.175	5.425	31	292	0.146	146
CU	268877	2178292	6.88	2.445	24.8	573	0.2865	286.5
COS2	267232	2178175	6.77	3.38	23.7	502	0.251	251
PVG	269538	2181555	7.265	5.27	23.1	744.5	0.37225	372.25
SJI	264182	2179460	7.09	4.63	27.9	848	0.424	424
MA	263483	2178543	7.47	2.34	22.8	447.5	0.21	216
6J	272407	2178618	7.13	6.07	24.5	612.5	0.3	294
BOUL	273429	2178363	7.9	6.61	26.4	553	0.265	268
LS1	270655	2182749	7.69	4.47	29.55	1250	0.625	620
ALM	266406	2179675	7.16	5.875	25.75	591.5	0.285	287.5
MM	262094	2174547	7.34	6.23	22.55	178.25	0.08	84.6
FM	268931	2176653	7.425	5.3	25.2	275.5	0.13	131.7
AAC	269256	2176232	7.335	4.78	24.9	368.5	0.175	181.95
SC	269740	2176324	7.545	6.255	24.8	274	1.63	131.05
PB	269876	2175752	7.98	6.26	29.9	628	0.305	307
LS	271166	2175987	8.22	6.365	26.35	284.5	0.13	136.05
JMM	273819	2174545	6.29	5.565	21.15	203.6	0.1	96.85
DJM	274690	2174152	6.365	5.405	21.7	118.9	0.055	55.95
PPM	274793	2173414	7.65	5.82	27.565	257	0.12	122.5

Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea medidos en la temporada de lluvias								
Acrónimo	X	Y	pH	O₂ (mg/l)	Conductividad (μS/cm)	Temperatura (°C)	Salinidad (%)	Sólidos disueltos (mg/l)
RDV	267123	2177373	7.225	6.035	234.5	25.1	0.11	111.7
ME2	269022	2181439	7.055	4.635	1070.5	26.8	0.53	528.5
ATN	268613	2183580	7.57	8.1	548	22.1	0.26	266
VDR4	268089	2184522	8.035	5.395	300	29.1	0.14	143.6
CU	268877	2178292	6.73	3.335	578	24.2	0.28	280
COS2	267232	2178175	6.635	3.325	508	27.2	0.24	245.5
PVG	269538	2181555	7.035	4.98	756	23.8	0.37	369
SJI	264182	2179460	6.98	3.725	834	24.7	0.41	408.5
MA	263483	2178543	7.345	2.825	442	22.35	0.21	213.25
6J	272407	2178618	7.16	7.865	606.5	23.8	0.29	295
BOUL	273429	2178363	7.63	6.595	574.5	25.7	0.28	279.5
LS1	270655	2182749	7.58	4.63	1243	28.2	0.615	616.5
ALM	266406	2179675	7.105	5.72	612	23.55	0.295	297
MM	262094	2174547	7.555	6.36	186	22.7	0.09	88.35
FM	268931	2176653	7.485	5.78	267	20.5	0.13	127.55
AAC	269256	2176232	7.325	5.07	260.5	25.95	0.12	124.4
SC	269740	2176324	7.46	6.475	269.5	26.55	0.13	128.95
PB	269876	2175752	7.835	6.315	621.5	27.6	0.3	302
LS	271166	2175987	7.9	7.275	288	24.9	0.14	137.8
JMM	273819	2174545	6.405	5.805	197	20.6	0.09	94.04
DJM	274690	2174152	6.635	6.275	117.95	18.45	0.05	55.5
TOR	267729	2178837	6.62	2.7	723	29.7	0.35	353

Alcalinidad y dureza del agua subterránea en la temporada de estiaje y en la de lluvias					
		Estiaje		Lluvias	
Pozo	Acrónimo	Alcalinidad (mg/L)	Dureza (mg CaCO₃/l)	Alcalinidad mg/L	Dureza(mg CaCO₃/l)
Rinconada del valle	RDV	432.78	3.3	91.3	3.3
Mariano Escobedo II	ME2	150.52	8.9	433	6.6
Ampliación Torreon Nuevo	ATN	254.24	4.1	253.86	8.9
Villas del Real IV	VDR4	233.68	1.9	150.9	1.95
CU	CU	260	6.8	263.16	7
Cosmos II	COS2	262.66	6.6	267.34	6.35
Prados Verdes Galeana	PVG	320.56	5.3	324.66	5.4
San Juanito Itzicuaró	SJI	350.62	5.6	342.59	5.5
Mariano Abasolo	MA	210.02	6.9	214.3	7.2
6 de Julio	6J	287.1	7.4	281.32	7.5
Boulevard	BOUL	285.54	3.65	280.04	3.7
La soledad 1	LS1	510.4	4.55	516.46	4.7
Adolfo López Mateos	ALM	255.7	5.5	265.98	5.5
Manantial la Mintzita	MM	80.5	6.3	80.44	6.4
Fuentes de Morelia	FM	144.68	4.1	145.14	4.1
Arroyo de agua clara	AAC	138.24	4	138.48	4.1
Santa Cecilia	SC	143.14	4.3	144.66	4.5
Peña Blanca	PB	318.08	2.5	310.72	2.7
Los Sauces	LS	151.36	4.5	150.26	4.8
San Miguel	JMM	45.24	2.95	43.56	2.9
Depositos San Miguel	DJM	63.04	2.4	61.7	2.4
Pozo San Miguel	PPM	142.64	5.35		
Toreo	TOR			346.18	5.265

Metales pesados en el agua subterránea en la temporada de estiaje (ppm)

POZO	Be	Ti	V	Cr	Mn	Co	Cu	Mo	Cd	Sb	Pb	As
RDV	N.D	N.D	0.0076	N.D	N.D	N.D	0.0001	0.0032	0.0001	N.D	N.D	0.0541
ME2	N.D	N.D	0.0092	N.D	0.0008	N.D	0.0004	0.0069	0.0000	N.D	N.D	0.0510
ATN	N.D	N.D	0.0146	N.D	0.0025	N.D	0.0000	0.0007	0.0001	N.D	N.D	0.0257
VDR4	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0002	N.D	N.D	0.0082
CU	N.D	N.D	0.0058	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0012	0.0001	N.D	N.D	0.0189
COS2	N.D	N.D	0.0049	0.0009	0.0347	N.D	N.D	0.0016	0.0002	N.D	N.D	0.0280
PVG	N.D	N.D	0.0132	N.D	0.0610	N.D	N.D	0.0031	0.0001	N.D	N.D	0.0171
SJI	N.D	N.D	0.0152	0.0005	0.0144	0.0002	0.0014	0.0050	0.0001	N.D	N.D	0.0199
MA	N.D	N.D	0.0198	N.D	0.0016	N.D	N.D	0.0016	0.0002	N.D	N.D	0.0146
6J	N.D	N.D	0.0053	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0038	0.0003	N.D	N.D	0.0056
BOUL	N.D	N.D	0.0017	N.D	0.0013	N.D	N.D	0.0050	0.0001	N.D	N.D	0.0045
LS1	N.D	N.D	0.0008	N.D	0.0037	N.D	N.D	0.0042	0.0002	N.D	N.D	0.0062
ALM	N.D	N.D	0.0058	N.D	0.7731	N.D	0.0003	0.0002	0.0008	N.D	0.0039	0.0036
MM	N.D	N.D	0.0151	N.D	0.0017	N.D	N.D	0.0000	0.0003	N.D	N.D	0.0037
FM	N.D	N.D	0.0061	N.D	N.D	N.D	0.0028	0.0007	0.0003	N.D	N.D	N.D
AAC	N.D	N.D	0.0041	N.D	0.0000	N.D	N.D	0.0006	0.0004	N.D	N.D	N.D
SC	N.D	N.D	0.0051	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0004	0.0001	N.D	N.D	N.D
PB	N.D	N.D	0.0003	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0075	0.0001	N.D	N.D	0.0073
LS	N.D	N.D	0.0075	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0009	0.0002	N.D	N.D	N.D
JMM	N.D	N.D	0.0014	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0000	N.D	N.D	N.D
DJM	N.D	N.D	0.0038	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0001	N.D	N.D	N.D
PPM	N.D	N.D	0.0088	N.D	0.0308	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0008	0.0119

Metales pesados en el agua subterránea en la temporada de lluvias (ppm)

POZO	Be	Ti	V	Cr	Mn	Co	Cu	Mo	Cd	Sb	Pb	As
ATN	N.D	N.D	0.0135	0.0001	0.0061	N.D	N.D	0.0000	N.D	N.D	0.0003	0.0102
VDR4	N.D	N.D	0.0296	0.0014	0.0002	0.0001	N.D	0.0006	N.D	N.D	0.0003	0.0239
LS1	0.0005	N.D	0.0014	0.0004	0.0031	0.0001	N.D	0.0011	N.D	N.D	0.0009	N.D
PVG	N.D	N.D	0.0094	0.0006	0.0438	0.0002	N.D	0.0028	N.D	N.D	0.0005	0.0055
ME2	N.D	N.D	0.0065	0.0006	0.0079	0.0007	N.D	0.0053	N.D	N.D	0.0002	0.0096
TOR	N.D	N.D	0.0069	0.0002	0.0121	N.D	N.D	0.0062	N.D	N.D	0.0006	0.0337
COS2	N.D	N.D	0.0043	0.0006	0.0363	0.0002	0.0074	0.0010	N.D	N.D	0.0013	N.D
MM	N.D	0.0071	0.0166	0.0014	0.0001	0.0000	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0001	N.D
ALM	N.D	N.D	0.0070	0.0003	0.0259	0.0000	N.D	0.0045	N.D	N.D	0.0002	0.0095
SJ12	N.D	N.D	0.0139	0.0008	0.0083	0.0000	N.D	0.0033	N.D	N.D	0.0009	N.D
MA2	N.D	N.D	0.0199	0.0006	0.0042	0.0000	0.0000	0.0000	N.D	N.D	0.0005	N.D
RDV2	N.D	N.D	0.0095	0.0020	0.0054	0.0001	N.D	0.0004	N.D	N.D	0.0010	N.D
CU2	N.D	N.D	0.0042	0.0012	0.0002	0.0001	N.D	0.0018	N.D	N.D	0.0010	N.D
FM2	N.D	0.0184	0.0066	0.0013	0.0010	0.0001	N.D	0.0001	N.D	N.D	0.0008	N.D
AAC2	N.D	N.D	0.0040	0.0004	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0004	N.D
SC2	N.D	N.D	0.0061	0.0012	N.D	0.0000	N.D	N.D	N.D	N.D	0.0004	N.D
6J2	N.D	N.D	0.0056	0.0008	N.D	0.0001	N.D	0.0006	N.D	N.D	0.0012	N.D
BOUL2	N.D	N.D	0.0017	0.0004	0.0014	N.D	0.0000	0.0007	N.D	N.D	0.0010	N.D
PB2	N.D	N.D	0.0006	0.0001	N.D	0.0000	0.0001	0.0060	N.D	N.D	0.0005	N.D
LS2	0.0005	N.D	0.0076	0.0005	0.0021	0.0000	0.0000	0.0006	0.0002	N.D	0.0009	N.D
JMM2	N.D	N.D	0.0020	0.0004	N.D	0.0002	N.D	0.0006	N.D	N.D	0.0009	N.D
DJM2	N.D	N.D	0.0051	0.0019	N.D	0.0001	N.D	0.0000	N.D	N.D	0.0008	N.D

Isótopos estables en al agua subterránea para la temporada de estiaje y de lluvias

Identificación	Temporada de estiaje				Temporada de lluvias			
	$\delta_{18}\text{OVSMOW2}$	Desviación	δ_{DVSMOW2}	Desviación	$\delta_{18}\text{OVSMOW2}$	Desviación	δ_{DVSMOW2}	Desviación
RDV-1	-8,96	0,181	-66,41	1,024	-9,87	0,020	-71,26	0,064
ME2-1	-9,17	0,208	-67,38	1,185	-8,97	0,180	-65,61	1,001
ATN-1	-9,21	0,240	-69,29	1,084	-9,42	0,187	-70,28	1,155
VDR4-1	-8,67	0,353	-63,84	1,783	-8,98	0,042	-65,04	0,318
CU-1	-8,90	0,471	-65,67	2,223	-8,76	0,139	-64,48	0,751
COS2-1	-9,12	0,233	-66,57	1,221	-8,47	0,238	-62,78	1,263
PVG-1	-8,68	0,229	-64,00	0,966	-8,85	0,104	-64,67	0,715
SJI-1	-9,42	0,102	-68,65	0,536	-9,34	0,126	-67,50	0,670
MA-1	-9,38	0,010	-69,16	0,180	-9,44	0,024	-68,79	0,091
6J-1	-8,95	0,028	-66,41	0,160	-9,01	0,176	-65,91	1,122
BOUL-1	-8,93	0,200	-65,40	1,012	-8,39	0,140	-62,21	0,709
LS1-1	-10,11	0,014	-69,87	0,190	-9,48	0,065	-69,01	0,390
ALM-1	-9,88	0,030	-68,53	0,110	-8,79	0,036	-65,27	0,173
MM-1	-10,54	0,018	-72,60	0,102	-9,30	0,251	-68,76	1,175
FM-1	-9,68	0,021	-67,22	0,206	-8,55	0,050	-63,79	0,292
AAC-1	-9,70	0,072	-67,50	0,360	-9,02	0,024	-66,03	0,176
SC-1	-9,31	0,296	-65,39	1,649	-8,87	0,166	-65,36	0,959
PB-1	-9,68	0,079	-65,77	0,377	-9,03	0,191	-64,33	1,199
LS-1	-9,44	0,009	-66,11	0,120	-8,69	0,237	-64,35	1,204
JMM-1	-10,08	0,035	-70,42	0,151	-9,39	0,204	-68,85	1,096
DJM-1	-10,91	0,013	-73,66	0,141	-10,23	0,194	-72,11	0,983
PPM-1	-10,41	0,048	-71,75	0,160				
TOR-2					-9,27	0,083	-65,89	0,592

Elementos mayores y menores del agua subterránea (ppm)										
Acrónimo	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	F	Cl	SO4	PO4	NO3
RDV	19.5430033	7.13966054	57.8955098	5.47918929	527.9916	0.157	10.443242	7.824483	1.39969	3.457138
ME2	38.1474717	10.1306721	186.536511	19.0885968	183.6344	0	77.503242	22.483483	0	0
ATN	30.4921976	19.5213912	40.0026362	8.80356995	310.1728	0	9.977242	20.929483	2.35969	11.666138
VDR4	1.41436985	0.91513876	5.29447	0.23509029	285.0896	0.201	1.857242	3.798483	0.52869	4.629138
CU	28.7978432	15.545705	58.0176021	8.479366	317.2	0.237	14.753242	11.218483	1.42669	25.196138
COS2	27.0420013	13.464087	52.4128819	8.36074001	320.4452	0.233	7.063242	7.470483	1.43969	0.523138
PVG	27.9892034	9.77450737	117.473077	11.0090796	391.0832	0.303	60.835242	26.686483	2.39769	3.456138
SJI	31.8238062	8.19334841	133.742938	11.3022417	427.7564	0.291	93.599242	13.236483	1.67569	1.224138
MA	25.167338	15.4474926	29.1642529	13.6802631	256.2244	0.17	6.698242	11.378483	1.36869	0.852138
6J	27.9598009	18.1332358	67.7418338	6.92216742	350.262	0.195	9.955242	25.297483	2.38469	14.011138
BOUL	11.8641454	9.92427496	85.0032113	6.44040482	348.3588	0.296	5.667242	12.095483	1.13569	0.447138
LS1	15.7719077	6.53451424	172.24534	8.05355265	622.688	0.312	95.344242	31.805483	11.67369	12.197138
ALM	28.9232932	9.41833758	77.7596384	10.7074694	311.954	0.312	28.095242	12.001483	0	13.922138
MM	11.0827915	7.11371938	10.3993375	2.78702802	98.21	0.229	1.887242	5.444483	0.69069	7.701138
FM	17.6184069	8.22113566	21.9665578	2.53091708	176.5096	0.08	0.755242	1.945483	1.70669	0.917138
AAC	16.5838801	8.06307076	19.8722074	2.3249574	168.6528	0.081	0.853242	1.836483	2.13169	0.779138
SC	17.5789684	9.19744011	20.4397175	2.61562492	174.6308	0.08	0.765242	2.038483	2.08269	0.964138
PB	9.32861164	7.04204336	109.644309	5.26387333	388.0576	0.661	7.026242	11.486483	1.04269	0
LS	19.0187847	10.2392189	18.6222258	1.7104941	184.6592	0.25	0.922242	2.736483	0.82369	0.075138
JMM	16.2082654	4.2673099	12.0649338	4.74364451	55.1928	0.106	8.159242	10.187483	0	33.530138
DJM	11.498789	4.38087928	6.97608116	1.20305397	76.9088	0.055	0.223242	0.089483	0.70369	2.041138
PPM	20.2131996	10.5850511	10.5765964	3.11919758	174.0208	0.077	0.499242	0.988483	2.34669	0.611138

Bacterias en el agua subterránea (UFC)								
ID	Temporada de estiaje				Temporada de lluvias			
	B. Mezofilicas (UFC/MI)	Coliformes totales (UFC/MI)	E. Coli (UFC/MI)	Cloro residual (ppm)	Bacterias Mezofilicas (UFC/MI)	Coliformes Totales (UFC/MI)	E. Coli (UFC/MI)	Cloro residual (ppm)
RDV	8	0	0	0	0	0	0	0
ME2	0	0	0	0	0	0	0	0
ATN	20	0	0	0	100	0	0	0
VR4	200	20	3	0	0	0	0	0
CU	300	10	5	0	250	0	0	0
COS2	15	0	0	0	30	0	0	0
PVG	150	50	20	0	30	0	0	0
SJI	50	6	2	0	0	0	0	0
MA	0	0	0	0	0	0	0	0
6J	0	0	0	0	10	14	4	0
BOUL	0	0	0	0	6	0	0	0
LS1	0	0	0	0	120	40	20	0
ALM	1000	400	30	0	40	0	0	0
MM	2000	400	20	0	50	2	2	0
FM	4	0	0	0	10	0	0	0
AAC	10	0	0	0	50	10	2	0
SC	60	2	2	0	50	0	0	0
PB	15	0	0	0	45	0	0	0
LS	0	0	0	0	25	4	2	0
JMM	50	10	1	0	12	4	2	0
DJM	50	10	5	0	38	4	3	0
PPM	30	6	3	0				
TOR					10	0	0	0

