



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES DE
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE
MORELIA MEDIANTE ANÁLISIS ISOTÓPICOS”**

TESIS

Para obtener el título de:

INGENIERO CÍVIL

PRESENTA

JULISSA JIMÉNEZ MORALES

Director de tesis:

SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puentes

Co-director de tesis:

MARIO ALBERTO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

Doctor en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente



Morelia, Michoacán a agosto del 2021



DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto en primer lugar a Dios por haberme dado el placer de la vida. El haber permitido cumplir mis objetivos, darme la fuerza y salud, gracias por su amor infinito.

A mi mamá Florinda Morales Pérez quien ha sido mi motor, quien cuidó de mí en todo momento, por su esfuerzo, sacrificio, su apoyo y sobre todo la lección de amor que me ofrece día con día.

A mi familia que nunca dudó en demostrarme su apoyo incondicional.

A mis amigos que en esta difícil etapa de la vida lejos de casa se convirtieron en una nueva familia.

No dejes que nadie defina tus límites, el único límite es tu alma.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por abrirme las puertas a su Máxima casa de Estudios.

A la Facultad de Ingeniería Civil por recibirme y prepararme y sobre todo por forjar mi carácter, habilidades, conocimiento y capacidades.

Al departamento de Hidráulica por brindarme su confianza y el apoyo recibido al hacer el servicio social.

Dr. Mario Alberto Hernández H., por su aporte de conocimientos, por orientarme, apoyarme, por sus sugerencias, recomendaciones y correcciones para mejorar cada día y sobre todo por su paciencia durante el desarrollo de este proyecto.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por los conocimientos y el apoyo recibido durante mi preparación durante la carrera, por impulsarme día con día a tener una mejor preparación y ser un ejemplo de superación para la mujer en esta carrera de la Ingeniería Civil.

A mi comité de tesis, Dr. Constantino Sánchez, Benjamín Lara Ledesma por su disposición y apoyo.



CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABLAS	9
INDICE DE ABREVIATURAS	10
RESUMEN	12
ABSTRACT	14
1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes	17
1.1.1 Estudios previos en hidrología	18
1.1.2 Estudios previos en geología	26
1.1.3 Estudios previos en isotopía.....	30
1.2 Zona de estudio	33
1.2.1 Localización	33
1.2.2 Clima.....	35
1.2.3 Breve análisis de la precipitación	36
1.3 Justificación y Objetivos	44
1.3.1 Justificación	44
1.3.2 Objetivos	45
2 MARCO TEÓRICO	46
2.1 Evolución del flujo en el agua subterránea.....	46
2.1.1 Importancia del agua subterránea	46
2.1.2 Medición del agua de lluvia.....	47
2.1.3 Firma química isotópica.	50
2.1.4 Agua de reciente infiltración y sus propiedades	51
2.1.5 Agua subterránea profunda y el cambio de sus propiedades.....	52
2.2 Diagrama de Piper	54
2.3 Isótopos estables de la molécula del agua	55
2.3.1 ¿Qué son los isótopos?.....	55
2.3.2 Distintos tipos de isótopos (estables e inestables)	56
2.3.3 Distintos tipos de isótopos en la molécula del agua	58
2.3.4 Isótopos inestables de la molécula de agua.....	60



2.4	Isótopos estables aplicados a la hidrogeología	61
2.5	Gráfico $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$	62
2.6	Técnicas de muestreo y análisis de agua para análisis isotópicos	64
2.6.1	Muestreo de agua de lluvia y otras fuentes.....	64
2.6.2	Preservación de las muestras.....	66
2.6.3	Técnicas de análisis en laboratorio	66
3	METODOLOGÍA	68
3.1	Herramientas utilizadas en el desarrollo del trabajo de Tesis.....	74
3.1.1	Software ARCGIS	74
3.1.2	Información de INEGI	74
3.1.3	Generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE).....	75
3.1.4	Información meteorológica recopilada en la base de datos CLICOM.....	75
3.1.5	Software Google Earth	76
3.1.6	Base de datos Wáter isotopes.....	77
3.1.7	Información de CONABIO.....	77
3.2	Procedimiento de colecta de agua de lluvia para su análisis isotópico	78
3.3	Procedimiento de colecta de agua de las fuentes de abastecimiento de Morelia	80
3.4	Extracción de datos isotópicos de bases de datos internacionales	83
3.5	Significado de parámetros fisicoquímicos que se miden en campo.	85
3.5.1	Temperatura (T)	85
3.5.2	pH	85
3.5.3	Alcalinidad	85
3.5.4	Oxígeno disuelto (O.D.)	86
3.5.5	Sólidos Disueltos Totales (S.D.T.)	87
3.5.6	Conductividad Eléctrica (C.E.)	87
3.5.7	Potencial Redox (O.R.).....	88
3.6	Descripción de los tipos de correlación de variables Fisicoquímicas	89
3.6.1	Gráficos bivariados.....	89
4	RESULTADOS	91
4.1	Información generada a partir de datos recopilados	91
4.2	Trabajo de campo y sitios de muestreo.....	94
4.2.1	Campaña de muestreo de febrero de 2021 (periodo de estiaje).....	95



4.3	Resultados del tratamiento de datos recolectados en campo	97
4.3.1	Resultados del tratamiento de datos isotópicos.....	97
4.3.2	Resultados del tratamiento de parámetros fisicoquímicos	99
5	DISCUSIÓN.....	114
5.1	Sobre los resultados isotópicos	114
5.2	Sobre los resultados de los parámetros fisicoquímicos	116
5.3	Sobre el reconocimiento de las fuentes de abastecimiento	118
6	CONCLUSIONES.....	121
6.1	Sobre los resultados isotópicos	121
6.2	Sobre los resultados de los parámetros fisicoquímicos	121
6.3	Sobre el reconocimiento de las fuentes de abastecimiento	122
6.4	Conclusiones generales	126
7	REFERENCIAS	127
8	ANEXOS	135

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1	Localización de la zona de estudio dentro de la cuenca "Cuenca Lago de Cuitzeo"	18
Figura 2	Mapa de formaciones Geológicas que conforman el Acuífero Morelia Queréndaro.	27
Figura 3	Mapa de ubicación de la Zona de Estudio	33
Figura 4	Mapa de interpolación de la temperatura media anual en la zona de estudio	35
Figura 5	Precipitación anual de Morelia Michoacán, tomado de CLIMATE-DATA.ORG (programa de información para datos climatológicos).....	37
Figura 6	Definición de los Polígonos de Thiessen con el área de influencia de las estaciones seleccionadas y el municipio de Morelia.....	40
Figura 7	Interpolación de la precipitación media anual con el método IDW.	41
Figura 8	Resumen de los datos de precipitación para todas las estaciones de estudio, incluyendo el intervalo de mínimos y máximos.....	42
Figura 9	Resumen de los datos de Temperatura de todas las estaciones en estudio mediante el intervalo de mínimos y máximos.	43
Figura 10	Proceso de infiltración en el suelo.....	51
Figura 11	Tipo de Acuíferos.....	53
Figura 12	Diagrama de Piper.....	54
Figura 13	Relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el agua de lluvia	62
Figura 14	Línea de Agua Meteorica Global y tipos de desviaciones. Fuente: web.sahra.arizona.edu.....	63
Figura 15	Esquema Metodológico que presenta la descripción de actividades para el desarrollo del proyecto.	68
Figura 16	Esquema Metodológico que presenta el subapartado Recopilación de información del diagrama principal.....	69
Figura 17	Esquema metodológico que presenta la gestión de datos y su tratamiento.....	70
Figura 18	Esquema metodológico que describe el trabajo de campo.....	71
Figura 19	Esquema metodológico que describe el tratamiento de datos recabados en el trabajo de campo.	72
Figura 20	Esquema Metodológico que describe la interpretación de datos.....	73
Figura 21	Esquema Metodológico que describe conclusiones y recomendaciones.	73
Figura 22	Curva de titulación de la alcalinidad. Fuente tomada de Sawyer C., McCarty P. y Parkin G.....	86
Figura 23	Tipos de correlación	90
Figura 24	Interpolación de niveles piezométricos y direcciones de flujo principales.....	91
Figura 25	Mapa de interpolación IDW de la profundidad del Nivel Estático (en msnm)	92
Figura 26	Mapa de elevaciones topográficas en la zona de estudio (en msnm).....	93



Figura 27 Mapa de sectorización de fuentes de abastecimiento que suministra el ODAPAS de la ciudad de Morelia. Fuente: Unidad de Transparencia del ODAPAS	94
Figura 28 Localización de los puntos de muestreo realizado en distintos días, considerando las diferentes fuentes que abastecen la ciudad de Morelia.....	95
Figura 29 Datos isotópicos anuales de agua de lluvia, datos extraídos de la página internacional Water Isotopes, y línea meteórica Mundial.....	97
Figura 30 Datos isotópicos mensuales de agua de lluvia, datos extraídos de la página internacional Water Isotopes, y línea meteórica Mundial.....	98
Figura 31 Variables Temperatura vs pH	100
Figura 32 Variables Temperatura vs SDT	100
Figura 33 Variables Temperatura vs C.E.	101
Figura 34 Variables %O.D. vs SDT	101
Figura 35 Variables Alcalinidad vs Temperatura.....	102
Figura 36 Variable Alcalinidad vs SDT	103
Figura 37 Variables Alcalinidad vs C.E.	103
Figura 38 Variables pH vs C.E.....	104
Figura 39 Variables Alcalinidad vs pH.....	104
Figura 40 Ubicación espacial de la Variable Oxígeno Disuelto (en %) en la zona de estudio.....	106
Figura 41 Ubicación espacial de la Variable Temperatura (°C) en la zona de estudio.....	107
Figura 42 Ubicación espacial de la Variable Potencial Redox (en Mv) en la zona de estudio.....	108
Figura 43 Ubicación espacial de la Variable Solidos Disueltos Totales (en ppm) en la zona de estudio.....	110
Figura 44 Ubicación espacial de la variable pH en la zona de estudio.....	111
Figura 45 Ubicación espacial de la variable Alcalinidad (en ppm) en la zona de estudio.....	112
Figura 46 Ubicación espacial de la Variable Conductividad Eléctrica (en %) en la zona d estudio.....	113
Figura 47 Solicitud de información sobre la sectorización de fuentes de abastecimiento de agua potable ante el ODAPAS de Morelia.....	136
Figura 48 Solicitud de permisos convenientes para el acceso al muestreo de las fuentes de abastecimiento de agua potable operados por el ODAPAS.....	136

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1 Resumen de estudios hidrológicos.....	25
Tabla 2 Resumen de datos climatológicos anuales tomado de CLIMATE-DATA.ORG (programa de información para datos climatológicos).....	37
Tabla 3 “Datos de las Estaciones Meteorológicas CLICOM seleccionadas para el análisis en la zona de estudio”	38
Tabla 4 Valores registrados de PMA y TMA de las estaciones asociadas a la zona de estudio.....	39
Tabla 5 Abundancia promedio en la Tierra de los isótopos estables de elementos de interés biológico (tomado de Ehleringer y Osmond, 1989).....	57
Tabla 6 Tabla de datos anuales de isótopos $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. extraídos de la página Water Isotopes.....	83
Tabla 7 Tabla de datos mensuales de isótopos $\delta^2\text{H}$ extraídos de la página Water Isotopes.....	84
Tabla 8 Tabla de datos mensuales de isótopos $\delta^{18}\text{O}$ extraídos de la página Water Isotopes.....	84
Tabla 9 Estadística de Parámetros Físicoquímicos tomados en campo.....	96
Tabla 10 Límites permisibles de parámetros físicoquímicos.....	119
Tabla 11 Sectorización del ODAPAS	122



INDICE DE ABREVIATURAS

CE: Conductividad Eléctrica

CLICOM: Climate Computing Project CNRMCM5 Centre National de Recherches
Météorologiques

CICESE: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua CORDEX Coordinate Regional Climate Downscaling
Experiment

CVTM: Vulcanismo Cuaternario del Cinturón Volcánico Transmexican

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

IGME: Instituto Geológico y Minero de España

IRMS: Indian Ridge Middle School

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

LMM: Línea Meteórica Mundial

LML: Línea Meteórica Local

MDE: Modelo Digital de Elevaciones

N.P: Nivel Piezométrico

OR: Potencial Redox

OOAPAS: Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

OMS: Organismo Mundial de la Salud

OD: Oxígeno Disuelto



OR: Potencial Redox

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica

Ph: Potencial Hidrógeno

REPDA: Registro Público de Derechos de Agua

RHA: Región Hidrológica Administrativa

SARH: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos

SMC: Sierra de Mil Cumbres

SACM: Sistema de Aguas de la Ciudad de México

SMOW: Vienna - Standard Mean Ocean

SDT: Sólidos Disueltos Totales

SIG: Sistema de información geográfica

TU: Tritium Units

USV: Uso de suelo y vegetación

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

UTM: Universal Transverse Mercator

UNICEF: United Nations Children's Fund

USGS: United States Geological Survey

ZMCM: Zona Metropolitana del Valle de México

ZNS: Zona No Saturada



RESUMEN

La población de Morelia Michoacán con más de ochocientos mil habitantes y el constante crecimiento de la misma demanda grandes volúmenes de agua, actualmente presenta problemas con el abastecimiento del recurso hídrico. La extracción y explotación de las aguas subterráneas y superficiales han mostrado un déficit del gasto y ha afectado la disponibilidad del agua para esta zona. De seguir así se puede producir un desequilibrio en las fuentes de abastecimiento e ir disminuyendo cada vez más en un corto plazo.

El estudio está diseñado para evaluar y mejorar las condiciones en las que se encuentran las principales fuentes de abastecimiento, implementar el reconocimiento de ellas y cuidar la disponibilidad que tiene actualmente, esto gracias al análisis mediante técnicas isotópicas y fisicoquímicas que representan una herramienta útil para relacionar los recursos hídricos con el ciclo natural del agua. Al estudiar la abundancia relativa de isótopos estables y parámetros fisicoquímicos del agua de lluvia y fuentes subterráneas, superficiales y manantiales, se puede analizar procesos de recarga, reconocimiento de las fuentes de abastecimiento y la relación con la disponibilidad a la que se encuentra el recurso que es extraído a través de los pozos de la zona de estudio. La ciudad de Morelia no cuenta con estudios suficientes de parámetros fisicoquímicos ni isotópicos, por lo que no se conoce el comportamiento de los cuerpos de agua y es por ello que la problemática a la que está expuesta no se haya solucionado aún ni ha aterrizado acciones encaminadas a su conservación.

Para realizar el análisis planteado en este trabajo, se llevaron a cabo dos muestreos, una para agua de lluvia en la que se recolectaron más de 70 muestras y otra de las fuentes de abastecimiento de agua potable (operados por el OOAPAS de Morelia), en donde se recolectaron 76 muestras. También se hizo uso de datos climatológicos de precipitación y temperatura que fueron útiles para el desarrollo de esta investigación, junto con una recolección de datos hidrogeológicos e isotópicos.

La relación isotópica entre las aguas meteóricas y las aguas subterráneas, permite deducir que la composición isotópica de agua de lluvia como de agua proveniente de fuentes



subterráneas y superficiales describen el comportamiento del recurso hídrico y posteriormente conocer soluciones a la problemática a la que está expuesta. Actualmente no se cuenta con los resultados isotópicos de las aguas de fuentes de abastecimiento de la zona, pero con relación a los parámetros fisicoquímicos, su análisis presenta una idea de la dinámica en la que trabaja el ciclo hidrológico con el flujo subterráneo y se observa un comportamiento similar en todas las fuentes de agua.

Cabe mencionar que el recurso hídrico de la zona de estudio es influenciado por la presión humana ya que no se tiene un manejo adecuado de las fuentes, su explotación descontrolada debido a que no se profundizan los estudios que se han realizado anteriormente. Realizar este tipo de estudios es muy importante ya que se logra un mejor aprovechamiento del recurso hídrico.

Palabras clave: Acuífero, subterránea, superficial, sobreexplotación, renovabilidad.



ABSTRACT

The population of Morelia Michoacán, with more than eight hundred thousand inhabitants and the constant growth of the same demands large volumes of water, currently presents problems with the supply of water resources. The extraction and exploitation of groundwater and surface water has shown a deficit of expenditure and has affected the availability of water for this area. If this continues, there could be an imbalance in the supply sources and it could become increasingly scarce in the short term.

The study is designed to evaluate and improve the conditions in which the main sources of supply are found, implement the recognition of them and take care of the current availability, thanks to the analysis through isotopic and physicochemical techniques that represent a useful tool to relate water resources with the natural water cycle. By studying the relative abundance of stable isotopes and physicochemical parameters of rainwater, groundwater, surface water and springs, it is possible to analyze recharge processes, recognition of supply sources and the relationship with the availability of the resource that is extracted through wells in the study area. The city of Morelia does not have sufficient studies of physicochemical or isotopic parameters, so the behavior of the bodies of water is not known and that is why the problems to which it is exposed have not yet been solved and actions aimed at their conservation have not yet been taken.

To carry out the analysis proposed in this work, two samplings were carried out, one for rainwater in which more than 70 samples were collected and another from the drinking water supply sources (operated by the OOAPAS of Morelia), in which 76 samples were collected. Climatological data on precipitation and temperature were also used, which were useful for the development of this research, along with a collection of hydrogeological and isotopic data.

The isotopic relationship between meteoric water and groundwater allows us to deduce that the isotopic composition of rainwater and water from subway and surface sources describes the behavior of the water resource and, subsequently, to find solutions to the problems to which it is exposed. Currently there are no isotopic results for the water supply sources in the



area, but with regard to the physicochemical parameters, their analysis gives an idea of the dynamics of the hydrological cycle working with the subway flow and a similar behavior is observed in all the water sources.

It is worth mentioning that the water resource of the study area is influenced by human pressure since there is no adequate management of the sources, their uncontrolled exploitation due to the fact that the studies that have been carried out previously are not deepened. It is very important to carry out this type of study in order to make better use of water resources.



1 INTRODUCCIÓN

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

El agua dulce es el principal recurso del hombre y siempre ha sido el elemento básico que ha condicionado mayormente las actividades industriales, agrícolas y humanas. A lo largo de la historia, la calidad del agua potable ha sido un factor determinante del bienestar humano. La importancia del agua en el desarrollo de nuestras actividades diarias es indiscutible.

En 2017 el 75% de la población mundial (5.700 millones de personas) tenía suministro de agua en sus hogares (UNICEF Y OMS, 2019). El 25% restante de la población mundial (casi 2000 millones de personas) incluye más de 200 millones de personas que necesitan más de 30 minutos para recoger agua potable.

Actualmente 2200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura y otros 4.200 millones que carecen de sistemas de saneamiento seguros.

La gran mayoría de los 5.700 millones de personas con acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura dependen de las redes de tuberías, junto con otros sistemas convencionales de abastecimiento y tratamiento de agua, centralizados y descentralizados. (ONU, 2020)

En México algunas ciudades no cuentan con el abastecimiento de agua suficiente como para responder a la demanda de la población. En particular, la ciudad de Morelia (Michoacán), no escapa a esta situación, ya que en términos promedio se tiene una dotación en fuentes de 367 litros/habitante/día, que resulta insuficiente para satisfacer las necesidades de una población que ronda los 849,053 habitantes, según el INEGI 2020. Sin embargo, la población sigue sin ver satisfecha la demanda del vital líquido (Domínguez Sánchez, et al., 2011).



Durante los últimos años la ciudad ha carecido de este recurso, principalmente durante los periodos de estiaje. Se ha tenido un descontrol en el manejo de las diferentes fuentes, en especial la de los pozos que extraen recursos subterráneos y se contemplan problemas para abastecer completamente de este recurso.

La ciudad de Morelia se abastece hasta en un 65% de agua superficial, la cual se origina principalmente en el manantial La Mintzita (que resulta ser una manifestación del recurso subterráneo) y de la presa de Cointzio, además de un 35% que se extrae de pozos. Dado el crecimiento de la ciudad, el agua cada vez alcanza menos, ya que se ofrece el servicio a una cantidad más grande de población y la disponibilidad del líquido es la misma, o aún peor, cada vez va descendiendo.

El estudio del agua, analizado por medio de su componente químico a lo largo del tiempo, ha fortalecido su conocimiento respecto al problema de abastecimiento y ha ayudado a comprenderlo, de tal manera que se puedan prevenir este tipo de inconvenientes.

La presente investigación se centra en estudiar la composición isotópica de las distintas fuentes de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de Morelia, fundamentalmente revisando pozos, presas, ríos y manantiales que suministran este líquido, mediante el reconocimiento isotópico de la molécula del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) y a través de la caracterización físico-química de cada fuente. Gracias a las propiedades químicas únicas, junto con la información que proporcionan los isótopos, se pueden emplear para la comprensión del funcionamiento del agua subterránea, al ser una de las fuentes de abastecimiento principal de la ciudad y contribuyendo en la sostenibilidad del abastecimiento de agua.

1.1 Antecedentes

Existen estudios que se han realizado a lo largo del tiempo en la región de Morelia Michoacán para interpretar el comportamiento del agua que sirven de base para establecer el comportamiento de las diferentes fuentes que abastecen la ciudad de Morelia. A continuación, se describen de forma general algunas investigaciones realizadas de los cuales estarán divididos para su análisis en los siguientes apartados; hidrológicos, geológicos, e isotópicos respectivamente, en cuanto a este recurso y a otros factores que influyen directamente en el comportamiento del mismo.

A continuación, se detalla una breve descripción de algunos estudios hidrológicos que se han realizado a lo largo del tiempo en el acuífero Morelia-Queréndaro, y su transición hasta la actualidad.

1.1.1 Estudios previos en hidrología

El acuífero Morelia-Queréndaro (Figura 1), definido con la clave 1602 en el Sistema de Información geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos $19^{\circ} 26'$ y $20^{\circ} 08'$ de latitud norte y los meridianos $100^{\circ} 38'$ y $101^{\circ} 29'$ de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de $3,510 \text{ km}^2$.

Colinda al norte con los acuíferos Ciénega Prieta-Moroleón y Lago de Cuitzeo, del estado de Guanajuato, al poniente con los acuíferos Pastor Ortiz-La Piedad, Zacapu y Lagunillas-Pátzcuaro, al sur con Tacámbaro-Turicato y Huetamo y al oriente con los acuíferos, Ciudad Hidalgo-Tuxpan y Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, en el estado de Michoacán.

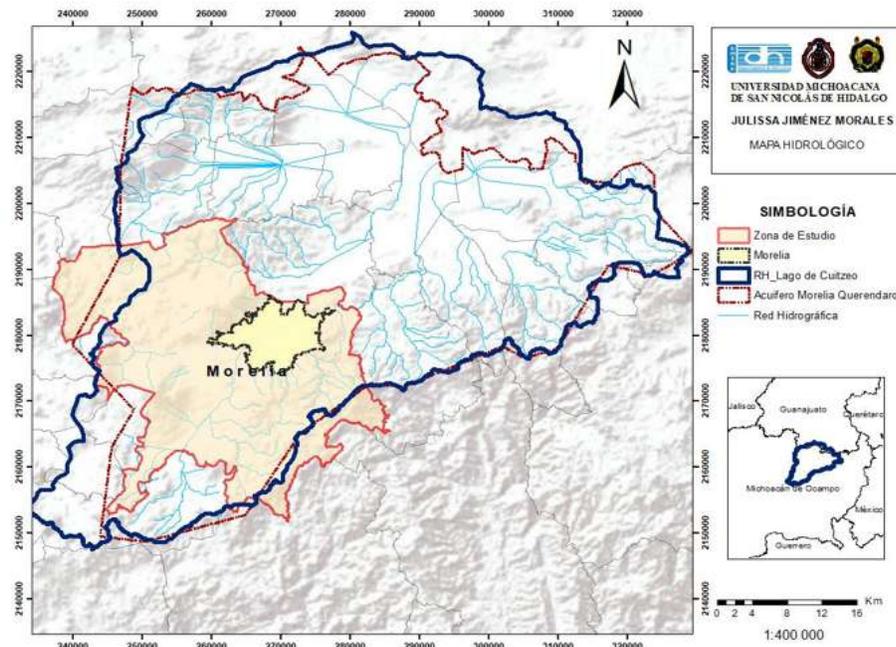


Figura 1 Localización de la zona de estudio dentro de la cuenca “Cuenca Lago de Cuitzeo”



En la zona que comprende el acuífero se han realizado ocho estudios, que van de los años 1977 a 2006, algunos con información hidrogeológica y algunos estudios recientes que se han implementado a través del tiempo, con el objetivo de evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona.

A. *Estudio Geohidrológico, Río Lerma, Modelo Tectónico, Subcuencas Subterráneas (SARH, 1977)*

Este expediente contiene planos de litología del área norte de la Laguna de Cuitzeo. En el plano fechado 1977, “Estudio Geohidrológico, Río Lerma, Modelo Tectónico, Subcuencas Subterráneas, SARH” indican dos abatimientos en la zona del acuífero Morelia-Queréndaro, uno en el municipio de Cuitzeo que va de 14m a 16m debido a la continua extracción para el abastecimiento de la ciudad de Morelia y el de mayor área se ubica en la zona entre Queréndaro y Zinapécuaro con valores que van desde 20 hasta 30 m.

B. *Estudio de exploración geofísica e hidrológica, y actividades geológicas complementarias en la zona de Morelia-Álvaro Obregón, Michoacán (SARH, 1988)*

El estudio es una actualización del conocimiento geológico e hidrológico de los materiales del subsuelo con posibilidades de construir acuíferos susceptibles de explotación, mediante 50 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en 10 secciones y un estudio hidrogeoquímico, efectuado en 30 aprovechamientos. Concluyen que en el subsuelo de la zona en que se encuentra ubicada la Cd. de Morelia, así como en las áreas circundantes se manifiesta la existencia de un sistema acuífero de alta productividad, alojado principalmente en las ignimbritas y tobas pumíticas de edad Plioceno Superior, así como en los derrames, brechas, aglomerados y conglomerados de composición basáltica y andesítica. La calidad fisicoquímica es apta para todo uso, únicamente la de la porción baja del valle Morelia-Álvaro Obregón, presenta peligro de salinidad media a ligeramente alta.



Este estudio es de hace ya un poco más de 30 años atrás y puesto que las condiciones en las que se encuentra el acuífero no son las mismas, el comportamiento ha ido cambiando cada vez más, de ahí que surge la necesidad de realizar estudios de caracterización hidrogeológica e isotópica actualizados.

C. *Estudio Geohidrológico cuantitativo del acuífero Morelia-Queréndaro, Michoacán (CONAGUA, 1990)*

En el estudio se llevó a cabo una actualización del inventario de aprovechamientos, reportando 1,038 (924 pozos, 52 norias y 62 manantiales) mediante los cuales se extrae un volumen del orden de $52 \text{ hm}^3/\text{año}$ en los acuíferos de la porción norte contigua al Lago de Cuitzeo a través de 581 aprovechamientos; $197 \text{ hm}^3/\text{año}$, de los que $83 \text{ hm}^3/\text{año}$ se extraen en el valle de Morelia mediante 216 aprovechamientos y $62 \text{ hm}^3/\text{año}$ en la Planicie Álvaro Obregón-Queréndaro con 241 aprovechamientos. El principal uso del agua subterránea es el agrícola (56%) y el público urbano (17%).

Reportan una sobreexplotación del agua subterránea en el valle de Morelia provocando el descenso progresivo de los niveles del agua en el área localizada entre Cointzio y el poblado de Charo, alcanzando un máximo de 30 m en el intervalo de 1977-1990. La calidad del agua en forma general es buena, reportando una salinidad total predominante de 1,000 ppm.

Concluyen que la recarga que recibe el acuífero granular en la porción sur de la zona (planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro y valle de Morelia) es superior a 178 Hm^3 , reportando una disponibilidad en este acuífero de 33 hm^3 dado que en esa zona sólo se reportan $145 \text{ hm}^3/\text{año}$ de extracción. En el documento se recomienda reglamentar la disponibilidad de agua en el acuífero granular para satisfacer demandas de riego y para uso doméstico de los núcleos de población asentados en los valles; regular la disponibilidad de aguas subterráneas en la porción occidental de la planicie de Álvaro



Obregón, para satisfacer las demandas de agua potable de la población de Morelia; no incrementar la explotación de agua subterránea en el valle de Morelia, específicamente en el área comprendida entre las poblaciones de Cointzio y Charo.

- D. *Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero Morelia- Queréndaro, Michoacán (CONAGUA, 1993)*

El documento reporta una extracción de 100 hm³/año (incluye pozos y norias) distribuido de la siguiente manera: 40 hm³/año para uso agrícola, 53 hm³/año para abastecimiento de núcleos de población e instalaciones industriales y 7 hm³/año para uso doméstico y/o abrevadero.

En el documento se presenta un balance de aguas subterráneas, considerando la extracción de 100 hm³/año, una descarga natural del orden de 45 hm³/año (considerando evapotranspiración y descarga de manantiales), el cambio de almacenamiento anual de 15 hm³ (calculado en el lapso 1977-1992).

Para planear el desarrollo y orientar el manejo del acuífero, se realizó una modelación matemática preliminar, ya que disponen de poca información para formar y calibrar el modelo, se simuló el comportamiento de los niveles en el intervalo 1993-2010, suponiendo un bombeo incrementado en unos 45 hm³/año, a partir de 1993, con la siguiente distribución: 30 hm³/año en el área de Álvaro Obregón-Queréndaro y 15 hm³/año en el área de Morelia.

Los resultados indican que el incremento del bombeo provocaría el descenso de los niveles del agua, afectando el área de Morelia.

En el acuífero se observan abatimientos desde 1977 en la zona de Morelia, del orden de 5 a 20 m; y en la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro del orden de los 6 m, provocados por la operación de los pozos agrícolas construidos a partir de 1989.



E. *Registros de piezometría, acuífero Morelia-Queréndaro (CONAGUA, 1997).*

Este expediente contiene una recopilación de planos de piezometría de estudios previos (SARH, 1990; entre otros). Contiene información litológica de 13 pozos; datos piezométricos de aprovechamientos que abastecen la ciudad de Morelia en el periodo sep./96-mar/97 (esta información carece de coordenadas), el OOAPAS dividió la información de niveles dinámicos en cinco zonas;

1) Zona Río Chiquito, destacando la Reserva Ocolusen con niveles de 183.6m, 2) Zona Prados Verdes, Mariano Escobedo II con niveles de 154.2 m; 3) Zona Quinceo, Potrerillos con niveles de 190.2 m; 4) Zona Realitos, El Lago II con niveles de 157.1 m; 5) Zona Oriente de la Cd., Enrique Ramírez II con niveles de 158.2 m. La profundidad de los niveles estáticos se encuentra entre 2 y 98 m, la de los niveles dinámicos entre 21 y 215 m, con gastos entre 3 y 70 lps y profundidad total entre 25 y 350 m.

F. *Estudio Geohidrológico preliminar de la zona de Morelia Queréndaro, Michoacán (SARH, 1997)*

Este documento reporta la existencia de dos fuentes principales de agua subterránea, un acuífero granular y un acuífero basáltico, con espesores de 100 m en el valle de Morelia, de 300 m en la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro. Estimaron 21 hm³ de extracción de agua subterránea (pozos y norias), siendo el uso principal el de abastecimiento de agua potable. Los manantiales descargan un volumen del orden de 50 hm³/año.

En términos generales, se clasifica al agua subterránea como de buena calidad. Para este estudio se realizaron 150 sondeos eléctricos verticales los cuales se integraron en 11 perfiles geo eléctricos y muestrearon 184 aprovechamientos para análisis de calidad del agua. Adicionalmente, se llevaron a cabo 10 pruebas de bombeo que fueron útiles para estimar el funcionamiento, capacidad y la zona de influencia de la extracción de los pozos y también para conocer las características del acuífero como lo son, su almacenamiento, transmisividad, límites, etc.



G. *Estudio Geohidrológico de la zona Sur-Poniente de Morelia (OOAPAS, 2006).*

El estudio tiene una extensión de 48 km², localizada en la zona sur-poniente de Morelia. El censo realizado en ese año (2006) indica un total de 59 aprovechamientos de agua subterránea, de ellos 53 son pozos y 6 manantiales. 33 de los pozos son operados por el OOAPAS Morelia; se observa que los niveles estáticos de los pozos ubicados en la zona del valle varían de los 14 a los 45 m de profundidad y los pozos ubicados en la zona de las faldas del Quinceo varían de los 47 a los 110 m. Además, se realizaron 20 sondeos eléctricos verticales.

Reportan un volumen de agua subterránea disponible en el acuífero de 5.81 hm³; abatimientos que van desde los 12-14 m en la zona del ex Ejido Tzindurio, el FOVISSSTE La Huerta, Ciudad Universitaria y en el Fraccionamiento Ario 1815, San Isidro Itzicuaró. El menor abatimiento se encuentra en la zona comprendida entre la población de San Juanito Itzicuaró y el Fraccionamiento Fuentes de Valladolid y hacia el Sur de estos asentamientos que son de 10 m.

La calidad del agua subterránea es apta para el consumo humano en la zona centro y sur del valle aluvial, los pozos que en algunos parámetros rebasan lo establecido por la norma, se ubican al norte y oriente de la zona de estudio.

H. *Actualización Hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán (CONAGUA, 2007).*

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizó para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) un estudio hidrogeológico cuyo objetivo general fue conocer las condiciones actuales de explotación del agua subterránea y funcionamiento hidrogeológico del acuífero Morelia-Queréndaro (1602), con el objeto de que sirva de herramienta, para



proponer las políticas de explotación adecuadas y estar en condiciones de realizar un mejor aprovechamiento del recurso subterráneo.

Se registraron 986 pozos y 23 manantiales. El uso principal del agua es agrícola (53.69%), el segundo lugar lo ocupa el público urbano (40.21%) y en menor medida los demás usos (6.1%); para este análisis se utilizaron los pozos activos. La extracción de agua subterránea de acuerdo con la estimación del censo es de 162.2 hm^3 /año. El volumen de agua estimado en el censo por salida de manantiales es de 60.3 hm^3 /año.

I. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas (CONAGUA, 2020).*

El registro de los niveles del agua realizados durante el periodo de 1977 a 1992 aunado a la información recabada el año de 2007 permiten establecer la variación de los niveles que ha presentado el agua subterránea en las últimas tres décadas y la influencia del bombeo sobre los mismos. Puesto que en el 2007 se realizó el último censo, se sigue compartiendo información del total de pozos y manantiales existentes.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de 169.005 hm^3 anuales, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del 20 de febrero del 2020.

El volumen anual de extracción por manantiales de acuerdo al censo de aprovechamientos es de 60.3 hm^3 /año.

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de 10.21 hm^3 anuales que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.



En la Tabla 1 se tiene un resumen de los diferentes estudios donde se puede apreciar cambios a lo largo del tiempo, el comportamiento de la zona acuífera y fuentes para el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Morelia.

Tabla 1 Resumen de estudios hidrológicos

ESTUDIOS REALIZADOS	AÑO DE ESTUDIO	CENSO DE POZOS / MANANTIALES		VOL. EXTRACCIÓN DEL ACUIFERO/DISPONIBILIDAD
ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE MORELIA-QUERÉNDARO	1977	-	-	21 hm ³ de pozos y norias y 50 hm ³ /año de manantiales
ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO CUANTITATIVO DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO, MICH	1990	924 pozos	62 manantiales	52 hm ³ /año- lago de Cuitzeo 197 hm ³ /año- valle de Morelia y Álvaro Obregón- Queréndaro
ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES GEOHIDROLÓGICAS ACTUALES DEL ACUÍFERO DE MORELIA-QUERÉNDARO, MICHOACÁN	1993	-	--	100hm ³ /año
ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA SUR-PONIENTE DE MORELIA	2006	53 pozos	6 manantiales	5.8 hm ³ disponibilidad
ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DE LOS ACUÍFEROS: MARAVATIO-CONTEPEC-EPITACIO HUERTA, ZACAPU, MORELIA-QUERÉNDARO Y PASTOR ORTIZ, EN EL ESTADO DE MICHOACÁN. 2007.	2007	986 pozos	23 manantiales	162.2 hm ³ /año
ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO, SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (CNA 2020)	2020	987 pozos	24 manantiales	169.006 hm ³ /año con un Déficit de 10.21 hm ³

Una vez presentados los estudios hidrológicos, a continuación, se muestran algunos antecedentes de análisis realizados para saber el comportamiento, características y datos necesarios para la comprensión del acuífero por medio de evaluaciones geológicas (fig. 1.2) aplicados a la zona de estudio. Desafortunadamente no se ha redactado todavía suficiente información sobre las características del acuífero de la subcuenca, pero se destacan algunas mencionadas a continuación.



1.1.2 Estudios previos en geología

A. *Geología Regional*

El estudio realizado por Víctor Hugo Garduño Monroy et al., (1997) en el tema “Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia para una correcta planificación del territorio” menciona que la ciudad de Morelia se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, en la intersección entre dos provincias geológicas, hacia el sur se tiene la Sierra de Mil Cumbres (SMC), caracterizada por volcanismo miocénico; hacia el norte se observa la provincia del vulcanismo cuaternario del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), representado por los volcanes monogenéticos que dan lugar al campo volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985) o Corredor Tarasco (Garduño-Monroy et al., 1997).

La región se encuentra afectada por sistemas de fallas con dirección E-W y NE-SW que dieron origen al valle donde se aloja el sistema acuífero. Están presentes ignimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior y depósitos lacustres y de aluvión del Cuaternario Reciente (Corona y Birgit, 2001).

Las rocas que afloran dentro de los límites del acuífero son de tipo ígneo extrusivo básica del periodo cuaternario, según INEGI 2007.

a) *La estratigrafía*

Mediante el estudio mencionado anteriormente se concluye que la zona de Morelia está compuesta por rocas ígneas, constituida por tobas, brechas y lavas ignimbritas (Figura 2) de composición riolítica que se encuentran en la sierra de Mil cumbres y en el camino a Tzitzio.

También podemos notar derrames andesíticos, derrames de lavas, aglomerados y brechas de composición andesítica que se presentan al norte del poblado de Tarímbaro.

En el área del poblado de Morelos, afloran más de 150 m de tobas soldadas, se les midió un espesor máximo de 140 m, sin embargo, en los alrededores de la ciudad de Morelia, muestran que el espesor de las tobas arenosas y de las ignimbritas, aumentan del oriente de dicha ciudad hacia el poniente de la misma.

Se encuentra la existencia de depósitos lacustres constituidas por sedimentos de constitución arcillo-arenoso al noreste de la ciudad de Morelia. Por otro lado, lavas, brechas y tobas de composición basáltica se localizan al poniente de la ciudad con espesores de 60 m.

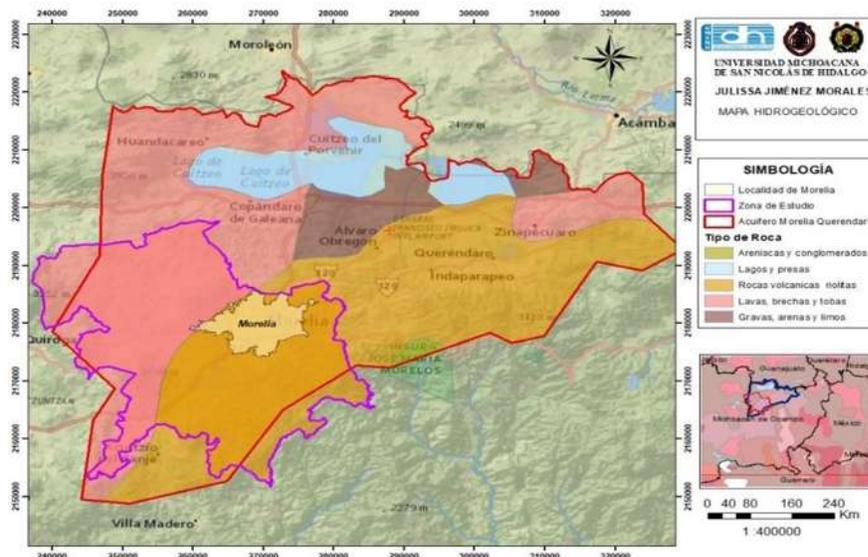


Figura 2 Mapa de formaciones Geológicas que conforman el Acuífero Morelia Queréndaro.



B. *Geología Local*

Por medio de la información de los pozos perforados en la ciudad de Morelia, del mapa geológico y del trabajo de campo es posible identificar la geología de la ciudad de Morelia, la cual se resume a continuación:

a) *Complejo volcánico miocénico del Cerro Punhuato.*

Se trata de una secuencia de rocas constituida por derrames de lava y brechas andesíticas y dacíticas, a veces soldadas, que por su estructura y morfología se asocia a un complejo de domos. Este complejo presenta una estructura de herradura abierta hacia el Oeste y los productos asociados, considerados ser el material acumulado después de la destrucción del cono, forman un abanico al oriente de la ciudad, lo que evidencia una gran explosión lateral. A esta unidad se le asigna una edad ubicada dentro del Mioceno, considerando que subyace a los sedimentos lacustres del Mioceno superior-Plioceno (Israde-Alcántara, 1995).

b) *Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno*

Esta secuencia aflora en la parte sur y oriente de Morelia, donde está caracterizada por limos y arcillas; tiene un espesor, según los cortes efectuados por las perforaciones profundas, hasta de 60 metros y presentan un basculamiento de 5° hacia el Sur. Por medio de análisis microscópicos de las diatomeas (algas constituidas por caparazón silíceo), se atribuye un nivel del lago muy bajo. Hacia la Huerta la secuencia se compone de cenizas volcánicas con matriz arcillosa alternadas con niveles arcillo-limosos. Hacia el libramiento norte y a la altura del Río Grande se observan conglomerados y niveles de arenas y limos, afectados por uno de los más importantes fallos de Morelia, la falla Central Camionera. En la zona industrial, hacia la región de Charo, la secuencia fluvio-lacustre está caracterizada por arcillas, limos café y cenizas blancas y subyace a las brechas y lavas del complejo volcánico del Punhuato. Es aquí donde la secuencia presenta su máxima expresión.



c) *Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco*

Es la unidad más reciente y corresponde a los productos del volcanismo monogenético del CVTM. Son lavas andesíticas y eventualmente andesítico-basálticas que provienen de los volcanes Quinceo, Las Tetillas o del Cerro El Águila que, además, delinean morfológicamente la cima más importante de la ciudad de Morelia. El aparato de estos volcanes tiene una base de 10 km de diámetro y más de 800 metros de altura (la punta del volcán El Quinceo se encuentra a 2720 msnm mientras que la subcuenca tiene una altura de 1980-1990 msnm). El volcán El Quinceo fue fechado en 500,000 años y ha tenido reactivaciones en los últimos 10,000 años (Holoceno), como lo demuestran impresiones de mazorcas de maíz encontradas en las cercanías de la hacienda de la Magdalena (norte de la ciudad) (Martínez y Hobson, 1907 en Garduño-Monroy et al., 2001).

No obstante haber mostrado las dos fallas principales de la región de Morelia-Tarímbaro, en la planificación del territorio siempre se ha cuestionado la existencia de estas estructuras geológicas, sin embargo, la carta oficial del INEGI de la región de Morelia desde 1979 ya ponía en existencia las fallas de La Paloma, La Colina, Cerritos y Atapaneo-Charo. Con la recopilación de la información de detalle acerca de la litología del subsuelo, obtenida por medio de los pozos profundos para la extracción del agua del subsuelo administrados por el OOAPAS (Organismo Operador de Agua Potable y Alcantarillado Sanitarios), junto al estudio de los antecedentes y trabajo de campo, se realizó un perfil geológico NO-SE de la ciudad de Morelia. En este, si partimos del sector SE, apreciamos los grandes desniveles generados por las fallas de Morelia, destacando la falla La Paloma con un desplazamiento real de más de 200 m.



A continuación, se revisarán estudios previos llevados a cabo en temas de isotopía en la zona o cercanos a la zona de estudio.

La zona de estudio tiene la particularidad de presentar deficiencia de información en análisis isotópicos, es por ello que en el siguiente apartado se incluyen ejemplos de estudios realizados en zonas aledañas a la ciudad de Morelia durante algunos años atrás que han demostrado ser una herramienta útil para la investigación del origen y renovabilidad del agua.

1.1.3 Estudios previos en isotopía

Los isótopos estables del $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se han convertido en una herramienta indispensable para abordar aspectos clave del ciclo hidrológico (Gat, 1996) y en la prospección de recursos naturales; además son trazadores geoquímicos ideales de las aguas, debido a que sus concentraciones no se alteran por la interacción con los materiales del subsuelo, aunque son sensibles a los efectos de latitud, altitud y temperatura (efectos isotópicos). A continuación, se presentan, de manera resumida, algunas investigaciones llevadas a cabo en México, donde las herramientas isotópicas son de utilidad en el estudio de las aguas subterráneas:

A. *Estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la Cuenca de México, realizado por Cortés et al. (1989)*

Consideraron la variación estacional en el contenido isotópico e hidroquímico de manantiales, pozos, norias y lagos ubicados principalmente en las zonas de recarga de la Cuenca de México. Entre las anomalías químicas (STD en mg/l) encontraron a los manantiales del Peñón de los Baños (>2500), Poza de Reyes (>900), Copilco (>540) y Pocito La Villa (>700), mientras que el resto de los aprovechamientos fluctúa en el intervalo de 13–460 mg/l. Encontraron dos anomalías térmicas correspondientes al Peñón de los Baños con una temperatura de 45°C y a La Castañeda, con una temperatura máxima de 46°C, además de revelar en ambos casos enriquecimiento isotópico respecto al promedio de la Cuenca. Los promedios isotópicos calculados en este análisis son $\delta^{18}\text{O}=-10,7$ y $\delta\text{D} = -73$, posible debido a la evolución y las diferentes condiciones de recarga de los últimos años.



- B. *Análisis geoquímico e isotópico de aguas geotérmicas y manantiales para definir el estado de equilibrio agua-roca del reservorio de Los Azufres, Michoacán, México (Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XV, 2000)*

En el presente estudio se realizó un análisis a partir de la información geoquímica e isotópica de los fluidos producidos por los pozos de Los Azufres (Michoacán), además de incluir manantiales localizados en la periferia del campo. Se realizó una clasificación de los tipos de aguas que se producen de acuerdo con su composición química, siendo el agua extraída en los pozos de Los Azufres una salmuera geotérmica del tipo clorurado-sódico, totalmente equilibrada con la roca que la almacena. Al hacer la corrección de la composición química en la descarga total y a condiciones de yacimiento, se encontró que los pozos producen una mezcla en una zona de líquido dominante. Los pozos de vapor seco, que son los más someros, la están produciendo en una zona bifásica (agua + gas y/o vapor de agua + gas).

Isotópicamente, la composición de los pozos presenta un enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}=-39.32$ y $\delta^2\text{H}=3.11$, como producto de la interacción agua-roca a altas temperaturas. Con respecto a los manantiales ubicados dentro del campo, estos presentan un carácter geoquímico sulfatado-ácido, lo que indica que se trata de aguas de origen meteórico calentadas con vapor geotérmico. Esto se confirma con los análisis isotópicos practicados a estos manantiales.



C. *Estudio de las entidades de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) propensas a la contaminación de agua subterránea (2002)*

La evolución geoquímica del agua subterránea por debajo de la Ciudad de México la estudiaron Edmunds et al. (2002), llevada a cabo a lo largo de 24 km siguiendo una trayectoria del Centro de la Ciudad de México, camino de la Sierra de las Cruces y hacia el Lago de Texcoco, utilizando isótopos estables, radiocarbónicos y elementos mayores y traza, con lo cual se determinaron las condiciones de la línea base, la extensión de algún contaminante y la eficacia del acuitardo.

En el estudio determinaron que las aguas debajo de la Ciudad de México (en la parte central de la sección) tienen edades de hasta 6000 años, el radiocarbono natural indicó velocidades de flujo en torno a 4 m/año y las propiedades de aguas termales indican que las corrientes eran más profundas y con mayor edad. Debido al gran espesor de la arcilla, se sugiere que ésta ofrecía la capacidad de retrasar enormemente cualquier contaminación urbana y, por ende, las aguas subterráneas seguían siendo de buena calidad.

D. *Estudio Monitoreo de agua subterránea del Sur de la Cuenca de México, realizado por Armienta H. y Rodríguez C. (2009)*

Se analizó la calidad del agua subterránea mediante el monitoreo de algunos pozos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), con 120 muestras donde se determinaron los elementos mayores y trazas, con 77 para análisis de volátiles y 33 para análisis de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$). Adicionalmente, se midieron variables de campo como temperatura, pH, conductividad y potencial Redox in situ. Se llevaron a cabo dos campañas para colecta de muestras, la primera en junio de 2008 (iniciando época de lluvias), y la segunda en abril de 2009 (antes del periodo de lluvias). Los resultados que obtuvieron les permitieron proponer hipótesis sobre el origen de los solutos detectados. Los valores de la media ponderada de la composición isotópica del estudio realizado resultaron igual a $\delta^{18}\text{O} = -10.62$ y $\delta^2\text{H} = -73.25$ respectivamente.

1.2 Zona de estudio

1.2.1 Localización

La ciudad de Morelia tiene su localización en la porción centro-Norte del Estado de Michoacán (Figura 3) siendo esta la capital y presenta una población de 849,053 habitantes (INEGI, 2020)

El área de estudio se encuentra contenida entre los paralelos $19^{\circ} 42' 10''$ latitud norte y los meridianos $101^{\circ} 11' 32''$ longitud oeste; las elevaciones topográficas que se observan en la zona son de una altitud promedio de 1,921 msnm y comprende una superficie de $1,771 \text{ km}^2$ aproximadamente y una superficie en la zona urbana de $1,199 \text{ km}^2$ (INEGI, 2020)

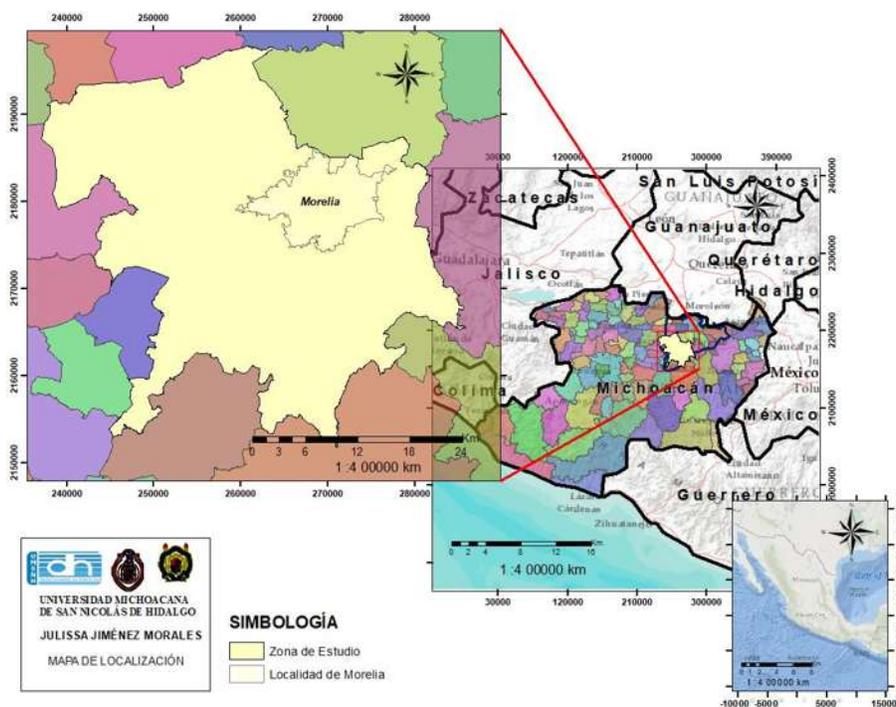


Figura 3 Mapa de ubicación de la Zona de Estudio



Territorialmente limita en la zona norte con los municipios de Tarímbaro, Chucándiro y Huaniqueo, al este con Charo y Tzitzio, al sur con Villa Madero y Acuitzio, finalmente en la porción del oeste limita con los municipios de Lagunillas, Coeneo, Tzintzuntzan y Quiroga.

El suministro de agua a dicha población se realiza principalmente a través de fuentes superficiales de abastecimiento (denominadas como Presa de Cointzio, Manantial de la Mintzita) y de fuentes subterráneas (mediante la extracción de pozos profundos repartidos por toda la zona).

Por otro lado, en México, la entidad encargada de la gestión del agua es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual desempeña sus funciones administrativas, normativas, técnicas y consultivas a través de 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las Regiones Hidrológico Administrativas (RHA) (Martínez, 2018).

Además, en años recientes el Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la ciudad (OOAPAS) implementó un sistema de recolección de datos que da certeza al estado que guardan dichas fuentes en su operación. La información recabada de ambas dependencias (regional y local), son consideradas en este estudio para el análisis de las fuentes de abastecimiento.

1.2.2 Clima

De acuerdo con los datos de 26 estaciones climatológicas (Figura 4) seleccionadas (ERIC II, 1999), con registros de 1940 a 2004, el clima de la ciudad de Morelia corresponde a templado subhúmedo. Los promedios anuales de temperatura, precipitación y evaporación potencial son 17.4°C , 797 mm y 1,810 mm respectivamente; el régimen de lluvias se presenta de junio a septiembre.

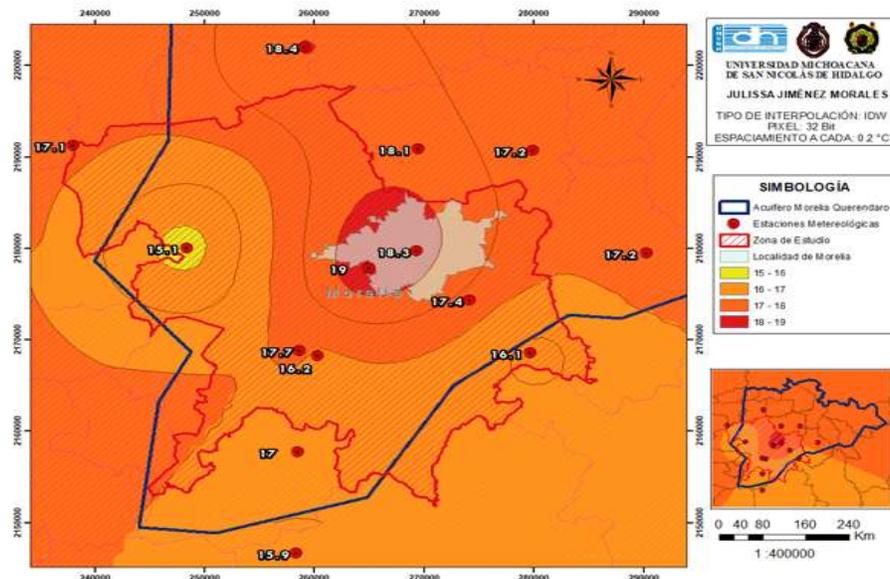


Figura 4 Mapa de interpolación de la temperatura media anual en la zona de estudio

La precipitación menos abundante se presenta en la porción norte del acuífero y la más cuantiosa en la porción sureste. Según los datos recopilados (INEGI, 2009), el clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media es de (74.67%), templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (23.98%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (0.65%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (0.39%) y templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (0.31%) El clima en Morelia se clasifica como cálido y templado.

Los veranos son mucho más lluviosos que los inviernos. De acuerdo con la Figura 4 en promedio, durante todo el año se presentan temperaturas que van desde 15 a 18°C , con las mayores temperaturas asociadas a la mancha urbana de Morelia y las menores correspondientes a las zonas montañosas del sur y oeste del municipio de Morelia.



1.2.3 Breve análisis de la precipitación

- *Recopilación de información*

Dentro del ciclo hidrológico, la precipitación es una parte importante, debido a que produce el agua renovable del planeta y ésta varía dependiendo de la región. Las ciudades que se encuentran en un mayor rango de latitud, son las que se caracterizan por tener una precipitación uniforme a lo largo de todo el año. De los 200 países de los cuales se dispone información, México se encuentra en el lugar 93 en términos de agua renovable per cápita. (CONAGUA, 2019)

Para la ciudad de Morelia, la temporada de lluvia es nublada, mientras que la temporada seca es parcialmente nublada y caliente durante todo el año. Un día mojado es un día con por lo menos 1 milímetro de líquido o precipitación equivalente a líquido. La probabilidad de días mojados en Morelia varía considerablemente durante el año. La temporada más mojada dura 4 meses, del 6 de junio al 5 de octubre, con una probabilidad de más del 38 % de que cierto día será un día mojado. (Weather spark, 2013)

La probabilidad máxima de un día mojado de acuerdo en la Figura 5 mostrada es del 75 % el 14 de julio. La temporada más seca dura 8.0 meses, del 5 de octubre al 6 de junio.

La probabilidad mínima de un día mojado es del 1 % el 5 de abril.

La menor cantidad de lluvia ocurre en diciembre, el promedio de este mes es de 13 mm, la mayor cantidad ocurre en julio, con un promedio de 139 mm (climate, 1999)

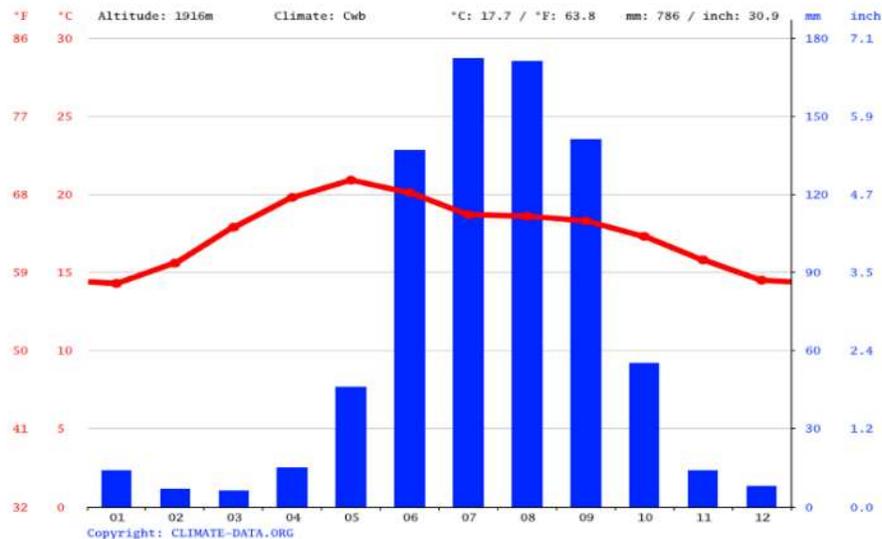


Figura 5 Precipitación anual de Morelia Michoacán, tomado de CLIMATE-DATA.ORG (programa de información para datos climatológicos)

A. Tabla resumen de datos históricos

La variación en la precipitación entre los meses más secos y más húmedos es 126 mm. La variación en las temperaturas durante todo el año es 5.8 °C. Por otro lado, la Tabla 2 resume los datos climatológicos anuales registrados para Morelia.

Tabla 2 Resumen de datos climatológicos anuales tomado de CLIMATE-DATA.ORG (programa de información para datos climatológicos)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	13.9	15.3	17	19.3	19.6	18.1	16.9	17	16.6	16.2	15.1	14.2
Temperatura mín. (°C)	7.9	8.7	10	12.2	13.5	13.8	13.2	13.2	13	11.6	9.6	8.4
Temperatura máx. (°C)	21.2	23.2	26.2	27.4	27	23.8	22	22.1	21.6	22	21.6	21.2
Precipitación (mm)	20	22	18	18	63	125	139	122	123	63	28	13
Humedad(%)	53%	48%	41%	38%	48%	60%	79%	79%	79%	71%	62%	54%
Días lluviosos (días)	3	3	3	3	9	14	17	16	14	8	4	2



B. *Análisis de datos con información Meteorológica CLICOM*

La información meteorológica de precipitación y temperatura se obtuvo a través de la consulta de la base de datos Climate Computing Project o CLICOM (CICESE, 2018), que es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en México, el cual ayuda a conocer la ubicación espacial de cada estación climatológica en la República Mexicana, así como toda la información que contiene cada estación meteorológica.

Con esta base de datos se realizó una elección de la mayor cantidad posible de estaciones ubicadas en Morelia y las más cercanas a ella, así como descargar la información para tratarla y presentarla en el estudio.

De la selección de estaciones, se pueden obtener características como sus coordenadas espaciales (latitud, longitud) elevación, años en estudio, en servicio y efectivos, entre otros.

A continuación, en la Tabla 3 se presentan las estaciones de influencia seleccionadas para su análisis, así como sus características principales. En total se tomaron en cuenta 14 estaciones que tienen relación con la zona de estudio, así como las más cercanas a ella, con años de servicio que varían entre 26 y 79.

Tabla 3 "Datos de las Estaciones Meteorológicas CLICOM seleccionadas para el análisis en la zona de estudio"

N°	Código	Nombre	Años de Servicio	Años efectivos	Año inicial	Año Final	latitud (Este) UTM	longitud (Norte) UTM	altitud (z)
1	16001	ACUITZIO DEL CANJE, MICH	54	38.6	1961	2015	258606.7	2157770.8	2200
2	16120	SANTIAGO UNDAMEO	53	52.4	1953	2007	258755.5	2168843.2	2130
3	16022	COINTZIO, MICH	66	60	1940	2006	258755.5	2168843.2	2096
4	16114	SAN MIGUEL DEL MONTE, MICH	51	40.4	1963	2015	279741	2168572.8	1965
5	16055	JESUS DEL MONTE, MICH	79	76.6	1935	2015	269391.6	2179776.8	2180
6	16081	MORELIA, MICH	68	67.1	1947	2015	269391.6	2179776.8	1908
7	16080	MORELIA (OBS), MICH	29	27.4	1986	2015	269391.6	2179776.8	1912.7
8	16247	CAPULA, MICH	26	17.8	1981	2007	248418	2180060.8	2097
9	16028	CUITZILLO GRANDE, MICH	38	36.6	1969	2007	280014.7	2190715.6	1987
10	16512	EL COLEGIO, MICH	29	26.1	1986	2015	269535.3	2190848.9	1880
11	16254	TEREMENDO, MICH	33	32.5	1982	2015	238093.8	2191285.9	2188
12	16139	VILLA MADERO, MICH	41	40.6	1943	1984	258458.6	2146698.5	2097
13	16045	EL TEMAZCAL, MICH	49	48.3	1965	2014	290362.9	2179517.6	2220
14	16513	EL JACAL (DGE), MICH	34	24.4	1981	2015	259206.4	2202061.1	1874



Adicionalmente se descargaron datos de temperatura y precipitación mensuales y anuales, para todos los años efectivos. Se procedió al llenado de datos para después obtener la Precipitación Media mensual y posteriormente la anual (Tabla 4) para cada una de las estaciones. Con los datos procesados, se realizaron gráficos de los valores medios mensuales de las variables, los cuales pueden encontrarse en el apartado de anexos II que muestran el comportamiento tanto de precipitación como de temperatura durante todos los años de servicio de cada zona del área en estudio. Finalmente, para las estaciones climáticas seleccionadas (una vez analizadas por separado), se creó una tabla de datos a manera de resumen en la que se observan los datos de Precipitación Media Anual (PMA) y Temperatura Media (TMA) Anual.

Tabla 4 Valores registrados de PMA y TMA de las estaciones asociadas a la zona de estudio.

N°	ESTACIONES	PMA (mm)	TMA (°C)
1	ACUITZIO DEL CANJE, MICH	1000.7	17.0
2	SANTIAGO UNDAMEO	885.0	16.2
3	COINTZIO, MICH	832.3	17.7
4	SAN MIGUEL DEL MONTE, MICH	1080.4	16.1
5	JESUS DEL MONTE, MICH	936.8	17.4
6	MORELIA, MICH	810.7	18.3
7	MORELIA (OBS), MICH	816.9	19.0
8	CAPULA, MICH	832.2	15.1
9	CUITZILLO GRANDE, MICH	699.2	17.2
10	EL COLEGIO, MICH	797.2	18.1
11	TEREMENDO, MICH	767.8	17.1
12	VILLA MADERO, MICH	1311.1	15.9
13	EL TEMAZCAL, MICH	1456.5	17.2
14	EL JACAL	875.5	18.4

Una vez realizado el análisis se procedió a generar sus respectivos mapas (Figura 6 y Figura 7) para comprender de mejor forma el comportamiento y distribución espacial de las variables con respecto a la zona de estudio y al acuífero Morelia-Queréndaro.

C. *Polígonos de Thiessen*

Se generaron los polígonos de Thiessen para la zona de estudio, considerando el área de influencia de cada estación meteorológica presente, utilizando un total de 14 estaciones, (Tabla 3). De acuerdo con esta metodología, a cada estación se le asigna una superficie de influencia, la cual es obtenida representando las estaciones en un plano y uniéndose a través de rectas. A estas rectas posteriormente se les trazan sus mediatrices hasta que se intersecan entre sí. Con los límites del área en estudio y los que definen las mediatrices se obtiene la superficie de influencia para cada estación (Pizarro, et al., 2003).

De acuerdo con la Figura 6 y con base en los datos de precipitación media anual registrada en cada estación meteorológica, la escala de colores muestra la distribución de la precipitación media anual, donde los mayores registros (colores azules más intensos) se presentan en las estaciones El Jacal, El Temazcal, San Miguel del Monte y Acuitzio del Canje; por su parte, los menores registros (colores azules más claros) se presentan en las estaciones de Cuitzillo, Terremendo y el Colegio. (Tabla 4).

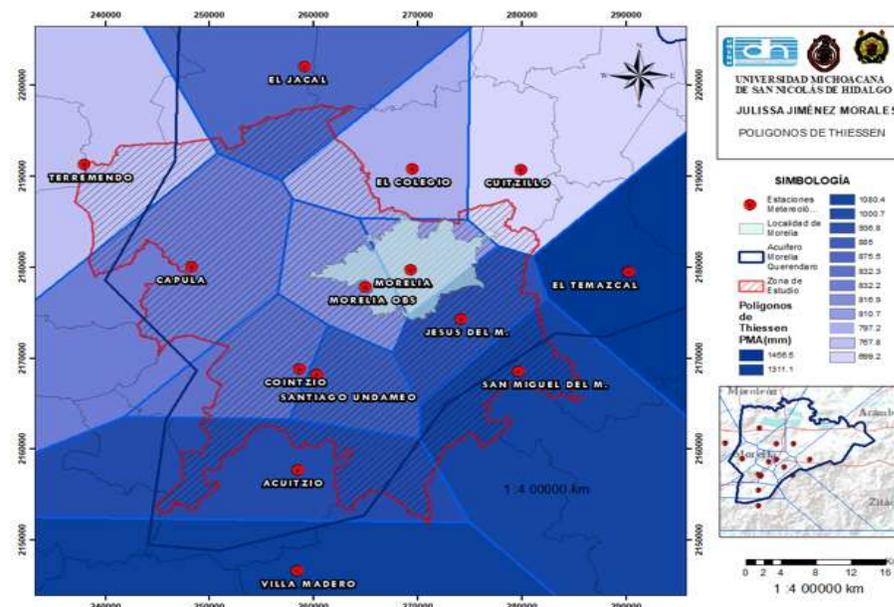


Figura 6 Definición de los Polígonos de Thiessen con el área de influencia de las estaciones seleccionadas y el municipio de Morelia.

Adicionalmente, con los datos de las estaciones meteorológicas también se realizó un mapa (Figura 7) de interpolación utilizando el comando IDW mediante distancia inversa ponderada, la cual determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Así se puede conocer la influencia que posee en cuestión de la zona de estudio.

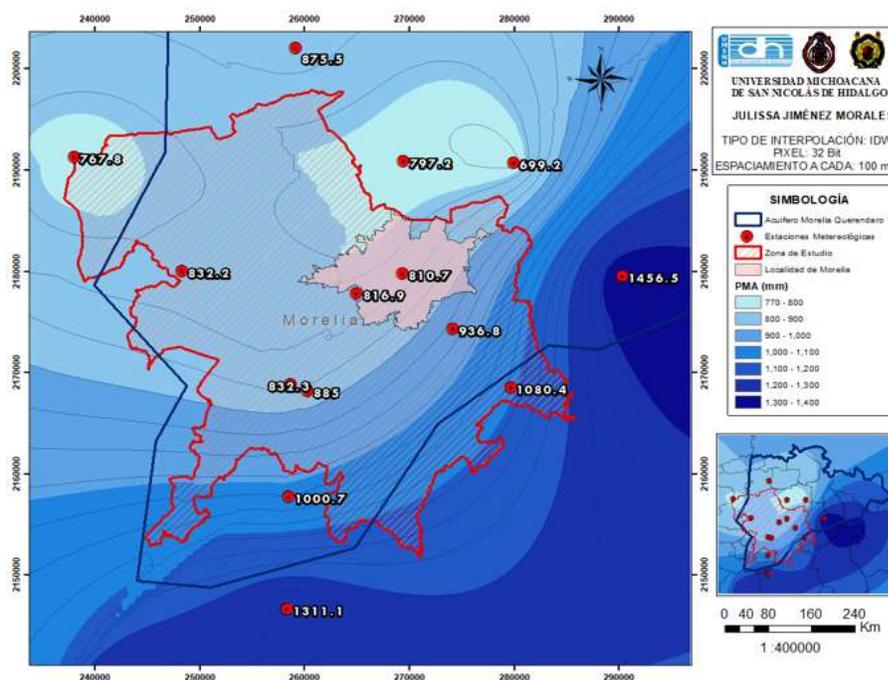


Figura 7 Interpolación de la precipitación media anual con el método IDW.



En los Figura 8 y Figura 9 se presenta el promedio mensual de los datos de precipitación y temperatura (respectivamente) para las estaciones de estudio durante todos los años de servicio. Los gráficos muestran el cambio de cada variable durante un año medio y representa los límites inferiores y superiores registrados de cada parámetro (su rango de variación).

Respecto a los datos de precipitación contenidos en la Figura 8, se representan los valores mínimo y máximo que se han registrado en todas las estaciones estudiadas, los valores por debajo y por arriba de la línea punteada que es el promedio de cada mes de todas las estaciones representa el intervalo en el que se mueve la precipitación durante cada mes de todos los años estudiados. Se puede observar que hay una amplitud mayor en los meses de lluvia (mayo-noviembre o de junio-octubre), la variación de lluvia es mayor que en los meses de secas que es más constante, lo cual puede afectar el comportamiento de esta variable sobre la investigación de isótopos estables del agua de lluvia.

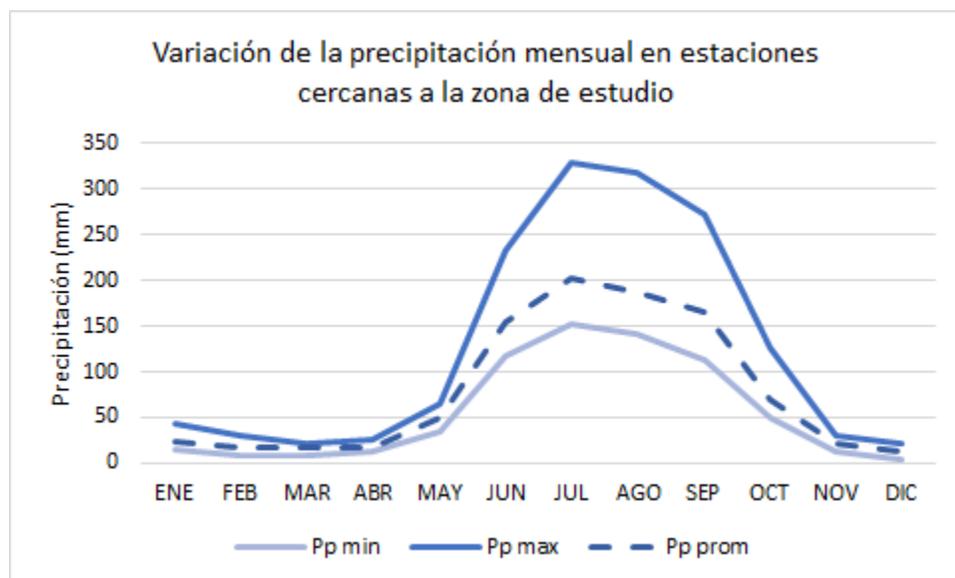


Figura 8 Resumen de los datos de precipitación para todas las estaciones de estudio, incluyendo el intervalo de mínimos y máximos.



En el caso de la temperatura media, en la Figura 9 se representa la información de las estaciones en estudio y se puede observar que, a diferencia de la precipitación, la curva de mínimos y máximos asociados con la temperatura media mensual es más constante, con las temperaturas más altas entre abril y julio. La distribución interanual de esta variable también modifica la firma isotópica de las precipitaciones registradas en episodios de lluvia de los meses más cálidos respecto a los más fríos.

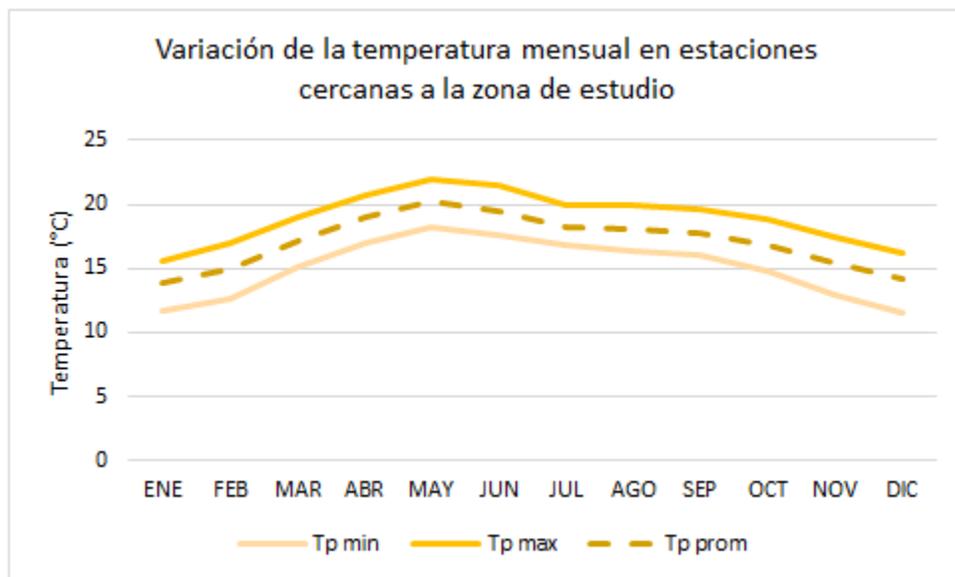


Figura 9 Resumen de los datos de Temperatura de todas las estaciones en estudio mediante el intervalo de mínimos y máximos.



1.3 Justificación y Objetivos

1.3.1 Justificación

La necesidad de realizar este proyecto tiene su interés principal en conocer la problemática actual de falta de recurso que atraviesa la ciudad de Morelia, ya que la zona en estudio carece de información primordial para el manejo correcto de sus fuentes de abastecimiento de agua.

En la actualidad se han acentuado distintos problemas relacionados con la explotación del acuífero Morelia-Queréndaro (de cantidad y calidad), el cual es una fuente importante para el suministro de agua en el Municipio de Morelia.

Para contribuir en su análisis se propone la realización de un estudio que permita conocer el origen de la recarga de distintas fuentes de abastecimiento en la ciudad (manantiales, bombeo en el acuífero, suministro superficial a través de embalses, etc.), considerando la aplicación de técnicas isotópicas que permitan diferenciar las distintas firmas del agua dependiendo de su origen que contribuyan al suministro de agua en la ciudad de Morelia.

En este sentido, se espera obtener información importante de la disponibilidad y comportamiento del recurso tanto superficial, como subterránea y cuidar de la sustentabilidad de los recursos hídricos, a través de la caracterización isotópica de las componentes del ciclo hidrológico local.

Para llevar a cabo este trabajo, se debe incluir información que pueda complementar el estudio (variables climáticas, variables fisicoquímicas, variables orográficas, etc.), y así conocer el comportamiento que tienen cada una de las fuentes de abastecimiento mencionados anteriormente para la ciudad de Morelia.



1.3.2 Objetivos

A. *General*

Identificar cuáles son las principales áreas de recarga hídrica en la región de Morelia mediante el contexto histórico y un estudio isotópico que permita trazar el recorrido del agua (ciclo hidrológico), aplicando técnicas isotópicas y la medición de isótopos estables del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), los cuales son característicos y diferenciables entre sus distintos orígenes; estos se pueden encontrar en los átomos de agua de lluvia, de ríos, pozos y todo tipo de fuente de recarga al acuífero, llevando a cabo un muestreo del mismo en los diferentes puntos de ubicación de las fuentes de abastecimiento de este líquido y así seguir el rastro de agua, con afán de estudiar y saber que se está sobreexplotando así como llevar un control en la extracción y explotación de este recurso.

B. *Específico*

- Localizar las fuentes de abastecimiento de agua potable que suministra la ciudad de Morelia
- Realizar muestreos de agua de los distintos pozos que abastecen a la ciudad de Morelia
- Implementar una campaña de muestreo de las principales fuentes de abastecimiento para la zona en estudio (manantiales, pozos, presa, corrientes superficiales, etc.)
- Determinar e interpretar los resultados de los análisis de isótopos estables del agua.
- Implementar medidas preventivas que permitan conservar los recursos hídricos de la zona de estudio y mitigar su sobreexplotación.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Evolución del flujo en el agua subterránea

La disponibilidad de agua, en cantidad y calidad, es hoy en día una necesidad clave para el desarrollo adecuado de las poblaciones humanas. La presión por el recurso agua puede llegar a afectar su disponibilidad y calidad, disminuyendo con esto su aprovechamiento e inclusive su uso para las necesidades más vitales de las poblaciones actuales y futuras. Para entender mejor su comportamiento y caracterización de las aguas subterráneas, se muestran los aspectos conceptuales siguientes:

2.1.1 Importancia del agua subterránea

El agua subterránea constituye la fuente principal de abastecimiento de agua en nuestro país, especialmente en la parte norte, en donde las precipitaciones son escasas e irregulares y las temperaturas muy altas. Sin embargo, estas fuentes no son inagotables y es necesario preservarlas (Ruíz, 2008). Cuando la extracción de las aguas subterráneas supera la recarga, se consume el agua almacenada en los acuíferos y se generan abatimientos de los niveles freáticos. La disponibilidad de agua puede convertirse en un freno al desarrollo, por lo cual se requiere de acciones en el proceso de aprovechamiento del agua subterránea, con el fin de optimizar su uso desde una perspectiva del desarrollo (Manzano-Solís, 2007).

Ante una situación prolongada de sobreexplotación del agua subterránea, el volumen de agua almacenado en un acuífero disminuirá progresivamente, provocando una serie de consecuencias negativas, que van desde el cambio de la dirección del flujo hasta el agotamiento del acuífero, entre otros impactos ambientales. Esto podría provocar la disminución de la calidad del agua, frenar el crecimiento urbano, desaparición o reducción de los caudales base de los ríos, la eliminación de la vegetación nativa o incluso la pérdida del ecosistema por la degradación completa de las fuentes de abastecimiento (Ontiveros et al., 2018).



2.1.2 Medición del agua de lluvia

Lluvia, según la Organización Meteorológica Mundial, es la precipitación de partículas líquidas de agua, mayores a 0.5 mm de diámetro o de gotas menores pero muy dispersas, que se presenta como un fenómeno hidrometeorológico que se genera en la atmósfera a partir de la condensación del vapor de agua contenido en las nubes. El agua de lluvia cae de forma irregular tanto en cantidad como en el tiempo y el espacio, formando ríos, mediante las escorrentías provenientes de las montañas que delimitan una cuenca hidrográfica, alimentando y en su caso, aumentando las reservas de humedales y de embalses antes de desembocar en el mar. Otra parte del agua de lluvia se infiltra a través del suelo para formar parte del flujo subterráneo en distintos sistemas acuíferos. Así como sus efectos son benéficos también, en ocasiones, son catastróficos. (IMTA, 2019).

Por ello, es importante medir tanto la cantidad de lluvia como su tiempo de precipitación y establecer su lugar de destino con la finalidad de prevenir desastres naturales y crear políticas públicas destinadas a regular, entre otras acciones, desarrollos inmobiliarios, áreas de reserva ecológica, ubicación de infraestructuras urbanas, industrial e hidroagrícola, por mencionar las más importantes. Medir el agua de lluvia sirve para tomar decisiones que favorezcan un desarrollo sustentable y seguro. La medición del agua de lluvia en México se lleva a cabo en las estaciones climatológicas, tanto automatizadas como convencionales, establecidas en puntos estratégicos a lo largo y ancho del territorio nacional, las cuales están a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Servicio Meteorológico Nacional, en operación en todo el país. Un ejemplo del registro de datos son los reportados por la estación climatológica convencional Progreso, que los realiza durante los 365 días del año a partir de las ocho de la mañana (hora local). Los parámetros que se miden en dicha estación ejemplo son los siguientes:

- Lluvia acumulada en 24 horas utilizando un pluviómetro.
- Temperatura máxima, mínima durante las 24 horas precedentes a la medición y ambiente a las 8 horas.
- Dirección del viento, intensidad, visibilidad.



El agua de lluvia en el sentido isotópico constituye una de las principales fuentes de las aguas subterráneas, además del agua contenida en la zona de poro y la de la Zona No Saturada (ZNS). La variación espacial y temporal del contenido isotópico de la lluvia puede usarse para estudiar tanto la zona de la recarga en los acuíferos, como la época en que tiene lugar ésta.

De acuerdo con (Soler, A. et al., 2015), la composición isotópica del agua de lluvia está influenciada por diversos factores, tales como:

- *Efecto de temperatura:*
la temperatura es el primer parámetro de control de la composición isotópica del agua de lluvia. Ésta depende de la temperatura a la cual se evaporó el agua de mar y, aún más, de la temperatura a la cual condensó la lluvia o la nieve. Es un efecto íntimamente ligado al fraccionamiento isotópico.
- *Efecto altitudinal:* en el lado de barlovento de las montañas (no a sotavento) los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en lluvia disminuyen (aguas más ligeras) al aumentar la altitud. Esto se debe a una combinación de factores, fundamentalmente dos: 1) aguas arriba la lluvia procede de masas de vapor progresivamente empobrecidas isotópicamente por la pérdida de isótopos pesados en las lluvias precedentes y 2) aguas arriba la temperatura es más baja y por tanto el fraccionamiento de la condensación de vapor es mayor. Este efecto es de gran utilidad para localizar la ubicación de las zonas de recarga, ayudando a identificar y discriminar las zonas de recarga de acuíferos multicapa o de líneas de flujo individuales en acuíferos de gran espesor. En algunas zonas el gradiente isotópico de las lluvias de verano es distinto al de las lluvias de invierno (en general debido a la distinta procedencia de los frentes nubosos que ocasionan las lluvias de ambas estaciones), y esto ha podido ser utilizado para trazar la recarga de verano y de invierno en distintas zonas del acuífero o distintos acuíferos (Lambán y Custodio, 1999).



- *Efecto de latitud:* los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en lluvia disminuyen al aumentar la latitud. Se trata de un efecto aparente pues en realidad se debe a la temperatura a la cual se generan las masas de vapor y de lluvia o nieve a escala del planeta, combinado con una escasa mezcla de las masas de aire (y las nubes) que se mueven a distinta latitud.
- *Efecto de continentalidad:* los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en lluvia disminuyen tierra adentro, medidos desde la costa. Esto se debe fundamentalmente a la historia previa de las masas de vapor, que son progresivamente más ligeras tierra adentro por la sucesiva pérdida de humedad y de isótopos pesados, debido al desgaste cinético de la nube.
- *Efecto de cantidad:* las lluvias más abundantes son más ligeras. Esto se debe a que la lluvia se va haciendo más ligera conforme va condensando la humedad residual del aire, previamente empobrecida en isótopos pesados durante los episodios anteriores de lluvia.
- *Variación estacional:* la lluvia de invierno es más ligera que la de verano (hasta un 10 % de diferencia); esto se debe también a la temperatura de evaporación y de condensación, pues a menor temperatura de evaporación, más ligeras son las nubes (mayor es el fraccionamiento) y también más abundantes son las lluvias.



2.1.3 Firma química isotópica.

La composición química del agua subterránea permite conocer su origen y los procesos que la afectan, dando paso a la determinación de su firma química específica. Su determinación se realiza por medio del análisis de características físicas y químicas de la concentración en iones mayoritarios, minoritarios, elementos traza, e isótopos. Estos estudios se realizan por medio de la caracterización fisicoquímica, abarcando la identificación de procesos de intercambio iónico, interacción agua-roca, precipitación y procesos de mezcla; así como los tiempos de residencia, distancia recorrida, mineralogía y geología del acuífero. Además, el agua subterránea sigue esquemas de flujo predecibles y gobernados por la topografía que permiten asociar las características fisicoquímicas de la misma a lo largo de su trayectoria sobre la línea de flujo (Wallick, 1981; Appelo, 1996).

Las sustancias orgánicas disueltas en agua, aunque frecuentes, aparecen en concentraciones por lo común mucho menores que los constituyentes inorgánicos. La composición química del agua subterránea natural se define a partir de los análisis de muestras recogidas adecuadamente y se cuantifica por medio de la concentración de cada constituyente analizado. Aunque son más de 60 los constituyentes y propiedades del agua subterránea natural que pueden encontrarse cuantificados en análisis químicos, por lo general y en estudios convencionales, sólo se determinan entre 10 y 20 parámetros fundamentales. Aunque la composición media del agua subterránea suele considerarse invariable en un acuífero o porción del mismo, no debe olvidarse que las interacciones agua-medio determinan dicha composición. Se trata de procesos dinámicos que se desarrollan a ritmo diverso, tanto en el espacio como en el tiempo. En consecuencia, la composición del agua subterránea natural debe contemplarse con la perspectiva de su posible variación espacio-temporal. Una composición química concreta no queda completamente definida si no se refiere a un lugar y momento determinados. Por tanto, como consecuencia de su composición y de acciones naturales externas, el agua presenta una serie de características fisicoquímicas específicas que le confieren dicha composición química concreta (IGME, 2005).



2.1.4 Agua de reciente infiltración y sus propiedades

El agua precipitada sobre la superficie de la Tierra queda detenida, se evapora, discurre por ella o penetra hacia su interior. Se define como infiltración al paso del agua de la superficie hacia el interior del suelo (Figura 10). Es un proceso que depende fundamentalmente del agua disponible a infiltrar, la naturaleza del suelo, el estado de la superficie y las cantidades de agua y aire inicialmente presentes en su interior (A. Rodríguez, 2017).

La infiltración sirve como fuente para la recarga de acuíferos, así como también para mantener la humedad del suelo. Se dice que la infiltración será total cuando la capacidad de infiltración del suelo sea mayor que la intensidad de precipitación, para este caso se considera que no ocurrirá escorrentía directa (IH, 2020).

A medida que el agua se infiltra desde la superficie, las capas superiores del suelo se van humedeciendo de arriba hacia abajo, alterando gradualmente su humedad. En cuanto al aporte de agua, el perfil de humedad tiende a la saturación en toda la profundidad, siendo la superficie el primer nivel a saturar. Normalmente la infiltración proveniente de precipitaciones naturales no es capaz de saturar todo el suelo, sólo satura las capas más cercanas a la superficie, conformando un perfil típico donde el valor de humedad decrece con la profundidad (Rodríguez A., 2017).

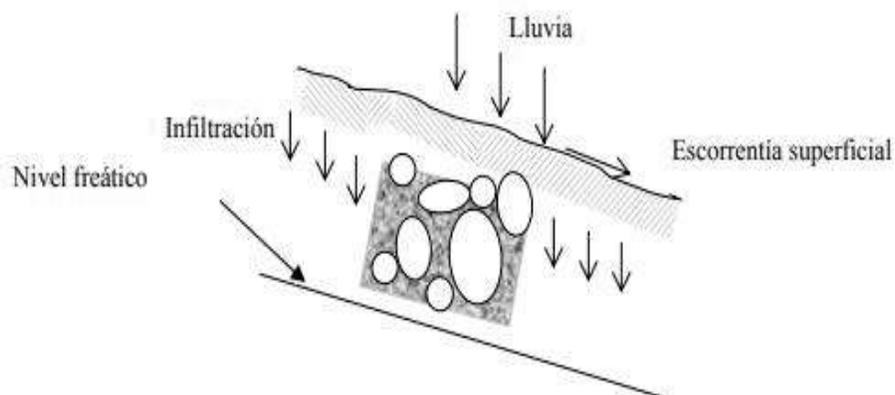


Figura 10 Proceso de infiltración en el suelo



El cambio de uso de suelo en el territorio de una cuenca afecta directamente la infiltración y escurrimiento superficial de agua, alterando el balance del ciclo hidrológico. Por lo que estimar parámetros de infiltración y escurrimiento por tipo de uso de suelo y vegetación (USV), es fundamental para diferenciar el impacto que ejerce el cambio de uso del suelo, sobre el balance hídrico de la misma. (Lozano T. S., 2020)

Algunas aguas que se infiltran permanecerán en la capa superficial del suelo, donde gradualmente se moverá vertical y horizontalmente a través del suelo y el material subsuperficial. Parte del agua puede infiltrarse más profundamente, recargando acuíferos de agua subterránea. Si los acuíferos son lo suficientemente porosos como para permitir que el agua se mueva libremente a través de ella, se pueden perforar pozos en el acuífero y utilizar el agua para distintos propósitos. El agua puede viajar largas distancias o permanecer en el almacenamiento de aguas subterráneas durante largos períodos, antes de regresar a la superficie o filtrarse a otros cuerpos de agua, como los arroyos y los océanos (USGS, 1999).

2.1.5 Agua subterránea profunda y el cambio de sus propiedades

El agua subterránea es aquella parte del agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales. Este recurso es almacenado naturalmente mediante un acuífero, que es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua.

El agua subterránea que se encuentra almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico. Se han realizado estudios que permiten calcular que aproximadamente el 30% del caudal de superficie proviene de fuentes de agua subterránea.

Existen distintos tipos de acuíferos (Figura 11), dependiendo de sus características y profundidades, pudiendo clasificarse como sigue:

- *Acuíferos libres*. Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por saturación, es decir, el agua que ceden es la procedente del drenaje de sus poros.
- *Acuíferos confinados*. Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos.
- *Acuíferos semiconfinados*. Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua.

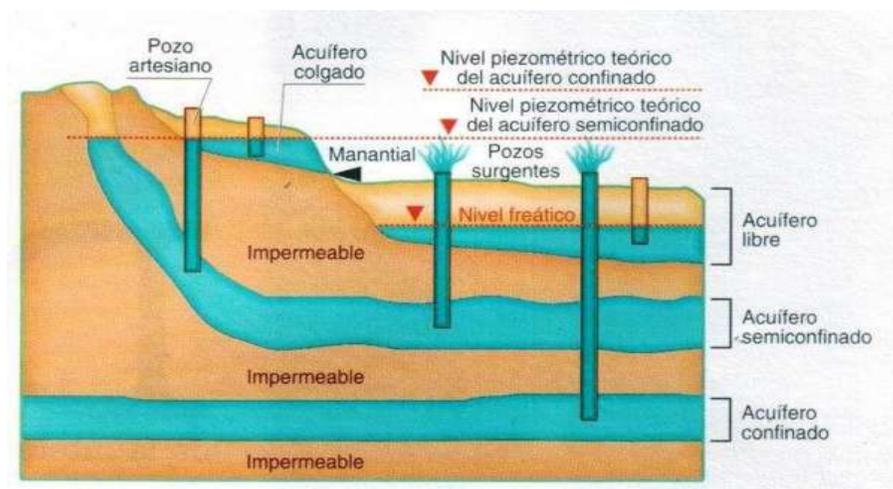


Figura 11 Tipo de Acuíferos

La propiedad de los acuíferos de contener agua, está gobernada por varios factores: porosidad, permeabilidad, transmisividad específica y coeficiente de almacenamiento. Conocer estas características permite evaluar la magnitud del recurso y su aprovechamiento racional sin peligro a agotarlo (Arocha, 1980).

2.2 Diagrama de Piper

Este diagrama está conformado por dos triángulos equiláteros y un rombo que recoge la información de ambos triángulos (Figura 12); es usado para representar la composición aniónica y catiónica respectivamente de una muestra de agua específica (utiliza unidades de porcentaje de miliequivalentes por litro). Se construye proyectando la información de concentración iónica hacia el rombo, donde se evalúa el punto de intersección de ambos triángulos y se determina la familia a que corresponde la muestra de agua, según la zona en la que recaiga el punto dentro del rombo. Para su construcción es necesario manejar las concentraciones en las unidades utilizadas como miliequivalentes por litro meq/L, o (eq/L) equivalentes por litro. Un equivalente es esencialmente un mol de carga; estas unidades miden la concentración de las cargas asociadas con solutos iónicos y están relacionadas a la concentración molar (Fitts, 2002).

Estas a su vez son transformadas a porcentaje en el diagrama. Donde cada uno de los vértices en los triángulos corresponde un 100% de un anión o catión. Además, este diagrama permite reflejar las variaciones provocadas por la presencia de mezclas, precipitaciones, disoluciones, procesos de intercambio iónico que están ocurriendo en el comportamiento del agua, es decir, visualizar la evolución hidrogeoquímica del agua.

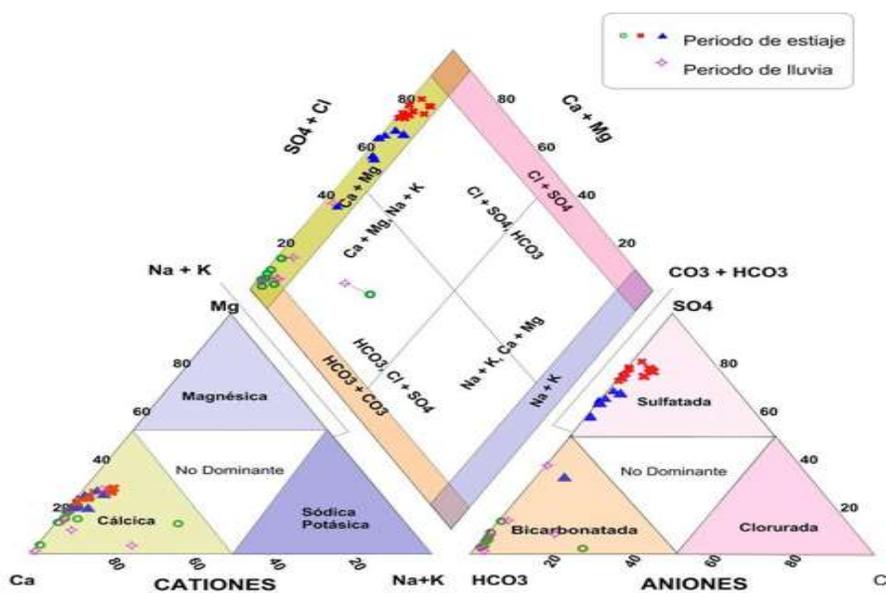


Figura 12 Diagrama de Piper



En uno de los triángulos del diagrama se representan los cationes (Na^+ y K^+ sumados) y en el otro los aniones principales. El paso desde ambos triángulos hasta el rombo es inmediato y muy simple, como se aprecia en la Figura 12. Por tanto, cada muestra de agua analizada queda representada por tres puntos, ubicados en los dos triángulos y el rombo.

2.3 Isótopos estables de la molécula del agua

Los estudios con los isótopos estables de elementos de interés biológico se han convertido en una herramienta útil para conocer el intercambio de las moléculas en la biosfera. Como el agua es una de las moléculas más abundantes en dicho intercambio, los estudios con los isótopos estables del hidrógeno y el oxígeno han sido un componente fundamental de muchos trabajos. Un componente esencial en el estudio de los sistemas de flujo del agua subterránea es su contenido isotópico. Existen dos tipos de isótopos, radiactivos y estables. (Antalia G., 2011)

2.3.1 ¿Qué son los isótopos?

Los isótopos son formas distintas de un mismo elemento; distintas en términos de masa y propiedades físicas, pero con las mismas propiedades químicas. Los isótopos de un elemento son átomos con igual número atómico pero distinto peso atómico. El peso atómico (en realidad masa atómica) es casi, aunque no exactamente, la suma de las masas de los protones, neutrones y electrones que constituyen un átomo.

Cuando protones, neutrones y electrones se combinan para formar un átomo, parte de su masa se transforma en energía que se desprende, por lo que el peso atómico es ligeramente inferior a la suma de sus masas.

Aunque la mayoría de los isótopos son estables, algunos emiten radiación. Estos radioisótopos se utilizan en aplicaciones médicas e industriales, en el seguimiento ambiental y estudios biológicos.



2.3.2 Distintos tipos de isótopos (estables e inestables)

Los elementos hidrógeno (H) y oxígeno (O) que conforman la molécula del agua, en su estado natural, están formados por una mezcla de isótopos. En la naturaleza estos isótopos se manifiestan como especies estables e inestables, dependiendo de los límites de detección del tiempo de decaimiento radiactivo (Hoefs, 1988).

A. *Isótopos estables*

Los isótopos estables tienen el mismo número de protones y de electrones, pero diferente número de neutrones. En general, los isótopos estables de un elemento se encuentran en diferente abundancia: uno de los isótopos está en mayor abundancia y uno o dos isótopos en menor abundancia. Debido a que el comportamiento físico y químico es diferente para cada uno de los isótopos estables de un elemento, éstos pueden usarse como trazadores de moléculas en la biosfera.

En este caso los isótopos estables se vuelven una herramienta ya que son trazadores del sitio, elevación y recorrido del agua subterránea y pueden ser empleados para determinar procesos de recarga. Estos isótopos como se indica en su nombre son estables, ya que no cambian con el tiempo ni se modifican con procesos físicos ni químicos (Kehew, 2001).



En la Tabla 5 se menciona la abundancia promedio para cada elemento de isótopo estable contenida en la Tierra.

Tabla 5 Abundancia promedio en la Tierra de los isótopos estables de elementos de interés biológico (tomado de Ehleringer y Osmond, 1989)

Elemento	Isótopo	Abundancia promedio en la Tierra (%)
Hidrógeno	^1H	99.985
	^2H o D	0.015
Carbono	^{12}C	98.89
	^{13}C	1.11
Oxígeno	^{16}O	99.759
	^{17}O	0.037
	^{18}O	0.204
Nitrógeno	^{14}N	99.63
	^{15}N	0.37
Azufre	^{32}S	95.0
	^{33}S	0.76
	^{34}S	4.22
	^{35}S	0.014

B. Isótopos inestables

Los isótopos radioactivos (inestables) son átomos isótopos que decaen espontáneamente con el tiempo, formando otros isótopos que emiten partículas alfa o beta y hasta gamma (Kendall, 1998).

- *Tritio*. El Tritio es un isótopo radiactivo producido naturalmente por la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera y artificialmente con la descarga de bombas de fusión principalmente en la estratósfera (Salomón, 2005). Los valores de tritio se expresan en concentraciones absolutas llamadas unidades de tritio (Tritium Units, TU), donde una unidad TU corresponde a 1 átomo de tritio por 10^{18} átomos de hidrógeno.



Un gran componente de tritio artificial fue producido principalmente al probar armas nucleares a mediados de la década de los 60 's. Dependiendo de las unidades TU observadas en muestras de agua, el agua puede ser cualitativamente fechada entre el periodo anterior a las pruebas con las bombas (antes de 1960), posterior a las pruebas con las bombas (desde 1960 a 2005) o una mezcla de ambos.

- *14-C*: El carbono-14 es un isótopo radiactivo producido en la atmósfera por la interacción de los neutrones de rayos cósmicos con el nitrógeno 14 (^{14}N). El carbono-14 tiene una vida media de 5,730 años y decae a un ^{14}N estable por la emisión de partículas beta.

El carbono-14 puede ser usado para fechar el agua subterránea a edades hasta de 60,000 años, aunque este rango puede ser más corto por la pobre preservación y contaminación del viejo material.

2.3.3 Distintos tipos de isótopos en la molécula del agua

-Elementos (Oxígeno e Hidrógeno) ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , ^2H , ^3H .

En la naturaleza se conocen 3 isótopos del Hidrógeno, dos estables y uno radioactivo:

- 1) ^1H o H: 99,98 % del hidrógeno total; como isótopo estable
- 2) ^2H o D (Deuterio): 0,016 %; como isótopo estable
- 3) ^3H o T (Tritio): $5 \cdot 10^{-6}$ %; como isótopo radioactivo

Respecto a los diferentes isótopos del Oxígeno, solo son de interés en la hidrogeología los siguientes isótopos estables:

- 1) ^{16}O : constituye el 99,76 % de todo el oxígeno
- 2) ^{17}O : el 0,04 %
- 3) ^{18}O : el 0,20 %



Aunque el ^{17}O es el menos abundante de los tres, es tan poco abundante que se mide con más incertidumbre que el ^{16}O . Por esta razón generalmente se usa la relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, que ofrece un mayor contraste y una mayor facilidad de medición.

El estándar internacional para la medida de las relaciones $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ es un agua de mar que se denomina SMOW (Vienna - Standard Mean Ocean Water, (Soler, A. et al., 2000). Después de las últimas calibraciones del estándar, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) recomienda usar como estándar las últimas calibraciones, llamadas VSMOW. Obviamente la desviación isotópica de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del estándar respecto a él mismo es igual a cero. Esta nueva recalibración no afecta en absoluto a las medidas previas, siendo más una recomendación formal. La combinación de los diferentes isótopos existentes de hidrógeno y de oxígeno permite formar hasta 18 moléculas de agua diferentes. De ellas, las más usuales desde un punto de vista probabilístico son: $^2\text{H} \ ^{16}\text{O}$, HD^{16}O y $^2\text{H} \ ^{18}\text{O}$.

Las propiedades de los diferentes isótopos de un mismo elemento son muy similares, pero las pequeñas diferencias de movilidad iónica, tensión de vapor, difusividad, etc., hacen que el agua natural tenga ligeras diferencias de composición isotópica según su origen en el ciclo hidrológico, lo cual puede ser explotado en el área de la hidrología isotópica. Así, el agua de mar es más pesada o enriquecida en HD^{16}O y HD^{18}O que el agua dulce, mientras que el vapor de agua de mar es más ligero o enriquecido en $^2\text{H} \ ^{16}\text{O}$ respecto al agua de mar de la que es originaria. El vapor de agua de lagos o embalses es más pesado o enriquecido en HD^{16}O y HD^{18}O que el agua de la que procede. Es decir, existe un fraccionamiento isotópico al pasar de un estado a otro, lo cual resulta útil para estudiar procesos ocurridos en el ciclo hidrológico. (Soler A. et al., 2000).



La proporción ^2H Y ^{18}O con respecto a los isótopos estables comunes ^1H Y ^{16}O , pueden ser medidas con un espectrofotómetro de masas. Las concentraciones de esa proporción al tocar la Tierra obedecen una relación conocida como la línea meteórica mundial (LMM). Esta relación tiene carácter local o regional y depende de las condiciones climáticas de cada región en el planeta (Clark y Fritz, 1997).

Por ejemplo, en regiones áridas, el contenido de isótopos en el agua subterránea presenta una fuerte firma de evaporación, cuyas diferencias entre la cantidad de isótopos con la elevación del sitio muestreado donde cae la lluvia puede usarse para determinar la posición de zonas de recarga (Clark y Fritz, 1997).

Una vez que el agua esté en el acuífero su composición isotópica no sufre cambio, a menos que se produzca un intercambio con oxígeno de la roca. Estos procesos de intercambios son por lo general muy pequeños a la temperatura normal del acuífero y solo se perciben en caso de agua termal (Craig, 1961).

La composición entonces del agua subterránea se relaciona con las precipitaciones en la región donde se recarga el sistema del flujo de interés y en el tiempo en que esto ocurre. Es necesario indicar que el agua subterránea ingresa, por la zona de recarga y por donde se incorporará principalmente al sistema particular, ya sea local intermedio o regional.

El aporte procedente de agua superficial (río, lago) será menor o aporta agua a otro sistema de flujo, por ejemplo, de uno de tipo local. Así, cuando el agua de recarga proviene de una fuente superficial, el agua refleja la composición isotópica media de los ríos y lagos (Craig, 1961).

2.3.4 Isótopos inestables de la molécula de agua

Existen otros cuatro isótopos del oxígeno: ^{14}O , ^{15}O , ^{19}O y ^{20}O , todos ellos radiactivos, pero sin interés debido a su corto periodo de semidesintegración (del orden de segundos).



2.4 Isótopos estables aplicados a la hidrogeología

Los isótopos son el instrumento más eficaz y poderoso disponible para estimar la edad, la vulnerabilidad y la sostenibilidad de los recursos hídricos. Cuando el agua subterránea de un acuífero es “antigua”, el flujo del agua es lento y el acuífero puede tardar mucho tiempo en recargarse. En cambio, las aguas subterráneas jóvenes se renuevan fácil y rápidamente por medio del agua de lluvia, a pesar de ser muy susceptibles a la contaminación y a los cambios de las condiciones climáticas.

El conocimiento de la edad del agua da a los científicos y los Gobiernos una idea clara de la rapidez con la que los acuíferos se recargan.

En hidrología, se utilizan algunos radioisótopos naturales presentes en el agua, tales como el tritio (^3H), el carbono 14 (^{14}C) y radioisótopos de gases nobles, para estimar la edad del agua subterránea, que puede ir de unos pocos meses hasta millones de años.

Dado que estos isótopos decaen con el paso del tiempo, su abundancia disminuye a medida que pasan los años. Cuanto más altos son los niveles, más joven es el agua, y cuanto más bajos, más antigua. Por ejemplo, el agua subterránea con cantidades detectables de tritio puede llegar hasta los 60 años aproximadamente, mientras que si no contiene este isótopo ha de ser más antigua. Mientras el tritio se emplea para datar el agua subterránea que acaba de cargarse, es decir, que no supera los 60 años de edad, el carbono 14 se utiliza para aguas de hasta 40 000 años de antigüedad y el kriptón 81, para aquellas que pueden alcanzar un millón de años.



2.5 Gráfico $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$

Como se ha presentado anteriormente en el apartado 2.1.2, se han visto diferentes factores que controlan la composición isotópica del agua; en resumen, estos factores se generalizan en dos: la temperatura y el desgaste cinético.

Estas variaciones de oxígeno y deuterio del agua serán covariantes, ya que ambos isótopos están asociados a la misma molécula, y por tanto todas las aguas de lluvia se proyectan sobre una recta (Figura 13)

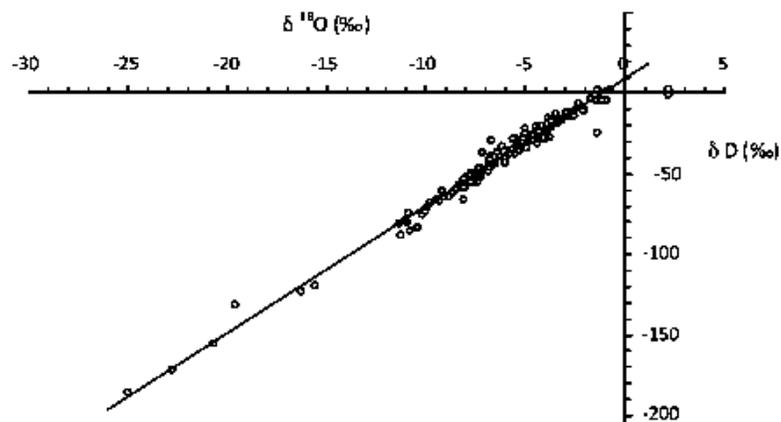


Figura 13 Relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el agua de lluvia

A esta recta se le llama Línea Meteorica Mundial (LMM). Cuando las composiciones isotópicas de precipitaciones de todo el mundo se grafica en $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$, pueden ser descritas por la ecuación (Craig, 1961):

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \text{ (en } \text{‰})$$

La pendiente de 8 se debe a las condiciones de equilibrio durante la condensación de la precipitación en nubes a 25-30 °C. El valor de 10 ‰ en la intersección con el eje Y es llamado el valor de exceso de deuterio.

Este valor de exceso de deuterio se aplica sólo a los datos que "encajan" con la pendiente de 8; valores de exceso típicos de deuterio se encuentran en el rango de 0 a 20 (Kendall, 1998) y son un indicador de las condiciones de humedad de la región de origen (Figura 14).

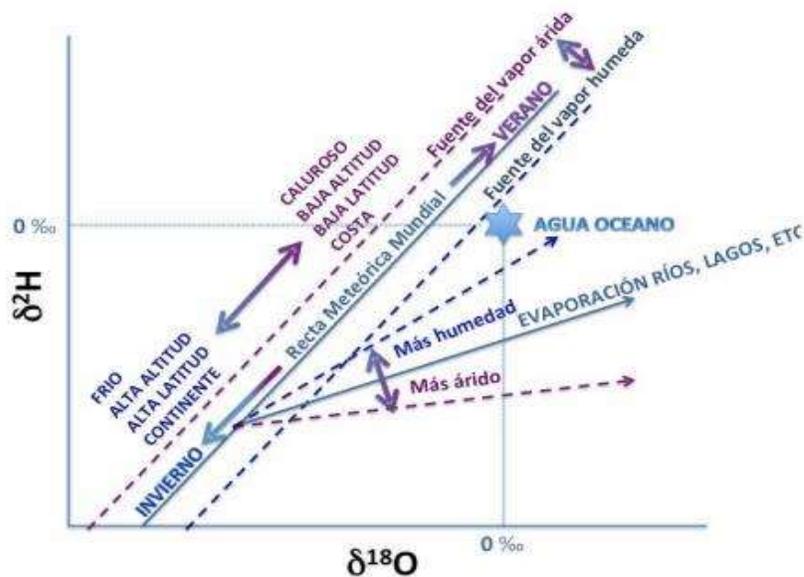


Figura 14 Línea de Agua Meteorológica Global y tipos de desviaciones. Fuente: web.sahra.arizona.edu



2.6 Técnicas de muestreo y análisis de agua para análisis isotópicos

Cualquier tipo de agua natural, ya sea superficial, subterránea, atmosférica o aun recuperada, puede ser considerada como fuente de agua para consumo humano. Las aguas superficiales pueden incluir arroyos, ríos, lagos y aguas de mar. Las aguas subterráneas son las que están contenidas dentro de formaciones geológicas e incluyen las de lloraderos (galerías), manantiales, pozos naturales y la extraída de norias y pozos profundos conectados a acuíferos libres o confinados. Las aguas atmosféricas son las que se obtienen de la captación de aguas lluvias o de la humedad atmosférica. Finalmente están las aguas recuperadas a través de procesos de tratamiento de aguas residuales y que pueden ser reutilizadas para algunos consumos domésticos (Bogotá D.C., 2011).

2.6.1 Muestreo de agua de lluvia y otras fuentes

Cuando se desea caracterizar un cuerpo de agua (llámese acuífero, río, lago, etc.) mediante isótopos, ya sean estables o radiactivos, el seguimiento de protocolos es muy importante para obtener resultados confiables de laboratorio. En todo caso es necesario evitar el fraccionamiento isotópico a través de la evaporación o de pérdidas difusivas del vapor de agua o el intercambio isotópico con los alrededores y con el material del envase, Estos efectos se puede minimizar siempre y cuando se utilicen métodos de recolección y preservación apropiados (Mook, 2001).

Es importante conocer las técnicas de muestreo de agua en los sistemas de abastecimiento de una zona, con el fin de evaluar su calidad, por lo que a continuación se presenta a grandes rasgos una descripción del procedimiento llevado a cabo en campo para la colecta de agua proveniente de distintas fuentes:



A. *Agua de lluvia*

- Se deben utilizar envases seguros, pudiendo ser de cristal (ámbar) o polietileno de alta densidad, con tapa y sub-tapa.
- Se debe planificar la localización de las estaciones de muestreo, de acuerdo con el régimen topográfico, localización de la zona de recarga, etc.
- Durante la recolección, se retira el agua del depósito colector de lluvia inmediatamente después de haberse producido la precipitación.
- Se llevará a un tanque hermético o algún lugar frío (para protegerla de la evaporación), donde se acumulará mensualmente durante un año hidrológico.

B. *Aguas subterráneas y superficiales.*

- En caso de la recolección de otras fuentes superficiales y subterráneas principalmente se realiza una red de monitoreo y preparación de equipo de campo.
- Se accede al sitio de muestreo y se debe cerrar la válvula de cloración, siendo necesario dejar correr el agua durante al menos 5 minutos para permitir la salida de agua antigua contenida en el sistema de tuberías.
- Se deben tomar notas sobre las características de la fuente muestreada, como son: nivel piezométrico, profundidad del muestreo, sistema de muestreo, tiempo de bombeo, entre otras características del lugar; de igual forma, se deben tomar muestras y determinar los valores de sus parámetros fisicoquímicos.
- Para el almacenamiento de las muestras que serán usadas para determinar los valores de δ^2H y del $\delta^{18}O$, se utilizan normalmente botellas de 50 ml, las cuales serán transportadas inmediatamente después de su toma, hacia un recipiente de almacenaje totalmente frío ($< 5\text{ }^\circ\text{C}$) para preservar sus propiedades iniciales y evitar fraccionamiento isotópico por evaporación.
- Se debe tener cuidado al momento de tomar las muestras de no dejar burbujas dentro del recipiente de muestreo, para evitar modificaciones del valor isotópico al interactuar la burbuja de aire y la muestra de agua.



2.6.2 Preservación de las muestras

El objetivo de la preservación es retardar los cambios químicos y biológicos que continúan después de que la muestra se retira de su fuente. Los resultados analíticos son más exactos en la medida que el tiempo transcurrido entre la recolección de la muestra y su análisis sea menor.

Los métodos de preservación incluyen las siguientes operaciones: control de pH, adición de reactivos, refrigeración y otros, los cuales sirven para retardar la acción biológica, retardar la hidrólisis de los compuestos químicos, reducir la volatilidad de los constituyentes y reducir los efectos de absorción. En el caso particular de las muestras de agua para análisis isotópicos no requieren la adición de ningún tipo de reactivo ni control de pH, únicamente controlar la temperatura de traslado y evitar exposición directa al sol de la muestra, lo que podría provocar la formación de burbujas de vapor al interior de la muestra y modificar los resultados isotópicos.

En el momento de almacenar las muestras se debe revisar que los recipientes estén correctamente tapados para evitar posibles derrames y mezclas. Las muestras deben ser entregadas al laboratorio lo más pronto posible para su preservación y análisis, identificándolas correctamente y entregando la hoja de custodia con la información de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo.

2.6.3 Técnicas de análisis en laboratorio

Las técnicas isotópicas constituyen en la actualidad uno de los instrumentos de trabajo del hidrólogo. Algunas de estas técnicas pueden aportar información de características únicas, imposible de obtener por otros métodos o técnicas. Aunque es mucho lo que queda por hacer en cuanto al perfeccionamiento de los métodos existentes, y a la puesta a punto y ensayo de nuevas técnicas, sigue siendo preciso perseverar en la transmisión a los países en desarrollo los conocimientos sobre técnicas ya acreditadas (OIEA, 2004).



Aunque la Espectrometría de Masas de Isótopos Estables (IRMS) es una forma tradicional de llevar a cabo el análisis de isótopos estables de δ^2H y $\delta^{18}O$ del agua, desde 2007 su medición para los estudios hidrológicos se lleva a cabo cada vez más por el diodo infrarrojo de la Espectroscopía de Absorción Láser (LAS), reemplazando rápidamente en muchas áreas al IRMS.

Actualmente, en LAS existen varios desafíos en la obtención de resultados de alta calidad de δ^2H y $\delta^{18}O$, que difieren notablemente con IRMS (fuerte memoria entre muestras, interferencias ópticas moleculares) y que son especialmente difíciles para los usuarios con poca experiencia en las mediciones. Los instrumentos LAS producen archivos *.cvs (archivos separados por comas) de valores con formato que requieren de un procesamiento fuera del instrumento de medición.

Por otro lado, la VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), VSMOW2 y SLAP (Standard Light Antarctic Precipitation), SLAP2 son los isótopos primarios disponibles de las aguas (usados como referencia para mediciones de δ^2H y $\delta^{18}O$ (17O)). Los estándares de agua de uso diario y el estándar de control se pueden obtener a nivel local o de fuentes comerciales (agua local embotellada o importados), preferentemente en grandes cantidades (20 L), estimando de la gama de isótopos el rango completo de las muestras a medir. Se deben buscar al menos tres estándares δ^2H y $\delta^{18}O$ de uso diario: un valor extremo Alto (positivo) y un valor extremo Bajo (negativo) que se utilizarán para la normalización de datos y un estándar de medición intermedio como control a largo plazo. Mayor información sobre el uso de estándares y equipos de medición de isótopos estables del agua se encuentran disponibles en el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), agencia internacional que regula las disposiciones sobre hidrología isotópica a nivel mundial.



3 METODOLOGÍA

En este apartado se presenta el método de trabajo empleado para el desarrollo de la investigación, así como la obtención de datos que serán empleados en el análisis y comportamiento de las fuentes de abastecimiento de la zona en estudio. Las principales actividades que se realizaron para el proceso de este trabajo (Figura 15) incluyen el trabajo de campo, herramientas utilizadas y manejo de datos de páginas internacionales. En general el trabajo se divide en 6 etapas que resumen las actividades individuales, las cuales son 1) recopilación de información, 2) tratamiento de información recopilada, 3) trabajo de campo, 4) tratamiento de datos recopilados en campo, 5) interpretación de datos, y 6) conclusiones.

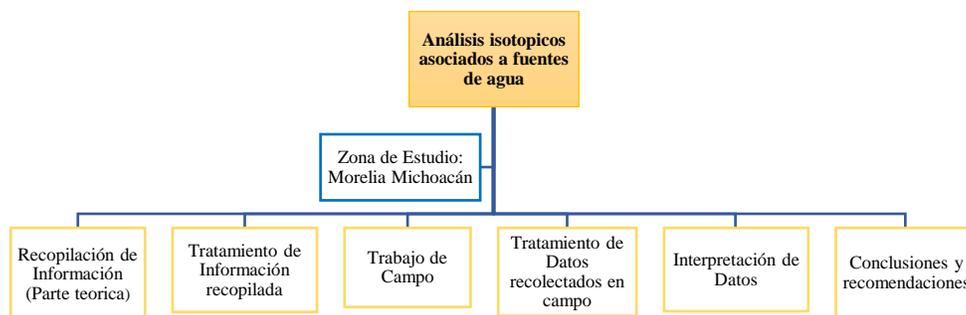


Figura 15 Esquema Metodológico que presenta la descripción de actividades para el desarrollo del proyecto.



En la etapa 1), descrita en la Figura 16, se detalla la recopilación de información necesaria para tener un amplio conocimiento en el trabajo a realizar. Para adentrarse al tema, primero se debe tener conocimiento acerca de estudios previos, tanto de hidrología, como de geología e isotopía. Por ello, lo primero que se realizó fue una búsqueda de información, tanto de datos que puedan ser útiles a la investigación, como de estudios previos que se han realizado en la zona de estudio.

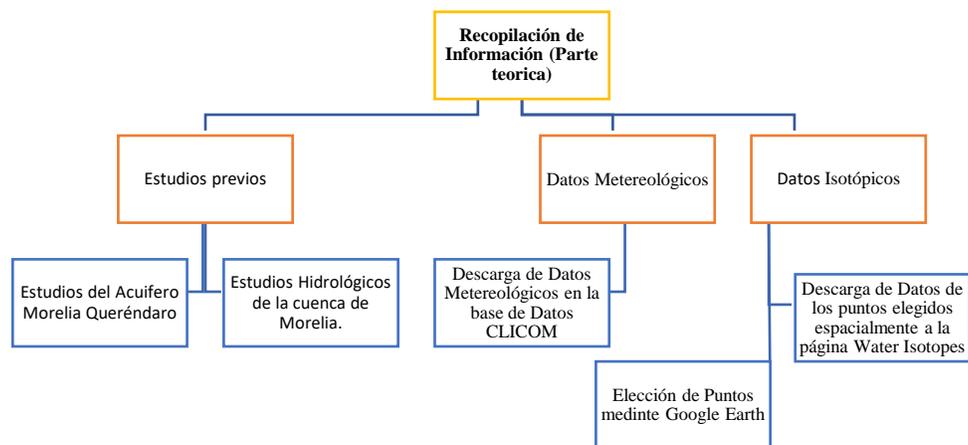


Figura 16 Esquema Metodológico que presenta el subapartado Recopilación de información del diagrama principal

En la etapa 2), descrita en la Figura 17 como el tratamiento de datos, una vez que se recopiló la información necesaria y con la ayuda de software específico (Excel, ArcGIS, Google Earth, etc.), se manipuló y representó la información a manera de mapas, gráficos, tablas, etc., lo que ayudó a comprender mejor el los múltiples datos recabados para la zona de estudio. Cabe mencionar que la generación de mapas ayudó a comprender la relación entre la zona de estudio y su comportamiento en cuanto a datos isotópicos e hidrológicos.

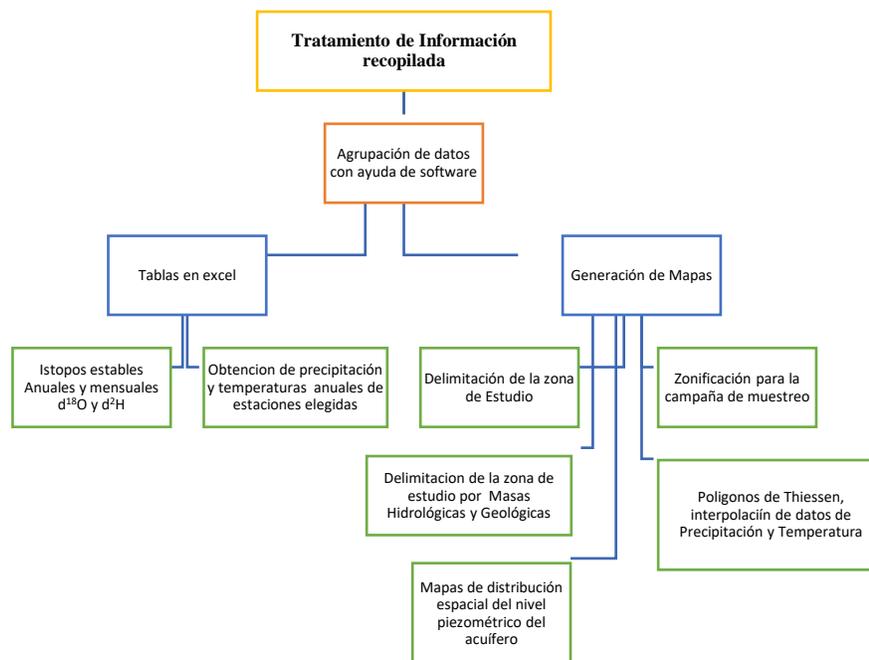


Figura 17 Esquema metodológico que presenta la gestión de datos y su tratamiento.

La metodología empleada en esta etapa 3) de Trabajo de campo (Figura 18) describe brevemente el procedimiento que se empleó para realizar el trabajo en campo, tanto del muestreo de agua de lluvia como el muestreo realizado para fuentes de abastecimiento usado principalmente por el OOAPAS en la ciudad de Morelia. Además, con base en el desarrollo de este apartado, se adquirieron los datos útiles para el desarrollo del presente trabajo, los cuales deben llevar un posterior tratamiento y representación.

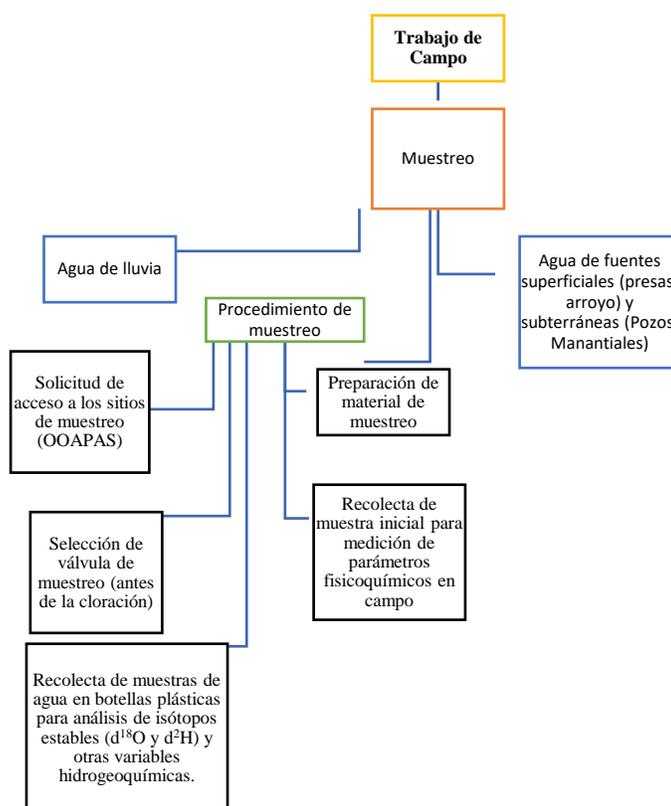


Figura 18 Esquema metodológico que describe el trabajo de campo.



En la Figura 19 se explica el tratamiento de datos y los métodos empleados provenientes de dos fuentes: de los datos isotópicos y de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo; se considera cómo fueron tratados recopilados en el trabajo en campo (muestreo de agua de lluvia y fuentes de abastecimiento) y su posterior interpretación.

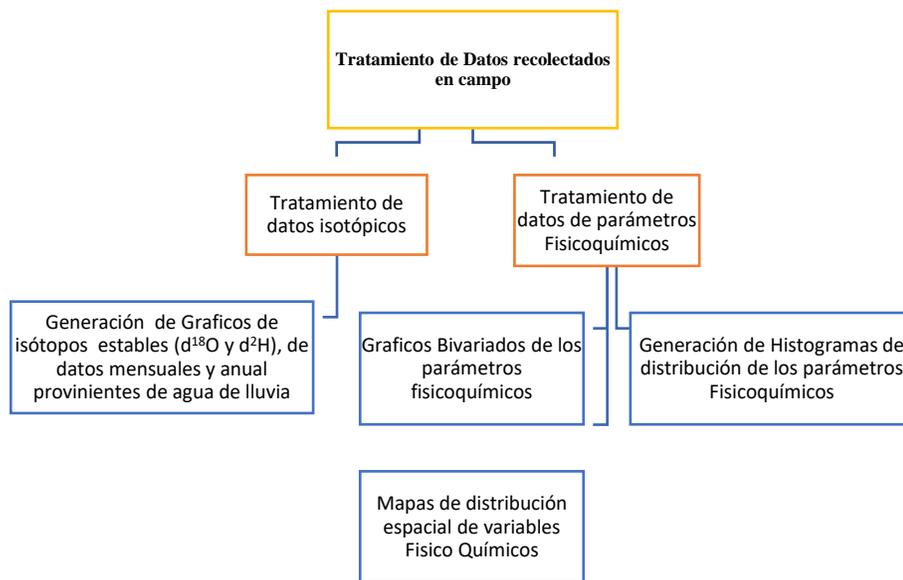


Figura 19 Esquema metodológico que describe el tratamiento de datos recabados en el trabajo de campo.

En la Figura 20 se presenta un esquema del apartado metodológico del tratamiento de datos recolectados en campo, que incluye una interpretación de datos por etapas, describiendo la relación que tiene cada parámetro con respecto a otros y la zona de estudio y su comportamiento respecto a otras variables como la elevación, el clima y su ubicación espacial.

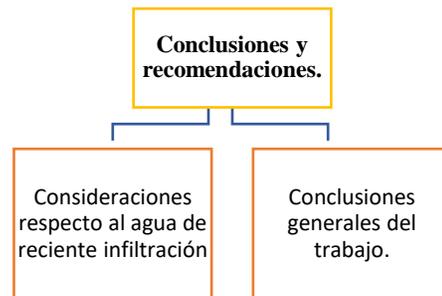


Figura 20 Esquema Metodológico que describe la interpretación de datos

Finalmente, el último apartado de Conclusiones y recomendaciones (Figura 21) puntualiza las principales consideraciones obtenidas durante el desarrollo del trabajo, del comportamiento de los datos y algunas recomendaciones y estrategias propuestas para ayudar a mejorar o cambiar la forma en que se utiliza el recurso del agua.

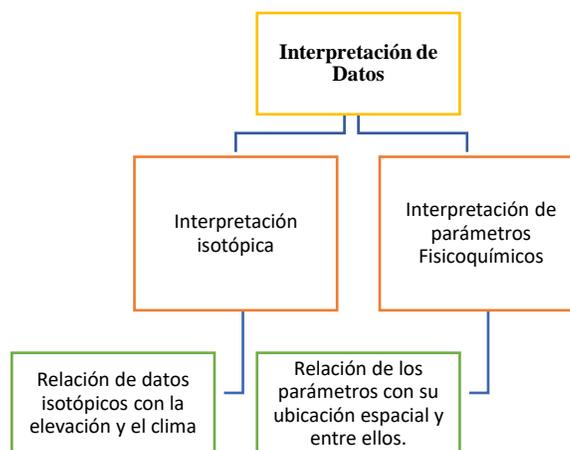


Figura 21 Esquema Metodológico que describe conclusiones y recomendaciones.



3.1 Herramientas utilizadas en el desarrollo del trabajo de Tesis

Con ayuda de las herramientas (metodológicas, de acceso a información y de software) descritas a continuación se realizó una interpretación de los datos trabajados en esta tesis. Se revisó la relación que existe entre la zona de estudio y el comportamiento de distintas variables a través del tiempo, realizando la comparación de datos recopilados a través de estudios realizados anteriormente, respecto a lo generado en este estudio.

3.1.1 Software ARCGIS

Para delimitar la zona de estudio se utilizó el Software ArcGIS, el cual es un sistema de información geográfica (SIG) integrado.

Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica; usa modelos de datos inteligentes SIG para representar la geografía y proporciona todas las herramientas necesarias para crear y trabajar con datos geográficos. El software incluye herramientas para todo tipo de actividad SIG, como la edición y automatización de datos, el mapeo y actividades basadas en mapas, la administración de datos, el análisis geográfico y la organización de datos. El software tiene un modelo de datos geográficos de muy alto nivel para representar información espacial, tales como objetos, ráster y otro tipo de datos (ESRI, 2002).

Con ayuda de este software se trató la información espacial disponible para la zona de estudio, tanto de localización, como de georreferenciación, representación de datos y generación de mapas de resultados.

3.1.2 Información de INEGI

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) es un organismo público autónomo responsable de normar, coordinar, captar y difundir información de México en cuanto al territorio, los recursos, la población y economía, que permita dar conocer las características del país y ayudar a la toma de decisiones (INEGI, 2019 a).



Fueron usadas sus bases de datos de acceso gratuito, descargando información de cartas topográficas, clasificación hidrográfica, acuíferos, geología, red de pozos, corrientes superficiales, poblaciones, carreteras, entre otros.

3.1.3 Generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Un modelo digital de elevaciones (MDE) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994).

En este caso la palabra elevación enfatiza el concepto de medición de altura con respecto a un datum y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura. Este término se utiliza con frecuencia en los Estados Unidos para describir un arreglo rectangular o hexagonal de puntos con valores de elevación obtenidos por métodos fotogramétricos y cartográficos (Fallas, 2007).

Con ayuda de esta herramienta se pudieron extraer los datos de la altitud (elevación sobre el nivel del mar) que tienen los pozos en la zona de estudio, valores indispensables para la interpretación de resultados del nivel piezométrico y para asociar la relación del flujo en el acuífero en explotación. Adicionalmente, la información generada a partir del MDE permitió generar un mapa de elevaciones topográficas para la zona de estudio y sus respectivas curvas de nivel, factor directamente relacionado con los escurrimientos superficiales y flujos subterráneos.

3.1.4 Información meteorológica recopilada en la base de datos CLICOM

La información meteorológica (precipitación y temperatura) se obtuvo de la base de datos Climate Computing Project o CLICOM (CICESE, 2018), que es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en México, el cual permite conocer la ubicación espacial de cada estación climatológica en la República Mexicana, así como toda la información que contiene cada estación meteorológica.



Las observaciones representan los datos recopilados en las diferentes estaciones meteorológicas del país y estas se contienen en diferentes periodos de información, donde los datos más antiguos datan de 1920, hasta el periodo actual, que en la base de datos abarca hasta diciembre de 2014 (CICESE, 2018).

Esta base de datos permitió realizar una elección preliminar de las estaciones a utilizar en el estudio, así como descargar la información climática de interés (valores medios de lluvia mensual y temperatura), para la manipulación de los datos y selección de las estaciones más favorables para el estudio en específico.

3.1.5 Software Google Earth

Es un programa de escritorio en el que se puede observar con detalle un mapa del globo terráqueo, con imágenes en 3D que permite en algunos casos explorar a través de calles y paisajes con mucha exactitud. Su concepción fue desarrollada por una compañía estadounidense llamada Keyhole Inc. en 2004 para ser utilizada por la CIA (Agencia Central de Inteligencia). Este programa funciona con uno de los sistemas de fotografía satelital más avanzados del planeta (Definista, 2015).

Google Earth funciona con el motor de búsqueda de Google, recopilando toda la información de los lugares a los que el satélite captura desde el espacio y superponiendo toda la información en el plano esférico que se observa al correr la aplicación.

Este software fue empleado para ubicar en la zona de estudio, puntos necesarios para su elección espacial, ya sea para la utilización en datos meteorológicos o isotópicos.



3.1.6 Base de datos Wáter isotopes

Se trata de un sistema de información mundial sobre los isótopos estables del agua de lluvia (δH y $\delta^{18}O$) y su distribución geoespacial. Contiene una descripción de los esfuerzos para mapear los isótopos estables de agua de lluvia e información sobre cómo se pueden aplicar los datos isotópicos a estudios específicos, poniendo referencias y ejemplos de cómo distintos grupos de investigación los han utilizado (G. Bowen, 2003).

Fue empleado para la extracción y tratamiento de datos isotópicos que se presentan en la zona de estudio y sus zonas aledañas. Gracias a ello podemos realizar un estudio y posteriormente comparar sus resultados con los estudios realizados localmente.

3.1.7 Información de CONABIO

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, mejor conocida por las siglas CONABIO, es una institución perteneciente al gobierno mexicano, creada con el principal propósito de difundir, promover y apoyar todas las actividades que tengan relación con la biodiversidad de México (CONABIO, 1992). Por medio de la información recopilada en esta institución se obtuvieron datos que permitieron la georreferenciación de mapas con datos de aguas superficiales y subterráneas para la zona de estudio, de una forma más clara y precisa.



3.2 Procedimiento de colecta de agua de lluvia para su análisis isotópico

Para establecer una línea de base isotópica para la zona de Morelia, fue necesario plantear una red de muestreo de agua de lluvia, definiendo el lugar de ubicación de las estaciones de colecta de agua de lluvia y el equipo necesario para su recolección, etiquetado y almacenaje. Teniendo en cuenta que el objetivo es interpretar el comportamiento isotópico del agua de lluvia con respecto a la fuente de suministro del recurso hídrico para la Ciudad de Morelia, es de suma importancia recolectar el mayor número de muestras posibles durante un año hidrológico y así poder interpretar estos resultados en comparación con los valores isotópicos obtenidos para las fuentes de abastecimiento (agua superficial, agua subterránea, agua de manantiales, otras fuentes).

Para llevar a cabo este muestreo, en mayo de 2018 se inició la toma de muestras de agua de lluvia, colocando dos estaciones de muestreo en distintos puntos de la Ciudad de Morelia: una en un espacio abierto del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y otra de respaldo al sur de la ciudad, en el Fraccionamiento Praderas de Morelia, a una distancia de 3.3 km entre ellas.

El material previamente preparado para la colecta de muestras en las estaciones muestreo instaladas consistió en:

- Cuatro recipientes plásticos de tamaño grande (de dimensiones 60x40x30 cm), rectangulares para la captación directa de agua de lluvia
- Botellas plásticas de polietileno de alta densidad (PAD) de 50 y 60 ml.
- Jeringas plásticas de 60 ml
- Filtros de disco desechables de nitrilo de poro de 0.45 micras
- Guantes de nitrilo
- Agua desionizada
- Material de etiquetado y rotuladores
- Cinta transparente
- Cámara fotográfica
- Equipo de cómputo para el registro de datos



En total se recolectaron 82 muestras de agua de lluvia (en meses de lluvia y estiaje), repartidas durante todo el año, con su colecta directa desde los recipientes de captación en las dos estaciones de recolección, su filtrado, etiquetado y preservación. El procedimiento consistió en lo siguiente:

- La instalación de las estaciones mediante los recipientes plásticos de captación, limpieza y adaptación alrededor del sitio de captación; se ubicaron de preferencia en un lugar libre de obstáculos (árboles y plantas, otras), propiciando que la lluvia entre en contacto directo con los recipientes, que estuviera alejado del suelo y pudiese acceder solo la persona que realizó el muestreo, para evitar la contaminación en las muestras.
- La recolección se realizó durante las primeras horas de la mañana un día después de la lluvia o inmediatamente después de que cayese la lluvia.
- Se revisó que los recipientes de captación estuvieran libres de material orgánico y tuvieran agua suficiente para rellenar las botellas de muestreo.
- Se enjuagaron las botellas con la misma agua colectada.
- Si el recipiente de captación tiene material orgánico, se deben utilizar los filtros para jeringa para tomar las muestras de agua.
- Al momento de llenar las botellas para la toma de muestras se debe tener cuidado de no dejar burbujas ni material orgánico dentro y de inmediato sellar la muestra con cinta adhesiva.
- Se deben etiquetar la muestra con los datos correspondientes (lugar y fecha, tipo de muestra, si está filtrada o no y tipo de análisis que se le realizará).
- Se lleva la muestra a un lugar húmedo y fresco para su almacenamiento para posteriormente una vez que se hayan recolectado todas las muestras, estas sean llevadas al laboratorio para su análisis.

Las muestras de agua fueron enviadas al Laboratorio de Geoquímica de fluidos geotérmicos del Instituto de Geofísica de la UNAM, Unidad Morelia, para ser analizadas para isótopos estables δ^2H y $\delta^{18}O$.



3.3 Procedimiento de colecta de agua de las fuentes de abastecimiento de Morelia

En el siguiente apartado se realiza una breve descripción de las actividades llevadas a cabo en campo durante la recolección de datos y toma de muestras de las fuentes de agua que abastecen a la Ciudad de Morelia operadas por el OOAPAS, realizada entre el 22 y el 26 de febrero de 2021, para su posterior análisis fisicoquímico e isotópico.

Dentro de los objetivos primordiales del muestreo está la medición de parámetros fisicoquímicos, la toma de muestras para su análisis en laboratorio y procedimiento correcto de muestreo, preservación y transporte.

La recolección y medición de parámetros de campo se realizó con el siguiente material y equipo:

- Botellas plásticas de 60 ml
- Filtros de nitrilo (0.45 micras)
- Bomba de filtrado de agua (de campo)
- Recipientes plásticos para medición de parámetros fisicoquímicos
- Termómetro manual de alcohol (-20 a 120°C)
- Dispositivo multiparamétrico de campo (pH, CE, SDT, OD, Temp., Redox)
- Kit de medición de alcalinidad en campo (Hanna)
- Dispositivo GPS
- Cámara fotográfica
- Tableta electrónica para registro de datos
- Material de etiquetado (rotuladores, etiquetas, cintas adhesivas, libreta de campo, plumas, lápiz)
- Guantes de látex
- Agua destilada para limpieza de material y equipo
- Hielera para almacenamiento de muestras (hielos)



El muestreo para su análisis isotópico y recolección de datos consistió en visitas directas a las fuentes de abastecimiento y teniendo previamente un cronograma de muestreo, para agilizar tiempos y acceso a los distintos lugares de muestreo. Se dividió la zona de estudio en diferentes sectores, teniendo listo el equipo y material de muestreo previamente etiquetados por cada día de muestreo. El procedimiento que se siguió fue:

- En cada día de trabajo de campo se asignó un punto de reunión para después partir a los lugares de muestreo, acompañados por personal asignado por el OOAPAS.
- Al llegar al lugar, se procedió a tomar la temperatura ambiente, usando tanto el termómetro manual como el dispositivo multiparamétrico.
- Previo al inicio de la toma de muestras en el sistema de válvulas del pozo, se debe apagar la caseta de cloración.
- Se debe dejar correr el agua aproximadamente 5 minutos, previo a comenzar a enjuagar y rellenar los recipientes plásticos con agua; es importante enjuagar los recipientes con el tipo de agua que será muestreada.
- El llenado de las botellas de muestreo se realizó con ayuda de una bomba de campo y filtros.
- Al momento de llenar las muestras, se debe tener cuidado de no dejar burbujas ni materia orgánica dentro del recipiente.
- Se usa un conjunto de recipientes plásticos con muestra de agua y el equipo multiparamétrico para la toma de los parámetros Físicoquímicos del agua, y de manera independiente, la temperatura de la misma.
- En caso de fuentes con directo acceso al agua (manantiales, corrientes superficiales), se sumerge completamente el equipo para la obtención de los parámetros Físicoquímicos.
- Se debe sellar bien la botella, empacarse en una bolsa plástica y posteriormente colocarse en la hielera para su preservación y almacenamiento.
- Se anotan los datos en la Bitácora de campo y se etiquetan los elementos que requieran modificarse.



- Usando el dispositivo GPS, se deben tomar las coordenadas UTM, la elevación (en metros sobre el nivel del mar) del sitio de muestreo y la precisión del GPS; además, se registra con un metro la altura del brocal del pozo medido desde el terreno hasta la parte horizontal de la tubería de descarga.
- Es importante anotar también todas las características descriptivas o relevantes presentes en la zona y a su alrededor (presencia de posibles fuentes de contaminación locales, preservación del sitio donde está ubicada la caseta del pozo, algún foco de contaminación alrededor del pozo, preservación del sistema de válvulas, orografía y rasgos geológicos importantes, etc.).

En este segundo tipo de muestreo en total se recolectaron 76 muestras, entre las diferentes fuentes de abastecimiento de la zona de estudio (pozos, manantiales, corriente superficial y de la derivación de la presa Cointzio).

Las muestras de agua fueron enviadas al Laboratorio de Geoquímica de fluidos geotérmicos del Instituto de Geofísica de la UNAM, Unidad Morelia, para ser analizadas para isótopos estables (δ^2H y $\delta^{18}O$). Otras muestras fueron enviadas a laboratorios en San Luis Potosí, al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), para el análisis de Iones mayores, traza y compuestos orgánicos. Los resultados de estos análisis no serán contemplados en este proyecto de tesis, pues su interpretación está fuera del alcance de los objetivos de la misma.



3.4 Extracción de datos isotópicos de bases de datos internacionales

En el siguiente apartado se plantea el desarrollo del tratamiento de datos del sitio web Wáter isotopes que recopila información isotópica ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) de agua de lluvia a nivel internacional. Esta información es útil para realizar los gráficos de relaciones isotópicas que permitan un análisis comparativo de los resultados del agua de lluvia muestreada y analizada con los resultados del análisis de las fuentes de abastecimiento para la ciudad de Morelia.

El procedimiento de recopilación de datos y su tratamiento se describe en el apartado de Anexo IV; en las Tabla 6, *Tabla 7* y *Tabla 8* se muestran datos isotópicos extraídos de la página web que posteriormente son usados en la interpretación isotópica.

Tabla 6 Tabla de datos anuales de isótopos $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. extraídos de la página Wáter Isotopes.

	$\delta^2\text{H}$ (‰, V-SMOW)											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Morelia	-50	-47	-43	-40	-61	-53	-61	-77	-70	-72	-66	-50
Quiroga	-53	-49	-46	-42	-63	-55	-63	-78	-72	-74	-69	-53
Tarímbaro	-49	-45	-42	-39	-60	-52	-60	-76	-69	-71	-65	-49
Lagunillas	-53	-50	-46	-42	-63	-55	-63	-78	-72	-74	-69	-53
Tzocurio	-52	-49	-45	-42	-62	-54	-62	-78	-71	-74	-68	-52
Huatzio	-53	-49	-45	-42	-62	-55	-62	-78	-71	-74	-69	-52
Nocupétaro	-33	-27	-27	-24	-45	-38	-50	-66	-58	-57	-46	-32
Chupicuaro	-39	-43	-34	-30	-43	-40	-38	-35	-56	-75	-65	-51
Pátzcuaro	-41	-45	-36	-32	-45	-42	-39	-36	-58	-76	-67	-52
Madero	-45	-49	-39	-35	-48	-44	-41	-38	-60	-79	-71	-56
Puruándiro	-33	-40	-30	-26	-41	-40	-42	-38	-57	-73	-64	-48
Jerécuaro	-38	-42	-34	-29	-45	-44	-45	-44	-59	-73	-65	-48
Celaya	-24	-38	-26	-21	-33	-37	-48	-44	-57	-73	-65	-50
Tlalpujagua	-54	-55	-47	-42	-55	-50	-45	-44	-64	-83	-77	-61
Tiquicheo	-22	-21	-19	-14	-27	-25	-26	-26	-43	-56	-42	-29
Apatzingán	-25	-19	-20	-17	-39	-33	-45	-62	-53	-51	-38	-25
Paracho	-55	-52	-48	-44	-65	-57	-64	-79	-73	-76	-72	-55
La Piedad	-42	-41	-37	-33	-58	-51	-65	-75	-68	-68	-63	-44
Irapuato	-30	-37	-28	-23	-38	-38	-41	-37	-55	-71	-62	-45
Huetamo	-21	-19	-17	-13	-23	-20	-20	-20	-39	-56	-38	-29
La Huacana	-32	-23	-26	-23	-39	-32	-41	-60	-53	-53	-41	-30



Tabla 7 Tabla de datos mensuales de isótopos $\delta^2\text{H}$ extraídos de la página Water Isotopes.

	$\delta^2\text{H}$ (‰, V-SMOW)	$\delta^2\text{H}$ 95% CI (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, V-SMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ 95% CI (‰)
Morelia	-77	6	-11.3	0.7
Quiroga	-80	7	-11.6	0.8
Tarímbaro	-76	6	-11.1	0.7
Lagunillas	-80	7	-11.7	0.8
Tzocurio	-79	7	-11.5	0.7
Huatzio	-79	7	-11.6	0.7
Nocupetaro	-60	2	-8.7	0.3
Chupicuaro	-59	12	-8.5	0.9
Patzcuaro	-61	13	-8.8	1
Madero	-64	14	-9.3	1.1
Puruandiro	-60	14	-8.5	1.1
Jerecuaro	-62	14	-8.8	1.1
Celaya	-62	8	-9.2	0.8
Tlalpujagua	-70	15	-10.1	1.2
Tiquicheo	-39	8	-5.6	0.6
Apatzingan	-53	2	-7.7	0.2
Paracho	-82	7	-12	0.8
La Piedad	-75	6	-10.9	0.6
Irapuato	-57	13	-8.2	1
Huetamo	-34	4	-5.1	0.4
Huacana	-54	4	-8.1	0.4

Tabla 8 Tabla de datos mensuales de isótopos $\delta^{18}\text{O}$ extraídos de la página Water Isotopes.

	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, V-SMOW)											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Morelia	-7.3	-7.5	-7.1	-6.6	-9.2	-8.1	-9	-11	-10.1	-10.6	-9.6	-7.7
Quiroga	-7.6	-7.9	-7.4	-6.9	-9.5	-8.4	-9.2	-11.2	-10.4	-10.9	-10	-8
Tarímbaro	-7.1	-7.3	-7	-6.4	-9	-8	-8.9	-10.9	-10	-10.5	-9.4	-7.5
Lagunillas	-7.6	-7.9	-7.5	-6.9	-9.5	-8.5	-9.2	-11.2	-10.4	-10.9	-10	-8.1
Tzocurio	-7.5	-7.8	-7.3	-6.8	-9.4	-8.4	-9.2	-11.1	-10.3	-10.8	-9.9	-7.9
Huatzio	-7.5	-7.8	-7.4	-6.8	-9.4	-8.4	-9.2	-11.1	-10.3	-10.9	-9.9	-8
Nocupetaro	-4.9	-4.8	-4.8	-4.3	-6.9	-6	-7.3	-9.5	-8.4	-8.5	-7	-5.3
Chupicuaro	-5.7	-6.6	-5.4	-5.1	-6.7	-6	-5.5	-5.8	-8.2	-10.5	-9.2	-7.4
Pátzcuaro	-6	-6.9	-5.6	-5.3	-7	-6.2	-5.7	-6	-8.3	-10.7	-9.5	-7.6
Madero	-6.4	-7.4	-6.1	-5.8	-7.4	-6.7	-6	-6.2	-8.7	-11.1	-10	-8.1
Puruándiro	-5	-6.1	-4.9	-4.6	-6.4	-6.2	-6.2	-6.3	-8.3	-10.3	-9.1	-7.1
Jerécuaro	-5.7	-6.5	-5.5	-5.1	-7	-6.7	-6.7	-7.1	-8.6	-10.5	-9.3	-7.2
Celaya	-4.4	-6.2	-4.6	-4.2	-5.6	-6.1	-7.2	-7.3	-8.4	-10.5	-9.3	-7.5
Tlalpujagua	-7.6	-8.3	-7.2	-6.8	-8.4	-7.6	-6.7	-7	-9.3	-11.7	-10.8	-8.8
Tiquicheo	-3.4	-3.6	-3.2	-2.8	-4.5	-3.8	-3.8	-4.4	-6.2	-8	-6.2	-4.6
Apatzingán	-3.9	-3.8	-3.9	-3.4	-6.1	-5.2	-6.7	-8.9	-7.7	-7.7	-5.9	-4.3
Paracho	-7.9	-8.2	-7.7	-7.2	-9.8	-8.7	-9.4	-11.4	-10.6	-11.2	-10.3	-8.3
La Piedad	-6.3	-6.8	-6.3	-5.7	-8.7	-7.9	-9.4	-10.8	-9.9	-10.1	-9.1	-7
Irapuato	-4.6	-5.8	-4.6	-4.2	-6.1	-5.9	-6	-6.1	-8.1	-10	-8.7	-6.7
Huetamo	-3.2	-3.4	-2.9	-2.6	-3.9	-3	-2.9	-3.7	-5.6	-7.8	-5.7	-4.5
La Huacana	-4.8	-4.3	-4.7	-4.3	-6.3	-5.2	-6.3	-8.7	-7.8	-8	-6.3	-5



3.5 Significado de parámetros fisicoquímicos que se miden en campo.

3.5.1 Temperatura (T)

La temperatura del agua es considerada un parámetro de importancia porque influye en la solubilidad de las sales y sobre todo en la de los gases. También influye en la disociación de las sales disueltas y por lo tanto en el valor de la conductividad eléctrica y el pH del agua. Con una temperatura elevada es esperable menor cantidad de oxígeno disuelto, lo cual es perjudicial para los organismos acuáticos y que contribuyen en forma natural a su depuración (Metcalf y Eddy, 1996).

3.5.2 pH

El término se refiere a la intensidad de la condición de acidez o alcalinidad de una solución. Esta propiedad se calcula en una expresión logarítmica, su escala parte del 0 a 14, donde un pH elevado indica baja concentración de iones H^+ y por lo tanto una alcalinización del medio. Por el contrario, un pH bajo indica una acidificación del medio. En el agua subterránea el pH tiende a ser balanceado (con valores entre 6 y 8), pues en ella es difícil encontrar minerales libres (Sawyer et al., 2001).

3.5.3 Alcalinidad

La alcalinidad del agua es una medida de su capacidad para neutralizar ácidos. En aguas naturales la alcalinidad es causada por tres grandes grupos que se clasifican de acuerdo con sus valores de pH: 1) hidróxido, 2) carbonato, 3) bicarbonato de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ K^+ y NH_4^+ , (Figura 22) siendo los más comunes calcio y magnesio.

La alcalinidad se determina mediante la titulación con un ácido (H_2SO_4 , 0.02N), las reacciones que ocurren son: $\text{H}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ + $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^-$. Completa a $\text{pH} = 8$ $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3^*$ Completa a $\text{pH} = 4.5$. El principal efecto de la alcalinidad es la reacción de carbonatos de calcio con ciertos cationes en el agua, lo que conduce a la formación de precipitados (Jiménez, 2001).

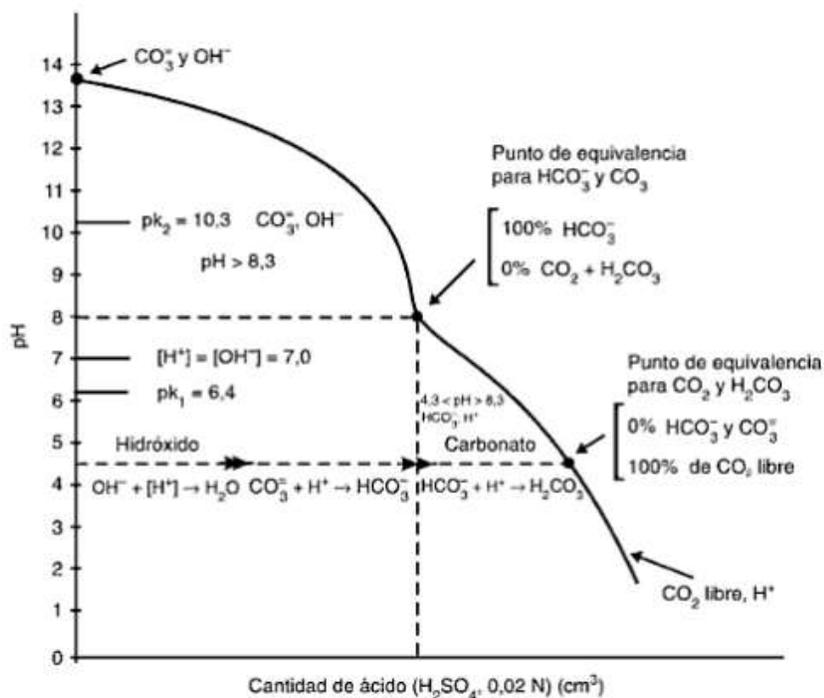


Figura 22 Curva de titulación de la alcalinidad. Fuente tomada de Sawyer C., McCarty P. y Parkin G.

3.5.4 Oxígeno disuelto (O.D.)

Los niveles de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema de agua. La solubilidad del oxígeno en el agua varía directamente con la presión atmosférica, a cualquier temperatura y con la presencia de sales y/o sólidos.

En el agua, el oxígeno disuelto afecta principalmente las reacciones en las que participan el hierro, manganeso, cobre y los compuestos que contienen nitrógeno y azufre (Jiménez, 2001).



La solubilidad del oxígeno en agua dulce varía desde 14.6 mg/L a 0°C hasta aproximadamente 7 mg/L a 35°C a 1 atm de presión. Mientras que en aguas que contienen sal, la solubilidad del oxígeno es menor. Por otra parte, la profundidad es otro factor que determina la cantidad de oxígeno disuelto, mientras que en ríos y arroyos los cambios suelen estar más vinculados a la dimensión horizontal (Harrison, 2003).

3.5.5 Sólidos Disueltos Totales (S.D.T.)

Son una medida de la cantidad de materia, sustancias, elementos y sales disueltas en el agua. Comprenden las sales inorgánicas, principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua. (Carrillo Chávez et al., 2000).

Los S.D.T. en el agua puede provenir de casi cualquier lugar, incluidos minerales en manantiales de una fuente de agua y pozos. Se produce en condiciones naturales cuando el agua se mueve a través de rocas como la piedra caliza y la tiza que consisten en minerales como el carbonato de calcio y el carbonato de magnesio. Productos químicos utilizados para tratar el suministro municipal de agua, fertilizantes y productos químicos usados en la agricultura y minería, incluso las tuberías de nuestro hogar (Puritec, 2020).

3.5.6 Conductividad Eléctrica (C.E.)

La conductividad se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. Los iones más positivos son sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}). Los iones más negativos son cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), carbonato y bicarbonato (G. Newsom, 2013).

En soluciones acuosas la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. La relación entre conductividad y sólidos disueltos se expresa, dependiendo de las aplicaciones, con una buena aproximación por la siguiente igualdad: $1.4 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$ o $2 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$ (mg/l de CaCO_3)



La conductividad varía en función de la fuente de agua: agua subterránea, agua de escorrentía de la agricultura, aguas residuales municipales y precipitación. Por lo tanto, la conductividad puede ser un indicador de filtración en agua subterránea o de fugas de aguas residuales. Además, cuando la temperatura aumenta, la conductividad aumenta también y menor concentración de iones, menor conductividad (DMCA, 2017).

3.5.7 Potencial Redox (O.R.)

Este parámetro mide la tendencia de un sistema a oxidar o reducir una especie química. Los sistemas redox están relacionados directamente con el pH, el oxígeno disuelto, la presión y la temperatura. El eH u O.R. es importante en los procesos de disolución de sales por el ataque del agua a los minerales, es importante ya que las especies químicas pueden cambiar su estado de valencia, oxidándose o reduciéndose una y otra vez (Bustamante E, 2017).

En el agua subterránea el pH y el Eh presente no permiten la liberación de O^2 tampoco de H^2 (Eh +0.700 y -0.480 voltios). Los posibles oxidantes en el agua del subsuelo son el O^2 presente en aire, $Fe^3 +$, $SO^4 2-$, $NO^3 -$ y $Fe (OH)^2$. Este parámetro debe medirse en campo apoyado por un electrodo de referencia, ya que los cambios de las condiciones ambientales producen alteraciones en su valor (E. Bustamante, 2017).



3.6 Descripción de los tipos de correlación de variables Físicoquímicas

3.6.1 Gráficos bivariados

En el estudio de dos variables cuantitativas, su graficación es muy importante, porque de manera visual se pueden determinar en una primera etapa si es posible pensar en una correlación entre las variables y determinar qué modelo matemático es el más adecuado para representar dicha relación. De la misma manera, la forma de la gráfica (Figura 23) podría indicar la falta de relación entre las variables. La gráfica en la que se representan las parejas ordenadas se conoce con el nombre de diagrama de dispersión (CUAIEED, 2017).

La idea de trabajar los datos de manera bivariada es buscar la posible relación entre dos variables, de manera que, al conocer el valor de una, nos sea posible predecir el valor de la otra. Generalmente, cuando se forman las parejas ordenadas se acostumbra poner primero a la variable que puede controlarse o medirse con mayor facilidad (lo que en funciones se llama la variable independiente) y luego la variable que se quiere predecir (conocida como variable dependiente).

En estadística, el análisis y la interpretación de los datos son muy importantes y esto puede hacerse a través de una técnica que se conoce como regresión lineal, en donde los diagramas de dispersión son muy importantes pues permiten conocer el comportamiento de los datos. La construcción del diagrama de dispersión es muy importante porque visualmente se puede determinar si un conjunto de datos podría representarse mediante una recta o no.



La construcción de estos diagramas ha ayudado a determinar que el conjunto de datos puede ser susceptible de un análisis de correlación lineal y una manera de hacerlo es pensar en trazar una línea que pase por en medio de los puntos para analizar el comportamiento (CUAIEED, 2017). Según la Figura 23 existen 5 tipos de correlación que podrían encontrarse al realizar los gráficos bivariados: sin correlación, correlación lineal positiva, correlación lineal positiva alta, correlación lineal negativa, correlación lineal negativa alta. Con base en estas clasificaciones, en el apartado de resultados se revisan los gráficos bivariados de los parámetros fisicoquímicos recolectados en campo.

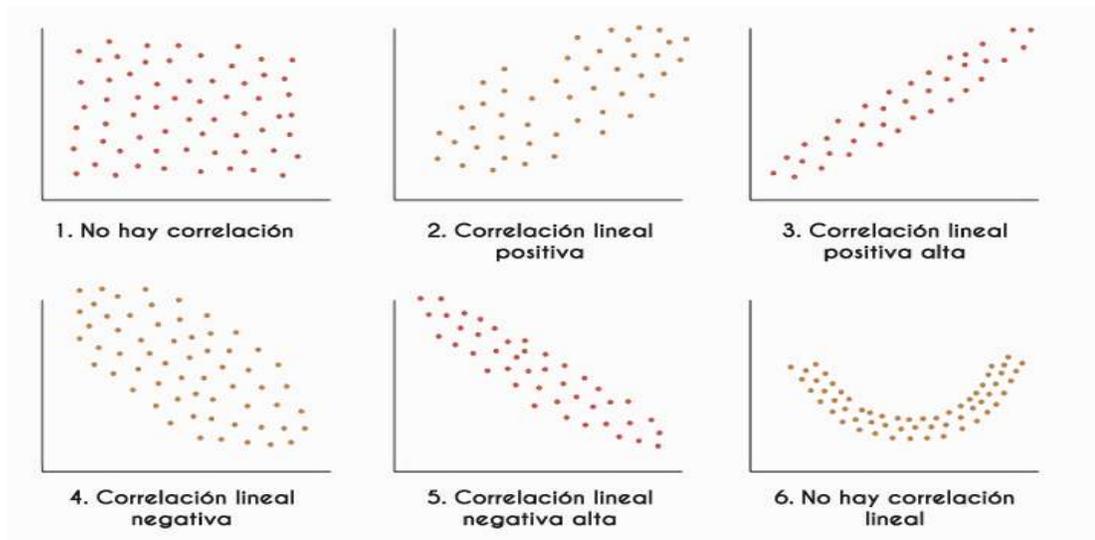


Figura 23 Tipos de correlación

4 RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en distintos apartados, entre ellos, la información generada a partir de los datos recopilados en búsquedas bibliográficas, los resultados del trabajo de campo realizado y la definición de sitios de muestreo y sobre el tratamiento de datos recolectados en campo (isotópicos y fisicoquímicos).

4.1 Información generada a partir de datos recopilados

Con base en la localización de los pozos provenientes de la base de datos de OOAPAS y mediante el uso de Google Earth, se extrajeron los datos de elevación (altura del terreno sobre el nivel del mar) de cada pozo analizado. Con este dato calculado se procedió a calcular el valor del Nivel Piezométrico (N.P.) en cada pozo, tomando como dato inicial su elevación y restando la profundidad del Nivel Estático (N.E.), registro con el que se contaba en la base de datos del OOAPAS.

En la Figura 24 se muestra la interpolación tipo IDW del nivel piezométrico para la zona de estudio, realizada a partir de los datos calculados del N.P. Sobre la interpolación se trazaron líneas perpendiculares a las isopiezas del N.P., definiendo las direcciones de flujo principales. Las zonas más claras se corresponden con aquellas de N.P. más alto, a partir del cual el flujo se mueve hacia la parte más baja (zonas oscuras).

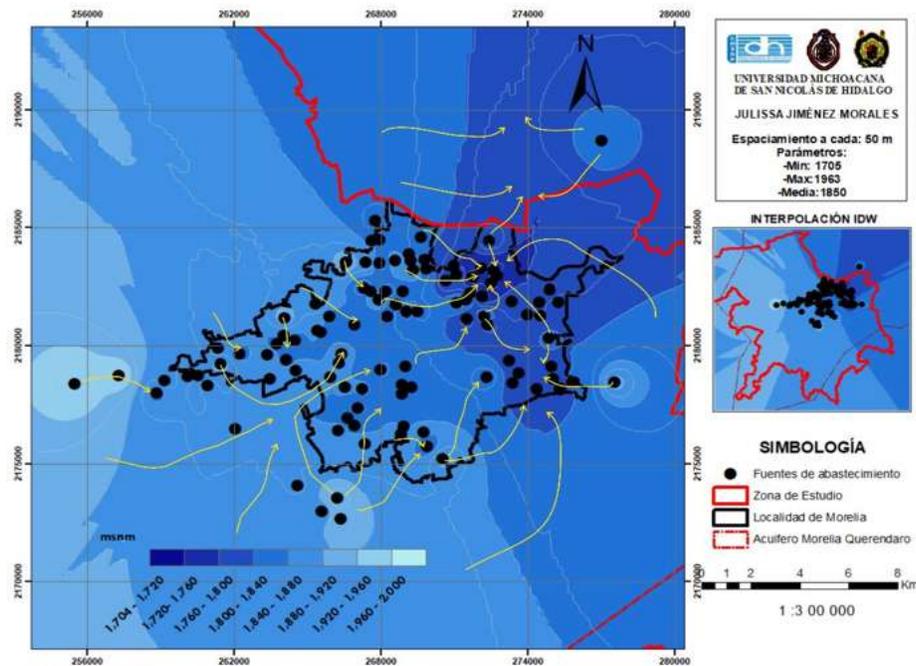


Figura 24 Interpolación de niveles piezométricos y direcciones de flujo principales

En términos generales, el N.P. de la zona de estudio tiene un flujo preferencial desde el surponiente a nororiente, presentando algunos conos de abatimiento al centro-poniente, centro-norte y al nororiente de la zona de estudio.

Adicionalmente se realizó una interpolación tipo IDW de la profundidad del nivel estático (Figura 25), medido con respecto al nivel del terreno para cada pozo en la zona de estudio. Se pueden apreciar profundidades en un rango entre los 180 a 210 m (en tonos más oscuros, localizados al oriente y sur de Morelia), así como sitios con un rango de profundidad entre los 13 y 60 m (representado con tonos más claros, localizados al noreste, oeste, centro-sur y centro-norte de la zona de estudio).

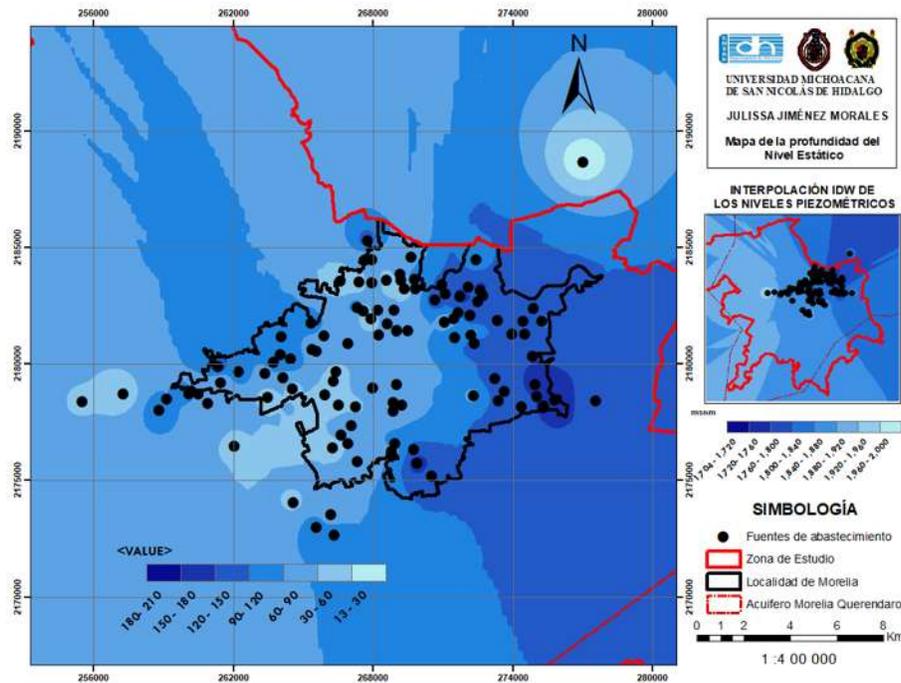


Figura 25 Mapa de interpolación IDW de la profundidad del Nivel Estático (en msnm)

Además, en la Figura 26 se presenta un mapa topográfico de la zona de estudio, donde se observan elevaciones entre 1900 y 3000 msnm; la mayoría de los pozos muestreados se localizan en la parte de valle de Morelia, en elevaciones entre 1900 y 2200 msnm.

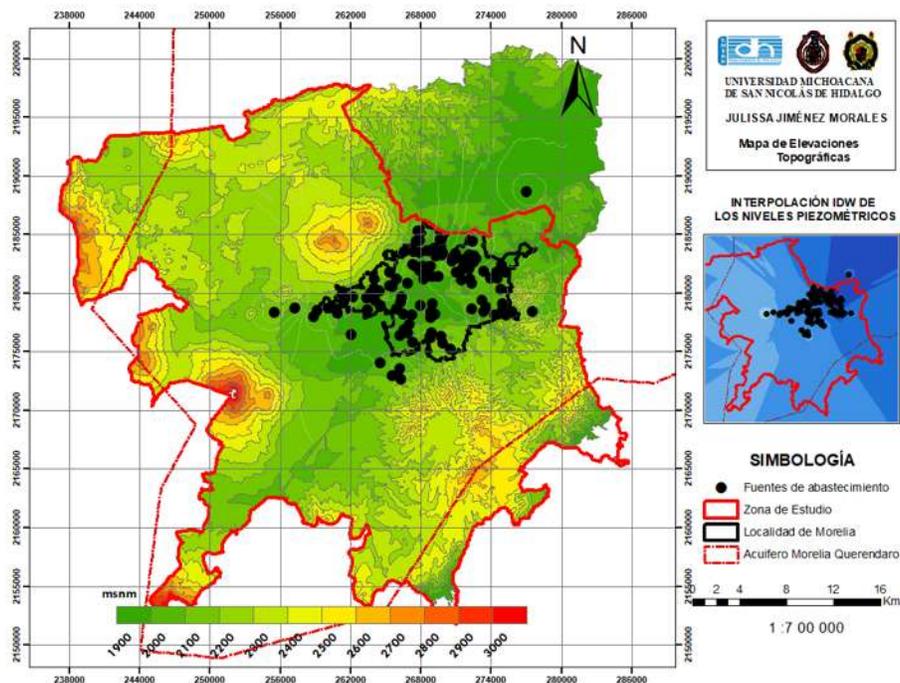


Figura 26 Mapa de elevaciones topográficas en la zona de estudio (en msnm)

4.2 Trabajo de campo y sitios de muestreo

En la Figura 27 se muestran los 8 sectores administrativos en los que el organismo operador de agua (OOAPAS) divide el suministro para la ciudad de Morelia. El muestreo se organizó con una elección inicial de pozos distribuidos de manera espacial en toda la zona de estudio para agilizar su proceso, considerando un total de 76 puntos de muestreo en toda la ciudad de Morelia.

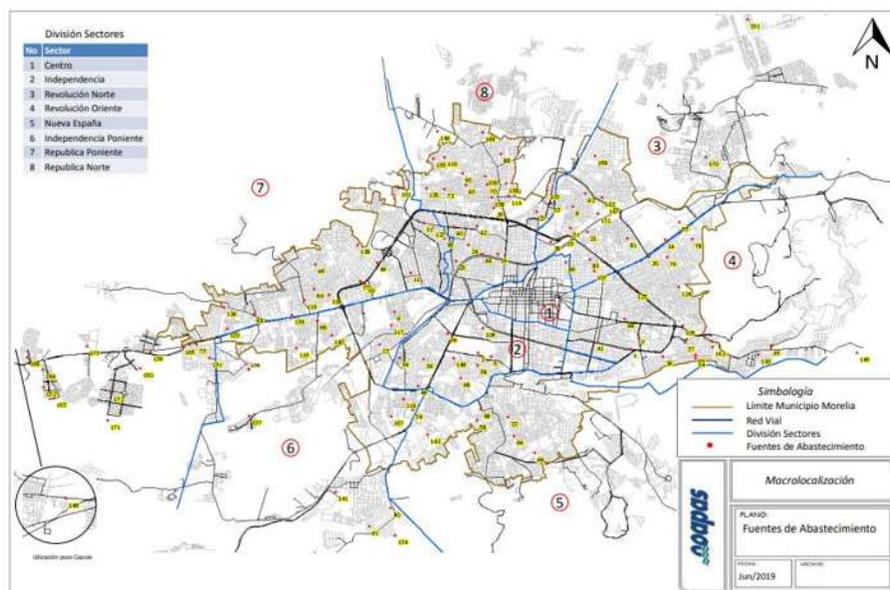


Figura 27 Mapa de sectorización de fuentes de abastecimiento que suministra el OOAPAS de la ciudad de Morelia. Fuente: Unidad de Transparencia del OOAPAS

4.2.1 Campaña de muestreo de febrero de 2021 (periodo de estiaje)

Los resultados obtenidos de la campaña de muestreo, realizado del 22 al 26 de febrero del 2021 en la ciudad de Morelia Michoacán, para las fuentes de abastecimiento que son operados por el OOAPAS, se obtuvieron los siguientes datos tomados en campo: No de muestra, ID (otorgado por el organismo operador), nombre de la zona de muestreo, fecha y hora de inicio y fin, coordenadas (X,Y) en UTM, elevación, y parámetros fisicoquímicos (temperatura, oxígeno disuelto, %oxígeno disuelto, O.R., pH de cada muestra, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, alcalinidad)

En la Figura 28 se presenta con diferente coloración la localización de los puntos de muestreo realizados en cada día muestreado. En la Tabla 9 se presenta un resumen estadístico de los datos de parámetros fisicoquímicos tomados en campo.

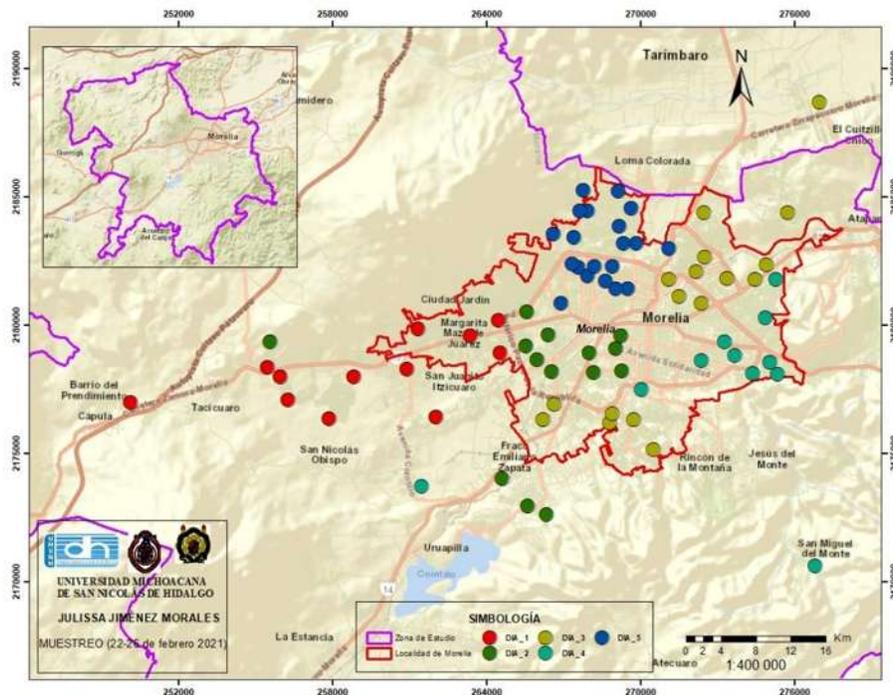


Figura 28 Localización de los puntos de muestreo realizado en distintos días, considerando las diferentes fuentes que abastecen la ciudad de Morelia.



Llaman la atención algunos pozos que registraron valores de temperatura anómalos para aguas subterráneas (34.3°C), repartidos de manera aleatoria en la zona de estudio. El rango de pH varió dentro de lo esperado (entre 6 y 8) y los valores de C.E. y S.T.D. variaron ampliamente, desde valores muy bajos (asociados con agua de reciente infiltración), hasta valores relativamente altos para agua de consumo humano (aguas más mineralizadas).

Tabla 9 Estadística de Parámetros Fisicoquímicos tomados en campo

Parámetros Fisicoquímicos		T _{amb} (°C)	T _{muestra} (°C)	O.D. (%)	O.D. (ppm)	O.R. (Mv)	pH	C.E. (μS/cm)	C.E. ABS.	S.T.D. (ppm)	Alcalinidad (mg/L)
Resumen de Datos de todas las fuentes de	Min	13.39	15.22	22.90	1.48	78.70	6.68	2.91	3.56	54.00	30.00
	Max	31.42	34.31	99.40	7.92	612.90	8.27	1744.00	2147.00	871.00	1041.00
	Media	20.85	26.05	50.00	3.24	223.31	7.45	573.99	655.22	292.89	297.04

4.3 Resultados del tratamiento de datos recolectados en campo

4.3.1 Resultados del tratamiento de datos isotópicos

A. Isótopos estables del agua $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$

Las muestras de agua de lluvia colectadas en dos sitios de muestreo en la ciudad de Morelia fueron usadas para determinar la relación de isótopos estables (en unidades por mil, ‰) de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, comparados respecto a los valores isotópicos del estándar de Viena de agua de mar (VSMOW). Los resultados se presentan en las Figura 29 y Figura 30, correspondientes al resultado isotópico promedio anual para la Zona de Morelia y los resultados isotópicos mensuales de la misma zona respectivamente. De la Figura 29 resaltan (a manera de comparación) la Línea Meteórica Mundial (LMM), en color amarillo, representado por la ecuación general de Craig ($\delta^2\text{H} = 8.0 \delta^{18}\text{O} + 10.0$). También se representan los valores promedio anuales de distintas estaciones ficticias generadas con sitios alrededor de Morelia y extrayendo sus resultados isotópicos a partir de la Base de Datos de Water Isotopes (BD-WI). Se utilizaron “X” sitios de control, a los cuales, con base en sus coordenadas, se determinaron los valores isotópicos interpolados de la (BD-WI); a partir de estos puntos se generó una Línea Meteórica Local (LML), la cual tiene una ecuación $\delta^2\text{H} = 6.83 \delta^{18}\text{O} - 0.46$. Además, con base en las muestras recolectadas y analizadas para Morelia (esta tesis), se generó un valor promedio para la ciudad (rectángulo en verde).

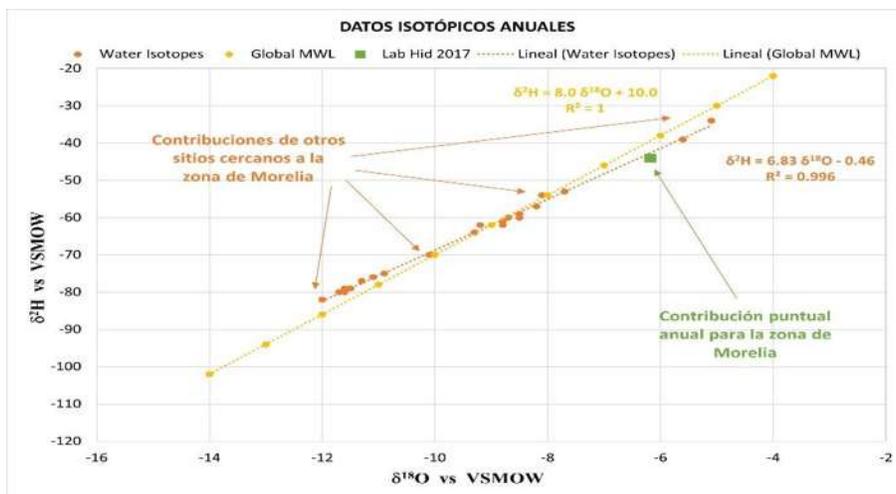


Figura 29 Datos isotópicos anuales de agua de lluvia, datos extraídos de la página internacional Water Isotopes, y línea meteórica Mundial



Respecto a la Figura 30, representa la información isotópica mensual recopilada en la BD-WI (puntos naranjas), cuya LML mensual se ajusta a la ecuación $\delta^2\text{H} = 7.56 \delta^{18}\text{O} + 7.05$; mientras que la información isotópica proveniente de las muestras de agua de lluvia recolectadas y analizadas (recuadros verdes) se ajustan a una LML mensual similar, con una ecuación del tipo $\delta^2\text{H} = 7.54 \delta^{18}\text{O} + 2.55$. Ambas ecuaciones describen la contribución isotópica del agua de lluvia que recarga al acuífero de Morelia. Los valores isotópicos promedio de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos a partir de este estudio pueden tomarse como referencia para estudios isotópicos de mezcla de aguas provenientes de distintos orígenes (agua subterránea, agua superficial, agua de retorno, manantiales, etc.), que interactúan en el sistema de abastecimiento de Morelia.

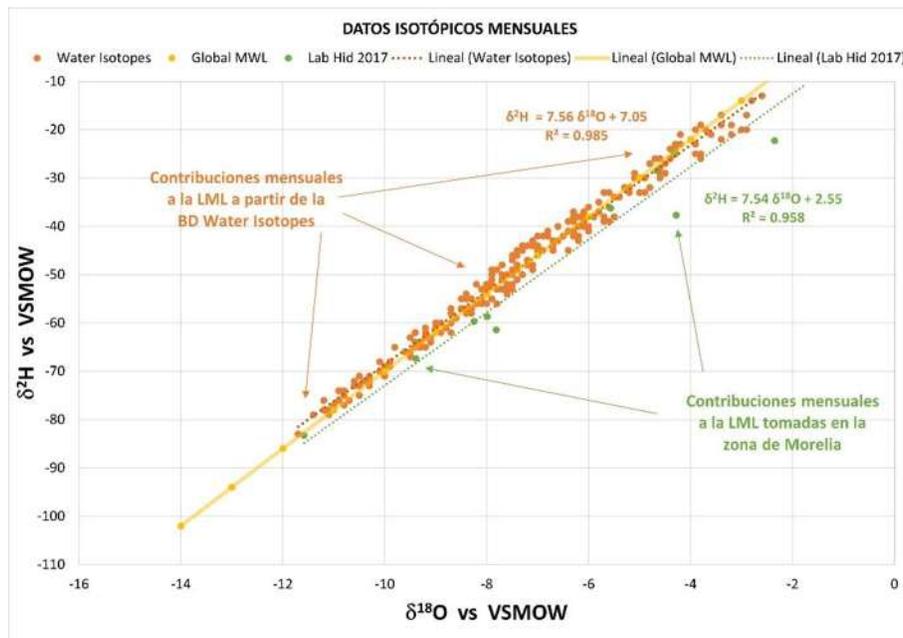


Figura 30 Datos isotópicos mensuales de agua de lluvia, datos extraídos de la página internacional Water Isotopes, y línea meteórica Mundial



4.3.2 Resultados del tratamiento de parámetros fisicoquímicos

A. *Análisis de parámetros a través de gráficos bivariados*

Las correlaciones sirven para conocer el comportamiento de las variables fisicoquímicas de las muestras. A continuación, se presentan los gráficos bivariados para los parámetros tomados en campo, determinando su correlación. Los gráficos generados comparan las siguientes variables muestreadas:

- pH vs Temp.
- Conduct. vs Temp.
- Conduct. vs pH
- STD vs %OD
- SDT vs Temp.
- Alcalinidad vs Temp.
- Alcalinidad vs SDT.
- Alcalinidad vs Conductividad
- Alcalinidad vs pH.

En el apartado 3.6 del marco teórico se pueden encontrar descritas en la Figura 23 los tipos de correlación que existen entre 2 variables, los cuales ayudan a observar la relación y el comportamiento que tienen diferentes tipos de variables.

La gráfica es muy importante, porque de manera visual se determina en una primera etapa si es posible pensar en una correlación entre las variables. De la misma manera, la observación de la gráfica puede indicar la falta de relación entre ellas. Gracias a ello, ahora es posible saber qué tipo de correlación tienen las variables que para el estudio se tomaron, mencionadas anteriormente, además de saber el comportamiento que presentan.



Los gráficos de Temperatura vs. pH y de Temperatura vs. SDT (Figura 31 y Figura 32), no presentan una correlación clara (correlación nula), lo cual indica que con respecto a los tipos de correlación no existe correlación entre ambas variables, teniendo una diferencia de $R^2=0.0137$ entre ellas.

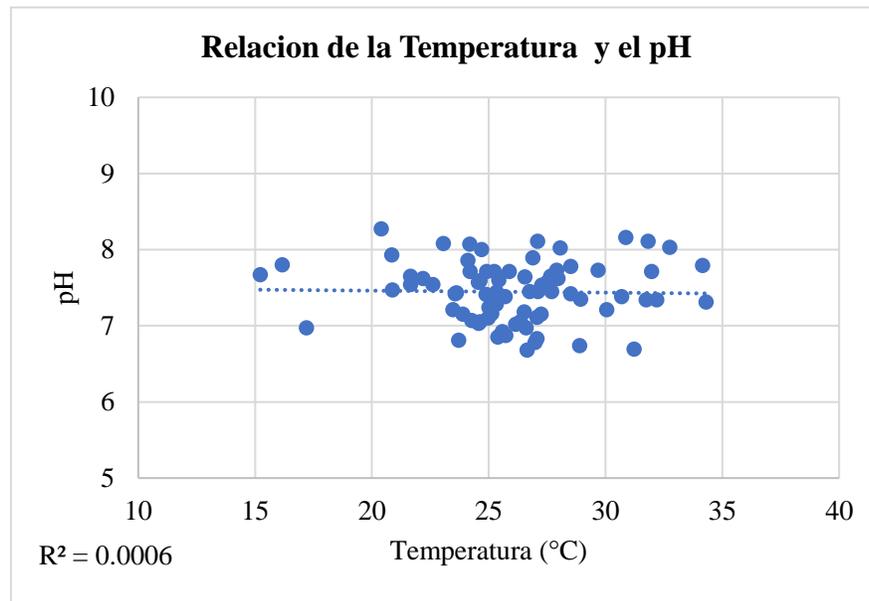


Figura 31 Variables Temperatura vs pH

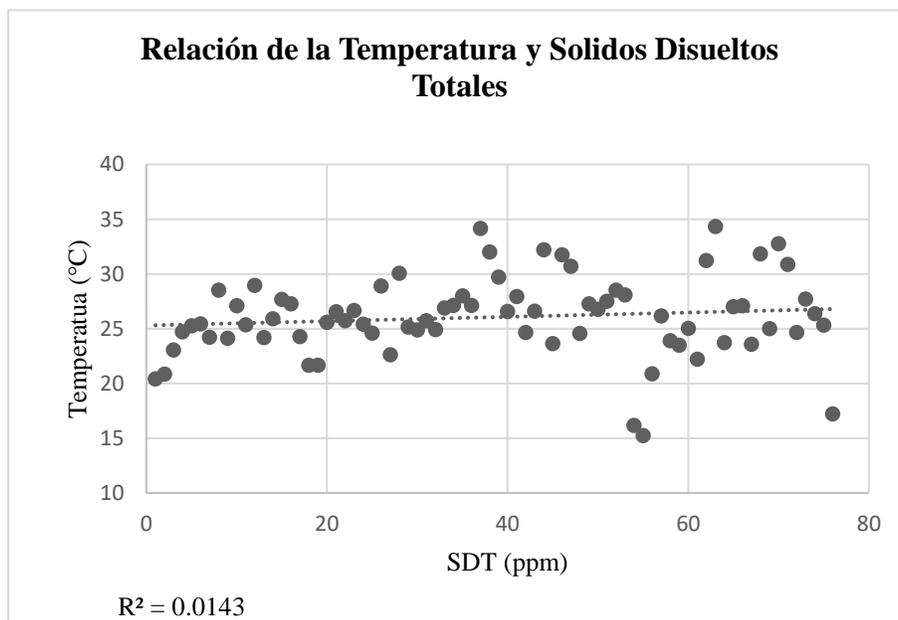


Figura 32 Variables Temperatura vs SDT



Los gráficos de Temperatura vs. C.E. oxígeno disuelto vs. S.D.T., y la relación de la Alcalinidad vs. Temperatura (Figura 33, Figura 34 y Figura 35), indican que se presenta una correlación lineal positiva débil con un ($R^2 < 0.5$).

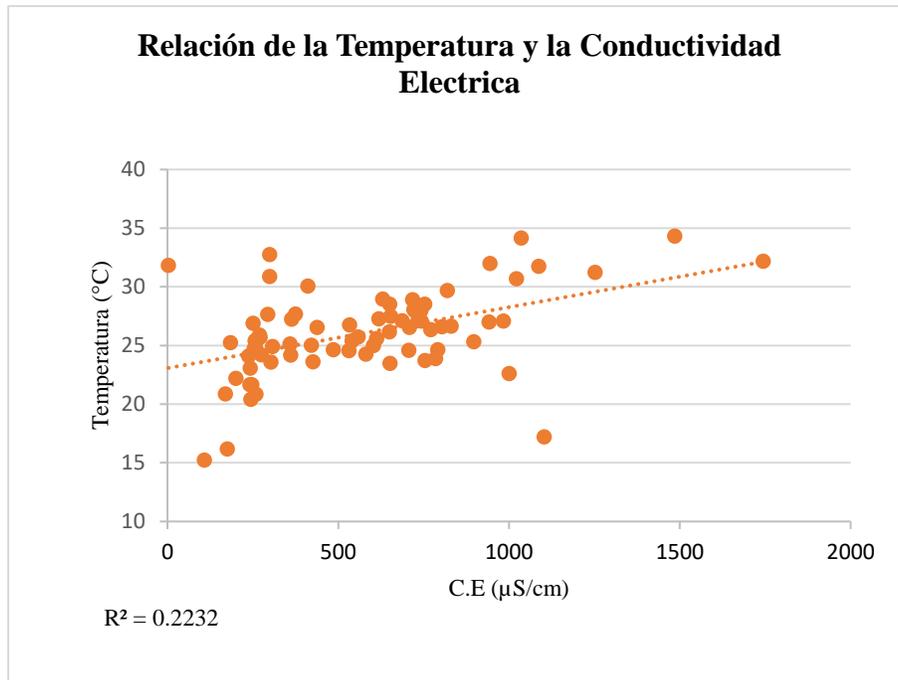


Figura 33 Variables Temperatura vs C.E.

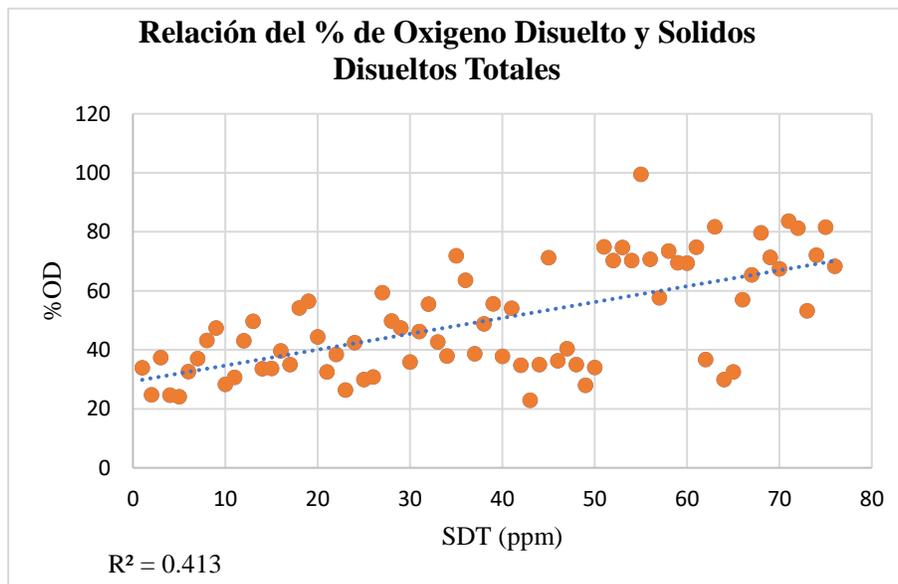


Figura 34 Variables %O.D. vs SDT

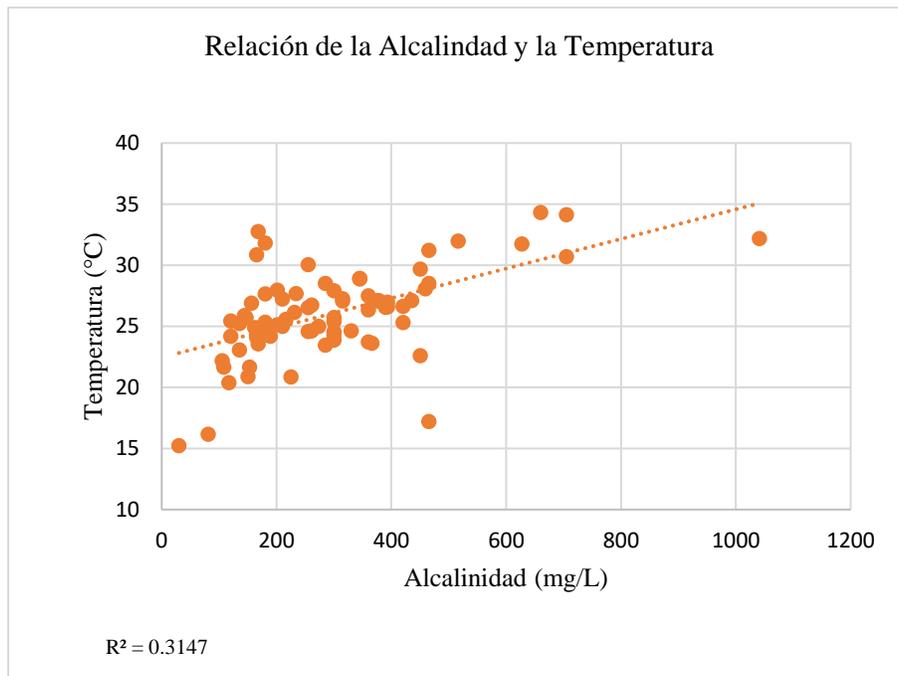


Figura 35 Variables Alcalinidad vs Temperatura



Los gráficos de Alcalinidad y S.D.T., y la Alcalinidad y Conductividad Eléctrica (Figura 36 y Figura 37), presentan correlación lineal positiva alta entre ambas variables, con un $R^2 > 0.5$.

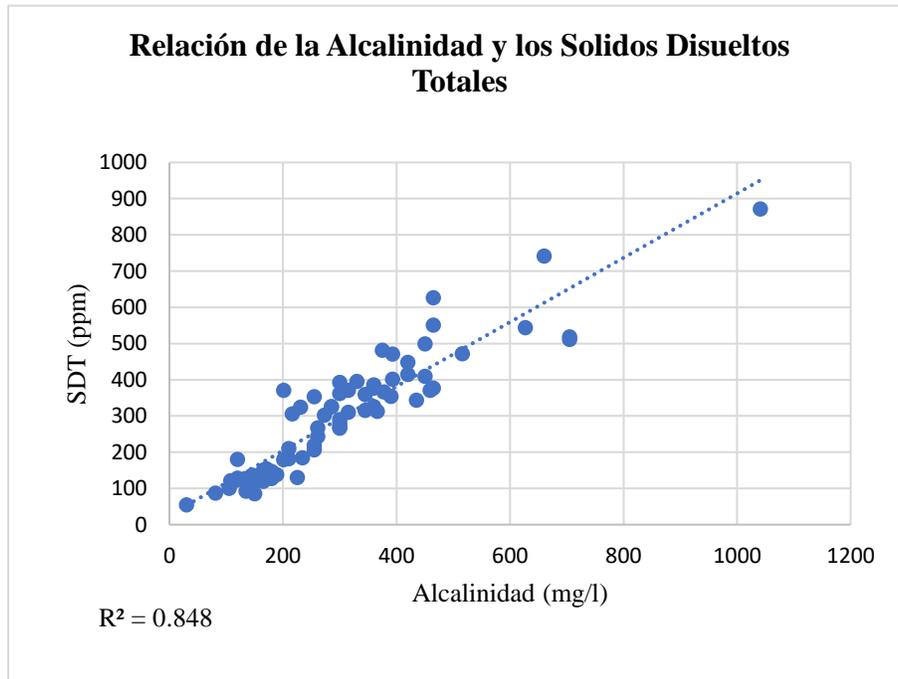


Figura 36 variable Alcalinidad vs SDT

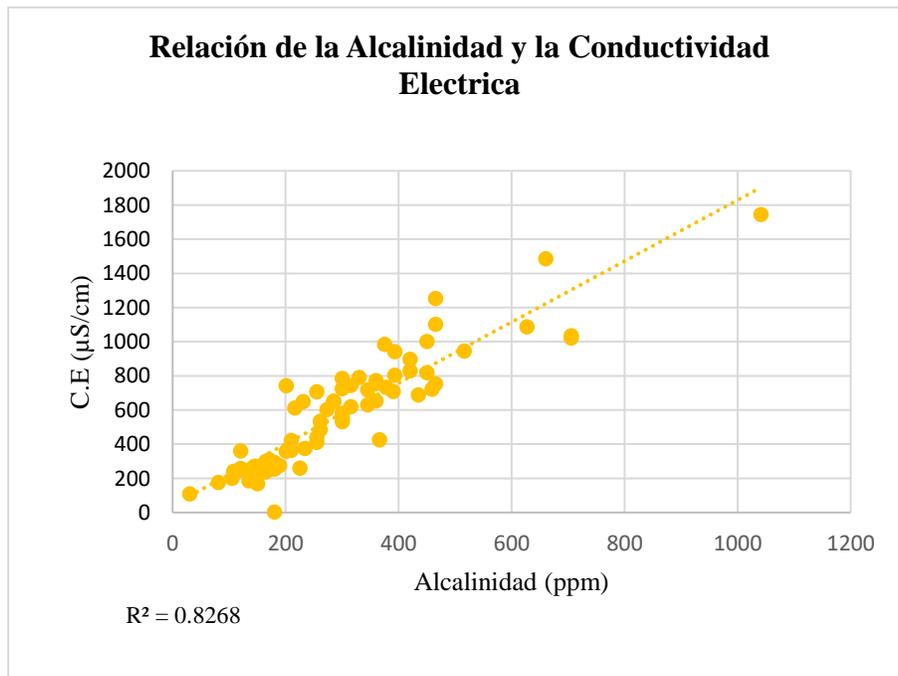


Figura 37 Variables Alcalinidad vs C.E.



Respecto a los gráficos de pH vs. Conductividad Eléctrica y la relación de la Alcalinidad vs. pH (Figura 38 y Figura 39), estos presentan una correlación lineal negativa teniendo un $R^2=0.1992$ Y $R^2=0.0746$ respectivamente.

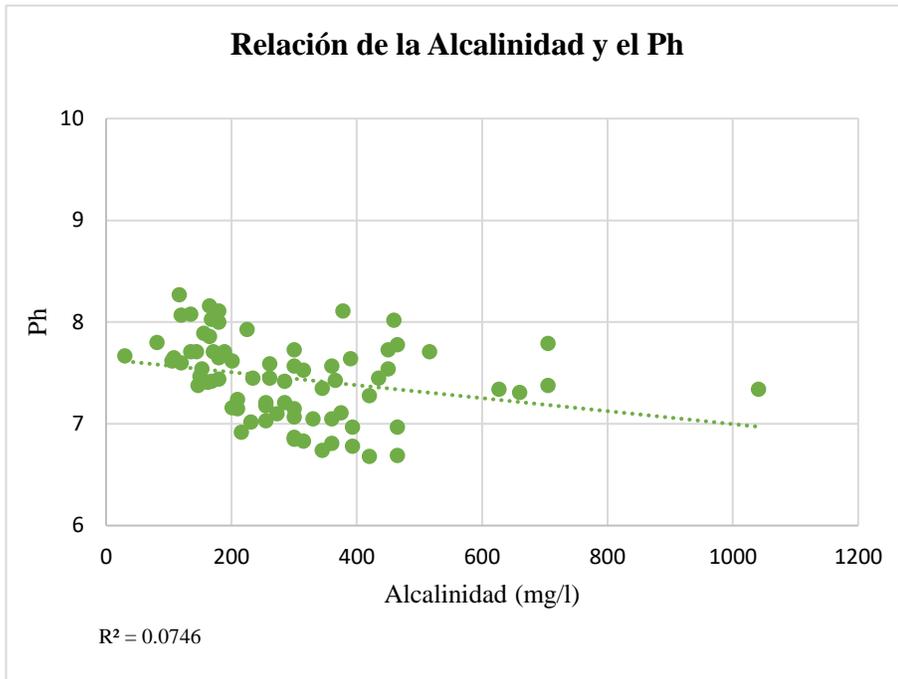


Figura 38 Variables pH vs C.E.

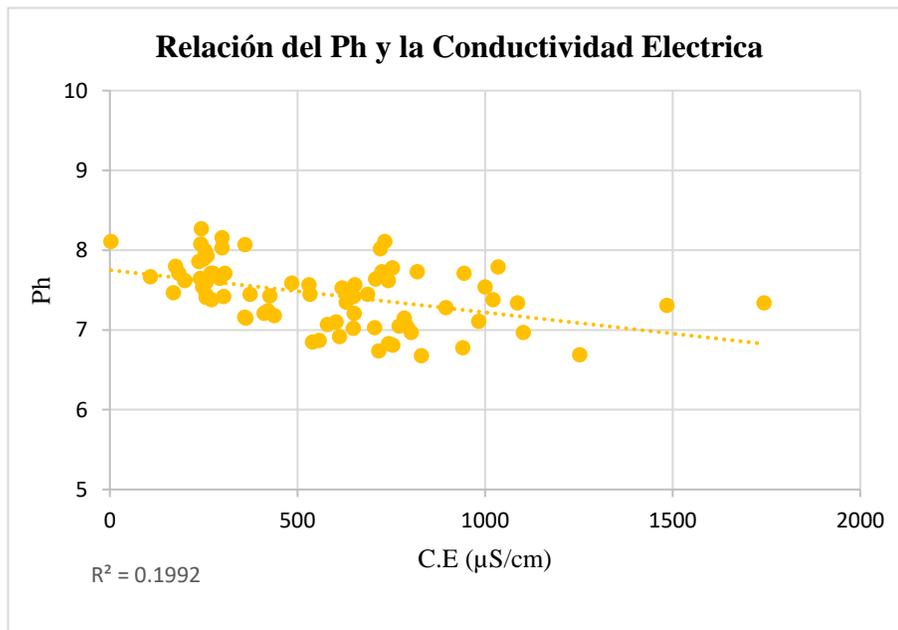


Figura 39 Variables Alcalinidad vs pH



B. *Análisis de los parámetros fisicoquímicos espacialmente distribuidos*

En la Figura 40 se presentan una serie de sitios que representa el número de pozos muestreados, con respecto al parámetro de Oxígeno Disuelto (en %), se dividen en 5 rangos, los cuales varían dependiendo del porcentaje y el número de pozos. De acuerdo con el histograma de frecuencias, para esta variable, el rango de 25% a 43.6% de O.D. está presente en 35 de los 76 pozos muestreados (simbología de círculos de tamaño 2), distribuidos por toda la zona de estudio; por su parte, la simbología de círculos de tamaño 4 y 5 (que representa valores de O.D. entre 62.2% y 99.4%), se encuentran zonificados en pozos del norte y oriente de la ciudad, en alrededor de 24 pozos.

La interpretación del valor del porcentaje de Oxígeno Disuelto con relación a la renovabilidad y recarga del acuífero, a grandes rasgos, es que, a mayor cantidad de moléculas de oxígeno disueltas en el agua, se trata de un fluido que ha estado más recientemente en contacto con oxígeno de la atmósfera y por tanto ha estado menos tiempo en el acuífero. Esto puede interpretarse como la existencia de un menor número de pozos donde el agua que recarga al acuífero es constantemente renovada, presentando valores de O.D. en el intervalo del 62 al 99%. Estos valores se han adquirido recientemente y pueden estar asociados con las fuentes superficiales, como lo son los manantiales y la derivación de la presa de Cointzio que está en contacto con la superficie. Por consiguiente, el mayor número de pozos que se presenta en el segundo rango del histograma no contiene un alto porcentaje de O.D., por lo que el agua extraída de estos pozos puede no estar renovándose de igual forma o a la misma velocidad.

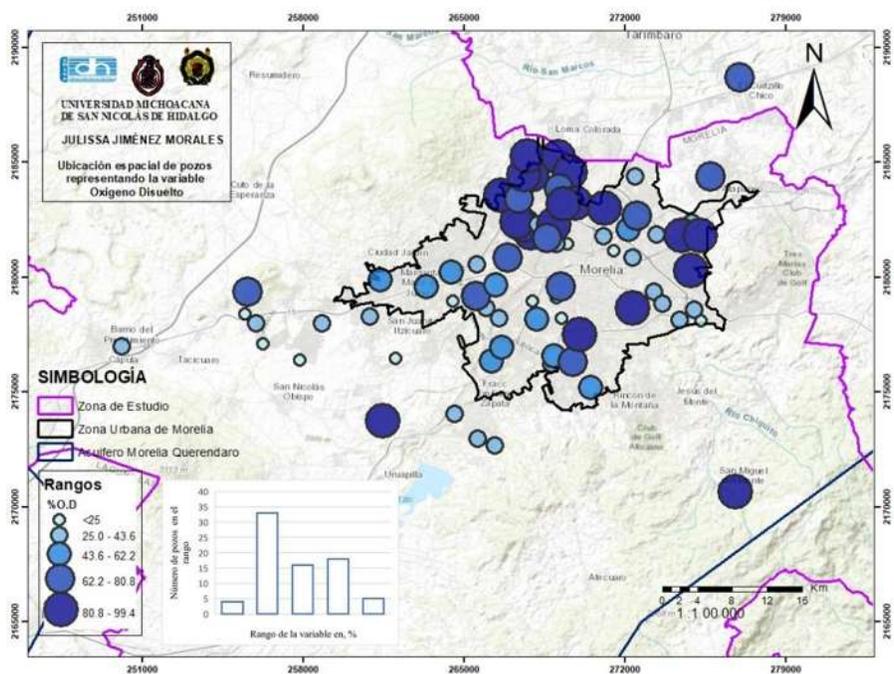


Figura 40 Ubicación espacial de la Variable Oxígeno Disuelto (en %) en la zona de estudio

Por otro lado, la Figura 41 presenta la distribución espacial de la variable temperatura, donde se destaca la ubicación de sitios en color rojo (simbología de círculos de tamaño 5), concentrados en la parte norte de la zona de estudio, con un rango de 30.5-34.3 °C y un número aproximado de pozos igual a 10. El mayor número de pozos representados en color naranja medio (simbología de círculos tamaño 3), se concentran principalmente al centro de la zona de estudio, con un intervalo de 22-26 °C, en alrededor de 35 pozos; finalmente, la menor cantidad de pozos con un rango de 15-19 °C, se presenta de manera aleatoria en la zona de estudio (simbología de círculos tamaño 1).

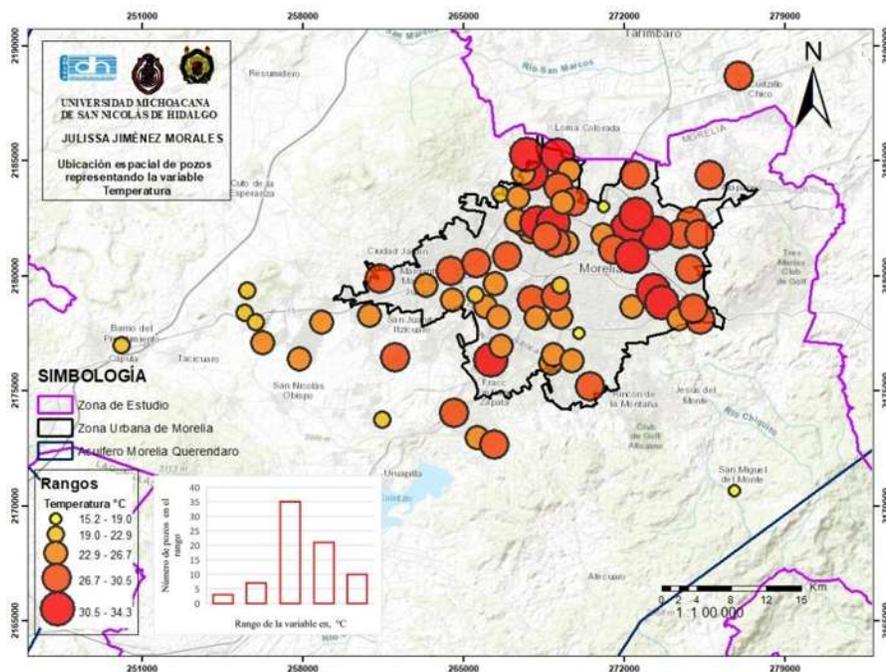


Figura 41 Ubicación espacial de la Variable Temperatura (°C) en la zona de estudio

Respecto al Potencial Redox (O.R.), su distribución espacial se presenta en la Figura 42, mostrando cada uno de los puntos muestreados. El histograma de frecuencias indica que los rangos 2 y 3 (simbologías de círculos tamaño 2 y 3), abarcan el mayor número de pozos (72 de 76), con un intervalo de O.R. entre 80 y 346.5 Mv., repartidos por toda la zona de estudio. En particular, los pozos representados por las simbologías 4 y 5 se localizan en la porción centro-norte de la zona de estudio, lo que indicaría que, al estar en contacto con la atmósfera, contienen valor mayor de O.R., representado por menos de 5 fuentes, donde su agua se encuentra en constante renovación.

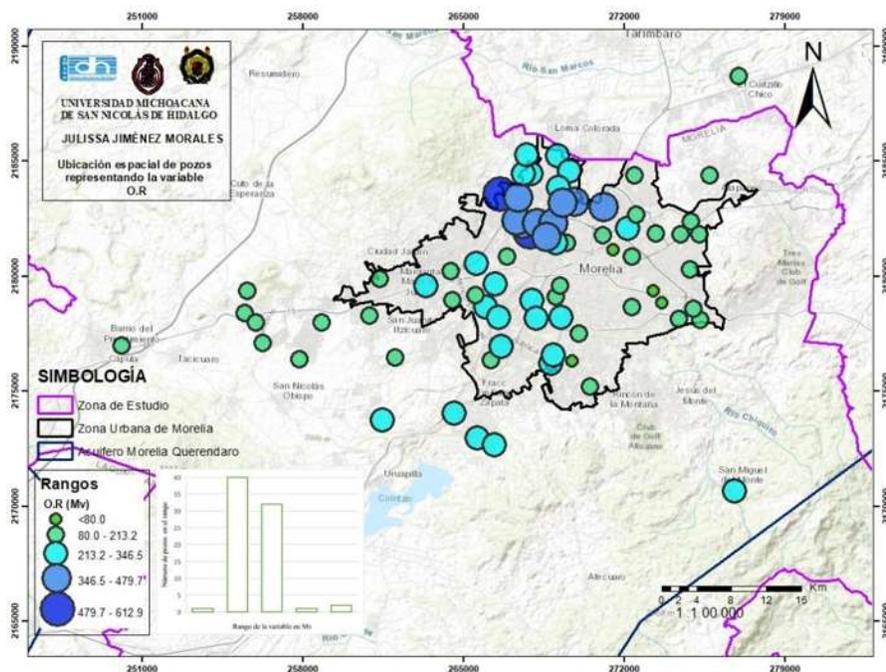


Figura 42 Ubicación espacial de la Variable Potencial Redox (en Mv) en la zona de estudio



La Figura 43 describe cómo se comporta la variable Sólidos Disueltos Totales (S.D.T.) para la zona de estudio. Se observa que, al igual que la temperatura y el O.D., se concentra un determinado número de pozos en la parte nororiente, mostrado de acuerdo con el histograma de frecuencias en el tercer rango (simbología de círculos tamaño 3), con valores de 292.8 a 485.5 ppm y un total de 30 de 76 pozos muestreados. De igual forma y de acuerdo a los valores mostrados en el histograma de frecuencias, el menor número de pozos representados en el intervalo 5 (simbología de círculos tamaño 5), con valores de 678.3 a 871 ppm y un total de 2 pozos.

Se observa que el rango con menos cantidad de pozos con S.D.T. se localiza en zonas aledañas a la zona urbana de la ciudad, mientras que los pozos con mayor cantidad de S.D.T. en su mayoría se localizan al centro de la zona de estudio. Los valores de concentración de S.D.T. en las muestras de agua de las fuentes muestreadas, con respecto al flujo subterráneo, se asocia con el recorrido que realiza el agua desde su precipitación, infiltración y flujo subterráneo, ya que, al entrar más en contacto con las rocas, va adquiriendo mayor cantidad de minerales y elementos disueltos, que son transportados a lo largo del recorrido del agua en un acuífero.

Es común asociar una mayor cantidad de S.D.T. en una muestra de agua subterránea, a un mayor tiempo de residencia que ha tenido esa agua en el acuífero y más tiempo ha tenido para disolver minerales de las rocas por donde circula el agua, a diferencia de aguas de reciente infiltración, donde los S.D.T. son más bajos y más parecidos a otro tipo de fuente de agua (superficial o de lluvia). En el caso de los pozos analizados, la simbología de círculos tamaño 4 y 5 no supera los 10 pozos, donde se presentan valores de S.D.T. > 485 ppm (aún apta para consumo humano).

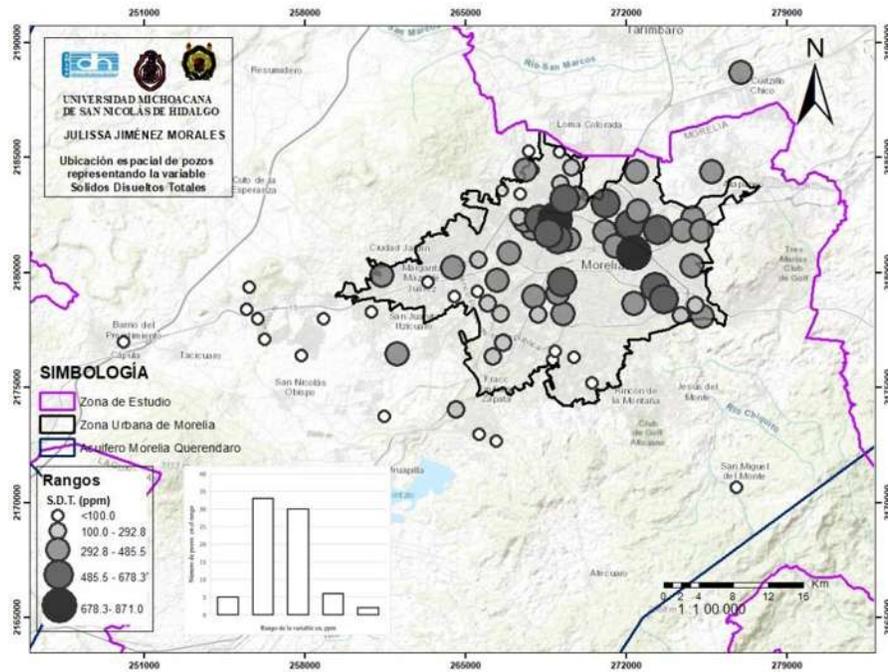


Figura 43 Ubicación espacial de la Variable Solidos Disueltos Totales (en ppm) en la zona de estudio

La Figura 44 muestra la distribución espacial de los valores medidos de pH que contiene cada uno de los sitios muestreados para su estudio. Se observa un contenido de pH uniforme en toda la zona de estudio, del cual el rango con el mayor número de pozos (simbología de círculos amarillos, de tamaño 3) se localizan al centro de la zona de estudio, con un rango del parámetro de entre 7.3 a 7.6, siendo 23 pozos. De acuerdo con la escala de medición del pH, se puede notar que el agua extraída se mantiene neutra, esto quiere decir que la calidad del agua presentada es buena y útil para su consumo.

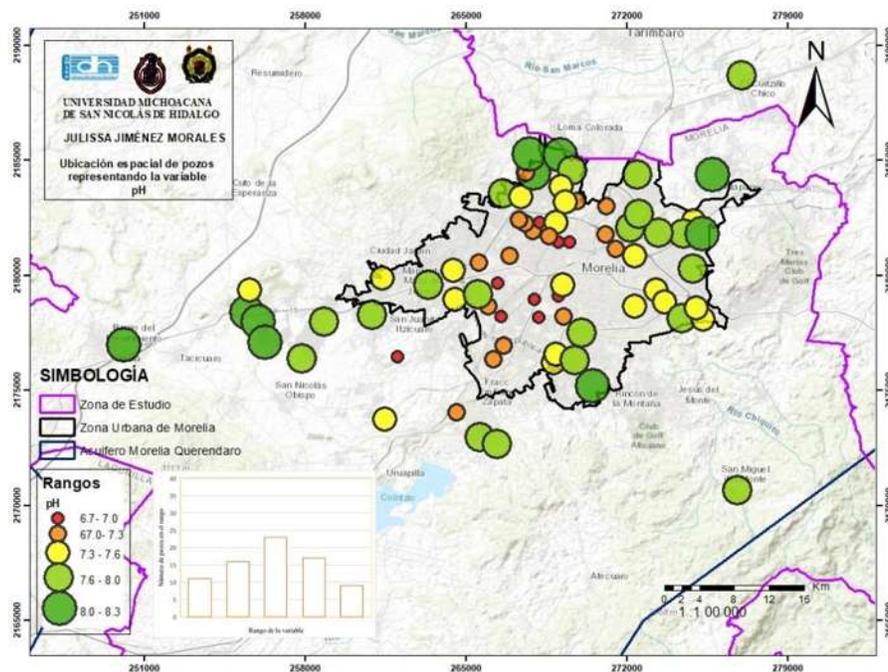


Figura 44 Ubicación espacial de la variable pH en la zona de estudio

Respecto a la variable de Alcalinidad, esta se presenta en la Figura 45, donde se contempla una concentración de pozos de igual forma en la parte nororiental de la zona de estudio. Esto quiere decir que al igual que el pH y los S.D.T., estos parámetros comparten una estrecha relación, pues a mayor pH, mayor es la Alcalinidad que posee y gracias a esto, aún con la presencia de S.D.T., teniendo un pH balanceado se neutraliza la Alcalinidad. Los rangos que van desde 545-793.3 ppm y 793.3-1041 ppm, tiene un número total de pozos de 5, representados en el histograma de frecuencias con el rango 4 y 5 (simbología de círculos tamaño 4 y 5). En el rango 2 (simbología de círculos tamaño 2), se encuentra la mayor cantidad de pozos con un total de 40, con intervalo de 50 a 297.8 ppm, estos se localizan en la porción sureste de la zona de estudio.

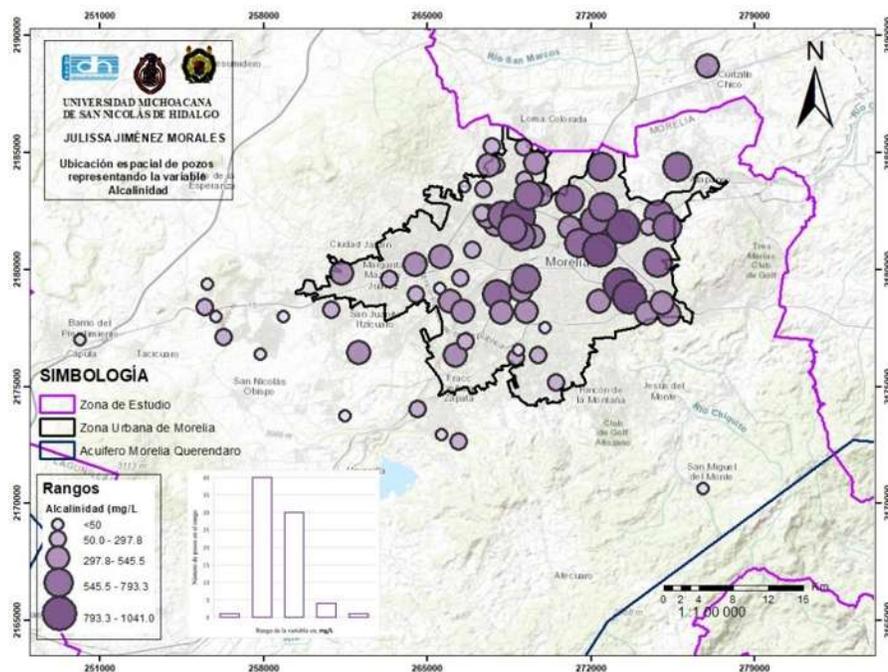


Figura 45 Ubicación espacial de la variable Alcalinidad (en ppm) en la zona de estudio

Finalmente, para los valores de Conductividad Eléctrica (C.E.), representados en la Figura 46, de acuerdo con el histograma de frecuencias muestran el rango 4 y 5 que de igual manera tienen el mismo comportamiento que los S.D.T. y Alcalinidad, con intervalos de 1076 a 1554 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y valores mayores a 1554 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que con 5 pozos representan los intervalos con menor número de pozos localizados en la porción nororiente de la zona de estudio. Así mismo el rango con valores de 120 a 598 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (rango 2 del histograma de frecuencias, con simbología de círculos número 2), tiene un total de 37 pozos que representan el mayor número de pozos de los intervalos del histograma y se localizan parcialmente distribuidos en la zona de estudio.

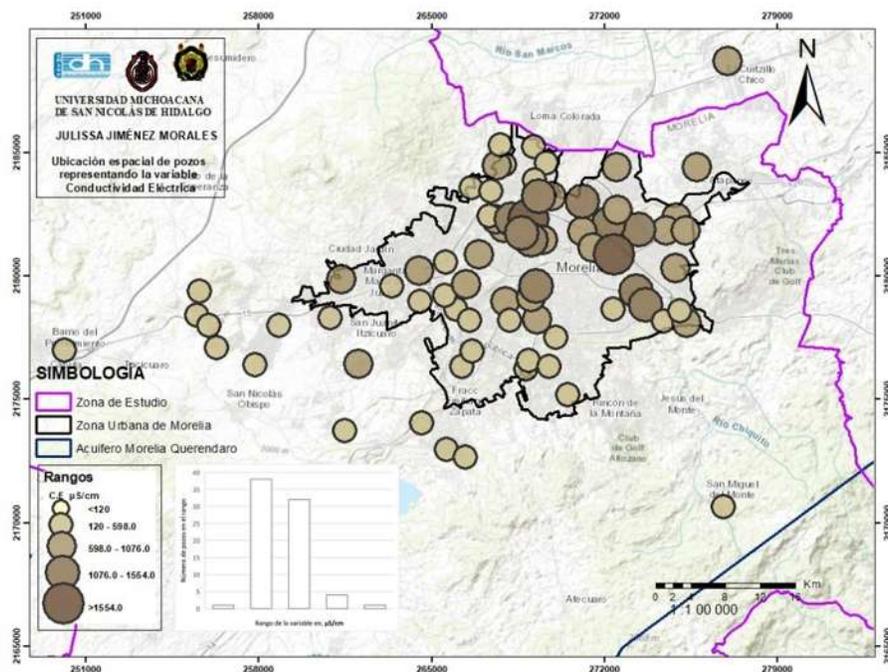


Figura 46 Ubicación espacial de la Variable Conductividad Eléctrica (en %) en la zona de estudio



5 DISCUSIÓN

En este apartado se concentra un resumen de resultados y su interpretación en cuanto a los datos obtenidos tanto de parámetros fisicoquímicos y datos isotópicos del muestreo y de la página de Waterisotopes.

5.1 Sobre los resultados isotópicos

Los valores isotópicos determinados para las muestras recolectadas de agua de lluvia en los 2 sitios de muestreo cercanos a Morelia permitieron obtener una línea meteórica local de la forma $\delta^2\text{H} = 6.8249\delta^{18}\text{O} - 0.4584$, construida a partir del promedio de 10 valores asociados con la toma de 75 datos a lo largo de un año hidrológico. Adicionalmente, el valor isotópico promedio de todas las muestras de agua de lluvia recolectadas proporcionó una medición espacial anual asociada a la zona de Morelia, que robusteció el conocimiento y la información recopilada desde la plataforma Water Isotopes, la cual contiene una base de datos isotópicos mensuales y anuales mundial para agua de lluvia, de la que se extrajeron datos isotópicos para sitios cercanos a la zona de estudio.

Los valores isotópicos $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras recolectadas comparadas con la base de datos de la plataforma Water Isotopes se corresponden en sus medidas mensuales y anuales, pero a su vez, los valores medidos en este estudio ($\delta^2\text{H} = -64.9$ y $\delta^{18}\text{O} = -9.4$) resultan un aporte significativo y específico en el conocimiento de la firma isotópica de entrada del agua de lluvia como recarga en el sistema subterráneo y demás fuentes de abastecimiento de la zona de estudio.

En cuanto al tratamiento de los datos obtenidos mediante el muestreo de agua de lluvia y la recopilación de datos de la página de Water isotopes, los resultados arrojan cierta información de acuerdo a su ubicación en el gráfico. El resultado de los datos del muestreo de agua de lluvia anual se localiza en la parte superior derecha de la Figura 29, el cual muestra una relación con los datos de la página de water isotopes distribuidos en una misma línea, esto indica que se tratan de zonas similares y el comportamiento entre ella es parecida. De la misma manera, la ubicación de los puntos del muestreo tomados para el análisis de isótopos $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se ubican de forma paralela a los datos mensuales obtenidos de la página de Water Isotopes.



Los resultados isotópicos de la LML datos mensuales (Figura 30), tanto de agua de lluvia como de datos de la página Water Isotopes en comparación con la LMM están estrechamente relacionados, ya que, al graficarse los resultados, el rango de valores de composiciones isotópicas de agua de lluvia se ubicó muy cercanos a la línea LMM. Se observa una relación lineal muy similar entre ellas.

A manera de comparación entre los diferentes estudios realizados a fuentes cercanas a nuestra zona de estudio, como lo es el estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la Cuenca de México, donde sus valores isotópicos promedio son iguales a $\delta^{18}\text{O} = -10,7$ y $\delta^2\text{H} = -73$; el análisis geoquímico e isotópico de aguas geotérmicas y manantiales de Los Azufres, Michoacán, México con los siguientes resultados $\delta^{18}\text{O} = -39.32$ y $\delta^2\text{H} = 3.11$; así como los del estudio de monitoreo de agua subterránea del Sur de la Cuenca de México, cuyos valores isotópicos promedio registraron valores de $\delta^{18}\text{O} = -8.07$ y $\delta^2\text{H} = -60.88$. Presentan una relación lineal similar entre los valores, y las muestras arrojaron resultados ligeramente por debajo de la LMM, a excepción del análisis realizado a Los Azufres (Michoacán), ya que se trata de aguas geotérmicas por lo tanto van cambiando sus propiedades isotópicas que pueden explicarse por procesos de evaporación.

En cuanto a los resultados de la campaña de muestreo realizado para la ciudad de Morelia, se espera que los resultados no varíen en cuanto al rango y que presente resultados parecidos a los estudios mencionados, debido a las condiciones climáticas que se presentan. Se puede apreciar que dentro del rango se posicionan los resultados de datos isotópicos extraídos de la página de Water Isotopes con una relación lineal de $\delta^2\text{H} = -64.9$ y $\delta^{18}\text{O} = -9.4$, tratándose de aguas de lluvia, con sus datos isotópicos sin grandes cambios.



5.2 Sobre los resultados de los parámetros fisicoquímicos

En general, hay una cierta correspondencia entre los datos de S.D.T., Conductividad Eléctrica (C.E.), y Alcalinidad, pues estos parámetros presentan cierta correlación.

Se clasificaron a partir de los gráficos bivariados, las correlaciones de los parámetros fisicoquímicos en 4 grupos: las primeras de ellas tienen una correlación nula (Figura 31, Figura 32,); los siguientes 3 gráficos (Figura 33, Figura 34 y Figura 35) presentan correlación positiva débil; los siguientes dos gráficos (Figura 36 y Figura 37), tienen correlación positiva fuerte; por último, 2 gráficos (Figura 38 y Figura 39), presentan una correlación lineal negativa.

Gracias a estas correlaciones se puede interpretar como se relaciona una variable con otra; las variables con altas correlaciones indican que son menos dispersos los datos respecto a la línea de tendencia de 45° . Respecto a las 3 variables mencionadas, se presenta una relación más uniforme, pues en donde existe alta Alcalinidad, se presenta alta C.E. y S.D.T. En el caso de las variables con las que se presenta una relación nula, quiere decir que al haber presencia de una variable y otra, no existe ninguna relación entre esas propiedades del agua.

Al igual que con los gráficos descritos anteriormente, para su mejor interpretación se realizaron mapas con ubicación espacial de fuentes en la zona de estudio, para cada una de las variables, estos mapas constituyen el comportamiento de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Morelia. Están integrados por shapes de la zona de estudio, el contorno de la zona urbana de Morelia, las fuentes de abastecimiento, el acuífero Morelia Queréndaro, entre otros. Para conocer la distribución de los valores de los parámetros en la zona de estudio, se integraron los histogramas de frecuencia de cada variable, dividiendo en 5 rangos los valores, los cuales indican los valores de concentración en cada uno de los sitios de muestreo. Estos rangos están representados por círculos de distinto color para cada variable y un tamaño diferente a medida que el valor de concentración va ascendiendo. También, en el histograma se indica el número de pozos que se encuentran en un determinado rango.



Estos mapas como ya se había mencionado, sirven para tener una idea de la relación que posee el agua superficial con el agua subterránea. En casi todas las variables se observa que un número representativo de pozos se posicionan en la parte superior derecha de cada uno de los mapas. Esto quiere decir que espacialmente las variables están relacionadas de alguna manera entre ellas. Cabe mencionar que, dentro del muestreo a las fuentes de abastecimiento, en su mayoría fueron de pozos profundos (profundidad de pozos mayores a 90 m y menores a 230 m), pero también se recopilaron muestras para su análisis de agua superficial como lo son manantiales y una corriente superficial.

Respecto a la relación que tiene una variable con otra, el ejemplo de las variables S.D.T. y C.E., que en cierto número de pozos se encuentran en el rango 1 con valores menores de acuerdo al histograma (Anexo V), en comparación con las de aguas superficiales (manantiales, derivación de presa de Cointzio y escurrimiento superficial). Para ambas variables se observan los mismos tamaños (simbología de círculos), al tratarse de aguas que están en contacto con la atmósfera.



5.3 Sobre el reconocimiento de las fuentes de abastecimiento

El estudio al no contar aún con los resultados de las muestras tomadas para la ciudad de Morelia para análisis de isótopos estables de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, los parámetros fisicoquímicos de las muestras recolectadas, muestran un comportamiento y aporta cierta información a la investigación en cuanto al reconocimiento de las fuentes. Gracias a los mapas generados y explicados en el apartado de resultados pg.93 se puede conocer de acuerdo a su ubicación espacial y en el rango en que se encuentran si el agua corresponde a flujos de reciente recarga (asociado con flujos más naturales) o a flujos más profundos (dependiendo del tiempo de tránsito en el acuífero y su profundidad), los cuales pueden distinguirse con base en sus componentes fisicoquímicos. Para flujos naturales, los resultados de la variable S.D.T., toma valores en una concentración baja; en cambio, para flujos modificados, se trataría de aguas profundas que con el tiempo y su movimiento en su medio van ganando minerales, tomando valores más altos de S.D.T. Esto también se observa respecto a la localización de los sitios de muestreo en la zona de estudio, ya que si se habla de fuentes que se encuentran en zonas más altas (al sur de la zona de estudio) tienden a poseer valores más bajos (en caso de SDT, Alcalinidad y C.E), a diferencia de zonas más bajas (al centro y norte de la zona de estudio), donde estos parámetros van incrementando su concentración, esto debido a mayores tiempos de recorrido y residencia del agua en el acuífero.

También se observó un limitado número de pozos que en zonas altas en la porción noreste poseen valores bajos (S.D.T., Alcalinidad y C.E.), indicando entonces que posiblemente el agua extraída esté relacionada con flujos de reciente infiltración, al igual que zonas que presentan aguas muy someras, tales como los manantiales, o el caso de algunos pozos profundos, que presentan valores con bajo contenido de estos parámetros. Respecto l O.D., los mismos sitios de muestreo presentan valores altos de este parámetro, ya que estas aguas estuvieron en contacto con oxígeno de la superficie, adquiriendo un mayor contenido (en %) de esta variable.



El estudio también comprobó el caso de la explotación de agua subterránea localizada en la parte centro y norte de la zona de estudio, asociados con flujos con altos contenidos de S.D.T., típicas de aguas más evolucionadas o de mayor tiempo de residencia en el acuífero, esto debido a la disolución de más minerales y un flujo que ha circulado en el acuífero a mayor profundidad. Al ser interceptados sus flujos por bombeos excesivos, se inicia la extracción de estos fluidos más profundos, sin observarse renovabilidad del agua más somera o de reciente infiltración.

Considerando el flujo del agua que es usada para el consumo y abastecimiento para la zona de estudio, los parámetros estudiados deben tener una calidad adecuada, para lo cual existen límites permisibles de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Olaiz Fernández G. 1995), que deben cumplirse con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua y los tratamientos posteriores de potabilización. Esta NOM establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional. En la Tabla 10 se muestran los valores de límites permisibles de algunos parámetros tomados para el análisis y desarrollo de esta investigación.

Tabla 10 Límites permisibles de parámetros fisicoquímicos

Característica	Límite Permissible
pH	6.5-8.5
Alcalinidad (ml/l)	500
SDT (ml/l)	1000



Con base a la NOM-127-SSA1-1994, se observa que los valores registrados en los sitios muestreados de la variable de pH (min: 6.68, máx.: 8.27, prom:7.45), estos se encuentran dentro de los límites permisibles, ya que cuenta con valores dentro de los rangos y su comportamiento es más constante por lo que cumple con buena calidad para extracción y consumo.

Con respecto a la Alcalinidad, el mayor número de pozos se encuentran dentro de los límites permisibles de la Norma (min: 30 mg/L, máx.: 1041 ml/L, prom:297.04 ml/L) y solo alrededor de 6 pozos muestran altos valores de Alcalinidad, por lo que son aguas que necesitan un pretratamiento antes de ser surtidas para su consumo.

Así mismo, para los S.D.T. los valores que se encontraron (min:54 ppm, máx.: 871 ppm, prom:292.89 ppm) indica que todos los pozos muestreados (76 muestras) están dentro de los límites permisibles para su consumo (Tabla 10) ya que el pozo con valores altos de S.D.T. tiene un valor de 871 ppm



6 CONCLUSIONES

6.1 Sobre los resultados isotópicos

En general las muestras de agua de lluvia para el análisis $d\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, razones isotópicas características del muestreo se encuentran entre el intervalo de ($d\delta^2\text{H}=-63$ y $\delta^{18}\text{O}=-7.8$), en comparación con los datos proporcionados de la página Water Isotopes ($d\delta^2\text{H}=-64.9$ y $\delta^{18}\text{O}=-9.4$). Las ecuaciones de las LML y la LMM son muy similares. Al carecer de resultados de las muestras recabadas en pozos, manantiales y cuerpos de agua superficiales, no fue posible hacer una comparación más específica para flujos subterráneos y superficiales respecto a los de lluvia analizados.

La falta de información existente para datos isotópicos en la ciudad de Morelia representa un problema grave ya que no se está monitoreando la fuente de suministro humano más a fondo. Resulta de suma importancia realizar estudios más especializados para poder así tener un panorama más claro de la problemática que se está viviendo hoy en día en esta ciudad y en otras con circunstancias similares.

6.2 Sobre los resultados de los parámetros fisicoquímicos

Al igual que los datos isotópicos, los parámetros fisicoquímicos aportan sólo un cierto porcentaje a la información requerida para conocer el comportamiento del recurso hídrico en la zona de estudio. Estos parámetros permitieron determinar correlaciones directas entre parámetros, especialmente entre las variables de C.E., S.D.T. y Alcalinidad, asociando bajas concentraciones y/o mediciones con flujos de reciente infiltración que son explotados en algunos pozos y flujos más evolucionados, más profundos, explotados en algunos pozos al centro y norte de la zona de estudio, asociados con valores más altos de los parámetros mencionados.



6.3 Sobre el reconocimiento de las fuentes de abastecimiento

Respecto a la sectorización que se usa para el abastecimiento de agua potable en la ciudad de Morelia, ésta se distribuye en 8 sectores, donde se localizan 116 pozos, 2 manantiales, una fuente superficial y la derivación de la presa de Cointzio, los cuales son Operados por el OOAPAS. En la Tabla 11 se encuentra la definición de los diferentes sectores operados por OOAPAS para la ciudad de Morelia.

Tabla 11 Sectorización del OOAPAS

No.	SECTOR
1	Centro
2	Independencia
3	Revolución Norte
4	Revolución Oriente
5	Nueva España
6	Independencia Poniente
7	República Poniente
8	República Norte

A continuación, se presentan las problemáticas encontradas en las diferentes fuentes de abastecimiento referentes al suministro de agua potable en la ciudad de Morelia.

En caso de los manantiales, derivación de presa y corriente superficial, se encuentra de manera similar el problema de falta de mantenimiento en cada zona, con la presencia de crecimiento de material orgánico (crecimiento de lirio, algas, carrizales, etc.); además, el acceso sin restricción al lugar permite que las personas que habitan cerca de las fuentes usen este recurso de manera libre por lo que se puede observar la presencia de detergente (manantial la Mintzita), contaminación por basura, etc.

Actualmente las fuentes presentan algunos problemas con la distribución del recurso, por lo que en ocasiones su extracción y distribución se realiza por medio de tandeo, tal es el caso del manantial “La Mintzita”, que tiene su ubicación en las coordenadas UTM-X: 261483, UTM-Y: 2173751, el manantial “Los Manantiales”, con coordenadas UTM-X: 265538, UTM-Y: 2179195.



En particular el sistema de nacimientos de la zona de “Los Manantiales” está dividida en dos partes: una porción abastece la Universidad Latina de América (UNLA), a un ejido y al OOAPAS (con un cárcamo que lleva tiempo sin bombear) y el otro extremo del sistema de nacimientos es operado solo por OOAPAS, que posee actualmente un Q_{max} de 60 lps las 24 hrs, alimentando 5 colonias, con un gasto muy restrictivo para la cantidad de personas que suministra. Otra de las problemáticas que se presenta en este manantial es la infiltración de aguas residuales y por consiguiente el crecimiento de materia orgánica, que es un problema que afecta directamente a la calidad que posee el agua.

Respecto a la derivación de la presa Cointzio con coordenadas UTM-X: 270022, UTM-Y: 2177518, el mantenimiento no se da si no hasta su llegada a la planta potabilizadora, presenta problemas de S.D.T. (presencia de animales, lirios, raíces, etc., que va ganando durante su recorrido hasta la planta). En 2020, durante los meses de lluvia (julio-agosto) se presentó el levantamiento de sedimentos por lo que hubo problemas de hierro y manganeso. Esto requiere un tratamiento y precio más elevado para su consumo. Por último, la captación superficial “San Miguel” tiene su localización en las coordenadas UTM-X: 276807, UTM-Y: 2170662, que al igual que los manantiales presentan las mismas condiciones y esta se ubica en un terreno baldío, no protegido.

En lo que respecta a los pozos, en general, estos presentan problemas de mantenimiento, presencia de animales, falta de limpieza, algunos presentan problemas de tuberías en mal estado.

Respecto a los volúmenes de extracción, el personal de OOAPAS indica que son cada vez menores, a comparación con algunos años atrás, presentándose problemas de abatimiento a lo largo del tiempo, tal es el caso de los pozos que se describen particularmente a continuación.



- Pozo “Lomas de la maestranza”, localizado en el sector 7, que originalmente tenía un Q_{\max} de 20 lps y actualmente se extrae un Q_{\max} de 13 lps.
- Pozo “Santa Cecilia”, ubicado en el sector 5 con un Q_{\max} original de 18 lps y ahora suministra un Q_{\max} de entre 2.15 lps (sin cárcamo de bombeo) y 12.9 lps (con cárcamo de bombeo).
- Pozo “Misión del valle I”, ubicado en el sector 3, con un Q_{\max} original de 60 lps y ahora suministra un Q_{\max} de 42 lps.
- Pozo “Periodistas”, ubicado en el sector 4, actualmente trabaja solo al 50 % de su capacidad, con un Q_{\max} de 0.75 lps. Esto puede ser debido a la poca profundidad y disponibilidad del flujo ya que tiene 170 m de profundidad.
- Pozo “Jardines del rincón”, ubicado en el sector 4, con un Q_{\max} original de 26 lps y ahora se extrae un Q_{\max} de 23.4 lps.
- Pozo “Prados verdes Galeana” del sector 8, se extrae actualmente un Q_{\max} de 6.57 lps y presentó un descenso en enero del 2020 a partir de Q_{\max} original de 9.01 lps y un volumen de extracción igual a 881,291.31 m³/año.

Esta problemática pone en riesgo las múltiples actividades de la población que son abastecidas, ya que los problemas de falta de agua en algunas colonias son cada vez más recurrentes y eso perjudica la calidad del servicio. Esta problemática fue encontrada al realizar el muestreo realizado en el presente proyecto; cabe mencionar que de los 116 pozos que son operados por OOAPAS, solo se analizaron 76 de ellos, y en su mayoría presenta la problemática descrita anteriormente por lo que se puede pensar en que esta circunstancia está presente en todos los sectores que sirven como abastecimiento a la zona de estudio.



Para disminuir estas problemáticas, se proponen alternativas preventivas para mejorar el uso sustentable de las fuentes de abastecimiento de agua para Morelia, tanto del uso del agua subterránea como superficial y manantiales derivados de todos los análisis anteriores, las cuales se describen a continuación:

- Es muy importante realizar estudios de disponibilidad y calidad del agua, ya que la falta de información impide mejorar la situación en la que se está viviendo.
- Realizar monitoreos periódicos de parámetros fisicoquímicos e hidráulicos (volúmenes de extracción/descarga y niveles)
- Incorporar nuevas técnicas isotópicas y químicas para el estudio de la renovabilidad del recurso hídrico en la cuenca y el acuífero
- Mantenimiento y rehabilitación de pozos y manantiales
- Cuidado de las zonas de recarga (partes altas de la cuenca de Morelia)
- Automatización de la medición de parámetros en campo
- La colaboración entre el organismo operador (OOAPAS) y las instituciones universitarias
- Difusión de las problemáticas y alternativas del uso y cuidado del agua
- En el caso de los pozos con problemas de disminución del gasto, como medida preventiva, aumentar su profundidad, aunque representa un costo elevado, y la extracción del agua requiere mayor tratamiento.
- Monitorear los límites permisibles de parámetros normados en la NOM-127-SSA1-1994, pues algunos pozos presentan valores superiores a la norma, que deben atenderse con algún tratamiento de potabilización



6.4 Conclusiones generales

En general, el trabajo desarrollado y su aporte al cuidado del agua y al organismo operador se muestra en que el estudio comprobó que el análisis de isótopos estables y parámetros fisicoquímicos son una herramienta muy importante para el estudio de la evolución del agua superficial y subterránea, ayudando a complementar la información que poseen las fuentes de abastecimiento de agua potable con relación a la problemática que se tiene actualmente. El aporte de esta investigación al Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia, es dar hincapié a la falta de información que posee, ya que los resultados químicos obtenidos aportan una idea del comportamiento que tiene este recurso y la forma que ha evolucionado hasta ahora. La forma en que se relaciona sus componentes químicos con el medio en que se encuentra y la información que otorga a la problemática, pueden ser útiles para la toma de medidas que prevean problemas en el futuro y fomentar el cuidado al recurso. Como se observó en algunas fuentes, con las problemáticas que presentan, se corre el riesgo de que en el futuro los recursos de agua potable vayan degradándose y no sea posible su uso directo, incluso disminuirse hasta su desaparición, como puede ser el caso de las fuentes superficiales y los manantiales.



7 REFERENCIAS

- Antalla G. A. (2011). Determinación de los sistemas de flujo del agua subterránea y caracterización de sus componentes en regiones desérticas: Loreto Baja California Sur.
- Appelo, C. J., & Postma, D. (1996). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Armienta H. y Rodríguez C. (2009). Estudio Monitoreo de agua subterránea del Sur de la Cuenca de México
- Arocha R. (1980). *Abastecimiento de agua (Teoría y Diseño)*. Editorial Vegas. Caracas, Venezuela. 284 pp.
- Bogotá D.C. (2011). Programa de vigilancia por laboratorio de calidad del Agua para consumo humano, ISBN, República de Colombia.
- Bowen Gabriel (2003). *Wáter isotopes*. Springer Isoscapes: Comprensión del movimiento, patrón y proceso en la Tierra a través del mapeo de isótopos. *WaterIsotopes.org (utah.edu)*
- Bustamante Ibáñez Elizabeth A. (2017) Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero de Soconusco Chiapas. Pg. 27. IPICYT S.L.P.
- CICESE. (2018). CLICOM. Obtenido de Base de Datos Climatológica Nacional: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Clark I. D. y P. Fritz. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers INC., 352 pp.



- Climate Data Org. (1999). Calculated By Climate. Programa de información para datos climatológicos. Disponible en: *Datos climáticos mundiales - Climate-Data.org*
- CONABIO (1992). Conoce toda la biodiversidad mexicana, Gob. México, disponible en <https://gobmx.mx/conabio/>
- CONAGUA. (1990). Estudio Geohidrológico cuantitativo del acuífero Morelia-Queréndaro, Mich. Realizado por la compañía de Consultores, S.A.
- CONAGUA. (1990). Registros de litología, acuífero Morelia- Queréndaro, Mich.
- CONAGUA. (1993). Estudio de diagnóstico de las condiciones Geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero Morelia-Queréndaro, Michoacán, realizado por la empresa Servicios, Estudios y Proyectos de Ingeniería y Ciencias de la Tierra, S.A. de C.V.
- CONAGUA. (1997). Registros de Piezometría, Acuífero Morelia-Queréndaro, Mich.
- CONAGUA (1998). Cuencas Hidrológicas. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONAGUA. (2007). Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- CONAGUA (2019) Agua en el Mundo. Cap. 8 Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)
- CONAGUA. (2020) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.



- Cortés, A.; Arizábal, R.D.; Rocha, R. (1989). Artículo sobre Estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la Cuenca de México. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Craig, H. (1961). "Isotopic variations in Meteoric Waters". Science 133, 1702-1703.
- CUAIEED (2017). Coordinación de Universidad Abierta, Innovación Educativa y Educación a Distancia de la UNAM
- DMCA (2017). Conductividad Eléctrica/Salinidad. Foletto Informativo 3.1.3.0
- Domínguez Sánchez, C.; Lara Ledesma, B.; Sánchez Quispe, S.T.; Soto Andrade, E., (2011). Propuesta de suministro del abastecimiento de las fuentes de la ciudad de Morelia, Michoacán, mediante el empleo de polígonos de Thiessen, Seminario Iberoamericano de Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua, S E R E A
- Ehleringer J.R. y Osmond C.B. (1989). Stable isotopes. En: Pearcy R.W., Ehleringer J.R., Mooney H.A. y Rundel P.W. Eds. Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation, pp. 281-300, Chapman & Hall, Londres.
- ERIC II. (1999). El clima de la ciudad de Morelia.
- ESRI. (2002). ¿Qué es ArcGIS? SIG de esri. El sistema de ArcGIS pp. 1-2
- Garduño-Monroy V.H., Israde-Alcántara I., Francalanci L., Carranza O., Chiesa S., Corona P. y Arreygue-Rocha E. (1997). "Sedimentology, volcanism and tectonics of the southern margin of the lacustrine basins of Maravatío and Cuitzeo, Mich., México", en IAVCEI General Assembly, Fieldtrip guidebook, Puerto Vallarta, Jal., Guadalajara, Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco, Unidad Editorial.



- Garduño-Monroy V.H., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I. y Rodríguez-Torres G.M. (2001). “Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 18, núm. 1, pp. 37-54.
- Garduño Monroy V. H.; Niccolò Giordano, Ávila Olivera J.A.; Hernández Madrigal V.M.; Sámano Nateras A. y J.E. Díaz Salmerón (2007). Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, para una correcta planificación del territorio.
- Gavin Newsom (2013). Conductividad Eléctrica/Salinidad, Foletto Informativo 3.1.3.0. Wáter Boards-state wáter resources control board, Estado de California /www.waterboards.ca.gov
- Harrison, R. M. (2003). El medio ambiente. Introducción a la química medioambiental y a la contaminación. España: Acribia.
- Hasenaka T. y Carmichael I. S. E. (1985). “The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central, Mexico-their age, volume and distribution, and magma discharge rate:” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 25, núm. 1-2, pp. 105-124.
- Hoefs, J. (1988). *Stable Isotope Geochemistry*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- IGME (2005) La composición química de las aguas naturales, libro 43, pg. 17.
- IMTA (2019). La importancia de la medición del agua de lluvia La importancia de la medición del agua de lluvia. Disponible en: | *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua / Gobierno / gob.mx* (www.gob.mx).
- INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Michoacán de Ocampo.



- INEGI. (2020). México en cifras: Población, Área Geográfica, Morelia Michoacán, México.
- Ingeniería Hidráulica en México. (2000) Análisis geoquímico e isotópico de aguas geotérmicas y manantiales para definir el estado de equilibrio agua-roca del reservorio de Los Azufres, Michoacán, México. Vol. XV
- Ingeniería Hidráulica (2020) Infiltración de agua en el suelo, tema: Agua subterránea. Disponible en: <https://www.hidraulicautiling.com/2020/04/infiltracion-de-agua-en-el-suelo.html>
- 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 di Milano, Ph. D. Thesis.
- Jiménez Cisneros, B. E. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. México: Limusa.
- Kehew, A. E. (2001) Applied Chemical Hydrogeology. USA. Prentice Hall. 368 pp.
- Lambán., Custodio, E. (1999). Estudio isotópico ambiental (18O- δ D en la unidad Anoia: principales zonas de recarga e implicaciones en el funcionamiento hidrogeológico del sistema. Ingeniería del Agua. Vol.6 Num.2, pp. 139-150.
- Lozano Trejo S. (2020). Infiltración y escorrentía de agua en suelos de una cuenca, en el sur de México. Terra Latinoam vol.38 no.1 Chapingo
- Manahan, S.E. (2007). Introducción a la química ambiental. México: Reverté
- Martínez, A. G. (2018). Información de México. Obtenido de Para todo México: <https://www.paratodomexico.com/geografia-de-mexico/index.html>
- Manzano Solís, L. R. (2007). Diseño de Base de Geo datos Censales Demográficos e Implementación Geomántica de Indicadores Hídricos. Tesis de Maestría en Ciencias



del Agua, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. 201p

- Metcalf y Eddy, I. (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. (3ra. ed., Vol. 1). México: Mc Graw Hill.
- OIEA (2004). Técnicas isotópicas en hidrología- instrumentos prácticos para resolver problemas del agua. boletín, Vol., 24.
- Olaiz Fernández G. (1995). 01-18-96 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. México, D.F
- Ontiveros Arturo S.; Alfredo Granados O., Adán Pinales M.; Sergio S. Solís y Josiah Mcconnell (2018). Evolución temporal del flujo del agua subterránea en Ciudad Juárez, Chihuahua aplicando modelación geoespacial. Tecnociencia chihuahua vol. XII, núm. 2 pg. 104
- OOAPAS. (2006). Estudio Geohidrológico de la zona Sur-Poniente de Morelia.
- Ordoñez Gálvez J.J. (2011) “Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico”. SENAMHI
- Pizarro, R., Ramírez, C., y Flores, J. P. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. Chile.
- Puritec de México (2020). Sólidos disueltos en agua; Que son y su importancia de medirlos. Disponible en: manantialwater.com.mx)



- Rodríguez Abel, (2017) Infiltración, capítulo 3 pg. 27, Loreto Baja California Sur. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48835872/1_136_147_89_1258.pdf?1473872550=&response-content-disposition=attachment%3B+filename%3DCAPITULO_3_INFILTRACION.pdf&Ex
- Ruíz, J. L. (2008). Impacto de la sobreexplotación del acuífero del Valle de Guaymas en la Calidad del Agua, Tesina, Colegio de Sonora. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo.
- SARH. (1977). Estudio Geohidrológico preliminar de la zona de Morelia-Queréndaro, estado de Michoacán.
- SARH. (1988). Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos, Dirección de Aguas Subterráneas. Estudio de exploración geofísica y actividades geológicas complementarias en la zona de Álvaro Obregón, Michoacán
- Sawyer, C., McCarty, P., & Parkin, G. (2001). Química para Ingeniería Ambiental (4a. ed.). Colombia: Mc Graw Hill.
- Soler, A.; Otero, N; Rosell, M.; Carrey, R.; Domènech, C. (2015) Tema 2: Isótopos de la molécula de agua. Grupo de Mineralogía Aplicada y Geoquímica de Fluidos Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona.
- Soto Galera, E. Mazarí Hillary, M., y Bojórquez Tapia, L. (2000). Estudio de las entidades de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México propensas a la contaminación de agua subterránea. Investigaciones geográficas, 1(43).
- Spellman, F. (2008). The science of wáter: concepts and applications (2nd ed.). Florida: CRC Press.



- UNESCO, ONU-Agua. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>
- UNICEF Y OMS. (2019). Informe sobre las Guías para la calidad del agua potable. Tema: el agua. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
- Weather Spark (2003) El clima típico de cualquier lugar del mundo. Disponible en: *Clima promedio en Morelia, México, durante todo el año - Weather Spark*
- Wallick, E. I. (1981). Chemical evolution of groundwater a drainage basin of Holocene age, east-central Alberta, Canadá. *Hydrology Journal* (54), 245- 283.



8 ANEXOS

Anexo I. **Descripción de presentación ante el Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia**

Se realizó una previa solicitud (Figura 48) ante el organismo con la finalidad de adquirir los permisos convenientes al muestreo que se pretende realizar a las diferentes fuentes que suministran el agua potable en la ciudad de Morelia. Teniendo una respuesta inmediata ante la mencionada solicitud, ellos necesitaban saber la razón por la cual necesitábamos hacer el muestreo y cómo iba a ser empleada la información recabada después de su análisis. Es por ello que se realizó una presentación de la cual se incluyó toda la información necesaria para poner en contexto al organismo. El día lunes 15 de febrero a las 8:00 hrs se tuvo una cita en las instalaciones de la planta potabilizadora Vista Bella de esta ciudad, de las cuales fuimos atendidos por el Dr. Francisco Medina y el M. C. Iván Gonzales encargados de la distribución y potabilización de este organismo.

La presentación incluía como punto principal el tema “Caracterización de las fuentes de abastecimiento de agua potable en la Ciudad de Morelia mediante análisis Isotópicos”. y los apartados introducción, justificación, objetivo general, objetivos específicos, estudios previos realizados, información previa recopilada (solicitud de información previa ante el OOAPAS Figura 47, las solicitudes correspondientes al organismo, el plan de acción (ruta de muestreo, calendario de muestreo), procedimiento de muestreo, especificaciones y los contactos necesarios. La presentación fluyó de manera formal teniendo principal atención y aportaciones de la experiencia que han tenido con el tema referente. Una vez informados nos otorgaron su apoyo y quedando a la espera del calendario con sus respectivos horarios de parte de nosotros los solicitantes.



Morelia Michoacán a 24 de noviembre del 2020.

Dr. Julio César Orantes Ávalos
Director general del OOAPAS
Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia
PRESENTE

Asunto: Solicitud de información histórica

Por medio de la presente, quien suscribe, M.C. María del Mar Navarro Farfán, estudiante del doctorado en Ciencias en Ingeniería Química me dirijo a usted, de la manera más atenta para solicitar información proveniente del OOAPAS para utilizarla en los proyectos que se están realizando por parte del Posgrado en Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Civil y Departamento de Hidráulica, todos pertenecientes a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El proyecto doctoral es "Metodología para la modelación del agua subterránea en las masas geológicas asociadas al acuífero Morelia-Queréndaro con transporte de compuestos nitrogenados y elementos potencialmente tóxicos", realizado por su servidora M.C. María del Mar Navarro Farfán (matrícula 1116779E); así como el proyecto de tesis de licenciatura "Reconocimiento de las fuentes de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Morelia mediante análisis isotópicos", por parte de la alumna de la facultad de Ingeniería Civil Julissa Jiménez Morales (matrícula 1542277F).

La información solicitada es la siguiente:

1. Base de datos de la red de pozos que abastece la Ciudad de Morelia (localización por coordenadas UTM o geográficas, número total de pozos, año de perforación,

Figura 47 Solicitud de información sobre la sectorización de fuentes de abastecimiento de agua potable ante el OOAPAS de Morelia

Morelia Michoacán a 04 de febrero del 2021

Dr. Julio César Orantes Ávalos
Director General del OOAPAS
Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia
PRESENTE

Asunto: Solicitud de acceso para la
toma de muestras en diferentes fuentes de abastecimiento de agua potable
gestionadas por el organismo operador

Por medio de la presente, quien suscribe, Julissa Jiménez Morales, pasante de la carrera de Ingeniería Civil, me dirijo a usted de la manera más atenta, para solicitar el acceso a las diferentes fuentes que abastecen la ciudad de Morelia (pozos, manantiales y presas), gestionados por el OOAPAS, con objeto de obtener muestras representativas del agua a las que se realizarán análisis isotópicos de ^{18}O y ^2H . Esta información será utilizada para un proyecto de tesis desarrollado en el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

El proyecto de tesis de licenciatura titulado "Reconocimiento de las fuentes de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Morelia mediante análisis isotópicos", se está desarrollando por su servidora Julissa Jiménez Morales (matrícula 1542277F), con asesoría del Dr. Mario Alberto Hernández Hernández.

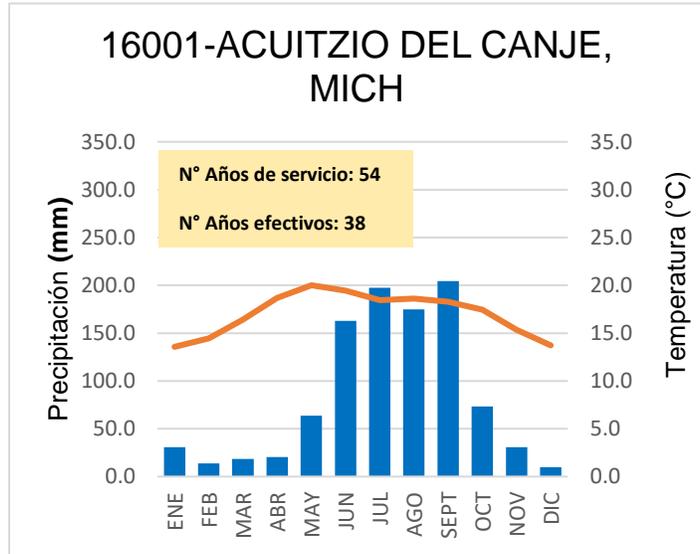
Las fuentes de las que se solicita autorización de acceso (en el entendido de que son fuentes gestionadas por el OOAPAS), son los mencionados en las siguientes tablas:

Figura 48 Solicitud de permisos convenientes para el acceso al muestreo de las fuentes de abastecimiento de agua potable operados por el OOAPAS

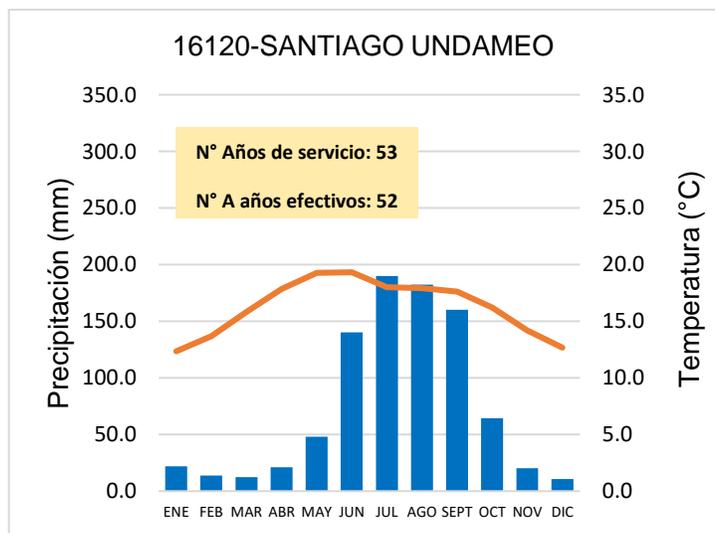


Anexo II. Anexo Gráfica de datos de cada estación elegida para análisis de precipitación

	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	30.9	13.6
FEBRERO	13.8	14.4
MARZO	18.6	16.4
ABRIL	20.5	18.7
MAYO	63.5	20.0
JUNIO	162.9	19.5
JULIO	197.4	18.5
AGOSTO	174.9	18.6
SEPTIEMBRE	204.4	18.3
OCTUBRE	73.5	17.5
NOVIEMBRE	30.8	15.4
DICIEMBRE	9.7	13.7
	PMA 1000.7	TMA 17.0

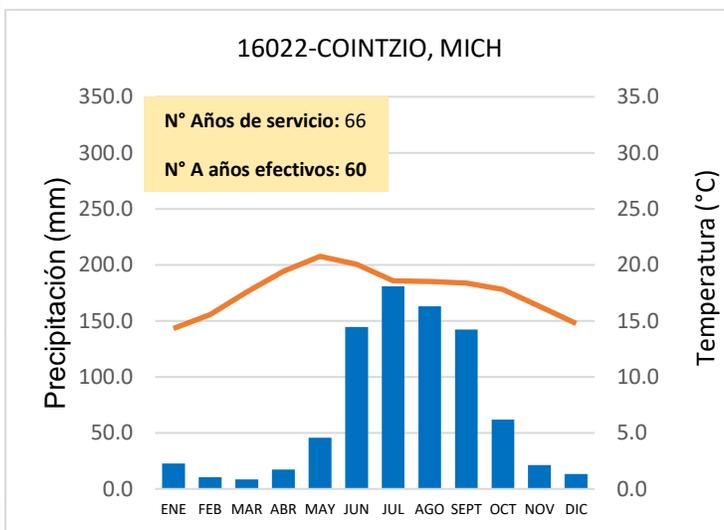


	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	22.0	12.3
FEBRERO	13.8	13.7
MARZO	12.3	15.8
ABRIL	21.2	17.8
MAYO	47.9	19.3
JUNIO	140.1	19.3
JULIO	190.0	18.0
AGOSTO	182.4	17.9
SEPTIEMBRE	160.1	17.6
OCTUBRE	64.4	16.2
NOVIEMBRE	20.2	14.2
DICIEMBRE	10.7	12.7
	PMA 885.0	TMA 16.2

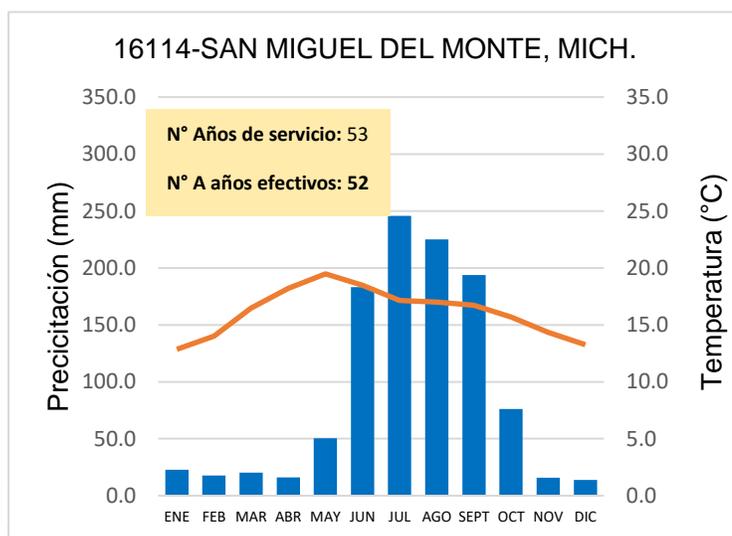




	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	22.6	14.3
FEBRERO	10.4	15.6
MARZO	8.6	17.6
ABRIL	17.5	19.4
MAYO	45.7	20.8
JUNIO	144.7	20.0
JULIO	181.0	18.6
AGOSTO	163.0	18.5
SEPTIEMBRE	142.4	18.4
OCTUBRE	61.9	17.8
NOVIEMBRE	21.2	16.3
DICIEMBRE	13.2	14.8
	PMA 832.3	TMA 17.7

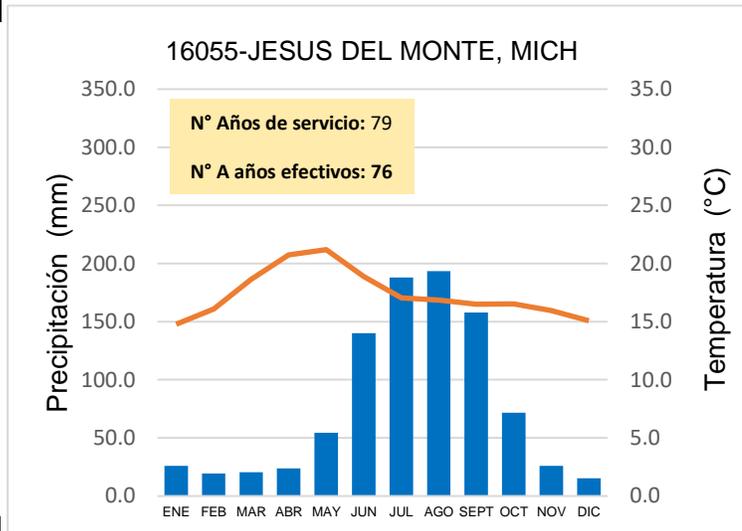


	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	22.9	12.9
FEBRERO	17.6	14.0
MARZO	20.3	16.5
ABRIL	16.0	18.2
MAYO	50.5	19.5
JUNIO	183.2	18.5
JULIO	245.7	17.1
AGOSTO	225.0	17.0
SEPTIEMBRE	193.6	16.7
OCTUBRE	76.0	15.7
NOVIEMBRE	15.9	14.4
DICIEMBRE	13.8	13.3
	PMA 1080.4	TMA 16.1

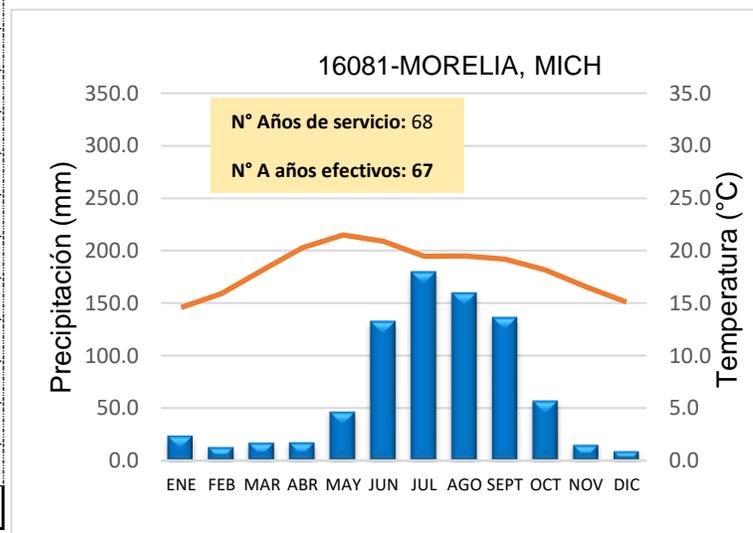




	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	26.0	14.8
FEBRERO	19.5	16.1
MARZO	20.5	18.6
ABRIL	23.7	20.8
MAYO	54.5	21.2
JUNIO	140.0	18.9
JULIO	188.1	17.0
AGOSTO	193.5	16.9
SEPTIEMBRE	157.9	16.5
OCTUBRE	71.6	16.5
NOVIEMBRE	26.1	16.0
DICIEMBRE	15.4	15.1
	PMA 936.8	TMA 17.4

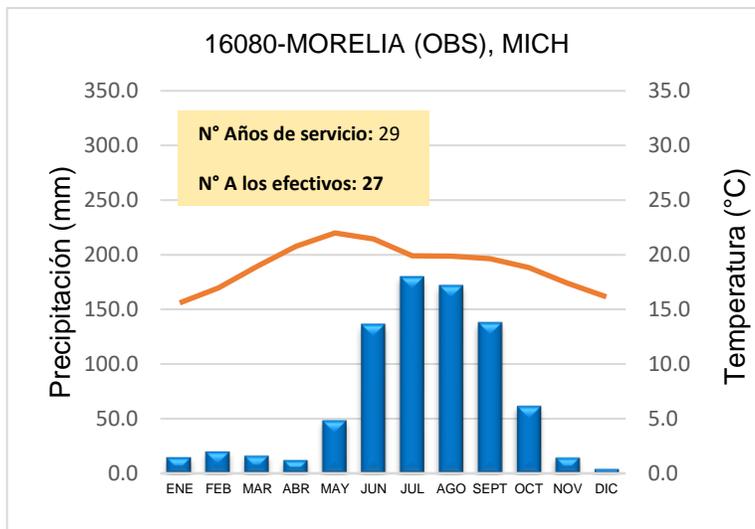


	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	24.0	14.6
FEBRERO	13.1	15.9
MARZO	17.2	18.1
ABRIL	17.5	20.3
MAYO	46.9	21.5
JUNIO	133.1	20.9
JULIO	180.2	19.5
AGOSTO	160.1	19.5
SEPTIEMBRE	136.7	19.2
OCTUBRE	57.3	18.2
NOVIEMBRE	15.3	16.5
DICIEMBRE	9.2	15.1
	PMA 810.7	TMA 18.3

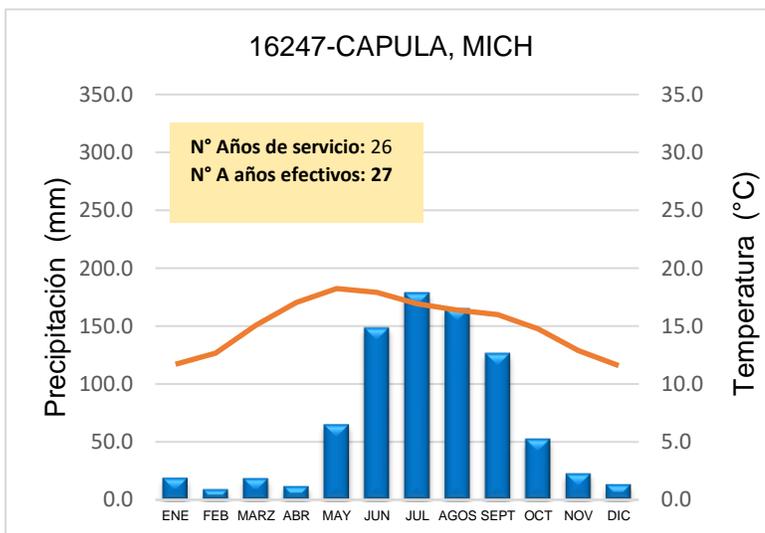




	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	14.9	15.6
FEBRERO	20.2	17.0
MARZO	16.4	18.9
ABRIL	12.3	20.8
MAYO	48.6	22.0
JUNIO	136.0	21.5
JULIO	179.2	19.9
AGOSTO	171.3	19.9
SEPTIEMBRE	137.5	19.6
OCTUBRE	61.5	18.8
NOVIEMBRE	14.7	17.4
DICIEMBRE	4.3	16.1
	PMA 816.9	TMA 19.0

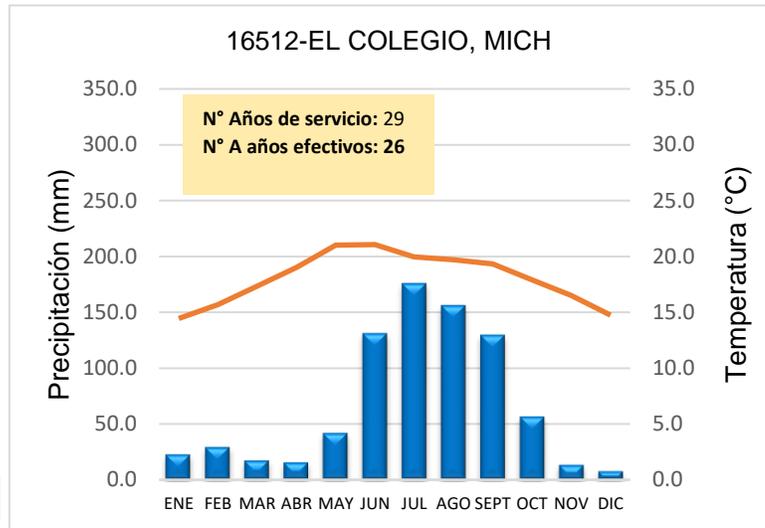


	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	18.8	11.7
FEBRERO	9.2	12.7
MARZO	18.8	15.1
ABRIL	11.9	17.0
MAYO	65.2	18.2
JUNIO	148.7	17.9
JULIO	178.8	16.9
AGOSTO	165.2	16.4
SEPTIEMBRE	126.8	16.0
OCTUBRE	52.7	14.8
NOVIEMBRE	22.7	12.9
DICIEMBRE	13.5	11.6
	PMA 832.2	TMA 15.1

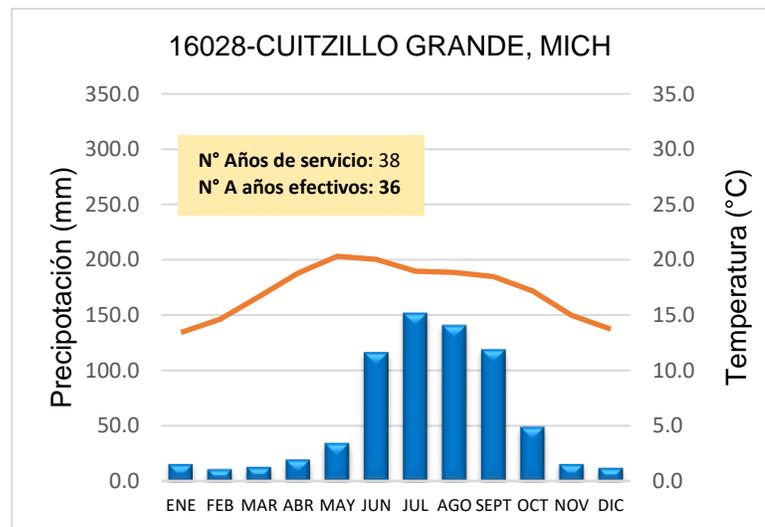




	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	22.8	14.4
FEBRERO	29.2	15.7
MARZO	17.3	17.3
ABRIL	15.4	19.0
MAYO	41.9	21.0
JUNIO	131.3	21.1
JULIO	175.9	20.0
AGOSTO	156.2	19.7
SEPTIEMBRE	129.9	19.3
OCTUBRE	56.6	17.9
NOVIEMBRE	13.2	16.5
DICIEMBRE	7.5	14.7
	PMA 797.2	TMA 18.1

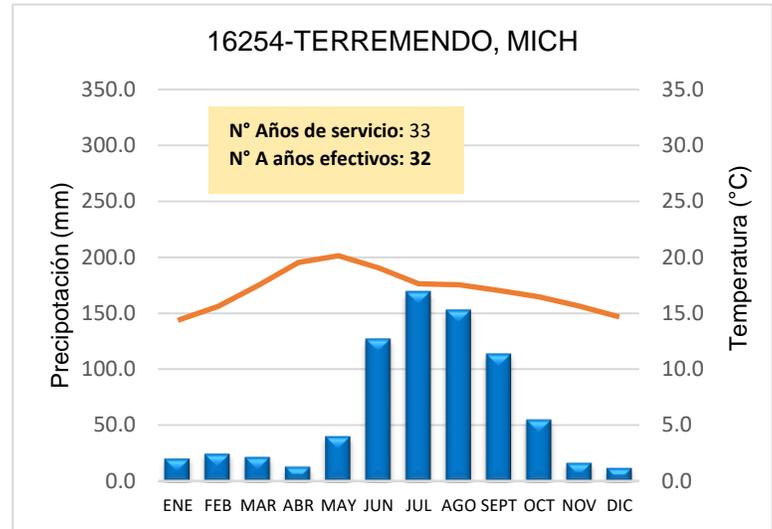


	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	15.6	13.4
FEBRERO	11.0	14.6
MARZO	13.1	16.7
ABRIL	19.8	18.8
MAYO	34.6	20.3
JUNIO	116.3	20.0
JULIO	151.9	19.0
AGOSTO	140.9	18.9
SEPTIEMBRE	119.1	18.5
OCTUBRE	49.2	17.2
NOVIEMBRE	15.6	15.0
DICIEMBRE	12.3	13.7
	PMA 699.2	TMA 17.2

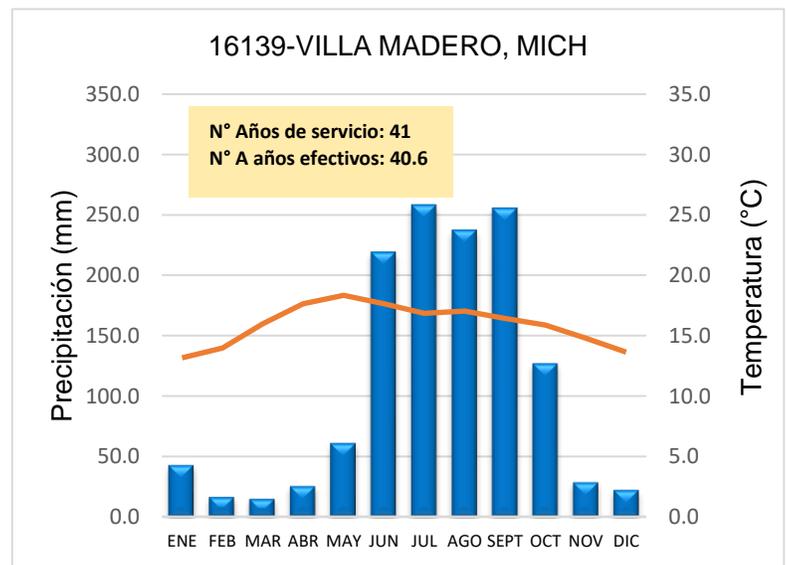




	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	20.4	14.4
FEBRERO	24.7	15.6
MARZO	21.8	17.5
ABRIL	13.2	19.5
MAYO	40.4	20.1
JUNIO	127.2	19.1
JULIO	169.1	17.6
AGOSTO	152.9	17.5
SEPTIEMBRE	113.9	17.0
OCTUBRE	55.0	16.5
NOVIEMBRE	16.8	15.6
DECIEMBRE	12.2	14.7
	PMA 767.8	TMA 17.1

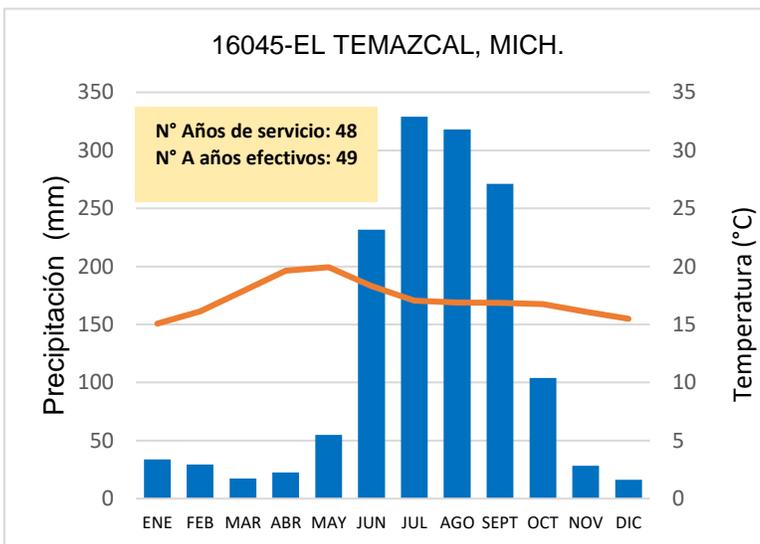


	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	43.0	13.2
FEBRERO	16.7	14.0
MARZO	15.2	16.0
ABRIL	25.6	17.6
MAYO	61.4	18.3
JUNIO	219.4	17.6
JULIO	258.3	16.9
AGOSTO	237.4	17.0
SEPTIEMBRE	255.8	16.4
OCTUBRE	127.1	15.9
NOVIEMBRE	28.9	14.8
DECIEMBRE	22.5	13.6
	PMA 1311.1	TMA 15.9

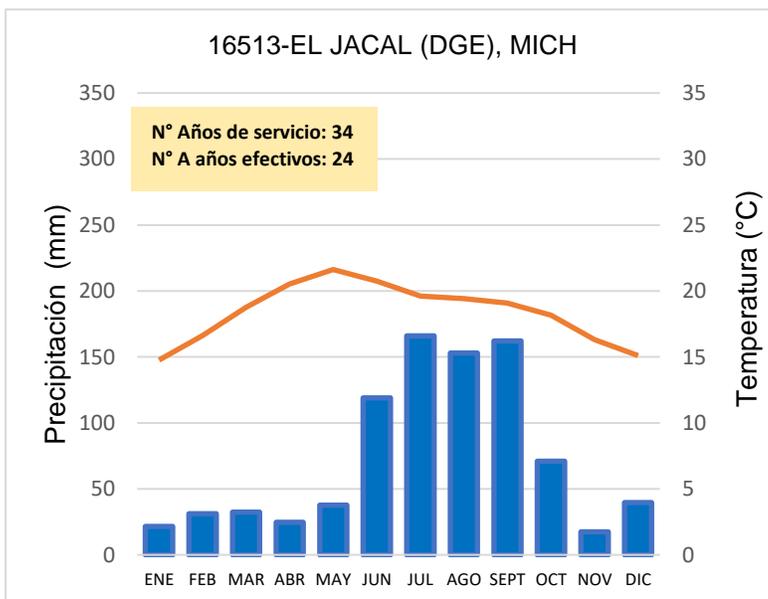




	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	33.9	15.1
FEBRERO	29.6	16.1
MARZO	17.3	17.9
ABRIL	22.6	19.6
MAYO	54.9	19.9
JUNIO	231.7	18.3
JULIO	329.0	17.0
AGOSTO	318.1	16.9
SEPTIEMBRE	271.1	16.9
OCTUBRE	103.9	16.7
NOVIEMBRE	28.3	16.1
DICIEMBRE	16.3	15.5
	PMA 1456.5	TMA 17.2



	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
ENERO	21.5	14.8
FEBRERO	31.1	16.6
MARZO	32.3	18.8
ABRIL	24.7	20.5
MAYO	37.7	21.6
JUNIO	119.0	20.7
JULIO	165.9	19.6
AGOSTO	153.1	19.4
SEPTIEMBRE	162.2	19.1
OCTUBRE	71.1	18.2
NOVIEMBRE	17.3	16.3
DICIEMBRE	39.7	15.1
	PMA 875.5	TMA 18.4



Anexo III. **Recopilación fotográfica de los muestreos.**

- Fotografías alusivas al muestreo de agua de lluvia realizada en el 2018



Estación con localización en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

- Fotografías alusivas a la toma de muestras de fuentes de abastecimiento realizadas del 22-26 de febrero del 2021 en la Ciudad de Morelia Michoacán.



Localización y llegada al lugar de muestreo



Caseta de cloración



Válvula del sistema y captación del agua en los recipientes de medición de los pozos de agua subterránea.



Proceso de llenado de muestras mediante un filtro de nitrilo y una bomba de filtrado de agua.



Determinación de parámetros mediante la utilización de un dispositivo multiparamétrico.



Colección de muestra de agua proveniente de un manantial (manantial “manantiales”) ingresando el dispositivo multiparamétrico de forma directa.



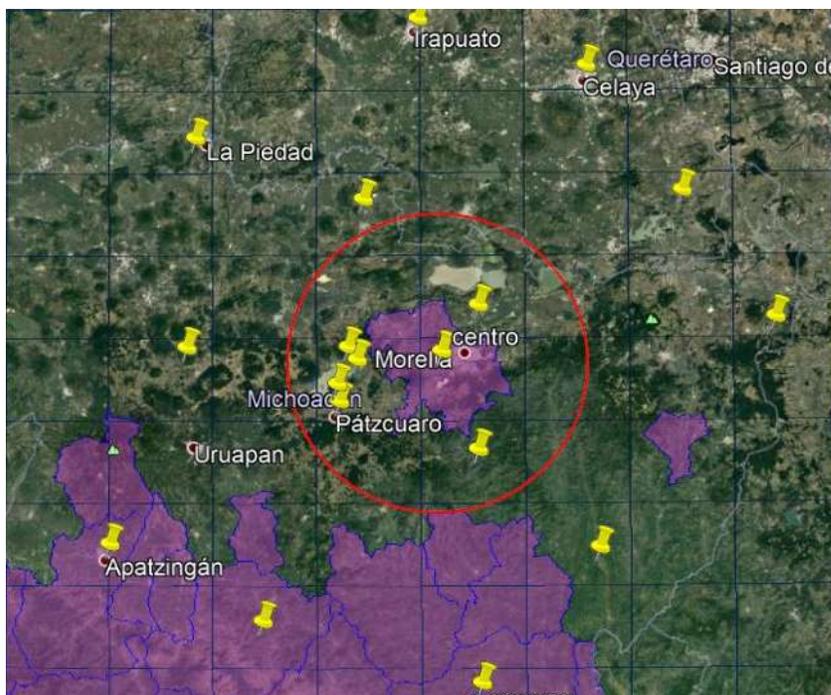
Kit de medición de alcalinidad en campo (Hanna)



Colección, almacenamiento de muestras y toma de datos en la bitácora de campo.

Anexo IV. **Tratamiento de la información de las bases de Datos Isotópicos en Línea.**

Se creó un radio aprox. de 50 km a partir de la zona de estudio con ayuda del programa Google Earth para conocer el alcance que tenía para la ciudad de Morelia y de esa forma se eligieron espacialmente 21 puntos alrededor.





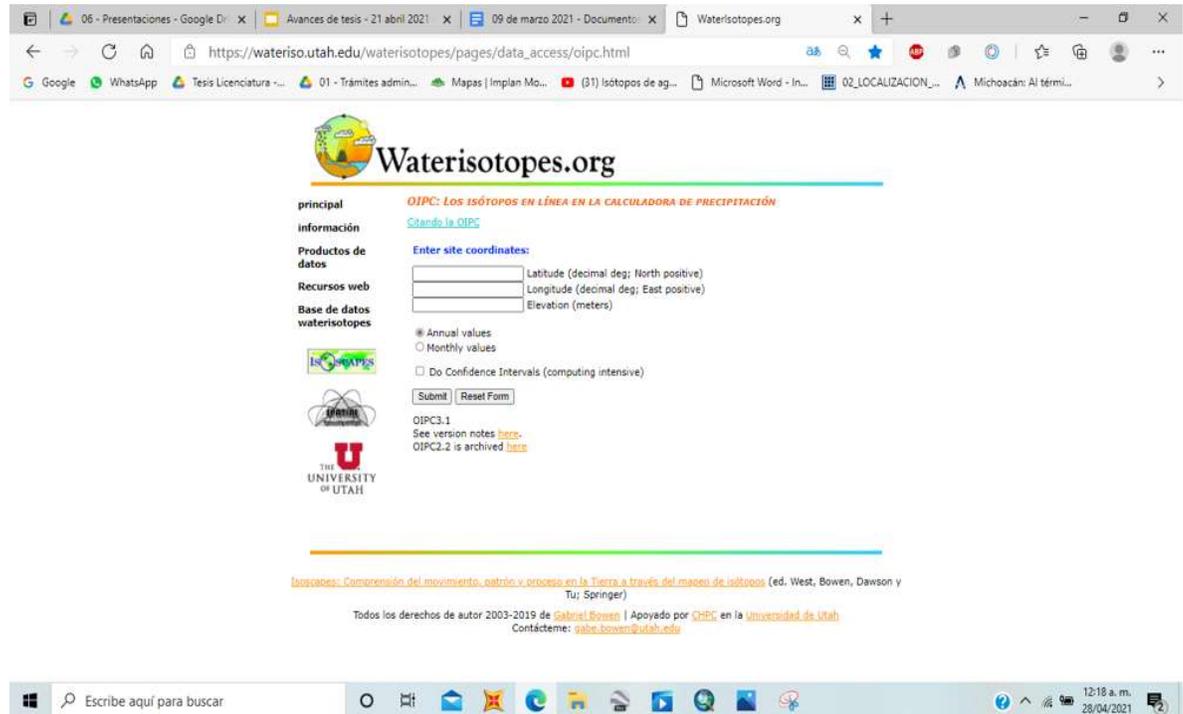
Se tomaron las coordenadas de los puntos ya elegidos (Tabla 12 **Tabla de Datos a ingresar para la obtención de datos isotópicos existentes, y conversión de coordenadas de UTM a Geográficas.**). Posteriormente, como las coordenadas estaban en coordenadas UTM se procedió a convertirlas a Coordenadas sexagesimales, ya que la página que se necesitará utiliza esas coordenadas.

CIUDAD	UTM		GEOGRAFICAS		altitud
	este	norte	Latitud	longitud	
Morelia	260627	2175926	19°39'51.0588"	101°16'59.0603"	1920
Quiroga	19.625612	101.502027	19°37'32.2032"	101°30'07.2972"	2080
Tarímbaro	273151	2191189	19°48'12.5748"	101°09'55.9620"	1847
Lagunillas	246298.96	2167964.64	19°35'25.8468"	101°25'06.8315"	2100
Tzocurio	232283	2173597	19°38'22.2720"	101°33'10.3934"	2040
Huatzio	225509	2165558	19°33'57.6684"	101°36'58.5305"	2056
Nocupétaro	19.125635	101.168719	19°07'32.2860"	101°10'07.3884"	778
Chupicuaro	229356.21	2177797.15	19°40'37.3440"	96°25'07.0239"	1885
Pátzcuaro	226089.48	2159673.7	19°30'46.7208"	96°23'24.4477"	2000
Madero	271150.88	2142902.00 m N	19°21'26.7012"	96°49'16.9580"	2220
Puruándiro	235256	2227266	20°07'27.9912"	96°28'03.9014"	1890
Jerécuaro	342122.92	2228685.9	20°08'56.3712"	97°29'21.9921"	1958
Celaya	31067.13	2270969.13	20°28'45.6349"	94°30'24.6767"	1767
Tlalpujagua	372706	2185903	19°45'53.0208"	97°47'05.8804"	2580
Tiquicheo	312522	2109631	19°04'15.4308"	97°13'05.5391"	569
Apatzingán	779215	2122993	19°10'51.9744"	101°39'18.0462"	325
Paracho	804207	2178250	19°40'34.4748"	101°54'04.6451"	2228
La Piedad	805761	2248599	20°18'39.2220"	101°55'40.1451"	1767
Irapuato	254609	2287671	20°40'20.5608"	96°38'40.0541"	1724
Huetamo	272219	2064578	18°39'35.8776"	96°50'26.0392"	302
Huacana	198962	2086356	18°50'50.2296"	101°51'24.0531"	480

Tabla 12 **Tabla de Datos a ingresar para la obtención de datos isotópicos existentes, y conversión de coordenadas de UTM a Geográficas.**



Una vez obtenidas las coordenadas se procedió a meter los puntos en la página de Water isotopes.org, datos anuales y mensuales para $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$.
Lo cual realiza una interpolación de puntos entre los sitios elegidos.



Por último, con los datos obtenidos se crearon dos tablas, una para datos anuales y otra para datos isotópicos mensuales, esto para crear las gráficas y después compararlas con la línea meteórica mundial y comprender su comportamiento.



Anexo V. **Histogramas generados para los parámetros fisicoquímicos muestreados en campo de las fuentes de abastecimiento de Morelia.**

