



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del agua

“DISTRIBUCIÓN Y RIESGO ECOLÓGICO POR LA
CONTAMINACIÓN DE METALES EN EL ACUÍFERO DE
LA RUTA DE LOS CENOTES DE PUERTO MORELOS,
Q. ROO”

Tesis que presenta

GABRIELA PINEDA GARCÍA

En opción al título de
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México

2023

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de: Materiales y Métodos, Resultados y Discusión de este documento, proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que, a razón de lo anterior, y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y se regirán, en todo caso, por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: _____



Nombre: Gabriela Pineda García

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA*



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Gabriela Pineda García** titulado “**Distribución y riesgo ecológico por la contaminación de metales en el acuífero de la ruta de los cenotes de Puerto Morelos, Q. Roo**”, fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de investigación de ecosistemas acuáticos y calidad del agua, en el laboratorio de Ecotoxicología y Físicoquímicos del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del **Dr. Jesús Alvarado Flores** perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro y la codirección del **Dr. Jorge Adrián Perera Burgos** de la Universidad de Guanajuato.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 04 de diciembre de 2023

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por la beca otorgada para la realización de esta investigación (Número de becario: 1100540).

Al laboratorio de Ecotoxicología y al laboratorio de Físicoquímicos.

Al Dr. Jesús Alvarado Flores y el Dr. Jorge Adrián Perera Burgos por permitirme ser su estudiante, por haberme brindado de sus conocimientos y darme su tiempo, apoyo y comprensión en este proceso.

Al Dr. Eduardo Cejudo Espinosa y el Dr. Ignacio Alejandro Pérez Legaspi por formar parte del comité tutorial y aportar sus conocimientos en este proyecto.

A la Química Daniela Ortega, técnico académico, por apoyarme, aconsejarme y guiarme al realizar los análisis químicos de esta investigación.

A los representantes de las comunidades ejidales que nos permitieron la entrada a los sitios de trabajo ya que sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible.

Al Gran acuífero Maya que nos permitió trabajar en colaboración y apoyarnos en las tomas de muestra, gracias a los buzos y en especial a Ana K. Celis quien fue pieza fundamental del proyecto.

A mi amigo y compañero de generación el Ingeniero José Armando Rendon Juárez por su aporte en la creación de mapas de isofreáticas.

A todos estudiantes que forman parte del laboratorio de ecotoxicología con los que compartí experiencias y muchas horas de trabajo, gracias por su apoyo, tiempo, dedicación y su valiosa amistad.

A mis amigos de generación las Ingenieras Dayana Frias, Eunices Hernandez y al Biólogo Juan Arana por formar parte de esta maravillosa experiencia y convertirse en mi familia. Además por compartir conocimientos, viajes y anécdotas.

A mi familia que a pesar de la distancia siempre me han apoyado a cumplir cada uno de mis sueños y a Carlos que con su amor y cariño siempre me animo en los momentos mas difíciles.

ÍNDICE	
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO 1. LITERATURA.....	5
1.1 Contaminación ambiental.....	5
1.2 Contaminación por metales en México.....	8
1.2 Bioindicadores	9
1.3.1 Biodisponibilidad	10
1.4 Hidroquímica.....	11
1.5 Normas oficiales mexicanas.....	12
1.6 Ciclo hidrológico.....	14
1.7 Acuífero kárstico.....	15
1.7.1 Cenotes.....	16
1.8 Tomografía de resistividad eléctrica.....	17
1.8.1 Tomografías Dipolo-Dipolo/ Wenner.....	18
1.9 Evaluación ambiental.	19
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
JUSTIFICACIÓN	22
HIPOTESIS	22
OBJETIVO GENERAL	23
CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS	24
3.1 Colecta de agua.....	25
3.2 Colecta de sedimento	25
3.3 Protocolo de tomografías de resistividad eléctrica	26
3.4 Cuantificación de metales	27
3.4.1 Determinación de las direcciones de flujo en el área de estudio.	29
3.5 Geoquímica	29
3.5.1 Cuantificación de elementos y nutrientes (Sílice).	29
3.6 Análisis de riesgo	30
3.6.1 Agua	30
3.6.2 Biota: Factor de evaluación del riesgo.....	30

3.6.2 Biota: Factor de evaluación del riesgo.....	31
3.6.2.1 Colecta de zooplancton	31
3.6.2.2 Cultivo de Ostrácodos (<i>Cypridopsis vidua</i>)	32
3.6.2.3 Pruebas de toxicidad.....	32
3.6.3 Sedimento: Factores de enriquecimiento (<i>FE</i>) e índices de geoacumulación (<i>Igeo</i>)	34
3.6.4 El índice de riesgo ecológico potencial en sedimento (RI)	35
CAPITULO 4. RESULTADOS	38
4.1 Área de estudio	38
4.1.1 Maravilla (Ma).....	38
4.1.2 Siete Bocas (SB).....	38
4.1.3 Fátima (Fa)	39
4.1.4 Azul Ha (A-Ha)	40
4.1.5 Dzalam (Dzm)	41
4.2 Presencia de metales en la columna de agua y sedimento.	41
4.3 Caracterización de perfiles de conductividad	45
4.4 Hidrogeoquímica.....	49
4.5 Tomografías de resistividad eléctrica	51
4.5.1 Tomografía del cenote Maravillas	51
4.5.2 Tomografía del cenote Siete Bocas	53
4.5.3 Tomografía del cenote Dzalam.....	54
4.6 Flujos subterráneos	55
4.7 Riesgo ecológico	56
4.7.1 Agua	56
4.7.2. Biota	57
4.7.3 Sedimentos.....	59
CAPITULO 5 DISCUSIÓN	64
5.1 Sección Hidrogeoquímica	64
5.2 Sección Tomografías de resistividad eléctrica y dirección de los flujos subterráneos	64
5.3 Integración del riesgo ecológico	65
5.3.1 Metales en la columna de agua.....	65
5.3.2 Metales en sedimento	67
5.3.3 Riesgo ecológico en biota.....	68
CONCLUSIONES	72

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

ANEXOS 79

Anexo 1 79

Anexo 2 80

Anexo 3 81

Anexo 4 83

Anexo 5 86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Metales en artículos de uso común.....	5
Tabla 2. Lista de metales pesados, prioritarios y sin función biológica.	8
Tabla 3. Grado de toxicidad de Cd, Cu, Cr, Ni y Zn	10
Tabla 4. Límites máximos permitidos de metales en agua.	12
Tabla 5. Límites para la determinación de metales en sedimento.....	13
Tabla 6. Factor de evaluación de riesgo acorde a Karlsson (2008) con grupo de base.	33
Tabla 7. Evaluación del umbral de riesgo ambiental acorde a Karlsson (2008).	34
Tabla 8. Nivel de enriquecimiento.....	35
Tabla 9. Nivel de geoacumulación.....	35
Tabla 10. Factor de riesgo ecológico (E_r^i) descrito por Hakanson (1980).....	36
Tabla 11. Clasificación del índice de riesgo ecológico potencial (RI) descrito por Hakanson (1980).	37
Tabla 12. Metales encontrados en agua del cenote Maravillas durante las temporadas de lluvias y secas.....	42
Tabla 13. Metales encontrados en agua del cenote Siete bocas durante las temporadas de lluvias y secas	42
Tabla 14. Metales encontrados en agua del cenote Fátima durante las temporadas de lluvias y secas	43
Tabla 15. Metales encontrados en agua del cenote Azul Ha durante las temporadas de lluvias y secas.....	43
Tabla 16. Metales encontrados en agua en el cenote Dzalam durante las temporadas de lluvias y secas.....	44
Tabla 17. Valores máximos de metales encontrados en sedimentos a 30m de profundidad..	45
Tabla 18. Parámetros fisicoquímicos en la zona de estudio durante dos temporadas.	49
Tabla 19. Sílice encontrados en la zona de estudio durante dos temporadas.....	50
Tabla 20. Valores PNECs obtenidos a partir de valores CL_{50} para cada metal encontrado en agua.....	57
Tabla 21. Umbral de riesgo ambiental para el cenote Ma.	57

Tabla 22. Umbral de riesgo ambiental para el cenote SB.....	58
Tabla 23. Umbral de riesgo ambiental para el cenote Fátima.	58
Tabla 24. Umbral de riesgo ambiental para el cenote A-Ha.	58
Tabla 25. Umbral de riesgo ambiental para el cenote Dzm.	59
Tabla 26. Factor de enriquecimiento.	60
Tabla 27. Clasificación del índice de riesgo potencial (RI).	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes de contaminación e infiltración al acuífero.	15
Figura 2. A y B son los electrodos de corriente, M y N electrodos de potencial..	18
Figura 3. A y B son los electrodos de corriente, M y N electrodos de potencial.	18
Figura 4. Área de estudio.	24
Figura 5. Material para la colecta de sedimento.....	26
Figura 6. Extracción de sedimento por parte del GAM.	26
Figura 8. Equipo utilizado para la obtención de tomografías.....	27
Figura 7. Colecta de zooplancton en el cenote AHa.	32
Figura 10. Vista frontal del Cenote Ma.	38
Figura 11. Boca principal expuesta artificialmente.....	39
Figura 12. Entrada de la boca 5 en el área de caverna.	39
Figura 13. Vista desde la Plataforma del Cenote Fátima.....	40
Figura 14. Vista aérea y frontal del Cenote A-Ha.	41
Figura 15. Vista frontal del cenote Dzm.	41
Figura 16. Representación de la columna de agua en el cenote Ma.....	46
Figura 17. Representación de la columna de agua en el cenote SB. 47.....	47
Figura 18. Representación de la columna de agua en el cenote A-Ha.	47
Figura 19. Representación de la columna de agua en el cenote Fa.	48
Figura 20. Representación de la columna de agua en el cenote Dzm.	48
Figura 21. Diagrama de Piper de la temporada de lluvias..	50
Figura 22. Diagrama de Piper de la temporada de secas.....	51
Figura 23. Mapa del transecto en el cenote Maravillas.....	52
Figura 24. Tomografía de resistividad eléctrica del cenote Ma.....	52
Figura 25. Mapa del transecto en el cenote SB.	53
Figura 26. Tomografía de resistividad eléctrica del cenote SB.....	54
Figura 27. Mapa del transecto en el cenote Dzm.....	54
Figura 28. Tomografía de resistividad eléctrica del cenote Dzm.....	55

Figura 29. Mapa de isolíneas a nivel regional del área de estudio	56
Figura 30. Representación de la columna de agua en el cenote Ma	61
Figura 31. Representación de la columna de agua en el cenote Sb	62
Figura 32. Representación de la columna de agua en el cenote Fa	62
Figura 33. Representación de la columna de agua en el cenote AHa	63
Figura 34. Representación de la columna de agua en el cenote Ma	63

RESUMEN

El incremento en el uso de diversos productos domésticos, así como la expansión industrial y las actividades turísticas, han propiciado el aumento de metales pesados en el agua, debido a que los residuos producidos por las poblaciones son tratados inadecuadamente, estos agentes tóxicos se infiltran en el suelo o van directamente en los afluentes. Por tal motivo es importante conocer el estado de salud de los ecosistemas acuáticos. El presente estudio tiene como objetivo estimar el riesgo ecológico asociado a la presencia de metales en la columna de agua y sedimentos del acuífero, y correlacionar su concentración con la posible presencia de sistemas de flujos de agua subterránea. El estudio se realizó en 5 cenotes en la ruta de cenotes de Puerto Morelos en las temporadas de lluvias y secas. Se tomaron muestras de agua a 1,15 y 25m de profundidad donde se determinaron los parámetros físico químicos, concentración metales en el agua, sílice, elementos y zooplancton, además se tomaron muestras de sedimento a 25m. La integración del riesgo ecológico se obtuvo determinando el riesgo ambiental en agua por medio de organismos bioindicadores los cuales se cultivaron en laboratorio para la obtención del CL₅₀, en sedimento el factor de enriquecimiento e índice de geacumulación y el índice de riesgo ecológico potencial. Las tomografías de resistividad eléctrica se realizaron usando el programa EarthImage según los arreglos Dipolo-Dipolo y/o Wenner donde los 36 electrodos se encontraban a 5 metros entre ellos a una longitud de 175m. Por otro lado se obtuvieron diagramas de Piper para determinar el tipo de agua de la región y la dirección de los flujos subterráneos se obtuvo un mapa de isoclinas generado por el programa Surfer. Para obtener el perfil de resistividad eléctrica se utilizó el equipo Super Sting y el software EarthImager.

Los resultados obtenidos muestran que la bioacumulación de metales en los organismos está asociada a la temporalidad debido a que esta disminuye durante la temporada de lluvias. Se determinó que la presencia de metales en agua fue mayor durante la temporada de secas donde Al y Fe son los más elevados. En sedimentos la presencia fue >SB>Ma>A-Ha>Fa>Dzm donde Cd, Cu, Cr, Pb y Zn son de particular interés ya que se consideran prioritarios por su alta toxicidad. El tipo de agua en la región es de dos tipos: bicarbonatada cálcica y cloruradas cálcicas. Se observa una relación en la presencia de metales en la columna de agua según la dirección y movimiento de los flujos subterráneos. En la integración del índice de riesgo en sedimento el de mayor cantidad fue el cenote Ma mientras que el cálculo realizado para la terminación del riesgo ambiental en la biota muestran que nuestros sitios de estudio presentan riesgos moderados a extremadamente altos en el caso de Fe y Al.

ABSTRACT

The increase in the use of various domestic products, as well as industrial expansion and tourist activities, have led to the increase of heavy metals in water, because the waste produced by populations is treated inadequately, these toxic agents infiltrate the soil or go directly into the affluent. For this reason, it is important to know the state of health of aquatic ecosystems. The objective of this study is to estimate the ecological risk associated with the presence of metals in the water column and sediments of the aquifer, and to correlate their concentration with the possible presence of groundwater flow systems. The study was carried out in five sinkholes on the Puerto Morelos sinkhole route in the rainy and dry seasons. Water samples were taken at 1.15 and 25m depth where the physical and chemical parameters, metal concentration in the water, silica, elements and zooplankton were determined, in addition sediment samples were taken at 25m. The integration of the ecological risk was obtained by determining the environmental risk in water through bioindicator organisms which were culture in the laboratory to obtain the LC50, in sediment the enrichment factor and geaccumulation index and the potential ecological risk index. Electrical resistivity tomography was performed using the EarthImage program according to the Dipole-Dipole and/or Wenner arrays where the 36 electrodes were 5m apart at a length of 175m. On the other hand, Piper diagrams were obtained to determine the type of water in the region and the direction of underground flows. An isoline map generated by the surfer program was obtained. To obtain the electrical resistivity profile, the Super Sting equipment and the EarthImager software were used.

The results obtained show that the bioaccumulation of metals in organisms is associated with temporality because it decreases during the rainy season. It was determined that the presence of metals in water was greater during the dry season where Al and Fe are the highest. In sediments the presence was $\text{Ma} > \text{A-Ha} > \text{Fa} > \text{Dzm}$ where Cd, Cu, Cr, Pb and Zn are of particular interest since they are considered priority due to their high toxicity. The type of water in the region is of two types: calcium bicarbonate and calcium chloride. A relationship is observed in the presence of metals in the water column depending on the direction and movement of underground flows. In the integration of the risk index in sediment, the one with the greatest quantity was the Ma sinkhole while the calculation carried out for the determination of the environmental risk in the biota shows that our study sites present moderate to extremely high risks in the case of Fe and Al.

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es un gran problema que ha ido en constante crecimiento a nivel mundial, en los recursos hídricos afecta el suministro de agua de buena calidad para las poblaciones. Algunos de los contaminantes están presentes por causas naturales como erupciones volcánicas, incendios forestales, terremotos etc., sin embargo, la mayoría proviene de actividades antropogénicas, como el uso de agroquímicos, el aumento de depósitos de basura en las zonas urbanas, asentamientos humanos sin servicios de drenaje, construcciones inmobiliarias así como las actividades turísticas, las cuales contaminan el medio ambiente con metales pesados (Chávez, 2001).

Por ejemplo, el incremento en el uso de diversos productos domésticos así como la expansión industrial han propiciado el aumento de metales en el agua debido a que los residuos producidos de forma industrial muchas veces no son tratados adecuadamente y estos agentes tóxicos se infiltran en el suelo o van directamente en los afluentes (Sarria-Villa et al., 2020).

Los metales pesados ejercen un interés significativo en los ecosistemas acuáticos debido a su capacidad para persistir en los sedimentos. Estos contaminantes pueden liberarse en el agua, volviéndose accesibles para la biota marina y, por lo tanto, representan una amenaza potencial para el equilibrio y funcionamiento del ecosistema. Es importante recalcar que de forma natural algunos metales pueden presentarse en cantidades muy bajas ya que pueden ser importantes para algunos procesos biológicos, sin embargo, existen otros que debido a la toxicidad que poseen deben ser cuidadosamente analizados. El arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb) son considerados como contaminantes altamente peligrosos; sin embargo, otros metales como el cobre (Cu) y zinc (Zn) también pueden resultar tóxicos si exceden ciertos niveles de concentración (Laino et al., 2015).

En los sistemas biológicos, se ha observado que los metales pesados afectan a los orgánulos celulares y a componentes como la membrana celular, mitocondrias, lisosomas, retículo endoplásmico, núcleos y algunas enzimas vinculadas al metabolismo, la desintoxicación y la reparación de daños celulares. Los iones metálicos interactúan con elementos celulares como proteínas de ADN y nucleares, generando daño en el ADN y cambios conformacionales que pueden resultar en la modulación del ciclo celular, la carcinogénesis o la apoptosis. (Tchounwou et al., 2012).

Alvarado-Flores et al. (2019) mencionan que los metales pesados se bioacumulan en los tejidos y en algunas ocasiones alcanza un grado de envenenamiento que es letal para los organismos, esto representa un riesgo ya que, al formar parte de la cadena trófica, estos tóxicos pueden llegar a ocasionar problemas de salud pública, y existen múltiples reportes de poblaciones que se han visto afectadas por diversas enfermedades congénitas, dérmicas, otras. Se estima que en el mundo millones de personas son propensas y están expuestas a diversos metales que contaminan los acuíferos (Londoño, 2016), ya que el agua subterránea es un recurso importante para la salud de los ecosistemas y el ser humano. Por lo tanto, es importante cuantificar su concentración en el agua, en el sedimento y la biota acuática, para conocer la magnitud de la contaminación de metales y estimar, con base en las concentraciones detectadas, el potencial riesgo de la contaminación de metales al ecosistema acuático.

CAPITULO 1. LITERATURA

1.1 Contaminación ambiental

De acuerdo con la secretaria del medio ambiente y recursos naturales (2015), la contaminación es el deterioro o desequilibrio de los componentes habituales de las esferas de la tierra, otros autores como Colina (2000) lo describen como una sustancia que en su aumento o disminución afectaran de manera negativa el medio ambiente. Por su parte Schweitzer y Noble (2018) hacen una descripción mas especifica sobre la contaminación en el agua basada en los componentes químicos, físicos o biológicos que generan un deterioro en el cuerpo de agua. Es importante mencionar que existen dos formas de contaminación la primera es aquella generada por la misma naturaleza y la segunda es por efectos antropogénicos, siendo esta última la relacionada con el aumento de los contaminantes en los últimos años (Jiménez, 2001). Dentro de los elementos mas dañinos en el agua derivado de su toxicidad y persistencia se encuentran los metales. A pesar de que se pueden encontrar de forma natural el incremento en su concentración se asocia a fuentes de contaminación denominadas puntuales y difusas (Schweitzer & Noble, 2018), Jiménez (2001) menciona que algunas de las razones por las cual se pueden encontrar los metales en los ecosistemas es por acción antropogénica como desechos electrónicos, metalurgia, de artículos provenientes de alimentos, ropa y servicios , además enlista artículos de uso común que contienen metales (Tabla 1).

Tabla 1. Metales en artículos de uso común (Jiménez, 2001).

	Al	Ba	B	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Zn
Aceites		X				X			x
Combustibles		X				X			
Cosméticos	X	X	x	x		X	x	x	x
Extinguidores	X				X		x		x
Fotografía	X				X		x		
Limpiadores	X				X	X	x		x
Lubricantes		X			X				x
Lustradores	X	X				X			x
Medicinas	X		x			X	x		x
Papel	X	X			X		x		x
Pesticidas	X			x	X	X	x		x
Pigmentos	X	X	x	x	X	X	x	x	x
Pinturas	X	X			X		x		x
Preservativos							x		x
Productos Automotrices	X	X			X		x		x
Secadores	X								
Supositorios			x						x
Tintas	x					X			x

Ungüentos	x	x	X	x
-----------	---	---	---	---

Productos que contienen metales. Aluminio (Al), Bario (Ba), Boro (B), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Zinc (Zn).

Aluminio

La presencia de aluminio en el agua puede ser normal en pequeñas proporciones ya que es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre. Este metal es muy utilizado en diversas empresas donde se destaca la industria automotriz (Jiménez, 2001), es muy utilizado en envases de bebidas, ollas y otros utensilios, comúnmente se realizan aleaciones con otros metales. Aunque no son muy conocidos sus efectos a la salud algunos ensayos en animales demuestran que presentan mayor sensibilidad en el sistema nervioso, además se sugiere que a altos niveles de exposición se puede desarrollar Alzheimer (ATSDR, 2023).

Bario

El elemento Bario se puede encontrar en el agua en forma de sales, en concentraciones de trazas su presencia esta relacionada con el uso de venenos utilizados para ratones u otros organismos (Jiménez, 2001). Además, según lo menciona ATSDR (2023), se utiliza en la fabricación de pinturas, ladrillos, cerámicas, caucho y vidrio.

Los compuestos de este elemento como lo son, el nitrato, cloruro e hidróxido son solubles en agua y se combinan rápidamente con los sulfatos o carbonatos en el agua- (ATSDR, 2023). Su ingesta constante en dosis altas puede provocar enfermedades cardiacas y otras relacionadas con el sistema nervioso (Jiménez, 2001),

Boro

Su presencia en el ambiente se puede dar de forma natural. Es común encontrarlo formando compuestos llamados boratos, los cuales pueden contener al acido borico, oxido de boro y sales de boratos (ATSDR, 2023). Sin embargo, su presencia en los sistemas acuáticos tambien se asocia al uso de detergentes derivado de las actividades antropogénicas, materiales para fotografía, productos de limpieza y combustibles. Su concentración en agua mayor a 30 mg/L puede generar efectos fisiológicos directos en el sistema nervioso central ocasionando un síndrome denominado borismo (Jiménez, 2001).

Cobre

Su presencia en fuentes de abastecimiento de agua se debe a que este metal es añadido para evitar el crecimiento biológico y la acción oxidantes del magnesio según lo señalado por Jiménez, 2001. Además, el cobre metálico es utilizado en la industria debido a que es un

excelente conductor eléctrico. Por otro lado, varios compuestos orgánicos de cobre se utilizan en insecticidas, ollas, fungicidas, pigmentos, cableado. Además es muy utilizado en combinación de otros metales para producir tuberías de latón y bronce (ATSDR, 2023). El cobre es importante para el organismo y en proporciones de 2 mg/L, no se considera que su ingesta sea dañina para el organismo. Sin embargo, su consumo en mayores dosis y por un periodo prolongado podría provocar enfermedades como la cirrosis hepática (Jiménez, 2001).

Cromo

Este elemento se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre según lo menciona Jiménez (2011) en el agua las concentraciones comunes son inferiores a 2 µg/L, sin embargo una de sus fuentes principales de exposición es en la industria de cromado (tríóxido de cromo), el cromo metálico (0), se usa en la fabricación de acero, los tipos hexavalente (VI) y trivalente (III) se usan en cromados colorantes y pigmentos (ATSDR, 2023). Los efectos tóxicos del cromo están asociados a su estado de oxidación, se sabe el cromo VI a diferencia del III es tóxico y es fácilmente absorbido por el tracto gastrointestinal, además que se asocia a enfermedades dérmicas. Sin embargo son pocos los datos relacionados con los efectos sobre la salud (Jiménez, 2001).

Hierro

El hierro es un elemento altamente distribuido en la corteza terrestre, de forma natural se puede encontrar en corrientes de agua, es un elemento indispensable para los organismos y sus funciones vitales (ATSDR, 2023). En el agua potable el aumento de su concentración se debe a la corrosión de cañerías, en concentraciones mayores a 0.3 mg/L el agua presenta una tonalidad amarilla (Jiménez, 2001).

Niquel

Este metal es muy utilizado en la industria sus usos son variados, entre ellos está en el electroplatinado, en la elaboración de cerámicas, en el vidrio de color, en acrílicos para plásticos así como en la elaboración de amalgamas de otros metales como zinc, manganeso, cromo, hierro y en la aleación de níquel y cobre para la elaboración de monedas. Se calcula que la ingesta normal es de 0.1 mg/L a 0.3 mg/L, sin embargo la OMS basado en criterios sanitarios recomienda en el agua una concentración inferior a 0.02 mg/L. Entre los efectos adversos que puede provocar en la salud están las reacciones alérgicas (dérmicas y orales), cuando se ingiere como sales solubles genera náuseas, vómito y diarrea por lo que algunos compuestos entran en la lista de carcinógenos según la EPA (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de América).

Zinc

El zinc es un elemento necesario para el organismo, que normalmente se absorbe de diversos alimentos. En el agua la contaminación puede ser natural por el proceso de salinización con sedimentos salinos (Biasil et al. 2020), en zonas urbanas se debe al deterioro de tuberías de hierro galvanizado, sin embargo otros productos donde se puede encontrar en forma de cloruro de sodio es en desinfectantes, desodorantes, tintes, bloqueadores y en soluciones para embalsamar. Este metal es anfótero cuya solubilidad aumenta con los cambios en el pH (Jiménez, 2001).

Aunque algunos metales se encuentran de forma natural en el ecosistema, la ONU y EPA clasifican a los metales en grupos de interés según sus características iónicas (Jiménez, 2001), aunque no todos los metales con altas densidades son tóxicos existe un grupo que se denominan metales pesados debido a que pueden generar serios problemas medioambientales (MITECO, 2022). Tabla 2.

Tabla 2. Lista de metales pesados, prioritarios y sin función biológica (MITECO, 2022).

Metales NO prioritarios pero de interés en el agua	Metales Pesados	Metales sin función biológica
Aluminio	Mercurio	Antimonio
Bario	Plomo	Arsénico
Fierro	Cadmio	Berilio
Manganeso	Talio	Cadmio
Magnesio	Cobre	Estroncio
Potasio	Zinc	Mercurio
Vanadio	Cromo	Niquel
		Plomo
		Titanio

1.2 Contaminación por metales en México.

En el territorio mexicano existen múltiples estudios sobre los problemas a la salud que pueden ocasionar los metales pesados que se encuentran en el ambiente, sobre todo cuando se detectan en el agua potable que se distribuye a la población. Estos metales pesados logran ingresar a los ambientes acuáticos principalmente por descargas directas de fuentes de contaminación como lo son las actividades antropogénicas y en mayor medida aquellos derivados de las industrias, o bien pueden estar presentes de forma natural en bajas concentraciones en la corteza terrestre (Sarria-Villa et al., 2020).

Los metales pesados pueden ser definidos como un grupo de elementos que exhiben propiedades metálicas teniendo características únicas y específicas de su grupo abarcando metales de transición, algunos semimetales, lantánidos y actínidos. Sin embargo, el término "metal pesado" se utiliza de manera general para referirse a aquellos metales o metaloides con el potencial de ocasionar problemas de toxicidad. (Covarrubias & Peña, 2017).

Una de las industrias que más problemas ha generado en nuestro país, contaminando las aguas superficiales como subterráneas es la minería sin embargo existen otras fuentes de contaminación que si bien podrían pasar desapercibidas contaminan en gran medida como lo son el consumo de bienes en el hogar, la industria automotriz, textil así como todas las actividades cotidianas según lo mencionan Semarnat (2016) ya que generan una gran variedad de residuos que pueden contener desechos tóxicos que se manejan de forma inadecuada. Podemos encontrar gran variedad de metales contaminantes, en México se clasifican como los principales al mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb) y cromo (Cr), debido a su alto grado de toxicidad y su abundancia. Fernández et al. (2007) mencionan que las principales fuentes de contaminación por metales en el Caribe Mexicano son las entradas de aguas residuales, pesticidas por el uso en el sector agrícola, transporte y residuos del sector industrial.

1.2 Bioindicadores

La importancia de saber el estado en el que se encuentran los ecosistemas acuáticos ha llevado a la sociedad, el sector privado y académico a buscar nuevas formas para comprender la calidad de los ecosistemas acuáticos. Debido a los altos costos que estos análisis pueden representar, se han estandarizado y utilizado bioindicadores que representan un método muy eficiente. Según lo señalan González & Vallarino (2014) las especies bioindicadoras son aquellas que por su sensibilidad a los cambios ambientales, su abundancia, distribución, así como su éxito reproductivo, son representativas en su hábitat. Además, su presencia es un indicativo del estado particular del medio ambiente (Tenjo & Cárdenas, 2015).

Una característica esencial que debe tener un organismo designado como bioindicador es su sensibilidad, es decir, estos deben tener cierta vulnerabilidad frente a uno o más factores ambientales. Si el organismo es demasiado resistente, los daños causados por los estresores podrían pasar desapercibidos. Además, estos organismos deben proporcionar información biológicamente relevante, otras palabras, sus respuestas

deben permitir discriminar entre las perturbaciones causadas por actividades humanas en el medio ambiente y las variaciones naturales. (González & Vallariano, 2014).

En los ecosistemas acuáticos son muy utilizados los organismos del plancton, macroinvertebrados (crustáceos, moluscos e insectos), peces y aves (De la lanza & Hernández, 2014). Dentro de los organismos planctónicos de interés se encuentra un grupo importante: el zooplancton, debido a su amplia distribución, diversificación y reproducción. Dentro de este grupo, se considera a los rotíferos, cladóceros, ostrácodos y copépodos como indicadores importantes de los cambios en la calidad del agua, y se recomienda incluirlos en los estudios de impacto ambiental (Blaz, 2019).

1.3.1 Biodisponibilidad

Cuando se presentan cambios en los ecosistemas derivados de la exposición de contaminantes como metales, los organismos que se encuentran en el medio quedan expuestos a estos compuesto tóxicos, según lo menciona Carriquiriborde (2021) existen tres fases de acción, donde la primera es la exposición donde los factores ambientales determinarán la biodisponibilidad la cual se refiere al grado en el que un contaminante es incorporado a un organismo, la siguiente fase es la partición condicionada por la absorción, metabolización y por lo tanto la bioacumulación, la tercera fase es la potencia la cual depende de la concentración interna y determinará la toxicodinámica.

Los organismos que se encuentran en la cima de la cadena alimentaria tardan mas en metabolizar y por lo tanto excretar los contaminantes debido a que presentan una mayor cantidad de grasa corporal a diferencia de los que se encuentran en la parte inferior y viven menos tiempo (Schweitzer & Noble, 2018).

En la Tabla 3 se muestran límites de toxicidad de algunos metales en organismos según lo menciona Jiménez (2001).

Tabla 3. Grado de toxicidad de Cd, Cu, Cr, Ni y Zn (Jiménez, 2001).

Metal	Vida acuática				Salud humana	
	Agua dulce		Agua salada		Aguda	Crónica
	Toxicidad aguda µg/L	Toxicidad crónica µg/L	Toxicidad aguda µg/L	Toxicidad crónica µg/L	µg/L	µg/L
Cadmio	$e^{(1.5 \ln(\text{dureza})-8.53)}$	$e^{(1.5 \ln(\text{dureza}) 3.73)}$		4.5		10
Cobre	$e^{(0.94 \ln(\text{dureza})-1.23)}$	5.6 en 24h	23	4 en 24h		1
Cromo	21	0.29 en 24h	1260	18		50

Niquel	$e^{(0.76 \ln (\text{dureza})+1.6)}$	$e^{(1.76 \ln (\text{dureza})+1.42)}$	140	7.1 en 24h		13.4
Zinc		47	170	58		5000

1.4 Hidroquímica

Los sistemas acuáticos son muy complejos debido a la gran cantidad de procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren en el medio, de tal forma que el comportamiento de los metales que ingresen al sistema dependerá de los componentes disueltos y las condiciones en el que se encuentra, la precipitación directa se puede dar debido a los cambios en el pH, el potencial de oxidación y las concentraciones de otras sustancias disueltas como sólidos, mezclas de otras agua y pérdida de gases (Salomons y Förstner, 1984). De la misma forma Reyes et al. (2016). Menciona que tanto la materia orgánica e inorgánica presente de forma particulada y coloidal desempeña un papel importante en el proceso de sedimentación y de absorción, además que influyen en el transporte y el tiempo de residencia de los metales desde la columna de agua a los sedimentos u otras matrices.

Las mayoría de tipos de precipitación según lo menciona Rose et al. (1979) son

1.- Tipo de oxidación; Los óxidos de hierro, manganeso o azufre precipitan por la oxidación de soluciones reductoras por agua que emerge a la superficie.

2.- Tipo de reducción; Precipitan como metales u óxidos de menor valencia (Cu, U, V y Ag) por reducción de agua oxidante causada por su interacción con materia orgánica o una mezcla de agua y gases reductores.

3.- Tipo sulfuro reductor (Fe, Cu, Ag, Zn, Pb, Hg, Co, As y Mo); Precipitan como sulfuros por reducción de aguas oxidantes sulfatadas generalmente producidas por la acción de bacterias reductoras de sulfatos. En el caso de los metales U, V y Se también precipitan por las mismas causas sin embargo requieren la presencia de sulfato disuelto.

4.- Tipos sulfato carbonato, los metales Ba, Sr y Ca precipitan por el aumento de sulfato o carbonato como resultado de la mezcla de aguas, la oxidación de sulfuros o el paso a través de roca carbonatada

5.- Tipo alcalino, en este tipo de precipitación elementos como Ca, Mg, Sr, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Cd y otros más precipitan por el aumento del pH generalmente causado por la interacción de aguas ácidas con carbonatadas, rocas de silicato o mezcla con aguas alcalinas.

6.- Tipo adsortivo se refiere a la adsorción o coprecipitación de iones en acumulaciones de Fe-Mn-óxidos, arcillas y materiales orgánicos, los cationes de metales de transición y aquellos con alta valencia tienden a ser adsorbidos más fuertemente que los aniones y los cationes de baja valencia.

1.5 Normas oficiales mexicanas.

En el municipio de Benito Juárez el agua subterránea es la principal fuente de agua potable de la población, sin embargo, se ve expuesta a diversos contaminantes como los metales pesados, por lo que, la calidad del agua podría verse vulnerable y encontrarse fuera de las normatividades vigentes para México, en las que se establecen los límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización.

Las Normas Mexicanas (NOM) son las encargadas de regular de forma técnica y con un estándar diversos bienes o servicios con el fin de garantizar la seguridad de la población. Cuando hablamos de recursos hídricos se vuelve un tema controversial ya que el agua debe de estar regulada y mantener ciertos niveles de calidad para poder ser potable para la población. En las últimas décadas la explotación de los acuíferos ha ido en aumento derivado del crecimiento poblacional y de actividades recreativas en la península de Yucatán, en consecuencia, ponen en riesgo el agua que se destina al consumo humano (Chavez-Guzman, 2021). Nuestras referencias de calidad respecto a la contaminación de metales, están dentro de las NOM-127-SSA1-2021 la cual establece los límites máximos permisibles en la calidad del agua para el uso y consumo humano así como la norma NOM-001-SEMARNAT para la protección de la vida acuática, en la Tabla 4 se presentan estas normas con sus respectivas modificaciones realizadas en el año 2021, con respecto a los valores de referencia contamos con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-200 la cual nos brinda criterios para determinar la concentración de remediación de suelos contaminados además debido a la falta de información sobre algunos metales se tomarán como referencias parámetros internacionales de Estados Unidos (NOAA) y Canadá (Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life) (Tabla 5).

Tabla 4. Límites máximos permitidos de metales en agua.

	NOM 127		NOM 001		NOM 001			ONU
mg/L	1994	2021	1996	1996	2021	2021	2021	

Metal	LMP	LMP	P.M	P.D	PM	PD	VI	
Aluminio	0.20	0.20						0.2
Bario	0.70	1.30						0.7
Boro	----	----	----	----	----	----	----	---
Cromo	0.05	0.05	0.5	1.0	1.0	1.25	1.5	0.05
Cadmio	0.005	0.005	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.003
Hierro	0.30	0.30						0.3
Cobre	2.0	2.0	4.0	6.0	4.0	5.0	6.0	2
Litio	----	----	----	----	----	----	----	----
Zinc	5.0		10	20	10	15	20	3

LMP: Límites máximos permitidos en sedimentos. P.M: Promedio mensual. P.D: Promedio diario. Unidades en mg/L. Normas NOM-127-SSA1-1994 y 2021, NOM-001-SEMARNAT1996 y 2021, ONU.

Tabla 5. Límites para la determinación de metales en sedimento

LMP	NOM-147- SEMARNAT/SSA1- 2004	Calidad del sedimento canadiense (Protección vida acuática)	NOAA	
mg/kg	Uso Agrícola/residencial	ISQG	PEL	SQUIRTS
Al	-	-	-	-
Ba	-	-	-	-
Cr	-	37.3	90	7-13
Cr (VI)	280	-	-	-
Cd	37	0.6	3.5	-
Fe	-	-	-	-
Cu	-	35.7	197	10-25
Li	-	-	-	-
Ni	1600	-	-	-
Zn	-	123	315	7-38

LMP: Límites máximos permitidos en sedimentos. Unidades en mg/L. Normas NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica Departamento de

Comercio de EE. UU. (NOAA), **ISQG- Interim Sediment Quality** Guidelines for the Protection of Aquatic Life y Pel- niveles de efecto probable (Peso seco).

1.6 Ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es el proceso por el cual los seres vivos se abastecen de agua además forma parte importante de las condiciones en las que se pueden encontrar las cuencas hidrológicas (Maderey & Jiménez, 2001), este ciclo se encuentra en constante circulación entre la hidrosfera, litosfera y atmosfera en sus diversos estados (SINA, 2021). Sucede cuando la superficie del agua se calienta y evapora, las corrientes de aire llevan el vapor de agua, en la atmosfera el vapor formado se condensa formando nubes que se precipitan como lluvia, parte de esta precipitación cae en forma sólida como nieve que se acumula en capas de hielos o glaciares, en las zonas más cálidas esta nieve se derrite derivado de los cambios estacionales, el agua formada corre por la superficie llegando a ríos o acumulándose en lagos de agua dulce, una gran parte del agua es absorbida por los suelos el cual se infiltra y se acumula formando cuencas de agua subterránea que se seguirán moviendo hasta retornar nuevamente al océano; por otro lado el agua que se encuentre de forma superficial será aprovechado por plantas y animales que ahí se encuentren (USGS, 2021)

Según datos obtenidos del Sistema Nacional de información del agua (SINA) se estima que en México el agua de lluvia es de aproximadamente 1.5 millones de $\text{hm}^3/\text{año}$, el 72.5 % se evapotranspira y regresa a la atmosfera, el 21% que se mueve por los ríos y arroyos, siendo el 6.5 % únicamente el que se infiltra al suelo de forma natural y recarga los acuíferos (SINA, 2021).

Los componente que forma el ciclo hidrológico están íntimamente interrelacionados de tal forma que la modificación o alteración podría generar un desequilibrio ambiental (Maderey & Jiménez, 2001). Figura 1.

Las actividades agronómicas y ganaderas afectan los recursos hídricos, y es posible monitorear en el agua tóxicos que provienen de éstas actividades, priorizando su estudio en zonas prioritarias, analizando en el tiempo su evolución en la concentración en agua, tomando en cuenta, los cambios estacionales en los hidroperiodos de la región para entender y correlacionar algunas variables del ciclo hidrológico con la contaminación ambiental (Cejudo et al., 2021; Peña et al., 2014).

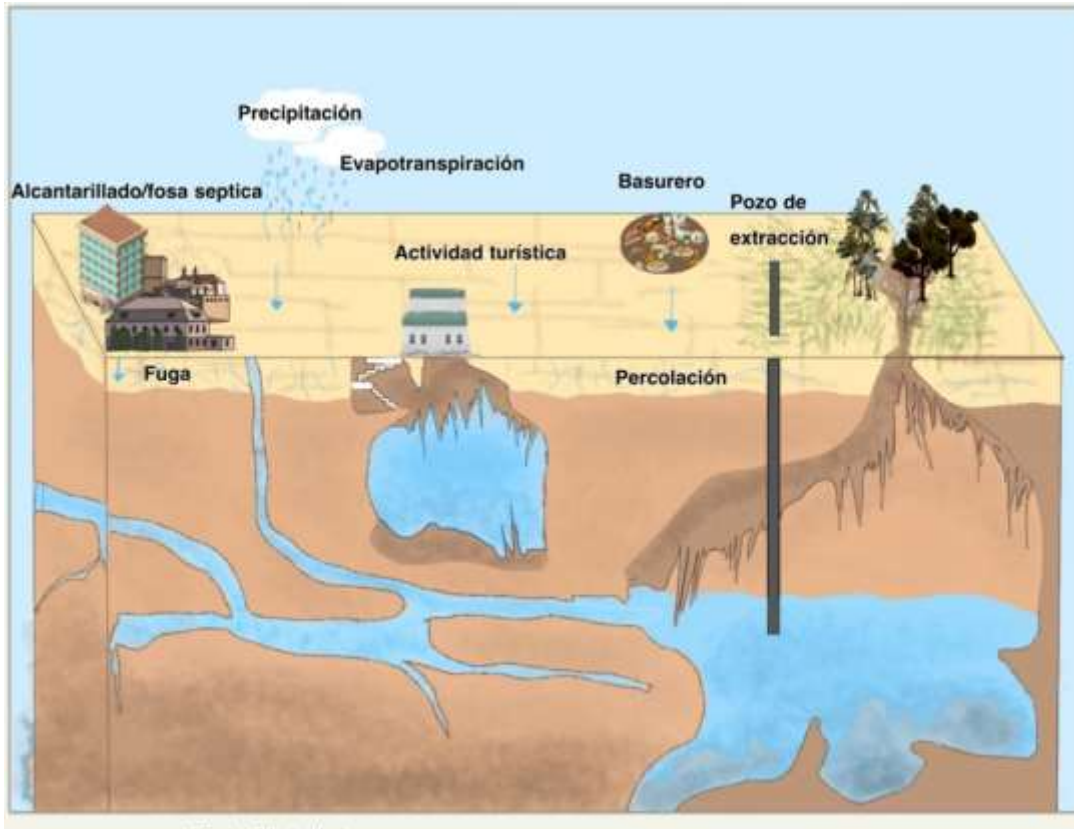


Figura 1. Fuentes de contaminación e infiltración al acuífero. Elaborado por Gabriela Pineda, 2023.

1.7 Acuífero kárstico.

La permeabilidad del suelo es determinante durante el proceso de infiltración del agua meteórica. Entre mayor sea la permeabilidad del suelo, el agua llegará más rápido a las zonas de fractura, donde las rocas presentan altas porosidades e inclusive huecos y cavidades, que pueden encontrarse parcial o totalmente saturados de agua y son denominados acuíferos (Peralta & López, 2012).

Es decir, las zonas de almacenamiento de agua en el medio poroso generan los acuíferos, los cuales son de gran importancia ya que son la fuente primordial de agua potable para las poblaciones. Un acuífero se pueden definir como un área de roca y arena subterránea que en su interior contiene agua y es parte primordial del ciclo hidrológico. Según sus características litológicas, los acuíferos se clasifican en tres tipos: detríticos, fisurado o kárstico y mixto (SEMIDE, 2021). Los acuíferos kársticos se caracterizan por estar conformados por rocas carbonatadas, susceptibles de fracturamiento y disolución, entre ellas se encuentran las calizas, dolomitas, yesos, granitos, basaltos etc., (SEMIDE, 2021). Muestran alta porosidad

secundaria (Pulido, 2001), en la que se presentan canales y cavernas de gran tamaño (Acosta, 2018).

La península de Yucatán contiene un acuífero kárstico debido a que yace en ella un extenso depósito de rocas sedimentarias, formadas a partir de los remanentes de antiguos mares y lagos que corresponden a una cuenca carbonatada (Beddows et al., 2007). En el sistema kárstico de la península de Yucatan se observan diversas depresiones kársticas como los cenotes o dolinas (Estrada et al. 2019).

1.7.1 Cenotes.

La formación de cenotes se debe a procesos geomorfológicos denominados Karst (Terreno calcáreo modelado por la acción del agua rica en anhídrido carbónico), nombre de la región italo-eslovena de Carso), a partir de la combinación de mecanismos en los que se incluye la disolución, el colapso y construcción de la caliza (Beddows et al., 2007).

Este proceso comienza con la disolución de las rocas solubles (yeso, caliza, dolomita y halita) por corrosión química (Beddows et al., 2007) resultado de tres procesos 1) las rocas comenzaron a diluirse debido a la ligera acidificación generada por el agua de lluvia al contener ácido carbónico formado por el CO₂ atmosférico. 2) La mezcla del agua dulce y de mar provocaron en la haloclina mayor agresividad en las rocas, generando que la disolución fuera más potente y se formaran agujeros en ella (Beddows et al., 2007). Y 3) la materia orgánica en descomposición produjo ácido sulfhídrico (H₂S) en los sistemas de flujo subterráneo generando la disolución de la roca desde la masa de agua (AQUAWORLD, 2015).

El segundo mecanismo vinculado al karst se debe a los cambios en el nivel del mar debido al periodo glaciario e interglaciario (Beddows et al., 2007) donde el agua bajo hasta el nivel del acuífero, dejando cuevas llenas de aire que por la fuerza colapsaron formando dolinas o depresiones (cenotes) (esta idea está medio extraña, la he leído en muchos textos, no todo lo que se escribe debe ser repetido. Hay mejores explicaciones acerca de la formación de los cenotes, que ocurre todo el tiempo). Al final del periodo glaciario, se descongelaron los polos, aumentó el nivel del mar y se inundaron las cuevas (AQUAWORLD, 2015).

Es importante mencionar que durante el tercer proceso general de formación de un cenote, se originan estructuras constructivas o de acumulación denominadas espeleotemas (Beddows et al., 2007). Es decir las cuevas o estructuras formadas anteriormente siguieron recibiendo agua de lluvia acidificada, al llegar a la cavidad se genera un proceso de desgasificación donde el

CO₂ es expulsado del agua provocando la precipitación de carbonato de calcio formando espeleotemas (Monroy, 2016). El crecimiento de estas estructuras se detendrá cuando el nivel del agua aumente o la cueva quede inundada de nuevo.

En la península de Yucatán el sistema kárstico contiene agua indispensable para la población y el medio ambiente, su estudio es importante desde la perspectiva de la contaminación ambiental y sus características hidrogeológicas.

1.8 Tomografía de resistividad eléctrica.

Las tomografías de resistividad eléctrica son utilizadas como un método para poder obtener una prospección geofísica de una zona definida, con esto se logra identificar como se encuentra la resistividad de las rocas, siendo esta una magnitud física que representa las propiedades eléctricas del medio y su constitución mineral, el cual dependerá de su forma, volumen y su capacidad de alojar en sus poros soluciones salinas que favorezcan su conducción eléctrica (Acosta, 2018). Otros factores que interactúan en el medio y serán determinantes para conocer la resistividad de una roca son la salinidad de las soluciones, la compactación, así como la presión y temperatura (Cáceres & Vera, 2016). Se estima que en las regiones kársticas la resistividad será menor como lo menciona Méndez (2008) quien ha observado que las rocas en zonas con gran porosidad o fractura, saturadas de agua van a presentar menor resistividad que las regiones más compactas o no saturadas. Se sabe que la resistividad eléctrica disminuirá entre mayor sea la interconexión entre los poros sin embargo cuanto mayor sea la salinidad de las soluciones será mayor la capacidad de conducir la corriente eléctrica debido al contenido de iones como lo describe la Ley de Archie con el cual es posible calcular el porcentaje de saturación (Cáceres & Vera, 2016).

De tal forma que los métodos eléctricos son utilizados, para caracterizar los medios geológicos basados en su resistividad eléctrica, siendo este un método muy eficiente ya que esta perturbación la podemos controlar.

Para poder medir la resistividad eléctrica de las rocas se utiliza una serie de electrodos a lo largo de un trayecto obteniendo información tanto horizontal y vertical del suelo, existen diferentes arreglos para medir la resistencia eléctrica de las rocas, entre los cuales destacan Dipolo- dipolo y Wenner (OCSA, 2016).

1.8.1 Tomografías Dipolo-Dipolo/ Wenner.

El arreglo dipolo-dipolo consiste en inyectar corriente mediante un par de electrodos fuente, separados entre sí, y medir la diferencia de potencial en otro par de electrodos, separados entre sí por la misma distancia. El arreglo se mueve a lo largo del perfil, conservando su geometría, como se aprecia en la figura 2, para los pares de electrodos AB y MN (Miguel et al., 2019).

Los arreglos dipolo-dipolo poseen la característica de que son más sensibles a cambios horizontales en las propiedades del subsuelo (Sanz et al., 2010).

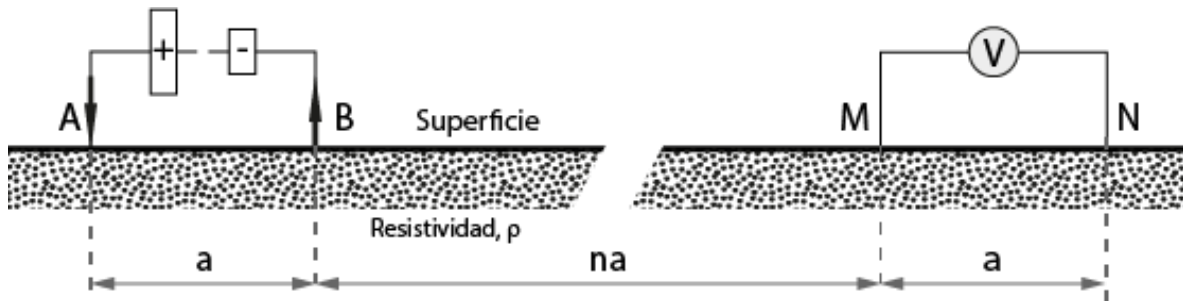


Figura 2. A y B son los electrodos de corriente, M y N electrodos de potencial. (a) distancia no mayor de 10 m (OCSA, 2016).

1.8.2 Tomografía Eléctrica Wenner.

El método Wenner consiste en la inyección de corriente eléctrica en el terreno por medio de electrodos auxiliares, véase figura 3 (Sanz et al., 2010). En este arreglo geométrico los electrodos se encuentran sobre una línea recta con el orden AMNB (Benavides et al., 2021)

Este método es el más sensible a cambios verticales en las propiedades eléctricas del terreno (Sanz et al., 2010).

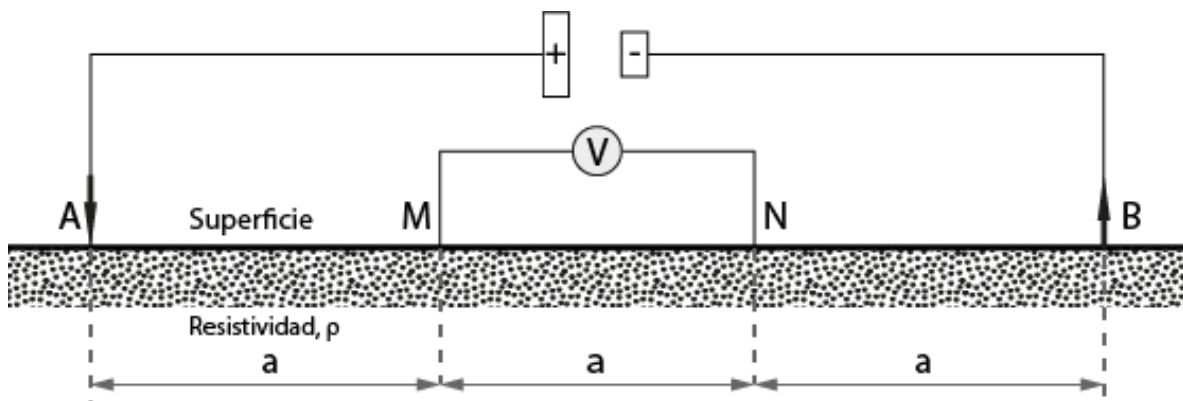


Figura 3. A y B son los electrodos de corriente, M y N electrodos de potencial. (a) distancia no mayor de 10 m (OCSA, 2016).

1.9 Evaluación ambiental.

El impacto ambiental lo podemos definir como los cambios o modificaciones del ambiente ocasionadas por el hombre o la naturaleza (SEMARNAT, 2018b), por ejemplo actividades antropogénicas así como algunos fenómenos climatológicos como lo pueden ser los huracanes y erupciones volcánicas que pueden generar impactos ambientales. Sin embargo, diversos autores relacionan este término a las modificaciones provocadas por el hombre. La SEMARNAT (2018) clasifica estos impactos de acuerdo a su origen en: a) el aprovechamiento de los recursos naturales (renovables o no renovables), b) contaminación generada por cualquier proyecto que produzca residuos y c) cambio de uso de suelo. Por su parte Perevochtchikova (2013) considera que el impacto ambiental debe considerarse como un proceso de análisis de diversos aspectos biofísicos y antropogénicos que se relacionan con la vulnerabilidad social y sus consecuencias económicas.

Debido a las diversas fuentes de contaminación y modificación de los ecosistemas es necesario realizar evaluaciones de impacto ambiental que determinen las condiciones en las que se encuentra un ambiente. Se debe considerar que el proyecto sea sustentable, económicamente factible y tenga un beneficio social con el aprovechamiento de los recursos naturales (SEMARNAT, 2018a). Además éste se debe desarrollar de acuerdo con la legislación vigente y los indicadores de desarrollo sostenible. Con el fin de prevenir riesgos a la salud, es necesario mantener el bienestar de las comunidades y recuperar su equilibrio ecológico (Perevochtchikova, 2013).

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

En la región sur del estado de Quintana Roo, México, así como en toda la península de Yucatán, el acuífero constituye la principal fuente de suministro de agua para todas las actividades humanas (Sánchez et al., 2016). Según estadísticas del INEGI, entre los años 2010 y 2020, la población experimentó un aumento del 40.1%. (INEGI, 2020).

El incremento acelerado de la población genera en los cuerpos de agua cercanos contaminación que puede tener consecuencias en la salud en las poblaciones que ahí residen, según lo mencionado por Covarrubias & Peña (2017). En México, existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así

como en ambientes costeros y marinos, donde se ha detectado la acumulación de metales tóxicos en tejidos de peces y moluscos de consumo humano (Covarrubias & Peña, 2017).

Particularmente, en el estado de Quintana Roo, existe una zona denominada Ruta de los cenotes situada en el municipio de Puerto Morelos y Lázaro Cárdenas, en donde existen gran cantidad de pozos de abastecimiento de agua potable y además, una gran actividad ecoturística, lo que está ocasionado una gran presión sobre los recursos naturales por el crecimiento y desarrollos ecoturísticos, los asentamientos irregulares, el aumento en el número de reportes de incendios forestales, así como la carencia de servicios como la recolección de desechos y la disposición final de los residuos sólidos urbanos (SEMA, 2020). Todo esto se vuelve una problemática a corto y mediano plazo, que pone en riesgo el acuífero en la zona. Las actividades turísticas generan un impacto negativo a largo plazo en los cenotes, y probablemente se observe una acumulación de productos químicos como metales en el sedimento y el agua y a futuro podría ser un problema crítico que afecte al ecosistema (Fernandez et al., 2007). Otras actividades que ahí se desarrollan son agrícolas que son otra fuente importante de contaminación por el uso de agroquímicos.

Algunos estudios de contaminación en la península reportaron la presencia de metales como el plomo (Pb). Arcega et al. (2014) detectaron la presencia de plomo (Pb) en humedales debido a las actividades recreativas de caza de aves que se realiza en los meses de invierno.

Medina et al. (2014) detectaron contaminación por hidrocarburos en los cenotes ubicados en varias regiones de Quintana Roo incluyendo Puerto Morelos, en los cuales se determinó que la concentración de estos contaminantes se encuentra relacionada con la temporada turística, ya que los cenotes mostraron un mayor porcentaje en la concentración y diversidad de hidrocarburos durante la temporada alta en comparación a la temporada baja. De la misma forma Gonzalez et al. (2018) mencionan que la contaminación por metales en la región se debe principalmente al turismo y pesca debido a que son las principales actividades que se realizan en la zona además de los tiraderos a cielo abierto. En el año 2009 se clausuró el basurero municipal que se encontraba a cielo abierto y el cual carecía de una base que protegiera su cercanía del nivel freático para evitar la infiltración de los lixiviados al acuífero (Gonzalez et al., 2018), lamentablemente aún existen tiraderos clandestinos en la zona.

Existen algunos reportes por la presencia de metales pesados en cenotes de la región según un estudio realizado por Alvarado-Flores et al. (2019) en donde documentaron la ocurrencia de metales pesados como cadmio (Cd) y mercurio (Hg) acumulado en la biota del noreste de la

península, mediante microanálisis de rayos x. Por su parte, Pérez-Yañez (2020) detectó la presencia de cadmio (Cd) tanto en biota como en agua en el cenote denominado la victoria, que rebasaba los límites permisibles en las normas oficiales mexicanas. Benavides et al., (2021) detectaron la presencia de metales como cadmio (Cd), cromo (Cr) y plomo (Pb) a lo largo de la columna de agua en otro cenote en Puerto Morelos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la atmosfera terrestre podemos encontrar una gran cantidad de elementos que se mueven constantemente durante los ciclos biogeoquímicos, entre los cuales se encuentran algunos metales, incluso en los organismos para completar sus funciones biológicas, porque los necesitan en porcentajes muy pequeños. Sin embargo, el rápido crecimiento poblacional y la diversidad de actividades antropogénicas que se realizan han generado la acumulación de grandes cantidades de metales en nuestro ambiente. El municipio de Quintana Roo, es reconocido a nivel mundial por su gran diversidad de áreas naturales, teniendo atracciones importantes como son los cenotes turísticos, que se encuentran por toda la península de Yucatán. En los cenotes se realizan actividades recreativas en el agua, lo que potencialmente puede alterar la calidad de agua.

Actualmente en la zona conocida como Ruta de los Cenotes localizada en los municipios de Puerto Morelos y Lázaro Cárdenas, se están desarrollando diversos proyectos inmobiliarios (SEMA, 2020), y un porcentaje de la población permanece en asentamientos irregulares y carecen de sistemas de drenaje. Además, es importante mencionar que los contaminantes infiltrados en la zona pueden arrastrarse con gran facilidad debido a que es una zona con gran precipitación pluvial y de suelos poco profundos. Por tal motivo es necesario determinar si existe presencia de metales considerados tóxicos en el agua y el sedimento, y después estimar con base en las concentraciones de los metales, si existe un riesgo ecológico en la zona, usando especies bioindicadoras de la región, como organismo de referencia.

JUSTIFICACIÓN

El desabasto de agua potable a nivel mundial, la explotación de este recurso y la inminente contaminación que se registra está generando graves problemas ambientales, impactando no solo su calidad si no a los ecosistemas acuáticos. Según la UNESCO (2009) en el año 2030 aproximadamente el 47% de la población mundial vivirá en zonas con estrés hídrico y 67% de la población podría no contar con sistemas de alcantarillado.

El acuífero en la península de Yucatán es de gran importancia ya que de ellas dependen millones de personas del estado de Campeche, Yucatán y Quintana Roo que lo utilizan para realizar sus actividades diarias, además de albergar gran diversidad de especies en toda la península. La contaminación del agua se agrava debido a que el suelo cuenta con características kársticas que inducen un aumento en su permeabilidad y distribución de los contaminantes. La zona conocida como Ruta de los Cenotes de Puerto Morelos se ha convertido en un detonante turístico debido a la gran cantidad de cenotes en la región. Por lo tanto, es necesario realizar análisis para identificar la presencia de metales pesados que puedan tener un potencial tóxico para la vida acuática e incluso con repercusiones adversas a la salud pública. Las determinaciones de metales pesados en agua y sedimento en la Ruta de los Cenotes de Puerto Morelos servirán para tomar decisiones respecto al futuro del acuífero de la península en esta región en específico y en particular para la zona de estudio. Con un sistema kárstico vulnerable, y donde la distribución de la contaminación de metales no se conoce, en especial con los flujos subterráneos que existen en la zona.

HIPOTESIS

Es posible determinar el riesgo ecológico utilizando organismos bioindicadores y generar una correlación con la presencia de metales en la columna de agua y sedimentos, así como su distribución basada en la permeabilidad de las rocas del subsuelo y los flujos de agua subterránea.

OBJETIVO GENERAL

Estimar el riesgo ecológico asociado a la presencia de metales en la columna de agua y sedimentos del acuífero, y correlacionar su concentración con la posible presencia de sistemas de flujo de agua subterránea.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el grado de contaminación por metales pesados en la columna de agua de los sitios de estudio.
- Caracterizar los perfiles de conductividad y temperatura, en la columna de agua para la identificación del espesor del lente de agua dulce de los sitios de estudio.
- Obtener la hidrogeoquímica del agua de los sitios de estudio.
- Estimar los perfiles de permeabilidad en el subsuelo a partir de tomografías de resistividad eléctrica, mediante los arreglos dipolo-dipolo y/o Wenner.
- Determinar las direcciones de flujo de agua subterránea en el área de estudio.
- Realizar la evaluación de riesgo ecológico por la presencia de metales en la columna de agua dulce (usando el zooplancton como organismo bioindicador) y sedimento.

CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se llevó a cabo durante la temporada de octubre 2021 y marzo 2022 en cinco cenotes ubicados en la Ruta de los cenotes (Figura 4) entre el municipio de Puerto Morelos y Lázaro Cárdenas al norte de la ciudad de Quintana Roo.

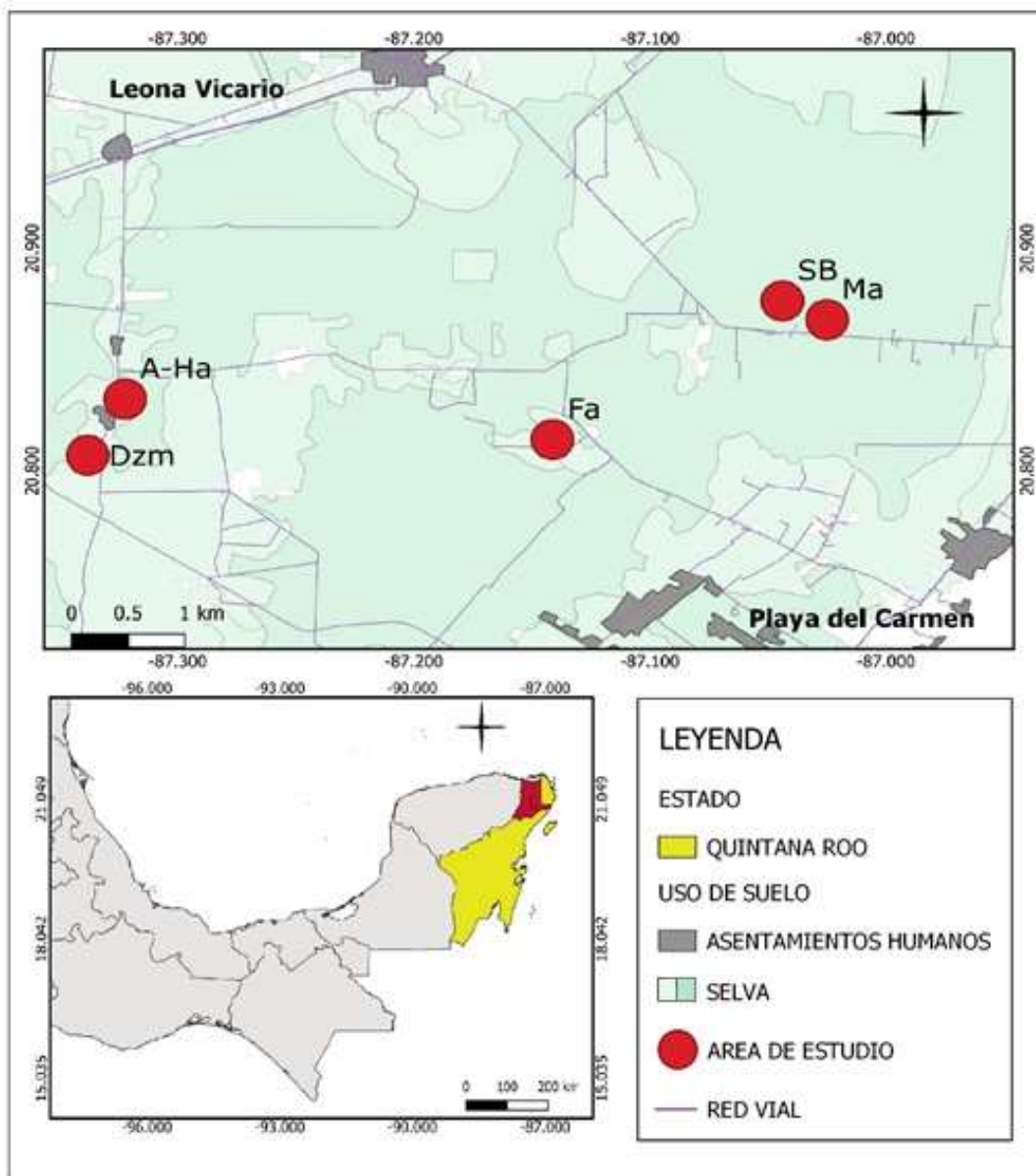


Figura 4. Área de estudio. Elaboración propia utilizando el software QGIS versión 3.16

3.1 Colecta de agua

Previo al muestreo, las botellas de HDPE (polietileno de alta densidad) utilizadas se lavaron según los protocolos de limpieza establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA). Los recipientes fueron lavados con detergente libre de fosfatos, luego se enjuagaron con agua desionizada y se dejaron en un baño de ácido clorhídrico al 10% por 24 horas. Para finalizar estas se enjuagaron nuevamente con agua desionizada.

En cada sitio se tomaron muestras de 1 litro de agua a tres profundidades (1, 15 y 25m) por medio de una botella Van Dorn. Se tomaron como datos *in situ* los parámetros físico químicos de temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica (CE), potencial redox (ORP) y sólidos disueltos totales (mg/L) con la sonda HANNA modelo HI98129. Las muestras se guardaron en una hielera para poder ser trasladadas. Ya en el laboratorio de cada muestra se separaron submuestras de 125 ml de agua para la determinación de sílice (sin filtrar) y elementos mayores el cual se filtró utilizando un filtro Milipore Millex-HN de 0.45µm y para la determinación de metales e cual se acidificó con ácido nítrico (HNO₃) ultra puro hasta alcanzar un pH de 2. Todas las muestras se mantuvieron en refrigeración a 4°C.

3.2 Colecta de sedimento

La colecta de sedimento se realizo con el apoyo de los buzos expertos en cavernas del Gran Acuífero Maya a una profundidad de 25m. Las inmerciones se realizaron durante 45 minutos aproximadamente en cada cenote. Ellos fueron los encargados de recolectar los sedimentos en cada cenote como se observa en la figura 5.

Para la colecta se utilizaron herramientas de plástico como una pala de 30cm, bolsas plásticas con cierre hermético (Ziploc®) de 25cm x 25cm y una bolsa de red de 35cm x 25cm para su fácil manipulación. Las muestras se guardaron en una hielera para poder ser transportadas. Ya en el laboratorio el sedimento se filtró para eliminar el exceso de agua con papel filtro marca Ederol N°1, se secó a 60°C durante 48hrs, posteriormente se tamizó en un tamiz de plástico con una apertura de malla de $\leq 2\text{mm}$. para obtener granos finos y se resguardó hasta su análisis (Figura 5 y 6).



Figura 5. Material para la colecta de sedimento. Fotografía obtenida por Gabriela Pineda, 2022.



Figura 6. Extracción de sedimento por parte del GAM. Fotografía obtenida del GAM.

3.3 Protocolo de tomografías de resistividad eléctrica

La tomografía de resistividad eléctrica se llevó a cabo del 22 al 24 de marzo en los cenotes Maravillas, Siete bocas y Dzalam mediante los arreglos Dipolo-Dipolo y/o Wenner. Se utilizaron 36 electrodos con separaciones de 5 metros entre ellos, con una longitud de 175 m. En cada sitio se georeferencio el inicio y final del transecto. Por otro lado, con ayuda de una sonda CTD manual marca Castawel se registraron los cambios en la conductividad y temperatura del agua a lo largo de la columna de agua de los cenotes.

Se utilizó el equipo Super Sting R1 1P el cual para su funcionamiento debe estar integrado por la consola, la caja de interruptores, así como contar con una batería Marca Duralast de 750W (Figura 8).

Una vez que se obtuvo el perfil se utilizó el software EarthImager para construir la imagen de las propiedades eléctricas del subsuelo. El proceso de inversión (construcción de la imagen) se divide en tres etapas: condiciones iniciales, simulación directa e inversión. En cada etapa se asignaron parámetros según lo recomendado por Advanced Geosciences (Zamora, 2019). Este proceso se realizó con el fin de interpretar las secciones geoeléctricas que se obtuvieron en el área de estudio.

Por otro lado, para establecer la porosidad de la roca se tomó en cuenta el perfil de conductividad del cenote y el perfil de resistividad del fluido en la columna de agua. Para relacionar la conductividad de la roca, su porosidad y el fluido que lo satura se utilizó la Ley de Archie.



Figura 8. Equipo utilizado para la obtención de tomografías. Fotografía obtenida por Gabriela Pineda, 2022.

3.4 Cuantificación de metales

Se seleccionaron once metales para analizar: Al, Ba, Pb, B, Cr, Cd, Fe, Cu, Li Ni, Zn. De las muestras de agua acidificadas previamente a pH 2, después se tomaron alícuotas de 10 ml para ser analizadas con el espectrómetro de plasma de acoplamiento inductivo (ICP por sus siglas en inglés) y obtener la concentración de metales de cada una de ellas.

En el caso de sedimentos se realizó previamente una digestión ácida mediante dos métodos EPA 3051A (cerrada) y EPA 3050 B (abierta).

El método 3051 o extracción por microondas, este método se lleva a cabo de la siguiente forma.

Para cada muestra se utilizaron tubos de digestión a los cuales se les agregó 0.500 g de sedimento (por duplicado) y se le adicionó 10ml de HNO_3 de forma lenta (1:1), posteriormente se selló el recipiente y se calentó durante 10 min a 175 °C en la unidad de microondas marca MARS5 previamente programado con el método EPA 3051. Una vez completado el paso anterior los tubos se dejan enfriar a temperatura ambiente y se transfieren a matraces volumétricos donde son aforados a 50ml con agua desionizada, una vez completado este paso se llevan a refrigeración a 4°C para su posterior análisis.

Por otro lado, con el método 3050B se genera una digestión ácida muy fuerte capaz de disolver diversos materiales incluyendo materia orgánica dejando expuesto los elementos de nuestro interés, aunque no es una digestión total absoluta sus niveles de alcance pueden ser mayores. Este método se lleva a cabo de la siguiente manera. En vasos de precipitado se pesa 1g de sedimento (por duplicado), se le adicionan 10ml de ácido nítrico ultra puro (HNO_3) 1:1 y se tapa con un vidrio de reloj o un dispositivo de recuperación de vapores. Se calientan en una plancha calefactora a 95°C por 10 o 15 min evitando un fuerte hervor. Una vez transcurrido el tiempo se deja enfriar y se adicionan 5ml HNO_3 , nuevamente se calienta durante 30 min, si durante este tiempo se generan vapores de color marrón es indicativo de un proceso de oxidación y será necesario repetir el paso anterior hasta que el vapor sea claro y la reacción se haya completado. La mezcla se deberá reducir a 5ml en aproximadamente 2 horas, una vez completado el tiempo y esta se haya reducido se le adicionan 2ml de agua desionizada y 3ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% de forma lenta, nuevamente se cubre y se lleva a la fuente de calor (95°C), el peróxido comenzará a reaccionar, se debe evitar que las efervescencias sean excesivas para no tener pérdidas, se continúa agregando 1ml de peróxido de hidrógeno (no más de 10ml) hasta que la efervescencia sea mínima. Posteriormente la mezcla se debe reducir a 5ml en no más de 2 horas. Por último, se deja enfriar y se le adicionan 100ml de agua desionizada, una vez completado el paso se transfieren a tubos de 15ml y se resguardan en refrigeración a 4°C para su posterior análisis.

Una vez obtenidas las digestiones ácidas la cuantificación de los metales se realizó en un espectrómetro de plasma de acoplamiento inductivo (ICP) modelo optima 8000, Marca Perkin Elmer.

3.4.1 Determinación de las direcciones de flujo en el área de estudio.

Para obtener las direcciones de flujo se tuvo el apoyo del Ingeniero José Armado Rendon. Se generó un mapa isofreático con dirección de los flujos. El mapa se construyó a partir del modelo de elevación digital del terreno para la zona de estudio, realizado con el programa ArcGis. Se utilizaron para este fin las coordenadas y la elevación del terreno en los sitios muestreados. Como método de interpolación se utilizó el algoritmo de Kriging. El trabajo se realizó con el programa Surfer 23.4.

3.5 Geoquímica

3.5.1 Cuantificación de elementos y nutrientes (Sílice).

Para calcular la concentración de sílice se utilizaron las previamente resguardada a 4°C. Se trabajó bajo el método colorimétrico de espectrofotometría en reacción al molibdosilicato con un rango de operación alto (410 nm) la cual se basa en una coloración amarilla una muestra con pH de 1.2, se le adiciona molibdato de amonio formando ácidos heteropolares, el procedimiento se realizó basado en la norma NMX-AA-75-1982. Todas las muestras fueron analizadas por duplicado en ambas temporadas.

Para la determinación de aniones y cationes las muestras fueron previamente filtradas con Milipore Millex-HN de 45 um y refrigeradas a 4°C.

Los análisis se realizaron por medio del método de cromatografía iónica con el equipo 882 Compact IC Plus. Para la determinación de cationes (calcio, sodio, potasio, magnesio) se utilizó como fase móvil una solución de ácido nítrico / ácido dipicolínico, en un rango de 1-50mg/l. Por otro lado, para la determinación de aniones (cloruros, sulfatos y nitratos) se utilizó una solución de Na₂CO₃ y NaHCO₃ con un rango de 1-10mg/l.

Los resultados serán integrados en un diagrama de Piper para determinar el tipo de agua de cada área de estudio utilizando el programa Easy QUIM 5.0 2012.

A los parámetros fisicoquímicos obtenidos *in situ*, los elementos y nutrientes se les aplicó una prueba de normalidad. Los datos fueron sometidos a una prueba de normalidad para determinar si existieron diferencias significativas entre las temporadas, si son normales se utilizaran ANOVAS ($\alpha= 0.05$) o y si no lo son se ocupara una Kruskal Wallis ($\alpha =0.05$). Además, se generaron regresiones lineales para ver si existe dependencia entre los parámetros. Los datos fueron analizados con el programa estadístico TIB STATISTICA 14.0.

3.6 Análisis de riesgo

El análisis de riesgo se llevó a cabo según el modelo conceptual (Figura 9) acorde a lo publicado por Demidof (2022). El diagrama se divide en tres matrices; agua, biota y sedimento los cuales se explican a continuación.

A partir de los datos obtenidos y su análisis se determinó si hay implicaciones ecológicas en el medio biofísico que van de lo insignificante a muy alto con base en el modelo conceptual.

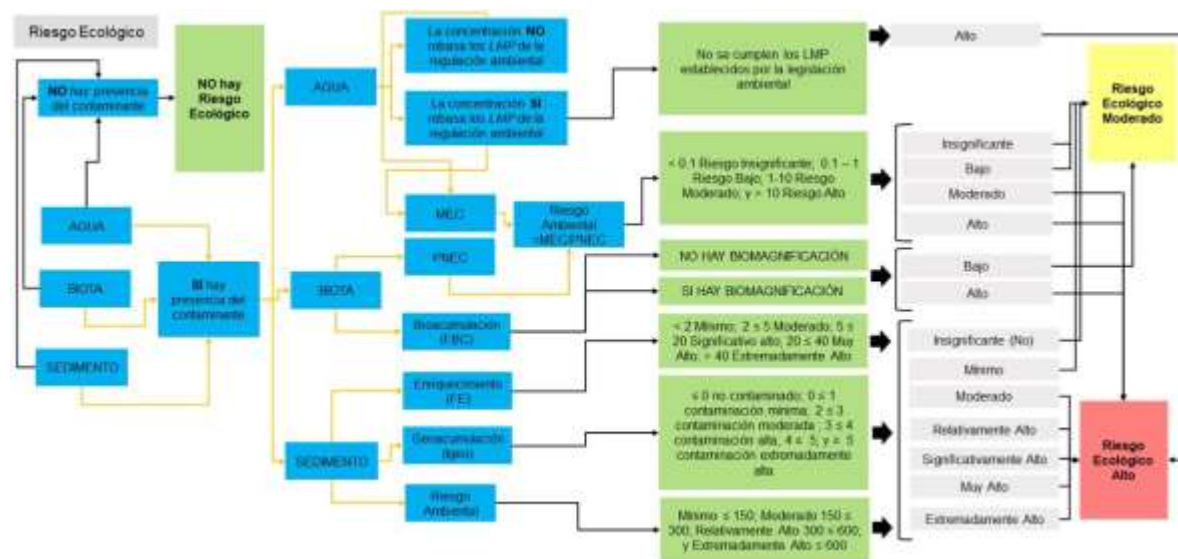


Figura 9. Adaptación realizada por Jesús Alvarado Flores 2023, del modelo conceptual de análisis de riesgo realizado en la tesis de Demidof (2021).

3.6.1 Agua

La determinación del riesgo ecológico en agua se basó en la concentración ambiental del tóxico y su comparación con los Límites Máximos Permitidos (LMP) según la normativa vigente NOM-127-SSA1, NOM-001-SEMARNAT y estándares de la ONU.

3.6.2 Biota: Factor de evaluación del riesgo

Para evaluar el riesgo ambiental es necesario contar con la concentración ambiental del tóxico (MEC), y tener la concentración letal media (CL₅₀) bibliográfica y experimental de las MEC de

los metales encontrados en la columna de agua, para posteriormente obtener el cálculo de la concentración predictiva sin efecto (PNEC).

3.6.2 Biota: Factor de evaluación del riesgo

Para evaluar el riesgo ambiental es necesario contar con la concentración ambiental del tóxico (MEC), y tener la concentración letal media (CL_{50}) bibliográfica y experimental de las MEC de los metales encontrados en la columna de agua, para posteriormente obtener el cálculo de la concentración predictiva sin efecto (PNEC).

Primero se realizó una búsqueda bibliográfica en artículos y bases de datos de toxicología de valores CL_{50} de los metales reportados en la columna de agua: Al, B, Ba, Cu, Cr, Fe, Li, y Zn.

Además, se logró obtener un cultivo de una especie de ostrácodo de la zona de estudio en la cual se realizaron pruebas de toxicidad solo para el metal Zn, debido a que solo contábamos en el laboratorio de ecotoxicología con nanopartículas de Zn (nanopowder, <100 nm particle size (544906-10G: CAS number 1314-13-2) para contribuir con un valor comparativo de CL_{50} con los de bibliografía para realizar la evaluación del riesgo. Para lograr obtener el valor CL_{50} a Zn, se llevó a cabo lo siguiente:

3.6.2.1 Colecta de zooplancton

Se utilizaron botellas de 250 ml previamente lavadas mediante el protocolo EPA y una red de zooplancton con una apertura de 54 μ m. Se realizaron seis arrastres superficiales a lo largo de todo el cenote, por otra parte, las muestras se guardaron en una hielera para poder ser transportadas (Figura 7). En laboratorio se fijó en formol 50ml de muestra al 5% y el restante se distribuyó en cajas Petri y se guardó en la cámara bioclimática (Thermo Scientific) a 25°C con fotoperiodos de 12 horas de luz y oscuridad. Se observaron en un microscopio estereoscópico marca Nikon SMZ745, en el cual se aisló e identificó a la clase ostrácoda como organismo bioindicador, la identificación de la especie se realizó a través de las claves dicotómicas de Pearse (1936).



Figura 7. Colecta de zooplancton en el cenote AHa.

3.6.2.2 Cultivo de Ostrácodos (*Cypridopsis vidua*)

Una vez identificada el ostrácodo como *Cypridopsis vidua* los organismos fueron seleccionados y aislados para su reproducción en cajas de cultivo de 12 pozas, en cada una se colocaron cinco organismos neonatos, una vez establecidos se transfirieron a cajas Petri donde se siguieron reproduciendo. Se utilizó como medio de cultivo medio dulceacuícola sintético de acuerdo a la USEPA y se mantuvieron en la cámara bioclimática (Thermo Scientific) a 25°C con fotoperiodos de 12 horas de luz y oscuridad, durante todo el proyecto hasta terminar las pruebas de toxicidad con metales selectos o prioritarios. Se alimentaron con suplementos alimenticios de Spirulina y Chlorella marca Vidanat®.

3.6.2.3 Pruebas de toxicidad

Para poder realizar las pruebas de toxicidad primero se realizaron rangos exploratorios de los metales Cadmio y Cromo a una concentración de 1mg/l elaborados de una solución stock con el fin de determinar la concentración letal media (CL₅₀).

En cajas de poliestireno de 24 pozas Marca Costar® se realizaron diluciones del stock usando a un volumen de 5, 10, 25, 50, 75, 100, 250, 500, 750 y 1000µl que corresponden a una concentración que va del 5 al 100% según corresponde, se añadió medio EPA hasta obtener un volumen final de 1ml en cada poza por duplicados de cada disolución. Posteriormente se añaden cinco organismos neonatos en cada una de las concentraciones y se incluyeron 4

pozas control (Medio EPA sin metal). Los resultados de mortalidad se registraron durante 24, 48 y 72 horas.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos se establecieron las concentraciones definitivas a las cuales se expondrán los organismos, para obtener la mortalidad para cada metal de referencia en el organismos cultivado y posterior a ello realizar los cálculos para estimar el valor CL₅₀, mediante regresión lineal simple con el programa estadístico TIB STATISTICA 14.0.

Una vez obtenido los valores de CL₅₀ experimentales y bibliográficos (Anexo 1), se procedio a realizar el calculo de la concentración predictiva sin efecto (por sus siglas en ingles, predictive no effect concentración: PNEC El valor CL₅₀ que se utiliza es el valor más bajo reportado en un organismo de prueba, esté para cada metal. A partir de la ecuación:

Ecuación 1

$$PNEC = \frac{CL50}{Factor\ de\ riesgo}$$

El factor de riesgo que se utiliza en la ecuación es acorde a Karlsson (2008), como se observa en la tabla 6. Se uso un factor de riesgo de 1000 en nuestro trabajo, debido a que no contamos con información suficiente toxicológica de la zona de estudio, y acorde a Karlsson (2008), el considera como grupo base valores de toxicidad de tres organismos indicadores: peces, zooplancton y fitoplancton. En nuestro trabajo contamos con información solo de zooplancton y de un metal el Zn. Por ello, tomamos como referencia valores de toxicidad reportados en otros estudios para estimar el riesgo de los metales que encontramos en la columna de agua (Tabla 6).

Tabla 6. Factor de evaluación de riesgo acorde a Karlsson (2008) con grupo de base.

Grupo base	Factor de riesgo
Grupo base + un NOEC agudo de un organismo zooplanctónico	1000
Grupo base + dos NOEC agudo de un organismo zooplanctónico	100
Grupo base + tres NOEC agudo de un organismo zooplanctónico	10

La determinación del umbral de riesgo ambiental se realiza al obtener la concentración efectiva en el medio (MEC) y la concentración predictiva sin efecto (PNEC) para cada metal, de acuerdo con la ecuación 2.

Ecuación 2

$$RA = MEC/PNEC$$

La interpretación se basa en la evaluación del umbral del riesgo ambiental acorde a Karlsson (Tabla 7).

Tabla 7. Evaluación del umbral de riesgo ambiental acorde a Karlsson (2008). Los colores utilizados fueron para el riesgo insignificante (verde), bajo (azul), moderado (amarillo), y alto (anaranjado).

INTERPRETACIÓN	RA
Riesgo ambiental insignificante	< 0.1
Riesgo ambiental bajo	0.1-1
Riesgo ambiental moderado	1-10
Riesgo ambiental alto	>10

En cuanto a los factores de bioacumulación estos fueron tomados a partir de datos publicados en la zona de estudio por Pérez-Yañez (2020) y Balam-Hernández y Ortega, (2022). Para completar la sección de análisis de riesgo basado en el modelo conceptual que se presento en la figura 9. Se reviso si existe reporte de biomagnificacion en estos estudios en los metales encontrados en la columna de agua de nuestro estudio.

3.6.3 Sedimento: Factores de enriquecimiento (FE) e índices de geoacumulación (Igeo)

Para determinar la contaminación de metales en el sedimento de la zona de estudio, se utilizará el factor de enriquecimiento (Fe) y el índice de geoacumulación (Igeo).

El FE se calcula mediante la ecuación 3:

Ecuación 3

$$FE = \frac{(XY)_{muestra}}{(XY)_{Corteza}}$$

Donde la concentración del metal potencialmente enriquecido se expresa como (X) en relación con un elemento de referencia (Y) presente en la muestra (Tabla 8).

Tabla 8. Nivel de enriquecimiento

INTERPRETACIÓN	FE
Mínimo	< 2
Moderado	2 ≤ 5
Significativo alto	5 ≤ 20
Muy Alto	20 ≤ 40
Extremadamente Alto	40

El índice de geoacumulación (Tabla 9) se calcula mediante la ecuación 4:

Ecuación 4

$$I_{geo} = \log_2 C_n / 1.5 B_n$$

donde:

C_n es la concentración del metal examinado

B_n es la concentración del metal encontrado en el sedimento.

Tabla 9. Nivel de geoacumulación

INTERPRETACIÓN	I _{geo}
No contaminado	≤ 0
Contaminación mínima	0 ≤ 1
Contaminación moderada	1 ≤ 2
Contaminación moderada a fuerte	3 ≤ 4
Contaminación extremadamente alta	4 ≤ 5; ≥ 5

3.6.4 El índice de riesgo ecológico potencial en sedimento (RI)

La determinación del riesgo ecológico se realizará según el índice mencionado por Hakanson,(1980).

Primero se debe determinar el factor de contaminación del elemento expresado en la siguiente ecuación.

Ecuación 5

$$C_f^i = C_k^i / C_n^i$$

Donde C_k^i Es el factor de contaminación encontrado del elemento y C_n^i es la concentración de referencia o basal de los metales.

Posteriormente se debe calcular el factor de riesgo ecológico según la ecuación 6.

Ecuación 6

$$E_r^i = T_r^i * C_f^i$$

donde E_r^i es el factor de riesgo potencial y T_r^i es el coeficiente de toxicidad del metal los cuales se registran para Cd (2), Cu (30), Cr (10), Zn (5), Ni (1). Los coeficientes se clasifican según se muestra en la Tabla 10 (Hakanson, 1980; Wang et al. 2020),

Tabla 10. Factor de riesgo ecológico (E_r^i) descrito por Hakanson (1980).

Clasificación (E_r^i)	Intervalo
Riesgo ecológico bajo	$E_r^i \leq 40$
Riesgo ecológico moderado	$40 \leq E_r^i < 80$
Riesgo ecológico considerable	$80 \leq E_r^i < 160$
Riesgo ecológico alto	$160 \leq E_r^i \leq 320$
Riesgo ecológico muy alto	$E_r^i \geq 320$

Una vez obtenido el factor de contaminación y el factor de riesgo ecológico es posible determinar el índice de riesgo potencial ecológico (RI) según la ecuación 7. La clasificación se observa en la tabla 8 (Hakanson, 1980; Chen et al., 2020).

Ecuación 7

$$RI = \sum T_r^i \frac{C_k^i}{C_n^i}$$

El valor obtenido nos mostrará el riesgo que representa cada metal en el ambiente (Tabla 11).

Tabla 11. Clasificación del índice de riesgo ecológico potencial (RI) descrito por Hakanson (1980). Los colores utilizados fueron para el riesgo bajo (verde), moderado (azul), relativamente alto (amarillo), y extremadamente alto (anaranjado).

Clasificación (RI)	Intervalo
Riesgo potencial bajo	$RI \leq 150$
Riesgo potencial moderado	$150 \leq RI \leq 300$
Riesgo potencial relativamente alto	$300 \leq RI \leq 600$
Riesgo potencial extremadamente alto	$RI > 600$

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 Área de estudio

4.1.1 Maravilla (Ma)

Se ubica en el kilómetro 13 de la ruta de los cenotes perteneciente al municipio de Puerto Morelos. Sus coordenadas corresponden a 20.868044" N y -87.024909° O. Es un cenote abierto con actividades turísticas enfocadas al buceo y la apnea. El lugar cuenta con servicio de sanitario seco y regadera al aire libre (Figura 10).



Figura 10. Vista frontal del Cenote Ma. Fotografía obtenida por Gabriela Pineda, 2022.

4.1.2 Siete Bocas (SB)

Este se encuentra ubicado a 18 km de Puerto Morelos en las coordenadas 20.876468" N y -87.043766° O (Figura 11 y 12). Es un cenote tipo cavernoso el cual cuenta con siete entradas o bocas, la principal se encuentra expuesta de forma artificial. Las actividades principales que se realizan son el buceo y el snorkel, además cuenta con zonas de hamacas, baños, regaderas

y área de campamento. El muestreo de agua se llevó a cabo en la Boca 5 y la entrada de acceso para la toma de sedimento se realizó en la boca principal.



Figura 11. Boca principal expuesta artificialmente. Fotografía obtenida por Gabriela Pineda, 2022.



Figura 12. Entrada de la boca 5 en el área de caverna. Fotografía obtenida por Gabriela Pineda, 2022.

4.1.3 Fátima (Fa)

Este cenote se encuentra 32 km de Puerto Morelos en las siguientes coordenadas 20.81409" N y -87.14113° O (Figura 13). Es un cenote abierto con poco movimiento, rodeado de alta

vegetación. Cercano a este se encuentra el cenote turístico Kin-Ha donde se desarrollan actividades de natación, buceo, snorkel y otras actividades recreativas como visitas guiadas en caballo y en cuatrimoto.



Figura 13. Vista desde la Plataforma del Cenote Fátima. Fotografía obtenida por Gabriela Pineda, 2022.

4.1.4 Azul Ha (A-Ha)

Este cenote es perteneciente al Municipio de Lázaro Cárdenas, ubicándose geográficamente en las coordenadas 20.832359" N y -87.322198° O, se encuentra a 29 km desviándose de la carretera a la ruta de los cenotes (Figura 14). Es un cenote abierto el cual su principal actividad es turística enfocada al buceo y apnea. El área cuenta con baños y regaderas además de zona de campamento.

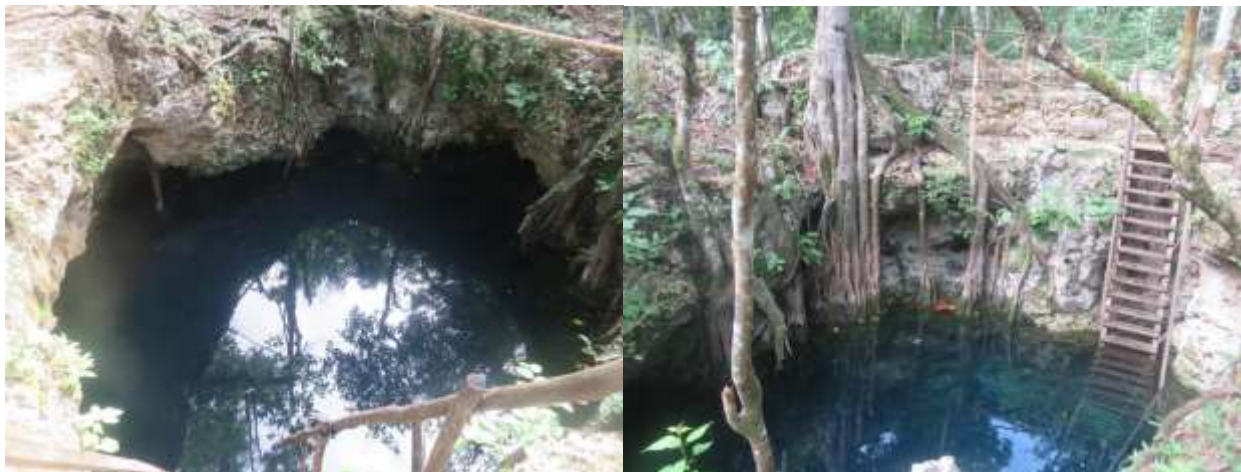


Figura 14. Vista aérea y frontal del Cenote A-Ha. Fotografía obtenida por Gabriela Pineda, 2022

4.1.5 Dzalam (Dzm)

Se ubica en el municipio de Lázaro Cárdenas en las coordenadas 20.835278" N y - 87.324056°O a 34 km desviándose de la carretera a la ruta de los cenotes (Figura 15). Es un cenote de tipo abierto el cual se encuentra a nivel de suelo, rodeado de amplia vegetación y se considera de difícil acceso.



Figura 15. Vista frontal del Dzm. Fotografía obtenida por Gabriela Pineda, 2022.

4.2 Presencia de metales en la columna de agua y sedimento.

La colecta de agua se hizo en la temporada de lluvias del 12 al 14 octubre del 2021 y en la temporada de secas del 2 al 9 de marzo del 2022, se obtuvieron un total de 60 muestras de agua y 5 de sedimento para la cuantificación de metales.

Los resultados en la columna de agua se presentan a continuación en las tablas de la 9 a la 13.

En el cenote Ma se registró la presencia de los metales B y Zn durante la temporada de secas, en el caso de B se cuantificó a 15m de profundidad mientras que Zn se mantuvo constante a lo largo de la columna de agua. En ambos casos las concentraciones cuantificadas se mantuvieron por debajo de la norma NOM-127-SSA1-2021 (Tabla 12).

Tabla 12. Metales encontrados en agua del cenote Maravillas durante las temporadas de lluvias y secas

	B (mg/L)		Zn (mg/L)	
	LL	SC	LL	SC
1m	<LMD	<LMD	<LMD	0.012
15m	<LMD	0.233	<LMD	0.006
25m	<LMD	<LMD	<LMD	0.008

Temporadas: Lluvias y secas, Metales: Boro y Zinc (mg/L) Profundidades: 1, 15 y 25m.
<LMP: Menor a los límites máximos permitidos

En el cenote SB se observó la presencia de los metales Fe y Cu a 1m de profundidad durante la temporada de secas, de mientras que Zn se cuantificó en las tres profundidades de la columna de agua. Todos los metales no sobrepasaron los LMP de la NOM-127-SSA1-2021 (Tabla 13).

Tabla 13. Metales encontrados en agua del cenote Siete bocas durante las temporadas de lluvias y secas

	Fe (mg/L)		Cu (mg/L)		Zn (mg/L)	
	LL	SC	LL	SC	LL	SC
1m	<LM	0.007	<LMD	0.015	<LMD	0.016
15m	<LM	<LM	<LMD	<LMD	<LMD	0.004
25m	<LM	0.004	<LMD	<LMD	<LMD	0.008

Temporadas: Lluvias y secas, Metales: Hierro, Cobre y Zinc en (mg/L) Profundidades: 1, 15 y 25m.

En el cenote Fa se registró la presencia de metales en ambas temporadas, durante la temporada de secas únicamente se observó Li a lo largo de la columna de agua de forma constante, los metales Cr y Cu se encontraron durante la temporada de lluvias a 15m de profundidas, por otro lado Fe y Zn, sin embargó Zn se cuantificó durante secas y lluvias siendo este último donde aumento su presencia. Todos los metales se encontraron por debajo de las normativas (Tabla 14).

Tabla 14. Metales encontrados en agua del cenote Fátima durante las temporadas de lluvias y secas

	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)		Cu (mg/L)	Li (mg/L)	Zn (mg/L)	
	LL	LL	SC	LL	SC	LL	SC
1m	<LMD	0.107	<LMD	<LMD	0.008	0.027	0.004
15m	0.010	0.393	<LMD	0.005	0.007	0.053	0.003
25m	<LMD	0.073	0.008	<LMD	0.006	0.014	<LMD

Temporadas: Lluvias y secas, Metales: Cromo, Hierro, Cobre y Zinc en (mg/L) Profundidades: 1, 15 y 25m

En el cenote A-Ha, se registró un total de seis metales en ambas temporadas siendo este el sitio de mayor presencia de metales cuantificados. Durante la temporada de secas solo se encontró a Ba a partir de los 15m mientras que Li se registro a 25m, en el caso de la temporada de lluvia Al se presentó a 1 y 25m de profundidad los cuales sobrepasaron los LMP de la norma NOM-127-SSA1-2021. Por otro lado, Fe y Zn se observaron en las dos temporadas siendo mayor su concentración durante lluvias (Tabla 15).

Tabla 15. Metales encontrados en agua del cenote Azul Ha durante las temporadas de lluvias y secas

	Al mg/L	Ba mg/L	Fe mg/L		Cu mg/L	Li mg/L	Zn mg/L	
	LL	SC	LL	SC	LL	SC	LL	SC
1m	0.487	<LMD	0.114	<LMD	0.006	<LMD	0.045	<LMD
15m	<LMD	0.025	<LMD	<LMD	<LMD	<LMD	0.008	0.003
25m	0.253	0.032	0.048	0.006	<LMD	0.006	0.028	0.014

Temporadas: Lluvias y secas, Metales: Aluminio, Bario, Hierro, Cobre, litio y Zinc en (mg/L) Profundidades: 1, 15 y 25m.

En el cenote Dzm se registró a Fe y Zn en ambas temporadas, los resultaron mostraron que la concentración de Fe fue mayor durante la temporada de lluvias mientras que durante lluvias Zn se mantuvo a lo largo de la columna de agua (Tabla 16).

Tabla 16. Metales encontrados en agua en el cenote Dzalam durante las temporadas de lluvias y secas.

	Fe (mg/L)		Zn (mg/L)	
	LL	SC	LL	SC
1m	0.064	<LMD	0.022	<LMD
15m	0.008	0.037	0.019	0.003
25m	0.006	0.036	0.111	<LMD

Temporadas: Lluvias y secas, Metales: Hierro y Zinc en (mg/L) Profundidades: 1, 15 y 25m.

Los resultados de cuantificación de metales en el sedimento se presentan en la tabla 17.

En el cenote Ma se observó la presencia de ocho metales Al >Fe>Cu>Ni>Zn>Cr>Ba>Li. Los metales Al y Fe son los que se cuantificaron con mayor concentración en todos los sedimentos de los cenotes (Tabla 17). Solo se tiene referencias de LMP de las NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Para la determinación de metales en sedimento se llevó a cabo en colaboración con los buzos del Gran Acuífero Maya (GAM) los días 16 y 19 de noviembre del 2021 en los cenotes Ma, SB, FA y Dzm, siendo el 7 de marzo del 2022 el ultimo muestreo en A-Ha, todos a una profundidad de 30m.

En el cenote SB determino la presencia de nueve metales Fe>Al>Ba>Zn>Cr>Ni>Cd>Cu>Li> (Tabla 17).

En el cenote Fa y AHa se observó la presencia de Al >Fe>Ba>Cr>Zn>Cu>Ni >Li> (Tabla 7). mientras que en el cenote Dzm se observó únicamente a siete metales Al >Fe>Ba>Zn>Cr>Li. Ninguna de las muestras tomadas sobre pasan los límites establecidos hasta el momento en la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Tabla 17. Valores máximos de metales encontrados en sedimentos a 30m de profundidad

	<i>Ma</i>	<i>SB</i>	<i>Fa</i>	<i>A-Ha</i>	<i>Dzm</i>
<i>Al</i>	5269.81	417.97	611.99	4696.18	859.62
<i>Ba</i>	14.55	121.33	27.61	97.59	10.87
<i>Cr</i>	27.47	22.41	14.59	41.81	3.46
<i>Cd</i>	<LMD	2.17	<LMD	<LMD	<LM
<i>Fe</i>	1393.45	834.87	171.99	2916.11	436.67
<i>Cu</i>	100.47	2.02	5.77	22.75	0.00
<i>Li</i>	10.10	0.97	0.94	15.05	1.69
<i>Ni</i>	50.70	4.49	2.77	8.70	<LM
<i>Zn</i>	36.42	30.61	13.88	31.29	4.35

Profundidad 30m, Metales: Aluminio, Bario, Plomo, Boro, Cromo, Cadmio, Hierro, Cobre, Litio, Niquel, Zn en (mg/kg), LMP: Límites máximos permitidos en sedimentos. Unidades en mg/kg. Normas NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, **ISQG- Interim Sediment Quality Guideli**

En el cenote Ma el Ba es el más concentrado en sedimento y Cd solo se presentó en este cenote. En SB se encontró que los metales Fe, Cr y Zn estaban en mayores porcentajes. Por otro lado, Al, Zn, Cu se presentaron en mayor concentración en SB. En los cenotes Fa y Dzm no se observaron concentraciones elevadas de los metales.

Los sedimentos en cenote SB presentan las concentraciones más altas en cuatro metales (Al>Zn>Cu>Ni) en comparación con las concentraciones cuantificadas en los otros sedimentos de los cenotes

4.3 Caracterización de perfiles de conductividad

Para la caracterización de los perfiles de conductividad se utilizaron los registros obtenidos del CTD los cuales se integraron a las imágenes ilustrativas de los cenotes que se muestran en las figura 16 a la 20. En éstas figuras se colocan además, la presencia de los metales cuantificados en la columna de agua en lluvias y secas, y los metales detectados en sedimentos. Los valores que sobrepasan los límites máximos permitidos se marcaron con una circunferencia en color rojo.

En los cenotes Ma y SB el espesor del lente de agua llego hasta los 29 y 30 metros de profundidad respectivamente, a partir de este punto se registró la presencia de la haloclina. En

el caso de Ma se llegó a una profundidad de 34 metros donde la CE aumento hasta llegar a los 8398 [$\mu\text{S}/\text{cm}$].

En el cenote Fa la CE a lo largo de la columna de agua oscilo entre los 1354.32 y 1357 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. Por otro lado, en los cenotes A-Ha y Dzm la conductividad descendió y oscilo entre los 800 y 900 [$\mu\text{S}/\text{cm}$].

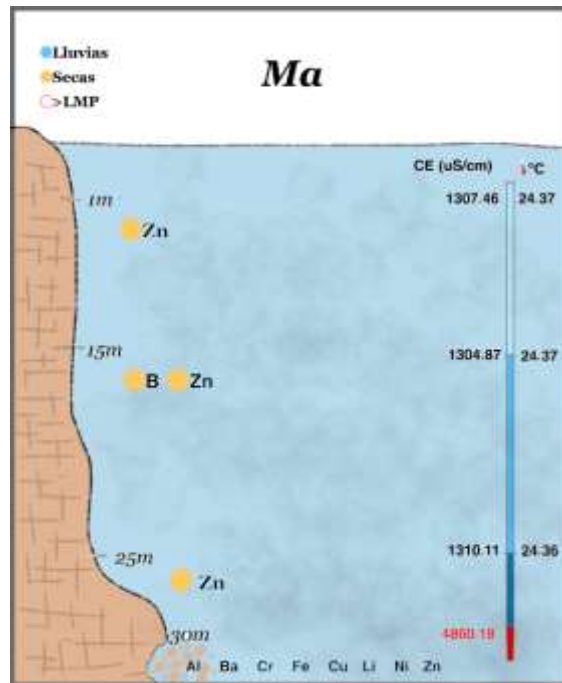


Figura 16. Representación de la columna de agua en el cenote Ma. Profundidades: 1, 15 y 25m. Metales: Agua y sedimento. Temporalidad: Lluvias y secas. CE: Conductividad eléctrica. $^{\circ}\text{C}$: Temperatura.

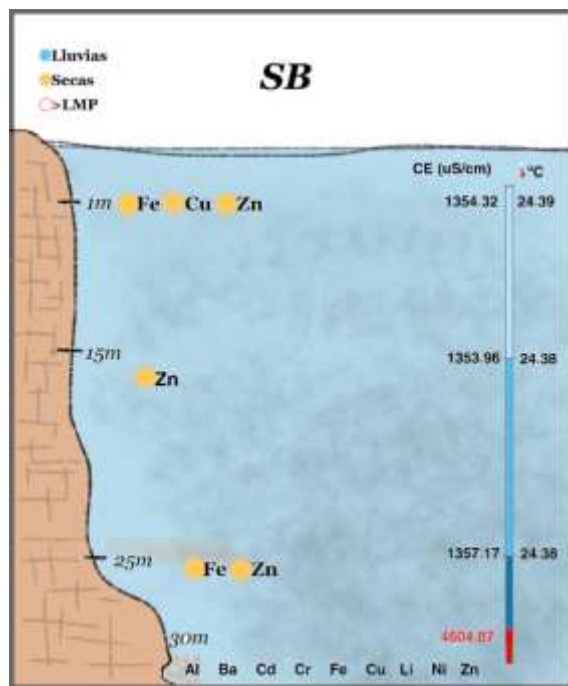


Figura 17. Representación de la columna de agua en el cenote SB. Profundidades: 1, 15 y 25m. Metales: Agua y sedimento. Temporalidad: Lluvias y secas. CE: Conductividad eléctrica. °C: Temperatura.

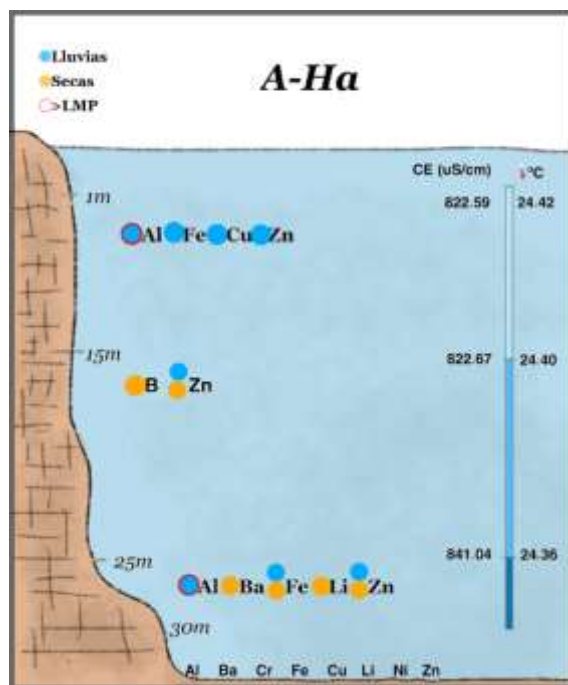


Figura 18. Representación de la columna de agua en el cenote A-Ha. Profundidades: 1, 15 y 25m. Metales: Agua y sedimento. Temporalidad: Lluvias y secas. CE: Conductividad eléctrica. °C: Temperatura.

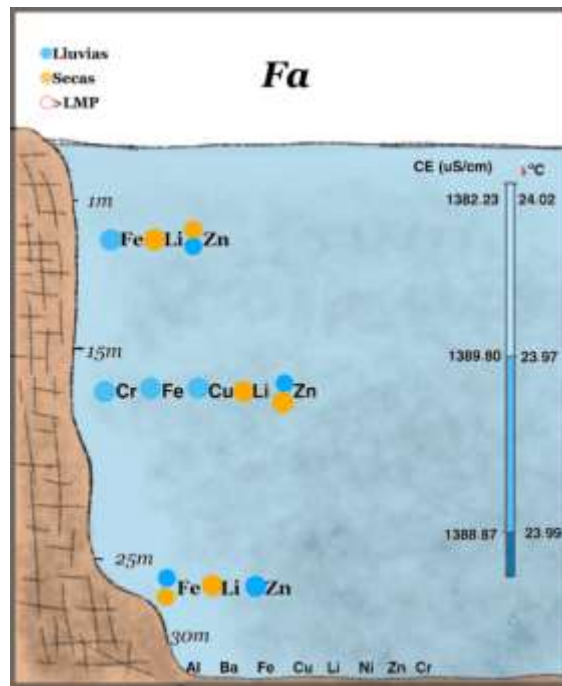


Figura 19. Representación de la columna de agua en el cenote Fa. Profundidades: 1, 15 y 25m. Metales: Agua y sedimento. Temporalidad: Lluvias y secas. CE: Conductividad eléctrica. °C: Temperatura.

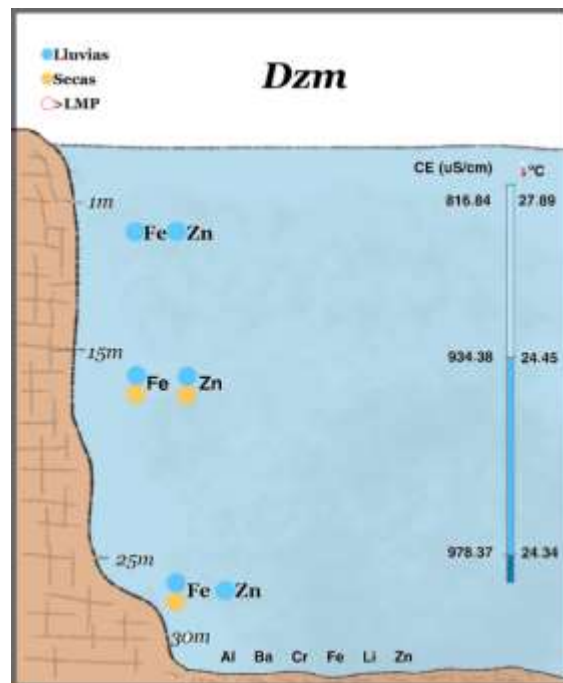


Figura 20. Representación de la columna de agua en el cenote Dzm. Profundidades: 1, 15 y 25m. Metales: Agua y sedimento. Temporalidad: Lluvias y secas. CE: Conductividad eléctrica. °C: Temperatura.

4.4 Hidrogeoquímica

Los parámetros físicoquímicos tomados *in situ* en las zonas de estudio mostraron los siguientes datos (Tabla 18).

La temperatura en los cenotes Ma, SB y Fa se observa una disminución conforme aumenta la profundidad. En A-Ha y Dzm la temperatura aumento a los 25m.

El pH en todos los sitios se mantiene entre la neutralidad oscilando entre los 6.7 y 8. Por otro lado, el potencial de oxidación fue mayor en todas las muestras durante la temporada de secas.

Los valores obtenidos de conductividad eléctrica a 1m de profundidad muestran valores característicos de agua dulce. Por otro lado se puede observar una disminución de la conductividad electrica en los cenotes A-Ha y Dzm los cuales se encuentran más alejados de la playa.

En el caso de los sólidos disueltos totales muestran una relación directa en proporción a la CE.

Tabla 18. Parámetros físicoquímicos en la zona de estudio durante dos temporadas.

	Temp.[°C]	pH	ORP[mV]	EC[μS/cm]	TDS [ppt]
Maravillas	25.2 ± 1.89	6.9 - 7.2	69 -194.2	1238-1293	0.6 ± 0.02
Siete bocas	25.6 ± 0.89	6.8 - 7.2	83.3-147.9	1319-1369	0.6 ± 0.01
Fátima	25.1 ± 0.72	6.9 - 7.6	86.6-199.1	957-1631	0.6 ± 0.10
Azul-Ha	27.7 ± 0.39	6.7 - 6.9	90.2-168.9	496-850	0.4 ± 0.6
Dzalam	27.3 ± 2.58	6.8 – 8	45.9-143.5	521-971	0.4 ± 0.8

Cenotes: Ma, SB, Fa, AHa y Dzm.. Temperatura (°C), CE: Conductividad eléctrica, SDT: Sólidos disueltos totales,ORP: Potencial de óxido-reducción. Valores que representan el promedio ± desviación estándar y máximos y mínimos (-) de ambas temporadas.

Los resultados promedios obtenidos para el estudio de sílice no se observan variaciones entre las temporadas y profundidades sin embargo durante la temporada de secas se observó un aumento de este (Tabla 19).

Tabla 19. Sílice encontrados en la zona de estudio durante dos temporadas.

Sitio	Sílice (SiO ₂)
Maravillas	1.75 ± 0.46
Siete bocas	2.09 ± 0.37
Fátima	2.09 ± 0.62
Azul-Ha	2.66 ± 0.82
Dzalam	2.63 ± 0.96

Cenotes: Ma, SB, Fa, A-Ha y Dzm. Valores que representan el promedio ± desviación estándar de ambas temporadas a tres profundidades (1, 15 y 25m).

Los resultados obtenidos de los elementos mayores en ambas temporadas se pueden observar en el Anexo 2 y 3 con el cual se logró obtener el tipo de agua presente en cada sitio de estudio mediante los diagramas de Piper que se muestran en la Figura 21 y 22. En los cenotes Ma, Fa y SB se observa un tipo de agua sulfatada cálcica, mientras que los cenotes A-Ha y Dzm presentan un tipo de agua bicarbonatada cálcica. No hubo cambios en el tipo de agua durante las temporadas analizadas.

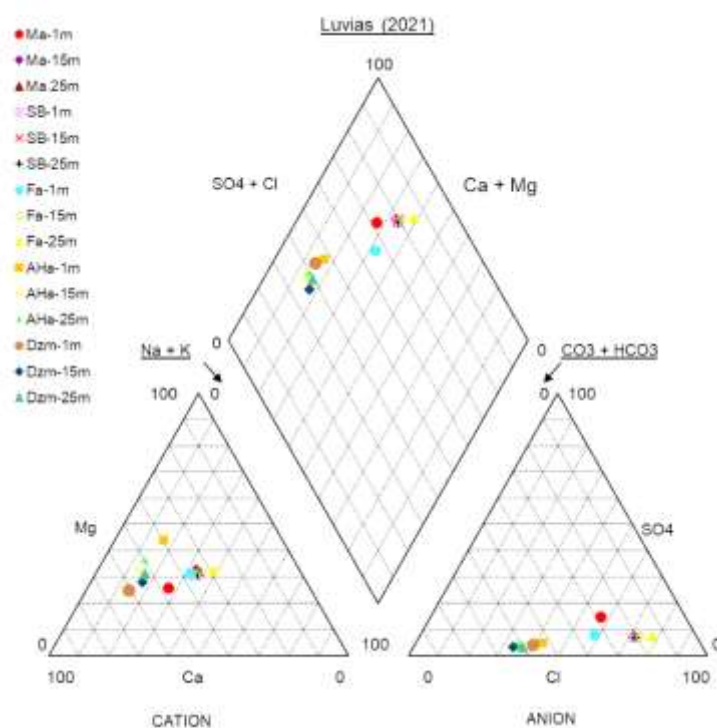


Figura 21. Diagrama de Piper de la temporada de lluvias. EL tipo de agua en los cenotes Ma, Fa, SB es sulfatada cálcica mientras que en A-Ha y Dzm es del tipo bicarbonatada cálcica.

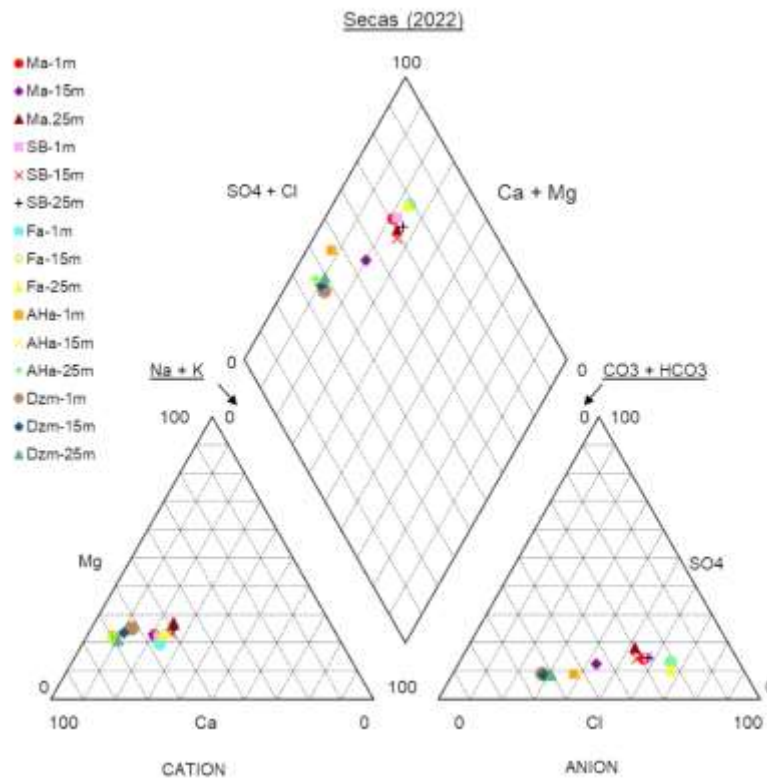


Figura 22. Diagrama de Piper de la temporada de secas. EL tipo de agua en los cenotes Ma, Fa, SB es sulfatada cálcica mientras que en A-Ha y Dzm es del tipo bicarbonatada cálcica.

4.5 Tomografías de resistividad eléctrica

Como parte de este estudio, se realizaron tomografías de resistividad eléctrica en los cenotes Ma, SB y Dzm. Previo al levantamiento de los datos, en cada sitio se realizó una prueba de resistencia de contacto para verificar que los valores de resistividad. Para poder realizar la lectura estos valores deben encontrarse por debajo de los 5000 Ω . Además, se verifica que cada uno de los electrodos tengan una instalación correcta por medio de una prueba de voltaje. Cada uno de estos valores de referencia se puede encontrar en el manual del equipo.

4.5.1 Tomografía del cenote Maravillas

Debido a las condiciones del clima únicamente se tomó el perfil mediante el arreglo Dipolo-Dipolo con una duración de 96 minutos. El transecto se generó según las coordenadas de inicio 20.86860 y 87.02460 (Figura 23).

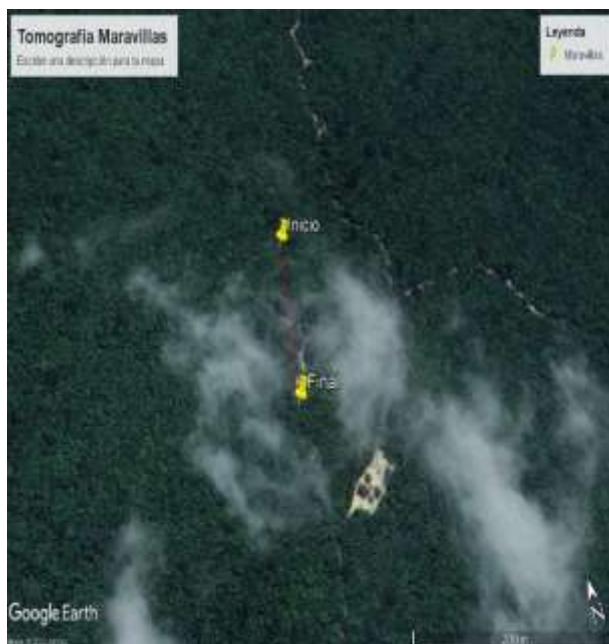


Figura 23. Mapa del transecto en el cenote Maravillas. Fuente: Elaborado por Gabriela Pineda, 2022.

La inversión de los datos en el cenote Ma se obtuvo con 4 iteraciones, con una media cuadrática de 5.56 y un error con la norma L2 de 0.89 (Figura 24).

La tomografía alcanzó a mapear el terreno hasta una profundidad de 33.5m, se puede observar que las regiones geoelectricas con mayor resistividad se ubican aproximadamente entre los primeros 5 a 8 metros, posteriormente nos encontramos con áreas con alta saturación de agua, las cuales se extienden hasta el fondo de la zona de estudio.

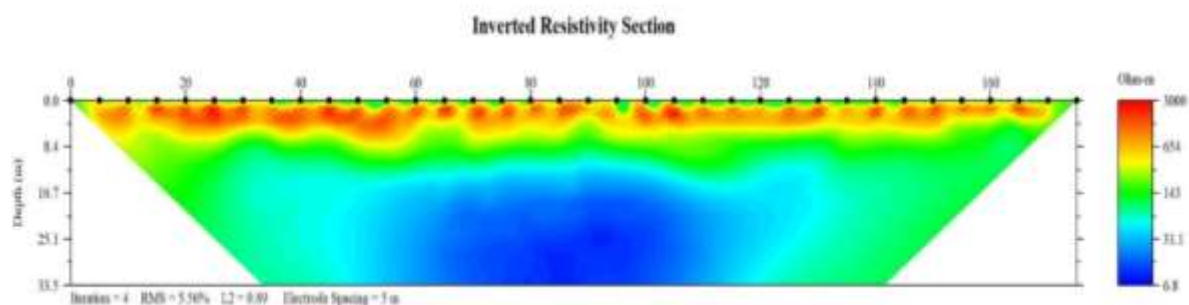


Figura 24. Tomografía de resistividad eléctrica del cenote Ma.

4.5.2 Tomografía del cenote Siete Bocas

Se realizó el perfil mediante el arreglo Dipolo- Dipolo y Wenner con una duraciones de 96 y 120 minutos respectivamente. El transecto se ubicó geográficamente 20.87670" N 87.04232 OE y 20.87683" N 87.04388 OE (Figura 25).



Figura 25. Mapa del transecto en el cenote SB. Fuente: Elaborado por Gabriela Pineda, 2022.

En el cenote SB la interpretación de las tomografías se llevó a cabo a través de una inversión de datos, cuyo resultado arrojó un RMS de 5.77 y un error en la norma L2 de 0.90, con un total de tres iteraciones.

Durante los primeros cinco metros se observa una región con alta resistividad (en tonalidades naranja). En el centro, a partir de los 10 metros, se observa una región cuya resistividad es relativamente baja y puede asociarse con una zona de mayor permeabilidad y saturación de agua dulce (en tonalidades azules), sin embargo ésta se encuentra confinada y se extiende de forma diagonal y podría deberse a la presencia de zonas de porosidad secundaria, inducida por el proceso de karstificación, y zonas donde la competencia de la roca caliza se preserva (Figura 26).

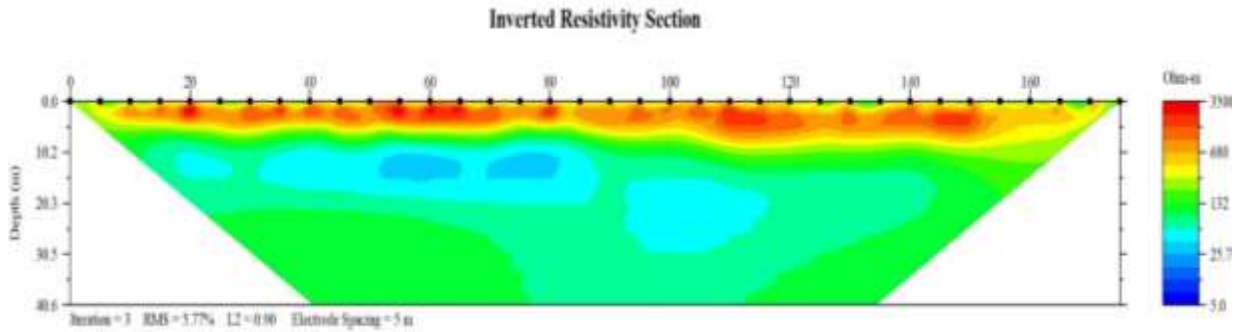


Figura 26. Tomografía de resistividad eléctrica del cenote SB

4.5.3 Tomografía del cenote Dzalam

Se realizó el perfil mediante el arreglo Dipolo- Dipolo y Wenner con una duración de 97 y 122 minutos respectivamente. El transecto se ubicó geográficamente en las coordenadas 20.80391" N 87.33717°OE y 20.80536" N 87.33730° OE (Figura 27).



Figura 27. Mapa del transecto en el cenote Dzm. Fuente: Elaborado por Gabriela Pineda, 2022.

El proceso de inversión de los datos de resistividad eléctrica y la construcción de la imagen con tomografía eléctrica en el cenote Dzm se realizó empleando tres iteraciones, con un error cuadrático medio (RMS) empleando la norma L2 de 0.85. Nuevamente durante los primeros

metros del perfil se observa una región de mayor resistividad (en tonalidades naranja), debido a la competencia de la roca caliza en la superficie del terreno. En este sitio se observan dos pequeñas regiones (en tonalidades azúles) con baja resistividad y, por lo tanto, mayor saturación de agua. Sin embargo, es una zona más resistiva y densa (menor porosidad secundaria) en comparación a Ma y SB, debido a que no se observa la presencia significativa del acuífero a esta profundidad (Figura 28).

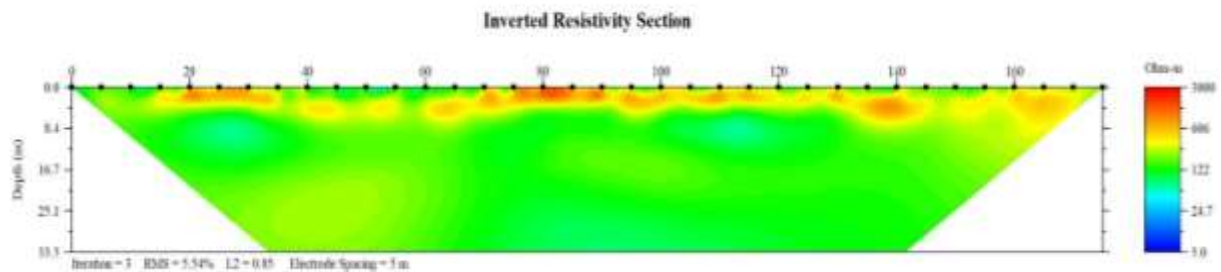


Figura 28. Tomografía de resistividad eléctrica del cenote Dzm

4.6 Flujos subterráneos

En la figura 29 se representan los flujos subterráneos a nivel regional para el área de estudio, a través de un mapa de isocurvas que abarcan un área de 2.5 km. Se observan diferentes curvas de nivel, la profundidad del acuífero y la dirección de los flujos varían en la región.

Existe una conexión muy marcada entre los cenotes Ma y SB. Los perfiles eléctricos sugieren que se podrían ver altamente afectados debido a que las corrientes que se mueven desde la mancha urbana de Puerto Morelos. Además, la profundidad del acuífero en esta área es menor, lo cual lo hace más vulnerable.

El cenote Fátima se encuentra sobre una región de transición a la zona de recarga del acuífero a una profundidad de 3.5m y la dirección de los flujos del agua es Oeste-Este.

El cenote Fátima se encuentra sobre una región de transición a la zona de recarga de acuífero a una profundidad de 3.5 y la dirección de los flujos va de Oeste-Este.

Por último los cenotes AHa y Dzm también se encuentran sobre la región de recarga del acuífero, los flujos en esta área se mueven de Este a Oeste siendo contrario a lo observado en los primeros tres cenotes.

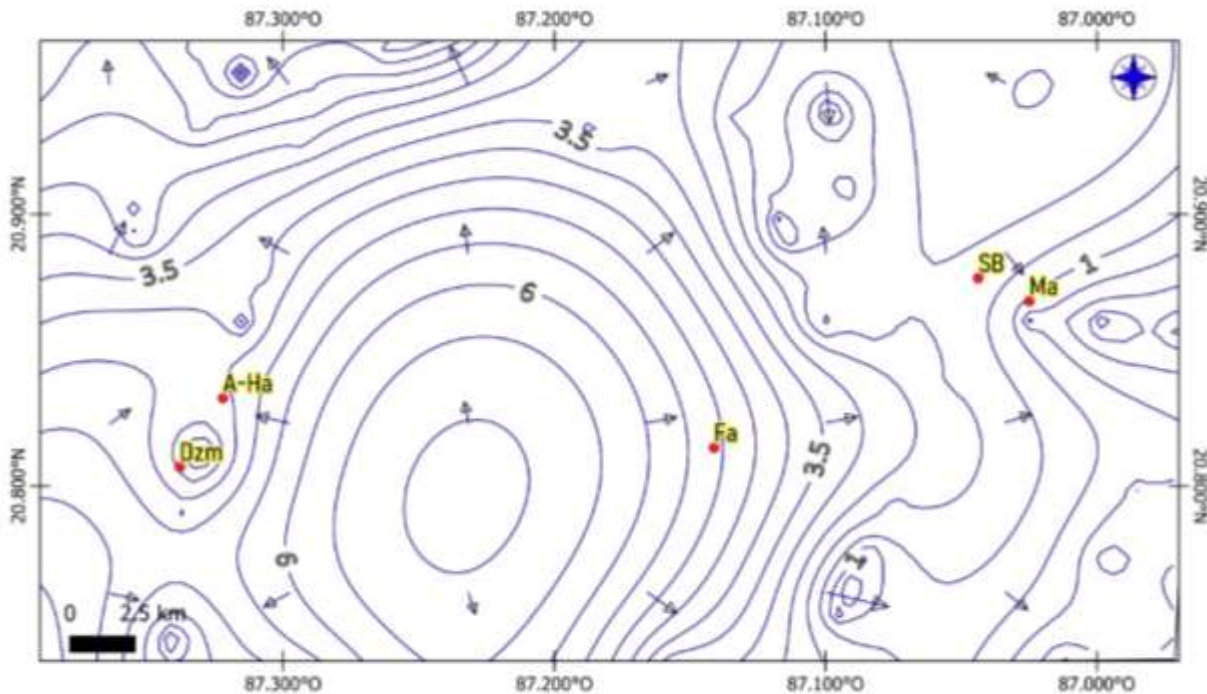


Figura 29. Mapa de isolíneas a nivel regional del área de estudio.

4.7 Riesgo ecológico

La integración de los riesgos ecológicos se representan de la figura 32 a la 36.

4.7.1 Agua

Para realizar la evaluación de riesgo ecológico en agua se utilizaron las normas nacionales NOM-127-SSA1 y NOM-001-SEMARNAT así como los estándares internacionales establecidos por la ONU. De los cenotes analizados únicamente AHa presentó valores superiores a los establecidos en las normativas para el metal Al durante la temporada de secas a 1 y 25 metros de profundidad (Anexo 4).

4.7.2. Biota

Se colecto, cultivo e se hizo una identificaicon del organismo de prueba *Cypridopsis vidua* la cual se uso como especie indicadora. En el ostrácodo se realizarón pruebas de toxicidad para la determinación del CL₅₀ en los metales Cr y Zinc (Óxido de Zinc en presentación de nano partículas) además la información se complemento gracias a información ya existente en bibliografía, para los metales Al, Ba, B, Fe, Cu y Li el cálculo basado en la revisión bibliográfica donde se incluyen los rotíferos y cladóceros.

Una vez obtenido el CL₅₀ se calcularon concentraciones donde no se observan efectos adversos (PNEC, por sus siglas en inglés Predictive No Effects Concentrations). Que se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Valores PNECs obtenidos a partir de valores CL₅₀ para cada metal encontrado en agua. Los grupos de zooplancton considerados fueron ostrácodos, rotíferos y cladóceros.

Metal	PNEC (mg/L)	FR	Grupos Zooplancton	n, CL50s
Al	0.0001483	1000	1	4
Cr	0.0017749	10	3	14
Cu	0.00034782	10	3	21
Fe	0.00037333	1000	1	3
Zn	0.00911962	100	2	18
B	0.0324525	1000	1	4
Ba	0.5	100	2	4

Para la evaluación del umbral del riesgo ambiental propuesta por Karlsson (2008) se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las tablas de la 21 a la 25..

En el cenote Ma el umbral de riesgo ambiental va del moderado para Zn y alto para B.

Tabla 21. Umbral de riesgo ambiental para el cenote Ma.

	Boro	Zinc
Profundidad	Secas	Secas
1m		1.33
15m	7.19	0.66
25m		0.92

Umbral de riesgo ambiental (Karlsson, 2008). Insignificante < 0.1; Bajo 0.1-1; moderado 1-10; y alto >10.

El cenote SB presenta un RA de alto para los metales Fe, Cu, Zn sin embargo este último presento durante la temporada de lluvias a una profundidad de 15 un índice moderado.

Tabla 22. Umbral de riesgo ambiental para el cenote SB.

	Hierro	Cobre	Zinc
Profundidad	Secas	Secas	Secas
1m	18.94	43.70	17.87
15m			4.87
25m	10.39		8.66

Umbral de riesgo ambiental (Karlsson, 2008). Insignificante < 0.1; Bajo 0.1-1; moderado 1-10; y alto >10.

En el cenote Fátima la interpretación del riesgo ambiental se presenta alto en Cu y Fe durante las temporada de lluvias y secas, sin embargo para el metal Cr y Zn el riesgo es moderado.

Tabla 23. Umbral de riesgo ambiental para el cenote Fátima.

	Cromo	Hierro		Cobre	Zinc	
Profundidad	Lluvias	Lluvias	Secas	Lluvias	Lluvias	Secas
1m		285.30			29.89	4.22
15m	5.85	1052.51		15.35	57.89	2.80
25m		196.36	21.22		15.27	

Umbral de riesgo ambiental (Karlsson, 2008). Insignificante < 0.1; Bajo 0.1-1; moderado 1-10; y alto >10.

El umbral de riesgo en el cenote AHa fue insignificante para Ba, mientras Cu se mantiene en riesgo bajo y Zn en bajo a moderado, por otro lado, los metales Al y Fe presentan un riesgo alto.

Tabla 24. Umbral de riesgo ambiental para el cenote A-Ha.

	Aluminio	Bario	Hierro		Cu		Zn
	Lluvia	Secas	Lluvia	Secas	Lluvia	Lluvia	Secas

1m	3284.02		304.98		0.16	4.89
15m		0.05				0.83 0.324
25m	1708.81	0.063	129.57	16.53		3.02 1.568

Umbral de riesgo ambiental (Karlsson, 2008). Insignificante < 0.1; Bajo 0.1-1; moderado 1-10; y alto >10.

Por último, el cenote Dzm presenta valores moderados para Zn en albas temporadas y altos para la temporada de secas, en Fe se determinó que existe un umbral de riesgo alto.

Tabla 25. Umbral de riesgo ambiental para el cenote Dzm.

Profundidad	Hierro		Zinc	
	Lluvia	Secas	Lluvia	Secas
1m	171.43		SC	
15m	20.54	99.11	24.34	3.04
25m	16.36	96.43	5.85	16.36

Umbral de riesgo ambiental (Karlsson, 2008). Insignificante < 0.1; Bajo 0.1-1; moderado 1-10; y alto >10.

4.7.3 Sedimentos

4.7.1.1 Factor de enriquecimiento

En la tabla 26 se muestra el factor de enriquecimiento de metales en sedimento de la ruta de cenotes de Puerto Morelos. Se reportan en total nueve metales, y siete metales con base en las categorías de enriquecimiento están dentro de la categoría de alto enriquecimiento. El elemento Ba, sigue este patrón de enriquecimiento en los cenotes del area de estudio Fa>SB>AHA>Dzm; mientras que el Cr sigue este patrón de enriquecimiento Fa>SB>Ma; Cu sigue este patrón Ma>Fa>>AHA; y en Zn se observa que Fa>SB; mientras que en los metales Cd se reporta alto solo en SB, y Ni y Li en Ma.

Tabla 26. Factor de enriquecimiento. Mínimo (<2), moderado (2≤5), significativamente alto (5≤20), muy alto (20≤40), extremadamente alto (≤40)

F. E. (mg/kg)	Ma	SB	Fa	AHA	Dzm
Al	3.42	0.45	3.22	1.46	1.78
Ba	3.97	55.22	61.01	12.72	9.46
Cr	6.81	9.27	29.31	4.95	2.74
Cd	-	282.11	-	-	-
Fe	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	68.49	2.30	31.87	7.41	-
Li	5.51	0.89	4.16	3.92	2.94
Ni	6.91	1.02	3.07	0.57	0.00
Zn	4.97	6.97	15.33	2.04	1.89

4.7.3.2 El índice de riesgo ecológico potencial en sedimento (RI)

Los valores obtenidos para el calculo del potencial riesgo ecológico (RI) como el factor de contaminación (C_f^i), y el coeficiente de toxicidad (E_{r^i}) se encuentran en el Anexo 5 . La clasificación del índice de riesgo ecológico potencial en sedimento muestra que el cenote Ma tiene un índice extremadamente alto, lo que significa un riesgo potencial alto de toxicidad en los sedimentos por los metales que se encuentran allí, seguido está cenote AHA y SB que presentan un riesgo potencial moderado, siendo el cenote Fa y Dzm los únicos con un riesgo potencial bajo (tabla 27).

Tabla 27. Clasificación del índice de riesgo potencial (RI). De los resultados obtenidos para metales pesados. Los colores utilizados fueron para el riesgo bajo (verde), moderado (azul), relativamente alto (amarillo), y extramadamente alto (naranja).

Sitio de estudio	RI
Ma	794.16
SB	167.79
Fa	60.52
AHA	222.94
Dzm	4.91

Riesgo potencial: Bajo , moderado,relativamente alto, extremadamente alto

A continuación se presenta una integración de todos los riesgos calculados en el presente estudio, como una diagrama conceptual para cada cenote en la figuras 33 a la 37. En el diagrama en el lado derecho esta la interpretación: por ejemplo, el riesgo ambiental RA en rectángulos de colores se obtuvo para la matriz agua, mientras que el índice de riesgo ecológico RI en cuadrados de colores se calculo para el sedimento. El factor de enriquecimiento se representa en triángulos de colores, y el índice de geoacumulación en círculos de colores. La escala de colores se especifica en el diagrama.

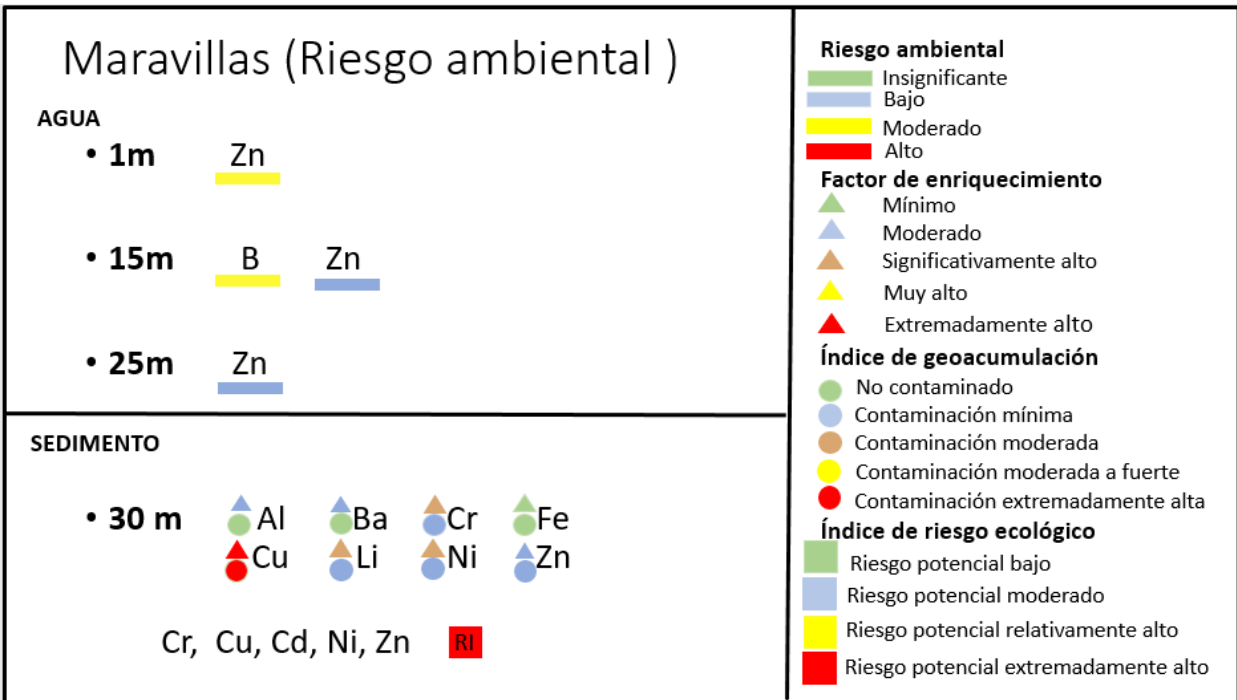


Figura 30. Representación de la columna de agua en el cenote Ma. Profundidades: 1, 15 y 25m en agua y sedimento. Integración de Riesgos.

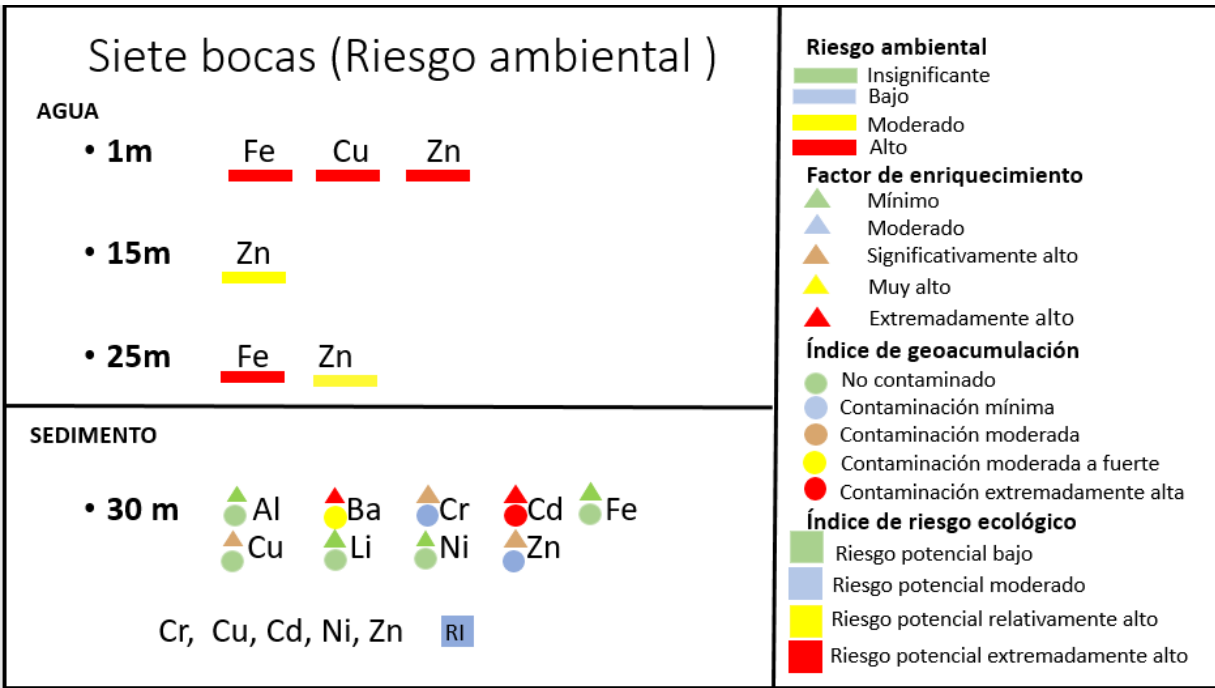


Figura 31. Representación de la columna de agua en el cenote Sb. Profundidades: 1, 15 y 25m en agua y sedimento. Integración de Riesgos.

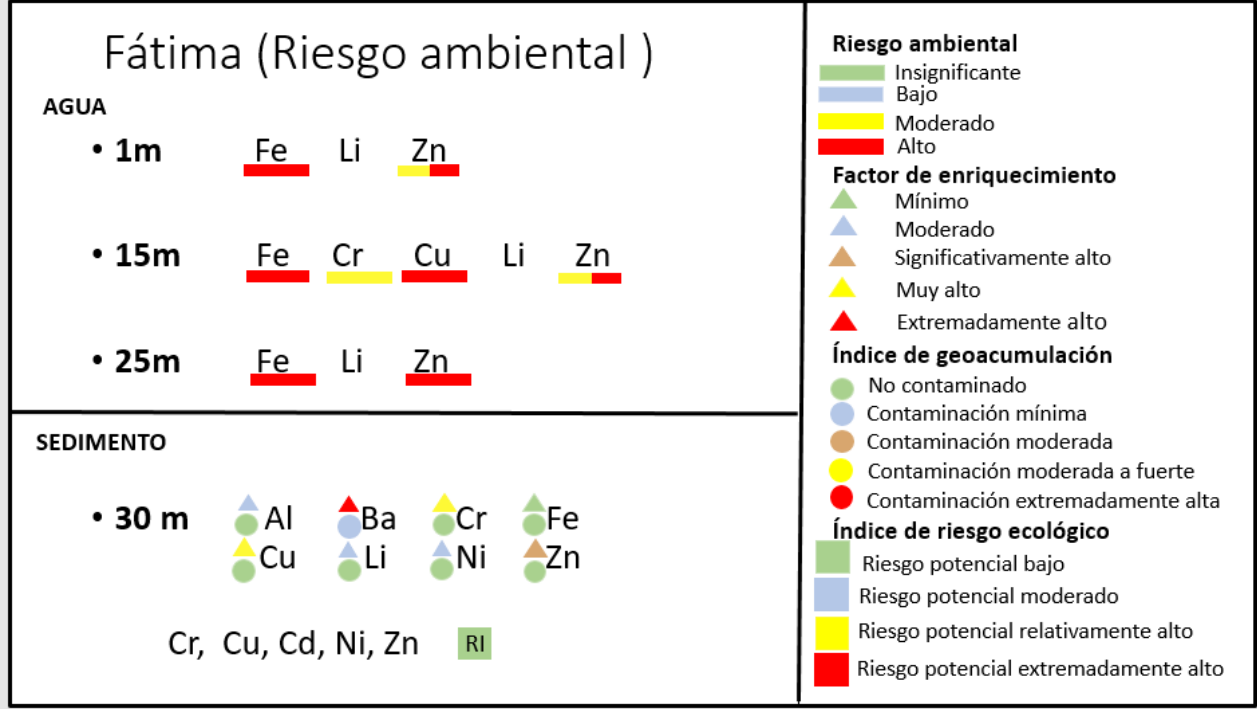


Figura 32. Representación de la columna de agua en el cenote Fa. Profundidades: 1, 15 y 25m en agua y sedimento. Integración de Riesgos.

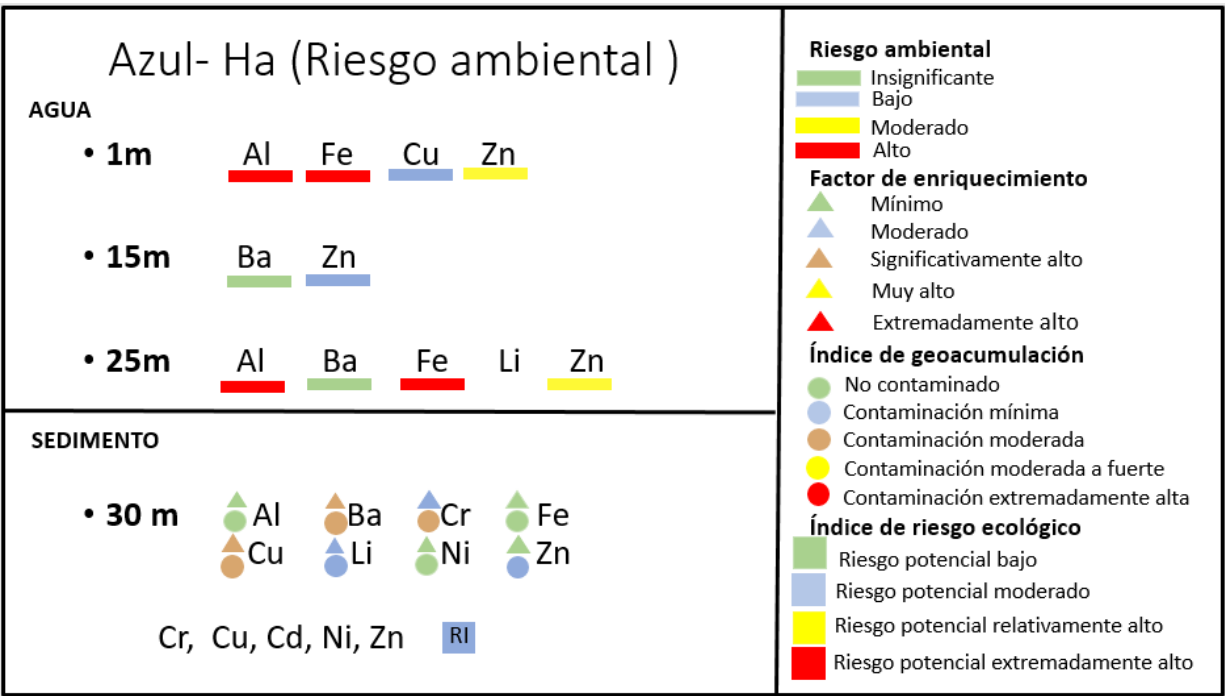


Figura 33. Representación de la columna de agua en el cenote AHa. Profundidades: 1, 15 y 25m en agua y sedimento. Integración de Riesgos.

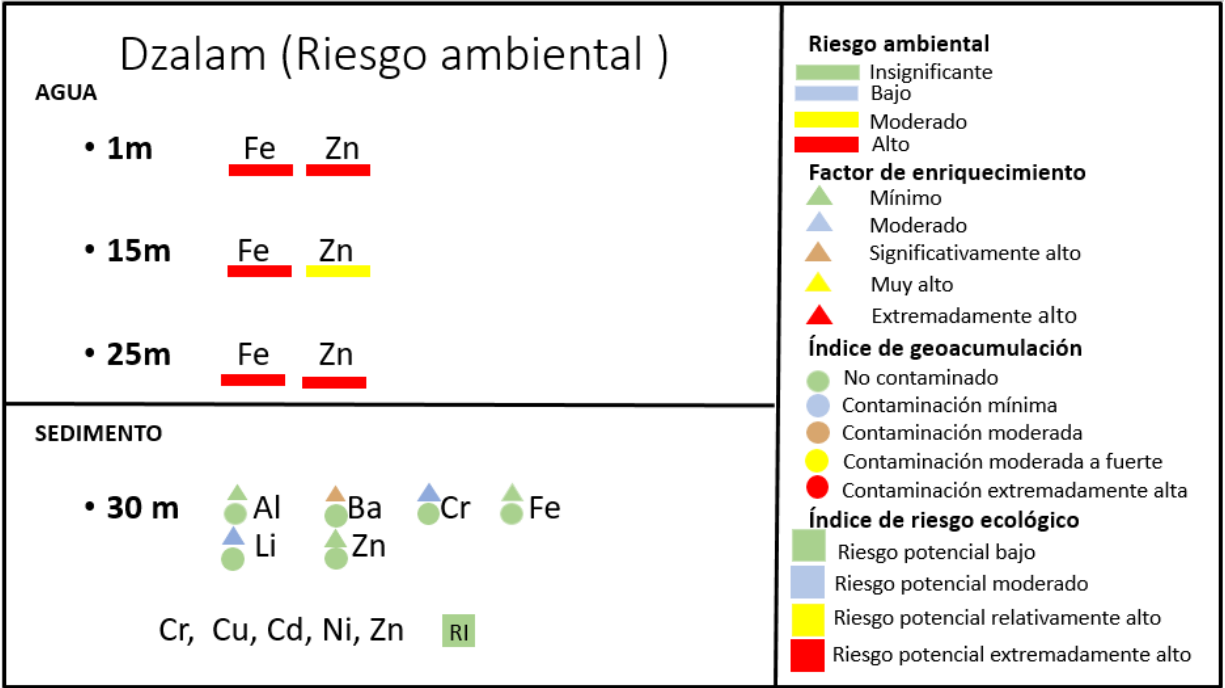


Figura 34. Representación de la columna de agua en el cenote Ma. Profundidades: 1, 15 y 25m en agua y sedimento. Integración de Riesgos.

CAPITULO 5 DISCUSIÓN

5.1 Sección Hidrogeoquímica

Con el análisis de cationes y aniones de la zona de estudio se lograron identificar dos tipos de agua, el primero en tres sitios cercanos a la costa (Ma, SB y FA), agua sulfatada cálcica mientras que en dos sitios alejados de la costa (A-Ha y Dzm) es del tipo bicarbonatada cálcica, justo en los dos sitios alejados de la costa, el mapa de flujos subterráneos indica una zona de recarga de agua dulce, además, los flujos subterráneos también indican que del sitio FA, el agua se mueve hacia SB y de este hacia Ma en dirección al mar, caso contrario en los sitios A-Ha y Dzm donde convergen y forman la zona de recarga. Desde el punto de vista hidrogeológico, las dos zonas tienen comportamiento diferentes. La temperatura en la columna de agua tomada por el CDT descendió conforme este era más profundo sin embargo la temperatura de las muestras obtenidas con el multiparamétrico presentó variaciones lo cual puede deberse al tiempo de exposición entre la toma de muestra y el análisis de la misma debido a que en algunos cenotes como AHa y Dzm se encontraban más alejados de la zona donde se realizó la medición. En ambos casos la temperatura es similar a lo reportado por Cejudo *et al.* (2021), además se encuentra dentro de los parámetros establecidos el acuerdo CE-CCA-001/89.

La conductividad eléctrica, así como los sólidos disueltos en el medio fue mayor en los cenotes Ma y Fa siendo estos donde se presentó la haloclina y son los más cercanos a la costa de tal forma que el cenote más alejado Dzm presentó los valores más bajos. Además, también se presentó un aumento durante la temporada de lluvias, según lo mencionan Gutiérrez & Cervantes (2008) la conductividad puede tener variaciones temporales debido al aporte de iones por acarreo superficial y subterráneo. Sin embargo es difícil determinar en específico de donde están siendo arrastradas ya que esto dependerá de múltiples factores así que cuando entran al acuífero los contaminantes fluyen a través de los ríos subterráneos, según la recopilación hecha por Salas *et al.* (2001) .

5.2 Sección Tomografías de resistividad eléctrica y dirección de los flujos subterráneos

La distribución en la selección de cenotes en el área de estudio es de particular interés debido a que abarca una dirección de Oeste a Este con dirección hacia el mar. Esto se diseñó con el

fin de identificar hacia donde se dirigen los flujos en la región, según lo señalan algunos autores como Ordoñez (2012), debido a que el agua subterránea se mueve en la dirección del gradiente hidráulico hacia niveles más bajos y en su mayoría regresa al mar. En las regiones con suelos kársticos, debido a la porosidad secundaria y la disolución de la roca caliza, el agua se infiltra y forma ríos subterráneos. Como se observa en el mapa de isoclinas, estos flujos a nivel regional presentan diferentes movimientos, en gran medida estos tienden a concentrarse en zonas de recarga del acuífero. Un ejemplo claro es la zona donde se encuentran los cenotes AHa, Fá y Dzm. En este último se logró realizar la tomografía de resistividad eléctrica y en él se observa que las rocas presentan una mayor resistividad lo cual nos puede dar un indicio de que el nivel freático se encuentra a una mayor profundidad que en los cenotes que se encuentran más cercanos a la costa, como lo son el cenote Ma y SB. Por otro lado, el movimiento del flujo de agua de AHa va en dirección a Dzm, lo cual podría ser derivado de la presencia de fracturas y fallas en la región.

Los flujos subterráneos en el cenote SB se mueven directamente hacia el cenote Ma, lo cual indica que ambos tienen una conexión directa. Además, su cercanía con la zona urbanizada de Puerto Morelos podría promover que diversos contaminantes lleguen a esta región fácilmente.

5.3 Integración del riesgo ecológico

5.3.1 Metales en la columna de agua

En los resultados obtenidos de metales pesados en la columna de agua dulce se observa una mayor concentración y presencia durante la temporada de secas, sin embargo los cenotes Sb y Ma únicamente presentaron presencia de metales en esta temporada a diferencia de los demás, esto puede estar derivado a que son los más cercanos a la zona urbana, según lo describe Gonzalez *et al.* (2018) en Puerto Morelos las actividades turísticas y de pesca así como la disposición inadecuada de aguas negras y los tiraderos clandestinos propician la contaminación, otro de los factores que propician la presencia y mayor concentración esto debido a la ausencia de agua meteorica. Salomons y Förstner (1984) mencionan que los metales presentes en el medio interactúan con los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren en el ecosistema debido a que estos tienden a formar fácilmente enlaces debido a su estado iónico, estos pueden precipitar de forma directa por cambios en el pH, el potencial de oxidación y las concentraciones de otras sustancias disueltas como sólidos, mezclas de otras agua y pérdida de gases lo cual concuerda con lo mencionado por Reyes *et al.* (2016)

quien relaciona a la materia orgánica e inorgánica particulada como un factor importante para el proceso de sedimentación, incluso de la influencia en la adsorción, transporte y tiempo de residencia de estos elementos en las matrices. Otro de los factores que deben tomarse en cuenta es la mezcla del agua continental con el agua de mar, donde los cenotes Sb y Ma se observó la haloclina a 25m de profundidad y según el diagrama de Piper el tipo de agua sulfatada cálcica es producto de la mezcla por intrusión salina, por lo cual las reacciones químicas aumentan debido a la cantidad de sales presentes en el medio. Por ejemplo acorde al estudio realizado por Wen *et al.*, (2019), la salinización del acuífero influye en la presencia y la concentración de metales que se detectan.

Los cenotes Fa, A-Ha y Dzm los cuales se adentran en la zona continental y conforme se alejan de la costa se cuantificaron metales en ambas temporadas, en el cenote A-Ha el metal Al presentó valores mayores a los LMP de la NOM-127-SSA1-2021 durante la temporada de lluvia, esto puede deberse al arrastre e infiltración de los metales durante la temporada de lluvia y la recarga del acuífero (Bautista, 2011); lo cual concuerda con los datos reportados por Tun-Canto *et al.*, (2017) en Chetumal donde la presencia de metales pesados fue mayor durante la temporada de lluvias que podrían provenir de las zonas urbanas y actividades turísticas que pueden propiciar la contaminación son las turísticas y de pesca así como la disposición inadecuada de aguas negras y los tiraderos clandestinos (Gonzalez *et al.*, 2018).

El hecho de que haya presencia de metales pesados en el ambiente se puede asociar a potenciales riesgos, debido a que están clasificados como contaminantes prioritarios. La fuente de contaminación es difícil determinar pero se asocia a actividades antropogénicas en la región, las cuales se infiltran al subsuelo hasta el medio acuoso, su distribución puede encontrarse a lo largo de toda la columna de agua y disponible para organismos residentes (Salas *et al.*, 2001).

Por otro lado, uno de los factores importantes que se deben tomar en cuenta es la normatividad vigente ya que algunos elementos que podrían ser peligrosos a la salud no se encuentran considerados en esta legislación por ejemplo boro y litio, este último es muy utilizado para la elaboración de pilas y diversos productos electrónicos los cuales pueden clasificarse como desechos peligrosos según lo señala la LGEEPPA y deben tener un manejo especial al ser desechadas debido a las sales que forman y lo corrosivo que pueden ser según lo mencionado en la NOM-053-SEMARNAT-1993 que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligro por su toxicidad en el ambiente, aunque no existe un apartado específico para el Li se sabe que los

lixiviados provenientes de las pilas al contacto con el aire y agua pueden ser altamente tóxicos para el ambiente (Medina, 2004)

Las actualizaciones que se realizaron en la normativa INOM-127-SSA1-2021 en comparación a la de 1994 aumenta el límite permitido del elemento B pasando de 0.70mg/L a 1.30mg/L e incluso algunos desaparecen como el Zn, siendo este metal de gran interés debido a que fue detectado en todos nuestros sitios de estudios en ambas temporadas a diversas profundidades lo cual nos indica que está en movimiento y hay una fuente de contaminación constante.

5.3.2 Metales en sedimento

En nuestros sitios de estudio se determinó un total de nueve metales en sedimento Según lo señala Medina et al. (2004) la mayoría de los metales se pueden encontrar en la naturaleza y son importantes para el sistema metabólico de los organismos, además su presencia está asociada a los cambios que se den en el ecosistema y debido a su naturaleza química rápidamente se relaciona con otros elementos en el medio. En el caso de Al, Lizano et al. (2015) menciona que su presencia en sedimentos se debe a que es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre proveniente de procesos biológicos y Fe está asociado a las actividades antropogénicas que se realizan en la región (Alcocer et al., 1999; Medina et al., 2004).

A pesar de no existir una legislación en específico para la determinación de contaminantes en sedimentos NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 así como Administración Nacional Oceánica y Atmosférica Departamento de Comercio de EE. UU. (NOAA), **ISQG-** Interim sediment quality guidelines for the protection of aquatic life y **pel-** niveles de efecto probable (Peso seco). Nos faltan algunos parámetros sin embargo no se encontraron límites para Al, Ba, Fe y Li por otro lado la presencia de los metales como Cr, Cd, Cu, Ni y Zn son de particular interés ya que no se presentan de forma natural en el ambiente debido a que la península de Yucatán está formada por la acumulación de materiales calcáreos de origen biológico. Estos elementos son considerados prioritarios ya que son tóxicos y representan un riesgo potencial al ecosistema y la salud (Medina et al., 2004).

De las muestras analizadas se observó que la presencia de Al es mayor que otros elementos siendo Mn el que presenta una mayor cantidad, Cr sobrepasa cada uno de los límites

establecidos en todos los cenotes mientras que Zn solo se mantuvo por debajo de la legislación en SB.

Respecto al factor de enriquecimiento los cenotes Ma y SB presentan un mayor enriquecimiento seguido de Fa, AHa y Dzm. Al obtener el índice de riesgo ecológico potencial por metales propuesto por Hakanson (1980) el cenote Ma presenta un índice extremadamente alto lo cual concuerda con la relación que se presenta en su sistema de flujos subterráneos y del movimiento en el acuífero que va de SB a Ma y su intersección con los flujos provenientes de la zona urbanizada de Puerto Morelos, uno de los metales que se presenta en mayor cantidad es el Al, Trejo & Hernández (2004) mencionan que la mayor parte de la contaminación de este elemento es por acciones antropogénicas incluso derivados de la ingesta de diversos productos que contienen este elemento como sustancias conservadoras y colorantes así como el uso desmedido en los productos farmacéuticos utilizados en enfermedades gastrointestinales.

Sin embargo es difícil determinar en específico de donde están siendo arrastradas ya que esto dependerá de múltiples factores según la recopilación hecha por Salas *et al.*, (2001) menciona que en el año 1992 el instituto nacional de ecología identifica dos principales fuentes de contaminación, la primera generadas por la población seguido del turismo, más tarde incluyo a un tiradero a cielo abierto que no cubría con las normativas vigentes, además se asocia a las condiciones de drenaje en la zona ya que gran parte de la población utiliza fosas sépticas irregulares, esto concuerda con la información recaba con cada uno de los cenotes en este estudio, debido a que se encuentran en una zona rural donde no se cuenta con servicios de drenaje y el turismo es la fuente de ingreso en la región.

5.3.3 Riesgo ecológico en biota

Se calcula por primera vez el riesgo ambiental para las comunidades de zooplancton de la zona de estudio con base en la información generada en el presente trabajo, se usaron organismos de prueba perteneciente a la clase ostracoda (*Cypridopsis vidua*), y otras especies acuáticas (rotíferos, cladóceros y copépodos) obtenidas de referencias la base de datos EcoTox de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA=), es importante resaltar que los valores de toxicidad obtenidos en nuestra especie indicadora, son más bajos que los reportados en otras especies, por ejemplo, el valor calculado CL₅₀ para Zn y Cr en nuestro

organismo de prueba *Cypridopsis vidua* respectivamente, comparado con especies de rotíferos de los generos *Brachionus* y *Lecane* donde sus valores CL_{50} en Cr oscilan entre 4.41 – 8.3 mg/L, mientras que los valores estimados para Zn en especies de estos generos oscilan entre 0.123 – 2.27 mg/L (Rico-Martinez et al., 2013). Un estudio realizado por Mendoza-Fernandez (2017), con dos especies de ostrácodos colectados en la zona urbana de Cancún, estimo valores de CL_{50} para el metal Cr, que van de 2.0 – 2.68 mg/L. Es importante mencionar que no existen muchos datos de toxicidad de los metales detectados en la columna de agua de la zona de estudio, en especies colectadas y cultivadas de Quintana Roo.

En el presente estudio se estimaron los valores PNEC los cuales acorde a Karlsson (2008) y como se muestran en la tabla 17, estos valores, son muy bajos debido al factor de riesgo que se uso en cada metal, con respecto a las recomendaciones de Karlsson (2008) y Hernández-Pedraza et al., (2020), pueden ser considerados como limites máximos permitidos, sin embargo, en el presente estudio, no deben ser considerados de esta perspectiva, debido a que la mayoría de los valores de toxicidad son bibliográficos, y no son datos completamente obtenidos dentro de la zona de estudio. Es importante contar con más valores de toxicidad de los metales que se detectaron en la columna de agua y también de aquellos que están presentes en el sedimento. Incluir en los estudios toxicológicos especies de otros grupos poblacionales y niveles tróficos, de está manera es posible estimar con mayor fortaleza los limites máximos permitidos para la zona de estudio. Nuestro trabajo aporta información relevante en este vacio de información que existe en la región, para futuras estimaciones de la evaluación de riesgo para las comunidades de zooplancton de la zona de estudio.

Se detectaron en la columna de agua los metales Al, B, Ba, Cu, Cr, y Zn, y de todos ellos solo el Al, sobrepasa los LMP permitidos por la NOM-001-SEMARNAT y los estándares internacionales para la calidad de agua y consumo humano acorde a la ONU, es decir, las concentraciones fueron detectadas en época de lluvias a una concentración de 0.253 mg/L a una profundidad de 25 m y de 0.487 mg/L a una profundidad de 1 m en el cenote A-Ha, estás concentraciones son bajas y altas comparadas con valores de toxicidad CL_{50} estimados en especies de zooplancton, por ejemplo, *Brachionus calyciflorus* es igual a 3 mg/L, mientras que en *Lecane quadridentata* es de 0.157 mg/L, acorde a Rico-Martinez et al. (2013). Lo que significa que la concentración de Al en el cenote A-Ha alcanzo una concentración mayor al valor CL_{50} reportado en para la especie *L. quadridentata*, que representa para está población de rotíferos un elevado riesgo de continuar presentándose está concentración de Al en la columna de agua, llegando a ocasionar problamente una reducción del 50% de su población, sin embargo al no existir valores estimados de CL_{50} en una especie de *L. quadridentata* de la

región de estudio, este argumento solo es un ejemplo del potencial riesgo de la contaminación de metales en la región de estudio. Estudios realizados por Pérez-Yañez (2020), en la zona de estudio reporta la presencia de *L. quadridenta* en los cenotes cercanos, incluso reporta acumulación de otros metales como el Cd, en especies de zooplancton. Por todo lo anterior, es necesario continuar realizando cuantificación de metales en la zona de estudio, pruebas de toxicidad y análisis y cálculos de factores de bioacumulación de metales para comprender e integrar los efectos adversos potenciales de metales considerados altamente tóxicos y no tóxicos, y poder proveer información necesaria y pertinente para la toma de decisión.

Recientemente, un estudio realizado por Balam-Hernández y González-Ortega (2022), calcularon factores de bioacumulación en zooplancton, derivado de las colectas de zooplancton en los mismos sitios de estudio, y en las mismas campañas de recolección de muestras de agua y sedimento para el análisis de metales. Sus resultados indican que los cladóceros son los que acumulan más el Zn, después los rotíferos y ostrácodos y por último los copépodos, en temporada de secas. En cuanto al metal Fe, en rotíferos en temporada de secas es el grupo que tiene los factores de bioacumulación más altos, comparado con los otros grupos de zooplancton. Además se reporta el Cu en cladóceros durante la temporada de lluvias. Los factores de bioacumulación de los metales Zn, Fe y Cu son muy bajos en lluvias, comparados con los valores de la temporada de secas.

Es importante resaltar que estos elementos se encontraron presentes en el agua del sitio por lo cual los organismos lo están bioacumulando debido a la exposición en su medio como se menciona anteriormente, durante la temporada de secas se determinó que existe una mayor acumulación de los metales lo cual está relacionado a una mayor concentración y exposición a los metales disueltos en el medio para los organismos durante esta temporada, se sabe que los metales en la columna de agua están asociados a los sedimentos y a partículas en suspensión teniendo efectos perjudiciales en los ecosistemas (Bastidas *et al.*, 1999) particularmente los pequeños microorganismos que son los primeros en ser afectados por estas sustancias en el medio

Santos-Mendrano y Rico-Martínez (2013) señalan que la determinación de metales en zooplancton son buenos indicadores de la calidad del agua por la facilidad de cuantificar metales en ellos en sus tejidos completos sobre todo aquellos que se bioacumulan. Esta bioacumulación en los organismos es mayor durante la temporada de lluvia y se encuentra presente en los rotíferos y cladóceros los cuales se concentran en la superficie del medio, donde pueden ser capturados fácilmente para emplearlos como especies centinelas de la

bioacumulacion de metales, la presencia de metales en ellos y en el agua indica que estos metales son biodisponibles para el zooplancton, y de continuar allí la contaminacion de metales en el agua, puede ocurrir biomangificación en el medio ambiente y afectar otros seres vivos, incluida la salud humana.

Una mayor acumulación de los metales lo cual esta reacionado a una mayor concentración y exposición a los metale disueltos en el medio para los organismos durante esta temporada, se sabe que los metales en la columna de agua están asociados a los sedimentos y a partículas en suspensión teniendo efectos perjudiciales en los ecosistemas (Bastidas *et al.*,1999) particularmente los pequeños microorganismos que son los primeros en ser afectados por estas sustancias en el medio.

Santos & Rico (2013) señalan que la determinación de metales en zooplancton son buenos indicadores de la calidad ecológica del agua por la facilidad de cuantificar metales en en sus tejidos, sobre todo aquellos que se bioacumulan. Esta bioacumulación en los organismos es mayor durante la temporada de lluvia y se encuentra presente en los rotíferos y cladóceros los cuales se concentran en la superficie del medio, donde pueden ser capturados facilmente para emplearlos como biomonitores de la bioacumulacion de metales, la presencia de metales en ellos y en el agua indica que estos metales son biodisponibles para el zooplancton, y de continuar allí la contaminacion de metales en el agua, puede ocurrir biomangificación en el medio ambiente y afectar otros seres vivos, incluida la salud humana.

CONCLUSIONES

1. Se reporta la presencia de siete metales en la columna de agua de la zona de estudio y nueve metales en los sedimentos.
2. El Al es el único metal que está por encima de los LMP por la NOM-001-SEMARNAT, y este solo se detectó en el cenote A-Ha a una profundidad de 1 m y 25 mts.
3. En el sedimento se reporta el metal Cd considerado muy tóxico para la vida acuática y la salud humana.
4. Se reporta mayor presencia de metales en la columna de agua de los cenotes A-Ha, Fa y menor presencia de metales en la columna de agua de los cenotes Ma y SB.
5. En general, en la columna de agua a una profundidad de 15 m se reportan los metales B, Cu, Cr, Fe, Li y Zn, mientras que a las profundidades de 1 m y 25 se reportan los metales Al, Ba, Cu, Fe, Li y Zn.
6. Se reporta mayor presencia de metales en sedimento en los cenotes Ma y SB, con respecto a los cenotes A-Ha y Fa.
7. Los cenotes Ma, SB y Fa comparten el mismo tipo de agua cloruradas cálcicas de igual forma los cenotes A-Ha y Dzm tienen el mismo tipo de agua bicarbonatada cálcica, debido a la distancia a la línea de costa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, Y. (2018). *Saracterización geofísica para la exploración de agua subterránea en ciudad caribia*, Universidad Simon Bolivar.
- Alcocer, J., Lugo, A., Sánchez, M., & Escobar, E. (1999). *Contaminacion del agua subterránea en la península de Yucatán, México*. pp 41-50
- Alvarado, J., Andrade, S. B., Caballero, J. A., & Almazán, A. (2019). X-ray microanalysis of northeastern Quintana Roo aquatic biota, Mexico: Evidence of hazard metals presence. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 47(4), pp. 654–664.
- Agencia para sustancias toxicas y el registro de enfermedades (ATSDR), 2023. ToxFAQs™- Aluminio (Aluminum). Extraído de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts22.html#:~:text=La%20exposici%C3%B3n%20al%20aluminio%20generalmente,visualizan%20en%20radiograf%C3%ADas%20del%20t%C3%B3rax
- AQUAWORLD (2015). *¿Cómo se formaron los cenotes?* <https://aquaworld.com.mx/blog/como-se-forman-los-cenotes>.
- Arcega, F., Noreña, E., & Ocegüera-Vargas, I. (2014). Lead from hunting activities and its potential environmental threat to wildlife in a protected wetland in Yucatan, Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 100(1), pp.251–257.
- Bastidas, C., Bone, D., Garcia, E., 1999. Sedimentation rates and metal content of sediments in a Venezuelan coral reef. *Marine Pollution Bulletin* 1, 16–24.
- Bautista, F. (2011). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la península de yucatán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2),pp. 7–8.
- Benavides, A., Gonzalez, L., & Sulvarán, G. (2021). *Estudio de la contaminación por Cadmio , Cromo y Plomo en el Cenote Maravilla (Chichanlub)*. Universidad del Caribe. pp 45-62.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar Briones, E., & Torres-Talamante, O. (2007). Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 14(83),pp 32–35.
- Beita, W., & Barahona, M. (2011). Península de Osa , Costa Rica. *UNED Research Journal/ Cuadernos de Investigación UNED*, 2(2), pp.157–179.
- Balam, L., Mercedes, A., German, A y Noemi, G. (2020). Determinación de Zinc en muestras de agua de ríos y red de la provincia de San Luis y aguas

- envasadas. *Diaeta*. Vol. 38(173), pp. 38-48.
- Blaz, S. (2019). Rotíferos como indicadores de la calidad ambiental en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Juan de Miraflores (PTAR Sedapal-SJM). In *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. <https://core.ac.uk/download/pdf/323348158.pdf>
- Chen, K., Cheng, S-Y., & Wang, J. (2020). Effects of cadmium on bioaccumulation, bioabsorption, and photosynthesis in *Sarcodia suaie*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, pp.1294.
- Cáceres, J., & Vera, E. (2016). *Sondajes Eléctricos Verticales (SEV): Método Galvánico Tradicional*. pp. 6-30. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/GF42A/1/material_docente/bajar?id_material=205302
- Carriquiriborde, P. (2021). Principios de Ecotoxicología. Biodisponibilidad, biotransformación, bioacumulación y biomagnificación. Ed. EDULP. pp.62-91
- Cejudo, E., Smith, D. N., & Ortega, D. (2021). Tendencias en la Biogeoquímica del agua subterránea en la región. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. p.11.
- Chavez, G. (2001). *El agua en la Península Yucatán, un recurso con alta vulnerabilidad*. Universidad Autónoma de Yucatán. Pp 1-3.
- Chen, H., Chen, Z., Chen, Z., Ou, X., & Chen, J. (2020). Calculation of toxicity coefficient of potential ecological risk assessment of rare earth elements. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104, 582-587.
- Colina, José (2000). Tipos de contaminación, sus fuentes y efectos en el estuario de Santoña. Monte Buciero, ISSN 1138-9680, N°.5, 2000, pag.211-224.
- Covarrubias & Peña (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol 33, pp 7–21.
- De la lanza, G., & Hernández, S. (2014). Organismos acuáticos como indicadores de cambios ambientales: Características, elección, interpretación, monitoreo. Ventajas y desventajas. In C. González, A. Vallariano, J. Pérez, & A. Low (Eds.), *Biondicadores guardianes de nuestro ambiente*, pp. 41–64.
- Demidof, C. (2023). Evaluación ambiental de la contaminación por metales en la laguna manatí, una zona sujeta a conservación ecológica en ambiente urbano, Centro de investigación de ciencias de yucatan. Tesis de maestría

- Fernandez, A., Singh, A., & Jaffé, R. (2007). A literature review on trace metals and organic compounds of anthropogenic origin in the Wider Caribbean Region. *Marine Pollution Bulletin*, 54(11), 1681–1691. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.08.007>
- González, C., & Vallariano, A. (2014). Los biodicadores ¿Una alternativa real para la protección del medio ambiente. In C. González, A. Vallariano, J. Pérez, & A. Low (Eds.), *Biodicadores guardianes de nuestro ambiente* (pp. 21–40).
- Gonzalez, R., Ismael, S., Cervantes, A., & Jose, O. (2018). Calida de agua en el acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *The New York Times*, 14(25), 69–89.
- INEGI. (2020). *Informacion por entidad Quintana roo*. Cuentame Inegi. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/poblacion/dinamica.aspx?tema=me&e=23>
- Jiménez, B. (2001). La contaminación en México: Causas, efectos y tecnología apropiada. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C. Ed. Limusa, pp. 52-926.
- Salas, H., Lobos, J., Leomax, J., & Fernicola, N. (2001). *Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales*. pp. 1-73. https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55258/OPSCEPISPUB0166_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Laino, R. M., Bello, R., González, M., Ramírez, N., Jiménez, Francisco, & Musálem-Castillejos, K. (2015). Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, vol 6(4).
- Lizano, O. G., AlMro, E. J., & Salazar Matarrita, A. (2015). Un método para evaluar el enriquecimiento de metales en sedimentos marinos en Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, vol 60(6), pp,197.
- NMX-AA-75-1982. Aalisis de agua. Determinación de silice.
- Maderey, L., & Jiménez, A. (2001). Hydrological cycle disturbances at the lower portion of the Lerma River upper basin derived from water transfer to Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, vol 1, p.45)
- Medina, R., Zetina, C., Comas, M., & Pat, R. (2004). Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb

- en sedimentos y en tres especies de pepino de mar (clase holothuroidea) de las costas del Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, vol 8(2), pp. 7–19.
- Medina, S., Jiménez, A., Gutiérrez, M., & Lizardi, M. (2014). Hydrocarbon pollution studies of underwater sinkholes along quintana roo as a function of tourism development in the mexican caribbean. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 13(2), pp.509–516.
- Méndez, E. (2008). Cálculo de la conductividad hidráulica de los acuíferos a partir de la resistividad eléctrica. *Minería y Geología*, vol. 24(2), pp. 1–8.
- Miguel, F., Laborín, J., Becuar, F., & García, C. (2019). Aplicación del método de resistividad eléctrica en la exploración de yacimientos de carbón. *epistemus*, vol. 27, pp.13–17.
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (MITECO), 2022. Calidad y evaluación ambiental. Problemática ambiental (Metales pesados). extraído de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx*
- Monroy, E. (2016). *¿Cómo se formaron cuevas y cenotes? espeleogénesis*. Karts Geochemistry and Hydrogeology. <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/2016/05/20/espeleogenesis/#.YNI3VehKjIV>
- OCSA. (2016). *Método de tomografía eléctrica*. Estudios Geofisicos. <https://ocsa-geofisica.com/tomografia-electrica.html>
- Peña, C., Torres, A., & Luna, H. (2014). Análisis espacial por dendrogramas de los determinantes DBO 5 , DQO, SST, SAAM, NT y PT sobre el río tunjuelo en la ciudad de bogotá. *XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, August*.
- Peralta, A., & López, E. (2012). Los Acuíferos de nuestro país: un tesoro para las generaciones venideras. *Ciencia y Tecnología*, vol. 1(12), pp.73–82.
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y Política Pública*, vol. 22(2), pp. 283–312.
- Pérez, D. (2020). Bioacumulación del cadmio y plomo en cuatro grupos de zooplancton del noreste de Quintana Roo, México. In *Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.*
- Rose, A., Hawkes, H., & Webb, J. (1979). *Geoquímica en la exploración de*

- minerales. Segunda edición, Academic Press, Londres, p.658.*
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz-Lagos, M., & González-Jimenez, E. (2016). *Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Ingeniería Investigación Y Desarrollo, Vol.16(2), pp. 66–77.*
- Pulido, A. (2001). Investigación y exploración de acuíferos kársticos. *Boletín Geológico y Minero, 112(SPECIAL EDDITION),pp 65–76.*
- Salas, H., Lobos, José., Leomax, J.(2001). Fernicola, NildaManual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales. Organización Panamericana de la Salud. pp1-17.
- Sarria-Villa, Pavon, S. & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de emoción. Vol. 14 (27). Pp. 9-18.
- Salomons W., & Förstner U. (1984). *Metals in the hydrocycle. SpringerVerlag, Berlin.*
<https://www.springer.com/gp/book/9783642693274>.
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., & Amílcar, R. (2016). *Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México.vol 7(4), pp.75–95.*
- Santos-Medrano & Rico-Martínez. (2013). Lethal effects of five metals on the freshwater rotifers *Asplanchna brighwellii* and *Brachionus calyciflorus*. *Hidrobiológica 23 (1), pp. 82-86.*
- Sanz, H., Duque, E., & Gómez, S. (2010). Soil resistivity as a Function of frequency. *Scientia et Technica, vol. XVI(44), pp.1-6 .*
- Schweitzer, L., y Noble,J. (2018). 3.6 CONTAMINACIÓN Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA. Elsevier. Pp.261-290.
- Schmitter-Soto, J., Alcocer, J., Suárez- Morales, E., & Elias- Gutierrez, M. (2007). Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología Mexicana, vol. 14(83), pp.32–35.*
- SEMA. (2020). *Uga 09-Ruta De Los Cenotes.*
http://sema.qroo.gob.mx/FichasPOELsQR/09_ben.pdf
- SEMARNAT. (2016). ¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo.
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/pdf/serie/yelmedioambiente.pdf>
- SEMARNAT. (2018a). *Definición y objetivo de la evaluación del impacto ambiental.*
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/definicion-y-objetivo-de-la-evaluacion-del-impacto-ambiental>.
- SEMARNAT. (2018b). *Impacto ambiental y tipos de impacto ambiental.*
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/impacto-ambiental-y-tipos->

de-impacto-ambiental

- SEMIDE. (2021). *Hidrogeología*. Hispagua Sistema Español de Información Sobre El Agua. <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia#4>
- SINA. (2021). *Ciclo hidrológico*. Sistema Nacional de Información Del Agua. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=7>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy Metals Toxicity and the Environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, vol. 101, pp.133–164.
- Tenjo, A., & Cárdenas, E. (2015). Importancia y utilidad de los bioindicadores acuáticos. In *Biodiversidad Colombia*. vol. 6.
- Trejo, E. y Navarro A. (2004). Patrones biogeográficos de la riqueza de especies y el endemismo de la avifauna en el oeste de México. *Acta Zoológica Mexicana* 20: 167-185
- Tun-Canto, G. E., Álvarez-Legorreta, T., Zapata-Buenfil, G., & Sosa-Cordero, E. (2017). Metales pesados en suelos y sedimentos de la zona cañera del sur de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(3), pp.157–169.
- UNESCO. (2009). El agua en un mundo en constante cambio. Hechos y Cifras. In *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos*. <http://www.unesco.org/>
- USGS. (2021). *The Water Cycle*. Science for a Changing World. https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- Wang, X., Liu, B., & Zhang, W. (2020). Distribution and risk analysis of heavy metals in sediments from the Yangtze River Estuary. *China. Environmental Science and Pollution Research*, 27(10), 10802–10810. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07581>
- Wen, X., Lu, L., Wu, J., Lin, Y., & Luo, Y. 2019. Influence of coastal groundwater salinization on the distribution and risk of heavy metals. *Science of total Environment* 652: 267-277.

ANEXOS

Anexo 1 . Valores de CL₅₀ experimentales y bibliográficos.

Metal	Especie	CL50	Referencia
Al	<i>Lecane quadridentata</i>	0.157	Mackie, 1974.
Al	<i>Lecane quadridentata</i>	0.1572	Mackie, 1974.
Al	<i>Brachionus calyciflorus</i>	0.105	Rico-Martínez et al., 2013
Al	<i>Asplanchna brightwellii</i>	0.174	Rico-Martínez et al., 2013
Cr	<i>Gammarus sp.</i>	6.4	Rehwoldt et al 2020
Cr	<i>Simocephalus vetulus</i>	0.05	Mount & Noberg, 1984
Cr	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	0.045	Mount & Noberg, 1984
Cr	<i>Gammarus sp.</i>	3.2	Rehwoldt et al. 1993
Cr	<i>Daphnia magna</i>	0.42	Vinot et al., 1984
Cr	<i>Daphnia pulex</i>	0.048	Mount & Noberg, 1984
Cr	<i>Asplanchna brightwellii</i>	1.3	Mount & Noberg, 1984
Cr	<i>Asplanchna brightwellii</i>	0.18	Mount & Noberg, 1984
Cr	<i>Lecane hamata</i>	4.41	Mount & Noberg, 1984
Cr	<i>Lecane luna</i>	3.26	Mount & Noberg, 1984
Cr	<i>Lecane quadridentata</i>	4.5	Mount & Noberg, 1984
Cr	<i>Cypridopsis vidua</i>	0.47	En este estudio
Cr	<i>Cypridopsis vidua</i>	0.31	En este estudio
Cr	<i>Cypridopsis vidua</i>	0.25	En este estudio
Cu	<i>Cypris subglobosa</i>	0.059	Daly et al., 1990
Cu	<i>Cypris subglobosa</i>	1.7	Rice et al., 1983
Cu	<i>Cypris subglobosa</i>	0.2773	Vardia et al., 1988
Cu	<i>Cypris subglobosa</i>	0.716	Rice et al., 1983
Cu	<i>Daphnia lumholtzi</i>	0.071	Daly et al., 1990
Cu	<i>Daphnia lumholtzi</i>	0.065	Krishnamoorthy., 1996
Cu	<i>Simocephalus vetulus</i>	0.89	Rice et al. 1983
Cu	<i>Daphnia lumholtzi</i>	0.135	Daly et al., 1990
Cu	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	0.033	Daly et al., 1990
Cu	<i>Daphnia lumholtzi</i>	1.15	Rice et al. 1983
Cu	<i>Asplanchna brightwellii</i>	0.045	Rice et al. 1983
Cu	<i>Asplanchna brightwellii</i>	0.026	Rice et al. 1983
Cu	<i>Asplanchna brightwellii</i>	0.031	Rice et al. 1983
Cu	<i>Asplanchna brightwellii</i>	0.026	Rice et al. 1983
Cu	<i>Brachionus patalus</i>	0.2	Rice et al. 1983
cu	<i>Brachionus plicatilis</i>	0.12	Rice et al. 1983
Cu	<i>Lecane hamata</i>	0.23	Rice et al. 1983
Cu	<i>Lecane luna</i>	0.06	Rice et al. 1983
Cu	<i>Lecane quadridentata</i>	0.33	Rice et al. 1983
Cu	<i>Philodina acuticornis</i>	1	Rice et al. 1983

Cu	<i>Philodina acuticornis</i>	0.14	Mount & Noberg, 1984
Fe	<i>Lecane quadridentata</i>	0.53	Mount & Noberg, 1984
Fe	<i>Brachionus calyciflorus</i>	0.232	Mount & Noberg, 1984
Fe	<i>Asplanchna brightwellii</i>	0.358	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Anuraeopsis fissa</i>	0.31	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Brachionus calyciflorus</i>	1.65	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Brachionus calyciflorus</i>	1.3	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Brachionus havanaensis</i>	2.27	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Brachionus havanaensis</i>	0.19	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Brachionus rubens</i>	0.55	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Lecane quadridentata</i>	0.123	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Philodina acuticornis</i>	2.4	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>Cypridopsis vidua</i>	0.08	Mount & Noberg, 1984
Zn	<i>B. calyciflorus</i>	1.2	Snell et al. 1991b
Zn	<i>B. calyciflorus</i>	1.32	Couillard et al. 1989
Zn	<i>B. calyciflorus</i>	1.65	Nelson & Rolin, 199
Zn	<i>B. havanaensi</i>	2.27	Juárez-Franco et al., 2007
Zn	<i>Anuraeopsis fissa</i>	0.31	Sarma et al., 2007b
Zn	<i>B. rubens</i>	0.55	Sarma et al., 2007b
Zn	<i>Cypridopsis vidua</i>	0.095	En este estudio
Zn	<i>Cypridopsis vidua</i>	0.081	En este estudio
Zn	<i>Cypridopsis vidua</i>	0.066	En este estudio
Ba	<i>Daphnia magna</i>	530	Borgmann et al., 2005
Ba	<i>Daphnia magna</i>	410	Leblanc et al. 1980
Ba	<i>Daphnia magna</i>	530	Leblanc et al. 1980
Ba	<i>Daphnia magna</i>	530	Leblanc et al. 1980
Bo	<i>Hyalella azteca</i>	3.15	Borgmann et al., 2005
Bo	<i>Hyalella azteca</i>	2.935	Borgmann et al., 2005
Bo	<i>Hyalella azteca</i>	1.638	Borgmann et al., 2005
Bo	<i>Hyalella azteca</i>	5.258	Borgmann et al., 2005

Anexo 2. Valor de los cationes encontrados en la zona de estudio durante dos temporadas.

CATIONES								
Cenote	Magnesio	Magnesio	Sodio	Sodio	Potasio	Potasio	Calcio	Calcio
	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)
	LL	SC	LL	SC	LL	SC	LL	SC
Ma-1m	2.189	2.504	4.503	4.626	0.110	0.000	3.924	6.195
Ma-15m	2.379	1.436	4.551	2.495	0.091	0.000	4.145	3.520
Ma.25m	2.333	2.490	4.645	4.429	0.086	0.000	4.062	4.390

SB-1m	2.260	2.431	4.794	4.817	0.104	0.000	4.366	6.011
SB-15m	2.314	1.991	4.849	4.348	0.110	0.000	4.451	4.312
SB-25m	2.296	2.477	4.823	5.085	0.077	0.000	4.250	4.946
Fa-1m	1.690	2.148	3.270	5.181	0.070	0.000	3.335	6.183
Fa-15m	2.575	2.467	5.245	5.072	0.100	0.000	4.340	5.658
Fa-25m	3.038	2.533	6.908	5.087	0.131	0.000	4.446	5.900
AHa-1m	1.448	1.839	1.027	1.246	0.000	0.000	2.159	5.563
AHa-15m	1.526	1.845	1.230	1.244	0.000	0.000	4.182	5.696
AHa-25m	1.802	1.880	1.334	1.341	0.020	0.000	4.111	5.951
Dzm-1m	1.558	1.860	1.670	1.782	1.000	0.000	6.250	4.528
Dzm-15m	1.692	2.132	1.974	1.931	2.000	0.000	5.450	5.887
Dzm-25m	2.000	2.081	1.991	2.047	3.000	0.000	5.500	6.767

Cenotes: Ma, SB, Fa, AHa y Dzm. Temporada: Lluvias (LL); Secas (SC). Profundidad (1, 15 y 25m).

Anexo 3. Valor de los aniones encontrados en la zona de estudio durante dos temporadas.

ANIONES						
Cenote	Sulfatos (meq/L)		Cloruros (meq/L)		Nitratos (meq/L)	
	LL	SC	LL	SC	LL	SC
Ma-1m	0.931	0.892	7.086	6.834	0.115	0.063
Ma-15m	0.935	0.495	6.971	3.374	0.047	0.054
Ma-25m	0.936	1.060	7.057	6.142	0.051	0.062
SB-1m	0.926	0.960	7.086	7.409	0.062	0.158
SB-15m	0.963	0.804	7.229	6.114	0.040	0.063
SB-25m	0.942	0.947	7.171	7.449	0.037	0.158
Fa-1m	0.658	1.120	3.486	10.826	0.000	0.329
Fa-15m	1.062	1.062	8.000	10.643	0.010	0.324
Fa-25m	1.386	0.828	10.771	10.514	0.023	0.319
AHa-1m	0.254	0.297	1.654	2.458	0.107	0.310
AHa-15m	0.304	0.303	1.680	2.430	0.116	0.327
AHa-25m	0.329	0.300	1.851	2.569	0.117	0.327
Dzm-1m	0.348	0.444	2.459	2.619	1.000	0.118

Dzm-15m	0.252	0.418	1.849	2.723	2.000	0.129
Dzm-25m	0.260	0.433	2.123	3.037	3.000	0.055

Cenotes: Ma, SB, Fa, AHa y Dzm. Temporada: Lluvias (LL); Secas (SC). Profundidad (1, 15 y 25).

Anexo 4. Análisis de riesgo ecológico en agua.

Sitio	Metal	Profundidad	temporada	Valor (mg/L)	NOM-127-SSA1. LMP de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano		NOM-001-SEMARNAT, LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.					ONU Estándar es Internacio nales para la Calidad de Agua para Consumo Humano	Sobrepa sa los Límites SI/NO
					1994	2021	1996 Ríos (Protección de vida acuática)		2001 Ríos, arroyos, canales y drenes				
							P.M	P.D	P.M	P.D	V.I		
Ma	B	15m	Secas	0.233	----	----	----	----	----	----	----	0.5(mg/l)	NO
A-Ha	Ba	15m	Secas	0.025	0.70(mg/l)	1.3(mg/l)	----	----	----	----	----	0.7(mg/l)	NO
A-Ha	Ba	25m	Secas	0.032	0.70(mg/l)	1.3(mg/l)	----	----	----	----	----	0.7(mg/l)	NO
SB	Cu	1m	Secas	0.015	2(mg/l)	2(mg/l)	4(mg/l)	6(mg/l)	4(mg/l)	5(mg/l)	6(mg/l)	2(mg/l)	NO
Fa	Li	1m	Secas	0.008	----	----	----	----	----			----	NO
Fa	Li	15m	Secas	0.007	----	----	----	----	----			----	NO
Fa	Li	25m	Secas	0.006	----	----	----	----	----			----	NO
A-Ha	Li	25m	Secas	0.006	----	----	----	----	----			----	NO
SB	Fe	1m	Secas	0.007	0.3(mg/l)	0.3(mg/l)	----	----	----	----	----	0.3(mg/l)	NO
SB	Fe	15m	Secas	0.004	0.3(mg/l)	0.3(mg/l)	----	----	----	----	----	0.3(mg/l)	NO

Fa	Fe	25m	Secas	0.008	0.3(mg/l)	0.3(mg/l)	----	----	----	----	----	0.3(mg/l)	NO
Al-Ha	Fe	25m	Secas	0.006	0.3(mg/l)	0.3(mg/l)	----	----	----	----	----	0.3(mg/l)	NO
Dzm	Fe	15m	Secas	0.037	0.3(mg/l)	0.3(mg/l)	----	----	----	----	----	0.3(mg/l)	NO
Dzm	Fe	25m	Secas	0.036	0.3(mg/l)	0.3(mg/l)	----	----	----	----	----	0.3(mg/l)	NO
Ma	Zn	1m	Secas	0.012	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
Ma	Zn	15m	Secas	0.006	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
Ma	Zn	25m	Secas	0.008	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
SB	Zn	1m	Secas	0.016	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
SB	Zn	15m	Secas	0.004	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
SB	Zn	25m	Secas	0.008	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
Fa	Zn	1m	Secas	0.004	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
Fa	Zn	15m	Secas	0.003	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
A-Ha	Zn	15m	Secas	0.003	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
A-Ha	Zn	25m	Secas	0.014	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
Dzm	Zn	15m	Secas	0.003	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
A-Ha	Al	1m	Lluvias	0.487	0.20(mg/l)	0.20(mg/l)	----	----	----	----	----	0.2(mg/l)	SI
A-Ha	Al	25m	Lluvias	0.253	0.20(mg/l)	0.20(mg/l)	----	----	----	----	----	0.2(mg/l)	SI
Fa	Cr	15m	Lluvias	0.010	0.5(mg/l)	0.5(mg/l)	0.5(mg/l)	1(mg/l)	1(mg/l)	1.25mg/l	1.5(mg/l)	0.05(mg/l)	NO
Fa	Cu	15m	Lluvias	0.005	2(mg/l)	2(mg/l)	4(mg/l)	6(mg/l)	4(mg/l)	5(mg/l)	6(mg/l)	2(mg/l)	NO
A-Ha	Cu	1m	Lluvias	0.006	2(mg/l)	2(mg/l)	4(mg/l)	6(mg/l)	4(mg/l)	5(mg/l)	6(mg/l)	2(mg/l)	NO

Fa	Fe	1m	Lluvias	0.107	0.30(mg/l)	0.30(mg/l)	----	----	----	----	----	----	NO
Fa	Fe	15m	Lluvias	0.393	0.30(mg/l)	0.30(mg/l)	----	----	----	----	----	----	NO
Fa	Fe	25m	Lluvias	0.073	0.30(mg/l)	0.30(mg/l)	----	----	----	----	----	----	NO
A-Ha	Fe	1m	Lluvias	0.114	0.30(mg/l)	0.30(mg/l)	----	----	----	----	----	----	NO
A-Ha	Fe	25m	Lluvias	0.048	0.30(mg/l)	0.30(mg/l)	----	----	----	----	----	----	NO
Dzm	Fe	1m	Lluvias	0.064	0.30(mg/l)	0.30(mg/l)	----	----	----	----	----	----	NO
Dzm	Fe	15m	Lluvias	0.008	0.30(mg/l)	0.30(mg/l)	----	----	----	----	----	----	NO
Dzm	Fe	25m	Lluvias	0.006	0.30(mg/l)	0.30(mg/l)	----	----	----	----	----	----	NO
Fa	Zn	1m	Lluvias	0.027	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
Fa	Zn	15m	Lluvias	0.053	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
Fa	Zn	25m	Lluvias	0.014	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
A-Ha	Zn	1m	Lluvias	0.045	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO
A-Ha	Zn	15m	Lluvias	0.008	5(mg/l)	----	10(mg/l)	20(mg/l)	10(mg/l)	15(mg/l)	20(mg/l)	3(mg/l)	NO

Anexo 5. Determinación del índice de riesgo ecológico en los cenotes muestreados, Hakanson (1980).

a) Maravillas

Ma	Al	Ba	Cr	Fe	Cu	Cd	Ni	Zn	
C_f^i	1.25	1.46	2.50	0.37	25.12	2.02	2.54	1.82	
E_r^i			24.98		753.50	4.04	2.54	9.11	
RI									794.16

C_f : Factor de contaminación del elemento; E_r^i : Coeficiente de toxicidad; RI: Índice de riesgo ecológico.

b) Siete bocas

Sb	Al	Ba	Cr	Cd	Fe	Cu	Cd	Ni	Zn
C_f^i	0.10	12.13	2.04	61.98	0.22	0.51	0.19	0.22	1.53
E_r^i			20.38	123.96		15.19	0.39	0.22	7.65
RI									167.79

C_f : Factor de contaminación del elemento; E_r^i : Coeficiente de toxicidad; RI: Índice de riesgo ecológico.

c) Fátima

Fa	Al	Ba	Cr	Fe	Cu	Cd	Ni	Zn	
C_f^i	0.15	2.76	1.33	0.05	1.44	0.19	0.14	0.69	
E_r^i			13.26		43.27	0.38	0.14	3.47	
RI									60.52

C_f : Factor de contaminación del elemento; E_r^i : Coeficiente de toxicidad; RI: Índice de riesgo ecológico.

d) Azul-Ha

AHa	Al	Ba	Cr	Cd	Fe	Cu	Cd	Ni	Zn
C_f^i	1.12	9.76	3.80		0.77	5.69	3.01	0.44	1.56
E_r^i			38.01			170.66	6.02	0.44	7.82
RI									222.94

C_f : Factor de contaminación del elemento; E_r^i : Coeficiente de toxicidad; RI: Índice de riesgo ecológico.

e) Dzalam

Dm	Al	Ba	Cr	Cd	Fe	Cu	Cd	Ni	Zn
C_f^i	0.20	1.09	0.31		0.11		0.34		0.22
E_r^i			3.14			0.00	0.68	0.00	1.09
RI									4.91

C_f : Factor de contaminación del elemento; E_r^i : Coeficiente de toxicidad; RI: Índice de riesgo ecológico.