UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA, MANAGUA

UNAN - MANAGUA

TESIS DE MAESTRÍA

Estudio de la relación entre la contaminación por arsénico y la dinámica hidrogeológica de la península de Chiltepe, con énfasis en el área recreativa de Xiloá

Keneth P. Morán G.

TUTORA
MSC. YELBA DEL CARMEN FLORES MEZA
ASESOR
MSC. MAXIMINA ALTAMIRANO ESPINOZA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MÁSTER EN CIENCIAS DEL AGUA CON ÉNFASIS EN CALIDAD DEL AGUA

¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!

Trabajo de Tesis
Para optar al grado de
Máster en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua

Título de la Tesis

Estudio de la relación entre la contaminación por arsénico y la dinámica hidrogeológica de la península de Chiltepe, con énfasis en el área recreativa de Xiloá

Elaborado por:

Keneth P. Morán G.

Comité de Tesis:

Nombre del Tutor(a): **MSc. Yelba del Carmen Flores Meza**
Nombres de los Asesores: **MSc. Maximina Altamirano Espinoza**

Managua, 12 de febrero de 2025

Patrocinado por "Servicio Alemán de Intercambio Académico DAAD"
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA, MANAGUA

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua)
Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua

DEDICATORIA

La presente investigación está dedicada a mis padres, Isabel González y Juan Antonio Yangüez, cuyo esfuerzo incansable y sacrificios constantes me han brindado el invaluable legado de la educación.

A mis hermanos Yamibel, Milibeth, Gabriela, Edwin e Ilaine, quienes me apoyaron enormemente durante este largo periodo lejos de casa, motivándome a ser la mejor versión de mí mismo.

A mi abuela Virginia, que, a través de su historia de vida, cariño infinito, ha sembrado en mí una semilla de resiliencia y esperanza.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primera instancia al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por su loable esfuerzo en promover la educación y por haber financiado mis estudios superiores en el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua).

A mi tutora, MSc. Yelba Flores, quien aceptó el desafío de dirigir este estudio, motivándome a adquirir nuevos conocimientos y a expandir mi horizonte científico. También agradezco a mi asesora, Maximina Altamirano, por aportar su vasta experiencia a la realización de esta investigación.

A la coordinación de maestría, en especial a MSc. Valeria Delgado, quien en incontables ocasiones demostró un profundo compromiso con la maestría y sus estudiantes, ofreciéndome la oportunidad de realizar esta tesis en su país, como alternativa a las dificultades migratorias del año 2020.

A mis compañeros Jairo, Xaviera, Gisselle, Josué, Daniel y Valeska, con quienes siempre pude contar ante cualquier dificultad y se convirtieron rápidamente en amigos entrañables durante mi estadía en Nicaragua.

Finalmente, a la señora Marilin y a don Miguel, quienes, por más de dos años, me abrieron las puertas de su hogar, me hicieron sentir parte de su familia y compartieron conmigo tantos momentos memorables, inspirándome a querer este país tanto como ustedes.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Planteamiento del problema 2

1.1.1 Caracterización del problema 2

1.1.2 Delimitación del problema 2

1.1.3 Preguntas de sistematización 4

1.2 Antecedentes 4

1.3 Objetivos 9

1.3.1 Objetivo general 9

1.3.2 Objetivos específicos 9

1.4 Justificación 9

1.5 Planteamiento hipotético 10

II. MARCO TEÓRICO 11

2.1 Calidad de agua 11

2.2 Hidroquímica del agua 11

2.3 Parámetros físicos del agua 12

2.3.1 pH 12

2.3.2 Alcalinidad 13

2.3.3 Potencial redox 13

2.3.4 Conductividad eléctrica 13

2.3.5 Temperatura del agua 14

2.4 Contaminación por arsénico en el medio hidrogeológico 14

2.4.1 Generalidades 14

2.4.2 Origen en el medio subterráneo 15

2.4.3 Compuestos más estudiados 15

2.4.4 Arsénico en medios geotermales 16

2.4.5 Estabilidad del arsénico de acuerdo con las condiciones fisicoquímicas 17

2.4.6 Toxicidad 18

2.4.7 Impactos a la salud 18

2.5 Guías de recreación segura ante Arsénico 19

2.5.1 Grado de contacto 19
2.5.2 Potencial de absorción dermal 20
2.5.3 Concentraciones límites 20
2.6 Isótopos ambientales como trazadores de flujo 20
2.6.1 Oxígeno y deuterio 21
2.7 Hidrodinámica subterránea 22
2.8 Generalidades de los lagos y lagunas 23
2.8.1 Lagunas cratéricas 23
III. MARCO GEOLÓGICO 24
3.1 Características Fisiográficas de la Península 24
3.1.1 Geomorfología 24
3.1.2 Geología Local 26
3.1.2.1 Cuaternario (Q) 27
3.1.2.2 Cuaternario Aluvial (Qal) 27
3.1.2.3 Cuaternario Lava (Ql) 28
3.1.2.4 Cuaternario Volcánico (Qv) 28
3.1.2.5 Cuaternario Volcánico Lava (Qvl) 28
3.1.3 Estratigrafía de la Formación Chiltepe (CF) 30
IV. MARCO METODOLÓGICO 31
4.1 Área de estudio 31
4.2 Tipo de estudio 32
4.3 Técnicas de recopilación de la información 33
4.3.1 Información secundaria 33
4.3.2 Información primaria 33
4.3.2.1 Levantamiento geológico 33
4.3.2.2 Levantamiento de objetos hidrogeológicos 34
4.3.2.3 Levantamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico 34
4.3.2.4 Medición de Niveles freáticos 35
4.3.2.5 Muestreo de agua superficial y subterránea para análisis isotópico 35
4.3.2.6 Muestreo de agua superficial y subterránea para análisis de Arsénico total 36
4.3.2.7 Determinación de concentraciones arsénico por del Arsenator Digital ..36

4.3.3 Medidas de recreación segura en la zona turística de Xiloá 38
V. RESULTADOS 40
5.1 Levantamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico noviembre 2020-2021 40
5.1.1 Hidrodinámica del agua subterránea de la Península 40
5.1.1.1 Piezometría 40
5.1.1.1 Fluctuación estacional 40
5.2 Caracterización Hidrogeoquímica 43
5.2.1 Temperatura 43
5.2.1.1 Aguas subterráneas 43
5.2.1.2 Aguas Superficiales 44
5.2.2 Conductividad Eléctrica 46
5.2.2.1 Aguas subterráneas 46
5.2.2.2 Aguas superficiales 46
5.2.3 Índice de acidez (pH) 49
5.2.3.1 Aguas subterráneas 49
5.2.3.2 Aguas superficiales 49
5.2.4 Potencial Redox 52
5.2.4.1 Aguas subterráneas 52
5.2.4.2 Aguas superficiales 52
5.2.5 Determinación de las concentraciones de Arsénico 55
5.2.5.1 Aguas subterráneas 55
5.2.5.2 Aguas superficiales 55
5.2.5.3 Distribución espacial de las concentraciones de Arsénico de la península 57
5.2.5.4 Especiación de Arsénico presente en la península 60
5.2.5.5 Relación entre las concentraciones de Arsénico y pH 62
5.2.5.6 Relación entre las concentraciones de Arsénico y el flujo subterráneo en la Península de Chiltepe 64
5.2.6 Composición Isotópica de la Península 65
5.2.6.1 Aguas Subterráneas 65
5.2.6.2 Aguas Superficiales 65
5.2.6.3 Comparación de los Isótopos oxígeno 18 y deuterio de las fuentes muestreadas 71

5.2.6.4 Interpretación del exceso de Deuterio (D-excess) 73
5.2.6.5 Interpretación del exceso de línea condicionado (Lc-excess) 75
5.3 Interpretación de resultados 77
5.4 Propuestas para la recreación segura en la laguna de Xiloá 81
5.4.1 Evaluación del sistema 81
5.4.1.1 Valoración de la exposición 81
5.4.1.2 Exposición dermal 81
5.4.2 Estimación de la absorción dermal en la Laguna de Xiloá 82
5.4.2.1 ingestión 82
5.4.2.2 Estimación de la ingestión de arsénico en la Laguna de Xiloá 83
5.4.2.3 Inhalación 83
5.4.2.4 Valores guía para recreación 84
5.4.3 Manejo de la contaminación por arsénico en el área recreativa de Xiloá 84
5.4.3.1 Disminución de la exposición ante arsénico por recreación de contacto directo en la laguna de Xiloá 85
5.4.3.2 Mitigar las posibles afectaciones que puedan darse producto de entrar encontacto con las aguas enriquecidas en arsénico de Xiloá 86
5.4.3.3 Diagnosticar el estado actual de la población local respecto a hidroasenicismoy relacionarlo con las condiciones del entorno. 87
5.4.3.4 Mantener y mejorar las condiciones de calidad del agua en laguna de Xiloá arazón de mantener el arsénico en su estado menos toxico. 88
5.4.3.5 Consolidar el conocimiento generado en todos los sectores sociales y políticosa través de un proceso de comunicación y difusión. 89
I. CONCLUSIONES 90
I. REFERENCIAS 91
II. ANEXOS 96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Compuestos de arsénico más estudiados.....16
Tabla 2. Estimación de la absorción dermal de arsénico por recreación en Xiloá. 82
Tabla 3. Estimación de la ingestión de arsénico por recreación en Xiloá. 83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa altimétrico, Península de Chiltepe.....25
Figura 2. Mapa geológico, Península de Chiltepe. Tomado de (INETER, 2020). 28
Figura 3. Mapa litológico, Península de Chiltepe.....29
Figura 4. Sucesión de la formación de la Tefra de Chiltepe y distribución por edades aproximada de las lavas asociadas. 30
Figura 5. Mapa de ubicación del área de estudio.....32
Figura 6. Ubicación de puntos de muestreo.....38
Figura 7. Mapa de isofreáticas en la península de Chiltepe, noviembre 2020. 41
Figura 8. Mapa de isofreáticas en la península de Chiltepe, marzo 2021. 42
Figura 9. Mapa de rangos de temperatura en la península de Chiltepe. 45
Figura 10. Mapa de valores de conductividad eléctrica subterránea, península de Chiltepe, marzo 2021. 47
Figura 11. Mapa de valores de conductividad eléctrica subterránea, península de Chiltepe, marzo 2021. 48
Figura 12. Mapa de variación de pH, en la península de Chiltepe 2020-2021.....50
Figura 13. Mapa de variación de pH, en la laguna de Xiloá 2020-2021. 51
Figura 14. Mapa de variación redox, en la península de Chiltepe 2020-2021. 53
Figura 15. Mapa de variación de redox, en la Laguna de Xiloá 2020-2021.....54
Figura 16. Variación estacional de las concentraciones de Arsénico del agua subterránea y superficial de la península de Chiltepe. 56

Figura 17. Variación estacional de las concentraciones de Arsénico de la Laguna de Xiloá. 56
Figura 18. Mapa de la distribución espacial de las concentraciones de Arsénico en la Península de Chiltepe, Noviembre (2020). 58
Figura 19. Mapa de la distribución espacial de las concentraciones de Arsénico en la Península de Chiltepe. 59
Figura 20. Gráfico de especie más probable de Arsénico según valores de Eh y pH, para las aguas subterráneas de la península de Chiltepe. 61
Figura 21. Gráfico de especie más probable de Arsénico según valores de Eh y pH, para las aguas superficiales de la península de Chiltepe 61
Figura 22. Gráfico de relación entre las concentraciones de Arsénico, y valores de pH de las aguas subterráneas de la península de Chiltepe. 63
Figura 23. Gráfico de relación entre las concentraciones de Arsénico, y valores de pH en las aguas superficiales de la península de Chiltepe. 63
Figura 24. Composición isotópica de las aguas subterráneas de la península de Chiltepe, noviembre2020. 67
Figura 25. Composición isotópica de las aguas subterráneas de la península de Chiltepe, marzo 2021. 68
Figura 26. Composición isotópica de las aguas superficiales de la península de Chiltepe, noviembre 2020. 69
Figura 27. Composición isotópica de las aguas superficiales de la península de Chiltepe, marzo 2021. 70
Figura 28. Gráfico comparativo entre la dispersión de la composición isotópica de las aguas de la península, respecto a la línea meteórica mundial y local, marzo (2021). 72
Figura 29. Gráfico comparativo entre la dispersión de la composición isotópica de las aguas de la península, respecto a la línea meteórica mundial y local, noviembre (2020). 72
Figura 30. Gráfico de clasificación de las aguas de la península, según el D-excess, noviembre (2020). 74
Figura 31. Gráfico de clasificación de las aguas de la península, según el D-excess, marzo (2021). 74

Figura 32. Gráfico de clasificación de las aguas de la península, según el Lc-excess, noviembre (2020). 76
Figura 33. Gráfico de clasificación de las aguas de la península, según el Lc-excess, marzo (2021). 76
Figura 34. Ilustración sobre el comportamiento de distintos parámetros en la zona sur-este de la península de Chiltepe, marzo 2021. 80
Figura 35. Ilustración sobre el comportamiento de distintos parámetros en la zona sur-este de la península de Chiltepe, noviembre 2020. 80
Figura 36. Meta 1: disminuir la exposición ante arsénico por recreación directa en la laguna de Xiloá. 85
Figura 37. Meta 2: mitigar las posibles afectaciones que puedan darse producto de entrar en contacto con las aguas enriquecidas en arsénico de Xiloá. 86
Figura 38. Meta 3: Diagnosticar el estado actual de la población local, respecto a hidroarsenicismo y relacionarlo a las condiciones del entorno. 87
Figura 39. Meta 4: Mantener y mejorar las condiciones de calidad del agua en laguna de Xiloá a razón de mantener el arsénico en su estado menos toxico. 88
Figura 40. Meta 5: Consolidad el conocimiento generado en todos los sectores sociales y políticos a través de un proceso de comunicación y difusión. 89

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Especificación de los Análisis realizados en cada punto. 96
Anexo 2.Especificación de los Análisis realizados en cada punto. 97
Anexo 3. Concentraciones medidas con Digital Arsenator vs soluciones del estándar de Arsénico. 98
Anexo 4. variabilidad de las mediciones de la concentración de Arsénico en el agua subterránea, lago Xolotlán y Apoyeque. 98
Anexo 5. Variación y Composición isotópica de las aguas, respecto a δ 2H (‰) SMOW y δ 18O (‰) SMOW 99
Anexo 6. Caracterización y variación estacional de las aguas, respecto a D-excess y Lc-excess. 100

Anexo 7. Parámetros de campo registrados en la península de Chiltepe, 2020-2021. 101
Anexo 8. . Parámetros de campo registrados en la en aguas superficiales de la península de Chiltepe, 2020-2021 102
Anexo 9. Estaciones de reconocimiento geológico. 103
Anexo 10. Evidencias de gira de campo preliminar. 104
Anexo 11. Monitoreo de niveles en la península. 105
Anexo 12. muestreo para el análisis isotópico. 106
Anexo 13. Formaciones y estructuras identificadas en el reconocimiento geológico. 107
Anexo 14. Uso del Arsenator digital para el análisis de muestras. 108
Anexo 15. Aguas superficiales muestreadas (Xolotlán, Xiloá, Apoyeque). 109
Anexo 16. Constantes de permeabilidad para especies individuales de arsénico a través de la piel humana. 110
Anexo 17. Modelo geotérmico conceptual, Managua Chiltepe, Nicaragua. 111
Anexo 18. Batimetría de la laguna de Xiloá. 112
Anexo 19. Carácter hidroquímico de los cuerpos de agua de la península de Chiltepe. 113

ÍNDICE DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

As: Arsénico

OMS: Organización Mundial de la Salud

OPS: Organización Panamericana de la Salud

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

HACRE: Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico

INTUR: Instituto Nicaragüense de Turismo

INETER: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales

CNE: Comisión Nacional de Energía

MARENA: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales

ANA: Autoridad Nacional del Agua

GWP: Global Water Partnership

CAPRE: Consejo de Aguas Potables y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana

SMOW: Standard Mean Ocean Water

IGM: Instituto Geográfico Militar

MMA: Ion Monometilarsónico

DMA: Ion Dimetilarsínico

pH: Potencial de Hidrógeno

Eh: Potencial Redox

OD: Oxígeno Disuelto

$_{18}$**O:** Isótopo de Oxígeno-18

$_{2}$**H:** Deuterio

µg/L: Microgramos por Litro

µS/cm: Microsiemens por Centímetro

RESUMEN

Autor: Keneth P. Morán G.

Título: Estudio de la relación entre la contaminación por arsénico y la dinámica hidrogeológica de la península de Chiltepe, con énfasis en el área recreativa de Xiloá.

Año de publicación: febrero 2025

El estudio analiza la relación entre la contaminación por arsénico (As) y la dinámica hidrogeológica de la península de Chiltepe, con énfasis en la laguna de Xiloá. La metodología empleada para la caracterización del sistema incluyó técnicas avanzadas, como el uso de isótopos ambientales (deuterio y oxígeno-18), análisis de parámetros fisicoquímicos, medición de concentraciones de arsénico y un levantamiento de datos hidrogeológicos. Los resultados muestran que las concentraciones de arsénico en las aguas superficiales y subterráneas superan significativamente los límites para consumo humano establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En particular, esta investigación expone que la laguna de Xiloá presenta altos niveles de contaminación por este metaloide, rebasando incluso los valores recomendados para recreación. Además, se comprobó que este cuerpo de agua descarga hacia un sector del acuífero ubicado al suroeste, alterando significativamente la calidad del agua subterránea. En lo referente a recreación, considerando el grado de contacto, el potencial de absorción dérmica y las concentraciones encontradas en la laguna de Xiloá; se proponen medidas de recreación segura, buscando ante todo conservar el potencial turístico de la zona y, al mismo tiempo, proteger la salud pública. Se diseñó una estrategia primaria, estableciendo metas enfocadas en la divulgación, prevención y mitigación.

Palabras clave: Contaminación por arsénico, recreación, acuífero, lagunas, sistema hidrogeológico, salud pública.

I. INTRODUCCIÓN

En América Latina las aguas enriquecidas con arsénico (As) se suelen asociar con áreas de vulcanismo activo y flujos geotérmicos (López et al., 2012). Sin embargo también se presenta en lagunas cratéricas (López, & Bundschuh, 2009), lagos próximos a descarga de manantiales y en ríos (Birkle & Bundschuh, 2007). En Nicaragua se ha comprobado ampliamente la presencia y origen del As en distintas zonas, encontrándose que el 7% de los puntos de abastecimiento están contaminados por este metaloide tóxico (OPS & OMS, 2015). Esta situación es preocupante debido a que el arsénico es mundialmente conocido por ser un agente carcinogénico, cuando éste se encuentra en concentraciones superiores a 10 $\mu g.L^{-1}$ en aguas de consumo humano (Medina-Pizzali, et al., 2018).

Los estudios a nivel nacional sugieren que el origen del As en el agua subterránea se debe al vulcanismo, ya sea por contacto con rocas volcánicas o fluidos geotérmicos (González et al., 2019). En la península de Chiltepe, de acuerdo con los hallazgos del Plan geotérmico Nacional de Nicaragua (Comisión Nacional de Energía, 2001), la composición química de las aguas subterráneas sugiere la presencia de un significativo aporte de aguas geotérmicas profundas, las cuales pueden provocar altas concentraciones de As.

De forma consecuente Parello et al., (2008) determina que este contaminante se encuentra presente en las aguas subterráneas en concentraciones hasta de 22 $\mu g.L^{-1}$, mientras que en las superficiales (Xiloá), se registran hasta 723 $\mu g\ L^{-1}$. Estos antecedentes resultan alarmantes, ya que a esta laguna ingresan más 200,000 bañistas al año (INTUR, 2018), los cuales están nadando en altas concentraciones de arsénico.

El objetivo principal de esta investigación es establecer la relación entre la contaminación por arsénico y la dinámica hidrogeológica, como herramienta para la recomendación de medidas de recreación en el área recreativa de Xiloá. Para lograrlo, se caracterizó el sistema hidrogeológico de la península, por medio de técnicas isotópicas ($^{18}\delta$ y $^{2}\delta$); determinación de concentraciones de As; medición parámetros fisicoquímicos del agua y niveles piezométricos.

Finalmente, estos hallazgos permitirán recomendar medidas que fomenten el uso seguro del área recreativa de Xiloá, ya que las concentraciones reportadas exceden el valor

recomendado para la natación equivalentes a 200 μg. L^{-1} (OMS, 2021). Cabe recalcar que el enfoque de este estudio no ha sido abordado con anterioridad en la zona, por lo que su desarrollo brindará un nuevo conocimiento científico de relevancia.

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Caracterización del problema

A nivel latinoamericano existe un interés marcado en estudiar el arsénico (As) en el medio subterráneo, ya que usualmente representa un problema de salud pública endémico de nuestra región (Martínez, 2018). En Nicaragua se ha detectado contaminación por arsénico en más de 80 comunidades rurales del país y se ha identificado intoxicación por arsénico en al menos seis de esas comunidades (González et al., 2019); Esta situación resulta alarmante, ya que dicho contaminante es responsable de causar enfermedades carcinogénicas y no carcinogénicas (Chakrabarti & Rahman, 2019); reportando serias sintomatologías, como lo son: parestesia, edema en las extremidades inferiores, ardor ocular, migraña, dolor abdominal, manifestaciones en la piel y sistemas respiratorios (Gómez, A,. 2002).

Actualmente en Nicaragua respecto al arsénico, se han estudiado algunos acuíferos y lagunas (Valle de Sébaco, La paz Centro, Laguna de Apoyo, Asososca, Nejapa, Acahualinca, entre otros), en donde se describe su origen, concentraciones e impacto a las poblaciones expuestas. En la Península de Chiltepe y la laguna de Xiloá, si bien existen antecedentes de enfoque similar; estos no describen a profundidad la contaminación por As, su relación con el medio hidrogeológico y posibles impactos a los usuarios. Lo cual es inquietante, ya que, la recreación en Xiloá es una actividad notablemente popular; con gran afluencia de visitantes, que no cuentan medidas de precaución al entrar en contacto con estas aguas. Por lo tanto, este grupo de vacíos de información y propuestas ha dado paso al desarrollo de esta investigación.

1.1.2 Delimitación del problema

Nicaragua posee numerosos cuerpos de agua que reportan concentraciones de Arsénico superiores a los 10 μg/L; entre ellos podemos mencionar: el agua subterránea de La Paz Centro, León (Altamirano & Delgado, 2020), distintas zonas del Valle Sébaco, y

lagunas cratéricas como la de Montegalán, Asososca-León, y Apoyo (Delgado, et al,. 2020). Para la Península de Chiltepe, la evidencia científica indica que el que el agua subterránea de esta zona presenta concentraciones que van desde 2.20 a 26,9 µg/L de As. Y respecto a las aguas superficiales, en la laguna de Xiloá, se registraran hasta 723 µg/L (Parello et al., 2008). A pesar de estos hallazgos, no existe un estudio actualizado sobre la distribución y comportamiento del dicho contaminante en la zona, ni se ha descrito el posible impacto que pueda tener sobre la población.

En adición, la laguna de Xiloá representa un importante centro turístico en donde ingresan más 200,000 bañistas al año (INTUR, 2018) que entran en contacto directo con aguas enriquecidas en arsénico, sin precaución alguna; teniendo así, un escenario complejo que debe estudiarse a fondo, y más aún, si consideramos que este contaminante puede ingresar al cuerpo humano a través de la ingesta, y en menor grado por absorción dérmica (Medina-Pizzali et al., 2018).

Si bien no existen normativas nacionales de calidad de agua para uso recreacional, según la Organización mundial de la Salud, un acercamiento válido es considerar que la concentración de un determinado contaminante es preocupante, si la misma se encuentra en una magnitud 20 veces mayor a la establecida para el consumo humano. Por lo tanto las concentraciones de As en aguas de recreación, empiezan a ser alarmantes a partir de los 200 $\mu g.L^{-1}$ (World Health Organization, 2003).

El hecho de que un cuerpo de agua exceda los límites provisionales para recreación, no necesariamente implica un grave problema, más que todo sugiere la necesidad de investigar sobre el efecto de la concentración del contaminante, sobre la población que hace un uso continuo del cuerpo de agua, la especiación y así como el tipo de contacto que se tiene con dicha agua (World Health Organization, 2003). En este sentido, este trabajo se enfoca en investigar los factores naturales que influyen en la concentración del As en la Península de Chiltepe, con mayor énfasis en la Laguna de Xiloá, a fin de determinar su zonificación y establecer recomendaciones para la recreación.

1.1.3 Preguntas de sistematización

Ante esta incertidumbre, el investigador genera la siguiente indagación; ¿Cuál es la relación entre la contaminación por arsénico y la dinámica hidrogeológica de la península de Chiltepe, y qué proponer ante concentraciones elevadas?

Para dar réplica a la interrogante principal de la investigación se generaron las siguientes preguntas específicas:

1. ¿A qué concentraciones se detectará el arsénico en la laguna de Xiloá y en su zona circundante?
2. ¿Cómo se caracteriza el sistema hidrogeológico de la península de Chiltepe?
3. ¿Qué medidas, que fomenten la recreación segura, se podrán recomendar ante la contaminación por arsénico en la laguna de Xiloá?

1.2 Antecedentes

En Nicaragua se cuenta con diversos estudios e investigaciones que abordan la temática de contaminación por arsénico en aguas. Los primeros indicios de arsénico se registran el año 1996, en donde por primera vez en el país se descubre la presencia de este metal en altas concentraciones a en las aguas subterráneas captadas en algunos pozos perforados en la comunidad El Zapote, municipio de San Isidro, departamento de Matagalpa. (OPS & ENACAL, 2004).

Esta temática de contaminación por arsénico se estudió detalladamente en el Valle de Sébaco en el 2005. En esta zona se investigó la distribución en el agua subterránea de la subcuenca suroeste (Altamirano, 2005) en donde a través de las caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica, se determinó, que las concentraciones de arsénico más elevadas, se encuentran asociadas a sistemas de fallas secundarias E-W. Las mayores concentraciones se encontraron en los pozos perforados más profundos, como los de la comunidad de El Zapote con una concentración de 1320 $\mu g\ l^{-1}$. Se aclara también que en el área, el arsénico se encuentra naturalmente, debido a la intensa alteración hidrotermal local, producto del vulcanismo extinto del terciario, que propicia la liberación desde las estructuras

mineralizadas, conducido a las aguas subterráneas a través de fallas y fracturas que sirven como conducto (Altamirano, 2005).

Otro antecedente nacional de este tipo de investigación es el estudio de Altamirano & Delgado (2020), en el cual se realizó una compilación detallada de estudios geológicos, químicos e hidrogeológicos, para evaluar la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la comunidad rural, La Fuente, en La Paz Centro, León. En el mismo, finalmente se encontró, que el 70% de los puntos muestreados reportan concentraciones de arsénico total que superan el valor guía de 10 $\mu g \cdot l^{-1}$ de arsénico en agua, establecidos en la Norma Regional CAPRE, lo cual es un peligro latente para la salud de la población de La Fuente.

En esta misma línea de investigación, en el 2017 se realizó un estudio en Granada, Nicaragua con el fin de determinar la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas del sector sur del volcán Mombacho. En este se encontró, que las mayores concentraciones de arsénico se encuentran en la zona de descarga del sistema geotérmico (hasta 94 $\mu g \cdot l^{-1}$). Y que contrario a lo esperado, los pozos ubicados en la zona presentan concentraciones particularmente bajas (< 11 $\mu g \cdot l^{-1}$ As); Esto debido a un proceso de mezcla del acuífero y la zona de descarga del sistema geotérmico (Martínez & Reynal, 2017).

Respecto a lagunas cratéricas, a nivel nacional, se han realizado distintas investigaciones, dentro de éstas: "Estudio hidrogeológico sobre el área de las lagunas de Nejapa, Asososca y Acahualinca" realizado por Montgomeri-Santos & Hielemann-Chan en 1979, donde se describió las características geológicas, hidrogeológicas y de calidad del agua; para Nejapa, se encontraron concentraciones elevadas de aniones y sólidos totales disueltos; y que por la baja permeabilidad del sedimento de fondo, no hay un flujo desde esta laguna hacia el acuífero regional. Para Asososca se determinó que sus aguas son de buena calidad para consumo humano, sin embargo, las extracciones locales han invertido la pendiente hidráulica entre la laguna y el lago de Managua, exponiendo a esta laguna a la contaminación. Para Acahualinca se registró una contaminación por alta turbidez y materia orgánica, lo que a su vez puede estar contribuyendo a impermeabilizar el fondo y retardar la percolación hacia el acuífero regional. Finalmente respecto al lago de Managua, se asume

que hay un movimiento de agua subterránea hacia el sur, y que si este continúa, entrará en contacto con los acuíferos subyacentes (Montgomeri-Santos & Hielemann-Chan, 1979).

Para la laguna de Asososca, se analizaron plomo, arsénico, cadmio y cobre en agua y sedimento, encontrando concentraciones de As que fluctuaron entre valores menores al límite de detección y 15.77 $\mu g.L^{-1}$ (media de 5.86 $\mu g.L^{-1}$). Los resultados detectaron también que las concentraciones de As de Asososca disminuían para el sétimo mes, lo cual llevo a concluir que la descarga del acuífero Las Sierras (menos enriquecido en As), contribuía a diluir las concentraciones de As en el Lago Xolotlán. Los autores exponen también, que en estudios anteriores no publicados para la Laguna de Monte Galán (también de origen volcánico), se detectaron concentraciones de 25 $\mu g.L^{-1}$ de este contaminante, atribuidos a fuentes naturales (Cruz et al., 1991).

Por otra parte, en el volumen VI del plan Geotérmico Nacional, aborda también el área de El Hoyo-Monte Galán y dentro de los resultados obtenidos, se sugiere la existencia de un flujo de agua geotérmica que va desde abajo del volcán El Hoyo, que se desplaza hacia el E y el SE, fluyendo por debajo del acuífero freático del valle ubicado entre el macizo de El Hoyo y la caldera del Galán. Los acuíferos someros estarían aislados desde el subyacente flujo de aguas geotérmicas por una capa sello de baja permeabilidad, así que solo limitadas porciones del agua geotérmica profunda logran subir a la superficie para mezclarse con las aguas de acuífero. Se encontraron anomalías de temperatura en aguas (40-50°C) con contenidos cloro, boro y sulfato superiores a los límites permisibles para consumo humano, lo que indicarían contaminación por mezcla con fluidos geotérmicos de origen profundo. En general el estudio revela que las lagunas de Monte Galán y las piedras (ambas al interior de la caldera de Galán), se encuentran aisladas y con poca conexión con el acuífero y alimentados principalmente por aguas meteóricas, aunque sus características químicas sugieren algún tipo de aporte (activo o fósil) de fluidos profundos.

Se estudió también en 1999 el lago Xolotlán, evaluando la posible intrusión de agua contaminada desde éste, hacia los acuíferos que lo rodean, utilizando técnicas químicas e isotópicas (deuterio, ^{18}O, tritio y ^{14}C). La investigación reveló que las aguas subterráneas que se extraen en las proximidades (zonas de Las Mercedes, Tipitapa, Chiltepe y laguna de Asososca) no contenían hasta el momento del estudio, fracciones significativas de agua

procedente del Xolotlán. Ello se explica por la colmatación del fondo de este último por los sedimentos depositados. Sin embargo, las concentraciones de tritio y de carbono-14, así como las características hidroquímicas de las aguas subterráneas indican que los acuíferos explotados son de libre recarga en la mayoría de los puntos y, por tanto, vulnerables a contaminación. Los datos isotópicos indican que la composición del agua del Lago de Managua es significativamente diferente a la de las aguas subterráneas de la zona de estudio, incluyendo las provenientes de la península de Chiltepe, donde se ubica el área objeto de esta investigación. Debido a la fuerte evaporación, el agua del Lago de Managua está altamente enriquecida en los isótopos de deuterio y oxígeno-18 en comparación con las aguas subterráneas de la región (Plata et al., 1999).

En el documento de Delgado *et al*, titulado: Arsénico en geo-ambientes de Nicaragua, se expone una compilación de estudios que evaluaron arsénico en la mayoría de los cuerpos de agua del país, de los cuales la laguna de Xiloá presenta la mayor concentración de este elemento entre todos los lagos y lagunas de Nicaragua. Se destaca la baja concentración de arsénico en la Laguna de Apoyeque en comparación con la Laguna de Xiloá, a pesar de que ambas se encuentran en la misma península y comparten el mismo ambiente geológico. Esta diferencia se debe al aislamiento de Xiloá, ubicado entre las fallas de los Maribios y Nejapa, lo que favorece su enriquecimiento en arsénico, alimentado por los sistemas geotérmicos y flujos subterráneos creados o condicionados por las fallas (Delgado et al., 2020).

El primer registro de los altos niveles de arsénico en la Península de Chiltepe, del cual se tiene acceso, es la caracterización geoquímica de las aguas superficiales y recursos subterráneo en Managua-Nicaragua, realizado por Parello et al, (2008), en donde se midieron concentraciones de As en aguas superficiales y subterráneas. Respecto a la laguna de Xiloá, el 62% de las muestras se encontraron sobre los 500 $\mu g.L^{-1}$, un máximo de 723 $\mu g.L^{-1}$, y una media de 440 $\mu g.L^{-1}$; para la laguna de Apoyeque se determinaron concentraciones de 39.2 $\mu g.L^{-1}$. Respecto a los pozos de la península, en los perforados se registraron concentraciones máximas de 21.80 $\mu g.L^{-1}$ y una media de 10.7 $\mu g.L^{-1}$. Cabe señalar que este estudio midió concentraciones de As para otras lagunas cratéricas como Apoyo (120 $\mu g.L^{-1}$), Nejapa (0.85 $\mu g.L^{-1}$), Asososca (5.41 $\mu g.L^{-1}$), Monte Galán (15.3 $\mu g.L^{-1}$), y Masaya (0.6 $\mu g.L^{-1}$).

De igual forma es necesario contemplar para este estudio el Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, evaluando el área de Managua-Chiltepe, realizado en el 2001 por la Comisión Nacional de Energía, en cual se recopila gran parte de la información geológica, vulcanológica e hidrogeológica disponible de la zona. Específicamente, para la laguna de Xiloá, se llevaron a cabo mediciones y toma de muestras representativas del cuerpo de agua para la determinación del contenido de cationes y aniones. Se registraron también los pozos perforados o excavados en la península. De este levantamiento se encontró que en las proximidades a la laguna de Xiloá (los Bosques de Xiloá), parte de los pozos presentaron aguas con temperatura anómala, alcanzando valores en el rango de los 40-45°C.

Respecto a Xiloá, se detalla, además, que existe una interconexión a nivel del acuífero freático regional que es, por lo tanto, la principal fuente de alimentación de esta laguna. La composición química de las aguas indica, la presencia de un significativo aporte de aguas geotérmicas profundas en este cuerpo de agua.

Otro estudio que toma como contexto a la laguna de Xiloá, es la tesis realizada por Solórzano (2013) que elaboró un plan maestro del centro turístico recreativo "Bosques de Xiloá" en la comunidad bosques de Xiloá del municipio de Mateare. Para ello elaboró una "Matriz de Afectaciones y Potencialidades del Sitio" y un FODA, que dejó ver la carencia e inadecuada gestión urbana del sitio. Se analizaron definiciones, normativas y criterios de diseño nacional e internacional, modelos análogos tanto nacional, como internacional que aportaron criterios básicos para la creación del FODA, en la cual se aplicaron principios sustentables, sistemas constructivos propios de la zona y desarrollo de espacios y actividades que fomentan la interacción directa con el usuario y el entorno natural. (Solórzano, 2013).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Establecer la relación entre la contaminación por arsénico y la dinámica hidrogeológica de la península de Chiltepe, como herramienta para la recomendación de medidas de recreación en el área recreativa de Xiloá.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el sistema hidrogeológico de la península de Chiltepe.
- Describir la relación entre las concentraciones de arsénico en agua, y la dinámica hidrogeológica de la península de Chiltepe.
- Recomendar medidas de prevención y protección para fomentar la recreación segura en el área recreativa laguna de Xiloá.

1.4 Justificación

El arsénico es una de las 10 sustancias químicas que la OMS considera como más preocupantes para la salud (Herrera et al., 2013). Y debido a su relevancia, es abordado dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Este contaminante, está ampliamente distribuido en el área de estudio (Península de Chiltepe) alcanzando altas concentraciones tanto subterránea como superficialmente.

En adición a esta problemática, el área recreativa de Xiloá registra elevadas concentraciones de As y una considerable afluencia de usuarios. Que, desde la perspectiva de la salud pública, supone un riesgo importante; lo cual, hace necesario estudiar esta laguna, a manera que sea posible describir los impactos potenciales y formular medidas que garanticen una experiencia recreativa segura.

Lo anterior evidencia la importancia de llevar a cabo esta investigación, la misma será novedosa por realizar una evaluación actualizada de las concentraciones de arsénico en la laguna de Xiloá, y aguas subterráneas circundante, así como establecer su relación con la dinámica del flujo subterráneo, lo cual nos permitirá proponer medidas para la recreación segura en ese sitio turístico.

Es relevante resaltar, que esta investigación se enmarca en el objetivo número tres de los ODS, que dicta asegurar una vida saludable y promover el bienestar a todas las edades. Se ajusta también, a la agenda del Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional de Nicaragua, que propone implementar monitoreos de calidad de agua respecto a niveles de arsénico, para la seguridad de la población. Y a su vez, complementa el Plan de Acción para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de Nicaragua (2022 – 2026), que plantea fortalecer el monitoreo de los recursos hídricos, a travéz de investigaciones dirigidas a los acuíferos, e investigaciones aplicadas en temas GIRH (MARENA, ANA, & Global Water Partnership, 2022). De modo que, la realización de esta investigación es un aporte significativo a las metas planteadas nacional e internacionalmente, marcando un impacto positivo en múltiples dimensiones.

1.5 Planteamiento hipotético

Hipótesis general: En el medio subterráneo de la península de Chiltepe y en la laguna de Xiloá, se presentan altas concentraciones de arsénico, influenciadas fuertemente por la geología local, lo que podría afectar la calidad del agua subterránea y generar condiciones desfavorables para los usuarios del área recreativa.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Calidad de agua

De acuerdo con múltiples organismos internacionales, la calidad del agua se puede entender como las condiciones en que se encuentra el agua respecto a características físicas, químicas y biológicas, en su estado natural o después de ser alteradas por actividades antropogénicas. Esta definición ha sido asociada principalmente al consumo humano, sin embargo, dependiendo de otros usos también se puede definir la calidad del agua en función de estos (riego, acuicultura, recreación etc.) (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2016).

El uso clásico de los análisis de agua en hidrología es mostrar la distribución regional de las composiciones del agua en un mapa, que sirven a las autoridades ambientales y administradores de recursos hídricos, para identificar acuíferos con agua subterránea de buena calidad (Appelo & Postma, 2005). El problema que enfrenta la ciencia actualmente es identificar las áreas y los mecanismos por los cuales los contaminantes pueden ingresar al flujo de aguas subterráneas. y desarrollar predicciones confiables del transporte de contaminantes dentro de los sistemas de flujo (Freeze & Cherry, 1979).

2.2 Hidroquímica del agua

Se considera la composición química, al conjunto de substancias (generalmente inorgánicas) incorporadas al agua por procesos naturales; como lo son las interacciones químicas y bioquímicas entre el agua y los materiales geológicos a través de los cuales fluye, y en menor medida debido a las contribuciones de la atmósfera y las masas de agua superficial, lo cual provee a estos cuerpos de agua una amplia variedad de componentes químicos inorgánicos disueltos en diversas concentraciones (Freeze & Cherry, 1979; IGM, 1985).

En un agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico, unos cuantos de estos iones se encuentran presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos; y sobre ellos descansará la mayor parte de los aspectos químicos e hidrogeoquímicos. Custodio & Llamas, 1976). Aunque la composición media del agua subterránea suele considerarse invariable en un acuífero o porción del mismo, no debe olvidarse que las interacciones agua-medio que determinan dicha composición son procesos dinámicos, por lo que la composición del agua subterránea natural debe contemplarse con la perspectiva de su posible variación espacio-temporal (IGM, 1985).

2.3 Parámetros físicos del agua

2.3.1 pH

El pH está íntimamente relacionado con los cambios de acidez y basicidad, y con la alcalinidad, su abreviatura representa el potencial de hidrogeniones (H^+). La notación pH expresa la intensidad de la condición ácida o básica de una solución. En aguas completamente puras, la relación del número de H+ y de OH- es de 1.0, siendo por tanto la relación general de carácter neutro. (Roldán, 2008). Este parámetro interviene enormemente en procesos químicos y biológicos de las aguas subterránea naturales, procesos redox, controla los procesos de solubilización de los metales, sirve para entender el conjunto de reacciones químicas que se producen por la formación, descomposición y disolución de las sustancias minerales en contacto con las aguas (Custodio & Llamas, 1976). La caída de una unidad de pH puede generar un aumento a más de un orden de magnitud de concentración de ciertos metales, y un cambio de condiciones oxidantes a condiciones reducidas puede tener un efecto similar (Edmunds & Smedley, 1996).

2.3.2 Alcalinidad

La alcalinidad de un agua determina su capacidad para neutralizar ácidos, En la mayoría de las aguas naturales la alcalinidad está producida prácticamente por los iones carbonato y bicarbonato, aunque en ocasiones otros ácidos débiles como el silícico, fosfórico, bórico y ácidos orgánicos pueden contribuir de forma notable al desarrollo de esta propiedad. (IGM, 1985).

2.3.3 Potencial redox

El potencial redox es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones (IGM, 1985). Numerosos elementos poseen diversos estados de oxidación a los que van ligadas propiedades características de cambios de solubilidad en el momento de formar compuestos. Reacciones en que se producen cambios en el estado de oxidación pueden facilitar entonces la solubilización de diferentes elementos. Reacciones de este tipo son las de oxidación de sulfuros. Reducción de sulfatos, oxidación-reducción de hierro y manganeso. Procesos de nitrificación. etc. (IGM, 1985).

2.3.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para conducir electricidad, como consecuencia de su contenido iónico, a medida que la concentración iónica aumenta, también aumenta hasta cierto límite la conductividad o capacidad de un agua para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medida es el µS/cm (microsiemens/cm). La variación de temperatura modifica notablemente la conductividad. Para disoluciones diluidas, se estima que el aumento de temperatura en 1°C, se traduce en un aumento de alrededor del 2% en la conductividad. Para aguas dulces oscilan entre 100 y 2000 µS/cm a 18°C, y en salmueras pueden alcanzarse valores de 100000 µS/cm. (Roldán, 2008) (Custodio & Llamas, 1976) (IGM, 1985).

2.3.5 Temperatura del agua

La temperatura del agua subterránea es un parámetro de muy fácil registro y que brinda información valiosa de las condiciones del medio en la cual esta almacenada, generalmente la temperatura del agua subterránea oscila en intervalos muy reducidos y se aproxima a los datos de temperatura media anual de la zona. Un caso distinto son las aguas termales, que, debido a interacciones de origen geológico, presentan una temperatura mayor a la media anual (Glynn & Plummer, 2005).

2.4 Contaminación por arsénico en el medio hidrogeológico

2.4.1 Generalidades

El As elemental es un material sólido de color gris acero. Sin embargo, en el ambiente se encuentra combinado con otros elementos como por ejemplo oxígeno, cloro y azufre. El arsénico combinado con estos elementos se conoce como arsénico inorgánico. El arsénico combinado con carbono e hidrógeno se conoce como arsénico orgánico. La mayoría de los compuestos inorgánicos y orgánicos de As son polvos de color blanco que no se evaporan. No tienen olor y la mayoría no tiene ningún sabor especial, por esta razón generalmente no se puede saber si están presentes en los alimentos, el agua o el aire (ATSDR, 2007).

El arsénico existe en la naturaleza en una variedad de formas químicas, como resultado de su participación en complejos biológicos, productos químicos y algunas aplicaciones industriales, como fabricación de determinados materiales de vidrio; tratamiento de determinadas enfermedades; en la agricultura como herbicidas, insecticidas y defoliantes. También la flora y fauna marina contienen compuestos de arsénico, porque en las vías metabólicas el nitrógeno y el fósforo pueden ser intercambiado fácilmente por arsénico. (Barra et al, 2000).

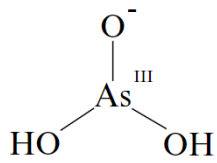
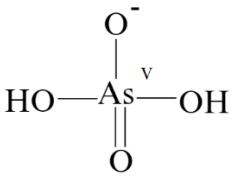
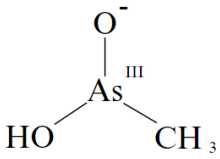
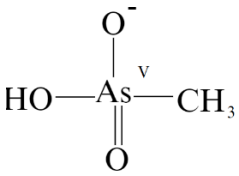
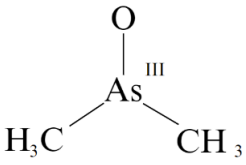
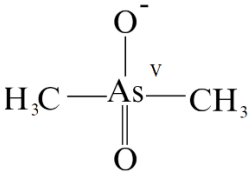
2.4.2 Origen en el medio subterráneo

El arsénico se puede encontrar en aguas subterráneas y en agua superficiales. Sin embargo, es más frecuente en aguas subterráneas, porque el mineral que se encuentra en el subsuelo, al estar tanto tiempo en contacto con el agua, termina por disolverse. Este proceso de disolución, por ser largo, produce altas concentraciones de este metaloide en el agua (Sepúlveda, 2009). El arsénico geogénico en el agua subterránea afecta a más de 296 millones de vidas en más de 100 países alrededor del mundo. Este elemento puede presentarse en cinco estados de valencia, de los cuales aquellos que se presentan en forma inorgánica, el arsenito ($H_nAsO_3^{3-n}$), la más tóxica y arsenato ($H_nAsO_4^{3-n}$), ambas son las especies más abundantes en el medio subterráneo (Chakrabarti et al., 2019). El As ocurre como elemento traza, especialmente concentrada en minerales sulfúricos como en el oropimento (As_2S_3), la arsenopirita (FeAsS), realgar (AsS) y la enargita (Cu_3AsS_4) (Edmunds & Smedley, 1996).

2.4.3 Compuestos más estudiados

Los altos niveles de toxicidad del arsénico son muy conocidos, ya que los compuestos de arsénico se absorben fácilmente, tanto por vía oral como por inhalación, dependiendo el grado de absorción de la solubilidad del compuesto. En la tabla N°1 se presentan algunas especies de arsénico de interés en estudios de especiación, con sus respectivos valores de pK_a, que dan una idea de las posibles formas en función del pH.

Tabla 1. Compuestos de arsénico más estudiados

Compuesto	*Fórmula*
Arsenito	
Arsenato	
Metil Arsenito	
Metil Arsenato	
Dimetil Arsenito	
Dimetil Arsenato	

Fuente: (Hung, Nekrassova, & Compton, 2004)

2.4.4 Arsénico en medios geotermales

Se reconoce que los sistemas geotérmicos representan una importante fuente de contaminación natural por arsénico de las aguas subterráneas en todo el mundo. En un sistema geohidrotermal se da la circulación de agua a través a fallas subterráneas y grietas en las rocas, en estos sistemas ocurren interacciones entre la roca huésped y el agua a medida que el fluido calentado asciende a la superficie provocando la disolución de minerales. El

arsénico se libera principalmente en el líquido caliente de la roca huésped en forma arsenito inorgánico (As^{+3}), formando un metal hidratado simple.

El arsenito puede oxidarse a Arsenato (As^{+5}) al mezclarse con agua o aire, aunque esta oxidación puede no ocurrir en aguas termales hasta que todo el sulfuro disponible se haya oxidado a sulfato. Manantiales alcalino-clorurados, con una relación alta de Cl/SO_4 sugieren una descarga directa del fluido térmico profundo del sistema. En estos manantiales el estado de oxidación predominante del arsénico es As^{+3}, por el contrario, las aguas ácido-sulfatadas, que surgen a través del calentamiento con vapor de acuíferos poco profundos o manantiales bicarbonatados, contienen cantidades más variables de As^{+5} (Lord et al, 2012).

2.4.5 Estabilidad del arsénico de acuerdo con las condiciones fisicoquímicas

La concentración de arsénico en las aguas naturales está posiblemente controlada en gran medida por procesos de interacción sólido-solución. Existen dos categorías fundamentales de procesos geoquímicos de interacción entre el agua y la fase sólida, que controlarán la movilidad de arsénico: 1) reacciones de adsorción-desorción y, 2) reacciones de precipitación-disolución de la fase sólida (Appelo & Postma, 2005).

Las especies de arsénico que existen en sistemas acuosos consisten principalmente de Arsenito (As^{+3}) y de arsenato (As^{+5}), ambas altamente solubles ante un rango variable de Eh y pH. Bajo condiciones oxidantes, predomina el arsenato y este se hidroliza en cuatro posibles especies (para un pH normal de aguas naturales). Por otra parte, ante condiciones reductoras y presencia de sulfuro, predominan especies de arsenito (totalmente desprotonadas).

Es importante señalar que el arsénico es fuertemente sorbido o precipitado con el hidróxido férrico ($Fe(OH)_3$), las formas de arsenato siendo más fuertemente sorbidas que las de arsenito. Esto resulta en un potencial mayor de concentración de arsénico disuelto bajo condiciones reductoras, no solo por la menor afinidad a la sorción sino porque también el $Fe(OH)_3$ es más soluble en Eh bajos (Edmunds & Smedley, 1996).

2.4.6 Toxicidad

La toxicidad de las especies de arsénico depende principalmente de su forma química, el arsénico en aguas naturales puede ocurrir como As^{+3} (arsenito), As^{+5} (arsenato), ion monometilarsónico (MMA) e ion dimetilarsínico (DMA). El orden decreciente de toxicidad de los compuestos de arsénico, según Anderson et al., 1986 11, y Burguera et al., 1991 (citado por Barra et al., 2020), es como sigue: arsina > arsenito > arsenato > ácidos alquil-arsénico > compuestos de arsénico > arsénico elemental. El arsenito es 60 veces más tóxico que su forma oxidada pentavalente (arsenato). Las sustancias inorgánicas son 100 veces más tóxicas que las partículas metilado (MMA y DMA) (Barra et al., 2000).

La razón por la cual los arsenitos inorgánicos trivalentes son más tóxicos, es debido a que estos logran penetrar a través de las membranas biológicas con mayor dificultad, lo que explicaría el largo periodo de incubación de las enfermedades generadas, el arsénico después de ser absorbido por los tejidos, pasa al torrente sanguíneo y es distribuido en los diferentes órganos, se deposita principalmente en el riñón, corazón, pulmón y piel (Bocanegra & Bocanegra, 2002).

2.4.7 Impactos a la salud

Arsenicosis es el término más común utilizado para describir efectos a la salud, entre ellos enfermedades carcinogénicas y no carcinogénicas, generalmente ocasionadas por una prolongada exposición en el agua de consumo y alimentos (Chakrabarti et al, 2019). Aún en dosis pequeñas, ha generado diversos tipos de cáncer: de piel, pulmonar, de la vejiga y de próstata. Otras enfermedades relacionadas son: desórdenes cardiovasculares, diabetes, anemia, así como defectos inmunológicos en los procesos reproductivos y de desarrollo (Sepúlveda, 2009). Los síntomas más visibles de intoxicación por arsénico, son las manifestaciones dermales, incluso exposición a niveles bajos por largos periodos inciden en lesiones crecientes en la piel (Chakrabarti et al, 2019).

Las afecciones a la salud por arsénico también han sido denominadas por la ciencia como hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE), del cual la principal sintomatología es la queratodermia palmo plantar, que afecta al 96% de los enfermos, aparece entre uno y quince años de la ingestión de agua arsenical, es de aspecto verrugoso, aumenta

el espesor cutáneo y alteraciones en el color de la piel. Los tumores son el segundo síntoma en orden de frecuencia, generalmente aparecen en el dorso, en miembros y en el cuero cabelludo (Bocanegra & Bocanegra, 2002).

2.5 Guías de recreación segura ante Arsénico

Los contaminantes químicos pueden ingresar a las aguas de uso recreativo, tanto de forma natural como antropogénica. La exposición es uno de los aspectos clave para determinar el riesgo de efectos tóxicos de los productos químicos en las aguas recreativas. Las vías de exposición están en función del contacto directo con la superficie, incluyendo piel, ojos y membranas mucosas, inhalación e ingestión. Al evaluar el riesgo de un contaminante en particular, la frecuencia, extensión y probabilidad de exposición son partes cruciales de la evaluación (World Health Organization, 2003).

2.5.1 Grado de contacto

Los grados de contacto con el agua en entornos acuáticos recreativos, según la OMS (2003) se pueden clasificar de la siguiente manera:

• **Sin contacto:** actividad recreativa en la que normalmente no hay contacto con el agua (p. Ej., Pesca con caña desde la orilla), o donde el agua es incidental para el disfrute de la actividad (como tomar el sol en la playa).

• **Contacto incidental**: actividad recreativa en la que solo las extremidades se mojan con regularidad y en la que un mayor contacto (incluido tragar agua) es inusual, por ejemplo, navegar, pescar, vadear.

• **Contacto con todo el cuerpo:** actividad recreativa en la que se sumerge con frecuencia todo el cuerpo o la cara y el tronco o la cara se moja con frecuencia con el aerosol, y donde es probable que se trague algo de agua.

2.5.2 Potencial de absorción dermal

Si bien no se cuentan con estudios detallados de la recreación en medios acuáticos contaminados con arsénico y su impacto en la salud, el estudio realizado por Feldmann et al, (citado por Lord et al., 2012), investigó la captación y acumulación dérmica de arsenito y ácido dimetilarsínico (DMAV) en piel humana (cadáveres); la tasa de absorción de arsenato osciló entre 2,0 y 6,4% de la dosis aplicada, sin variación significativa con la concentración. Sin embargo, se encontró que el arsenito y el DMAV penetraban la piel 29 y 59 veces más alto que la tasa de arsenato, respectivamente. El arsenito también se acumuló en la piel significativamente más que arsenato y DMAV durante la exposición.

2.5.3 Concentraciones límites

No existen reglas específicas que puedan aplicarse fácilmente para calcular los valores de referencia para los contaminantes químicos en las aguas recreativas. Sin embargo, siempre que se tenga cuidado en su aplicación, las Directrices de la OMS para la calidad del agua potable (OMS, 1993, 1998) pueden proporcionar un punto de partida para derivar valores que podrían usarse, para hacer una evaluación de riesgo. En función de lo anterior, La Guía de Calidad de Agua para Recreación, presentada por la OMS (2021), estipula que para el arsénico, las concentraciones que superen 200 $\mu g.L^{-1}$ pueden ser consideradas preocupantes.

2.6 Isótopos ambientales como trazadores de flujo

Los datos hidroquímicos e isotópicos son útiles para identificar las fuentes de recarga de los sistemas de agua subterránea y para rastrear el flujo de agua subterránea. Se han utilizado también las diferencias en la composición química e isotópica, para rastrear la infiltración de agua superficial, reconocer fugas entre acuíferos, definir áreas de intrusión de agua de mar e investigar tasas de recarga a través de zonas insaturadas profundas. Los trazadores como la temperatura, ^{2}H, ^{18}O, ^{14}C, ^{3}H, He y gases disueltos, han ayudado a refinar las estimaciones de las escalas de tiempo de recarga y flujo, interpretar el origen y modo de recarga del acuífero, proporcionar información temporal y espacial útiles en la calibración de modelos de flujo de agua subterránea (Glynn & Plummer, 2005).

Los isótopos naturales que existen en el agua en el ciclo hidrológico se han utilizado en investigaciones de sistemas de aguas subterráneas y superficiales. Dentro de los isótopos

más utilizados están el tritio (^{3}H) y el carbono 14 (^{14}C), que son radiactivos, y el oxígeno 18 (^{18}O) y el deuterio (^{2}H), que no son radiactivos. Estos últimos se conocen como isótopos estables. El tritio y el deuterio a menudo se representan como T y D, respectivamente. Los isótopos ^{18}O y ^{2}H sirven principalmente como indicadores de áreas de recarga de acuíferos y como indicadores de evaporación en cuerpos de agua superficial (Freeze & Cherry, 1979).

2.6.1 Oxígeno y deuterio

Las diversas formas isotópicas del agua tienen presiones de vapor y puntos de congelación ligeramente diferentes. Estas dos propiedades dan lugar a diferencias en las concentraciones de ^{18}O y ^{2}H en el agua en varias partes del ciclo hidrológico. Cuando el agua se evapora de los océanos, el vapor de agua producido se agota en ^{18}O y ^{2}H en relación con el agua del océano, en aproximadamente un 12-15%; en ^{18}O y 80-120 %; en ^{2}H. Cuando el vapor de agua se condensa, la lluvia o la nieve que se forma tiene concentraciones de ^{18}O y ^{2}H más altas que el vapor de agua restante. A medida que el vapor de agua se desplaza tierra adentro como parte de los sistemas de circulación atmosférica regionales o continentales, y a medida que el proceso de condensación y precipitación se repite muchas veces, la lluvia se caracteriza por bajas concentraciones de los isótopos pesados ^{18}O y ^{2}H.

Respecto a esta temática se ha probado que cuando el agua se evapora del suelo o de los cuerpos de agua superficiales en condiciones naturales, se enriquece en ^{18}O y ^{2}H, que existe una fuerte variación estacional en la composición isotópica promediada en el tiempo de la precipitación en un lugar dado, y que en las zonas subterráneas profundas donde las temperaturas están por encima de 50-100 ° C, el contenido de ^{18}O y ^{2}H del agua subterránea se puede alterar significativamente como resultado de interacciones químicas con la roca huésped.

En los sistemas de aguas subterráneas menos profundas con temperaturas normales, las concentraciones de estos isótopos son poco o nada afectadas por los procesos químicos. En estos regímenes de flujo, ^{18}O y ^{2}H son trazadores naturales no reactivos que tienen concentraciones determinadas por la composición isotópica de la precipitación que cae sobre la superficie del suelo y por la cantidad de evaporación que ocurre antes de que el agua penetre por debajo de la parte superior del suelo. Una vez que el agua se mueve por debajo

de la parte superior de la zona del suelo, las concentraciones de ^{18}O y ^{2}H se convierten en una propiedad característica de la masa de agua subterránea, lo que en muchos entornos hidrogeológicos permite que las áreas de origen y los patrones de mezcla se determinen mediante muestreo y análisis de estos isótopos (Freeze & Cherry, 1979).

En lugares con muy escasa vegetación puede existir una evaporación directa del agua retenida en el terreno dando lugar a un enriquecimiento isotópico que se transmite al acuífero cuando esta agua logra alcanzarlo. El intercambio isotópico con arcillas es en general pequeño y en todo caso se alcanza pronto un estado de equilibrio. Se tiene entonces que el agua subterránea tiene una composición isotópica igual o ligeramente superior que la infiltración local, lo cual permite identificar el área de recarga. Las pequeñas variaciones estacionales en ^{18}O y ^{2}H en la recarga son rápidamente suavizadas durante la infiltración de modo que en ausencia de acciones perturbadoras las aguas subterráneas tienen composición isotópica casi estable. En acuíferos recargados por ríos, lagos, embalses o canales se produce la influencia de los mismos., La composición isotópica puede ser notablemente diferente de las aguas recargadas localmente procedentes de la lluvia, en general aumentando ^{18}O y ^{2}H (Custodio & Llamas, 1983).

2.7 Hidrodinámica subterránea

Las fuentes de recarga a los sistemas de aguas subterráneas también se han distinguido en función de la presencia o la concentración de constituyentes o trazadores inertes. En los casos en que las concentraciones de trazadores inertes varían espacialmente a lo largo del área de recarga de agua subterránea, la ruta seguida por el trazador a través del acuífero delinea la dirección del flujo. En este caso, las zonas hidroquímicas se alinearán en paralelo a la dirección del flujo. En casos más complejos, la concentración de constituyentes reactivos puede variar espacial y temporalmente a lo largo del área de recarga y también puede evolucionar a lo largo de la dirección del flujo. Muchos de los patrones geoquímicos observados en los sistemas de aguas subterráneas también pueden estar relacionados con heterogeneidades en la abundancia de minerales reactivos o en las propiedades hidrológicas, y pueden ser difíciles de resolver dada la limitada información normalmente disponible (Glynn & Plummer, 2005).

2.8 Generalidades de los lagos y lagunas

Los lagos pertenecen a la categoría de aguas quietas o lénticas, su definición no es fácilmente aplicable pues existen términos locales que dificultan precisar la frontera entre conceptos como, por ejemplo, lago y laguna. En general los lagos se caracterizan por ser normalmente de agua dulce, presentar un vaso bien definido, con zona litoral y bental profunda y bien diferenciadas, compartamentalización vertical con gradientes de luz, densidad y temperatura sujetos a variación estacional, que intervienen en la biología y calidad del cuerpo de agua. A media que estas características se refinan, la imagen de lago pasa a la de laguna. Los conceptos de lago y laguna utilizados a menudo indiscriminada y semánticamente es un problema. Se define al lago como un cuerpo de agua de profundidades considerables, en cambio "laguna" se utiliza para describir cuerpo de agua poco profundas (Roldán, 2008).

2.8.1 Lagunas cratéricas

Los lagos volcánicos son acumulaciones de agua dentro de un cráter de un volcán (Universidad de Costa Rica & Red Sismológica Nacional de Costa Rica, 2019)La formación de estos mundialmente se ha visto influenciada fuertemente por la actividad volcánica, y se reconocen por su forma circular. También la lava producida por vulcanismo puede formar barreras en depresiones del terreno y formarlos, por lo general los volcanes están ubicados en áreas de actividad tectónica, por cual los lagos formados en estos ambientes pueden tener tanto origen volcánico como tectónico. (Roldán, 2008)

La formación y permanencia de los lagos volcánicos está condicionada por tres factores principales: Que exista un cráter (si no hay depresión no puede haber acumulación de agua); Que el fondo del cráter sea impermeable (compuesto por suelos arcillosos que impidan la filtración del agua); Que el aporte de agua (esencialmente proveniente de lluvia) sea mayor a la evaporación (Universidad de Costa Rica & Red Sismológica Nacional de Costa Rica, 2019).

III. MARCO GEOLÓGICO

3.1 Características Fisiográficas de la Península

El área de estudio se ubica al interior de la Depresión Nicaragüense, el cual es un amplio valle que cruza todo el país en sentido NO-SE, desde el Golfo de Fonseca hasta el límite con Costa Rica. El área es caracterizada por una morfología suave con presencia de varios edificios y depresiones volcánicas recientes (Comisión Nacional de Energía de Nicaragua, 2001).

3.1.1 Geomorfología

Chiltepe se encuentra sobre la misma fractura geológica de la cadena volcánica de Nicaragua. Los sismos son tan frecuentes en la península como en Managua, ya que sus estructuras volcánicas están alineadas con la falla Ticomo – Nejapa-Asososca que se extiende hacia el sur (MARENA, 2006). En la península de Chiltepe se ubica el principal edificio volcánico del área, conocido como Volcán Apoyeque (ver figura 1). Este es un edificio compuesto, con morfología general de escudo, que se eleva a 518 m.s.n.m; del cual, los Cerros Cuapes, (domos parcialmente erosionados) conforman la sección más elevada. Este edificio volcánico, se encuentra a su vez rodeado en sus lados NO, NE y SE por las aguas del lago Xolotlán, mientras que en su lado SO la ladera volcánica se prolonga en una llanura que se abarca hasta la llegar a las Sierras de Mateare, las cuales representan los residuos de un amplio edificio volcánico más antiguo abruptamente cortado por la Falla de Mateare (Comisión Nacional de Energía, 2001).

Los terrenos más bajos corresponden a las costas del lago Xolotlán en el sector de la península Chiltepe, con elevación de 40 metros sobre el nivel del mar. La planicie en el área del acuífero oscila entre los 40 y 120 metros sobre el nivel del mar, iniciando su ascenso desde las costas del lago Xolotlán en península de Chiltepe y se enrumba hacia el sur, desde Ciudad Sandino hasta Mateare.

El Volcán Apoyeque ha sido caracterizado por erupciones altamente explosivas y sus episodios más recientes generaron las dos amplias calderas de Apoyeque y xiloá, respectivamente, ubicadas en la cumbre y en la ladera SE del edificio volcánico. Ambas calderas tienen un diámetro de aproximadamente 2.5 km y son ocupadas por una laguna. Las erupciones explosivas del Volcán Apoyeque cubrieron con capas de pómez y cenizas los sectores aledaños, incluyendo a la ciudad capital Managua, y contribuyeron a la formación de morfologías suavemente onduladas en toda el área. A pesar de que este volcán sea el edificio principal, el nombre de la Península de Chiltepe deriva de un pequeño y característico cono volcánico, conocido como Volcán Chiltepe (228 m s.n.m.), ubicado en su extremidad oriental y aislado del edificio principal de Apoyeque (CNE, 2001).

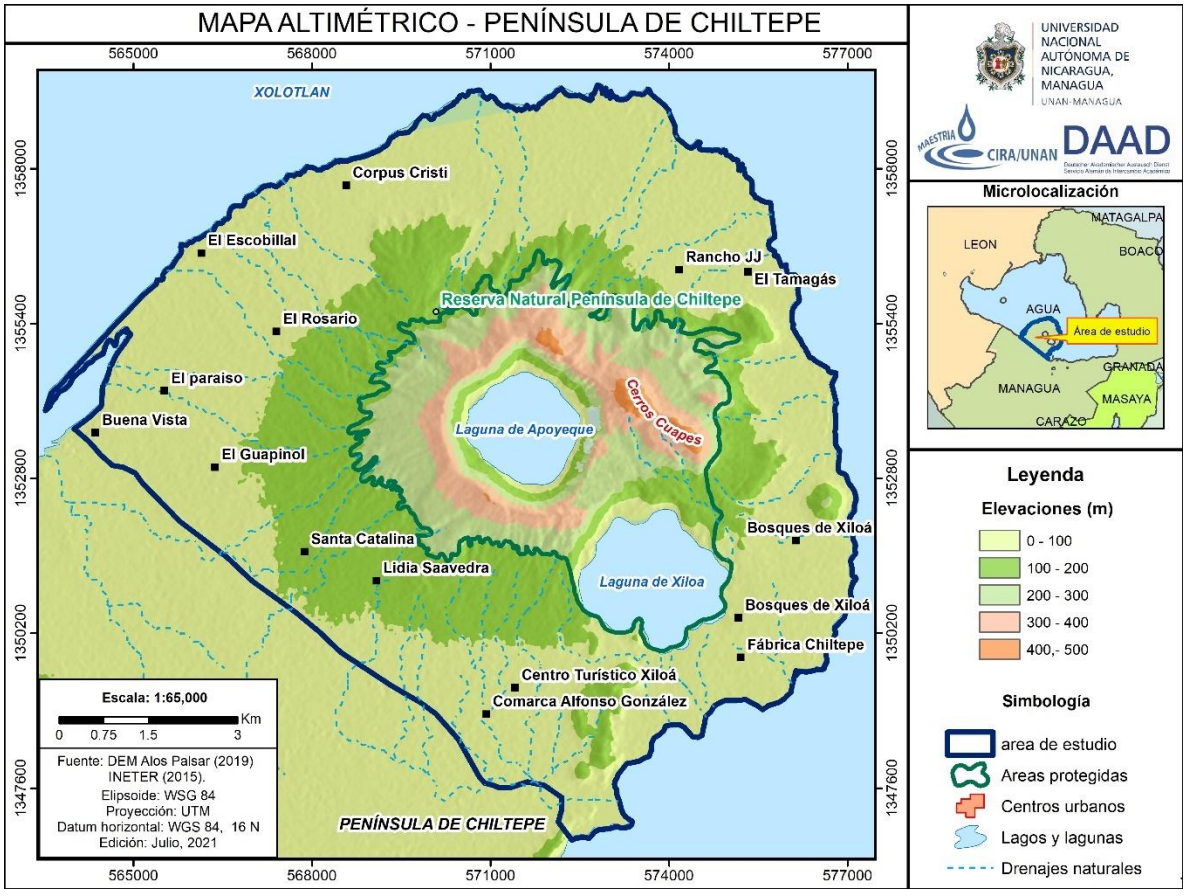


Figura 1. Mapa altimétrico, Península de Chiltepe.

3.1.2 Geología Local

La zona esta principalmente está formada por sedimentos Cuaternarios y de manera general por una variedad de productos volcánicos, determinados por el estilo eruptivo de la fuente de emisión en sus distintos períodos de actividad volcánica. La geología del área se enmarca en un contexto volcano-tectónico, en el cual sobresale la cadena volcánica cuaternaria del volcán Apoyeque como parte preponderante, seguida de la Falla Mateare.

El subsuelo de esta zona está compuesto básicamente de dos agrupamientos de rocas fragmentarias de procedencia volcánica. Él más antiguo, el **Grupo Las Sierras**, constituido principalmente por rocas piroclásticas de los períodos Plio-Pleistoceno, y se considera representa el basamento de la región. El segundo paquete de rocas, de edad más reciente, se conoce como **Grupo Managua**, cubre al anterior y está constituido por productos volcánicos y materiales sedimentarios transportados recientes, a los que se les ha asignado la época de Holoceno. Este apilamiento de materiales piroclásticos y sedimentarios, descansa sobre materiales más antiguos, depositados durante el Período Terciario Superior (Plioceno) y se reconocen con el nombre de **Formación El Salto**, compuesta principalmente por areniscas y limonitas (INTA & MARENA, 2018).

Los Piroclastos que afloran en el área de estudio son una asociación de varios fragmentos de poca consolidación, que alternados forman bancos de pseudo estratificación producto de las deposiciones graduales de estos materiales durante las explosiones volcánicas. En el proceso de sedimentación los materiales piroclásticos más gruesos se han depositado en lugares próximos a la cadena volcánica y los más finos cerca de la costa del Pacífico (Gómez, 2022)

Los piroclastos recientes y flujos lávicos descansan discordantemente sobre la formación Las Sierras, se acuñan hacia la zona costera y hacia los extremos oeste y noroeste del área. Son rocas fragmentarias en forma de polvo (cenizas), fragmentos (lapilli, arenas), también bombas, bloques y pómez producto de explosiones volcánicas locales pertenecientes a la cordillera de los Maribios que han sido depositados en la planicie y trasladados por el viento con dirección predominante E-NE (Gómez, 2022).

Respecto a la periferia de la Caldera de Xiloá, dentro de las diferentes estructuras presentes, se encuentran rocas andesíticas en la porción suroeste, junto con estratos predominantes de tobas y algunos afloramientos de pómez de Apoyeque. En el extremo norte de la laguna, se observaron además evidencias de una zona de alteración hidrotermal. En ella se encuentra un abanico de bloques lávicos y material aluvial; el suelo presentaba, además, una gran cantidad de sublimados de azufre y un intenso olor a Sulfuro de hidrógeno, y el agua cercana a la orilla de la laguna alcanzaba un estado de ebullición enérgica. (ver anexo 3).

Por orden litoestratigráfico, todos los materiales del suelo inmediato del área pertenecen a la formación geológica Cuaternaria. Todas las actividades geológicas tales como erupciones volcánicas, deslaves, inundaciones, formación de estructuras, regresión de caudales hídricos, fueron ocurriendo casi al unísono, o con poca diferencia de tiempo entre cada evento, se puede distinguir claramente el tipo de material que cubre cierta área y cual puede haber sido su origen (Gómez, 2022).

3.1.2.1 Cuaternario (Q)

Representada por capas superficiales de suelos que tienen su origen de los resultados de la descomposición de las rocas madres por medio del intemperismo y su traslado a sedimentarse con ayuda de las corrientes pluviales, se trata de arcillas, arcillas limosas, de color pardo claro y arcillas semiplásticas de color oscuro a negro. Es común encontrar arenas de origen pomáceo a causa de lixiviación, las cuales forman una intercalación de delgadas capas arenosas escoriaceas en la matriz de materiales indiferenciados (Gómez, 2022).

3.1.2.2 Cuaternario Aluvial (Qal)

Esta formación se encuentra principalmente en la Costa del lago Xolotlán (ver figura 2). Consta de materiales compuestos por limos, arcilla y arena. Esta formación sedimentaria tiene las mejores características para el almacenamiento y movimiento de agua, su contenido es especialmente arenas limo arcillosas, intercaladas con arena gruesa y gravas (Gómez, 2022).

3.1.2.3 Cuaternario Lava (Ql)

Estos materiales se encuentran hacia el Suroeste de la península Chiltepe. Están formados por fragmentos sueltos angulares y vesiculares claros de composición dacítica (Gómez, 2022).

3.1.2.4 Cuaternario Volcánico (Qv)

Se localizan desde el Noroeste hasta el Sureste y centro de la península, en las partes más planas. Está compuesta por fragmentos de pómez color blanquecino con matriz grano a grano y lapilli (Gómez, 2022).

3.1.2.5 Cuaternario Volcánico Lava (Qvl)

Se encuentran en las laderas del cráter del volcán Apoyeque. Están compuestas por lavas de composición andesítica- basáltica y dacíticas, con intercalaciones de tobas cineríticas y pómez (ver figura 3) (Gómez, 2022).

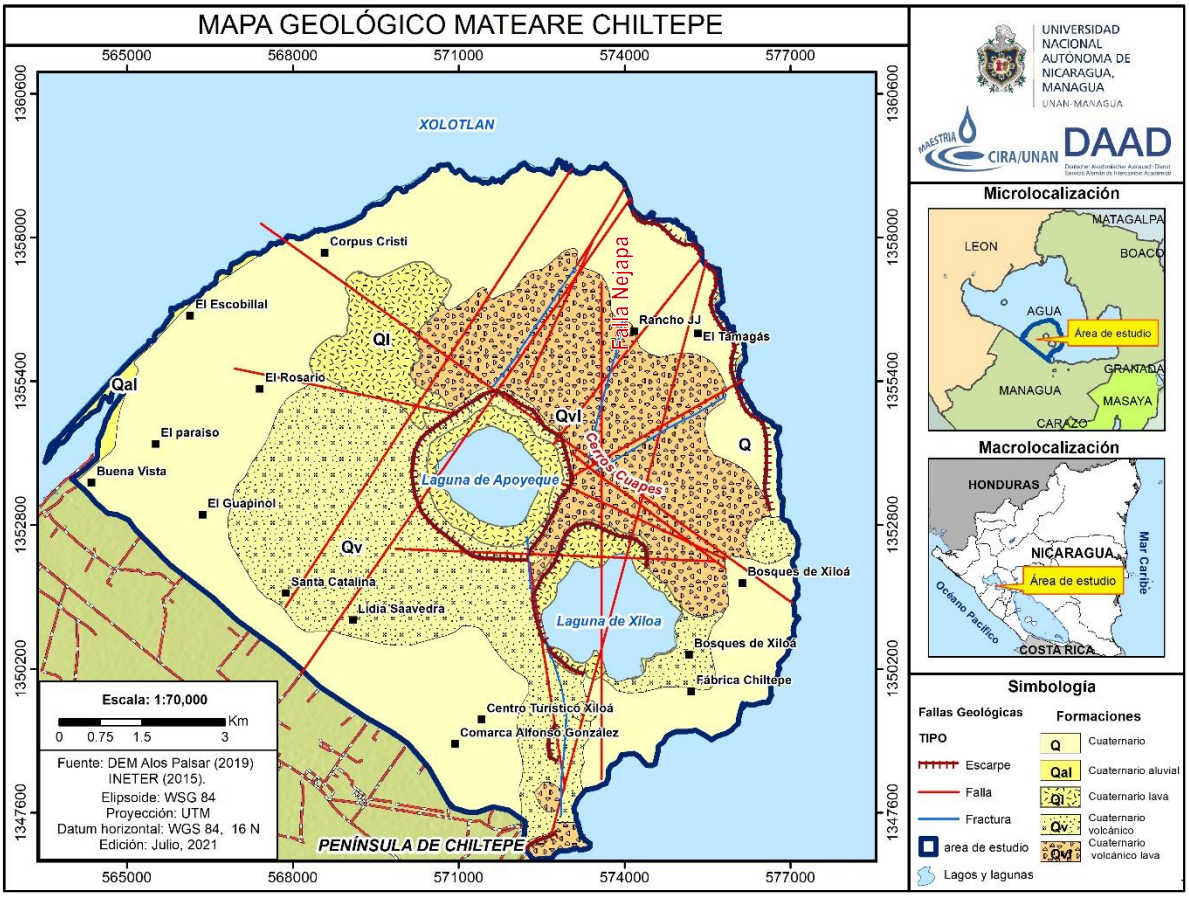


Figura 2. Mapa geológico, Península de Chiltepe. Tomado de (INETER, 2020). Modificado de Mapa Geológico Minero, INETER, 1995).

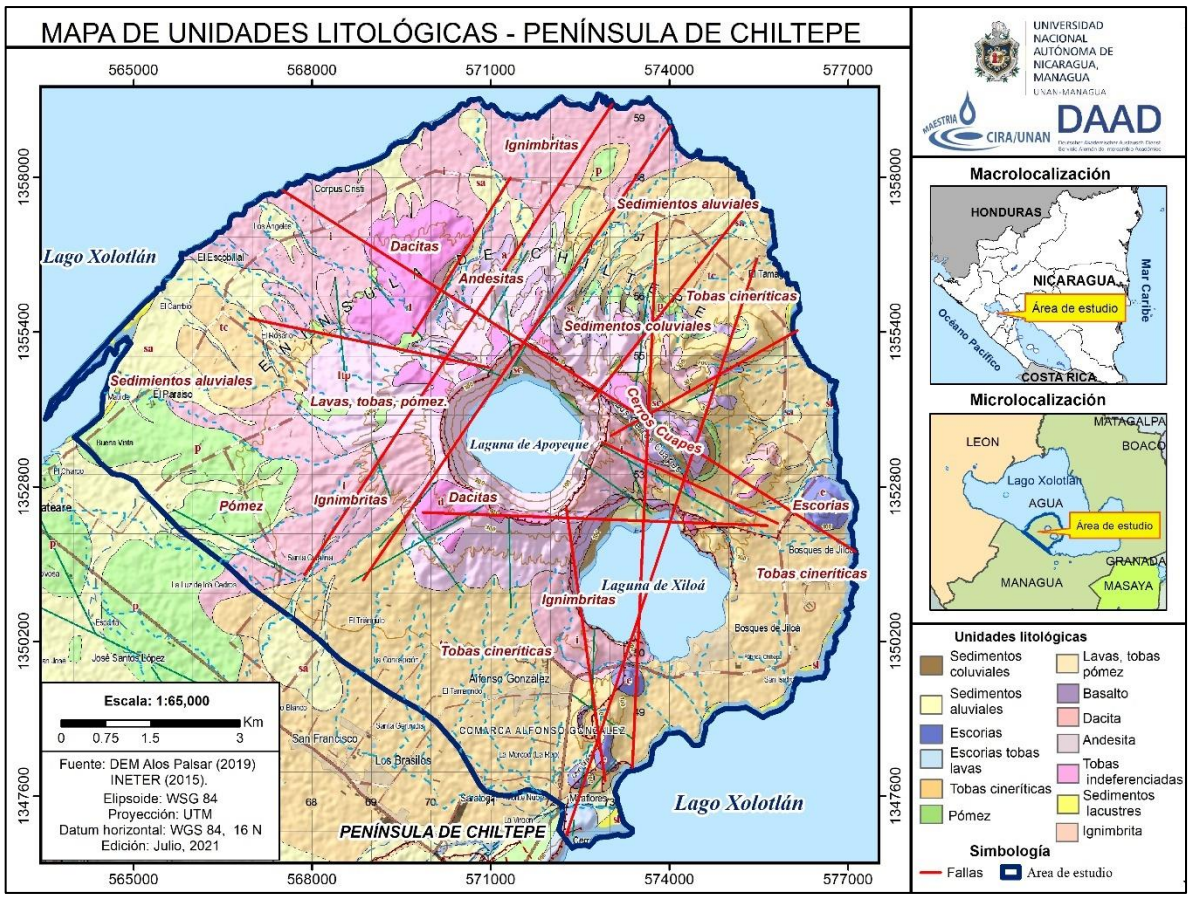
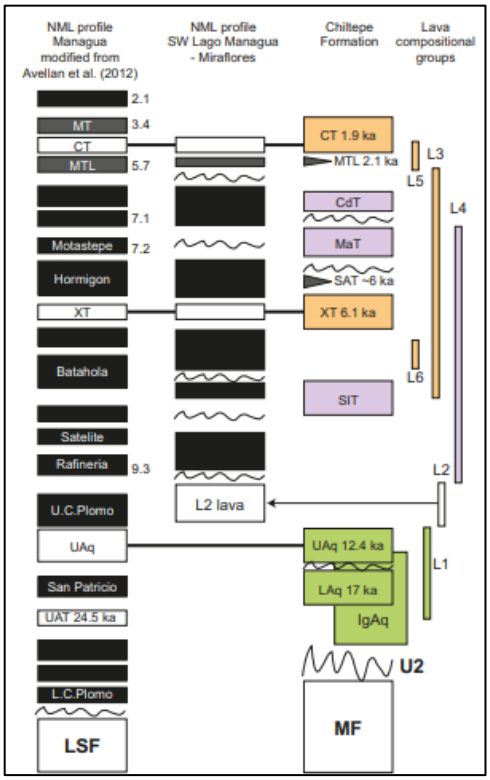


Figura 3. Mapa litológico, Península de Chiltepe.
Modificado de**:** Mapa Geológico de Managua y sus Alrededores, (INETER, 2020).

3.1.3 Estratigrafía de la Formación Chiltepe (CF)

De la más reciente a la más antigua, la estratigrafía de la formación de Chiltepe está formado de la siguiente manera: tefra de Chiltepe (CT), de unos 1.9 ka, formada a partir de una erupción pliniana; Tefra de Los Cedros, Tefra Mateare (MaT),tefra Xiloa (XT); Tefra de San Isidro, La tefra superior de Apoyeque, Tefra del Apoyeque Inferior 17 ka (LAq); Se encuentra además una Ignimbrita masiva (IgAq) con espesor mayor a 40 m, compuesto de numerosas unidades de flujo e incluyendo dos bloques líticos de brechas expuestas en el muro NE del mar de Xiloa. En donde se encuentra en contacto abrupto (pero cubierto por un talud de fragmentos de rocas) con lavas más jóvenes en el Borde N de Laguna Xiloa; el contacto es probablemente una falla normal que se extiende la falla graben occidental de Nejapa-Miraflores (Freundt & Kutterolf, 2019).



Leyenda:
Tefra de Chiltepe (CT), Tefra de Los Cedros (CdT), Tefra Mateare (MaT),Tefra Xiloá (XT); Tefra de San Isidro (SIT), Tefra Superior de Apoyeque (UAq), Tefra del Apoyeque Inferior (LAq); Ignimbrita masiva (IgAq). Tomado de: (Freundt & Kutterolf, 2019).

Figura 4. Sucesión de la formación de la Tefra de Chiltepe y distribución por edades aproximada de las lavas asociadas.

IV. MARCO METODOLÓGICO

4.1 Área de estudio

La zona de estudio se ubica en el departamento de Managua, municipio de Mateare en la costa sur del lago de Xolotlán a unos 15 km al noroeste de la ciudad de Managua; es habitada por 3 comarcas principales: Los Castros, Bosques de Xiloá y Chiltepe, albergando una población aproximada de 3194 habitantes (INIDE, 2008). En esta también se encuentra la Reserva natural Península de Chiltepe y la Zona de Recreación Turística Xiloá (GIZ, 2013) (**ver figura 5**).

La porción central de la península es caracterizada por la presencia de los Cerros Cuapes de Chiltepe (518 msnm), que son los restos de un viejo y erosionado edificio volcánico en cuyo centro se abre la caldera de Apoyeque, de unos 400 metros de profundidad y 2 km de diámetro, en cuyo fondo se aloja, la laguna de Apoyeque. Contiguo a esta caldera, en base sur de los Cerros Cuapes, se abre otra laguna volcánica (Xiloá), ligeramente más extensa que la anterior, pero sin aparente conexión con ella. Esta ocupa un cráter formado después de la última erupción de pómez por subsidencia (JICA, 1993).

Respecto a la laguna Xiloá es la laguna cratérica con mayor riqueza de cíclidos y mayor riqueza de especies de Nicaragua (18 especies) (Silva & Guido, 2017). Tiene una excelente accesibilidad por carretera, siendo el principal centro turístico de los capitalinos. Ocupa una superficie de 3.75 km^2 y su profundidad máxima es de 95.00 m a un nivel de agua de 38.29 m.s.n.m. El nivel promedio es de 39.23 m.s.n.m. y el volumen de agua corresponde 242 millones de metros cúbicos a un nivel de 43.91 m.s.n.m. (INETER, 2009)

Geológicamente el área pertenece a la Provincia Geológica del Pacífico de Nicaragua (Hogdson, 2000). Regionalmente la geología está conformada por depósitos reciente (Qr), aluviales (Qal), volcánico (Qv) de edad cuaternaria; y Grupo Las Sierras (TQps). Geomorfológicamente, se encuentra en la provincia de la Cordillera Volcánica Nicaragüense, y se ubica al interior de la Depresión Nicaragüense. En lo referente a las aguas subterráneas, en toda el área se extiende un amplio acuífero en los depósitos piroclásticos y aluvionales recientes y altamente permeables.

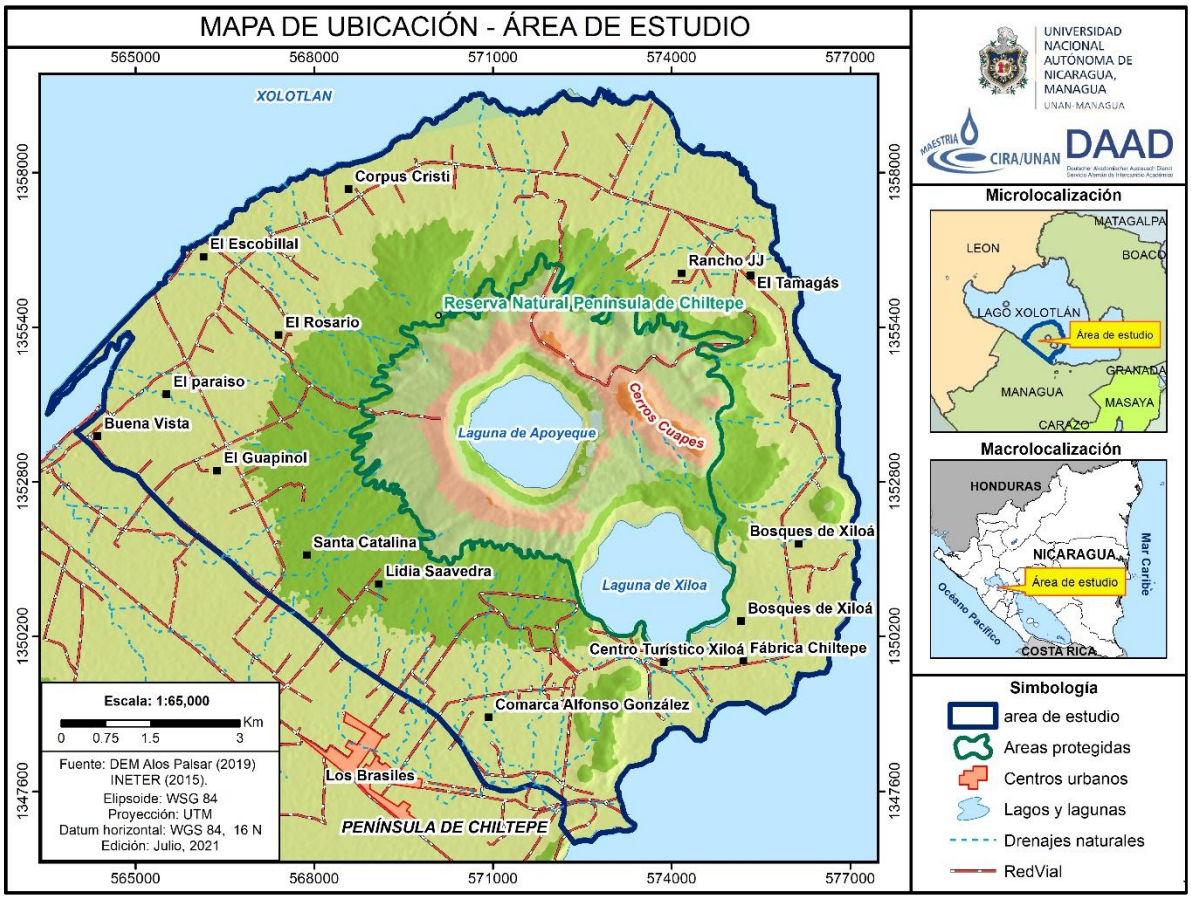


Figura 5. Mapa de ubicación del área de estudio.

4.2 Tipo de estudio

El presente perfil de investigación, según las teorías de la metodología de la investigación (Sampieri, 2014) se construye desde un paradigma positivista con enfoque cuanti-cuali, ya que se medirán las concentraciones de arsénico, niveles de agua para determinar dinámica subterránea y finalmente se presentarán medidas de seguridad para la recreación segura. Según su alcance, se define de tipo descriptivo-correlacional pues describirá y explicará la relación entre las variables, geología local, dinámica del flujo subterráneo y las concentraciones de Arsénico. Finalmente, de acuerdo con la secuencia de registro y procesamiento de la información el estudio es de tipo transversal, ya que se hará en un período menor que dos años.

4.3 Técnicas de recopilación de la información

4.3.1 Información secundaria

Una de las fases iniciales de este proyecto de investigación, fue recopilar información de interés que se haya generado en base al área de estudio para lo cual se utilizaron técnicas de análisis de documentos oficiales y profesionales, respecto a la hidrogeología, hidrogeoquímica, geología, problemáticas relacionadas al arsénico, inventarios, censos, y demás aspectos socioeconómicos registrados en la zona. Para el acceso a dicha información el investigador entró en contacto principalmente con las siguientes instituciones nicaragüenses: INETER, CIRA-UNAN, MARENA, entre otras. En esta etapa se realizó un análisis de las hojas topográficas de la zona, combinándola con el relieve generado a partir del DEM-30 de Nicaragua, e interpretación de imágenes satelitales, utilizando el sistema de información geográfica en el software Arcgis, para identificar la posible incidencia de fallas y/o lineamientos.

4.3.2 Información primaria

4.3.2.1 Levantamiento geológico

Las actividades de esta gira se planificaron en base al Mapa Geológico de Managua y sus alrededores realizados por el INETER, que corresponde a la información más actualizada de la que se tiene acceso. El levantamiento consistió en un recorrido intensivo por la zona, documentando los afloramientos y cortes de tierra que expusieran las formaciones geológicas presentes.

En total esta gira acumuló 27 estaciones de reconocimiento (**ver anexo N°9**), y dentro de los principales sitios visitados está el Volcán Apoyeque; el cono piroclástico llamado el Volcán Chiltepe; la Caldera de Xiloá; entre otros sitios como la zona de alteración hidrotermal, encontrada en el margen norte de la laguna de Xiloá.

4.3.2.2 Levantamiento de objetos hidrogeológicos

Con la información teórica y cartográfica obtenida en las hojas topográficas, se demarcaron los pozos disponibles, posteriormente en giras preliminares se identificaron y georreferenciaron aquellos de interés (en base a sus características hidrogeológicas, diseño y uso), para el monitoreo estacional de niveles (seca y lluviosa). Se utilizó una sonda eléctrica Solinst de 100 metros de longitud para mediciones de niveles estáticos de agua. Se midieron también los parámetros fisicoquímicos de campo (pH, temperatura, redox y concentración de arsénico). Finalmente, en este componente se desarrollaron apartados como la piezometría local y dirección del flujo.

4.3.2.3 Levantamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico

En noviembre 2020 y marzo 2021 que corresponden a la época seca y lluviosa respectivamente, se realizó el levantamiento hidroquímico e hidrogeológico de la investigación, acumulando en total 29 puntos distribuidos sobre la península de Chiltepe (**ver anexo N°2**). Del total de sitios inventariados, 17 sitios para la determinación de arsénico y la composición isotópica, 18 pozos para la medición de niveles freáticos, y 25 sitios para un monitoreo de parámetros in situ (Temperatura, pH, conductividad eléctrica, y potencial redox). La primera campaña se realizó los días 3, 4,6 y 23 de noviembre 2020, y la segunda, en los días 26, 27, 28 y 29 de abril 2021. Medición de parámetros de campo in-situ

Como parte del levantamiento hidrogeoquímico, en 25 puntos de la península, incluyendo 13 pozos, el lago Xolotlán y las lagunas de Xiloá y Apoyeque; se determinaron parámetros de campo como: Temperatura, pH, conductividad eléctrica, y potencial redox. Las mismas fueron realizadas haciendo uso de los equipos de campo de doble electrodo (modelos HI 98129, HI 98120, HI 98130de HANNA Instruments). Los cuales fueron calibrados previamente a cada gira de campo, para asegurar la calidad de los datos. Respecto al procedimiento de medición, se tomó en un recipiente un volumen de agua aproximado de un litro; de forma inmediata se sumergieron parcialmente los dispositivos, procurando que los mismos siempre se mantuvieran en sentido vertical, hasta que realizara la lectura definitiva del parámetro. Procedimos posteriormente a descontaminar los mismos con agua desionizada, se secaron y almacenaron en forma vertical.

4.3.2.4 Medición de Niveles freáticos

Para el desarrollo de este componente, se logró acceder a un total de 18 pozos tanto perforados como excavados, a los cuales se les midió la profundidad a la que se encontraba el nivel de agua. Utilizamos para este levantamiento, una sonda eléctrica Solinst de 100 metros (modelo 101 Solinst). El monitoreo se realizó introduciendo el cable graduado del equipo, a una velocidad moderada hasta que se encendiera la alarma sonora o visual, indicando el contacto del electrodo con la superficie del agua. Posteriormente mediante el uso de un formato, se anotaron los valores de profundidad del agua, de elevación topográfica de cada punto, altura del brocal o ademe, coordenadas UTM, y demás observaciones como profundidad aproximada, uso del pozo, propietario, características organolépticas etc.

La información obtenida en estos monitoreos fue procesada con el software ArcGis 10.5 para desarrollar apartados como la piezometría local y dirección de flujos. Por otra parte, las elevaciones fueron corregidas utilizando el archivo DEM Alos Palsar 2019. Respecto a las elevaciones de las lagunas de Xiloá y el lago Xolotlán, estas fueron obtenidas de registros batimétricos de años previos realizados por el INETER, y con datos telemétricos de la estación Salvador Allende.

4.3.2.5 Muestreo de agua superficial y subterránea para análisis isotópico

El levantamiento para cada campaña de muestreo consistió en la recolección de 17 muestras de agua, que corresponden a 8 muestras de pozos, 6 de la Laguna de Xiloá, 2 del Lago Xolotlán y una de la Laguna de Apoyeque. La captura se realizó directamente del pozo, empleando un bailer de un litro o cubeta sencilla. Para las de las lagunas y el Lago, se empleó una botella Niskin modelo AB-NK y una botella muestreadora doble.

El procesamiento in situ de la muestra para el análisis isotópico se realizó de la siguiente manera: una vez extraído el volumen deseado, si se observaban señales de alta turbidez, se empleó una bomba de vacío con filtro para eliminar las partículas suspendidas. Luego, la muestra se transfirió directamente a una botella plástica semitransparente de 30 mL, asegurándose de llenarla completamente y evitando la formación de burbujas. Las botellas se almacenaron en posición vertical, con la tapa roscada hacia abajo, dentro de un contenedor plástico oscuro para protegerlas de la radiación solar y minimizar la evaporación. Una vez completado el muestreo, las botellas fueron debidamente rotuladas con el código, fecha y

hora, y se mantuvieron en condiciones controladas hasta su llegada al laboratorio, donde se procesaron mediante espectroscopia láser (Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy, QA-ICOS).

4.3.2.6 Muestreo de agua superficial y subterránea para análisis de Arsénico total

Para este análisis se recolectaron 17 muestras de agua: 8 procedentes de pozos, 6 de la Laguna de Xiloá, 2 del Lago Xolotlán y 1 de la Laguna de Apoyeque **(ver figura 6)**. La recolección para el análisis de arsénico se realizó en botellas plásticas blancas de un litro de capacidad. Tras la recolección, las muestras fueron preservadas con 3 mL de ácido nítrico (HNO_3) y almacenadas en un termo con abundante hielo hasta su recepción en el laboratorio. Cada botella fue debidamente rotulada con el código de muestra, fecha, hora de muestreo y coordenadas geográficas.

Durante la primera campaña de muestreo, en el punto L-XIP de la Laguna de Xiloá, a 50 metros de profundidad, se tomó un duplicado de la muestra para ser analizado tanto con el Arsenator digital como en los laboratorios del CIRA-UNAN, con el fin de confirmar la precisión de los resultados obtenidos con el Arsenator. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio utilizando la técnica de generación de hidruros (VGA 77) y un espectrofotómetro de Absorción Atómica Varian SpectrAA-240S (Métodos 3114B + 3030F Ácido Clorhídrico, SMWW, 2012 -22 edición).

4.3.2.7 Determinación de concentraciones arsénico por del Arsenator Digital

Siguiendo la metodología establecida, se utilizó el Wagtech Digital Arsenator para determinar las concentraciones de arsénico en los pozos y aguas superficiales de la península. Este equipo opera mediante una variación del método de Gutzeit, el cual reduce el arsénico inorgánico a gas arsina, que luego es cuantificado por un fotómetro de longitud de onda única, proporcionando una lectura directa en $\mu g.L^{-1}$ (OPS & OMS, 2011). El rango de medición del equipo va de 2 a 100 $\mu g.L^{-1}$, con una precisión del ±10 % en todo el rango, aunque estudios internacionales indican que es más preciso en el intervalo de 2 a 50 $\mu g.L^{-1}$ (Safarzadeh-Amiri et al., 2011). Las 17 muestras recolectadas en cada temporada se procesaron siguiendo el manual del equipo, el cual consta de cuatro etapas principales:

Ensamblaje del dispositivo tapón: Inicialmente se ensamblaron los componentes del dispositivo (filtro de sulfuro, tarjetas de reacción, y cabezal). Se tomó el filtro de remoción de sulfuro de hidrógeno y se insertó en la parte inferior del cabezal. Seguido se tomó la tarjeta de reacción roja, y con una pinza se depositó la lámina correspondiente; una vez listo, se cerró la tarjeta y se insertó en la ranura superior del cabezal. Por último, se tomó la tarjeta de reacción negra y le insertamos la banda de prueba, asegurándonos de cubrir el orificio de la tarjeta.

Calibración del Arsenator: **Calibración del Arsenator**: Se calibró el equipo encendiéndolo y esperando el mensaje "insert slide". Se insertó la tarjeta negra de lectura de arsénico en la ranura del Arsenator, y tras la instrucción "remove slide", el cronómetro del dispositivo comenzó automáticamente.

Preparación de la muestra: Se vertieron 50 mL de la muestra en el matraz especial del equipo, a los que se añadieron 2.5 mL de ácido tartárico (T1) y 2.5 mL de borohidruro de sodio (Z2). El tapón se colocó de inmediato, asegurando que no pasaran más de dos segundos entre la adición del último reactivo y el montaje. El tiempo que la que se completa la reacción es de 20 minutos. Es necesario aclarar que por cada muestra, se realizaron tres lecturas y aquellas que contenían más de 50 $\mu g.L^{-1}$, se diluían entre el 2.5 al 10 %. Además, previo a realizar las lecturas de las muestras, se prepararon 4 soluciones a partir de un estándar de arsénico, en concentraciones de 10, 50,100 y 1000 $\mu g.L^{-1}$, que fueron leídas por el dispositivo para corroborar la precisión del equipo (ver anexo 14).

Determinación de arsénico: Tras completarse la reacción, la tarjeta negra se retiró del cabezal y se comparó con la ficha colorimétrica, si el color de la misma correspondía a una concentración menor a 100 $\mu g.L^{-1}$, se procedió entonces a introducir la tarjeta en el Arsenator digital para obtener el resultado, el cual fue registrado para su posterior análisis. Al finalizar cada ensayo, se desecharon los papeles filtro de ambas tarjetas y se repitió el proceso para cada muestra.

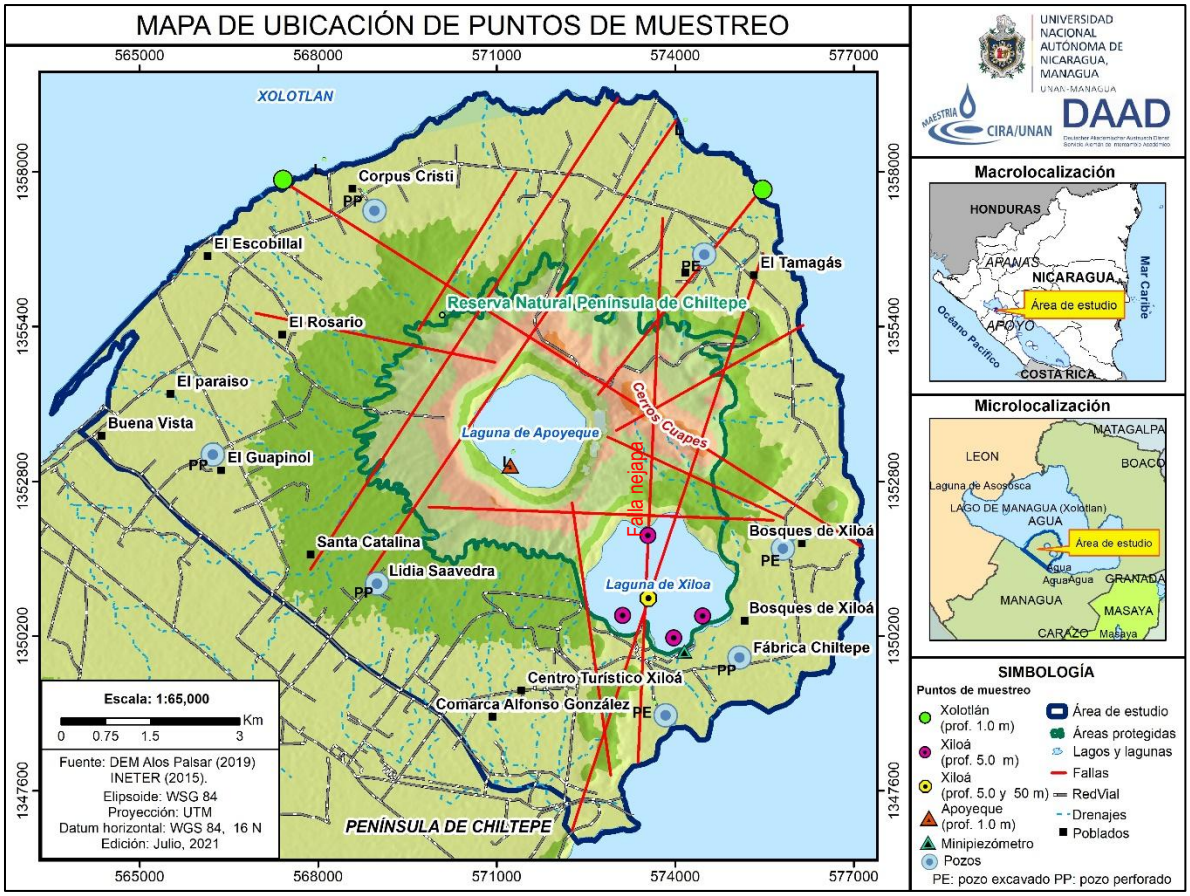


Figura 6. Ubicación de puntos de muestreo.

4.3.3 Medidas de recreación segura en la zona turística de Xiloá

Una vez determinadas las concentraciones de arsénico, su distribución vertical y horizontal en la laguna de Xiloá, así como la dinámica del agua subterránea de la zona. Se propone presentar medidas de recreación segura, para evitar que la población que utiliza esta área natural se vea impactada por un contacto prolongando de aguas enriquecidas en arsénico. Para el desarrollo de las medidas de recreación segura, se tomó como base las **Directrices de calidad de Aguas Recreacionales**, establecidas por la OMS para aguas dulces y costeras, volumen 1; En donde se indica cómo establecer estándares de calidad del agua, y de cómo implementar la gestión preventiva de riesgos a nivel local. Esta guía establece que, para desarrollar cualquier medida de gestión, control, o monitoreo, se deben desarrollar cuatro pilares principales que corresponden a: evaluación del sistema, monitoreo, administración y

comunicación, y necesidades de investigación, los cuales fueron aplicados a las condiciones medioambientales de la laguna de Xiloá.

Para la propuesta de medidas de recreación, fue además fundamental establecer si las concentraciones encontradas suponen o no un riesgo importante a la salud humana, sobre todo en un contexto de recreación directa. Esta valoración se logró, tomando como base el estudio realizado por Sairoong Ouypornkochagorn y Jorg Feldmann, quienes establecieron en 2010 las constantes de permeabilidad de las distintas especies de arsénico para la piel humana. Dicho estudio aplicó la técnica del Sistema de "Celda de Franz", (la cual involucra el uso de piel humana); para determinar la permeabilidad del As en sus distintas especiaciones.

V. RESULTADOS

5.1 Levantamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico noviembre 2020-2021

5.1.1 Hidrodinámica del agua subterránea de la Península

5.1.1.1 Piezometría

Las isofreáticas de la península de Chiltepe oscilan entre los 48 msnm encontradas en la franja que bordea la orilla sur de la Laguna de Xiloá y 43 msnm representados el límite entre el lago Xolotlán y la península. Hacia el norte, en la porción semiplana que rodea Los Cerros Cuapes y el volcán Apoyeque; se puede encontrar la isolínea correspondiente a 45 msnm. La zona evaluada presenta de manera general un ligero gradiente hidráulico, más acentuado al Sur de la península (bosques de Xiloá), a comparación en la sección norte, (Escobillal, Corpus Cristi y El Tamagás) **(ver figura 7).**

5.1.1.1 Fluctuación estacional

De acuerdo con los datos de campo, la profundidad del nivel del agua mostró una ligera diferencia entre la primera y segunda medición (periodo lluvioso y seco). Por ejemplo, las isofreáticas al norte de Chiltepe, variaron 0.5 m entre las dos temporadas (Ver figura 7 y 8). Este resultado algo inusual, podría ser explicado quizá por el efecto de la recarga proveniente de los huracanas Eta e Iota que provocaron intensas lluvias en la región.

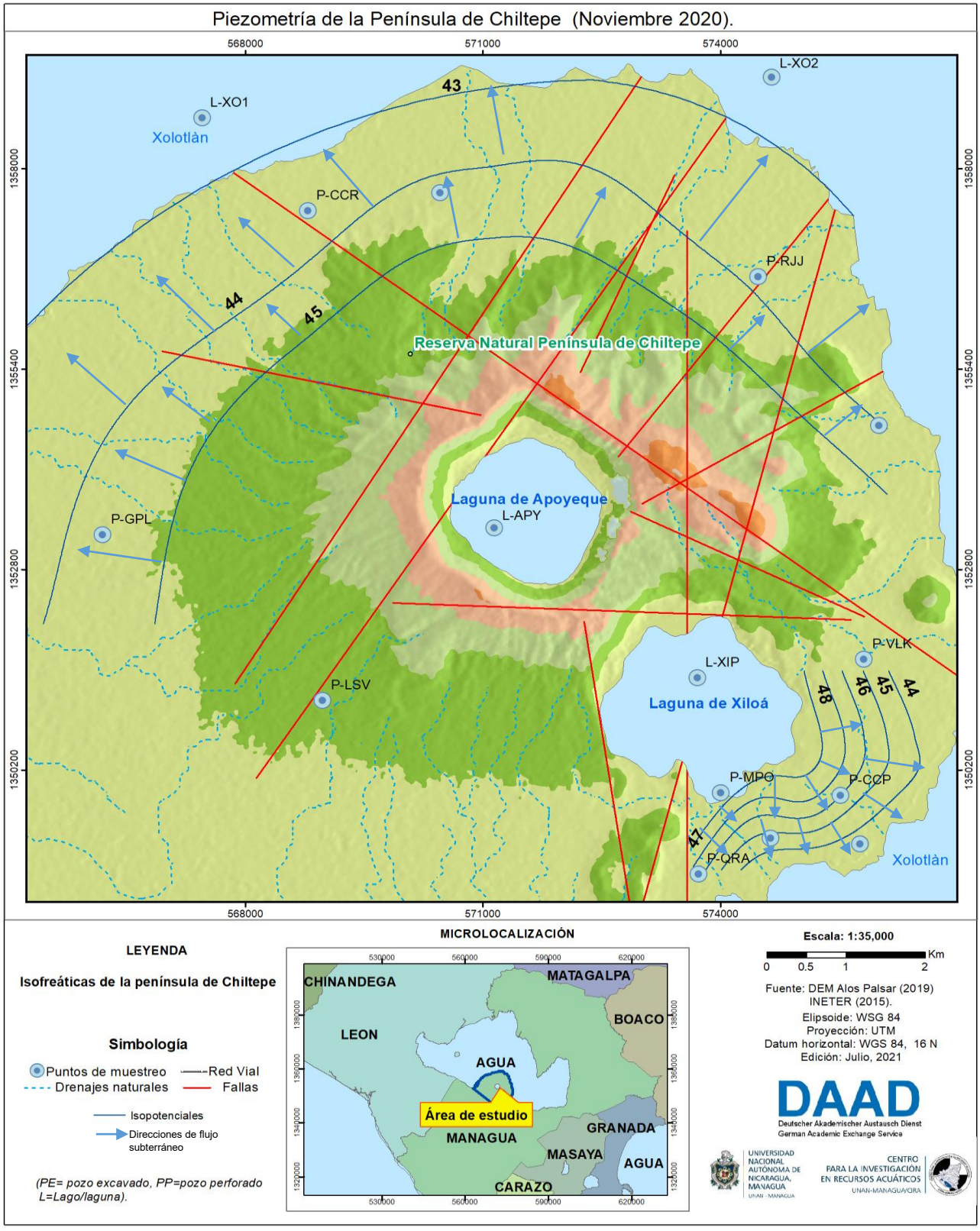


Figura 7. Mapa de isofreáticas en la península de Chiltepe, noviembre 2020.

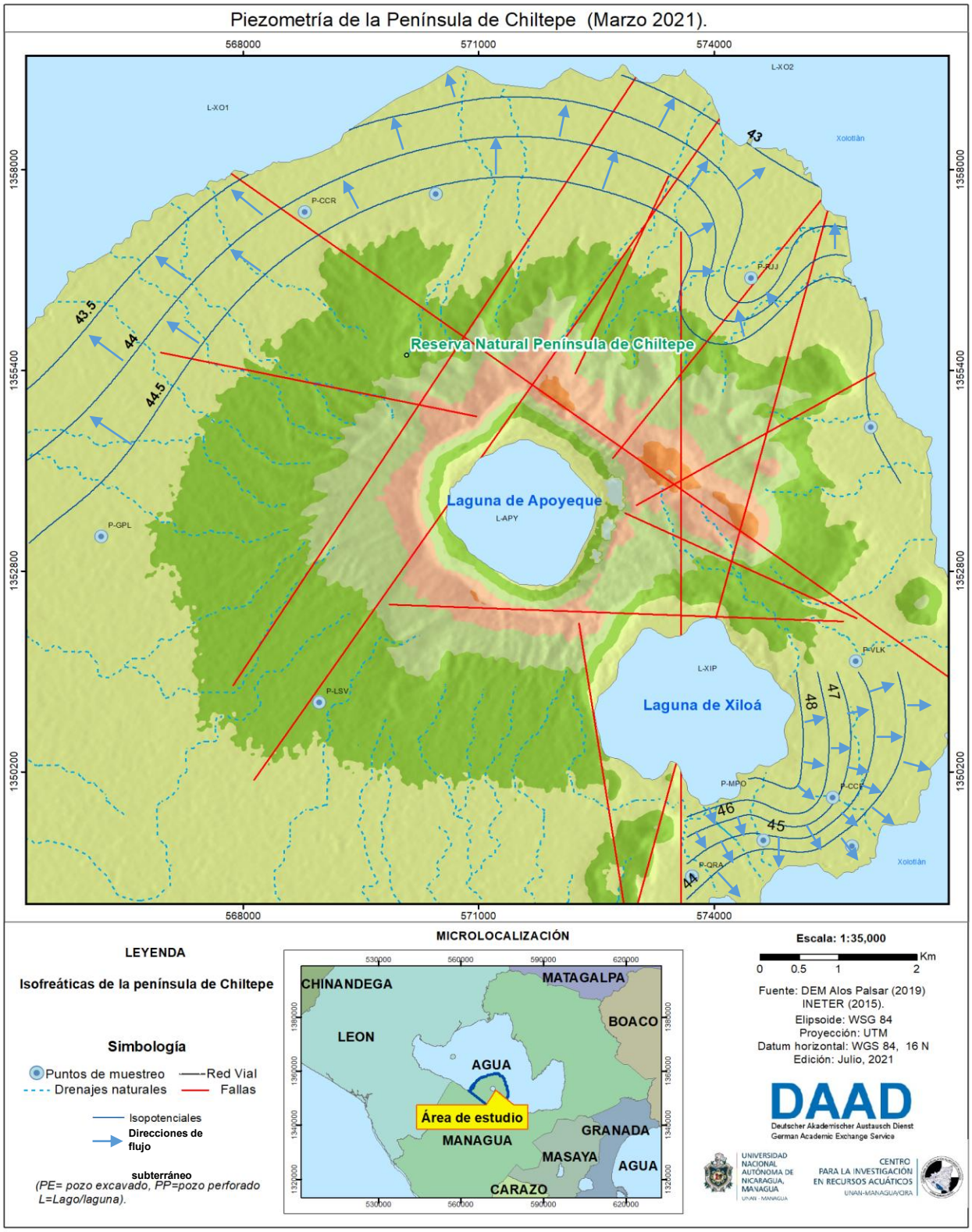


Figura 8. Mapa de isofreáticas en la península de Chiltepe, marzo 2021.

5.2 Caracterización Hidrogeoquímica

5.2.1 Temperatura

5.2.1.1 Aguas subterráneas

Respecto a las aguas subterráneas, las temperaturas promedio presentan un rango de 28.1°C a 37.8 °C y un promedio de 31.2 °C. Respecto a la variación estacional, El agua subterránea, para noviembre presentó un rango de (28-36°C), mientras que para marzo presentó un rango de (29-40°C) (ver figura 9). Cabe señalar que los antecedentes en la zona reflejan un rango de temperatura de 28.5 a 45°C y un promedio de 34.6°C (Comisión Nacional de Energía, 2001).

El 64% de los pozos se encuentran sobre el límite recomendado para consumo humano de acuerdo a la CAPRE, en este conjunto se ubican los 4 pozos perforados utilizados en esta investigación. Uno de ellos actualmente suple de agua a la comunidad de Lidia Saavedra, el cual presenta una temperatura de 33.2 °C (ver figura 9).

Tomando en consideración el criterio expuesto por Custodio y Llamas (1983), para la clasificación de las aguas termales, en el cual se considerada termal, a aquellas aguas que excedan la temperatura media anual del sitio más 4° C; Se tiene entonces que el 50% de los sitios muestreados son consideradas como aguas termales. Esto basándonos en que la temperatura media anual de Chiltepe va de 27-27.5°C (MARENA, 2006).

Según el Plan Maestro Geotérmico de Chiltepe – Managua, esta anomalía de temperatura en el agua, puede ser atribuida a una fuente de contaminación térmica, originada por la mezcla del agua del acuífero freático, con un flujo de agua geotérmica que se desplaza lateralmente desde la zona de subida ubicada debajo del sector NE de las lagunas de Xiloá y Apoyeque.

5.2.1.2 Aguas Superficiales

Por otra parte, las aguas superficiales reflejaron un promedio de 29°C para el Xolotlán, 28°C para la Laguna de Apoyeque y 29°C para la laguna de Xiloá (ver figura 9). Este grupo no presentó variaciones significativas entre temporadas; sin embargo, para Apoyeque se encontró una diferencia de 4 °C entre mediciones (26°C y30 °C); probablemente atribuido al desarrollo del huracán ETA durante las mediciones de la temporada. Cabe señalar que los antecedentes reflejan para el lago Xolotlán un promedio de 27.3 °C (Moreno & Pacheco, 1999), y Respecto a Xiloá, se han registrado temperaturas de 29.8°C a 48 °C y para Apoyeque 30°C (Parello et al., 2008).

Es necesario resaltar que al norte de la laguna de Xiloá se registraron temperaturas que alcanzaron los 65°C, la misma era fluctuante disminuyendo hasta a 40 °C. Otras fuentes han encontrado temperaturas cercanas a los 100°C en la misma sección (CNE, 2001). Este punto de anomalía térmica Se observa que ocurre en correspondencia de la intersección de la falla que corre entre la Laguna de Xiloá y los Cerros Cuapes y por otros lineamientos inferiores menores.

Figura 9. Mapa de rangos de temperatura en la península de Chiltepe.

5.2.2 Conductividad Eléctrica

5.2.2.1 Aguas subterráneas

Respecto a las conductividades eléctricas en el agua subterránea, para la época seca, se tiene un rango de 214 a 2301 µS/cm, y un promedio de 1256 µS/cm. Para la estación lluviosa, se encontraron valores desde 517 a 2710 µS/cm y obteniendo un valor medio de 1244 µS/cm (ver figura 10 y 11).

El 100% de los pozos muestreados en la época seca, presentan valores que sobrepasan el valor recomendado para consumo humano, establecido por la Norma CAPRE. Por su parte, durante la estación lluviosa, sólo uno de los pozos se encontró bajo los 400 µS/cm que recomienda esta normativa.

Las mayores conductividades se detectaron en los pozos perforados y excavados ubicados en la comunidad de Bosques de Xiloá, Mateare (2124 y 2500 µS cm^{-1}) (ver figura 10 y 11). Por otra parte, las aguas de los pozos excavados y perforados del oeste de la península presentan menor conductividad, los valores oscilan entre 543 a 824 µS.

Es notorio también, que los pozos ubicados al norte de la península, poseen conductividades de (1720, 1679, 1729 µS cm^{-1}) las cuales son similares a las presentadas por el Xolotlán (1585, 1576 µS cm^{-1}) (ver figura 10 y 11).

5.2.2.2 Aguas superficiales

Respecto a las aguas superficiales, para el lago Xolotlán se encontró una CE promedio de 1500 µS/cm; Para Apoyeque y Xiloá por su parte, se obtuvieron conductividades mayores a 4000 µS/cm, en ambos monitoreos (ver figura 10 y 11). Cabe señalar que la CE presentada por estos dos últimos superó el rango de detección del equipo; Por lo tanto, para el análisis de este estudio se considerará el valor de 4000 µS como la CE aproximada. Sin embargo a través de estudios previos se conoce que las conductividades de Xiloá, pueden ubicarse entre los 3300 a 6700 µS/cm (Parello et al., 2008).

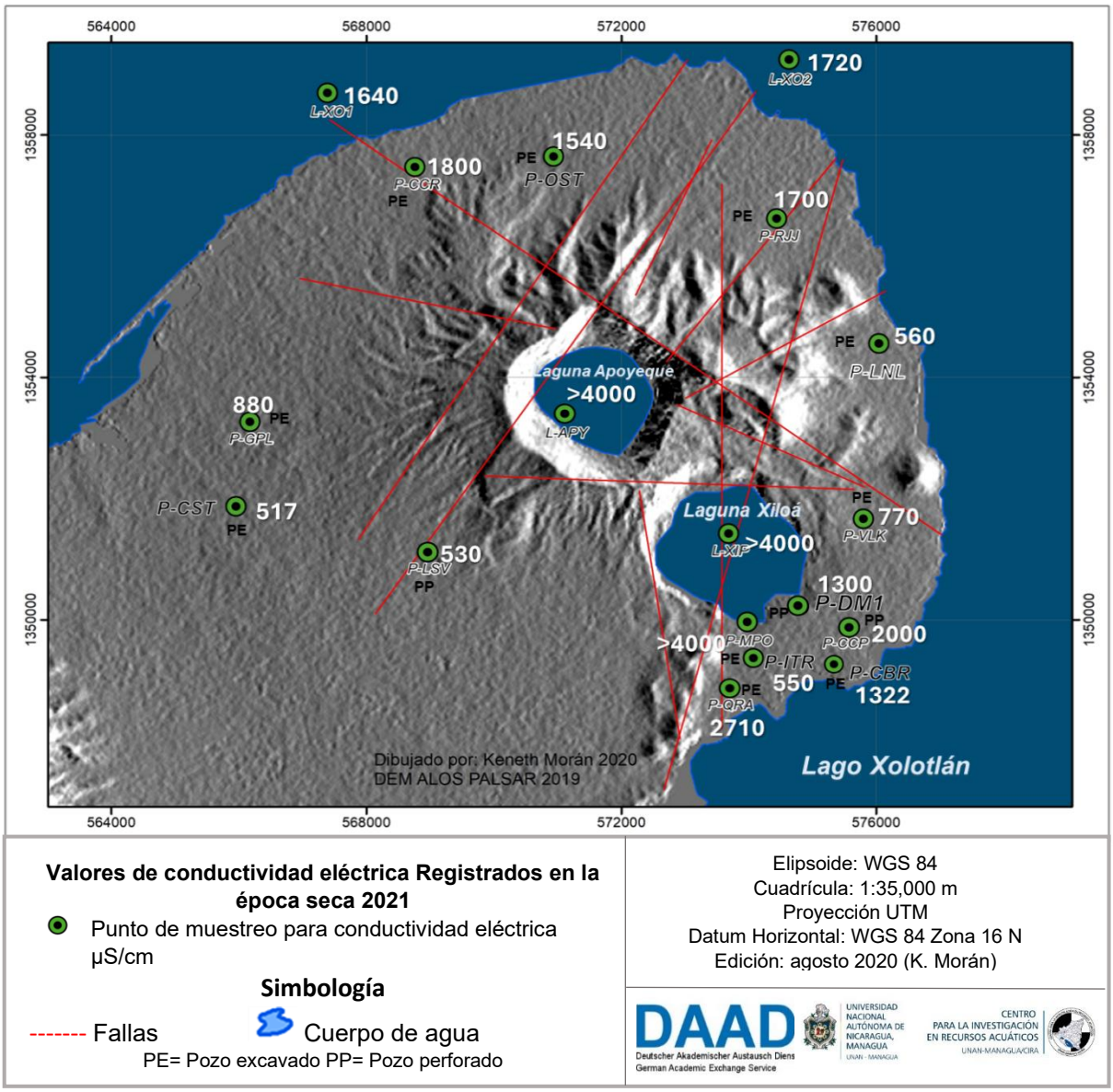


Figura 10. Mapa de valores de conductividad eléctrica del agua subterránea, lagos y lagunas de la península de Chiltepe, marzo 2021.

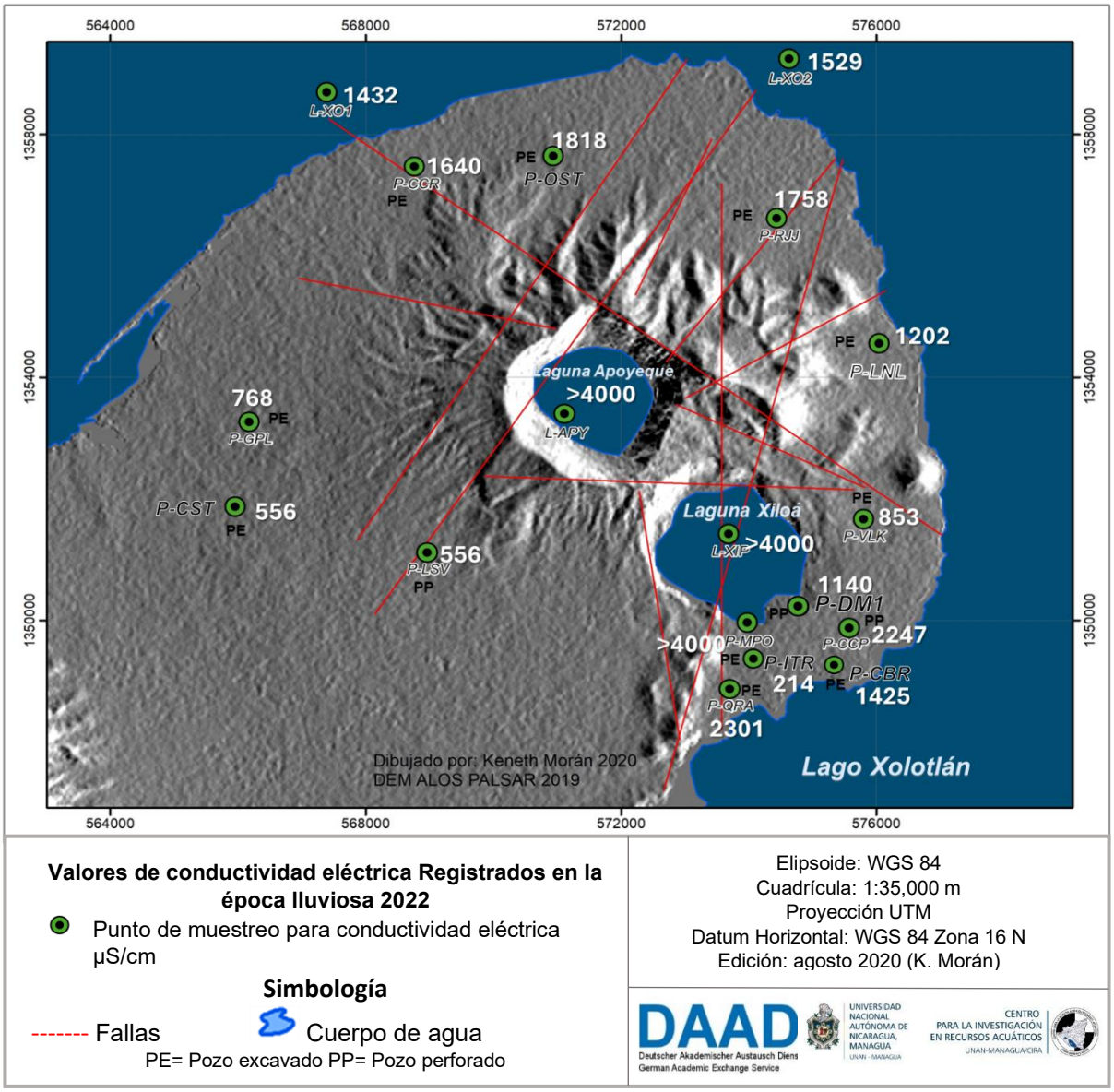


Figura 11. Mapa de valores de conductividad eléctrica en aguas subterráneas, lagos y lagunas de la península de Chiltepe, noviembre 2022.

5.2.3 Índice de acidez (pH)

5.2.3.1 Aguas subterráneas

Respecto a pH en las aguas subterráneas, durante la época seca se midió un rango de 6.7 a 7.64, mientras que para la estación lluviosa se obtuvo desde 6.8 a 7.64. Si bien estos rangos son prácticamente idénticos, como se observa en la figura 16, el pH presenta una ligera disminución durante la época lluviosa para casi todos los pozos (ver figura 12). Esto posiblemente generado por el contacto del agua de lluvia con el material orgánico que cubre el suelo, y aportes mineralógicos de la roca.

Los valores encontrados en el agua subterránea, nos permite clasificarlas como aguas neutras a ligeramente básicas. Además, se puede establecer que todos los pozos analizados, se encuentran dentro del rango de pH sugerido para aguas de consumo humano, establecido por las normas CAPRE.

5.2.3.2 Aguas superficiales

Por otra parte, respecto a las aguas superficiales; para el lago Xolotlán el pH se encontró en un rango de 7.9 a 9.1; indicando aguas altamente básicas. Las lagunas de Xiloá y Apoyeque por su parte, presentaron promedios de 8.0 y 8.7 respectivamente, que corresponden a aguas altamente básicas (ver figura 13). En Xiloá se encontró, una variación entre los valores superficiales y el medido a profundidad; en donde superficialmente el pH ronda los 8.0 mientras que a 50 m se encontraron de 7.4 a 7.8. Debemos mencionar también, que durante las mediciones del lago Xolotlán, se encontró evidencias de vertido de aguas residuales de un proyecto lechero, que pudo influenciar que el pH encontrado, difiera a los registros históricos, normalmente el pH de 9.25 a 9.55 (Lacayo, 1991).

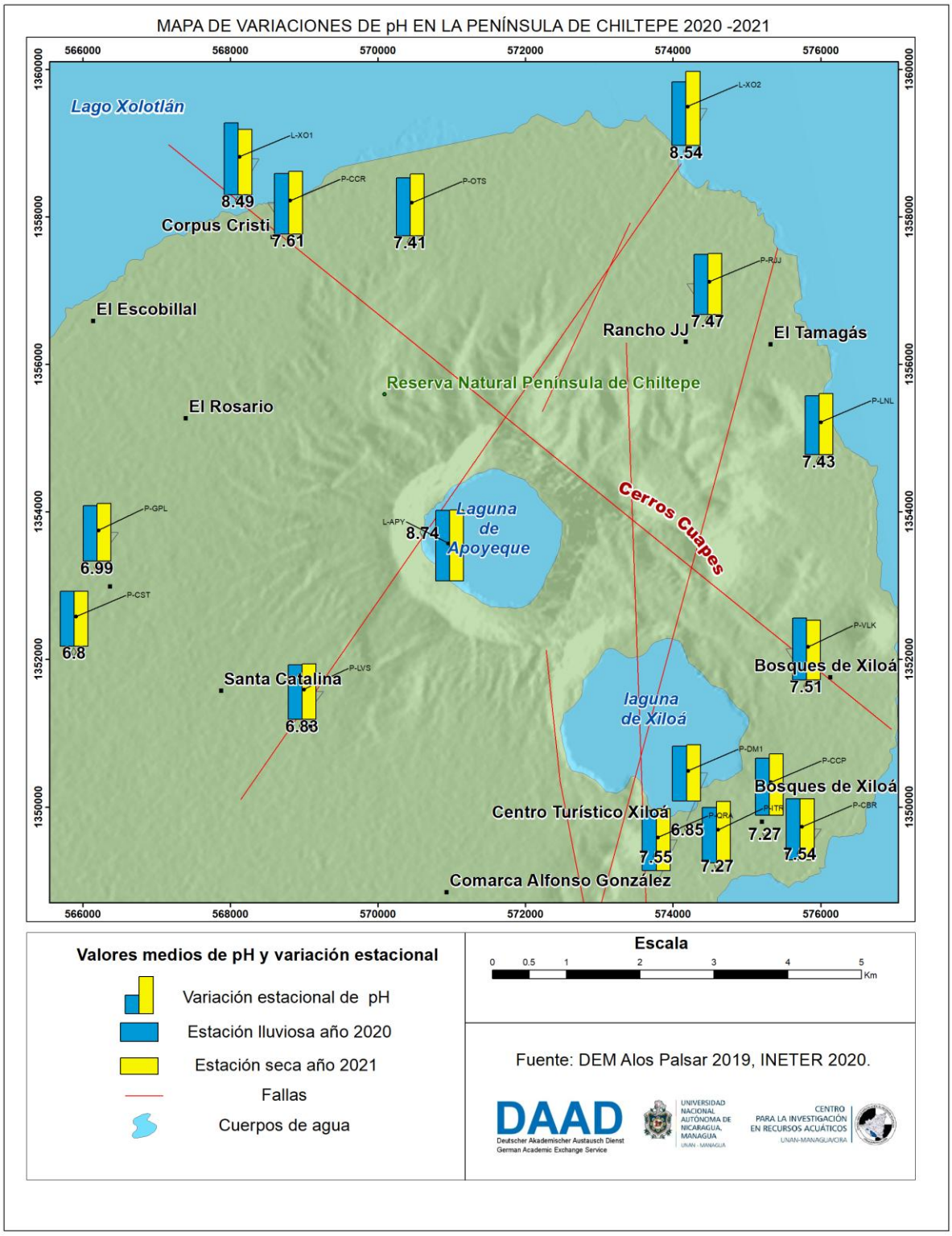


Figura 12. Mapa de variación de pH, en la península de Chiltepe 2020-2021.

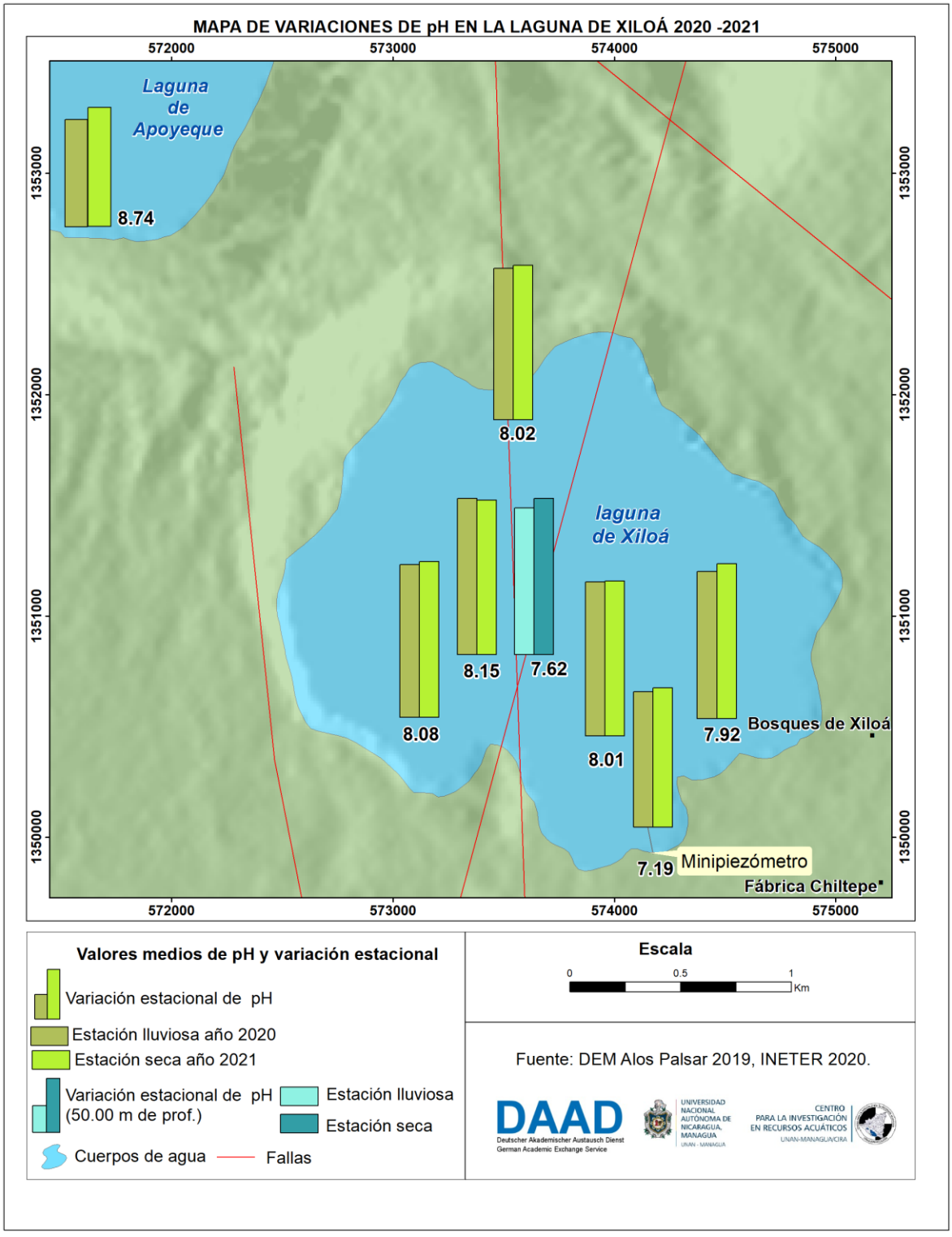


Figura 13. Mapa de variación de pH, en la laguna de Xiloá 2020-2021.

5.2.4 Potencial Redox

5.2.4.1 Aguas subterráneas

El potencial redox registrado en la península, durante la estación lluviosa se encontró en un rango desde 60 a 450 mV y con promedio de 305 mV. Para la estación seca, el rango se encontró de 50 a 345 mV y con un promedio de 150 mV. Presentando para ambos muestreos condiciones oxidantes para todos los pozos (ver figura 14).

Las condiciones oxidantes registradas para las aguas subterráneas pueden en parte estar siendo favorecidas porque en mayoría son pozos excavados con mayor exposición a la atmósfera, y además aquellos pozos perforados, el efecto del bombeo pudo oxigenar considerablemente la muestra. Cabe señalar que el mini-piezómetro instalado al sur de la laguna de Xiloá, fue la única muestra que presento un potencial redox negativo (-27 mV), probablemente porque el agua estuvo menos expuesta a la atmósfera.

5.2.4.2 Aguas superficiales

Respecto a las aguas superficiales, para el lago Xolotlán, el potencial redox se encontró en un promedio de 160 mV, para la época lluviosa; Mientras que para la época seca se obtuvo un valor medio de 71 mV. En el mismo orden, para la laguna de Xiloá, se obtuvo 150 y 70 mV (ver figura 15). Finalmente, para Apoyeque se encontraron valores de 196 y 36 mV. Cabe señalar que en Xiloá, los valores tanto horizontal como verticalmente, fueron uniformes, prevaleciendo las condiciones oxidantes.

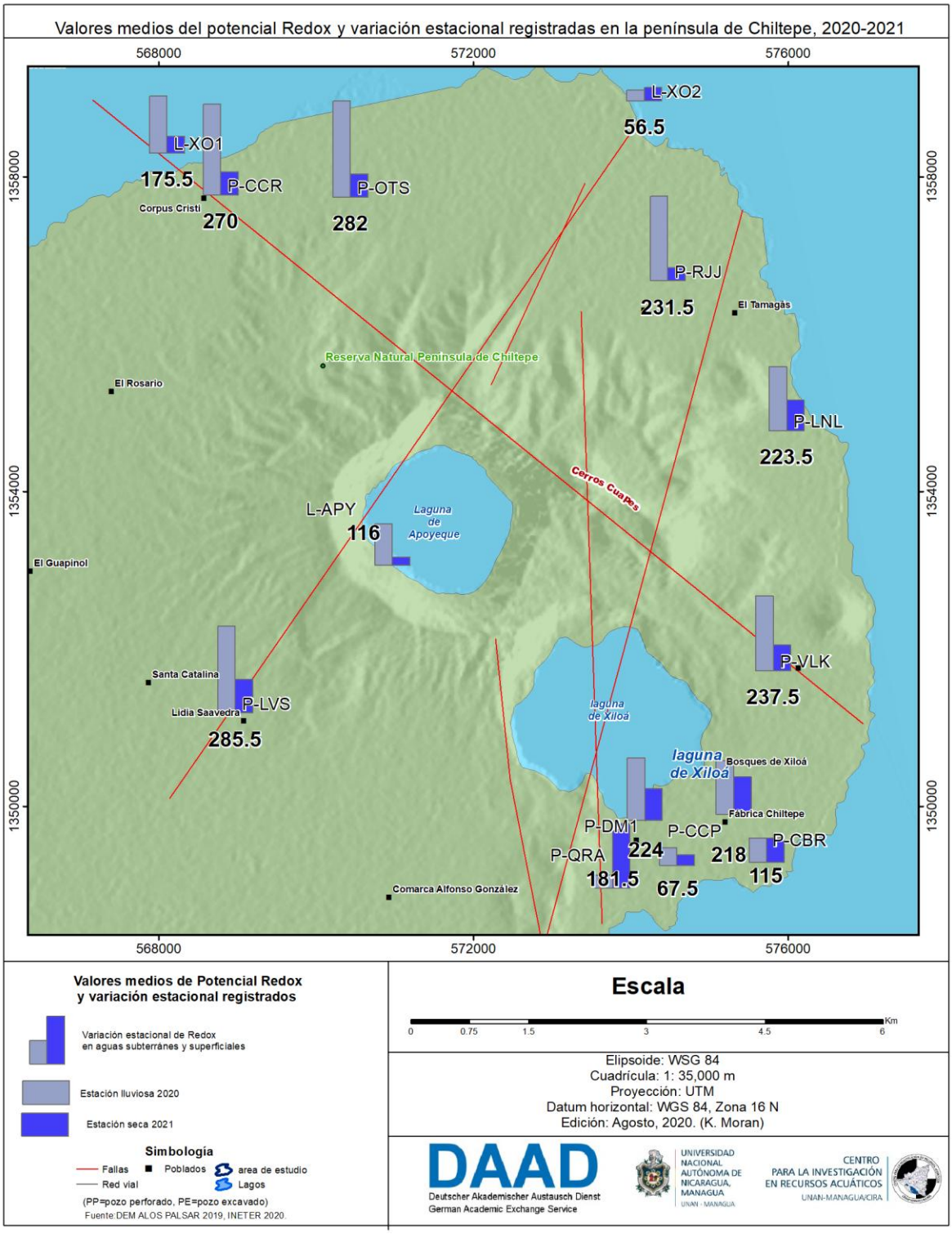


Figura 14. Mapa de variación redox, en la península de Chiltepe 2020-2021.

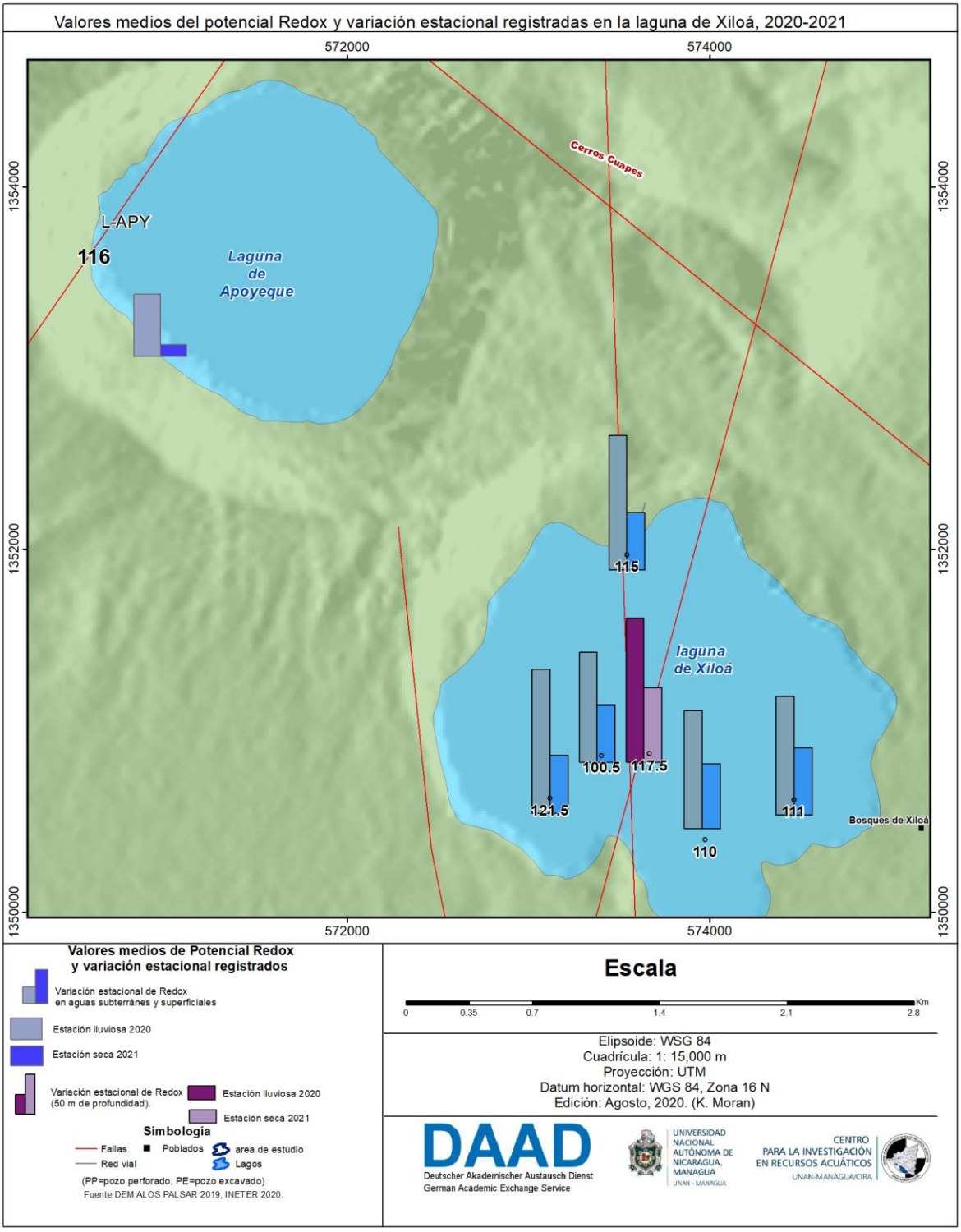


Figura 15. Mapa de variación de redox, en la Laguna de Xiloá 2020-2021.

5.2.5 Determinación de las concentraciones de Arsénico

5.2.5.1 Aguas subterráneas

Las concentraciones de este metaloide en las aguas subterráneas, para la época seca se encontraron en un rango de 1.7 a 31.7 µg. L^{-1}, resultando en un promedio de 15.4 µg. L^{-1}. Respecto a la estación lluviosa, las concentraciones se llegaron a registrarse desde 2.7 a 27.7 µg. L^{-1} (ver figura 16). El 57% de las muestras se encuentran en valores superiores permisibles para el consumo humano establecido por la OMS, en su guía de calidad de agua para consumo humano (2006).

Es necesario destacar, que en la zona la mayoría de los pozos son de uso agrícola, en especial para los sistemas de producción bovino; sin embargo, por medio de entrevistas conlos colaboradores de las fincas, se pudo rescatar que parte del personal que reside en las instalaciones, sí utilizan el agua proveniente de los pozos para cubrir sus necesidades básicas.

5.2.5.2 Aguas superficiales

Para las concentraciones de As, en el lago Xolotlán durante la época seca, se registró un promedio de 29.3 µg.L-1, mientras que para la estación lluviosa, se obtuvo un valor medio de 25.6 µg.L-1. Por otra parte, en la laguna de Apoyeque estos valores se encontraron en 33.3 µg.L-1 en época lluviosa y 41.7 µg.L^{-1}(ver figura 16). Estos valores, se corresponden con los antecedentes encontrados para el lago Xolotlán, este debido a su extensión y distintos factores geológicos, puede presentar valores que van desde (10.59 µg.L-1, a 2650.00 µg.L-1 (Delgado et al, 2020).

Por otra parte, las concentraciones obtenidas para Xiloá, para la estación lluviosa se obtuvo un promedio de 817 µg.L^{-1}, mientras que para la estación seca, sel promedio corresponde a 1525 µg.L^{-1}(ver figura 17). Resulta notorio también, la reconcentración entre temporada, puesto que los valores en promedio aumentaron 624 µg. L^{-1}. Cabe señalar que estas contenidos de As superan la concentración recomendada para la recreación (200 µg.L^{-1}) (World Health Organization, 2003).

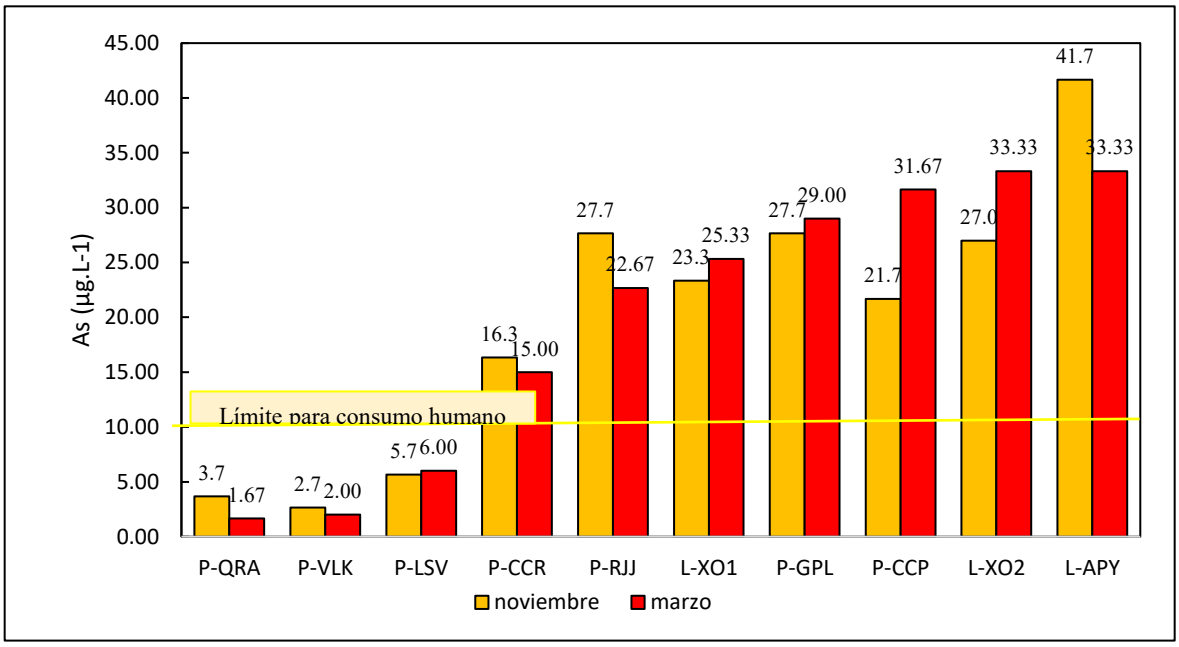


Figura 16. Variación estacional de las concentraciones de Arsénico del agua subterránea y superficial de la península de Chiltepe.

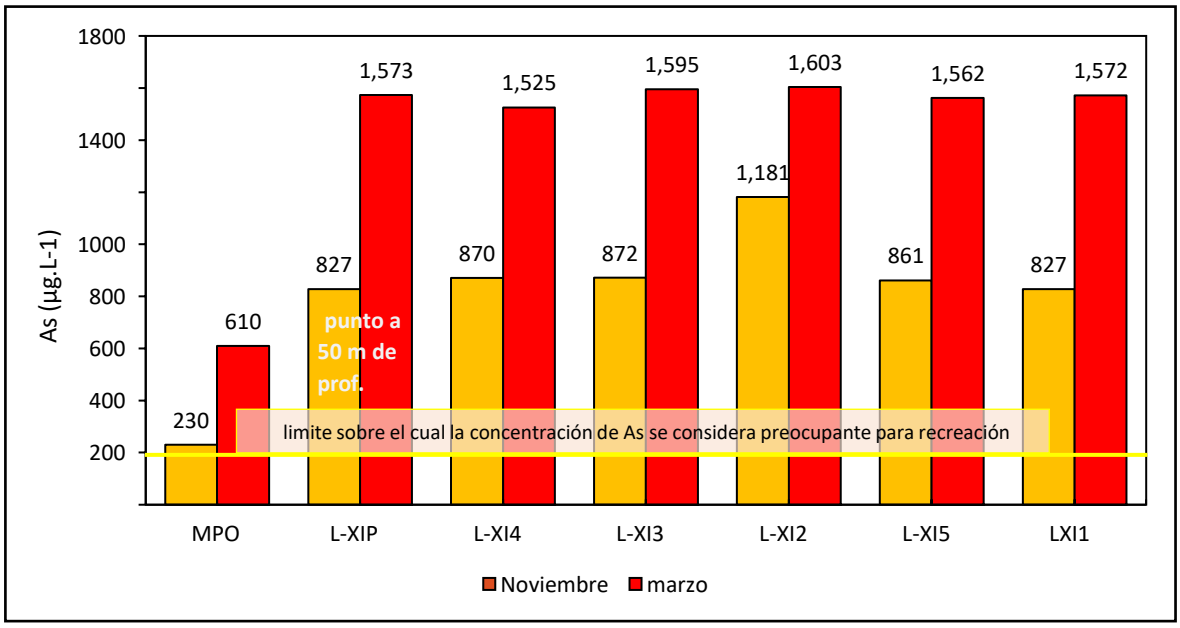


Figura 17. Variación estacional de las concentraciones de Arsénico de la Laguna de Xiloá.

5.2.5.3 Distribución espacial de las concentraciones de Arsénico de la península

Del total de las muestras, tanto superficiales como subterráneas, el 12 % se encontraronbajo concentraciones inferiores a los 10 µg. $L^{-1,}$ otro 42%, reportó entre 10 y 50 µg. L^{-1}, y el42% restante superaron los 100 µg. L^{-1}(ver figuras 18 y 19). El primer intervalo procede 2 pozos excavados y uno perforado, este último ubicado en la comunidad Lidia Saavedra, en donde abastase alrededor de 300 personas. El segundo grupo, se compone de tres fuentes:aguas subterráneas, lago Xolotlán y laguna de Apoyeque, siendo este último el más contaminado por As (hasta 40 µg. L^{-1}). El último intervalo descrito anteriormente, pertenecea su vez a las muestras de Xiloá, en donde en la época seca las concentraciones llegan a alcanzar 1600 µg. L^{-1}, cifra que es dos veces mayor que la registrada por Parello et al., (2008)en donde se reportaron hasta 723 µg L^{-1}.

La zona que más afectación presenta por arsénico corresponde la laguna de Xiloá. La segunda zona de mayor incidencia se encuentra al noroeste de la península, comunidad de Corpus Cristi, El Tamagás y El guapinol, en donde los pozos examinados llegaron a contenerde 16-29 µg. L^{-1}. Por último, las zonas con concentraciones más bajas (<10 mg. L^{-1}), se encontraron en la comunidad de Bosques de Xiloá, sin embargo, también ahí se pueden encontrar más de 20 µg. L^{-1}.

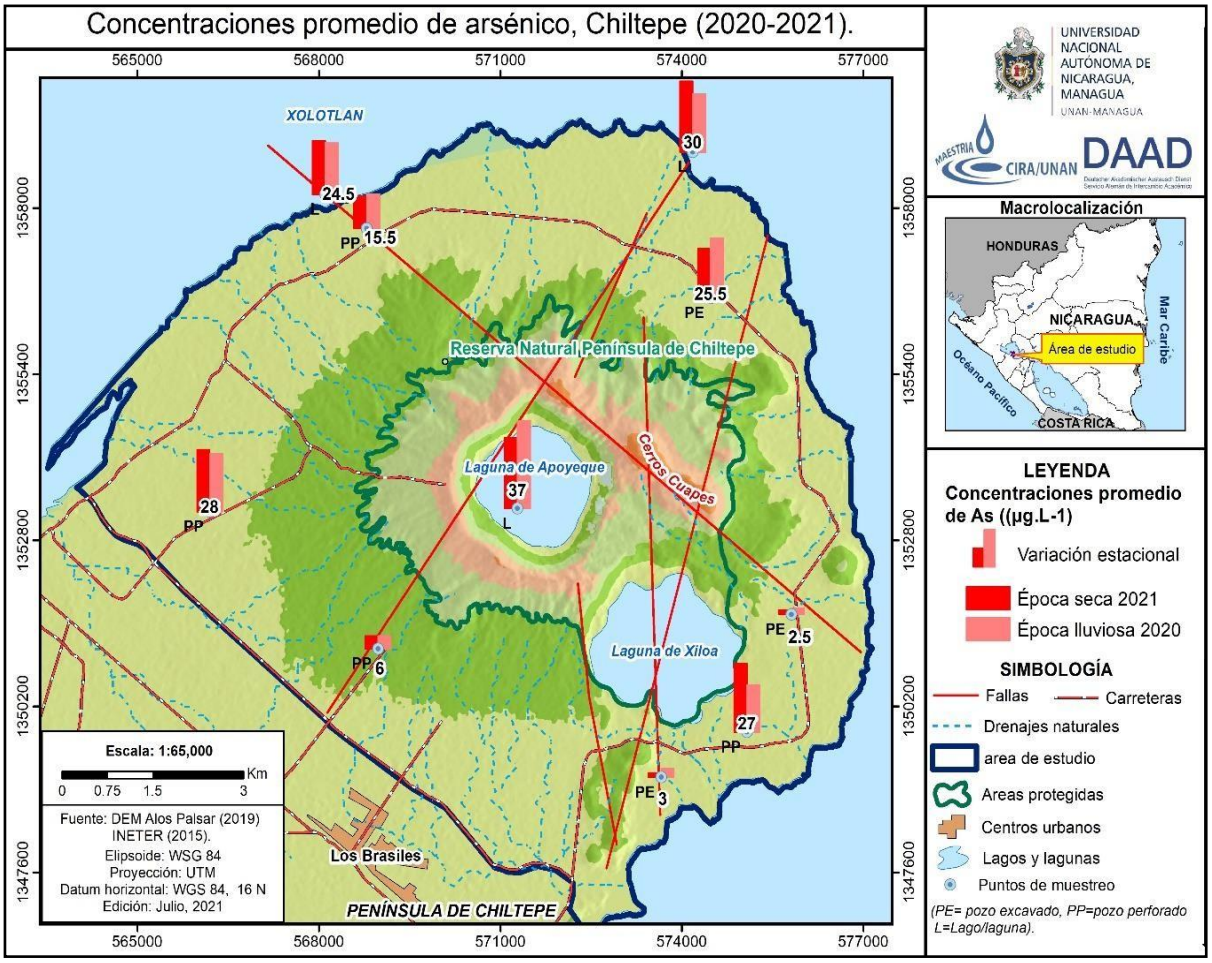


Figura 18. Mapa de la distribución espacial de las concentraciones de Arsénico en la Península de Chiltepe, Noviembre (2020).

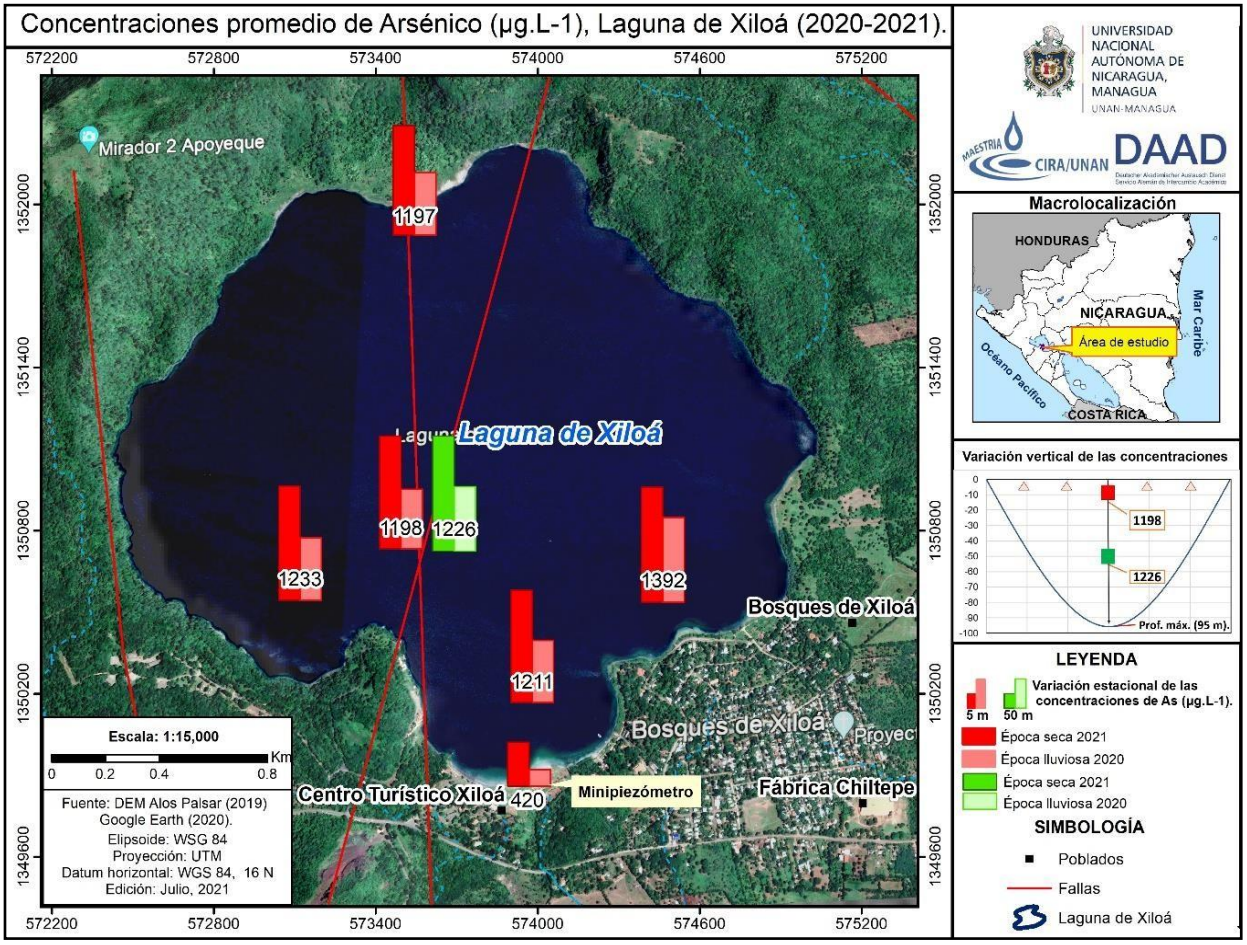


Figura 19. Mapa de la distribución espacial de las concentraciones de Arsénico en la Península de Chiltepe.

5.2.5.4 Especiación de Arsénico presente en la península

La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, generalmente se encuentra como oxianión en el agua subterránea, cuyas especies más importantes son los arsenatos conestado de oxidación (V) y los arsenitos con estado de oxidación (III) (Smedley & Kinniburgh, 2002). Siendo éstos últimos los de mayor preocupación para la salud humana (Bocanegra & Bocanegra, 2002). De los parámetros monitoreados en esta investigación, se obtuvo que el95% de los sitios, el arsénico probablemente se encuentre como arsenatos con un estado de oxidación (V) (ver figura 20 y 21).

Esta proporción ocurre probablemente a que la mayoría de los pozos son de tipo excavado, en donde prevalen condiciones oxidantes. Por otra parte, los puntos cuyas condiciones favorecen el estado de oxidación (III), son presentados en un pozo ubicado en lacomunidad de Bosques de Xiloá, y un minipiezómetro ubicado a orillas de la laguna de Xiloá.En el primero las condiciones reductoras pueden en parte atribuirse a la cantidad de materiaorgánica que se pudo observar al colectar la muestra, ya que este estaba precariamente cubierto; y respecto al minipiezómetro, las aguas colectadas de este no fueron expuestas significativamente al aire libre. Cabe señalar que en ambos puntos, las condiciones cambiaron entre las dos temporadas, para el pozo las condiciones reductoras se presentaron sólo para noviembre, mientras que el MP sólo en la época seca.

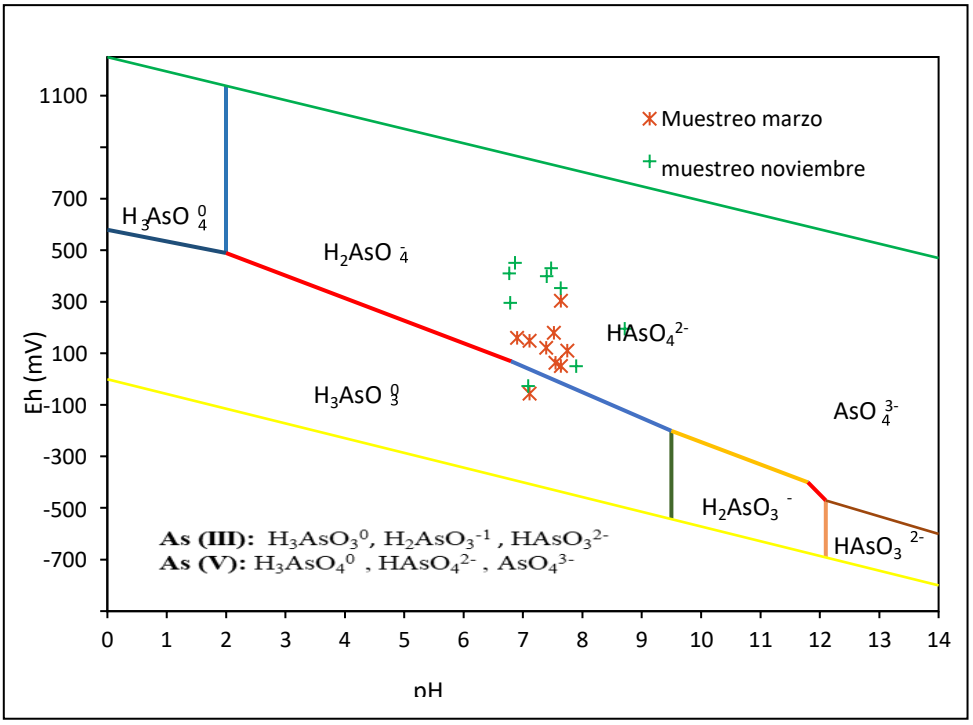


Figura 20. Gráfico de especie más probable de Arsénico según valores de Eh y pH, para las aguas subterráneas de la península de Chiltepe.

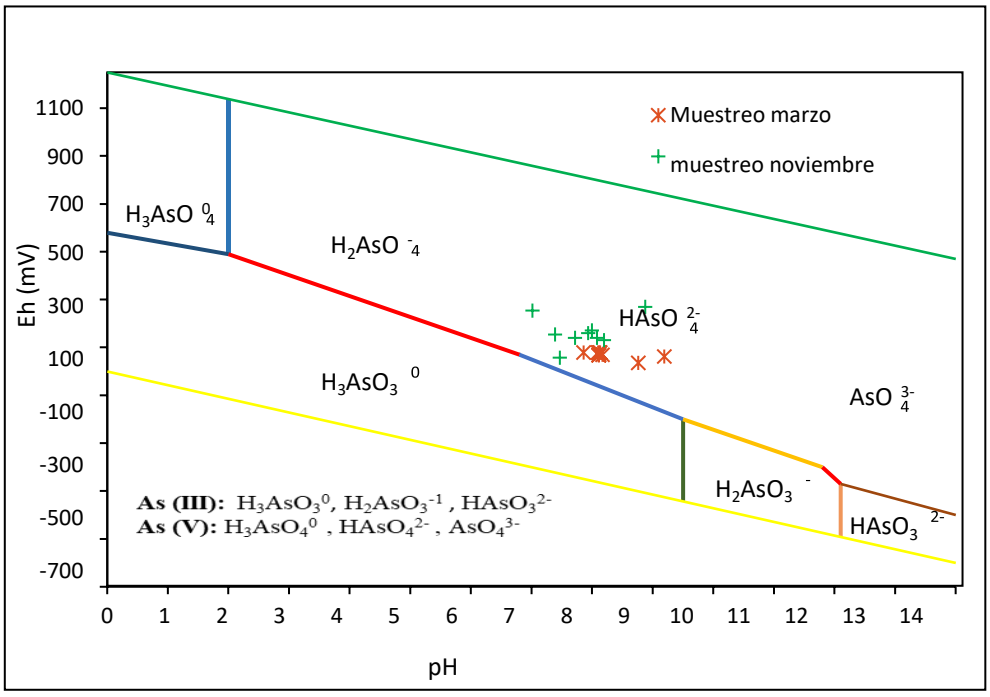


Figura 21. Gráfico de especie más probable de Arsénico según valores de Eh y pH, para las aguas superficiales de la península de Chiltepe

5.2.5.5 Relación entre las concentraciones de Arsénico y pH

Como se describió anteriormente, en las aguas subterráneas, durante la época seca se encontró un pH de 6.7 a 7.64, clasificándolas de neutras a ligeramente básicas. Como se puede observar en el gráfico, no se observa una tendencia significativa entre el valor de pH y la concentración de As (ver figura 22 y 23). Puesto a que se esperaba que a menor pH, mayores serían las concentraciones debido al aumento a la solubilidad de este. sin embargo, debido ala poca variación entre concentraciones del metaloide y su valor correspondiente de pH, no es posible establecer esta relación.

Respecto a las aguas superficiales, estas fueron clasificadas como aguas altamente básicas y con altas concentraciones de As, pudiendo alcanzar los 1600 $\mu g.L^{-1}$ (ver figura 22 y 23). En esta ocasión, estas altas concentraciones no pueden ser explicadas por un alto grado de acidez en el agua, ya que los valores son alcalinos; sin embargo, como se ha probado en algunos estudios como (Fan et al., 2020); En donde se prueba que altos valores de pH, favorecen la desorción de As (V) del material presente. Por lo que es de esperarse, que la capacidad que tiene el sedimento de estas lagunas, para retener este metal sea baja.

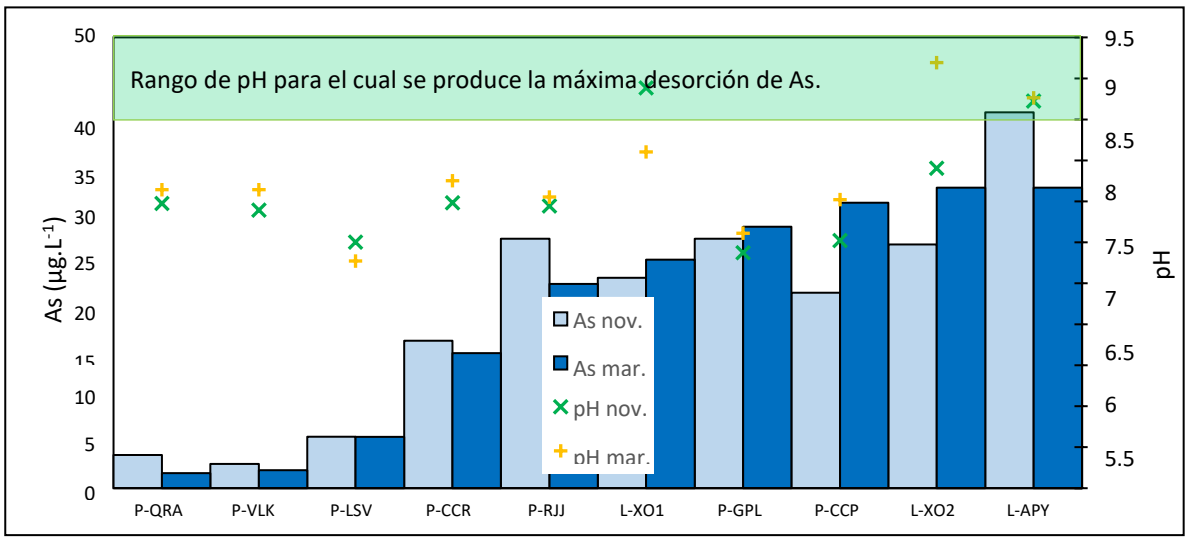


Figura 22. Gráfico de relación entre las concentraciones de Arsénico, y valores de pH de las aguas subterráneas de la península de Chiltepe.

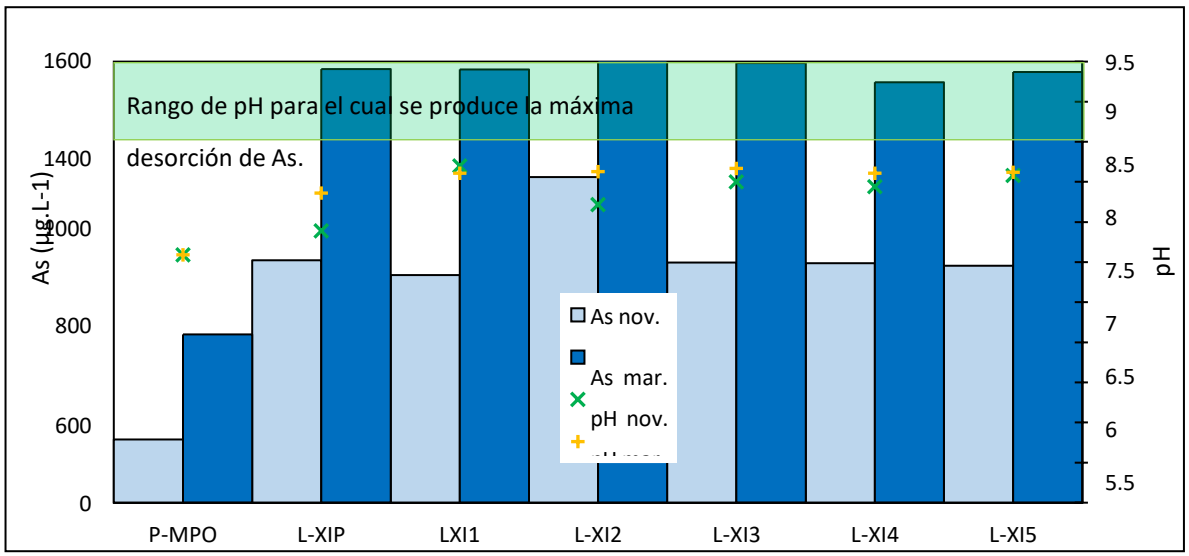


Figura 23. Gráfico de relación entre las concentraciones de Arsénico, y valores de pH en las aguas superficiales de la península de Chiltepe.

5.2.5.6 Relación entre las concentraciones de Arsénico y el flujo subterráneo en la Península de Chiltepe

Los puntos muestreados se seleccionaron considerando su posición, en relación con la dirección del flujo del agua subterránea y los sistemas de fallamiento local; ya que se esperaba encontrar zonas de descargas al Sur de la laguna de Xiloá y al Noroeste de Apoyeque. En nuestro caso, los datos fisicoquímicos e isotópicos ayudan a probar que existeun flujo de agua (desde Xiloá o del Xolotlán), que entra en contacto con las aguas subterráneas en la sección de acuífero ubicado en Bosques de Xiloá. Cabe señalar que dichos datos guardan más relación con una teoría en donde se da una entrada del lago Xolotlán haciadicha zona.

Esto puede ser explicado debido a que las diferencias de elevación entre las lagunas y el lagoXolotlán son prácticamente iguales, por lo que no existe un fuerte gradiente hidráulico; esta misma hipótesis surge en el Plan Maestro Geotérmico Chiltepe; en donde se describe que debido a la escaza diferencia de elevación; es improbable que exista un fuerte gradiente hidráulico entre las lagunas y los acuíferos freáticos adyacentes a la península, así que el flujosub-superficial desde Xiloá y Apoyeque hacia el exterior, puede estar limitado de una débil difusión (Comisión Nacional de Energía, 2001).

5.2.6 Composición Isotópica de la Península

5.2.6.1 Aguas Subterráneas

Para las aguas subterráneas de la península de Chiltepe, esta caracterización muestra que durante la estación lluviosa, la composición isotópica promedio corresponde a: $\delta\,^{2}H$ =-39.59 ‰, y $\delta\,^{18}O$= -5.59 ‰. Mientras que para la estación seca, los valores medios obtenidos son los siguientes: $\delta\,^{2}H$ = -40.09 ‰ y $\delta\,^{18}O$= -5.72 ‰. Se tienen, además, valores máximos de $\delta^{2}H$ = -10.4 ‰, $\delta^{18}O$= -1.37 ‰ y mínimos de $\delta^{2}H$ = -48.50 ‰, $\delta^{18}O$= -7.38 ‰ (ver figura 24-25).

Para el minipiezómetro instalado en la orilla sur de Xiloá, el análisis indica que, en la estación lluviosa, la composición resultó en: $\delta\,^{2}H$ = -4.1 ‰ y $\delta\,^{18}O$= 0.48 ‰. Mientras que, para la época seca se obtuvo los valores de: $\delta\,^{2}H$ = 1.8 ‰ y $\delta\,^{18}O$= 1.35 ‰.

5.2.6.2 Aguas Superficiales

Respecto a las aguas superficiales, para el lago Xolotlán esta caracterización para la época lluviosa, resultó en valores de: $\delta\,^{2}H$ = 1.5 ‰, $\delta\,^{18}O$= 0.82 ‰. Para la estación seca por su parte, se obtuvo: $\delta\,^{2}H$ =5.15 ‰, $\delta\,^{18}O$= 1.26 ‰. Presentando además, valores máximos de $\delta^{2}H$ = 5.7 ‰, $\delta^{18}O$= 1.35 ‰ y mínimos $\delta^{2}H$ = 1.1 ‰, $\delta^{18}O$= 0.77 ‰ (ver figura 26-27). Para este lago, la medición durante la estación seca arrojó valores más enriquecidos que la época lluviosa, esto probablemente sea una respuesta natural a la fluctuación climática, efectos evaporativos, y flujos bajos, característicos de la época seca.

La laguna de Xiloá por su parte, presentó para la época lluviosa, una composición isotópica promedio de: $\delta\,^{2}H$ =3.87 ‰, $\delta\,^{18}O$= 1.98 ‰. Mientras que, para la época seca se obtuvieron valores de: $\delta\,^{2}H$ =6.47 ‰, $\delta\,^{18}O$= 2.28 ‰. Al igual que el lago Xolotlán, se nota un significativo enriquecimiento para el segundo monitoreo; dado probablemente por las condiciones climáticas propias de la temporada, potenciada además por ser un cuerpo de agua, sin entradas de aguas superficiales.

En la laguna de Xiloá, se evaluó también la variación isotópica vertical, colectando una muestra sobre el punto más profundo (punto 2) en el cual se capturó una muestra a 50 m (capacidad máxima de la botella). A simple vista, solo se observan variaciones reducidas de $\delta\,^{2}H$ y $\delta\,^{18}O$ entre la muestra superficial y a profundidad. Esto sugiere que el lago este mezclado homogéneamente durante todo el año. Horizontalmente, también se encontró una alta homogeneidad entre los datos colectados.

En lo que respecta a la laguna de Apoyeque, los análisis revelan que, para la época lluviosa, la composición es de: $\delta\,^{2}H$ =1,1 ‰, $\delta\,^{18}O$= 1.99 ‰. Mientras que, para la época seca, se obtuvieron valores de $\delta\,^{2}H$ =6.66 ‰, $\delta\,^{18}O$= 2.47 ‰. En este caso, se repite la condición de enriquecimiento, ocasionados probablemente a los mismos fenómenos climáticos.

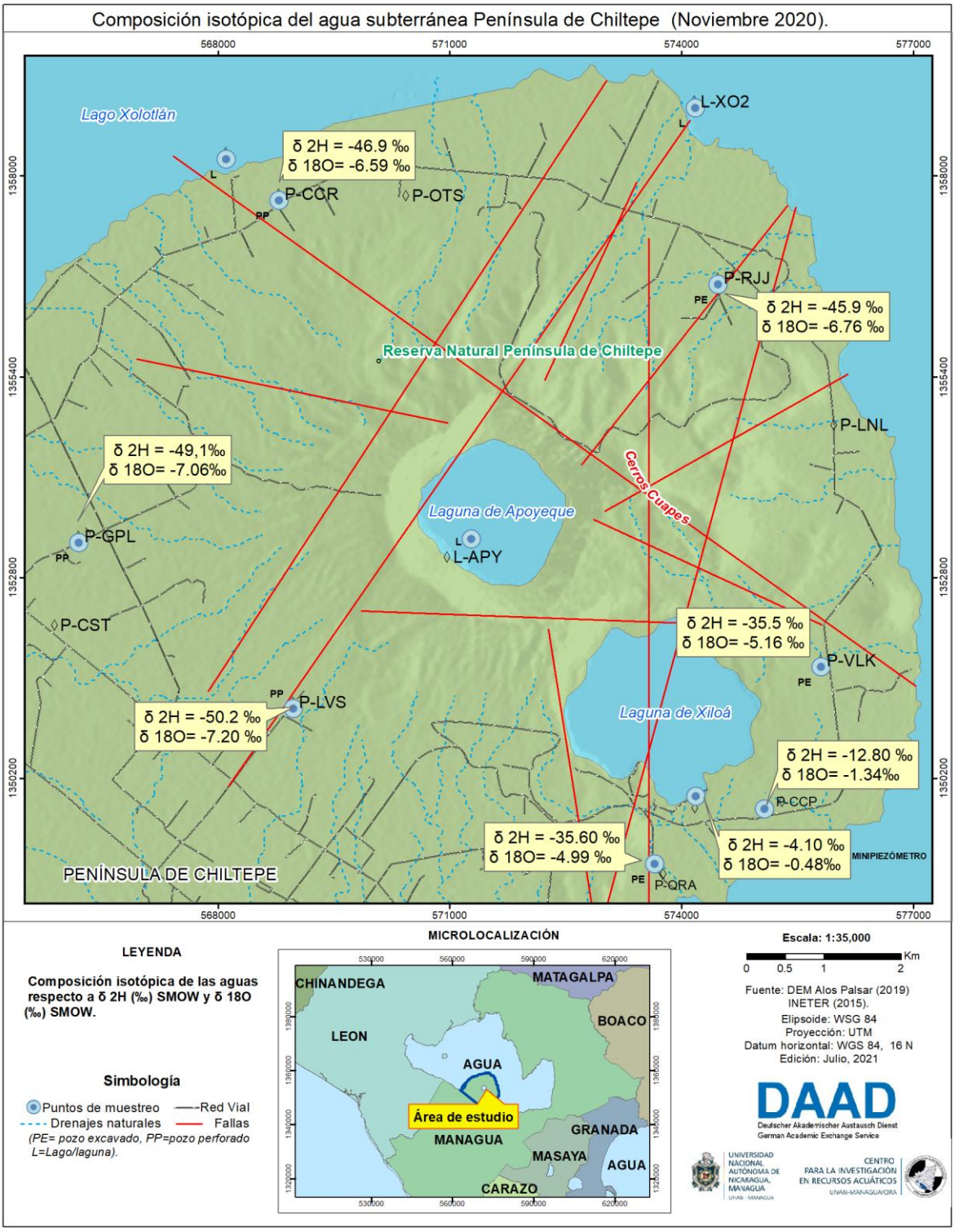


Figura 24. Composición isotópica respecto a oxígeno 18 y deuterio de las aguas subterráneas de la península de Chiltepe, noviembre2020.

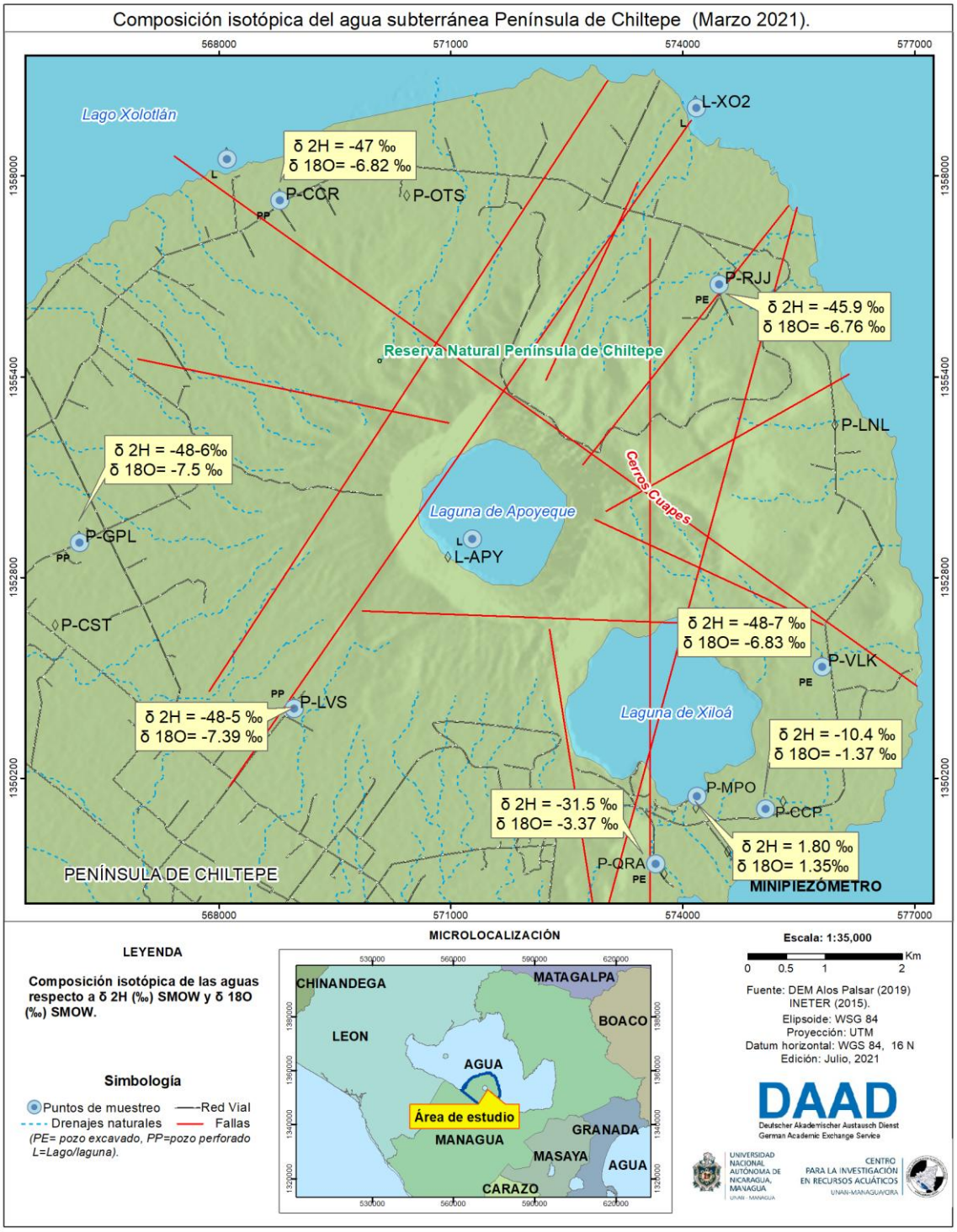


Figura 25. Composición isotópica respecto a oxígeno 18 y deuterio de las aguas subterráneas de la península de Chiltepe, marzo 2021.

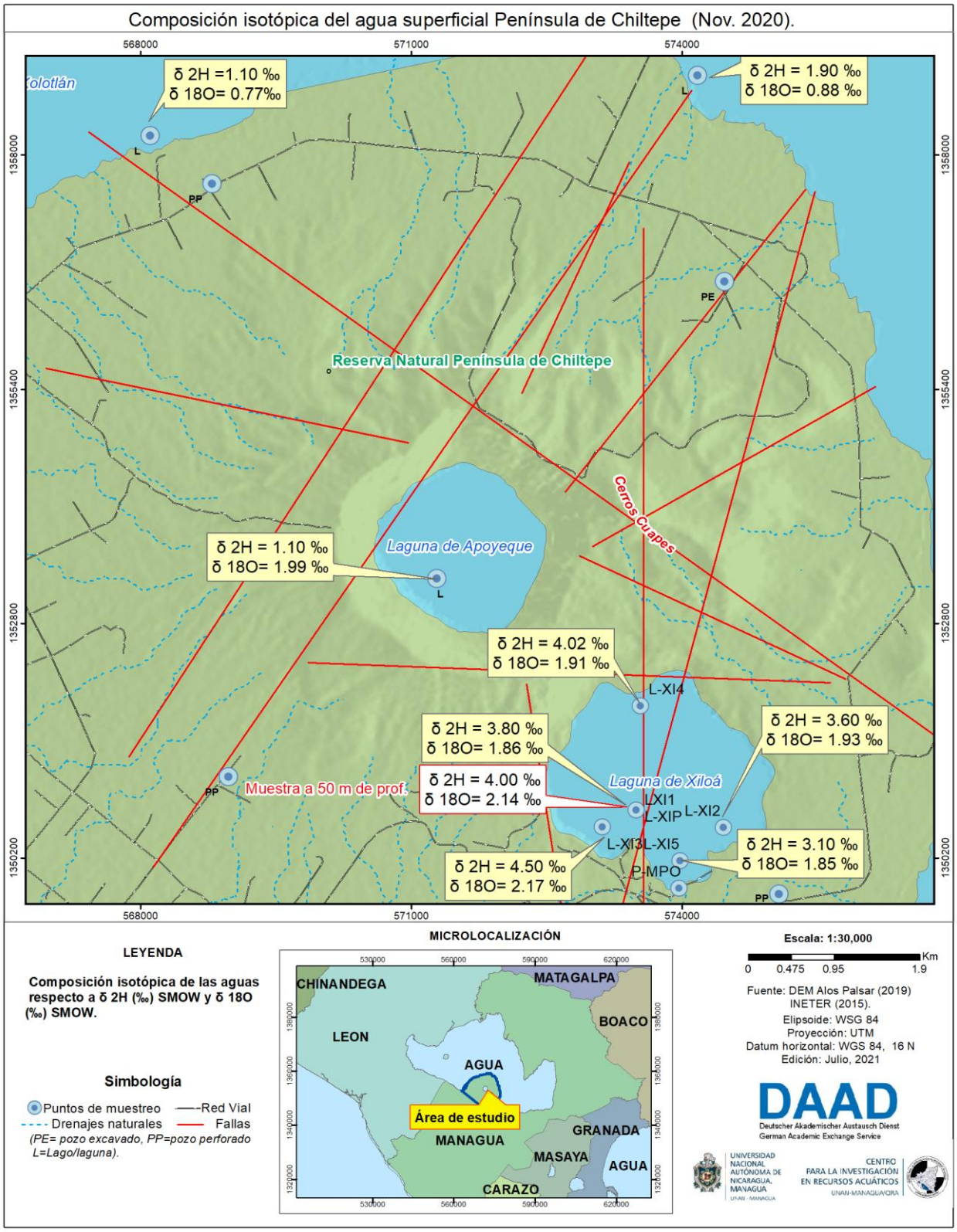


Figura 26. Composición isotópica respecto a oxígeno 18 y deuterio de las aguas superficiales de la península de Chiltepe, noviembre 2020.

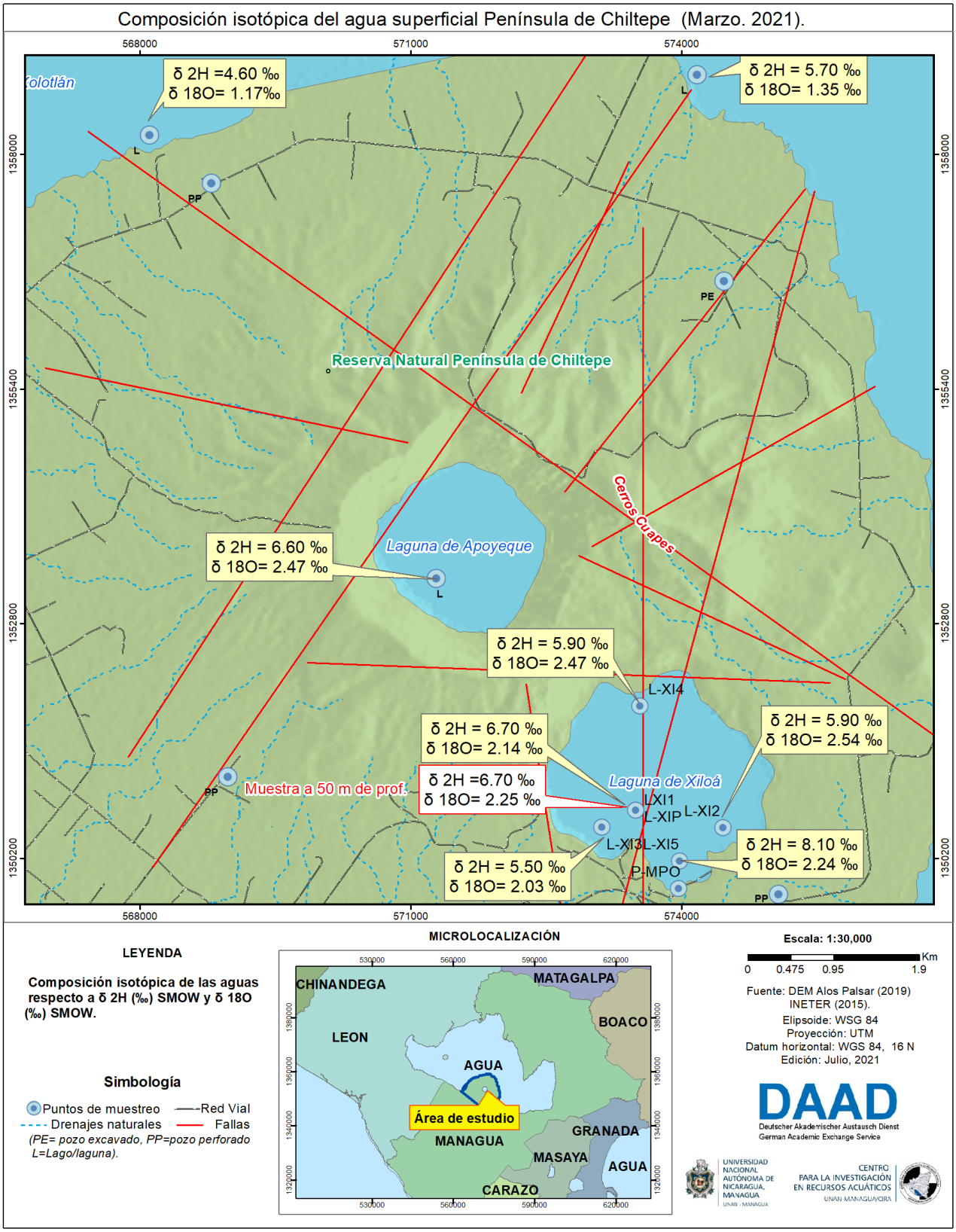


Figura 27. Composición isotópica respecto a oxígeno 18 y deuterio de las aguas superficiales de la península de Chiltepe, marzo 2021.

5.2.6.3 Comparación de los Isótopos oxígeno 18 y deuterio de las fuentes muestreadas

Se presenta a continuación un gráfico comparativo de la composición de isotópica, obtenida del agua subterránea, el lago Xolotlán y las lagunas de Xiloá y Apoyeque; junto a línea meteórica de agua mundial (GMWL) y la línea meteórica local, obtenida por Barberena (2021) (ver figura 28-29). De la comparación, se puede observar que, la composición isotópica de todas las fuentes de agua se ubica por debajo de la línea meteórica global (GMWL) y la local; lo cual se asocia a procesos de evaporación.

Los valores más empobrecidos del conjunto se encontraron para el agua subterránea; los que se corresponden, además, con los valores isotópicos de la lluvia local, siendo indicador de que este acuífero se recarga de dicha precipitación.

Los valores más elevados de enriquecimiento se observan en la Laguna de Xiloá, Apoyeque y el Lago Xolotlán (ver Figuras 28-29). Cabe destacar que los datos obtenidos del mini piezómetro, ubicado en el borde de la Laguna de Xiloá, muestran una notable diferencia respecto al resto de los pozos, presentando valores significativamente más enriquecidos. Es importante mencionar que esta muestra también exhibe valores atípicos en sus parámetros de campo, con una conductividad eléctrica (CE) superior a 4000 y un potencial redox de -27.

Otro conjunto de datos que refleja un enriquecimiento atípico, en ambas estaciones, corresponde a los pozos P-CCP, P-QRA y el minipiezómetro, ubicados al sureste de la Laguna de Xiloá. Estos sitios también destacan por presentar los valores más altos de conductividad eléctrica, con un rango de 2000 a 2700 µS/cm, mientras que el resto de los pozos se sitúa en un promedio de 1200 µS/cm. Este fenómeno será analizado en mayor detalle en el siguiente apartado.

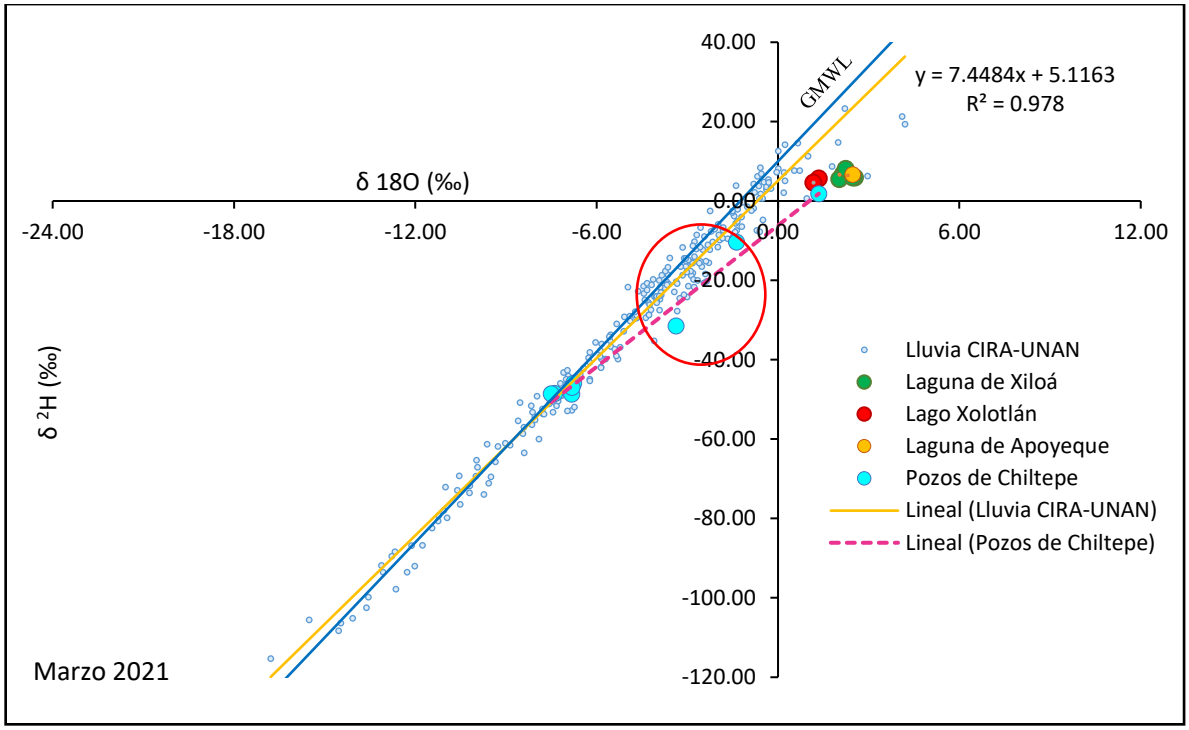


Figura 28. Gráfico comparativo entre la dispersión de la composición isotópica de las aguas de la península, respecto a la línea meteórica mundial y local, marzo (2021).

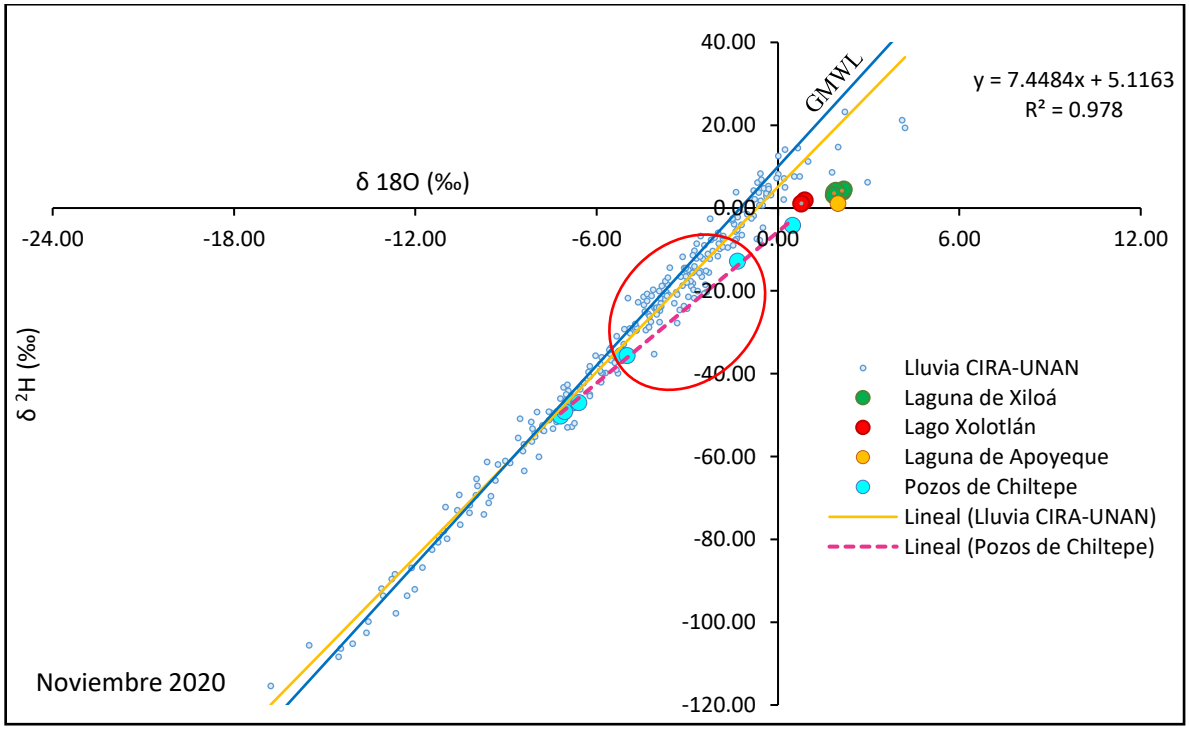


Figura 29. Gráfico comparativo entre la dispersión de la composición isotópica de las aguas de la península, respecto a la línea meteórica mundial y local, noviembre (2020).

5.2.6.4 Interpretación del exceso de Deuterio (D-excess)

Para el agua subterránea, el D-excess promedio se calculó en 5.16 ‰ para la época lluviosa mientras que para la época seca se obtuvo un valor de 5.67‰. En adición se obtuvieron valores máximos de 11.40‰ y mínimos de -4.54‰. En general estos valores inferiores a los medios globales de +10‰, nos indican una leve ocurrencia de procesos de evaporación. Esto puede ser atribuido a factores climáticos, como lo es la ocurrencia de nubes provenientes del este y noreste, con aguas del atlántico; mezcladas además con evaporación del lago Xolotlán. Pueden generar este exceso de deuterio particular (Ramírez-Leiva et al., 2017) (ver figura 30 y 31). Cabe señalar que los únicos valores negativos obtenidos para este análisis son los mismos pozos que produjeron valores atípicos en acápites anteriores (pozo CCP, QRA y el mini-piezómetro) ver anexo N°6.

Respecto al lago Xolotlán, este índice se obtuvo en -5.10‰ para la época lluviosa, y -12.93‰ para la seca. Los valores máximos -4.76 ‰ y mínimos -21.10‰. En el mismo orden, para Apoyeque los valores medidos se encontraron en -14.82‰ y -13.16‰. Para la laguna de Xiloá, los excesos presentaron valores de -11.95‰ para la estación lluviosa y -11.76‰ para la época seca, los valores máximos corresponden a -9.82‰, y los mínimos de -14.42‰.

estos datos predominantemente negativos; puede ser explicado por las condiciones climáticas a lo largo de la vertiente del Pacífico de Nicaragua, representadas por un régimen de lluvias más seco (es decir, menor mezcla de agua meteórica potencial) y mayores temperaturas ambientales aumentan el potencial de fraccionamiento cinético superficial (Ramírez-Leiva et al., 2017). Sin embargo, los valores predominantemente inferiores a cero; pueden ser también indicadores de aguas están sometidas a un fraccionamiento kinético secundario; como lo encontrado para Ramirez-leiva et al., (2017), en su evaluación de aguas hidrotermales de Nicaragua.

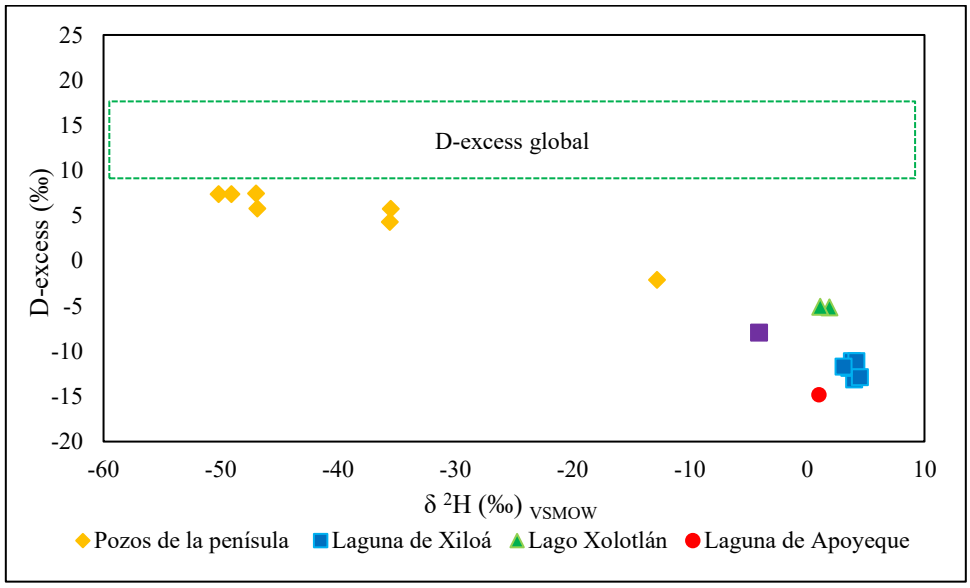


Figura 30. Gráfico de clasificación de las aguas de la península, según el D-excess, noviembre (2020).

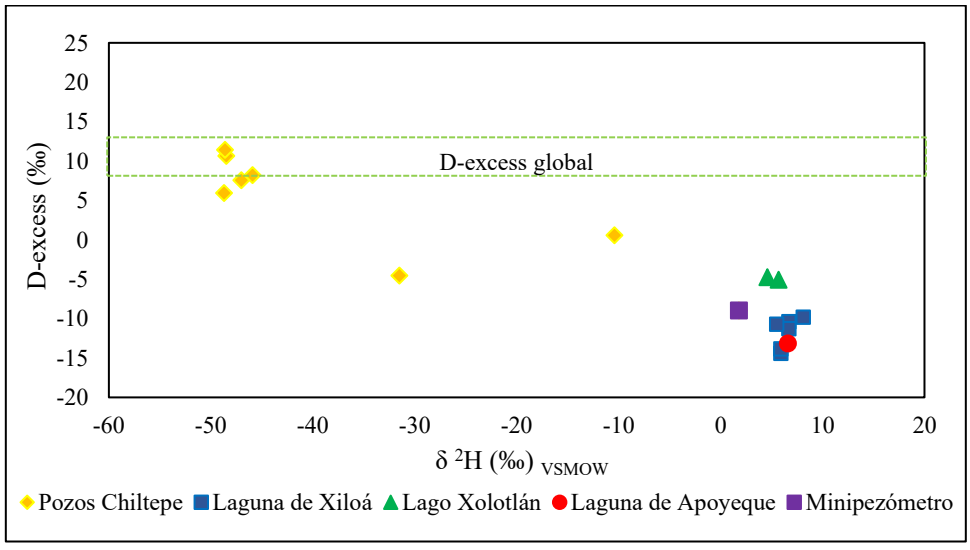


Figura 31. Gráfico de clasificación de las aguas de la península, según el D-excess, marzo (2021).

5.2.6.5 Interpretación del exceso de línea condicionado (Lc-excess)

Otro parámetro secundario utilizado para caracterizar el sistema es el denominado exceso de línea condicionado (en lo sucesivo lc-excess). Este método se utiliza para determinar cómo los valores isotópicos del agua de determinado sitio, difiere de su presunta fuente (Landwehr & Coplen, 2006).

Para el agua subterránea, el lc-excess promedio se calculó en -3.23‰ para la época lluviosa mientras que para la época seca se obtuvo un valor de -2.79; como valores máximos se obtuvieron: de 1.21‰ y mínimos de -11.60‰. Típicamente se considera que valores de lc-excess de +10‰, es un claro indicador de que el agua muestreada refleja condiciones cercanas a las aguas meteóricas; en nuestro caso (ver figura 32 y 33).

Respecto al lago Xolotlán, este índice se obtuvo en -9.83 ‰ para la época lluviosa, y -9.41‰ para la seca, con variaciones poco significativas entre los datos. En el mismo orden, para Apoyeque los valores medidos se encontraron en -18.89 ‰ y -16.95 ‰. En Xiloá por su parte, los excesos no presentaron variaciones entre temporada, teniendo -16.02 ‰ para la estación lluviosa y -15.66 ‰. En general estas aguas superficiales, presentaron valores de Lc-excess inferiores a cero, lo cual es indicativo de una fuente de fraccionamiento secundario.

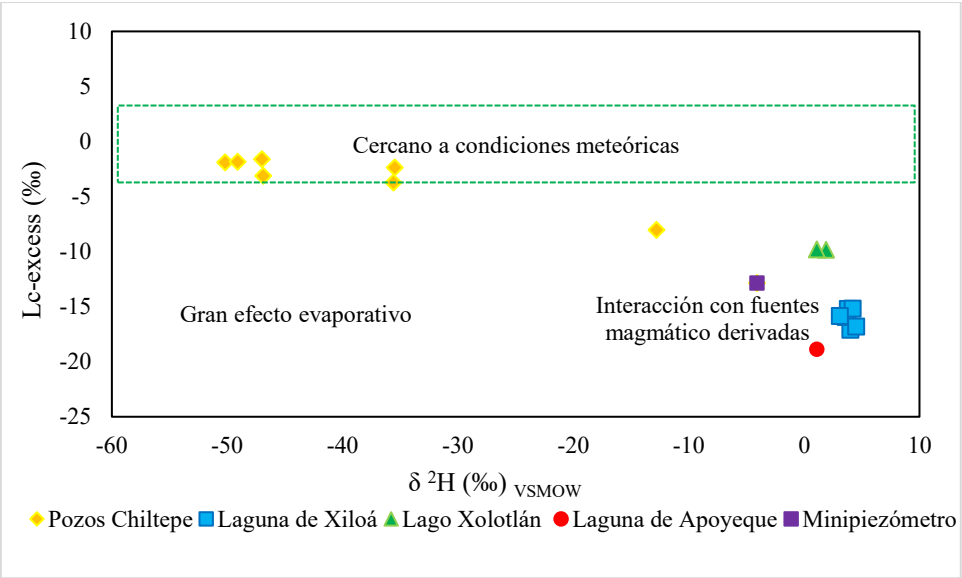


Figura 32. Gráfico de clasificación de las aguas de la península, según el Lc-excess, noviembre (2020).

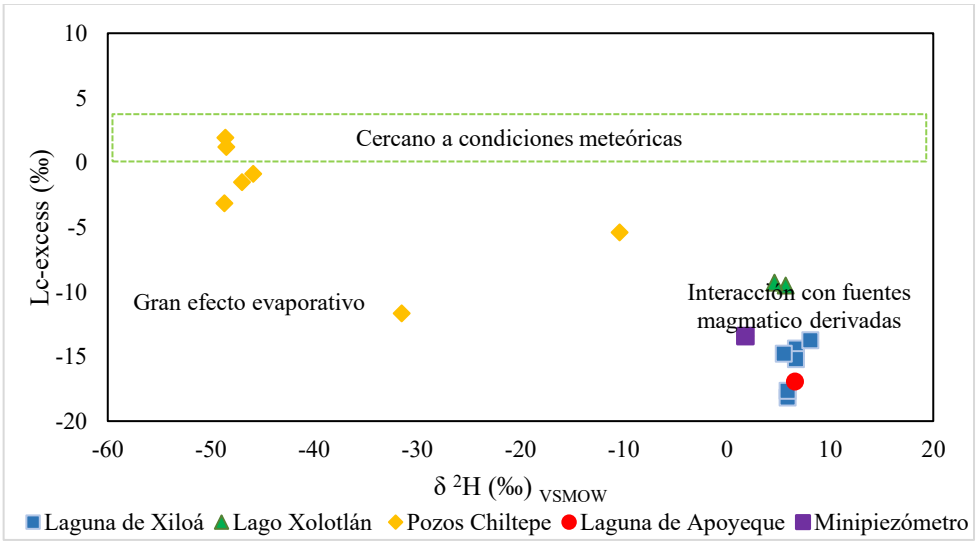


Figura 33. Gráfico de clasificación de las aguas de la península, según el Lc-excess, marzo (2021).

5.3 Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos en la investigación evidencian una clara diferenciación entre la composición aguas superficiales y subterráneas de la península de Chiltepe. incluso Xiloá, Apoyeque y Xolotlán, a pesar de que se ubican en la misma península y ambiente geológico, presentaron diferencias importantes. Evidenciando que, en el área de estudio, existen factores que provocan esta separación y que deben ser analizados para comprender la dinámica del sistema.

Por su parte, los datos piezométricos y las direcciones de flujo subterráneo obtenidos, indican que existe una descarga desde las lagunas hacía en acuífero circundante, y a su vez hacia el lago Xolotlán. Lo cual ha sido establecido anteriormente por otros autores; que describen que este lago, debido a su posición hidrogeológica, actúa como de zona de descarga regional, para el flujo subterráneo en todas direcciones (Krasny & Hetch, 1998). Por lo que es de esperarse una descarga desde la península de Chiltepe, hacia el lago Xolotlán.

Este comportamiento de flujo subterráneo puede explicar lo encontrado en el sureste de la laguna de Xiloá, en donde los distintos parámetros sugieren una descarga de esta laguna hacia el acuífero; en la imagen 34 y 35, se aprecia como distintos parámetros varían a lo largo de una línea de flujo; en donde la CE, concentraciones de As y valores de oxígeno 18 y deuterio, parecen atenuarse a media que el flujo avanza desde Xiloá, hasta llegar al lago Xolotlán (ver figura 34-35). Esta variación es menos evidente para el Xolotlán, ya que si bien, es el cuerpo de agua receptor; por su volumen de agua 10^{10} m^3 (Parello et al., 2008), puede amortiguar las diferencias, tomando en cuenta que Xiloá posee un volumen de agua estimado en 242 ^{6} m^3 (INETER, 2009).

Por otra parte, en la porción sureste de la península, la diferencia en elevación y el ancho de terreno juegan un rol fundamental para conceptualizar la dinámica subterránea. Entre Xiloá y Xolotlán, los distintos registros batimétricos realizados por INETER, señalan que existe aproximadamente un metro de diferencia, a favor de la primera, y que son separados aproximadamente por dos kilómetros de terreno (ver figura 34-35). Esto influye directamente en gradiente hidráulico y la dirección de flujo esperado para la zona; en donde se esperaría un leve gradiente desde el cuerpo de agua más elevado hacia el menor.

Por otra parte, en el noroeste de la península, entre la laguna de Apoyeque y el acuífero, no se evidencio una mezcla similar; si bien, datos como temperatura, conductividad eléctrica, y redox, presentaron anomalías en el agua subterránea; isotópicamente, no se tienen indicios de dicha interacción con la laguna. Cabe mencionar que anteriormente, se ha establecido que, entre lagunas, y el lago Xolotlán; la reducida diferencia de elevación previene que exista un fuerte gradiente hidráulico. Por lo tanto, el flujo subsuperficial desde las lagunas hacia el exterior es probablemente reducido a una débil difusión (Comisión Nacional de Energía de Nicaragua, 2001).

las anomalías del agua subterránea al noreste de la península pueden ser explicadas por lo expuesto en el Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua (2001); que establece que debido a la importante fuente de calor que se ubica debajo de la Península, (representada por el sistema magmático generado por el volcán Apoyeque); existe un fenómeno de calentamiento del acuífero, ya sea por mezcla con vapor, simple conducción; o, por el resultado de la interacción con fluidos geotérmicos (ver anexo 17). Sin embargo, las evaluaciones aplicadas como Lc-excess, no evidencian que estas aguas interactúan con fuentes magmático-derivadas; por lo que la explicación más probable, sea la transferencia de temperatura por conducción.

Para Xiloá y Apoyeque, se encontraron rasgos importantes de señalar; ambas son de carácter Cl-Na (Krasny & Hetch, 1998), poseen una huella isotópica similar (valores enriquecidos y lejanos de condiciones meteóricas), niveles elevados de cloruros (1,700 a 2,400 ppm), actividades termales y fumarolas. Estas similitudes y fenómenos se explican que son producto de la intersección ente el sistema de fallas N-S y el Alineamiento de Nejapa, se favorece el ascenso de fluidos geotérmicos, que afectan el NO y SE de la península. (Comisión Nacional de Energía de Nicaragua, 2001).

Respecto a las diferencias que existen entre las lagunas, la principal reside en el enriquecimiento respecto a arsénico; en donde en la primera, las concentraciones superan los 1600 µg. L^{-1} mientras que la segunda alcanzó como máximo 41.7 µg. L^{-1}. Esta diferencia puede ser explicada debido al posicionamiento de las fallas de Los Maribios y Nejapa (ver figura 3), que actúa como una división hidrogeológica entre las lagunas de Xiloá y Apoyeque (Delgado et al., 2020).

Ahora bien, abordando la temática recreativa de esta investigación, existen aspectos importantes a profundizar; partiendo de las concentraciones de arsénico, tenemos a laguna de Xiloá con concentraciones que exceden los valores guía para recreación establecidos por la OMS. Dichas concentraciones se encontraron, homogéneas tanto vertical como horizontalmente en ambas temporadas; confirmando que este es un cuerpo de agua polimíctico, como fue establecido en estudios limnológicos anteriores (García, 2000). Por otra parte, se evidencia una importante reconcentración de este contaminante. Ya que en el 2008 el máximo registrado fue de 723 $\mu g\ L^{-1}$ (Parello et al., 2008b) y a la fecha se registran hasta 1600 $\mu g\ L^{-1}$, lo cual exacerba la preocupación sobre los impactos que puedan darse a los usuarios de este cuerpo de agua.

Por otra parte, los parámetros fisicoquímicos del agua juegan un papel fundamental en la valoración de los posibles impactos, por ejemplo; si bien los valores de pH encontrados mantienen a este contaminante en su especie menos tóxica (As V), la OMS en su guía para Ambientes recreacionales seguros destaca que: “valores extremos de pH pueden tener un efecto negativo en aguas de uso recreativo, Ocasionando irritaciones en la piel y los ojos”. Sin embargo, como también establece la guía; el mecanismo de afección no está claramente establecido; puesto que, normalmente para que se manifieste, el agua debe contener otros elementos irritantes que son exacerbados por altos valores de pH. Esta valoración del sistema será abordada a mayor detalle, en la siguiente sección.

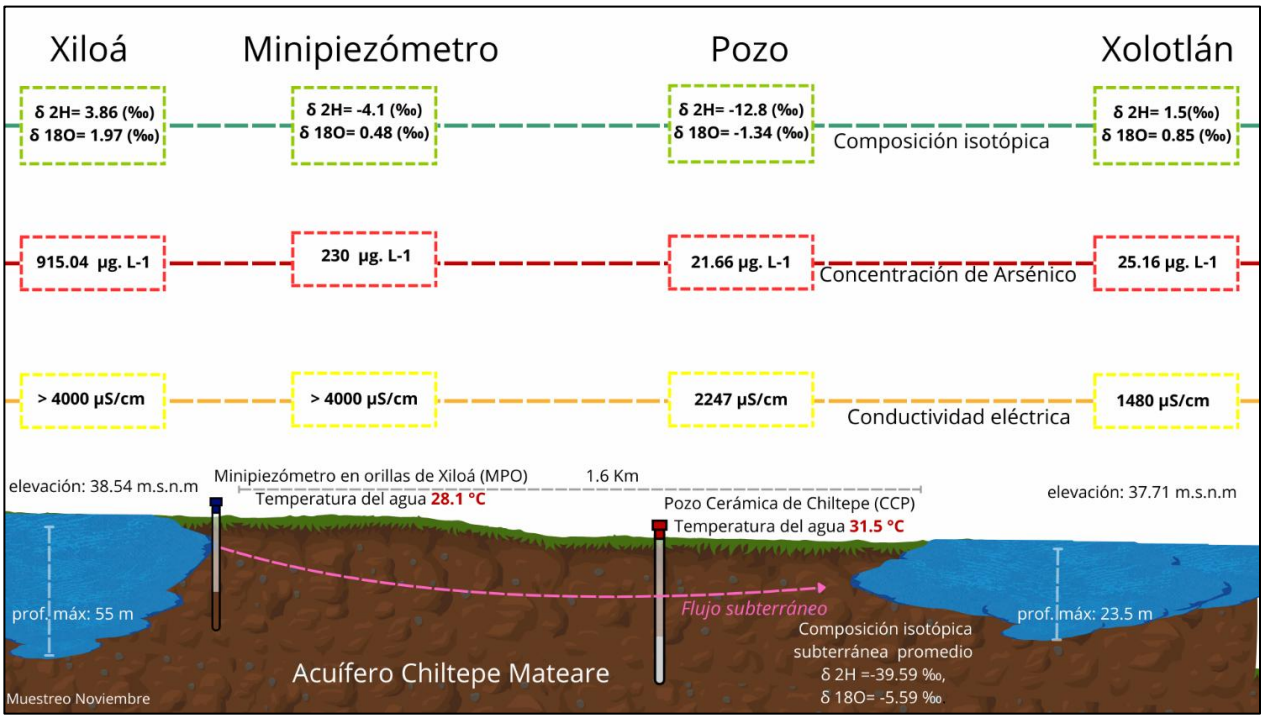


Figura 34. Ilustración sobre el comportamiento de distintos parámetros en la zona sur-este de la península de Chiltepe, noviembre 2020.

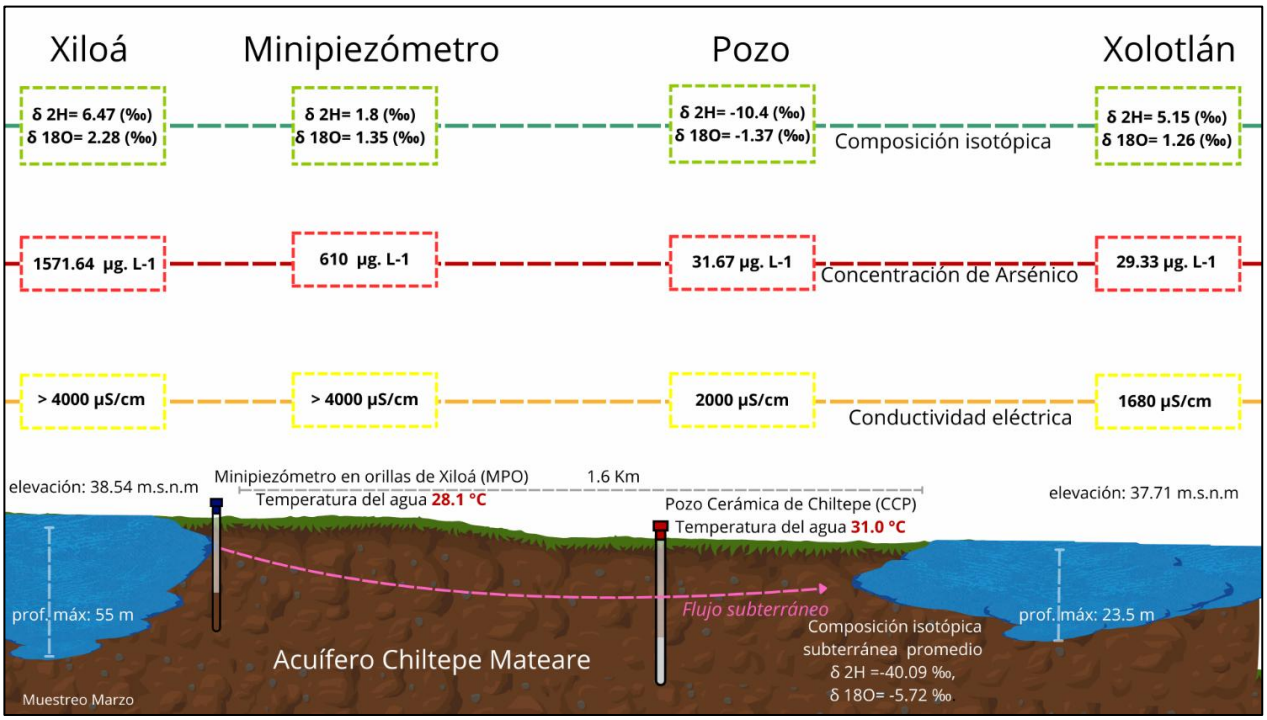


Figura 35. Ilustración sobre el comportamiento de distintos parámetros en la zona sur-este de la península de Chiltepe, marzo 2021.

5.4 Propuestas para la recreación segura en la laguna de Xiloá

5.4.1 Evaluación del sistema

5.4.1.1 Valoración de la exposición

La frecuencia, el alcance y la probabilidad de exposición son datos importantes para evaluar los riesgos de recreación ante aguas contaminadas. Para climas tropicales se sugiere que unafrecuencia de más 150 eventos de natación por año se considera como preocupante (World Health Organization, 2003).

Respecto a la laguna de Xiloá, si bien no se cuenta con una estadística acorde al tema, se sabeque para el año 2017 se registraron en total 214,302 visitantes. Y tomando como referencia el dato de frecuencia preocupante para la OMS, aquellas personas que entren en contacto directo, en una magnitud superior a 150 veces al año, son consideradas como una poblaciónde interés para la formulación de las estrategias.

De manera provisional se propone considerar a la población de las comarcas de Los Castros,Bosques de Xiloá y Chiltepe; como grupos de interés, ya que son quienes probablemente tiendan entrar en contacto de manera más frecuente, a causa de su cercanía con la laguna. Dichas comarcas para el año 2020 contarían con una población estimada de 3194 habitantes(INIDE & MAGFOR, 2013).

5.4.1.2 Exposición dermal

Respecto al arsénico, la exposición dérmica parece ser relevante solo cuando existe contactodirecto a través del estilo de vida, como lo que se sospecha del caso del pie negro en los campos de arroz en Taiwán (Ouypornkochagorn & Feldmann, 2010). Siendo además considerada como una ruta de exposición menor, debido a la baja permeabilidad del arsénico (Bernstam & Nriagu, 2001).

La acumulación y penetración de arsénico en la piel está fuertemente relacionado con la especiación (Ouypornkochagorn & Feldmann, 2010). Se ha encontrado que el arseniato presenta una absorción que varía de 2.0-6.4% de la

dosis aplicada, sin ninguna variación respecto a la concentración. Sin embargo, otras especies como el arsenito y el DMA ^{v} penetran la piel 29 y 59 veces más efectivamente la piel. A su vez el arsenito se acumula enla piel en mayor grado en comparación con DMA ^{v} (Lord & Ward, 2012).

5.4.2 Estimación de la absorción dermal en la Laguna de Xiloá

Para el arsénico disuelto en agua, ya existen tazas de absorción en piel humana, (***ver anexo 13***); las cuales fueron establecidas por Ouypornkochagorn y Feldmann (2010). Si tomamos en cuenta la especie más probable As (V) y las concentraciones de As encontradas en la laguna de Xiloá (827 a 1600 µg. L^{-1}); se tienen los siguientes valores de absorción dérmica:

Tabla 2. Estimación de la absorción dermal de arsénico por recreación en Xiloá.

Especie	**Taza de absorción** (µg/(cm h))	**Permeabilidad relativa**	**Absorción dermal estimada en un evento de recreación (µg As)[a], para distintas concentraciones**	
			1600 µg. L-1	827 µg. L^{-1}
arsenito	2.7 x 10^{-2}	29	43	22
arsenato	9.2 x 10^{-5}	1	1	0.8
DMA (V)	5.4 x 10^{-3}	59	86	45

a= Suponiendo que un adulto promedio tiene un área de superficie de 20 000 cm2 y que el periodo de contacto es equivalente a 30 minutos.

5.4.2.1 ingestión

Hay datos limitados disponibles sobre los volúmenes de agua ingeridos durante las actividades recreativas. Las estimaciones de los volúmenes máximos ingeridos por evento denatación son de 179 ml en niños y de 210 ml en adultos en aguas dulces, y de 250 ml en niños y de 170 ml en adultos en aguas marinas (OMS, 2022).

5.4.2.2 Estimación de la ingestión de arsénico en la Laguna de Xiloá

Basado en los niveles de ingestión en el peor de los casos por evento de nado de 250 mL (niños) y 210 mL (adultos), y frecuencias estimadas de 150 eventos en aguas cálidas, el volumen total de agua ingerido sería de 38 L (niños) y 32 L (adultos) (OMS, 2022). Por otra parte, teniendo en cuenta la concentración máxima de As encontrada en la Xiloá es correspondiente a 1600 μg. L^{-1}; tenemos los siguientes valores deingestión:

Tabla 3. Estimación de la ingestión de arsénico por recreación en Xiloá.

Grupos	**ingesta en un evento recreativo (μgAs)**	**ingesta anual por recreación (mgAs)**
Infante	400	60.8
Adulto	336	51.2

Sin embargo, la mayoría de los productos químicos peligrosos causan daño después de una exposición crónica durante muchos años. En nuestro caso el valor guía respecto al Arsénico se basan en la ingestión de 2 L por día durante muchos años (OMS, 2017).

5.4.2.3 Inhalación

La inhalación puede ser importante donde hay una cantidad significativa de rocío, como durante el esquí acuático o el piragüismo en aguas bravas. La inhalación puede ser de mayorimportancia en piscinas y afines. Dichas condiciones parecen no aplicar a nuestra área de estudio por lo que no es considerado como una forma de exposición importante.

5.4.2.4 Valores guía para recreación

Para asignar un valor guía, las GDWQ (OMS, 2017) brindan un punto de partida que se puede utilizar en una evaluación de riesgo. La OMS ha generado una aproximación que indica que la concentración del contamínate empieza ser preocupante cuando es mayor a 20 veces la concentración para consumo humano. En nuestro caso, esto se traduce que, para el arsénico,el valor guía provisional para recreación, es de 200 μg. L^{-1}.

Es esencial resaltar que si bien es válido tomar el valor guía de 200 μg. L^{-1}; los excesos no indican necesariamente que exista un problema. Más bien, sugieren la necesidad de una evaluación específica de la sustancia química, teniendo en cuenta las circunstancias locales y las condiciones del área de aguas recreativas.

5.4.3 Manejo de la contaminación por arsénico en el área recreativa de Xiloá

Los eventos de contaminación deben gestionarse y debe proporcionarse una comunicación oportuna y eficaz sobre los entornos acuáticos recreativos afectados por peligros químicos. se necesitarán enfoques multifacéticos para proporcionar avisos de salud pública, incluido:

- Emisión de avisos a los medios
- Comunicación con la comunidad o grupos de residentes
- instalación de señalización y su mantenimiento (por ejemplo, en caso de vandalismo).

Se debe proporcionar información sobre:

- la causa y naturaleza de la contaminación
- la base para evaluar los riesgos
- Indicar actividades a evitar
- riesgos potenciales para la salud
- acción correctiva.

Tomando los resultados obtenidos de este análisis y las demás recomendaciones restablecidaspor la OMS, respecto al manejo de la contaminación por arsénico en Xiloá; se idearon cuatrometas principales a desarrollar en el sitio turístico, a manera de fomentar una recreación segura, las cuales se desarrollan a continuación:

5.4.3.1 Disminución de la exposición ante arsénico por recreación de contacto directo en la laguna de Xiloá

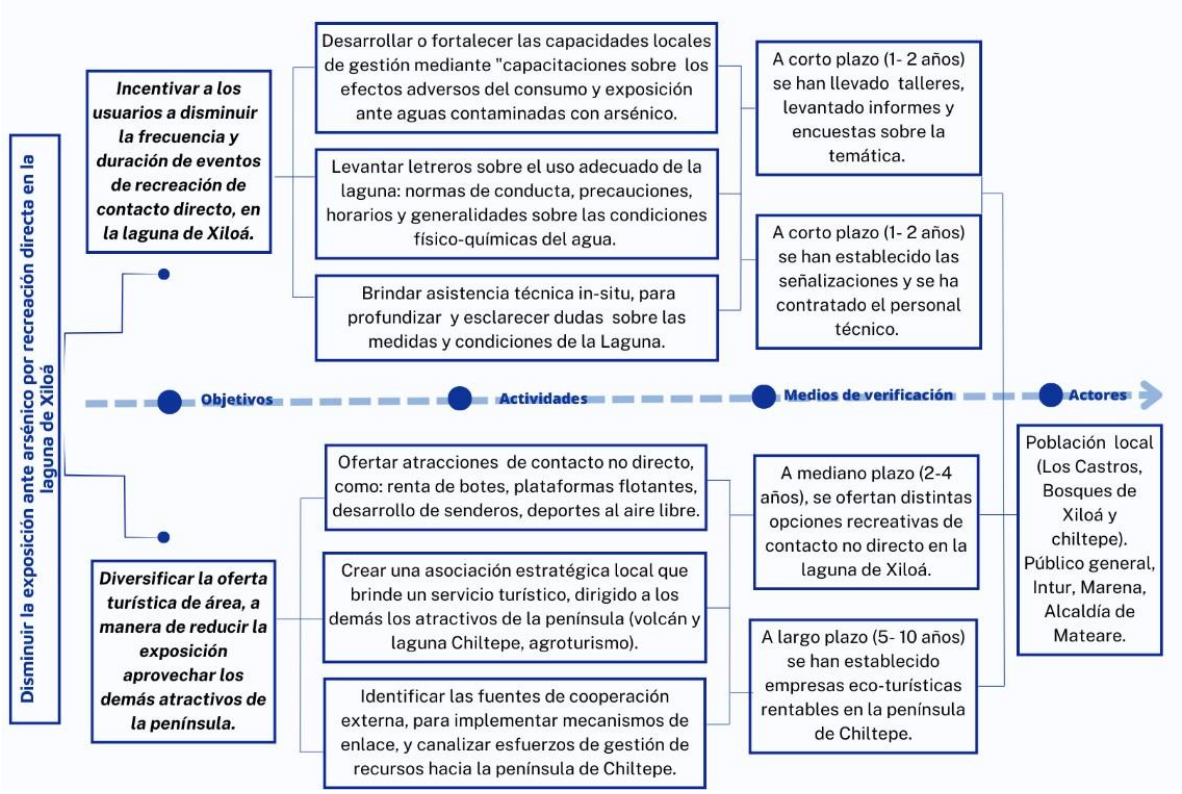


Figura 34. Meta 1: disminuir la exposición ante arsénico por recreación directa en la laguna de Xiloá.

5.4.3.2 Mitigar las posibles afectaciones que puedan darse producto de entrar encontacto con las aguas enriquecidas en arsénico de Xiloá

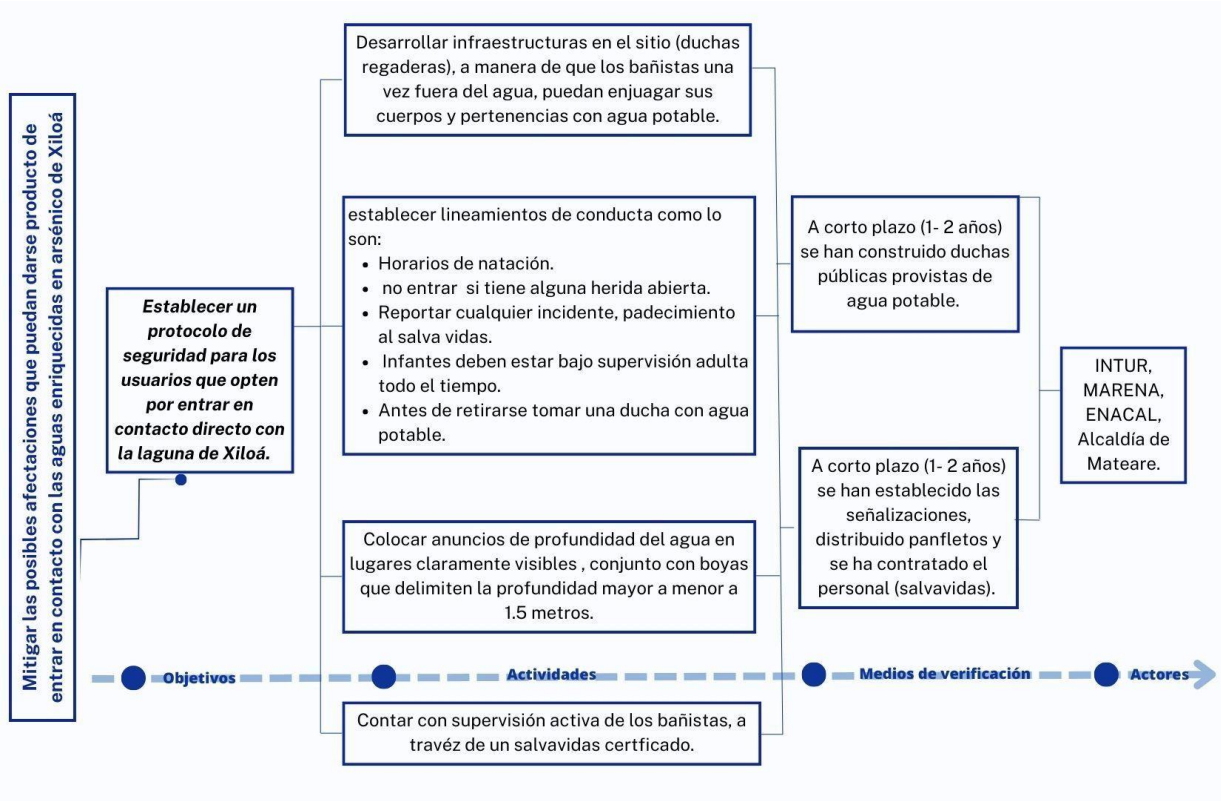


Figura 35. Meta 2: mitigar las posibles afectaciones que puedan darse producto de entrar en contacto con las aguas enriquecidas en arsénico de Xiloá.

5.4.3.3 Diagnosticar el estado actual de la población local respecto a hidroasenicismoy relacionarlo con las condiciones del entorno.

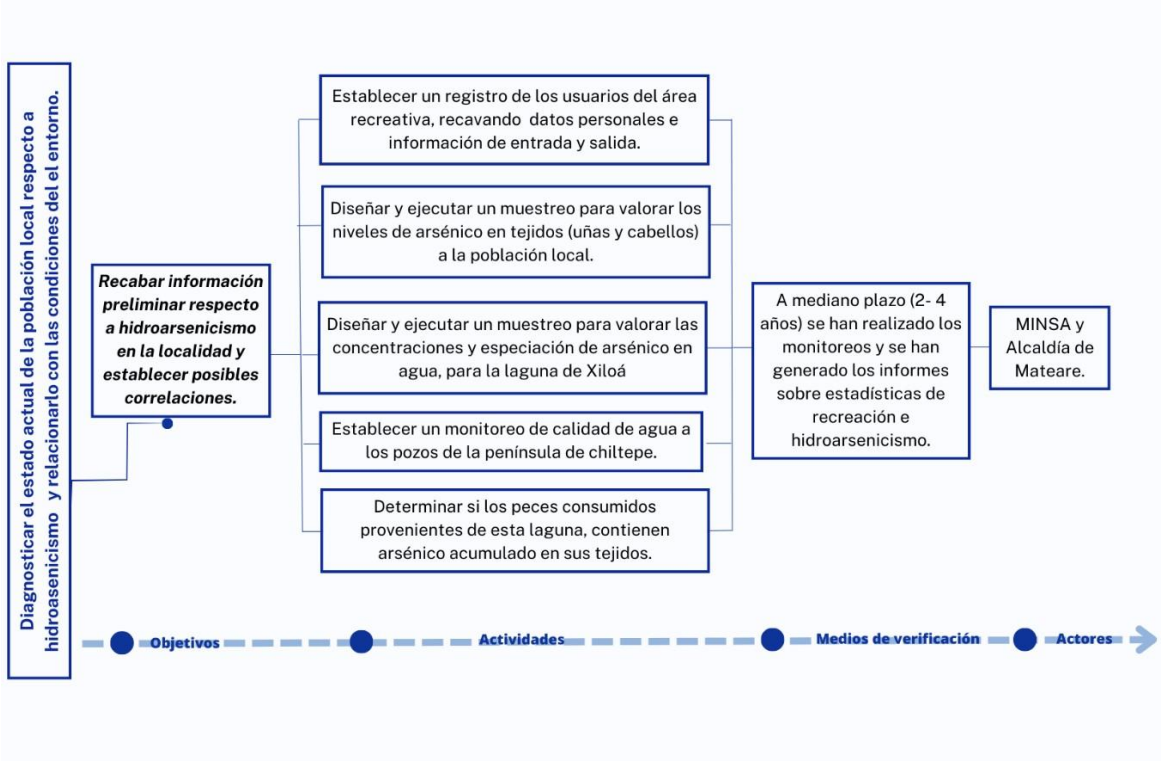


Figura 36. Meta 3: Diagnosticar el estado actual de la población local, respecto a hidroarsenicismo y relacionarlo a las condiciones del entorno.

5.4.3.4 Mantener y mejorar las condiciones de calidad del agua en laguna de Xiloá arazón de mantener el arsénico en su estado menos toxico.

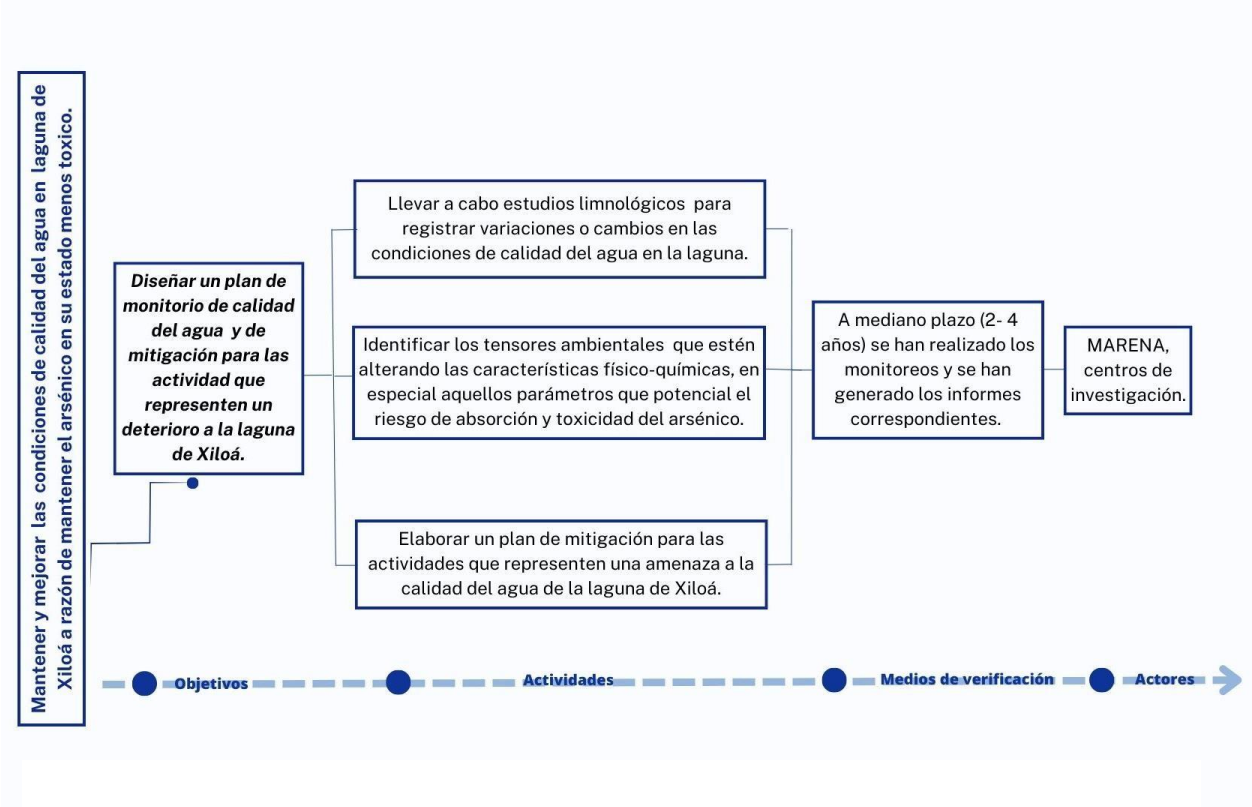


Figura 37. Meta 4: Mantener y mejorar las condiciones de calidad del agua en laguna de Xiloá a razón de mantener el arsénico en su estado menos toxico.

5.4.3.5 Consolidar el conocimiento generado en todos los sectores sociales y políticosa través de un proceso de comunicación y difusión.

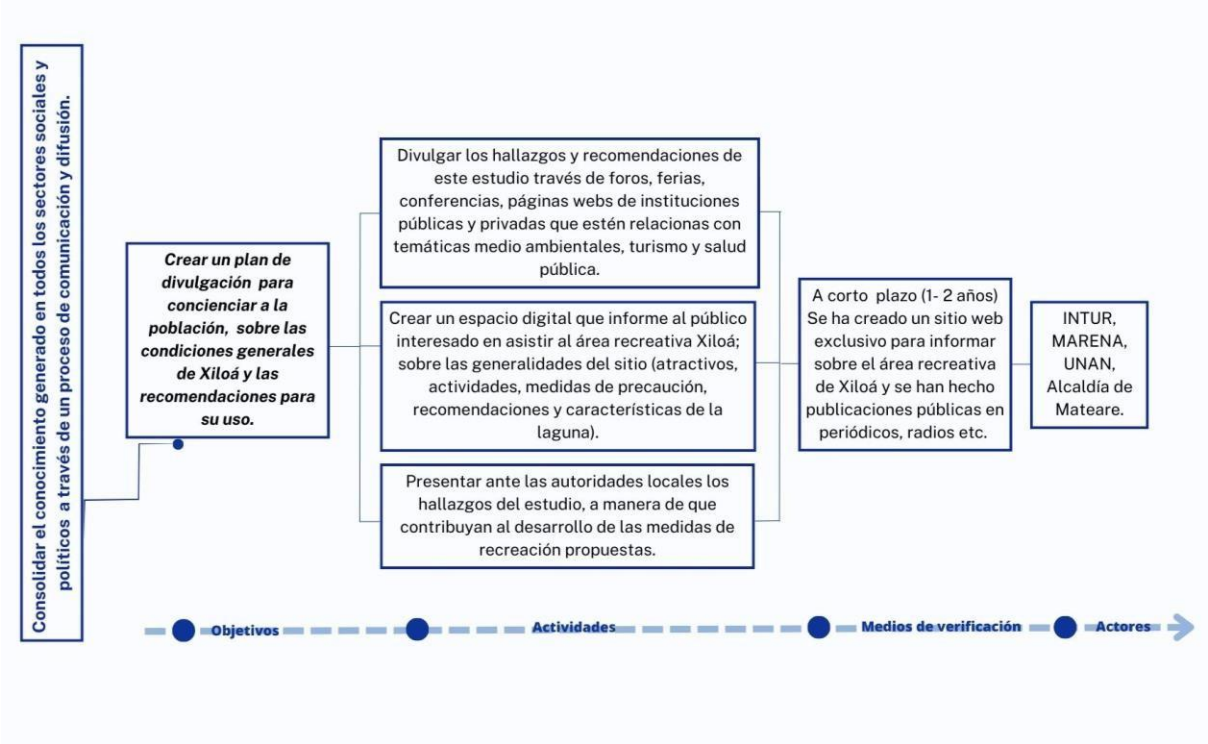


Figura 38. Meta 5: Consolidad el conocimiento generado en todos los sectores sociales y políticos a través de un proceso de comunicación y difusión.

I. CONCLUSIONES

La caracterización hidrogeoquímica indica que las aguas superficiales del área de estudio se encuentran afectadas por concentraciones elevadas de arsénico, Xolotlán y Apoyeque reportando unidades mayores al valor recomendado para consumo humano (10 $\mu g.L^{-1}$), y para Xiloá valores superiores a los descritos como preocupantes para la recreación (200 $\mu g.\ L^{-1}$).

El levantamiento hidrogeoquímico refleja que, en la gran mayoría de los pozos evaluados existe un riesgo potencial de afección a la salud humana, ya que contienen concentraciones de As superiores a los 10 $\mu g.L^{-1}$, conductividades y temperaturas superiores a los valores guías para consumo humano, establecidos por la OMS.

Existe un flujo preferencial en sentido SE desde la laguna de Xiloá, hacia el acuífero circundante, lo que facilita el transporte de As desde este cuerpo de agua hacia el acuífero; provocando a su vez que los pozos de la zona presenten concentraciones de arsénico superiores a las recomendadas por la OMS.

La a caracterización isotópica de Apoyeque permite identificar que esta laguna tiene una comunicación muy restringida con el acuífero circundante, en donde las salidas del sistema son dadas mayormente por procesos evaporativos, por lo tanto, las distintas anomalías encontradas en los pozos ubicados al NO y NE de la península, se deben a efectos de calentamiento del acuífero generado por la fuente de calor que se ubica bajo esta península.

La absorción de arsénico en un evento de recreación en Xiloá, es relativamente baja, incluso ante los supuestos más adversos. Siendo poco probable encontrar impactos inmediatos a la salud, ya que generalmente estos efectos negativos se esperan ante una exposición a largo plazo.

En Xiloá es probable que dicho contaminante se encuentre en su especie menos tóxica (As V). Favoreciendo que, durante los eventos de recreación directa, los niveles de absorción se mantengan a niveles menos preocupantes.

I. REFERENCIAS

Altamirano, M. (2005). Distribución de la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la subcuenca suroeste del valle de Sébaco, Matagalpa-Nicaragua.

Altamirano, M., & Delgado, V. (2020). Contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la comunidad rural "La Fuente", para sugerir y promover el uso de fuentes alternativas de agua segura municipio La Paz Centro, León, Nicaragua. Revista Torreón Universitario, 8(23), 58-72.

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005a). Geochemistry, groundwater and pollution (2nd edition.). Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.

ATSDR. (2007). Resumen de salud pública—Arsénico. Recuperado a partir de www.atsdr.cdc.gov/es/

Barra, C., Santelli, E., Abrão, J., & Guardia, M. (2000). Especiação de Arsênio—Uma revisão. Química Nova, 23(1), 58-70.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2016). Calidad del Agua.

Bernstam, L., C., Lee, J., Nriagu, J. (2001). Effects of Arsenic on Human Keratinocytes: Morphological, Physiological, and Precursor Incorporation Studies.

Birkle, P., & Bundschuh, J. (2007). Hydrogeochemical and isotopic composition of geothermal fluids. En J. Bundschuh & G. Alvarado (Eds.), Central America. Taylor & Francis. Recuperado octubre 30, 2020, a partir de http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9780203947043.ch27

Bocanegra, O. C., & Bocanegra, E. M. (2002). Arsénico en aguas subterráneas: Su impacto en la salud.

Chakrabarti, D., Singh, S. K., Rashid, M. H., & Rahman, M. M. (2019). Arsenic: Occurrence in Groundwater. Encyclopedia of Environmental Health (pp. 153-168).

Cruz, A., Fomsgaard, I,. Lacayo, J,. (1991). Plomo, arsénico cadmio y plomo en la laguna de Asososca, Nicaragua.

Comisión Nacional de Energía de Nicaragua. (2001). Plan maestro geotérmico de Nicaragua, Evaluación del área Managua - Chiltepe.

Comisión Nacional de Energía de Nicaragua. (2001). Plan maestro geotérmico de Nicaragua, Evaluación del área de El Hoyo - Montegalán.

Custodio, E, & Llamas, M. R. (1983). Hidrología Subterránea. Barcelona.

Custodio, E, & Llamas, M. R. (1976). Hidrología subterránea (1. ed.)..

Delgado, V., Altamirano, M., & Bundschuh, J. (2020). Arsenic in geoenvironments of Nicaragua: Exposure, health effects, mitigation and future needs.

Edmunds, W. M., & Smedley, P. L. (1996). Groundwater geochemistry and health: An overview.

Fan, Y., Zheng, C., Liu, H., He, C., Shen, Z., Zhang, T. (2020). Effect of pH on the adsorption of arsenic(V) and antimony(V) by the black soil in three systems: Performance and mechanism.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.

Freundt, A., & Kutterolf, S. (2019). The long-lived Chiltepe volcanic complex, Nicaragua: Magmatic evolution at an arc offset.

Garcia, R. (2000). Disponibilidad de alimento natural y habitos alimentarios de Cichlasoma chitrinellum y Neetroplus nematopus en el lago cratérico netropical Xiloá, Nicaragua.

GIZ. (2013). Áreas Protegidas de Nicaragua Primer Tomo, Región Pacífico. Recuperado agosto 9, 2020, a partir de https://fundenic.org/uploads/3/6/4/8/36486485/areas_protegidas_pacifico_nicaragua_2013_web_.pdf

Glynn, P. D., & Plummer, L. N. (2005). Geochemistry and the understanding of ground-water systems. Hydrogeology Journal.

Gómez, A. (2002). Monitoreo y atención de intoxicados con arsénico en El Zapote, municipio de San Isidro, departamento de Matagalpa, Nicaragua.

Gómez, O. (2022). Modelo Conceptual Hidrogeologico del Acuífero Mateare Chiltepe.

González, B., Rietveld, L. C., Longley, A. J., & van Halem, D. (2019). Arsenic contamination of rural community wells in Nicaragua: A review of two decades of experience. Science of The Total Environment, 657, 1441-1449.

Herrera, A., Teresa, M., Quezada, L., Olivia, L., Domínguez, M., Ramiro, I., Navarro, M., et al. (2013). Arsénico en agua: Presencia, cuantificación analítica y mitigación, 85.

Hodgson, G. (2000). Introducción al léxico estratigráfico de Nicaragua. Managua, Nicaragua

Hung, D. Q., Nekrassova, O., & Compton, R. G. (2004). Analytical methods for inorganic arsenic in water: A review. Talanta, 64(2), 269-277.

IGM. (1985). Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Recuperado septiembre 17, 2020, a partir de https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros4_CCA/libro43/lib43.htm

INETER. (2009). Batimetría Laguna de Xiloá.

INETER. (2020). Mapa Geológico de Managua y sus Alrededores.

INIDE & MAGFOR (2013). Departamento de León y sus municipios uso de la tierra y el agua en el sector agropecuario.

INTA & MARENA. (2018). Caracterización hidrológica e hidrogeológica Mateare.

INTUR. (2018). Estadísticas de Turismo 2018. INTUR Nicaragua. Recuperado agosto 16, 2020, a partir de https://www.intur.gob.ni/estadisticas-de-turismo/

JICA. (1993). Estudio sobre el abastecimiento de agua en Managua.

Krasny, J., & Hetch, G. (1998). Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacífico de Nicaragua, Managua.

Lacayo, M. (1991). Physical and chemical features of lake Xolotlán (Managua), 6.

Landwehr, J., & Coplen, T. B. (2006). Line-conditioned excess: A new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems.

López, D. L., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M. A., Cumbal, L., Sracek, O., Cornejo, L., et al. (2012). Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. Science of The Total Environment, 429, 57-75.

López, D. L., Monterosa, J., Soriano, T., Barahona, F., & Bundschuh, J. (2009). Volcanic arsenic and boron pollution of Ilopango lake, El Salvador, 17.

Lord, G., Kim, N., & Ward, N. I. (2012). Arsenic speciation of geothermal waters in New Zealand. Journal of Environmental Monitoring, 14(12), 3192.

MARENA. (2006). Evaluación y Redefinición del Sistema de Areas Protegidas de las Regiones Pacífico y Centro Norte de Nicaragua , Península de Chiltepe. Recuperado julio 11, 2020, a partir de http://www.renida.net.ni/renida/marena/RENP01F981pc.pdf

MARENA, ANA, & Global Water Partnership. (2022). Plan de Acción para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de Nicaragua (2022 – 2026).

Martínez, C. (2018). Comportamiento del arsénico y elementos traza en agua subterránea en una línea de flujo en el noreste de la pampa, 9.

Martínez, L., & Reynal, K. (2017). eterminación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada—Nicaragua. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Nicaragua.

Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: El impacto en la alimentación y la salud humana. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública, 35(1), 93.

Montgomeri-Santos & Hielemann-Chan. (1979). Estudio hidrogelogíco sobre el área de las lagunas de Nejapa, Asososca y Acahualinca.

Moreno, L., & Pacheco, L. (1999). Hablemos del Xolotlán, Caracterización del Lago Antes del Huracán Mitch.

OMS. (2017). Guidelines for drinking-water quality: first addendum to the third edition, volume 1 : reccommendations.

OMS. (2022). Guidelines on recreational water quality. Volume 1, Coastal and fresh waters. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

OPS & ENACAL. (2004). Análisis sectorial de agua potable y saneamiento de Nicaragua. Recuperado agosto 11, 2020, a partir de https://www.paho.org/nic/index.php?option=com_docman&view=download&categ

OPS & OMS. (2015). Boletín informativo: El agua. Recuperado agosto 11, 2020, a partir de https://www.paho.org/nic/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=datos-y-estadisticas&alias=716-boletin-informativo-el-agua&Itemid=235

Parello, F., Aiuppa, A., Calderon, H., Calvi, F., Cellura, D., Martinez, V., Militello, M., et al. (2008). Geochemical characterization of surface waters and groundwater

resources in the Managua area (Nicaragua, Central America). Applied Geochemistry, 23(4), 914-931.

Plata, A., Araguás, L., Áviles, J., & Ramón, P. (1999). Relación entre el lago de Managua (Nicaragua) y las aguas subterráneas de su entorno.

Ramírez-Leiva, A., Sánchez-Murillo, R., Martínez-Cruz, M., Calderón, H., Esquivel-Hernández, G., Delgado, V., Birkel, C., et al. (2017). Stable isotopes evidence of recycled subduction fluids in the hydrothermal/volcanic activity across Nicaragua and Costa Rica. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 345, 172-183.

Roldán, G. (2008). Fundamentos de Limnologia Neotropical (segunda Edición.). Colombia: Universidad de Antioquia.

Sampieri, R. (2014). Metodología de la investigación. México, D.F.: McGraw-Hill Education.

Sairoong, O., & Jorg F. (2010).D ermal Uptake of Arsenic through Human Skin Depends Strongly on Its Speciation.

Smedley, P., & Kinniburgh D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters.

Sepúlveda, R. (2009). El arsénico en la contaminación de las aguas subterráneas, 7, 239-244.

Silva, S., & Guido, I. (2017). Diversidad Ictiofaunística de la Laguna Apoyeque del municipio de Mateare, 2017.

Solórzano, C. (2013). Propuesta preliminar del reordenamiento ambienta centro turístico de la laguna de Xiloá. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua. Recuperado julio 11, 2020, a partir de https://repositorio.unan.edu.ni/3653/1/72237.pdf

Universidad de Costa Rica & Red Sismológica Nacional de Costa Rica. (2019). ¿Qué son los lagos volcánicos? Red Sismológica Nacional—Costa Rica. Recuperado septiembre 18, 2020, a partir de https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/vulcanologia/716-los-lagos-volcanicos

World Health Organization (Ed.). (2003). Guidelines for safe recreational water environments. Geneva: World Health Organization.

II. ANEXOS

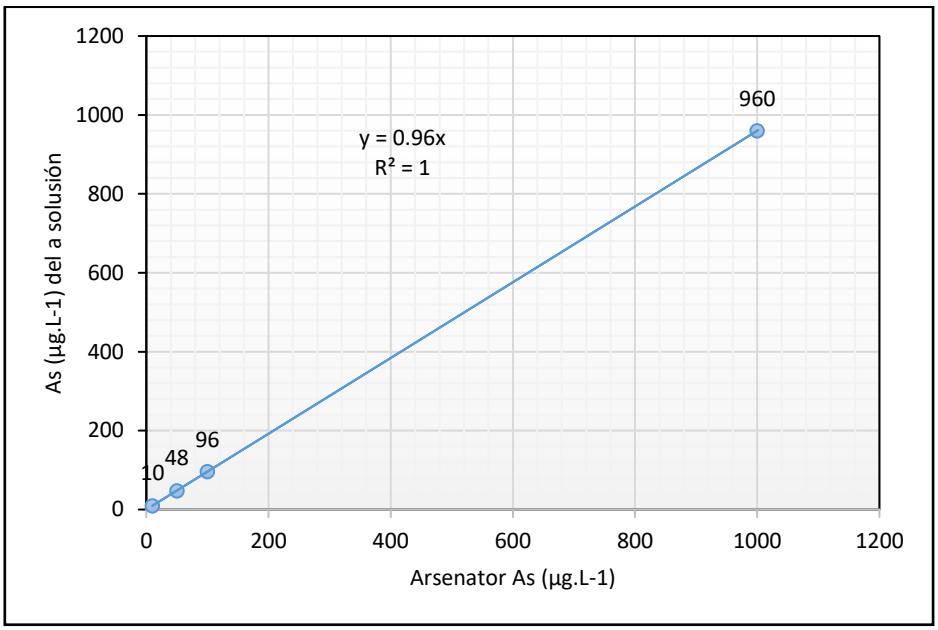
Anexo 1. Especificación de los Análisis realizados en cada punto.

ID	X	Y	Observación del punto
PP-LSV	568975	1351101	Pozo perforado, 5 l/seg abastece a 300 familias. Encontraron aguas termales a 90 m, y profundizaron a 113 para disminuir la temperatura. CAP: Bendición de Dios.
PE-RJJ	574471	1356592	Pozo excavado, altos contenidos de boro, agua de uso agrícola, abrevadero bovino.
PE-VLK	575808	1351639	Pozo excavado de uso agrícola.
PE-DNL	566437	1351559	Pozo excavado, de uso doméstico en desuso.
PP-GZM	570619	1349807	Pozo perforado alimenta a 200 persones. Pr: 32 cm. Agua dulce a buena temperatura. Uso cada 3 días.
PE-LNL	575981	1354688	Pozo excavado de uso agrícola.
PE-LGP	573834	1356902	Pozo excavado, agua fresca y dulce, de uso agrícola.
PP-CDN	575387	1355933	Pozo perforado, agua fresca pero salada.
PE-CST	565886	1352095	Pozo excavado, uso para piscina.
PP-CCP	575073	1349797	Pozo perforado comercial en desuso.
PE-ITR	574475	1349600	Pozo excavado, observación de INETER, en desuso.
PP-DM1	574531	1350074	Pozo excavado, de uso doméstico.
PP-MAR	574904	1350117	Pozo perforado, no se utiliza por la alta temperatura y alta salinidad (45°C).
PE-CBR	575523	1349469	Pozo excavado, finca de cabras, uso agrícola.
PE-DM2	575766	1351483	Pozo excavado de uso doméstico familiar.
PE-OTS	570438	1357657	Pozo excavado de uso agrícola.
PP-CCR	568790	1357680	Pozo perforado, para uso agrícola, temperatura cálida.
PP-GPL	566196	1353247	Pozo perforado, diagnosticada como no apta para beber.
PE-QRA	573655	1349090	Pozo excavado en abandono.

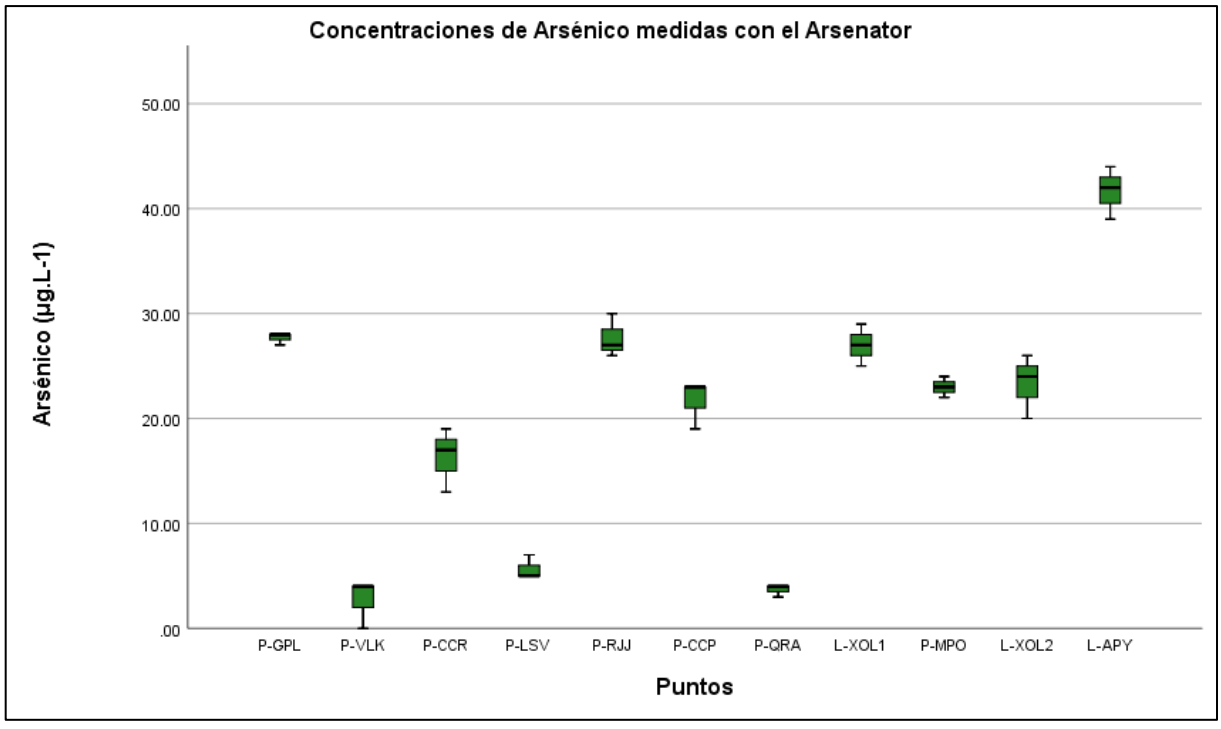
Anexo 2.Especificación de los Análisis realizados en cada punto.

Información del punto				*Actividades realizadas*			
Punto	***ID***	***Coordenadas***		***medición NEA***	***Medición de parámetros***	***Análisis isotópico***	***Determinación de Arsénico***
		X	**Y**				
1	*PP-LSV*	568975	1351101	-	x	x	x
2	*PE-RJJ*	574471	1356591	x	x	x	x
3	*PE-VLK*	575808	1351639	x	x	x	x
4	*MPO*	573967	1349861	-	x	x	x
5	*PE-DNL*	566437	1351558	x	-	-	-
6	*PP-GZM*	570619	1349807	x	-	-	-
7	*PE-LNL*	575981	1354688	x	x	-	-
8	*PE-LGP*	573834	1356902	x	x	-	-
9	*PE-CDN*	575387	1355933	x	-	-	-
10	*PE-CST*	565886	1352095	x	x	-	-
11	*PP-CCP*	575073	1349797	x	x	x	x
12	*PE-ITR*	574475	1349600	x	x	-	-
13	*PE-DM1*	574531	1350074	x	x	-	-
14	*PP-MAR*	574904	1350117	x	-	-	-
15	*PE-CBR*	575523	1349469	x	x	-	-
16	*PE-DM2*	575766	1351483	x	x	-	-
17	*PE-QRA*	573655	1349090	x	x	x	x
18	*PE-OTS*	570438	1357657	x	x	-	-
19	*PP-CCR*	568790	1357680	-	x	x	x
20	*PP-GPL*	566196	1353247	-	x	x	x
21	*L-XI1*	573493	1350733	-	x	x	x
22	*L-XI2*	574462	1350536	-	x	x	x
23	*L-XI3*	573119	1350543	-	x	x	x
24	*L-XI4*	573543	1351887	-	x	x	x
25	*L-XI5*	573978	1350168	-	x	x	x
26	*L-XIP*	573493	1350733	-	x	x	x
27	*L-XOI*	568107	1358214	-	x	x	x
28	*L-XO2*	574175	1358879	-	x	x	x
29	*L-APY*	570606	1353721	-	x	x	x
L-XO para lago Xolotlán, L-XI Laguna de Xiloá, L-APY, laguna de Apoyeque y P par distintos pozos.							

Anexo 3. Concentraciones medidas con Digital Arsenator vs soluciones del estándar de Arsénico.



Anexo 4. variabilidad de las mediciones de la concentración de Arsénico en el agua subterránea, lago Xolotlán y Apoyeque.



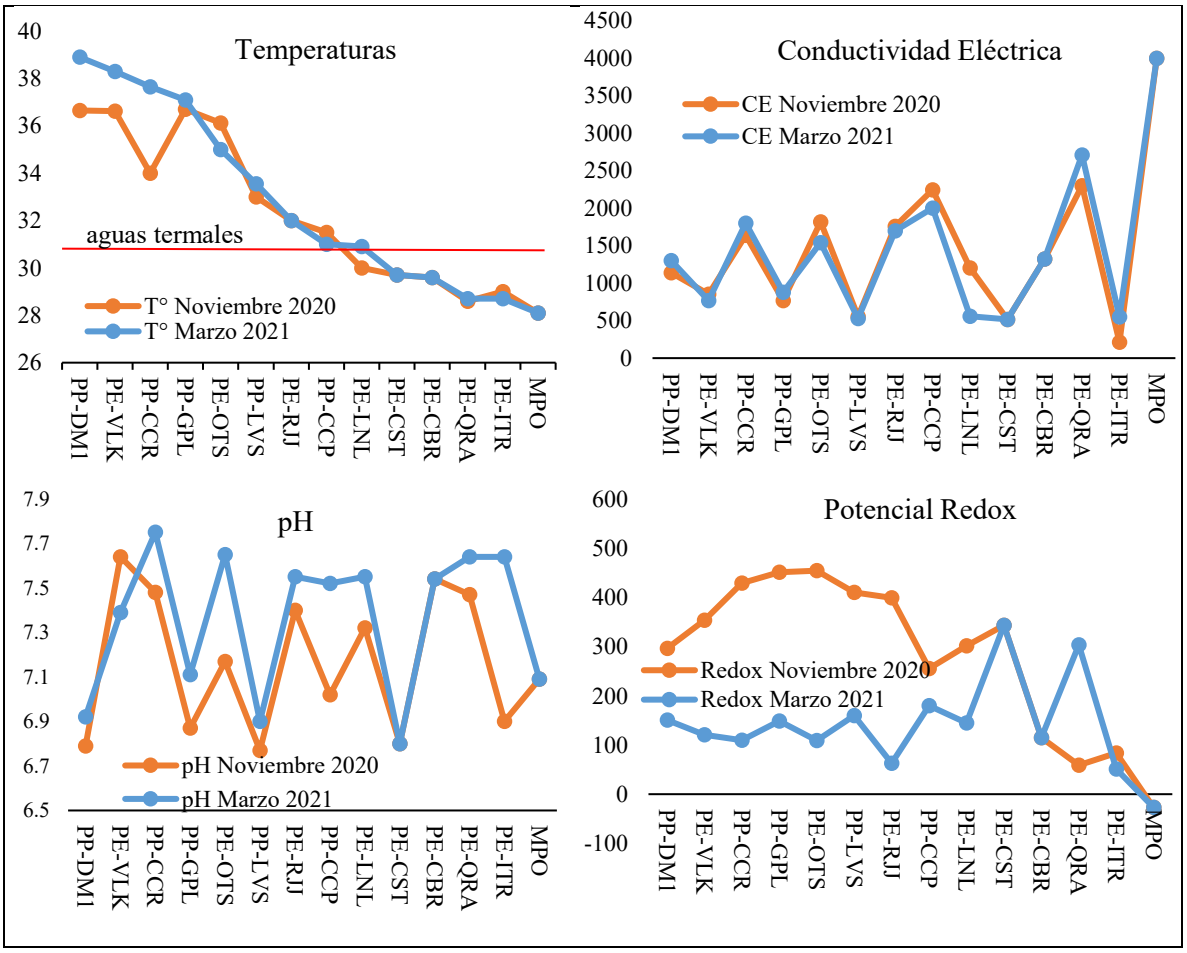
Anexo 5. Variación y Composición isotópica de las aguas, respecto a δ 2H (‰) SMOW y δ 18O (‰) SMOW.

Fuente	Puntos de muestreo	ID	$\delta^{2}H$ (‰)$_{SMOW}$		$\delta^{18}O$ (‰)$_{SMOW}$	
			nov-20	*mar-21*	*nov-20*	*mar-21*
Agua subterránea	1	*PP-LSV*	-50.2	-48.5	-7.20	-7.39
	2	*PE-RJJ*	-47	-45.9	-6.81	-6.76
	3	*PE-VLK*	-35.5	-48.7	-5.16	-6.83
	4	*PE-QRA*	-35.6	-31.5	-4.99	-3.37
	5	*PE-CCP*	-12.8	-10.4	-1.34	-1.37
	6	*PP-CCR*	-46.9	-47.0	-6.59	-6.82
	7	*PP-GPL*	-49.1	-48.6	-7.06	-7.50
	Promedio		**-39.59**	**-40.09**	**-5.59**	**-5.72**
Laguna de Xiloá	8	*L-XI1*	3.8	6.7	1.86	2.14
	9	*L-XIP*	4	6.7	2.14	2.25
	10	*L-XI2*	3.6	5.9	1.93	2.54
	11	*L-XI3*	4.5	5.5	2.17	2.03
	12	*L-XI4*	4.2	5.9	1.91	2.47
	13	*L-XI5*	3.1	8.1	1.85	2.24
	Promedio		**3.87**	**6.47**	**1.98**	**2.28**
Laguna de Apoyeque	14	*L-APY*	**1.1**	**6.6**	**1.99**	**2.47**
Lago Xolotlán	15	*L-XOL1*	1.9	5.7	0.88	1.35
	16	*L-XOL2*	1.1	4.6	0.77	1.17
	Promedio		**1.5**	**5.15**	**0.825**	**1.26**
Minipiezómetro	17	*MPO*	**-4.1**	**1.8**	**0.48**	**1.35**

Anexo 6. Caracterización y variación estacional de las aguas, respecto a D-excess y Lc-excess.

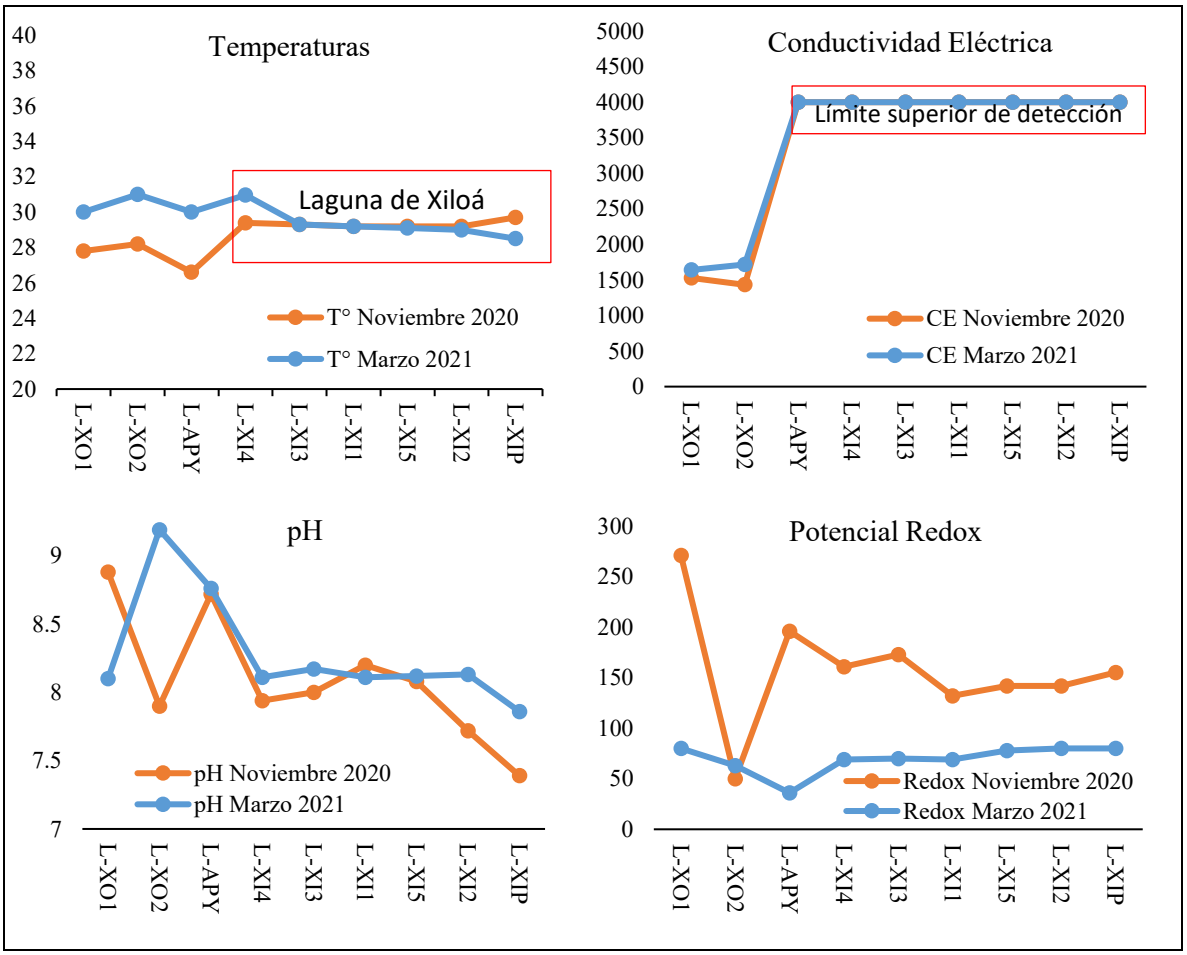
Fuente	Puntos de muestreo	ID	D-excess		L-c excess	
			nov-20	mar-21	nov-20	mar-21
Agua subterránea	1	*PP-LSV*	7.40	10.62	-1.90	1.21
	2	*PE-RJJ*	7.48	8.18	-1.60	-0.87
	3	*PE-VLK*	5.78	5.94	-2.36	-3.15
	4	*PE-QRA*	4.32	-4.54	-3.72	-11.66
	5	*PE-CCP*	-2.08	0.56	-8.04	-5.42
	6	*PP-CCR*	5.82	7.56	-3.14	-1.53
	7	*PP-GPL*	7.38	11.40	-1.84	1.92
	Promedio		**5.16**	**5.67**	**-3.23**	**-2.79**
Laguna de Xiloá	8	*L-XI1*	-11.08	-10.42	-15.22	-14.40
	9	*L-XIP*	-13.12	-11.30	-17.10	-15.22
	10	*L-XI2*	-11.84	-14.42	-15.94	-18.17
	11	*L-XI3*	-12.86	-10.74	-16.82	-14.78
	12	*L-XI4*	-11.08	-13.86	-15.19	-17.65
	13	*L-XI5*	-11.70	-9.82	-15.85	-13.74
	Promedio		**-11.95**	**-11.76**	**-16.02**	**-15.66**
Laguna de Apoyeque	14	*L-APY*	**-14.82**	**-13.16**	**-18.89**	**-16.95**
Lago Xolotlán	15	*L-XOL1*	-5.14	-21.10	-9.84	-9.53
	16	*L-XOL2*	-5.06	-4.76	-9.82	-9.29
	Promedio		**-5.10**	**-12.93**	**-9.83**	**-9.41**
Minipiezómetro	17	*MPO*	**-7.94**	**-9.00**	**-12.87**	**-13.43**

Anexo 7. Parámetros de campo registrados en la península de Chiltepe, 2020-2021.

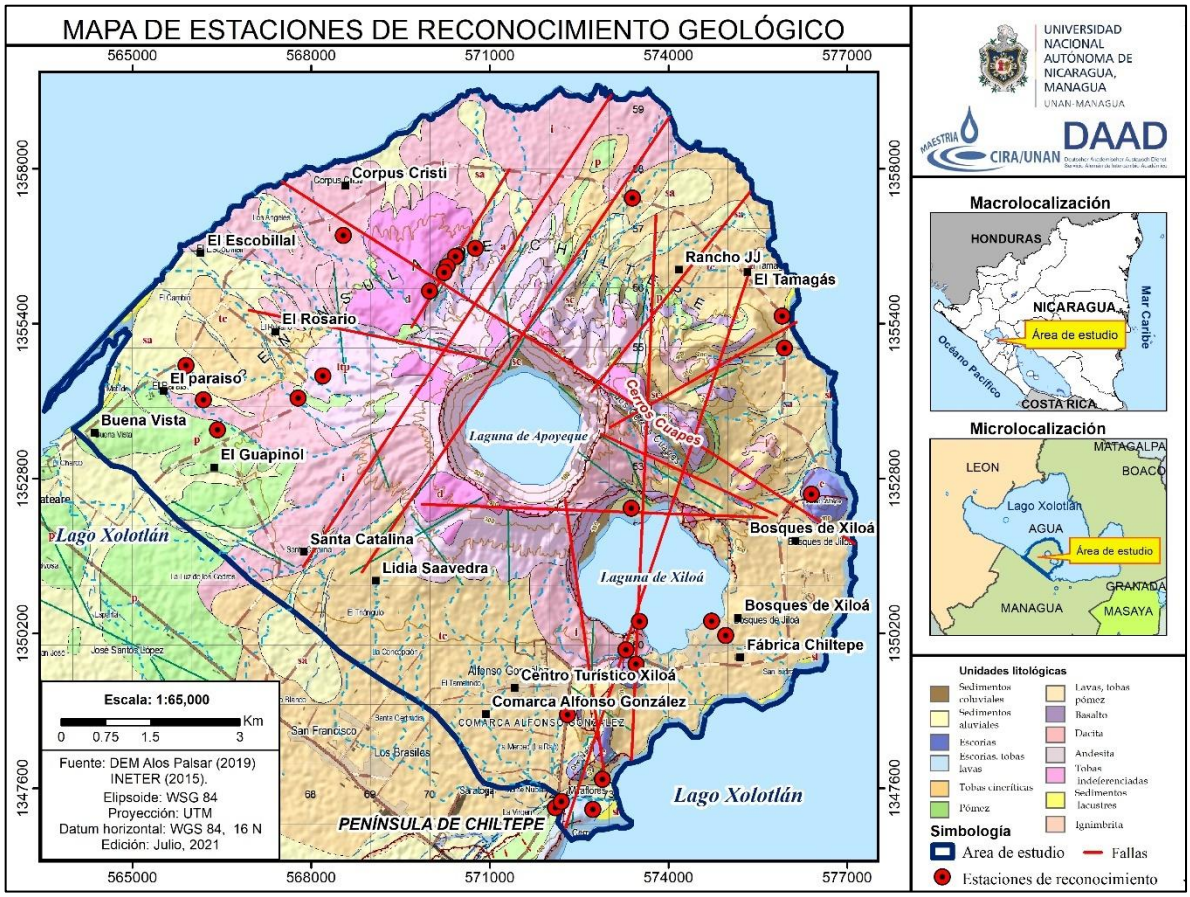


.

Anexo 8. . Parámetros de campo registrados en la en aguas superficiales de la península de Chiltepe, 2020-2021.



Anexo 9. Estaciones de reconocimiento geológico.



Anexo 10. Evidencias de gira de campo preliminar.

A)- Medición preliminar de niveles freáticos y parámetros de campo.

B)- Medición de parámetros de campo, pozos de abastecimiento comunitario.

C)- Pozo excavado en abandono, al norte de Chiltepe.

D)- Colecta de muestras de pozo excavado de uso doméstico.

Anexo 11. Monitoreo de niveles en la península.

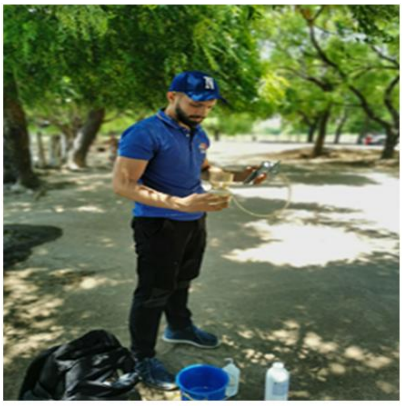
I)- Medición en pozo excavado, al sur de Bosques de Xiloá.

J)- Medición en pozo excavado, comunidad del Escobillal.

K)- Medición en pozo excavado, Bosques de Xiloá.

I)- Medición en pozo excavado, El Tamagás.

Anexo 12. muestreo para el análisis isotópico.



M)- Proceso de filtrado de la muestra para isótopos, Rancho JJ.

N)- Colecta de muestras para isótopos, laguna de Xiloá.

O)- Colecta de muestras para isótopos, pozo perforado, Bosques de Xiloá.

P)- Colecta de muestras para isótopos de minipiezómetro, laguna de Xiloá.

Anexo 13. Formaciones y estructuras identificadas en el reconocimiento geológico.

C)- Cono de escoria, Bosques de Xiloá.

D)- estrato de Toba, Bosques de Xiloá.

E)- Zona de actividad hidrotermal, norte de Xiloá

F)- Hervideros y sublimados de azufre al norte de la laguna.

Anexo 14. Uso del Arsenator digital para el análisis de muestras.

S)- Equipo de campo para la determinación de As, Arsenator Digital.

T)- Lectura en µ-L^{-1} de una muestra proveniente de la península.

U)- Bandas de prueba, filtros y ácido tartárico requeridos para el ensayo.

V)- Tesista tomando apuntes de las lecturas realizadas con el Arsenator.

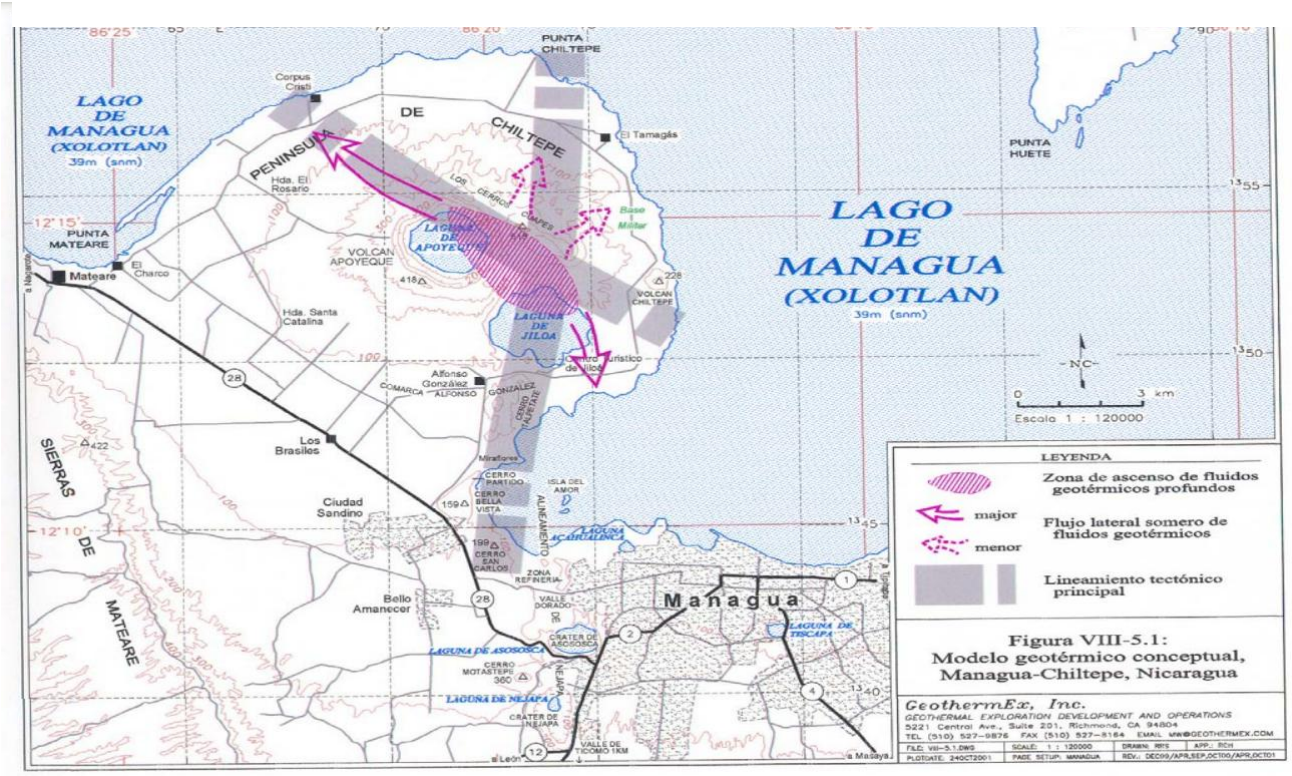
Anexo 15. Aguas superficiales muestreadas (Xolotlán, Xiloá, Apoyeque).

Anexo 16. Constantes de permeabilidad para especies individuales de arsénico a través de la piel humana.

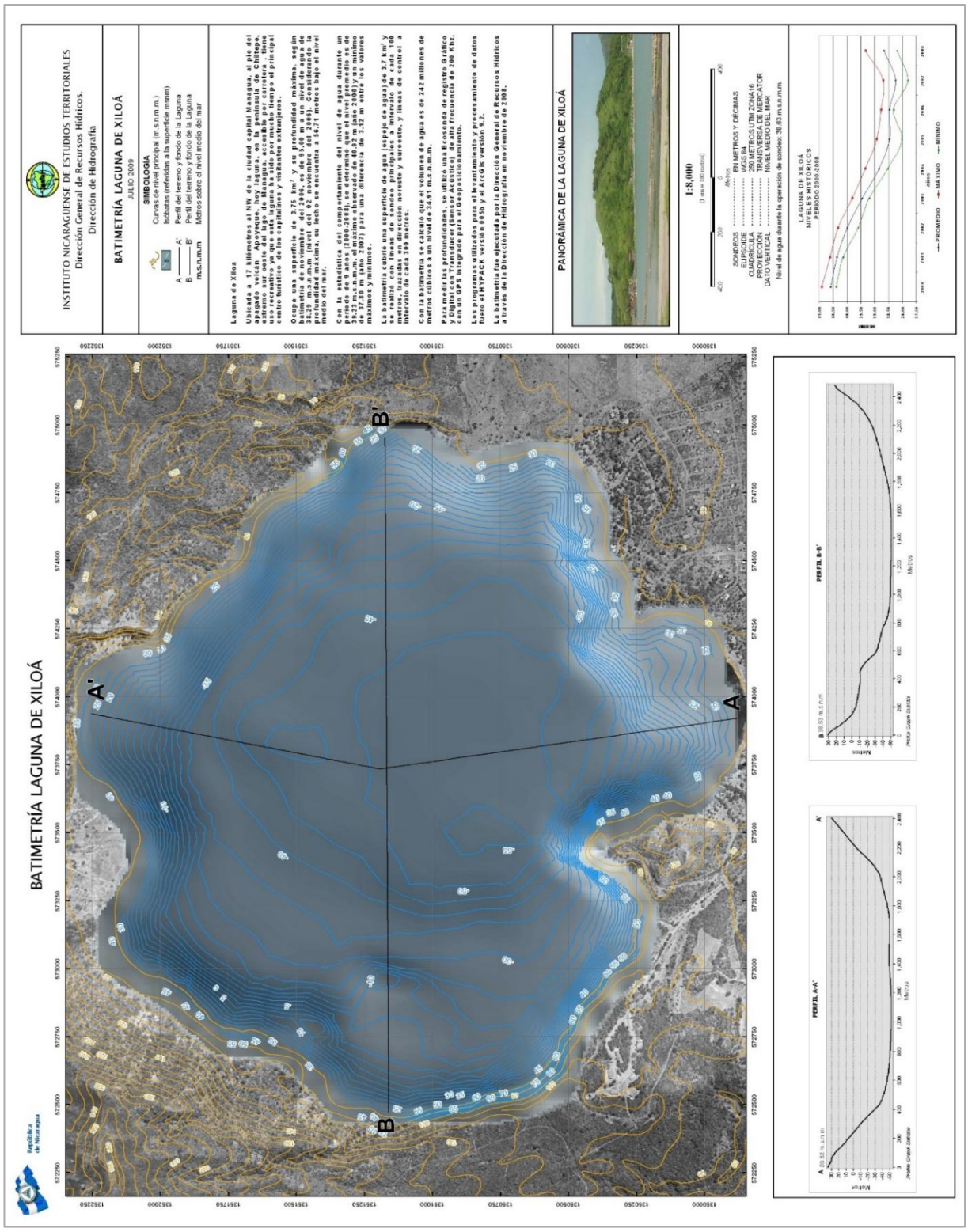
Especies	Concentración de dosis aplicada As (mg/L)	pseudo-K_p (cm/h)	Taza de absorción (µg/(cm h))	Permeabilidad relativa	Absorción dermal estimada en un evento de recreación (µg As)
arsenito	10	2.7×10^{-3}	2.7×10^{-2}	29	1.1
arsenato	10	9.2×10^{-5}	9.2×10^{-4}	1	0.04
DMA (V)	10	5.4×10^{-3}	5.4×10^{-2}	59	2.2
FS	9.9	ND[c]	ND[c]	<1	<0.04
Arsenito en fs	10+10	3.8×10^{-3}	3.8×10^{-2}	41	1.5
arsenoazúcar	4.2	9.4×10^{-5}	3.9×10^{-4}	1	0.04

Los cálculos de absorción se construyeron suponiendo que un adulto promedio tiene un área de superficie de 20 000 cm^2 y un peso de 70 kg, asumiendo también una solución de arsénico de 0,1 mg/L, para un evento de 12 min.

Anexo 17. Modelo geotérmico conceptual, Managua Chiltepe, Nicaragua.



Anexo 18. Batimetría de la laguna de Xiloá.



Anexo 19. Carácter hidroquímico de los cuerpos de agua de la península de Chiltepe.

Lago – Localidad - Fecha	Carácter Químico	Composición Química (ppm)				
		TDS	Cl	NO_3	B	F
Managua - El Charco, 1982	HCO_3-Na	1090	241	Tr.	0.8	1.0
Managua - NE Corpus Christi, 1982	HCO_3-Cl-Na	1190	316	Tr.	0.75	0.9
Managua – Punta Chiltepe, 1982	HCO_3-Na	1181	252	Tr.	0.7	0.8
Managua - El Tamagás, 1982	HCO_3-Cl-Na	1179	302	Tr.	0.5	0.7
Managua - San Isidro, 1982	HCO_3-Na	1083	245	0.6	0.85	0.9
Managua - NE Cerro S. Carlos, 1982	HCO_3-Na	1162	285	0	2.16	-
Apoyeque, 1970	Cl-Na	5322	2077	0.6	0	0.5
Apoyeque, 1976	Cl-Na	5164	2500	0.01	24.7	0.2
Apoyeque, 1982	Cl-Na	5796	2485	Tr.	9.3	0.5
Jiloá, 1958	Cl-Na	3900	1872	-	24.8	0.5
Jiloá, 1968	Cl-Na	3654	1831	Tr.	8.0	-
Jiloá, 1970	Cl-Na	3716	1988	2.1	6.0	0.7
Jiloá, 1976	Cl-Na	4018	2112	-	19.7	0.5
Jiloá, 1982	Cl-Na	4326	2166	Tr.	10.5	0.7