



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA**

UNAN - MANAGUA

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Departamento de Tecnología

Ingeniería Geológica

Tema:

“Evaluación de la Relación entre el Contenido de Arsénico en Aguas Subterráneas y Fallamiento Geológico en los alrededores de la Laguna de Apoyo, Catarina, Nicaragua”

Monografía para optar al Título de Ingeniera en Geología

Autora:

Br. Andrea Esnelda Benavides Fierro

Tutora:

PhD Heyddy Loredana Calderón Palma

Asesoras:

MSc. Juliana Galeano Pardo

MSc. Eveling Espinoza

Managua, enero 2020

¡Ala libertad por la universidad!

ÍNDICE

Capítulo I.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos de investigación.....	6
1.4.1. General.....	6
1.4.2. Específicos	6
Capítulo II	7
2.1. Antecedentes.....	7
2.2. Marco Teórico	10
2.2.1. Tectónica Regional de Centro América y Nicaragua	10
2.2.2. Marco Geomorfológico Regional	16
2.2.3. Geomorfología local de la Laguna Apoyo.....	19
2.2.4. Geología local de la Laguna de Apoyo.....	23
2.2.5. Origen de la Caldera Laguna Apoyo	29
2.2.6. Hidrología de la Laguna de Apoyo.....	31
2.2.7. Hidrogeología de la Laguna de Apoyo	33
2.2.8. Hidroquímica de aguas subterráneas	35
2.3. Marco conceptual.....	37
2.4. Hipótesis de investigación	45
Capítulo III.....	46
3.1. Diseño metodológico	46
Capítulo IV.....	53
4.1. Análisis y discusión de resultados.....	53
4.1.1. Fotointerpretación	53
4.1.2. Estratigrafía del área de estudio.....	55
4.1.3. Geología-estructural.....	59
4.1.4. Inventario de Pozos.....	64
4.1.5. Hidrogeología	68
4.1.6. Hidroquímica de las aguas subterráneas	70
4.1.7. Composición isotópica.....	73
4.1.8. Modelo Conceptual.....	76
Capítulo V.....	79
5.1. Conclusiones	79
5.2. Recomendaciones	81

Referencias	82
--------------------------	-----------

Anexos	
Medidas de recomendación para reducir las concentraciones de As en las aguas subterráneas.....	
Manual instructivo para realizar pruebas de Arsénico en aguas.....	
Recopilación de información y equipo utilizado	
Pozos inventariados	

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Validación del Digital Arsenator</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 2. Inventario de pozos.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 3. Resultados de isótopos.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 4. Resultados de la aplicación del Filtro Kanchan.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 5. Recopilación de información.....</i>	<i>73</i>

Lista de figuras

Figura 1. Provincias Geológicas de Nicaragua.....	15
Figura 2. Provincias Geomorfológicas de Nicaragua	18
Figura 3. Mapa geomorfológico del área de estudio.	22
Figura 4. Mapa geológico del área de estudio.....	28
Figura 5. Proceso de formación de calderas.....	30
Figura 6. Balance hídrico de la Laguna de Apoyo.....	34
Figura 7. Diagrama de Piper.	36
Figura 8. Afectación del Arsénico	39
Figura 9. Relación entre $^{18}\delta$ y $^{2}\delta$	44
Figura 10. Área de estudio.	47
Figura 11. Resultados de foto-interpretación.....	54
Figura 12. Falla normal desplazando estrato de pómez.	56
Figura 13. Litología del área.....	56
Figura 14. Litología del área.....	57
Figura 15. Columna litológica del área de estudio.....	58
Figura 16. Diagramas de Rosas.	60
Figura 17. Fracturas encontradas en el área de estudio.	61
Figura 18. Movimientos de masa.....	63
Figura 19. Inventario de pozos.	67
Figura 20. Mapa piezométrico	69
Figura 21. Conductividad Eléctrica Vs Arsénico	70
Figura 22. Línea de mezcla.	74
Figura 23. Línea meteórica.	75
Figura 24. Modelo conceptual en pozos sin As.	77
Figura 25. Modelo conceptual en pozos con As.	78
Figura 26. Componentes del filtro Kanchan	68
Figura 27. Componentes del Filtro Kanchan.....	69
Figura 28. Equipo para inventario de pozos.	75
Figura 29. Pozo de la Alcaldía de Catarina.....	76
Figura 30. Pozo Estación Richardson.	77
Figura 31. Pozo Quinta Bladimir Rosales.....	78
Figura 32. Pozo Monte Cristo	79
Figura 33. Pozo Topochiva.....	80
Figura 34. Pozo Villa Serena.....	81
Figura 35. Pozo Casa de Verano.....	82
Figura 36. Pozo Quinta El Carmelo.....	83
Figura 37. Pozo Punta El Cacique.	84
Figura 38. Pozo Casa Martha	85
Figura 39. Pozo Juan José Romero.....	86
Figura 40. Pozo Quinta Meneses.....	87
Figura 41. Pozo Bar y Restaurante María	88

	v
<i>Figura 42. Pozo Cuerpo de Paz.....</i>	89
<i>Figura 43. Pozo Restaurante Los Ranchos.....</i>	90
<i>Figura 44. Pozo Casa de las Aves</i>	91
<i>Figura 45, Pozo Ernesto Cordero</i>	92
<i>Figura 46. Pozo Laguna Shore Guesthouse</i>	93
<i>Figura 47. Mapa de trabajo en campo.</i>	122

Capítulo I

1.1. Introducción

En Nicaragua existen numerosas riquezas naturales, entre las más destacadas está la Cadena Volcánica Cuaternaria y los dos grandes Lagos Cocibolca y Xolotlán, que se ubican en el Pacífico del país. La zona del Pacífico alberga la mayor parte de lagunas y lagos del país. Así mismo, es de donde se obtiene el mayor porcentaje de fuentes de aguas subterráneas existentes en el país, debido a las condiciones litológicas. En Nicaragua existen 14 lagunas cratéricas las cuales son calificadas como patrimonio natural, el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA) en la norma NTON 05 002-99 considera a estos ecosistemas acuáticos de origen volcánico muy frágiles y susceptibles a impactos de contaminación, eutrofización y sedimentación (NTON 05 002-99, s.f.).

La Laguna de Apoyo es considerada como la laguna cratérica más grande de Nicaragua con un área de 21 km² (Calderón Palma & Flores Meza, 2010). A las orillas de la Laguna se puede evidenciar el incremento de viviendas y hoteles, lo que implica un impacto en la escorrentía de aguas superficiales con las construcciones de nuevas viviendas y carreteras, que comprende la descarga de aguas residuales y aumento en el uso de sus aguas. Este cuerpo de agua se encuentra naturalmente presenta altos niveles de salinidad (mayores a 800 µS/cm) y un alto contenido de Arsénico (As) (120 µg/l); el valor máximo admisible para concentración de este metaloide para consumo humano es de 10 µg/l, lo que restringe su uso únicamente para recreación. En estudios anteriores realizados en las aguas de la Laguna Apoyo y en aguas subterráneas alrededor se ha evidenciado este alto contenido de As (Calderón Palma & Flores Meza, 2010; Parello et al., 2008; Vázquez, Ortega, Marín, & Cerrato, 2007).

Esta investigación se enfoca el área del Plan de la Laguna de Apoyo, ubicada en el Pacífico de Nicaragua, entre el Complejo Volcánico Masaya y el Volcán Mombacho, específicamente en una franja de aproximadamente 1.5 km² en el Norte y Noroeste de la

laguna; ésta tiene un importante potencial turístico ya que brinda un paisaje exótico, tiene un espejo de agua color azul intenso con laderas frondosas, se tiene alrededor de ella también varios sectores turísticos donde se puede apreciar este paisaje hacia la Laguna. En el sitio se encuentran una variedad de biodiversidad y especies endémicas como la mojarra flecha, la mojarra chanco, pequeña y costera (CLUSA & FUNDECI/GAIA, 2009).

Considerando que las aguas subterráneas en el área de Apoyo y los pozos alrededor de la misma se encuentran contaminadas por arsénico (As), tomando en cuenta también la presencia de fallas tanto radiales por su origen volcánico como fallas regionales (Vázquez et al., 2007) se tiene el objetivo principal donde se determinó si existe relación con las concentraciones de As y la presencia de fallas y/o fracturas geológicas en el área de estudio.

1.2.Planteamiento del problema

La problemática a abordar en el área de estudio se basa en las diferentes concentraciones de As en el agua subterránea de los pozos analizados, estos muestran tener altas concentraciones en un sector Norte de la Laguna, y en un sector Noroeste estas concentraciones son menores radicalmente.

Los resultados que se han obtenido demuestran que muchos de los pozos tienen valores de concentración por encima de lo recomendado para el consumo humano (10 µg/l), esto presenta un problema para los pobladores y los hoteleros del área, ya que, al tener pozos con aguas no aptas para su consumo crea un déficit en su abastecimiento. Esta laguna es un sistema de cuenca muy complejo, delimitado por varias fallas geológicas en sus alrededores; fallas que probablemente estén conectadas hidráulicamente al origen de este contaminante natural.

En consecuencia, todo lo mencionado con anterioridad conlleva a la formulación del problema que se engloba en la siguiente pregunta: *¿Las estructuras de fallas en la zona Norte y Noroeste de la Laguna de Apoyo están conectadas de alguna manera a la presencia de altos y bajos niveles de As en las aguas subterráneas?*

1.3. Justificación

En el 2017 la UNESCO reportó en su página web¹ que la contaminación natural por As en agua potable es considerada como una amenaza en más de 70 países de todos los continentes, afectando alrededor de 140 millones de personas; por ejemplo, en Bangladesh cerca de 70 millones de personas se encuentran expuestas a aguas que contienen más de 10 µg/l de As, otros países que presentan este problema de contaminación son: Chile, China, Estados Unidos, Hungría, India, Japón, México, Taiwán y Vietnam (Carabantes & Fernicola, 2003).

En Nicaragua se realizó un estudio a nivel nacional de contaminación por As en 8 localidades, de las cuales 6 se confirmaron con este contaminante las cuales son: El Mojón en San Francisco del Norte, Comunidad Cerro Mina de Agua ambos sitios en Chinandega, Comunidad de EL Charco y Santa Rosa del Peñón, Comunidad La Cruz de la India y Las Pilas y la Comunidad de Kinuma en Chontales, se calculó una afectación de 1,270 personas estimando que el 5.7% de los puntos de abastecimiento de agua tienen valores de este As total por encima del valor máximo admisible de 10 µg/l (UNICEF, 2004).

La presencia de As en las aguas subterráneas que están siendo consumidas presenta un grave daño, su exposición prolongada puede causar graves enfermedades. En un escrito en la página web de la OMS² indica que el agua contaminada por As no puede ser utilizada para consumo humano, tampoco en ganadería o riego de plantas. Una prolongada exposición a este metal inorgánico (principalmente si es en los usos antes mencionados) podría causar una intoxicación crónica, los efectos más significativos son aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel; este elemento químico es una de las 10 sustancias químicas más alarmantes para la salud pública estableciendo un límite máximo en el agua de 10 µg/l. En

¹<http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-41-natural-arsenic-pollution/>

² <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

Nicaragua también existe un valor máximo admisible para la concentración de este metaloide en las aguas, establecido por las Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano como un máximo de 0.01 mg/l (CAPRE, 2010).

La situación medio ambiental del país es indudablemente un tema de mucha relevancia, ya que se involucra a toda la sociedad, tanto a los pobladores como a instituciones públicas y privadas. En la Laguna de Apoyo la demanda de agua para consumo humano va aumentando, esto debido a que la Laguna tiene un alto potencial turístico por su belleza paisajística, y su biodiversidad; sin embargo, para que el desarrollo turístico sea potencial los pobladores y hoteles requieren indispensablemente agua potable. Es por eso que este estudio pretende determinar si el origen del arsénico está relacionado con fallas geológicas, para identificar zonas donde es menos probable encontrar altas concentraciones de As y que las autoridades locales puedan planificar la perforación de futuros pozos seguros.

En el área de estudio se han realizado estudios donde revelan la existencia de contaminación de las aguas subterráneas de pozos, esto presenta un problema ya que las personas utilizan el agua para consumo, para lavar utensilios domésticos, riego, lavar alimentos, bañarse, entre otros. Con este estudio se logró obtener información de las concentraciones de As y el uso que se brinda a cada pozo.

1.4. Objetivos de investigación

1.4.1. General

- Evaluar la relación que existe entre el contenido de Arsénico en aguas subterráneas y el fallamiento geológico en los alrededores de la Laguna de Apoyo.

1.4.2. Específicos

- Caracterizar los tipos de estructuras geológicas en el área de estudio.
- Identificar pozos contaminados por arsénico en el área de estudio.
- Correlacionar la ubicación de los pozos contaminados y las fallas geológicas.
- Recomendar opciones para la reducción de As en aguas contaminadas de los pozos usados para consumo humano.

4.1.4. Inventario de Pozos

Se hizo un levantamiento total de 23 pozos Figura 19 entre los municipios de Catarina y Granada, las profundidades varían entre 4.13 m el pozo más somero y 42.7 m el pozo más profundo; los pozos en su mayoría pertenecen a quintas, otros pozos están en sitios turísticos y lugares públicos, todos los datos fueron recopilados durante la etapa de verano, a excepción del último pozo (Bladimir Rosales) donde se tomaron datos cuando ya había iniciado la etapa lluviosa en la zona.

En la Tabla 2 se muestran los parámetros físico-químicos que fueron determinados in situ en los 23 pozos y todos se encuentran dentro del Plan de la Laguna de Apoyo, en la columna de As se tiene un registro de 10 pozos los cuales presentan una concentración de arsénico mayor a los 10 $\mu\text{g/l}$ (resaltados en rojo), el más alto registrado con 70 $\mu\text{g/l}$ que corresponde al último pozo registrado como Bladimir Rosales; este se encuentra a una distancia de 18 m de la laguna. La mayoría de los pozos analizados son excavados, excepto por el pozo que pertenece a la alcaldía local; según los parámetros físico-químicos que se tomaron en campo los pozos pueden dividirse en dos áreas, unos con altas concentraciones de As, con alta conductividad eléctrica entre 450 y 1160 $\mu\text{S/cm}$ y pH mayor entre 7.4 y 8.3; y los pozos se encuentran a profundidades mayores de 10 m, a excepción del pozo Bladimir Rosales el cual está relativamente somero (4.13 m).

La segunda área corresponde a los pozos con registros de As menores a 5 $\mu\text{g/l}$, donde las conductividades eléctricas varían entre 320 y 430 $\mu\text{S/cm}$, el pH no hace mucha diferencia en cuanto a la primera área, con datos entre 7.3 y 8.3; los pozos más someros van desde 4.8 m hasta 42.7 m (pozo con mayor profundidad registrado).

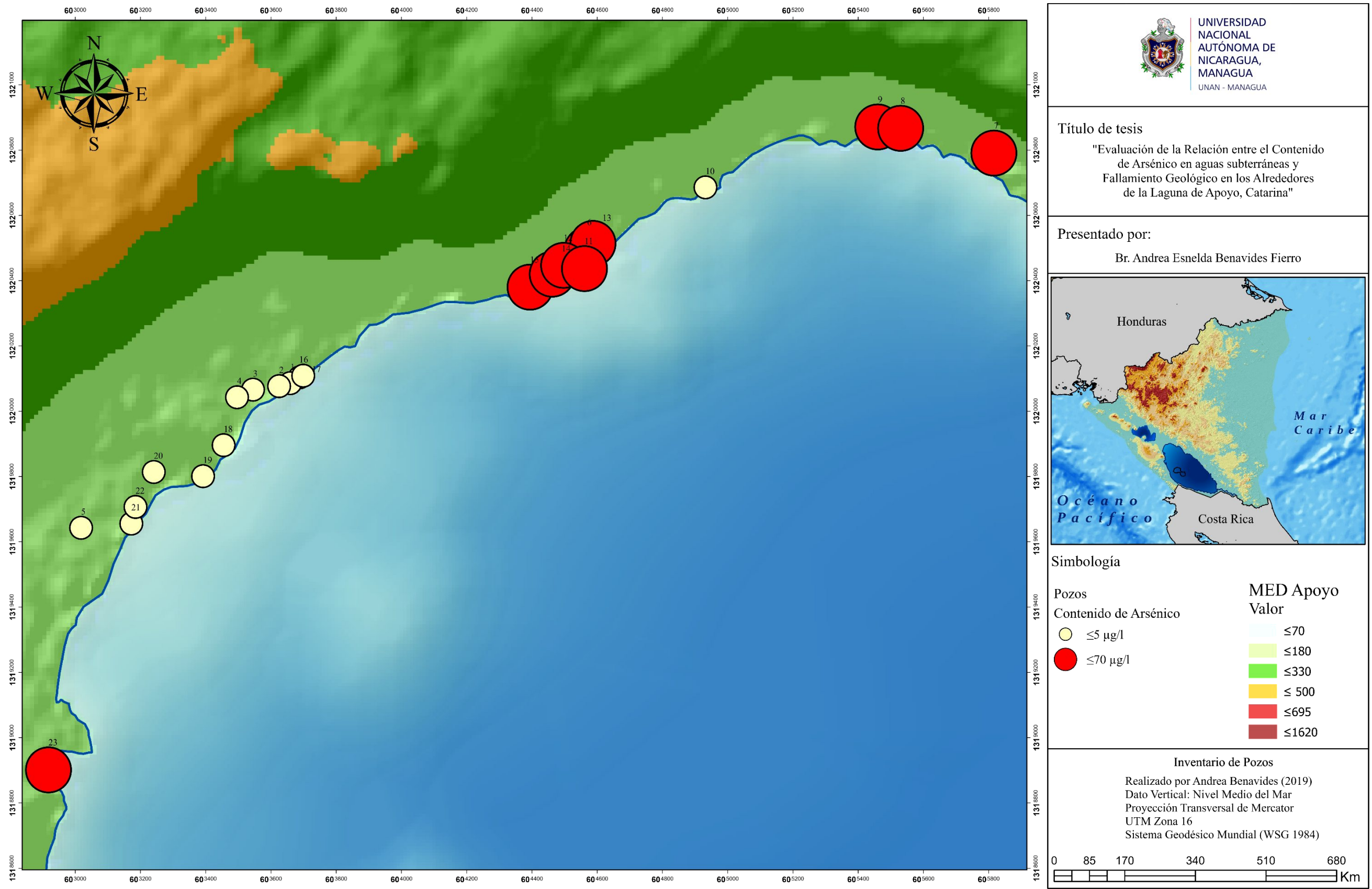


Figura 19. Inventario de pozos.

4.1.5. Hidrogeología

4.1.5.1. Piezometría

Para la elaboración del mapa piezométrico (Figura 20) se utilizaron los datos de los pozos obtenidos en campo, pero también se utilizaron datos de Vázquez et al., 2007 durante la etapa de verano al para tener una mejor distribución espacial de las líneas equipotenciales, ya que los 23 pozos analizados en este estudio no tenían una buena distribución espacial. Para la elaboración de las líneas equipotenciales se utilizó el programa Surfer 14, con el método de interpolación kriging.

En el área de estudio los niveles piezométricos van desde 70 m en la parte más baja de la Laguna hasta los 90 m en la zona Noroeste (Figura 20). Como se observó la red de drenaje del interior de la Caldera nace en los bordes del mismo desde las zonas más altas, eso sobre todo se puede apreciar en la zona Norte y Noroeste de la Laguna; ya que en la zona Sur como se mencionaba en el análisis de foto interpretación la red de drenaje es tipo paralelo.

De acuerdo a las líneas de flujo que van hacia la Laguna se tienen en la zona Sur, Suroeste y Noroeste. En la Figura 20 se observa en la zona Noroeste que el flujo es multidireccional, de acuerdo a las líneas equipotenciales; aquí se tienen pozos con concentraciones bajas de As posiblemente indicando un aporte de flujo subterráneo. Mientas en la zona Norte el comportamiento del flujo subterráneo según las equipotenciales van en dirección Noroeste-Sureste donde se ve que el flujo es ligeramente desviado de los pozos registrados con altas concentraciones de As, indicando probablemente que en esta zona de recibe poca aportación de flujo subterráneo. El comportamiento del flujo subterráneo en esta área podría obedecer a la presencia de fallas.

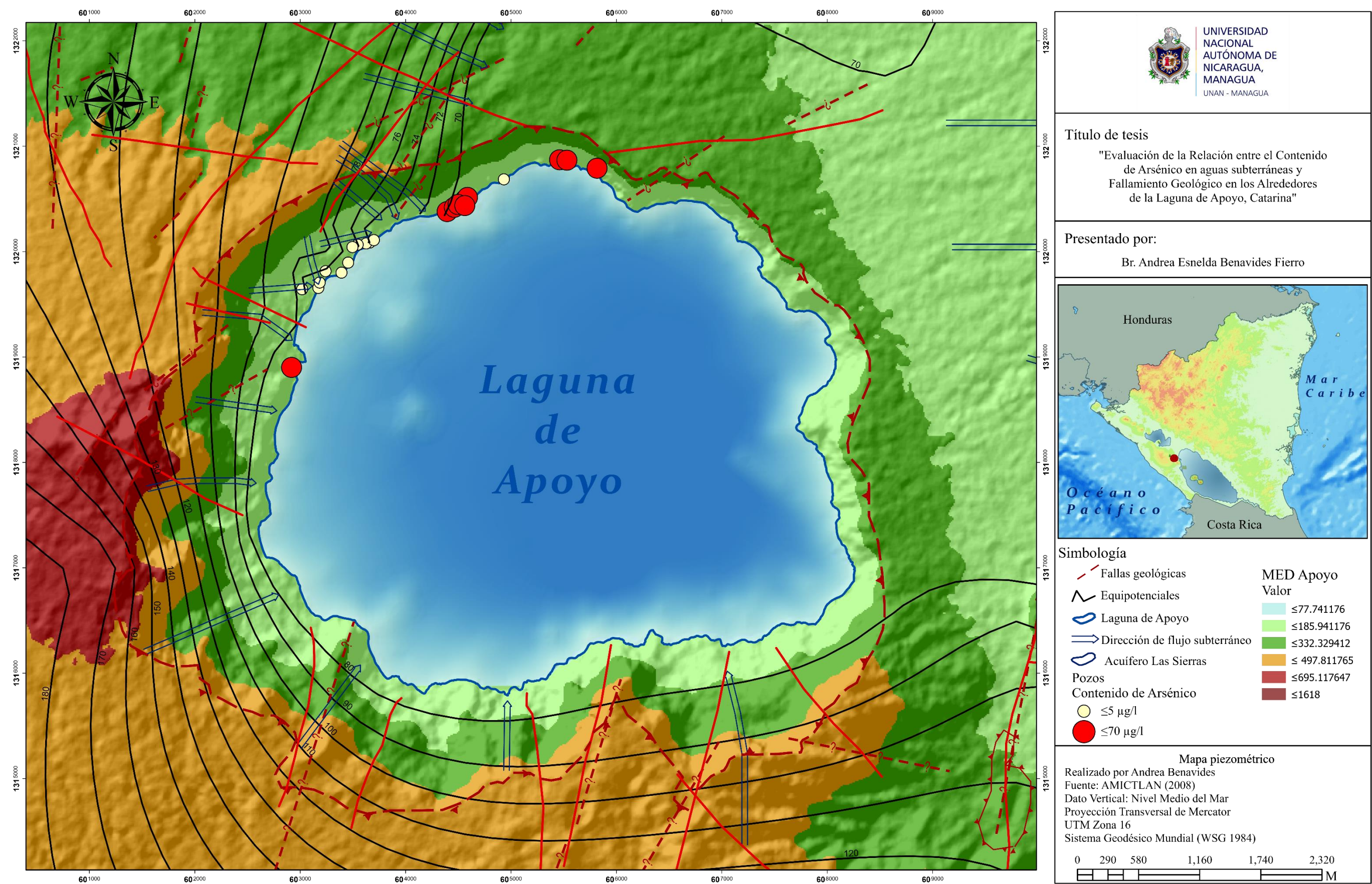


Figura 20. Mapa piezométrico

4.1.6. Hidroquímica de las aguas subterráneas

Relación entre Arsénico y Conductividad Eléctrica

En los resultados de los datos obtenidos de las concentraciones de As y las Conductividades eléctricas se puede decir que existe una relación, las conductividades entre 320 $\mu\text{S/cm}$ hasta 450 $\mu\text{S/cm}$ muestran tener rangos de As bajos (Figura 21, en color verde), esto a excepción de dos pozos registrados con conductividades de 580 $\mu\text{S/cm}$ y 1160 $\mu\text{S/cm}$. Otros pozos que se registraron con conductividades entre 450 $\mu\text{S/cm}$ y 1150 tienen registros de alto contenido de As (Figura 21 en color naranja).

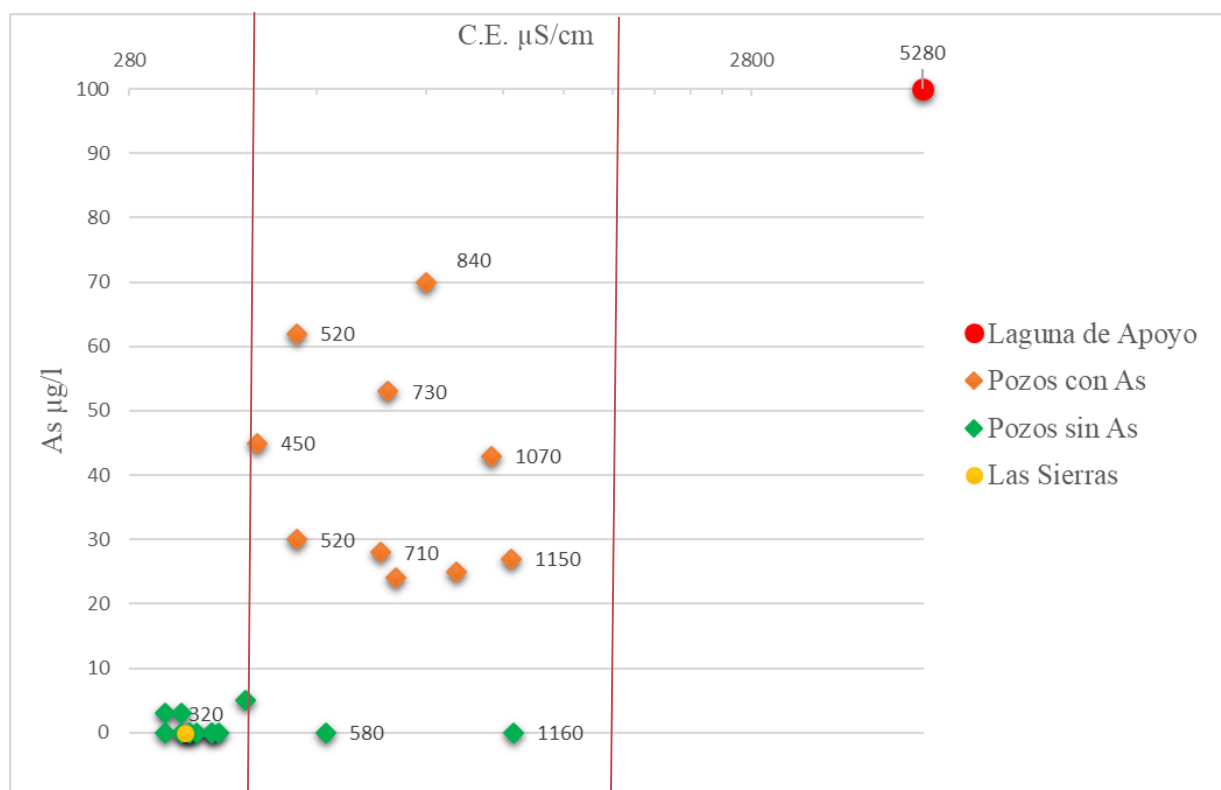


Figura 21. Conductividad Eléctrica Vs Arsénico

En la Figura 21 se pueden diferenciar 3 datos diferentes en dependencia a las concentraciones de As y los datos de las conductividades eléctricas. Los resultados de la Laguna se muestran elevados en ambos parámetros, y como se muestra en la Tabla 2. Inventario de pozos, el As es mayor a 100 $\mu\text{g/l}$ y la conductividad de 5,280 $\mu\text{S/cm}$. En la Figura 21 color naranja se muestran los que corresponden a pozos con registros de As mayores a 20 $\mu\text{g/l}$ y la conductividad también es elevada. Finalmente, el último resultado señalado en color verde con concentraciones bajas en As y en las conductividades. Una excepción que se presenta en dos pozos (pozos número 2 y 10, ver Tabla 2), éstos pozos a pesar de no presentar concentraciones elevadas de As tienen conductividades altas, lo que podría deberse a contaminación antrópica haciendo que la conductividad sea elevada.

Se realizó una comparación en el sector donde predominan bajas conductividades (Figura 21, en color verde) con la conductividad del acuífero regional (Figura 21, color amarillo) datos obtenidos de Vázquez et al., (2007), indicando que la fuente de estas aguas subterráneas podrían provenir del acuífero regional ya que las conductividades en ambos se muestra similar. En la Figura 47 se puede apreciar que los pozos con bajas concentraciones de As se encuentran en una zona con alto nivel de fracturamiento indicando probablemente que el flujo subterráneo obedece a las fracturas presentes; estas fracturas presentan direcciones N 10° E, S 10° O y N 15° O lo que en comparación con la dirección de flujo subterráneo (Figura 20) se observa que este es en múltiples direcciones. Acorde a la Figura 4 donde se muestra la litología en esta zona predomina material coluvial, y grandes depósitos de pómez; factor que también podría facilitar la infiltración de agua subterránea hacia estas aguas locales sabiendo que la pómez es un material poroso; lo que ayudaría a la dilución del As y en consecuencia los rangos de este metal son menores a 10 $\mu\text{g/l}$.

Por otra parte, se tienen pozos con conductividades entre 450 $\mu\text{S/cm}$ y 1150 $\mu\text{S/cm}$ (Figura 21, en color naranja) y rangos de As mayores a 20 $\mu\text{g/l}$; estos datos de conductividad y As se muestran en un área intermedia entre aguas de la Laguna y aguas subterráneas de los pozos con baja conductividad eléctrica, lo que según Vázquez et al., (2007) esto podría ser causa de una mezcla de aguas entre aguas subterráneas locales y aguas de la laguna. Lo que hace diferente a estos pozos es que las concentraciones de As son elevadas, esto se puede explicar con los datos de

piezometría (Figura 20) donde se logra visualizar que la dirección de flujo en trayectoria a los pozos con alto As no es muy evidente, este flujo tiene una orientación Noroeste- Sureste. Según la Figura 4, donde se muestra la litología de Toba que corresponde al Grupo Las Sierras, material poco poroso y compacto, algunos afloramientos muestran fracturas, sin embargo, este se atribuye a la caída de material de bloques. Por tanto, en esta zona no ocurre dilución de As y las concentraciones se muestran en un rango mayor a 20 $\mu\text{g/l}$.

Un pozo diferente se puede apreciar en la Figura 21, sus aguas tienen un comportamiento similar a las aguas superficiales de la Laguna de Apoyo (pozo Bladimir Rosales) con una conductividad eléctrica de 840 $\mu\text{S/cm}$, éste fue el pozo con mayor concentración de As registrado (70 $\mu\text{g/l}$), se encuentra aproximadamente a 15 m de la laguna, el nivel de agua se encuentra somero (1.85 m) y la distancia del pozo hacia la laguna es de aproximadamente 1 m, probablemente este pozo tenga influencia del agua de la laguna.

4.1.7. Composición isotópica

Se realizó un análisis de 9 muestras en total de los isótopos $\delta D\text{‰}$ y $\delta^{18}O\text{‰}$ los cuales fueron analizados en el laboratorio CIRA/UNAN-Managua. De éstas muestras 2 pertenecen a aguas superficiales de la Laguna de Apoyo y 7 muestras a aguas subterráneas de pozos, de los cuales 4 fueron tomados con registros elevados de As y el resto sin presencia de As, en la Tabla 3 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 3. Resultados de isótopos.

<i>Muestra</i>	$\delta D\text{‰}$	$\delta^{18}O\text{‰}$	As
<i>Laguna de Apoyo</i>	8.50	2.64	100
<i>Laguna de Apoyo</i>	10.20	2.68	100
<i>Bladimir Rosales</i>	9.30	2.69	70
<i>Estación Richard-son</i>	-34.60	-4.76	27
<i>El Cacique</i>	-42.50	-6.24	53
<i>Casa de Verano</i>	-42.00	-6.16	24
<i>Pozo alcaldía</i>	-47.00	-7.19	0
<i>Casa de las Aves</i>	-44.80	-6.66	0
<i>Ernesto Cordero</i>	-37.90	-5.39	0

De acuerdo al contenido isotópico se observa claramente las distintas fuentes de agua muestreadas, el primero corresponde a la Laguna de Apoyo la que muestra valores altamente enriquecidos en isótopos, el pozo Bladimir Rosales mostró una composición isotópica similar a las aguas de la laguna, lo que podría indicar que este pozo está siendo alimentado desde la misma fuente en profundidades a la Laguna, lo que se apoya con las características mencionadas en la discusión de As y las conductividades eléctricas sobre este pozo.

Por su parte, los resultados de las aguas subterráneas muestran estar más empobrecidos en isótopos pesados, entre ellos se encuentran pozos con altas y bajas concentraciones de As; lo que podría ser un indicador de mezcla entre aguas locales en el área de la laguna y aguas subterráneas del acuífero regional. Según la Figura 22 se observa que el pozo Ernesto Cordero se encuentra en una línea de mezcla entre dos pozos con alto contenido de As, este pozo fue de discusión anterior, donde se observa que presenta altas conductividades eléctricas y también la composición isotópica indica ser distinta a los dos tipos de aguas subterráneas generales que se han presentado; como los isótopos que se analizan son parte de la molécula de agua tienden a ser sensibles a procesos físicos como evaporación, condensación o mezcla, probablemente la composición isotópica de este pozo y la conductividad eléctrica representan que sus aguas provienen de una fuente distinta.

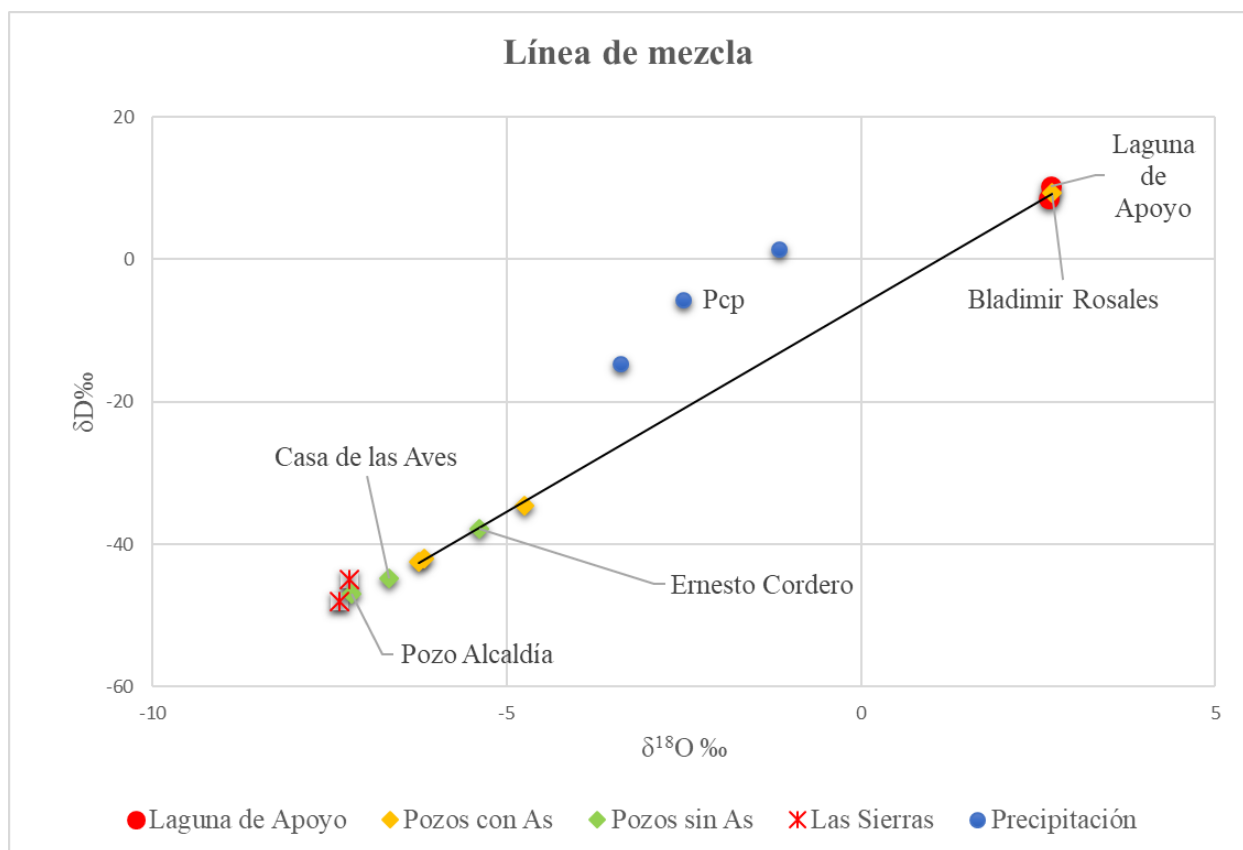


Figura 22. Línea de mezcla.

4.1.8. Modelo Conceptual

En la Figura 24 se muestra un modelo de dos pozos, el pozo 5 de la Alcaldía de Catarina, tiene una profundidad de 42.7 m y el nivel de agua se encuentra a 12.28 m; este tiene una conductividad eléctrica baja ($320 \mu\text{S}/\text{cm}$), el pozo está asentado sobre una capa fina de arena, por encima se tiene una toba pomácea con fracturas, sigue una capa de aglomerados con fragmentos de basalto y pómez, y en la capa superior se tienen depósitos coluviales y sedimentos del cuaternario. Este pozo se encuentra a 92 m.s.n.m., como se observa en la Figura 22 es alimentado por el acuífero regional Las Sierras.

El pozo 22 Bar y Restaurante María se encuentra a 82 m.s.n.m, tiene una conductividad eléctrica baja al igual que el pozo anterior ($390 \mu\text{S}/\text{cm}$), una profundidad de 5.65 m y el nivel de agua se encuentra a 3.24 m; este pozo es alimentado tanto por aguas pluviales, probablemente también es alimentado a través de permeabilidad secundaria por los depósitos de toba pomácea fracturada. El perfil trazado se encuentra en el área donde las concentraciones de As son menores a $5 \mu\text{g}/\text{L}$.

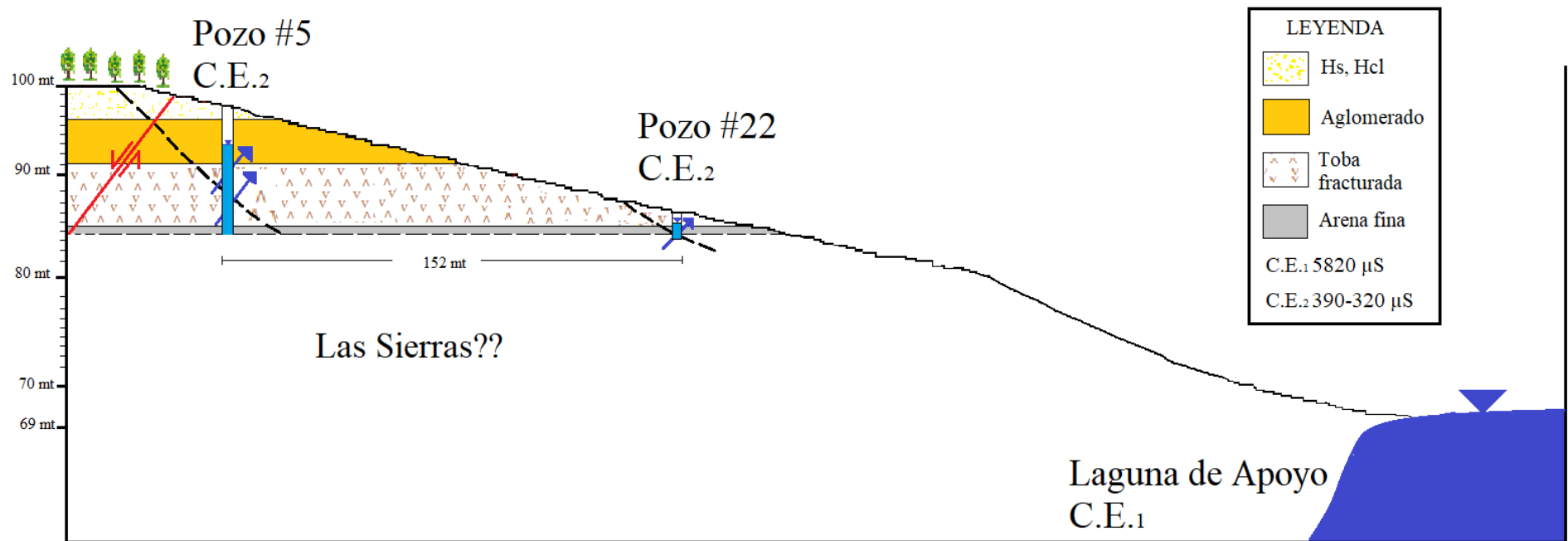


Figura 24. Modelo conceptual en pozos sin As.

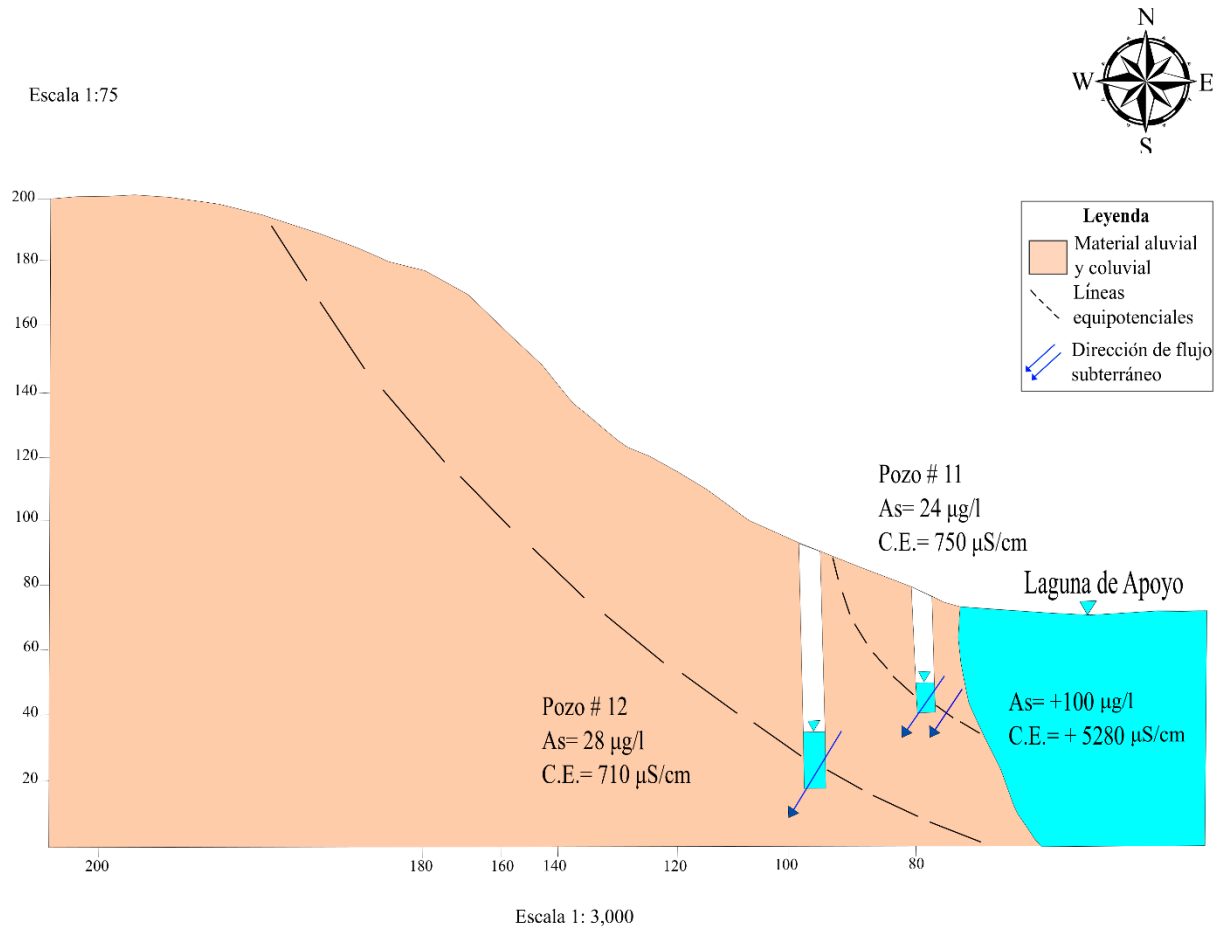


Figura 25. Modelo conceptual en pozos con As.

En la Figura 25 se puede observar un perfil donde se muestra la dirección del flujo subterráneo desde el pozo No 12 hacia el pozo No 11, según este perfil se puede determinar que el flujo subterráneo va en dirección a la Laguna, también se muestra la línea probable de interfaz entre las aguas más densas de la Laguna de Apoyo con el agua subterránea que tiene conductividades más bajas. Estos pozos tienen concentraciones de As mayores a 20 $\mu\text{g/l}$, lo que podría indicar una mezcla entre las aguas subterráneas provenientes de los pozos y aguas con de la Laguna; en base a los datos analizados de las conductividades eléctricas y la composición isotópica se puede determinar esta mezcla.

Capítulo V

5.1. Conclusiones

En base a la posición geográfica de los pozos con diferentes concentraciones de As, las características de conductividades y el contenido isotópico se pudo encontrar de forma general dos tipos de aguas. En una zona se tienen pozos con un contenido de As mayor a 20 µg/l y otra donde el contenido es menor a 10 µg/, es diferencia de concentraciones está vinculada a una zona de fallamiento y un alto grado de fracturas; como se mostró en la discusión en el área con menor As las fracturas presentan varias direcciones mismo comportamiento que se tiene con el flujo subterráneo, lo que indica que en esta zona ocurre dilución de As por el aporte de un flujo subterráneo regional que ha sido comparado con varios datos lo que probablemente indica que es del acuífero Las Sierras y según el mapa piezométrico, se observan estas diferentes direcciones del flujo subterráneo. La composición isotópica en esta zona es empobrecida en isótopos pesados.

Por su parte, los pozos que tienen alto contenido de As se encuentran en una zona donde las fracturas presentes son superficiales y causadas por el desprendimiento de materiales de gran tamaño, en base al mapa piezométrico y el sistema de flujo subterráneo se observó que este no presenta mucho aporte hacia estos pozos con As, sino que muestran tener una dirección Noroeste-Sureste hacia el Lago Cocibolca o Granada.

En el área de estudio se observó que el pozo Bladimir Rosales puede estar siendo alimentado con agua directamente de la Laguna, ya que este pozo es somero y la distancia del pozo hacia la laguna es de alrededor de 1 m y su característica de conductividad y composición isotópica muestra ser similar al agua superficial de la Laguna de Apoyo, ambas muestras son enriquecidas en isótopos.

En el sitio no se pudo observar un desplazamiento de falla, por lo que para determinar la presencia se utilizaron indicadores secundarios como dirección de fracturas, deslizamientos y foto-interpretación. Sin embargo, en base al sistema de caldera y en base a los antecedentes se podría tener presencia de fallas tipo normal.

Referencias

- Calderón Palma, H., & Flores Meza, Y. (2010). *Evaluación de la Dinámica de la Laguna de Apoyo mediante Trazadores Isotópicos y Geoquímicos*.
- CAPRE. *Norma Regional Capre.* , (2010).
- Carabantes, A. G., & Fernicola, N. A. G. G. de. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 39(4), 365–372. <https://doi.org/10.1590/S1516-93322003000400003>
- Castillo, B. (2011). *Comportamiento de tecnología Kanchan y Sono filter para la remoción de arsénico en aguas con concentraciones de 60 µg/l a 80 µg/l en la comunidad de Linda Vista del Municipio de Santa Rosa del Peñón* (Universidad Nacional de Ingeniería). Retrieved from <http://ribuni.uni.edu.ni/2081/1/PIENSA17.pdf>
- CLUSA, & FUNDECI/GAIA. (2009). *PLAN DE MANEJO RESERVA NATURAL LAGUNA DE APOYO*. 271.
- Cole, J. W., Milner, D. M., & Spinks, K. D. (2005). Calderas and caldera structures: A review. *Earth-Science Reviews*, 69(1–2), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.06.004>
- COSUDE. (2005). *Inestabilidad de laderas: Mapa de Amenazas, Recomendaciones Técnicas para su elaboración*. 60. Retrieved from <https://web-geofisica.ineter.gob.ni/proyectos/metalarn/deslizamiento.pdf>
- Espinoza Altamirano, M. (2005). *Distribución De La Contaminación Natural Por Arsénico En Las Aguas Subterráneas De La Subcuenca Suroeste Del Valle De Sebaco, Matagalpa-Nicaragua*. (Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-Managua). Retrieved from <http://repositorio.unan.edu.ni/2378/>

- Espinoza, E. (2008). *Cartografía Geológica en la Reserva Natural Laguna de Apoyo y sus alrededores*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua UNAN-Managua.
- FEDEMEX. (2018). FEDEMEX. Retrieved October 25, 2019, from <https://elperiodicodemexico.com/nota.php?id=870110>
- Fenzl, N. (1989). 1989 Fenzel, Norbert *Nicaragua, clima, geografía y hidrogeología.pdf*.
- Fernández, E. (2009). *Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo en las aguas*. Retrieved from [https://books.google.com.ni/books?id=zviWBAAAQBAJ&pg=PA56&dq=diagrama+de+piper&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEwixdeojIbiAhUIVN8KHdokCqYQ6AEILDAB#v=onepage&q=diagrama de piper&f=false](https://books.google.com.ni/books?id=zviWBAAAQBAJ&pg=PA56&dq=diagrama+de+piper&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEwixdeojIbiAhUIVN8KHdokCqYQ6AEILDAB#v=onepage&q=diagrama%20de%20piper&f=false)
- Fundación del Río, M. (2009). *Yo vivo en la Cuenca 69*. Retrieved from http://fundaciondelrio.org/files/doc/1250695295_Yo vivo en la cuenca 69.pdf
- Gat, J., G. W., & A.J. H. (2002). *Environmental isotopes in the hydrological cycle Volume II Atmospheric water* (Technical; M. W.G, Ed.). Retrieved from [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/global_cycle/Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle Vol 2.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/global_cycle/Environmental%20Isotopes%20in%20the%20Hydrological%20Cycle%20Vol%202.pdf)
- Hodgson, G. (2000). *Geología Regional de Nicaragua (Introducción al léxico estratigráfico de Nicaragua).pdf* (Universida). Managua.
- IAEA. (1997). Use of isotope techniques in lake dynamics investigations. *Final Research Coordination Meeting*, (March), 1–116.
- Krasny, & Hecht, G. (1998). *Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacífico de Nicaragua Estudios Hidrogeológicos e*. 168.

Lillo, J. (2002). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Retrieved from http://phys4.harvard.edu/~wilson/arsenic/pictures/arsenic_project_pict

Llinares, M., Ortiz, R., & Mareeno, J. (n.d.). Riesgo Volcánico. In I. N. D. B. O. D. E. ESTADO (Ed.), *Ministerio General de Protección Civil y Emergencias (DIRECCION)*. Retrieved from <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/VLC-Guia-Riesgo-Volcanico.pdf>

McDonnell, J. J., & Kendall, C. (1992). Isotope tracers in hydrology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 73(24), 260–260. <https://doi.org/10.1029/91eo00214>

NTON 05 002-99. *Norma técnica obligatoria nicaragüense para el control ambiental de las lagunas cratéricas*.

Ongley, L. K., Chambreau, S. D., Guenthner, A., Godaire, T. P., Vij, A., & Cheema, H. (2012). *Validating the Digital Arsenator® and a Composite Iron Matrix Arsenic Filter at the Arsenic Field Event , Boron , CA*. (Cim), 1–9.

Parello, F., Aiuppa, A., Calderon, H., Calvi, F., Cellura, D., Martinez, V., ... Vinti, D. (2008). Geochemical characterization of surface waters and groundwater resources in the Managua area (Nicaragua, Central America). *Applied Geochemistry*, 23(4), 914–931. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.08.006>

Ramírez, J. C., & Torrez, P. (2016). *Diseño de filtros de Bioarena para remover metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Fe) en aguas de uso doméstico* (Universidad Nacional de San Agustín). Retrieved from <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/1893/AMlerajc.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Santa Rosa Del Peñón, M. DE, Rolando Benito Castillo Tutor, I., Rodolfo Jaén Serrano Asesor, L., & Edouard Jacotin, I. (n.d.). *CIEMA-UNI*.

- Soler, A.; Otero, N; Rosell, M.; Carrey, R.; Domènech, C. (2015). *Isótopos de la molécula del agua*.
- Sussman, D. (1985). Apoyo caldera, Nicaragua: A major quaternary silicic eruptive center. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 24(3–4), 249–282. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90072-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90072-1)
- UNICEF. (2004). *Contribución al estudio de cinco zonas contaminadas naturalmente por arsénico en Nicaragua*. 1–36. Retrieved from <https://www.unicef.es/sites/unicef.es/files/Deporte06.pdf>
- Vammen, K., Montenegro, S., Matínez, V., Flores, Y., Calderón, H., Chow, N., ... Zelaya, A. (2005). *Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua Informe sobre el Lago de Apoyo. I*.
- Vázquez, D., Ortega, J., Marín, A., & Cerrato, D. (2007). *Estudio hidrogeológico y gestión de los recursos hídricos en la Cuenca de la Laguna de Apoyo, Nicaragua*. 74. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/38156038/Hidrogeologico-Laguna-de-Apoyo>
- Well, R. (1980). *Geology of Central America* (Printed in).
- WHO. (2011). *Arsenic in drinking water.pdf*. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2011.05.002>
- Zuidam, R. (1985). *Aerial Photointerpretation Terrain Analysis Geomorpho Mapping* (p. 446). p. 446.

Anexos

Anexo 1.

Medidas de recomendación para reducir las concentraciones de As en las aguas subterráneas.

Para este trabajo se indagaron varios métodos de remoción de As, de los cuales el más completo y con un acceso bajo económicamente se considera el Filtro Kanchan, o remoción por adsorción de Fe.

El Filtro Kanchan fue desarrollado por investigadores del MIT⁷, EHPHO⁸ y RWSSSP⁹ de Nepal; éste método se basa en principios de filtración lenta de arena y absorción de As por hidróxido de Fe.

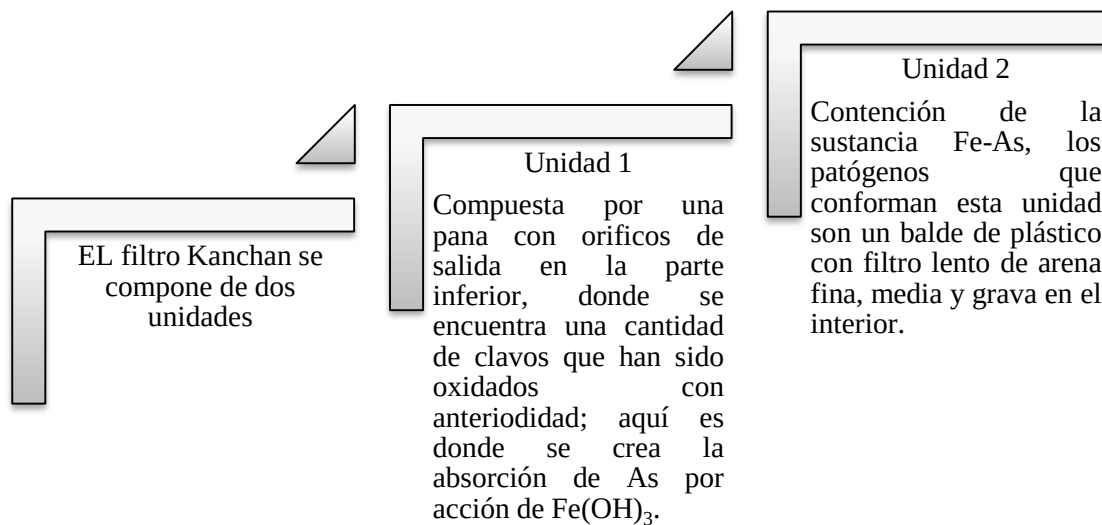


Figura 26. Componentes del filtro Kanchan

Fuente: (Castillo, 2011).

⁷ Massachusetts Institute of Technology

⁸Environment and Public Health Organization

⁹Rural Water Supply and Sanitation Support Programme

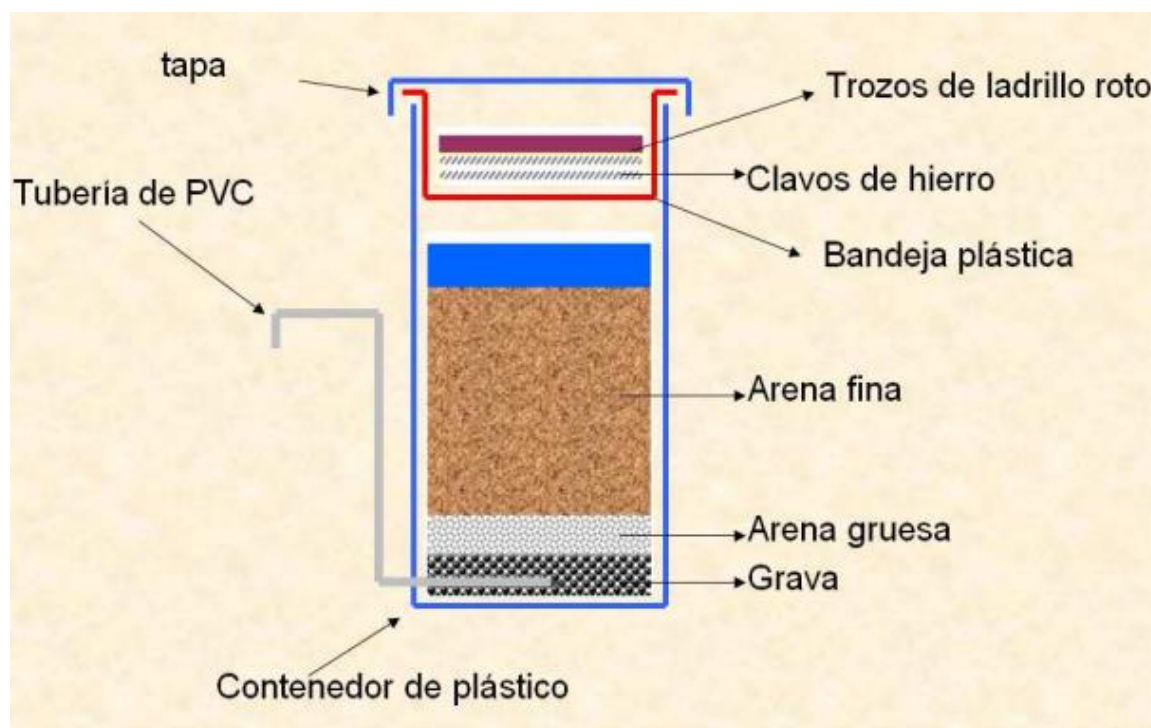


Figura 27. Componentes del Filtro Kanchan

Fuente: (Castillo, 2011)

Esta metodología ha sido utilizada en muchos países, incluyendo Nicaragua. En el estudio de Castillo, 2011 se aplicó este método para remover As el cual había sido objeto de estudio por UNICEF en 2004. Este fue aplicado en la comunidad de Linda Vista del Municipio de Santa Rosa del Peñón, en la Tabla 4 se muestran los resultados de la aplicación del Filtro Kanchan en aguas contaminadas por As en los rangos de 60 $\mu\text{g/l}$ a 80 $\mu\text{g/l}$.

Tabla 4. Resultados de la aplicación del Filtro Kanchan.

Fuente: (Castillo, 2011).

<i>Agua inicial con As µg/l</i>	<i>Agua con filtro µg/l</i>	<i>Remoción de As</i>	<i>% de remoción</i>
78	7.5	70.5	90.4
80	6.8	73.2	91.6
80	2.0	78	97.5
61	2.0	59	96.7
77	2.7	74.3	96.5
80	2.0	78	97.5
79	2.0	77	97.5

Estos análisis fueron realizados durante un lapso de 75 días, y se utilizó un volumen total 1.270 lt de agua con concentraciones de As variadas. Como se puede observar en la Tabla 4 la efectividad del método de remoción de As por Filtro Kanchan es muy alto, más del 90% del As contenido en el agua es removido, y este se encuentra por debajo del máximo admisible por la OMS y las Normas CAPRE.

Como parte de esta investigación se asistió a una charla sobre Remoción de As a nivel familiar impartida por el Ing. Sergio Gámez, patrocinada por ANISA y AMANCO donde también se trabajó con el Filtro removedor de As Kanchan, obteniendo resultados de más del 90% de remoción de este metal. También estudiaron y analizaron los costos que requiere la implementación de esta metodología, obteniendo un valor entre \$20 y \$22 por unidad. Este equipo tiene una vida útil entre 3 y 5 años.

Anexo 2.

Manual instructivo para realizar pruebas de Arsénico en aguas.

Digital Arsenator Palintest ZI INST 981

Materiales y equipo

- Analizador Digital de Arsénico
- Guantes látex
- Mascarillas (tapa bocas)
- Estándar pequeño
- Filtro eliminador de Sulfuro de hidrógeno
- Papel filtro rojo
- Papel filtro negro
- Erlenmeyer graduado
- Pinzas
- Filtro deslizante negro
- Filtro deslizante rojo
- Trampa tri-filtro
- Tabletas reactivas A2
- Polvo reactivo A1 (compuesto por ácido sulfanílico)
- Bolsas para desechos
- Tubo de dilución
- Agua des ionizada/ destilada
- Cepillo de limpieza de matraz
- Carta de colores
- Destornillador



Procedimiento

Antes de realizar alguna medición es necesario ejecutar un control en el aparato digital para comprobar siempre que funcione correctamente.

Preparación de los equipos

Para la lectura de concentración de arsénico se procede a colocar los papeles filtradores en cada filtro deslizante; para el filtro deslizante color rojo se introduce la tira reactiva del frasco con etiqueta “Red”; para el filtro deslizante color negro se introduce la tira reactiva del frasco con etiqueta “Black”. Se puede realizar una calibración del aparato digital utilizando el filtro negro, se presiona cualquiera de las dos teclas que tiene el aparato, este indica cuando se puede introducir el filtro y una vez lo salga en la pantalla se introduce el filtro deslizante negro y se retira cuando éste lo

indica. Luego se toma la trampa tri filtro y se coloca el filtro eliminador de Sulfuro de Hidrógeno en la parte superior, en el mismo tri filtro se colocan los dos filtros deslizantes (rojo y negro); el filtro negro en la parte inferior y el filtro rojo en la parte superior.

Preparación de la muestra

Con el matraz limpio (con el agua a analizarse o con agua des ionizada) se procede a llenar hasta 50 ml con el agua que requiere ser analizada, se debe tener listo las tabletas y el polvo reactivo, primero se coloca el polvo A1 y se introduce en el matraz con el agua, luego se introduce la tableta A2 tomando en cuenta que inmediatamente luego de colocar la tableta debe colocarse la trampa tri filtro sobre el matraz sellándolo, al introducir la tableta es recomendable que sea bien introducida, sin dejar restos en las paredes del matraz con el fin de utilizar bien toda la tableta reactiva.

Luego de esto se deja que reaccione la muestra en 20 minutos, el aparato digital tiene un cronometro con el cual se puede medir el tiempo, o bien usar un cronometro para esto; el tiempo inicia desde que se coloca la trampa tri filtro.

Medición del contenido de Arsénico

Una vez pasado los 20 minutos se retira el tri filtro del matraz, luego se retira de éste el filtro deslizante negro el cual si la muestra presenta algún grado de arsénico mostrará una coloración la cual se comparará con la tabla de colores la cual muestra de acuerdo al color en contenido de arsénico que presenta. Para una mejor exactitud del resultado se introduce el filtro deslizante negro en el aparato digital el cual arroja el resultado directo en $\mu\text{g/l}$.

Para finalizar las tiras reactivas se colocan en las bolsas de desechos especiales, para un mayor rendimiento del equipo el filtro de eliminación de Sulfuro de Hidrógeno se retira cuando en la parte superior empiece a oscurecerse.

Anexo 3.

Recopilación de información y equipo utilizado

Tabla 5. Recopilación de información.

Nombre	Tipo de información	Escala	Resolución	Formato	Autor	Año
<i>Mapa geológico de la Caldera de Apoyo</i>	Ráster	1:33 500	Media	JPG	David Susman	1982
<i>Mapa geológico Hoja Masaya 2951-I</i>	Ráster	1:50 000	Media	JPG	INETER	1972
<i>Mapa geológico Hoja Granada 3051-IV</i>	Ráster	1:50 000	Media	JPG	INETER	1972
<i>Mapa de la Caldera Volcánica Nicaragüense</i>	Ráster	1:200 000	Buena	JPG	Compilación por P. Hradecky, et al	2006
<i>Hoja Topográfica Masaya 2951-I</i>	Ráster	1:50 000	Buena	JPG	INETER	2006
<i>Hoja Topográfica Granada 3051-IV</i>	Ráster	1:50 000	Buena	JPG	INETER	2006
<i>Mapa geológico de la Reserva Natural Laguna de Apoyo</i>	Ráster	1:25 000	Buena	JPG	Espinoza, E; AMICTLAN	2008
<i>Mapa geomorfológico de la Reserva Natural Laguna de Apoyo</i>	Ráster	1:35 000	Buena	JPG	Espinoza, E; Espinoza, G; Delgado, F	2008
<i>Fotos aéreas línea de vuelo 8 y 9</i>	Ráster	1:40 000	Buena	TIFF	INETER	2004
<i>Ortofotomapas</i>	Ráster	1:10 000	Buena	TIFF	INETER	1996
<i>Mapa hidrogeológico Granada</i>	Ráster	1:250 000	Buena	JPG	INETER, COSUDE	1998
<i>Mapa hidroquímico Granada</i>	Ráster	1:250 000	Buena	JPG	INETER, COSUDE	1998
<i>Batimetría de la Laguna de Apoyo</i>	Vectorial		Buena	Shape	INETER, CIRA	2006
<i>Registro piezométrico</i>			Buena	xls	INETER	2008
<i>Registro piezométrico</i>			Buena	xls	AMICTLAN	2008

Apoyo Caldera, Nicaragua: A Major Quaternary Silicic Eruptive Center

Cartografía Geológica en la Reserva Natural Laguna de Apoyo y sus alrededores

Estudio Hidrogeológico e hidroquímico de la Región del Pacífico de Nicaragua

Informe sobre el Lago de Apoyo, Limnología, Calidad de agua, Hidrogeología e Hidrogeoquímica

Estudio Hidrogeológico y Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca de la Laguna de Apoyo, Nicaragua

Geochemical Characterization of Surface Waters and Groundwater Resources in the Managua área (Nicaragua, Central America)

Evaluación de la Dinámica de la Laguna de Apoyo Mediante Trazadores Isotópicos y Geoquímicos

Contribución al Estudio de Cinco Zonas Contaminadas Naturalmente por Arsénico en Nicaragua

Geológica		Buena	PDF	David Susman	1984
Geológica		Buena	PDF	Eveling Espinoza	2008
Hidrogeología e hidroquímica		Buena	PDF	Krasny & Hecht	1998
Hidrología e hidrogeología		Buena	PDF	Vammen et al	2005
Hidrología e hidrogeología		Buena	PDF	Vázquez et al.	2008
Hidroquímica		Buena	PDF	Parello et al	2008
Hidroquímica		Buena	PDF	Calderón Palma & Flores Meza	2010
Hidrogeología e hidroquímica		Buena	PDF	Espinoza Altamirano	2005

Contribución al Estudio de Cinco Zonas Contaminadas Naturalmente por Arsénico en Nicaragua

Geología ambiental		Buena	PDF	UNICEF	2004
--------------------	--	-------	-----	--------	------



Figura 28. Equipo para inventario de pozos.

28^a Equipo multiparamétrico 28^b Digital Arsenator Palintest 28^c Sonda de nivel de agua

Anexo 4.

Pozos inventariados



Figura 29. Pozo de la Alcaldía de Catarina.

Coordenadas 1319643, 603018

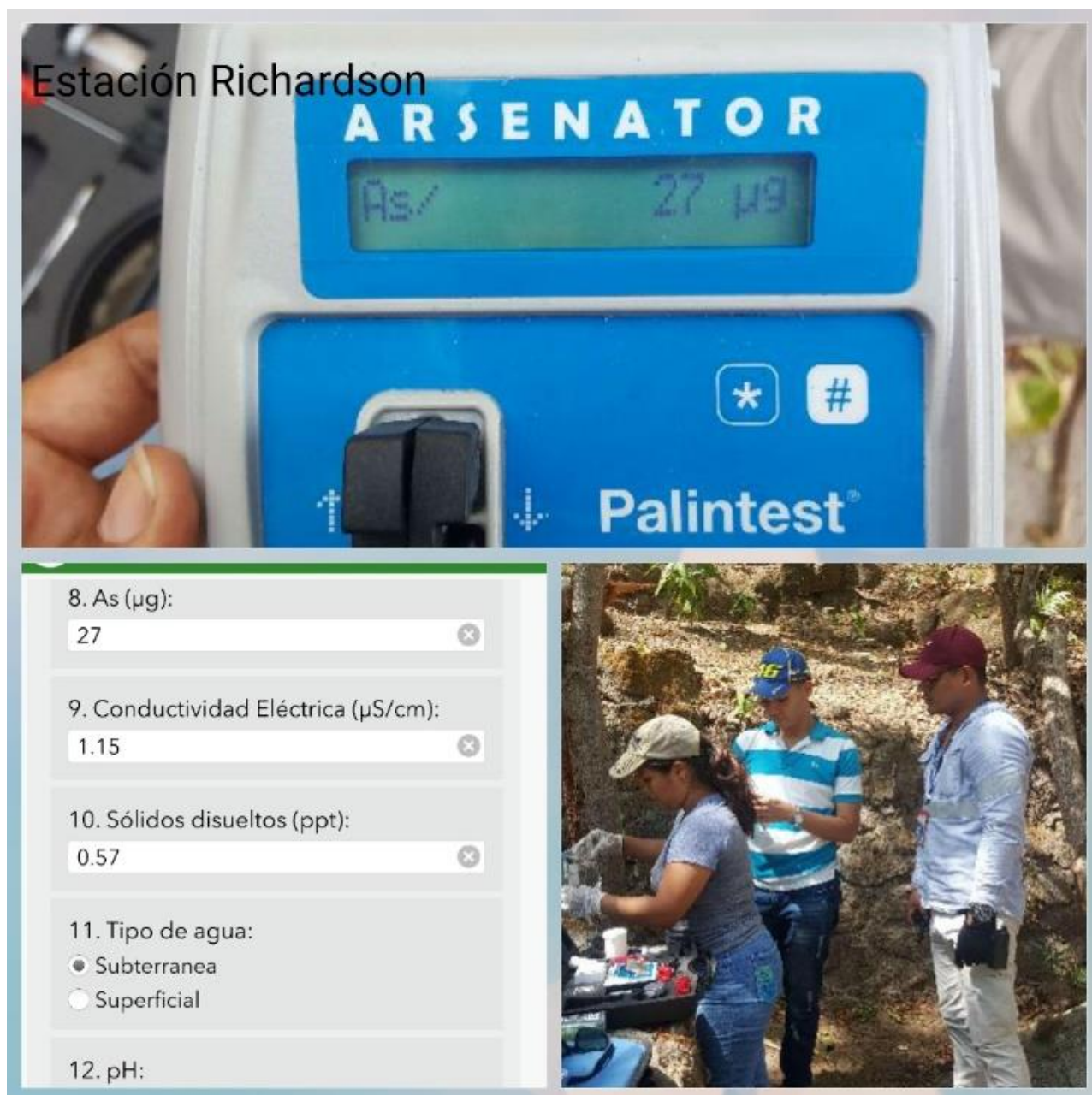


Figura 30. Pozo Estación Richardson.

Coordenadas 1320791, 605816

8. As (μg):

Quinta Bladimir Rosales

70

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):

840

10. Sólidos disueltos (ppt):

420



12. pH:



Figura 31. Pozo Quinta Bladimir Rosales

Coordenadas 1318901, 602618

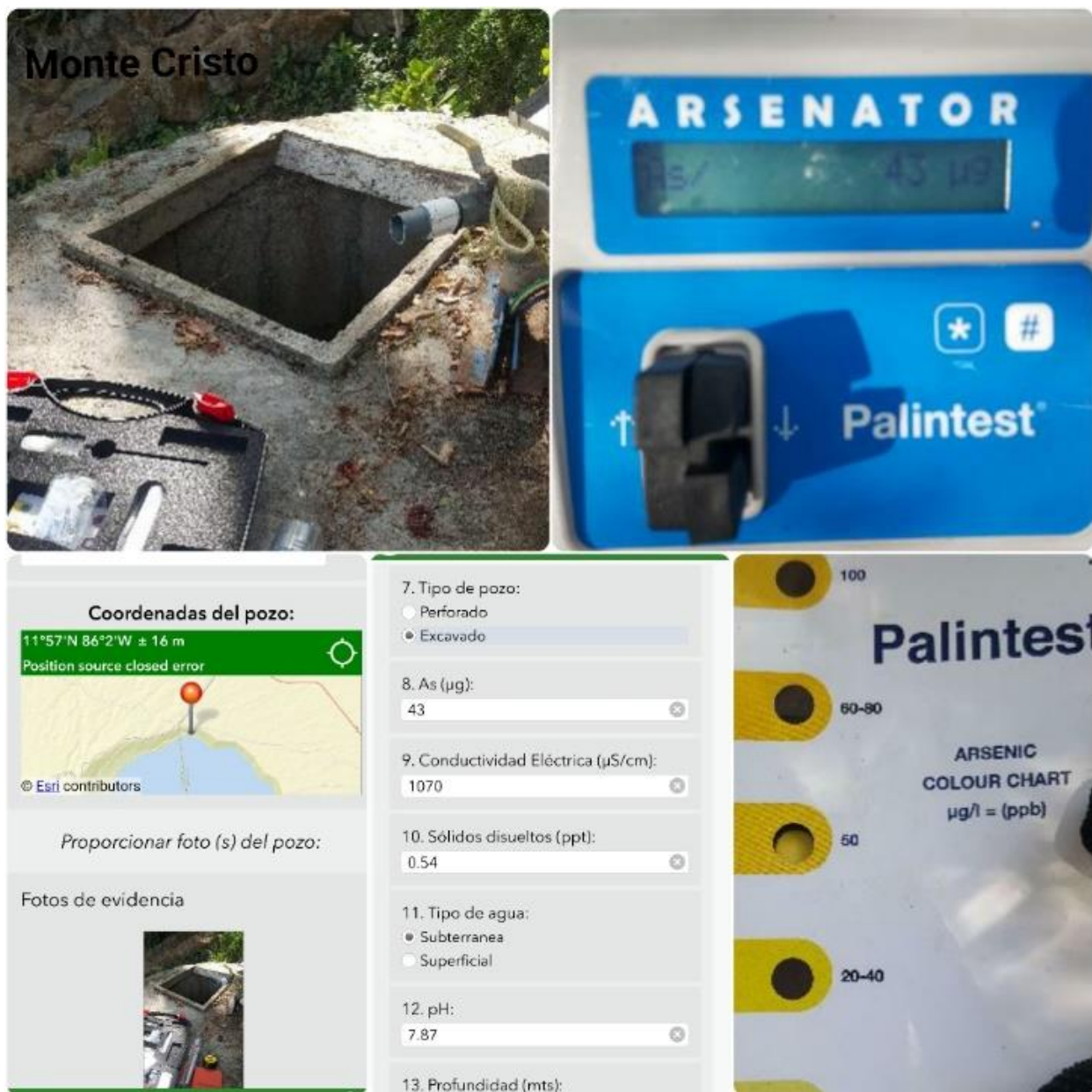


Figura 32. Pozo Monte Cristo
Coordenadas 1320871, 605460

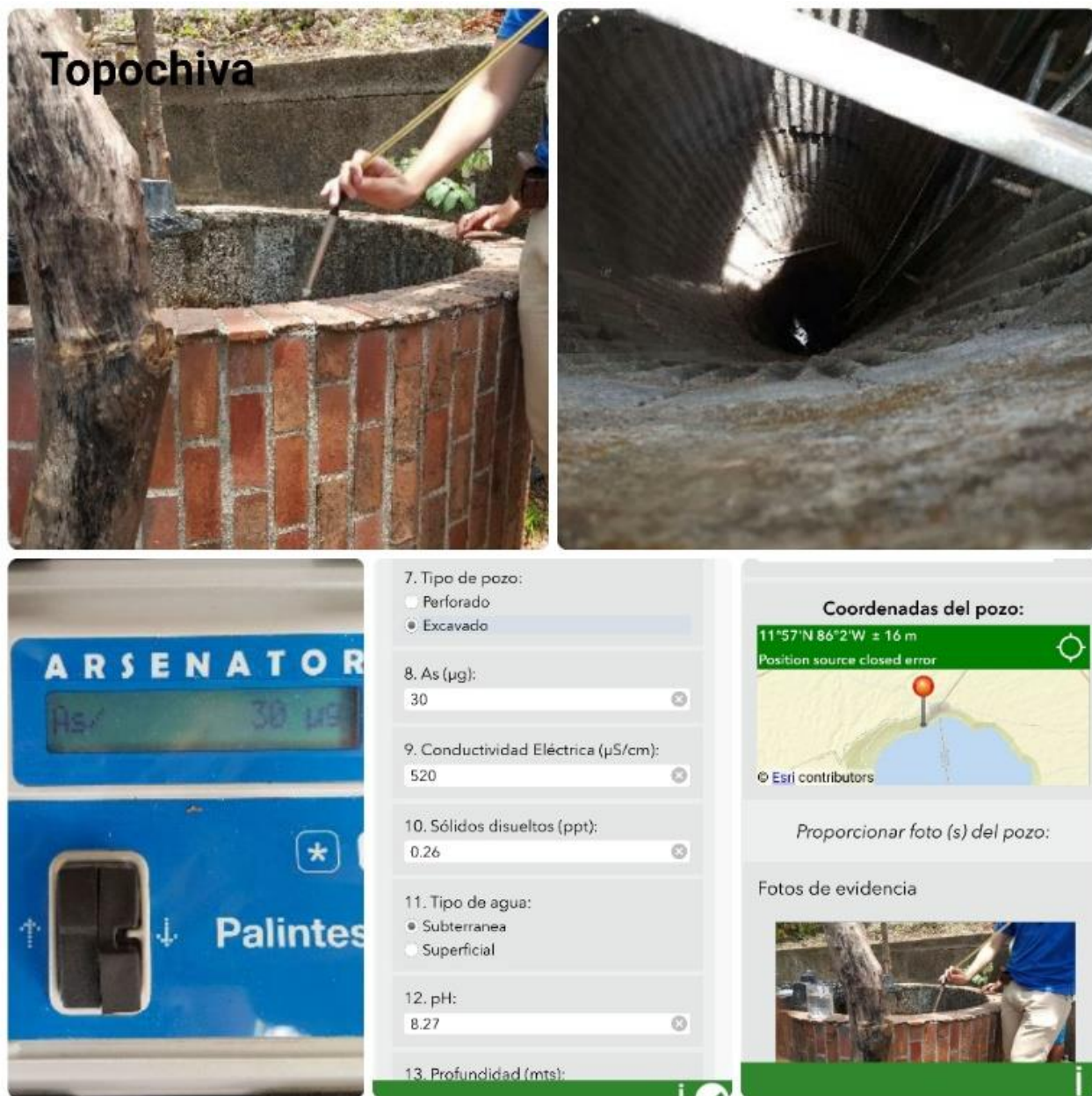


Figura 33. Pozo Topochiva
 Coordenadas 1320514, 604587

8. As (μg):
25

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):
0.94

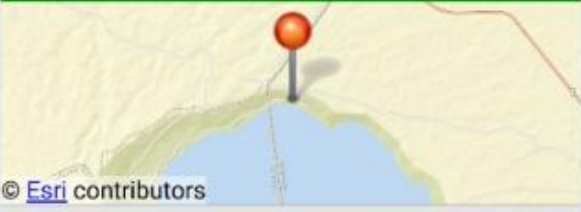
10. Sólidos disueltos (ppt):
0.47

11. Tipo de agua:
☒ Subterránea
☐ Superficial

12. pH:
7.43

Villa Serena

Coordenadas del pozo:
11°57'N 86°2'W $\pm$ 12 m


© Esri contributors

Proporcionar foto (s) del pozo:

Fotos de evidencia



Figura 34. Pozo Villa Serena.
Coordenadas 1320867, 605530

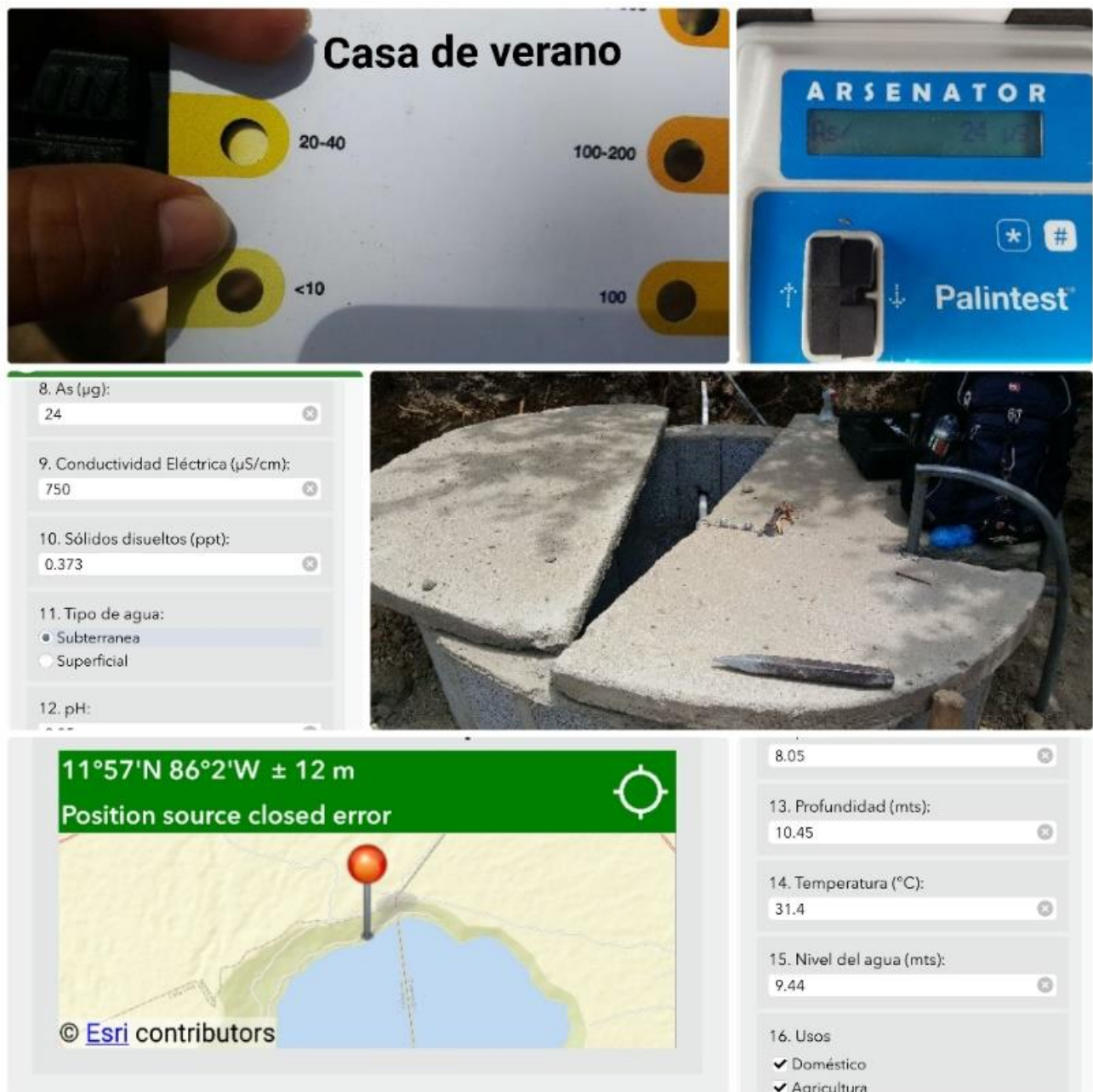


Figura 35. Pozo Casa de Verano.
Coordenadas 1320437, 604561

8. As (μg):
45

9. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$):
450

10. Sólidos disueltos (ppt):
0.23

11. Tipo de agua:
☒ Subterránea
☐ Superficial

12. pH:
8.32

13. Profundidad (mts):
18.15

14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$):
31.8



Figura 36. Pozo Quinta El Carmelo
Coordenadas 1320420, 604462

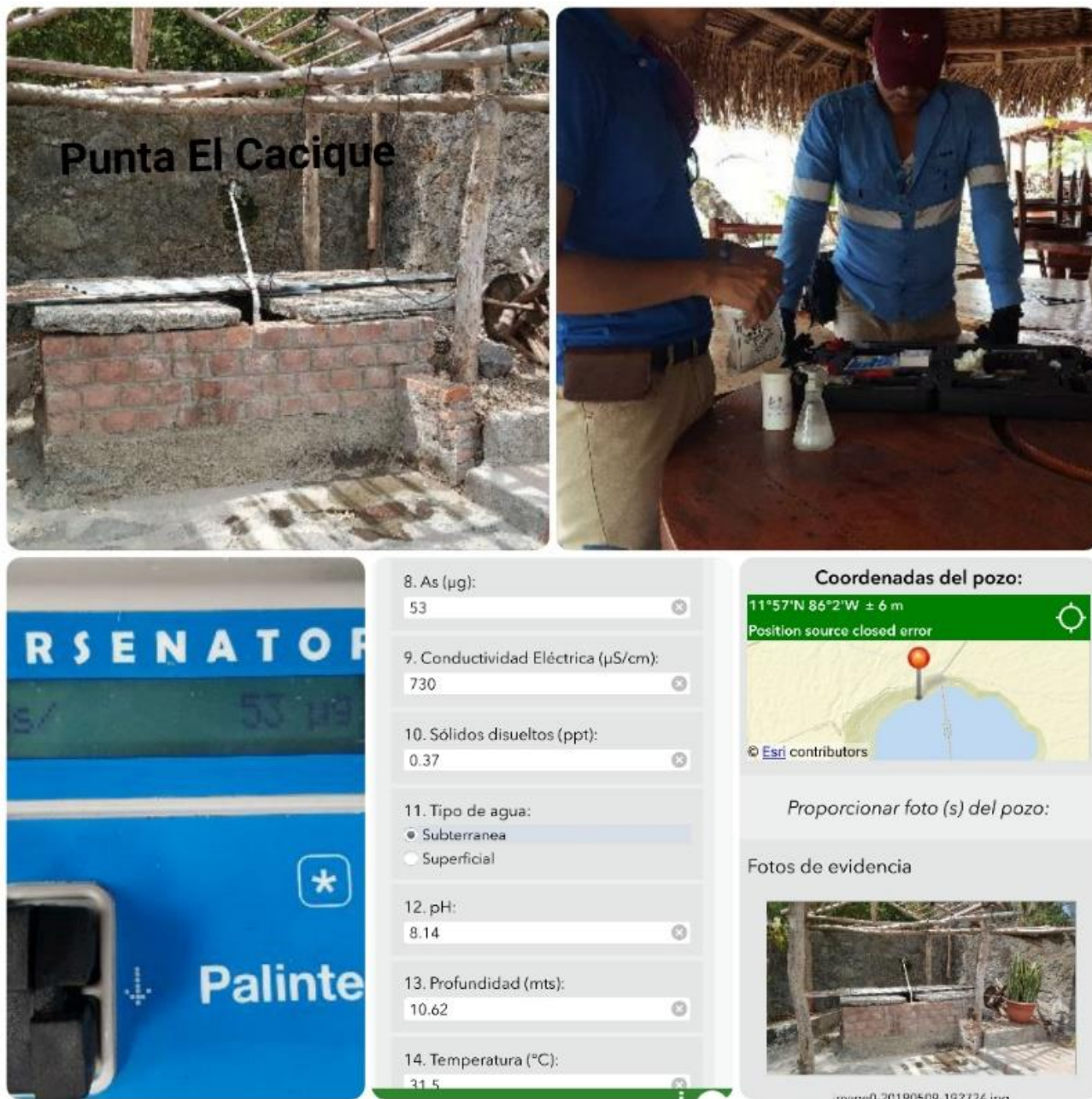


Figura 37. Pozo Punta El Cacique.
Coordenadas 1320380, 604394