



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos

**MODELO HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE DESCARGA HIDROLÓGICA DE LA
MICROCUENCA RÍO MORÁN, MUNICIPIO DE ASUNCIÓN MITA, DEPARTAMENTO DE
JUTIAPA**

Inga. Geol. Viridiana Sarahí Saavedra López

Asesorado por el Dr. Wener Armando Ochoa Orozco

Guatemala, noviembre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE DESCARGA HIDROLÓGICA DE LA
MICROCUEENCA RÍO MORÁN, MUNICIPIO DE ASUNCIÓN MITA, DEPARTAMENTO DE
JUTIAPA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. GEOL. VIRIDIANA SARAHÍ SAAVEDRA LÓPEZ
ASESORADO POR EL DR. WENER ARMANDO OCHOA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
DIRECTORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Julio Roberto Luna Aroche
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Alan Giovanni Cosillo Pinto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**MODELO HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE DESCARGA HIDROLÓGICA DE LA
MICROCUENCA RÍO MORÁN, MUNICIPIO DE ASUNCIÓN MITA, DEPARTAMENTO DE
JUTIAPA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 04 de julio de 2020.

Inga. Geol. Viridiana Sarahí Saavedra López

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.755.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **MODELO HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE DESCARGA HIDROLÓGICA DE LA MICROCUENCA RÍO MORÁN, MUNICIPIO DE ASUNCIÓN MITA, DEPARTAMENTO DE JUTIAPA**, presentado por: **Inga. Geol. Viridiana Sarahí Saavedra López**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Gestión de recursos hidrogeológicos después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, noviembre de 2023

JFGR/gaoc



Guatemala, noviembre de 2023

LNG.EEP.OI.755.2023


En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“MODELO HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE DESCARGA HIDROLÓGICA DE LA MICROCUENCA RÍO MORÁN, MUNICIPIO DE ASUNCIÓN MITA, DEPARTAMENTO DE JUTIAPA”

presentado por **Inga. Geol. Viridiana Sarahí Saavedra López** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Gestión de recursos hidrogeológicos** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA USAC
EF
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Guatemala, 22 de junio de 2023

Mtro. Ing. Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería, USAC.

Respetable Ingeniero Álvarez

Por este medio me dirijo a usted para saludarlo y desearle éxitos en sus actividades.

El motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que he **REVISADO** el trabajo de graduación titulado: **MODELO HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE DESCARGA HIDROLÓGICA DE LA MICROCUENCA RÍO MORÁN, MUNICIPIO DE ASUNCIÓN MITA, DEPARTAMENTO DE JUTIAPA.**

De la estudiante: **Viridiana Sarahí Saavedra López**, del Programa de Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos, quién se identifica con número de carné: 200840409.

Después de haberle hecho las observaciones pertinentes se da por **APROBADO** dicho trabajo

Sin otro particular me despido de usted, atentamente:

"Id y enseñad a todos"

JULIO ROBERTO LUNA AROCHE
INGENIERO CIVIL
GEÓLOGO M. Sc.
COLEGIADO # 2,514

Mtro. Ing. Julio Roberto Luna Aroche
COORDINADOR
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC

ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Guatemala, 14 de junio de 2023

Mtro. Ing. Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería, USAC.

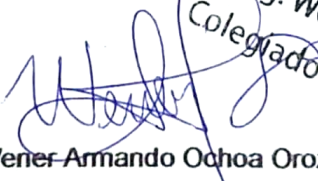
Respetable Ingeniero Álvarez

Por este medio informo a usted que he **REVISADO Y APROBADO** el trabajo de graduación titulado: **MODELO HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE DESCARGA HIDROLÓGICA DE LA MICROCUENCA RÍO MORÁN, MUNICIPIO DE ASUCIÓN MITA, DEPARTAMENTO DE JUTIAPA** de la estudiante: **Viridiana Sarahi Saavedra López**, del Programa de Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos identificada con número de carné: **200840409**.

Sin otro particular me despido, deseándole éxitos en todas sus actividades profesionales.

Atentamente.

Ph.D. Ing. Wener Ochoa
Colegiado 3,868


D.C. Wener Armando Ochoa Orozco
Asesor del trabajo de Graduación

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi guía y fortaleza durante mi caminar, para lograr alcanzar cada meta propuesta.
Mis padres	Guillermo Antonio Saavedra López (q. e. p. d.) y Renate Anabella López Och, quienes me han inspirado en cada paso que doy.
Mi esposo	Diego Renato Castro Wellmann, por ser parte especial en mi vida y motivarme con su amor y comprensión a cumplir mis sueños.
Mi hijo	Liam Renato Castro Saavedra, mi razón de vivir, quien me enseñó que la vida es un reto y se debe luchar hasta el final.
Mis hermanos	Nadia, Suni y Pablo Saavedra, por apoyarme en cada momento y motivarme a superar cada obstáculo.
Mis sobrinos	Quienes son mis ángeles que con su amor me incentivan a ser mejor persona.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	En especial a la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.
CESEM y al Proyecto Agua Futura de la Cooperación Italiana	Darme la oportunidad de superarme profesionalmente.
Catedráticos	Por aportar conocimientos invaluableles durante mi formación profesional.
Coordinador y asesor	Maestro Ing. Julio Luna y Doc. Wener Ochoa; quienes me motivaron a la excelencia para culminar cada etapa.
Compañeros de formación académica	Quienes me apoyaron de forma unánime y motivaron para poder culminar cada una de las etapas.
Municipalidad de Asunción Mita Jutiapa	Al señor alcalde René Francisco Guardado y su Consejo Municipal, por apoyarme durante la etapa de campo con insumos y personal de campo.

**Asociación de Monitoreo
Ambiental del municipio
de Asunción Mita**

Por proporcionar su apoyo durante la ejecución de etapa de campo.

**Entre Mares de
Guatemala, Proyecto
Minero Cerro Blanco**

Al señor alcalde René Francisco Guardado y su Consejo Municipal, por apoyarme durante la etapa de campo con insumos y personal de campo necesarios para este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
ALCANCES.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	XXIV
JUSTIFICACIÓN.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Ubicación del área de estudio.....	1
1.1.1. Localización y extensión del área.....	1
1.1.2. Accesos.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.2.1. Análisis de resultados de investigaciones previas.....	3
1.2.2. Aspectos socioeconómicos.....	7
1.2.2.1. Población.....	7
1.2.2.2. Actividad productiva.....	7
1.2.3. Clima.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Ciclo hidrológico.....	9
2.2. Temperatura.....	10

2.3.	Uso del suelo	11
2.4.	Relieve	12
2.5.	Geología	12
2.5.1.	Rocas metamórficas (Pzm)	13
2.5.2.	Rocas carbonatadas (Ksd)	14
2.5.3.	Capas rojas de formación subinal (Ktsb)	14
2.5.4.	Rocas volcánicas.....	15
2.6.	Hidrología.....	16
2.6.1.	Estaciones meteorológicas.....	19
2.7.	Geomorfología	19
2.8.	Unidades hidrogeológicas	20
2.8.1.	Acuíferos porosos.....	20
2.8.2.	Acuíferos fracturados	21
2.8.3.	Acuíferos fracturados de baja porosidad	21
2.8.4.	Acuíferos locales generados por sistemas de fallas geológicos.....	21
2.8.5.	Rocas sedimentarias	22
2.8.6.	Rocas ígneas	23
2.9.	Acuíferos.....	24
2.10.	Hidrog geoquímica	26
2.10.1.	Características físicas y químicas de las aguas subterráneas	27
2.10.2.	Clasificación según la dureza	29
2.10.3.	Clasificación según el pH	29
2.10.4.	Clasificación según iones mayores dominantes	29
2.10.4.1.	Diagramas <i>Piper-Hill-Langelier</i>	30
2.10.4.2.	Diagramas de <i>Stiff</i>	30
2.11.	Uso de las aguas subterráneas	31
2.11.1.	Demandas insatisfechas crecientes	31

2.11.2.	Agua subterránea e industria	32
2.11.3.	Agua subterránea y poblaciones	34
2.11.4.	Agua subterránea y agricultura	34
2.12.	Principales problemas de las aguas subterráneas	35
2.12.1.	Problemas ambientales naturales	36
2.12.2.	Problemas ambientales antropogénica	38
2.12.2.1.	Población	38
2.12.2.2.	Manejo de desechos	38
2.13.	Uso de suelo.....	39
2.13.1.	Actividad pecuaria.....	40
2.13.2.	Actividad industrial	40
2.14.	Contaminación.....	41
3.	MARCO METODOLÓGICO	43
3.1.	Marco metodológico o metodología validada	43
3.1.1.	Etapas de recopilación y análisis bibliográfico	43
3.1.2.	Etapas de trabajos de campo	43
3.1.2.1.	Fase 1	44
3.1.2.2.	Fase 2	44
3.1.2.3.	Fase 3	45
3.1.3.	Etapas de laboratorio.....	45
3.1.4.	Etapas de gabinete	46
3.1.4.1.	Método del cálculo hidrológico	46
3.2.	Método hidrogeoquímico	48
3.2.1.	Clasificación de tipos de aguas.....	49
3.3.	Técnicas de análisis de información	50
3.3.1.	Método cuantitativo	50
3.3.2.	Método cualitativo	51

4.	RESULTADOS OBTENIDOS, CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS	53
4.1.	Fisiografía	53
4.1.1.	Geomorfología local	57
4.2.	Geología local	60
4.2.1.	Unidad de depósitos terciarias.....	61
4.2.2.	Unidad de depósitos coluviales	62
4.2.3.	Unidad de rocas volcánicas	64
4.2.3.1.	Flujos basálticos	65
4.2.3.2.	Unidad de Toba (Tb).....	66
4.2.3.3.	Unidad de flujo dacítico (Tb)	67
4.3.	Características hidrológicas de la cuenca	68
4.3.1.	Morfometría de la microcuenca	68
4.3.1.1.	Parámetros de forma	68
4.3.1.2.	Parámetros de relieve.....	71
4.4.	Hidrología de la microcuenca	71
4.5.	Características hidrogeoquímicas de las aguas	73
4.5.1.	Estaciones de monitoreo de agua superficial y subterránea	73
4.6.	Clasificación de las aguas superficiales y subterráneas con el método de <i>Stiff</i> y <i>Piper</i>	77
4.7.	Modelo hidrogeoquímico conceptual según los parámetros fisicoquímicos de las aguas y su interacción	79
4.8.	Relación geoquímica que tienen las aguas superficiales y someras con las aguas profundas.....	84
4.9.	Uso de las aguas subterráneas según sus condiciones geoquímicas, a través de normas internacionales para proyectos productivos	91

5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	95
5.1.	Características hidrogeoquímicas a partir de las condiciones geogénicas de la microcuenca en estudio, y su relación con el sistema hidrotermal.....	95
5.2.	Clasificar las aguas superficiales y subterráneas a través del método de <i>Piper</i> y <i>Stiff</i> de acuerdo con las concentraciones de aniones y cationes	104
5.3.	Modelo hidrogeoquímico conceptual según los parámetros fisicoquímicos de las aguas y su interacción.....	106
5.4.	Relación geoquímica que tienen las aguas superficiales y someras con las aguas profundas	112
5.5.	Directrices de uso de las aguas subterráneas según sus condiciones geoquímicas, a través de normas internacionales para proyectos productivos	113
	CONCLUSIONES	117
	RECOMENDACIONES.....	123
	REFERENCIAS	125
	APÉNDICES.....	129
	ANEXOS	147

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1. Localización del área de investigación	2
Figura 2. Cultivo de melón en la microcuenca río Morán e imagen satelital	55
Figura 3. Ganado vacuno en el área de la microcuenca río Morán	56
Figura 4. Área cubierta con vegetación nativa de la región	56
Figura 5. Conos volcánicos en el área de estudio de la microcuenca río Morán.....	58
Figura 6. Planicie volcánica en el área de estudio de la microcuenca río Morán.....	59
Figura 7. Montañas volcánicas en el área de estudio de la microcuenca río Morán.....	60
Figura 8. Unidad de depósitos terciarios, aluvión	62
Figura 9. Unidad de coluviones.....	63
Figura 10. Depósitos de coluvión	64
Figura 11. Flujos basálticos, aflorando en coordenadas GTM Y 1585043-E589524	65
Figura 12. Unidad de Toba (Tb)	66
Figura 13. Unidad de Dacita (Dt).....	67
Figura 14. Ubicación de estaciones de monitoreo.....	75
Figura 15. Modelo químico de distribución de potasio.....	80
Figura 16. Modelo de distribución de arsénico y sodio	82
Figura 17. Modelo de distribución de cloro y boro	83
Figura 18. Potencial de hidrógeno en las estaciones de monitoreo.....	84
Figura 19. Estaciones de monitoreo con resultados de campo 2019 y 2021	85

Figura 20. Estaciones de monitoreo MX-10, MW14 y ETP1, con resultado de 2019	86
Figura 21. Estación HS5 Trapiche Vargas, de acuerdo con resultados del 2019	87
Figura 22. Estaciones de monitoreo de aguas superficiales, con resultados del 2019	88
Figura 23. Río Ostúa aguas arriba (SW-8) vs. aguas abajo (SW-5).....	89
Figura 24. Confluencia río Morán y Ostúa vs. nacimiento Trapiche Vargas.....	90
Figura 25. Confluencia río Morán y Ostúa vs. después de la confluencia	91
Figura 26. Estaciones de monitoreo de acuerdo con etapa de campo del 2021	96
Figura 27. Diagrama de correlación lineal simple del Cl vs. SO ₄ del 2019.....	98
Figura 28. Diagrama de correlación lineal simple del Cl vs. Na del 2019.....	99
Figura 29. Diagrama de correlación lineal simple del Cl vs. K del 2019.....	100
Figura 30. Diagrama de correlación lineal simple del Cl vs. B de 2019	101
Figura 31. Diagramas de correlación lineal del Cs vs. Cl y Mg vs. Cl del 2019	102
Figura 32. Diagrama de relación Na vs. K del 2019 zona de descarga.....	103
Figura 33. Modelo de hidrogeoquímico conceptual del área de estudio	109

TABLAS

Tabla 1. Estaciones de monitoreo superficial y subterránea y parámetros de medición.....	76
Tabla 2. Datos comparativos con la FAO y norma Chilena del INN	93

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Cl ⁻	Anión cloruro
HCO ₃	Bicarbonato
Ca ⁺²	Calcio
CO ₃ ⁻²	Calcita
Cl	Cloro
MgCl ²	Cloruro de magnesio
°C	Grados centígrados
Fe	Hierro
Ca ⁺	Ión calcio
Mg ⁺	Ión magnesio
K ⁺	Ión potasio
Na ⁺	Ión sodio
km ²	Kilómetro cuadrado
km	Kilómetros
KV	Kilo volteos
l/s	Litros por segundo
Mg ²⁺	Magnesio
MW	Megavatios
m	Metros
m ³ /d	Metros cúbicos por día
μS/cm	Microsiemen
meq/L	Miliequivalente por litro
mg/L	Miligramos por litro

mm	Milímetros
Q	Moneda en quetzales
NO₃	Nitrato
SiO²	Óxido de silicio
p	Página
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
Eh	Potencial de hidrógeno
pH	Potencial de hidrógeno
SO₄⁻²	Sulfato

GLOSARIO

Acuicludo	Las rocas poseen una capacidad de almacenamiento, pero muy lenta transmitividad.
Acuífero	Formaciones geológicas en las cuales se encuentra agua y presentan las condiciones de permeabilidad que permite su almacenamiento.
Acuifugos	Son rocas que no cuentan con la capacidad de transmitir ni almacenar agua.
Acuitardo	Las unidades de roca presentan una menor capacidad de trasmisión y almacenamiento por lo que el proceso es más lento.
Aguas subterráneas	Es el agua que se encuentra por debajo de la superficie de la tierra, que ocupa los poros de suelo y fisuras de los cuerpos rocosos.
Aguas superficiales	Es el agua que se encuentra en la superficie de la tierra, generada a partir de las precipitaciones o por el ascenso de aguas subterráneas.
AMAR	Asociación de Monitoreo Ambiental, que se encuentra en el municipio de Asunción Mita, departamento de Jutiapa.

Antropogénico	Se le denomina a la intervención humana la modificación de un lugar que se encontraba en estado natural.
Cationes	Es un átomo o grupo de átomos que tiene una carga negativa, es decir poseen repela a otro electrodo.
CESEM	Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas
COCODE	Consejo Comunitario de Desarrollo Urbano y Rural en Guatemala, están conformados por los residentes de la comunidad.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas, es el organismo representativo de la normalización en Guatemala y es miembro pleno de la Organización Internacional de Estandarización ISO.
COMUDE	Consejo Municipal de Desarrollo Urbano y Rural de Guatemala, ente coordinador de participación a nivel municipal.
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas en Guatemala
Conductividad eléctrica	Se conoce como CE, es una medida que define hasta qué punto una sustancia o material tiene la capacidad para conducir la corriente eléctrica.

Demanda bioquímica de oxígeno	Se conoce como DBO, es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida, disuelta o en suspensión.
Dilución de agua	Es la disminución de la concentración de una sustancia, añadiendo disolvente.
Dirección General de Minería	Por sus siglas DGM, es la dirección que pertenece al Ministerio de Energía y Minas.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
GEOCONSA	Geotecnología, construcción y servicios.
GEOGUAT	Geotermia Oriental de Guatemala.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global que proporciona servicios de localización exacta con mínimo grado de error a través de coordenadas.
Hidrogeoquímica	Se encarga de estudiar los procesos y reacciones químicas que se encuentran disueltas en el agua, en conjunto con los factores geológicos y biología que interactúan durante el ciclo del agua.

Hidrotermalismo	Proceso geológico que se debe a la convección del agua debido a fuentes de calor generadas principalmente por vulcanismo.
INE	Instituto Nacional de Estadística
INN	Instituto Nacional de Normalización
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Interpolación de mapas	Es el proceso donde se utilizan valores conocidos para estimar valores desconocidos, y ser proyectados espacialmente a través de un mapa.
Iones	Es un átomo o grupo de átomos que tiene una carga neta positiva, es decir, poseen una carga que atrae otro electrodo.
LEXT	Licencia de Explotación Minera proporcionadas por el Ministerio de Energía y Minas.
Manantial hidrotermal	Agua que aflora a la superficie de forma natural que presenta condiciones de alta temperatura llegando en algunos casos hasta ebullición, que es afectado por zonas de vulcanismo.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

Nacimiento de agua	Es conocido como manantial, se define como fuente natural de agua que brota de la superficie a través de poros o fracturas en la roca.
OD	Oxígeno disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
Potencial de hidrógeno	Es las concentraciones de iones de hidrógeno que se encuentran en una disolución.
Parámetro fisicoquímico	Parámetros que se evalúan en agua que corresponde a datos físicos como por ejemplo color, olor, turbidez, resistividad eléctrica, potencial de hidrógeno y los datos químicos que comprenden los elementos y compuestos que se encuentran en el agua como por ejemplo arsénico, fósforo, carbonatos, nitratos y hierro.
SDT	Sólidos disueltos totales
Sistema de Información Geográfica (SIG)	Es una herramienta que es utilizada para el tratamiento de datos espaciales georreferenciados, que son analizados y representados a través de mapas, gráficos, informes.
UGSA	Unidad de Gestión Socio Ambiental, que pertenece al Ministerio de Energía y Minas.

USAC

Universidad de San Carlos de Guatemala.

RESUMEN

El proyecto de investigación se encuentra ubicado al norte del arco volcánico de Guatemala, específicamente en la microcuenca río Morán, en el municipio de Asunción Mita, departamento de Jutiapa con un área de 40 km², siendo una zona compuesta principalmente por rocas originadas por el vulcanismo de la región así como rocas de composición carbonatada en menor porcentaje del área total, siendo evidente la presencia de zonas hidrotermales activas, lo que ha generado problemáticas con el agua superficial y mayormente agua de origen subterráneo, debido a la alta carga de concentración de elementos como por ejemplo arsénico (As).

Para determinar las concentraciones geoquímicas en las aguas superficiales y subterráneas, se realizó una distribución hidrogeoquímica del comportamiento de las aguas de acuerdo con los elementos, a través de la metodología de clasificación hidrogeoquímica de aniones y cationes contenidas en el agua, utilizando diagramas triangulares como Piper-Hill-Inagelier y Stiff, para poder caracterizar la zona de descarga de la microcuenca.

La metodología de la investigación consistió en la etapa de recopilación bibliográfica, etapa de campo y etapa de gabinete. En la fase de campo, se realizó el levantamiento de información geológica, identificación de zonas de descarga y evaluación de uso del suelo y agua por parte de las comunidades. Seguidamente en la fase de gabinete, se realizó la recolección, tabulación y análisis de datos, para el procesamiento de información geoquímica, geológica, estadística y sistemas de información geográfica que determinaron un modelo hidrogeoquímico del área de investigación.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se logra determinar que existe un sistema hidrotermalismo activo, que tiene evidencias tanto físicas como químicas en las aguas del área de estudio, lo que permitió definir un modelo hidrogeoquímico conceptual, con lo que se logró definir que hay aguas que tienen una migración directa con el sistema, otras que son calentadas por gases y vapores, y mezcladas por aguas frescas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción general

El área de investigación se encuentra ubicada geográficamente en una zona de actividad volcánica, por lo que se tiene presencia de manantiales hidrotermales o presencia de aguas profundas provenientes de acuíferos con interacción hidrotermal, teniendo una carga elemental muy particular de áreas volcánicas.

Las aldeas que se encuentra dentro del área de la microcuenca río Morán y poblados aledaños al municipio de Asunción Mita cuentan con información relacionada a las concentraciones elementales en las aguas superficiales y subterráneas únicamente, pero no posee un estudio hidrogeoquímico que las clasifique y caracterice según las condiciones naturales, de manera que pueda determinar la relación del agua y su entorno geológico.

Definición del problema

- Especificaciones del problema

Por parte de las entidades que han realizado estudios o monitoreos de aguas, no se han enfocado en determinar las posibles fuentes de las concentraciones geoquímicas de dichas aguas, contando únicamente con una línea base de información dentro de la microcuenca en estudio, sin una clasificado las aguas de acuerdo con sus concentraciones de iones y cationes,

que establezca la relación entre las aguas geotérmicas y aguas meteóricas es decir la interacción entre aguas someras y profundas.

- Delimitación geográfica del problema

El estudio se realizó en la zona de descarga hídrica de la microcuenca río Morán, que abarca un área de 40 km cuadrados, ubicada en el municipio de Asunción Mita, departamento de Jutiapa, durante los meses de junio de 2020 a marzo de 2021, por medio de recolección de información durante la fase de campo y gabinete.

¿Las condiciones geogénicas de la microcuenca río Morán ubicada en el municipio de Asunción Mita, departamento de Jutiapa, están relacionadas con las características químicas de las aguas y el sistema hidrotermal?

- Necesidades por cubrir

Durante la investigación se pretende evaluar las condiciones geoquímicas en la zona de descarga de la microcuenca, debido a que los recursos de agua en la región no han sido evaluados de acuerdo con su composición elemental, siendo muy limitados por las condiciones hidrotermales particulares de la región, por lo que las instituciones y pobladores deben obtener información sobre las características de las aguas, para posteriores proyectos de agua.

Como parte de la gestión de las aguas, no se tiene una optimización del recurso hídrico que pueda orientar la utilización correcta del agua de acuerdo con su composición química, principalmente en la agricultura que es la mayor actividad de la región.

ALCANCES

La presente investigación es un estudio técnico y recopilación de línea base que puede ser utilizada como soporte para estudios o proyectos de agua posteriores, donde se logró determinar las condiciones geoquímicas del área de descarga de la microcuenca río Morán, a través de análisis de aguas que permitieron definir el tipo de agua según su carga elemental y su relación geogénica o ambiente geológico. Con base en el resultado obtenido en esta investigación, se procedió a la divulgación con la corporación municipal de Asunción Mita Jutiapa, Consejo de Desarrollo Comunitario de influencia directa y asociaciones involucradas en el manejo de la cuenca, de manera que planteen estrategias para una gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas.

OBJETIVOS

General

Plantear un modelo conceptual hidrogeoquímico a partir de las condiciones geogénicas, que determinan las características químicas de las aguas de descarga de la microcuenca del río Morán que se ubica en el municipio de Asunción Mita, departamento de Jutiapa.

Específicos

1. Determinar las características hidrogeoquímicas a partir de las condiciones geogénicas de la microcuenca en estudio, y su relación con el sistema hidrotermal.
2. Clasificar las aguas superficiales y subterráneas a través del método de Piper y Stiff de acuerdo con las concentraciones de aniones y cationes.
3. Proponer un modelo hidrogeoquímico conceptual según los parámetros fisicoquímicos de las aguas y su interacción.
4. Establecer la relación geoquímica que tienen las aguas superficiales y someras con las aguas profundas.
5. Proponer directrices de uso de las aguas subterráneas según sus condiciones geoquímicas, a través de normas internacionales para proyectos productivos.

HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

La microcuenca río Moran, está conformada por diversos ambientes geológicos que son característicos de áreas volcánicas, que determinan las condiciones geoquímicas de las aguas superficiales y subterráneas. Dichas condiciones están relacionadas directamente a la actividad hidrotermal por ser una zona de vulcanismo activo, de acuerdo con los análisis de aguas realizados en el período que comprende de 2015 al 2019.

Por lo tanto; cuando el agua de precipitación se infiltra en el suelo, comienza su proceso de evolución a través de procedimientos hidrogeoquímicos, y es ahí donde el modelo conceptual hidrogeoquímico en la zona de descarga es evaluado de acuerdo con la clasificación de las aguas y sus características fisicoquímicas, lo que proporciona un mayor conocimiento técnico científico del comportamiento del agua subterránea de este lugar respecto a su geogénesis y evolución.

JUSTIFICACIÓN

La investigación se ha centralizado en la caracterización hidrogeoquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la zona de descarga de la microcuenca río Morán, debido a que se tienen investigaciones y estudios preliminares por parte de entidades, pero no se cuenta con un modelo conceptual geoquímico del área que pueda determinar las interacciones de las aguas de acuerdo con su carga elemental.

A través de la presente investigación, se clasificaron las aguas según su contenido de aniones y cationes, lo cual permitió el posible uso de los acuíferos por su contenido elemental. Considera que a nivel nacional se tiene una deficiencia de los recursos hídricos y su explotación racional, esto se debe a la falta de la implementación de un plan de gestión integrada del recurso hídrico por parte de las instituciones que son responsables del cuidado y distribución del agua a la población del municipio de Asunción Mita.

La mayor actividad productiva del municipio de Asunción Mita Jutiapa se enfoca principalmente en la producción agrícola, esta actividad es de vital importancia para la economía de los pobladores, por lo que es de interés el uso de agua para el abastecimiento de dicha actividad, lo que hace necesario determinar el comportamiento de los elementos en los acuíferos a través de modelos hidrogeoquímicos, que van a permitir una gestión de los recursos hídricos.

Por lo tanto, se evaluaron las condiciones físicoquímicas del área de la microcuenca en estudio, a través de análisis de resultados de aguas superficiales

y subterráneas de la línea base del año 2015 al año 2019, para poder definir las concentraciones de elementos químicos contenidas en las aguas, así como su clasificación de acuerdo con su contenido de aniones y cationes, lo que permitió hacer la relación con las condiciones geológicas que imperan en el área de estudio principalmente el sistema geotérmico, y así conocer la distribución geoquímica de las aguas, con lo que se logró determinar la relación de las aguas profundas y someras, y el ambiente geotérmico del área.

Con dicha investigación se proporcionó información valiosa a la comuna municipal, pobladores aledaños y entidades que tengan el interés en el manejo de los recursos hídricos, de manera que el estudio genera un soporte técnico-científico para la elaboración de posteriores proyectos de abastecimiento de agua a los pobladores del municipio de Asunción Mita del departamento de Jutiapa.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas principales alrededor del agua es que no hay gestión de las aguas superficiales y subterráneas, sumado a ello, la falta de información hidrogeológica del municipio de Asunción Mita Jutiapa, debido a que es un recurso utilizado para abastecimiento de agua potable, proyectos productivos como agricultura, ganadería e industria, pero debido a la falta de estudios técnicos que sustenten la implementación de proyectos de agua públicos y privados, las comunidades se están abasteciendo sin determinar las condiciones geoquímicas de las aguas superficiales y subterráneas, para ser utilizadas de acuerdo con sus condiciones, con previos tratamientos y así aprovechar el recurso hídrico.

Las concentraciones químicas de las aguas están relacionadas al ambiente geológico que imperan en la región, por ser una zona volcánica con evidencias de hidrotermalismo activo, impactando grandemente las calidades principalmente en el agua subterránea, que se relacionan al cambio fisicoquímico del sistema hídrico del área de estudio.

El proyecto de investigación está enfocado principalmente en la clasificación hidrogeoquímica en la zona de descarga hidrológica de la microcuenca río Morán, que se ubica al este de la cabecera municipal de Asunción Mita, departamento de Jutiapa, con resultados de análisis de laboratorio de muestras de aguas superficiales y subterráneas, para determinar las concentraciones elementales a través de un modelo hidrogeoquímico conceptual del área en estudio. El área de investigación se encuentra ubicada específicamente en la parte sur de la microcuenca río Morán, donde se descarga

el sistema hídrico. Para poder llevar a cabo esta investigación se evaluaron estudios preliminares en el sitio, para posteriormente ejecutar la etapa de campo.

Se evaluaron las aguas superficiales y subterráneas de algunos puntos de monitoreo que han sido establecidos por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, para ello se utilizó la línea base existente, ya que esta zona es monitoreada periódicamente debido a la presencia del proyecto minero Cerro Blanco.

1. GENERALIDADES

1.1. Ubicación del área de estudio

A continuación, se presenta información acerca de la ubicación del área de estudio.

1.1.1. Localización y extensión del área

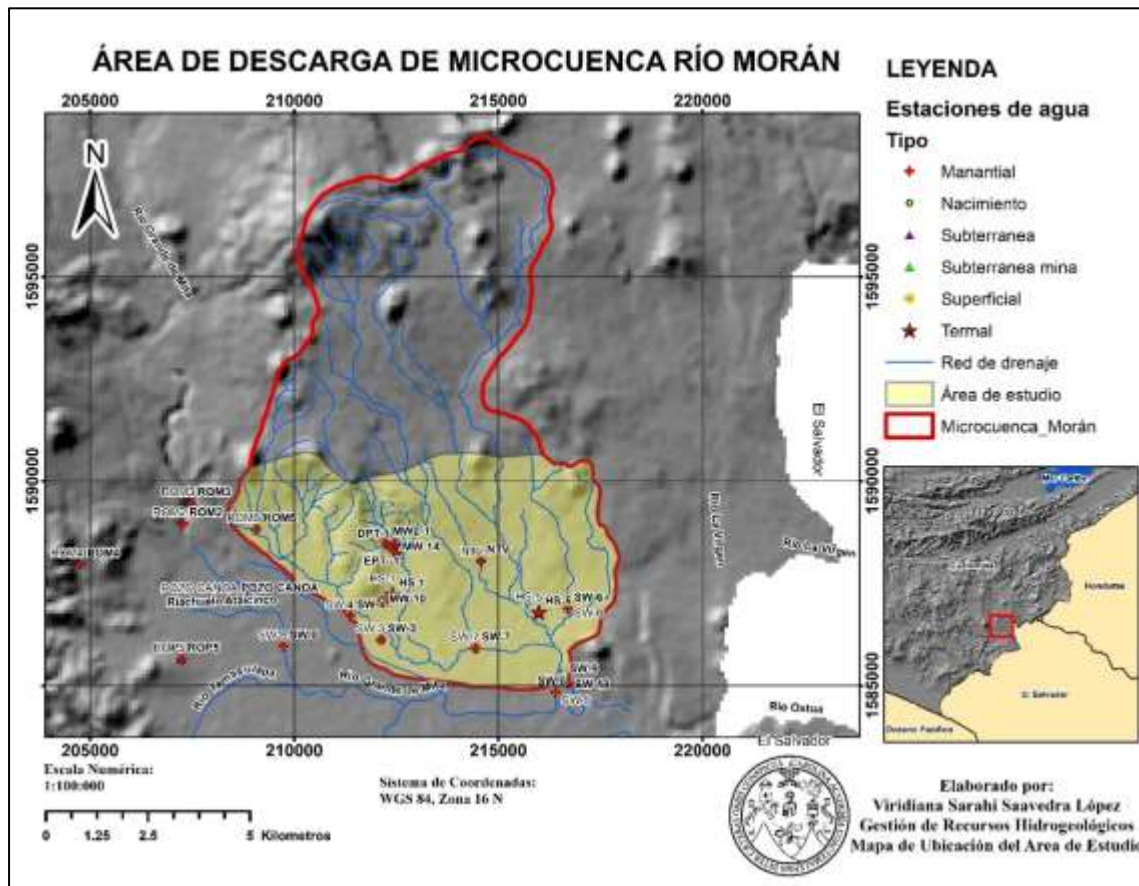
El área de investigación se localiza al Noreste del municipio de Asunción Mita del departamento de Jutiapa, específicamente en la microcuenca río Morán, con una extensión de 40 km² como se visualiza en la Figura 1. El polígono de investigación comprende principalmente las aldeas Trapiche Vargas, El Salitre, Cerro Blanco, Tancushapa y Tamarindo.

1.1.2. Accesos

El ingreso al área de estudio es a través de la carretera interamericana CA-01 desde la ciudad de Guatemala hacia el departamento de Jutiapa. Esta ruta dirige hacia la cabecera municipal de Asunción Mita, se hizo un recorrido aproximado de 156 kilómetros, luego hacia la ruta de terracería RD-JUT-44 con dirección Este que conduce a la aldea Trapiche Vargas, El Salitre, Cerro Blanco Tancushapa y Tamarindo.

Figura 1.

Localización del área de investigación



Nota. Mapa que muestra la localización del área de investigación, con sus respectivas estaciones de monitoreo. Elaboración propia, realizado con SIG.

1.2. Antecedentes

La investigación está centralizada en la microcuenca río Morán, con el objetivo primordial de evaluar las características geoquímicas del sistema de aguas que descargan en el sistema hídrico, para ello es necesario conocer los diversos estudios que se han realizado por instituciones o entidades que tengan algún tipo de interés científico, industrial o ambiental. A continuación, se presenta

una recopilación de resultados de investigaciones previas que pueden aportar información muy importante y puntual en el sitio.

1.2.1. Análisis de resultados de investigaciones previas

Dentro del área de investigación, se han realizado varios análisis relacionados a la calidad del agua y situación ambiental, esto debido a que hacia el norte del área de descarga de la microcuenca río Morán, se encuentra ubicada una licencia minera denominada “Proyecto Minero Cerro Blanco”, al momento de su otorgamiento se han elaborado varios estudios en zona de influencia directa e indirecta de la cuenca Ostúa-Güija.

De acuerdo con estudios realizados por la USAC específicamente por el CESEM, en el área que comprende el municipio de Asunción Mita y la cuenca Ostúa-Güija, se evaluaron ciertas concentraciones de elementos presentes en las aguas, y la posible relación con las actividades mineras del Proyecto Minero Cerro Blanco (Luna, et al., 2013). “En el Plan Trifinio se estima que los valores del elemento arsénico y otros detectados en concentraciones anómalas en el agua, corresponden a la línea base o fondo natural de su composición y no a la contaminación antrópica” (CTPT, 2008, pág. 40).

Según Luna, et al., (2013) considera que:

Los parámetros físicoquímicos de las condiciones del agua en el lago de Güija, de calidad de agua: temperatura, oxígeno, el grupo de coliformes totales y fecales se encuentran dentro de los rangos aceptables por la vida íctica; pero la demanda bioquímica del oxígeno, coliformes fecales y totales se encuentran por encima de los límites máximos permisibles

recomendados por COGUANOR, por lo que el agua del lago no es recomendable para el consumo humano sin previo tratamiento. (p. 48)

El MEM es el ente principal que regula toda actividad de aprovechamiento de minerales en Guatemala, por lo que realizó un estudio en el año 2010 de aguas superficiales, subterráneas y manantiales calientes, en acompañamiento con personal de la entidad Cerro Blanco, para evaluar los parámetros físicos principales como pH, temperatura, conductividad, sólidos suspendidos, entre otros. Así mismo se evaluaron los parámetros químicos como alcalinidad total, nitrógeno de nitratos y nitritos, fósforo disuelto, sulfatos, arsénico disuelto, metales pesados peligrosos y cianuro. Según la Unidad de Gestión Socio Ambiental (UGSA), de la Dirección General de Minería del MEM:

Las diferencias observadas entre estaciones de los manantiales calientes aguas arriba y aguas abajo se dan en parámetros de conductividad, demanda química de oxígeno, alcalinidad, arsénico y sulfatos. Dichas diferencias podrían deberse a la mayor oxigenación del agua de la estación aguas abajo, causada por las instalaciones a salida de este manantial, teniendo en teoría, originalmente el agua una calidad equivalente en ambas estaciones. (UGSA, 2010, pág. 41)

Las aguas que tienen relación con el sistema hidrológico con las actividades del proyecto Cerro Blanco, presentan calidades variables y muy dependientes de los factores geológicos que determinan las concentraciones de ciertos elementos que se encuentran elevados de

forma natural, y se moviliza mezclándose entre sí, en particular los manantiales calientes, por lo que forman parte del sistema determinado en el área. Los pozos indican que contribuyen contenidos fisicoquímicos de origen antropológico, recomendando así una vigilancia ambiental en el sistema hidrológico de dicha zona. (UGSA, 2010, pág. 42)

Los estudios realizados por la entidad minera, que tiene a cargo un proyecto geotérmico en el área para generación de energía eléctrica, indican que existen dos tipos de acuíferos principales, el primero consiste en Acuíferos libres o no confinados desarrollados en depósitos de origen aluvial es decir fragmentos de roca que han tenido un transporte, que tienen una porosidades entre el 10 y 30 %, y el segundo se refiere a los acuíferos confinados que se desarrollan en rocas basálticas fracturadas que subyacen a los acuíferos libres, que se describen con baja permeabilidad y porosidad. (EVERLIFE, 2007, p. 408)

En el año 2013 la entidad Geotermia Oriental de Guatemala, realizó un estudio donde solicitó un proyecto geotérmico denominado “Cerro Blanco”, localizado en el municipio en estudio, específicamente en la aldea Cerro Blanco, una reserva geotérmica profunda con temperaturas que han sido evaluadas que tienen la capacidad de desarrollar un recurso explotable de 50 MW, que al ser transformados a una potencia de 13.8 KV.

Para la estimación del recurso geotérmico se realizaron varias perforaciones desde su descubrimiento en el año de 1997, indicando que los estudios realizados durante varios años fueron confirmados a través de geoquímica de las fuentes, valores de resistividad bajos y presencia de cuerpos anómalos con mayor resistividad. (EVERLIFE, 2007, p. 3)

Como parte de la investigación realizada por el proyecto geotérmico, indica que la actividad térmica superficial se manifiesta en las comunidades de Cerro Blanco, El Tule, Bomba de Agua y Trapiche Vargas, haciendo relación que la colina Cerro Blanco está ubicada a cercanía de las fallas geológicas, haciendo una relación con las fuentes termales y las unidades litológicas-estructurales. (EVERLIFE, 2007, p. 7)

En el estudio técnico de justificación para modificación del contrato de autorización definitiva otorgada a Geotermia Oriental de Guatemala S.A. en Cerro Blanco, se elaboró un modelo conceptual del sistema geotérmico, indicando que se encuentra asociado al vulcanismo bimodal de rocas denominadas basalto-riolita, con pequeños conos y flujos de escoria basáltica, flujos riolíticos y cúpulas cercanas al área, con un reservorio que presenta una temperatura aproximada de 240° centígrados al este de Cerro Blanco y profundidad mayor a 1000 metros. La composición química de este reservorio se reporta que es de cloruro de

sodio-bicarbonato y contenido de gas aproximad de 0.4 % en peso.
(Geotecnología, Contrucción y Servicios , Sociedad Anónima, 2019, pág.
1749)

1.2.2. Aspectos socioeconómicos

A continuación, se presentan los aspectos socioeconómicos.

1.2.2.1. Población

Uno de los factores muy importantes que se relacionan al cambio fisicoquímico del sistema hídrico del área, es la intervención antropogénica, por lo que el crecimiento poblacional del área de investigación y el manejo de desechos sólidos por parte de la municipalidad son de suma importancia para conservar una calidad de agua óptima. En el censo efectuado en Asunción Mita en el año 2018 por el INE, la población es de 20926 habitantes en el área urbana y 27361 habitantes en el área rural, siendo evidente que se concentra la población mayormente en la región rural (INE, 2018).

1.2.2.2. Actividad productiva

Una de las aldeas con mayor influencia dentro del área de estudio es Trapiche Vargas, con una población de 1,027 personas, lo que equivale al 19.35 % de la población total del municipio, con una producción agrícola principalmente de maíz, sorgo y frijol en forma asociada. (COMUDE, 2011, pág. 15)

1.2.3. Clima

En el municipio de Asunción Mita, Jutiapa, de acuerdo con lo indicado por el INSIVUMEH en el año 2019, presenta una temperatura media-anual de 28.4 °C, con variaciones climáticas que se puede asociar al deterioro de los bosques por diferentes intervenciones como incendios forestales, deforestación y expansión de la frontera agrícola, así mismo el aumento de la urbanización proveniente del área rural hacia el casco urbano. (COMUDE, 2011, p. 40)

Con una precipitación anual de 1411.5 mm, según los registros en el año 2010 en la estación Asunción Mita por del INSIVUMEH (2019).

En otro apartado, se muestra la precipitación anual desde el año de 1970 al 2019, donde el año con menor cantidad de precipitación es en 1998 con una precipitación de 760.7 mm, y la mayor precipitación registrada es en el año del 2011 con 2,014 mm, la que se podría asociar a la depresión tropical 12E, “esto de acuerdo con un estudio de tendencias en el cambio climático realizado en Guatemala” (Bardales, Castañón, & Herrera, 2019, pág. 13).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ciclo hidrológico

El proceso de recarga hídrica está determinado por Barreno (2016) como “el desplazamiento del agua en la atmosfera hasta su precipitación, generado por varios fenómenos, los cuales están conformados por los procesos de evaporación, evapotranspiración, precipitación, retención, infiltración y escorrentía superficial” (p. 4).

Por lo tanto, el ciclo hidrológico está comprendido según lo define Martínez, et al., (2005) por la:

Precipitación que es cuando las partículas de agua aumentan su tamaño a causa de un proceso termodinámico, debido a su peso vencen la resistencia del aire y caen hacia la superficie de la tierra por la fuerza de gravedad. El agua que llega hacia la superficie, una parte de ella es evaporada, infiltrada y otra parte es escurrida por la superficie de la tierra la cual se le denomina escurrimiento superficial. (p. 18)

“La precipitación efectiva debe considerarse dentro del ciclo hidrológico”, expresa (Fuentes, 2005, pág. 42). Este factor al igual al igual que la infiltración, escorrentía, y evapotranspiración son parte del ciclo. “Las propiedades del suelo aportan información importante que determinan la capacidad de infiltración y escurrimiento del agua que precipita, el agua resultante o sobrante que no puede

ser infiltrada por el suelo, procede a ser absorbida por las plantas para la transpiración y otra puede regresar a la atmosfera por medio de la evaporación” (González, 2011, pág. 52).

“Al momento que el suelo llega a saturarse, el agua percola a la zona vadosa donde el agua tiene contacto con minerales, agua, aire, agua, aire y otros gases” (Martínez, P. ,Martínez, & Castaño, 2005, pág. 19).

El agua es un agente muy importante para la movilización y alteración química en los cuerpos de agua, debido a que esta es capaz de modificar las concentraciones químicas causadas por la interacción con diversas unidades de roca en el subsuelo, siendo uno de factores más influyentes en la carga elemental principalmente en las aguas subterráneas. Considerando que los tipos de estructuras de los suelos definen las condiciones de recarga hídrica, es decir los suelos con estructura laminar disminuyen la recarga y los suelos granulares aumentan la recarga. (Fuentes, 2005, pág. 42)

2.2. Temperatura

De acuerdo con información proporcionada por el INSIVUMEH (2020) la temperatura promedio del año 2019 se registra una máxima de 31.6 °C y promedio de 28.16 °C. La entidad Cerro Blanco, realizó una evaluación climatológica en Asunción Mita, en el 2012 haciendo uso de una estación privada, con una línea base desde el año 2009, con una temperatura promedio de 25.84 °C (Méndez, 2013).

2.3. Uso del suelo

La Municipalidad de Asunción Mita detalla que:

El 5 % es utilizado por asentamientos a causa del aumento demográfico, el otro 5 % corresponde a cuerpos de agua y en el mayor porcentaje del 25 % lamentablemente no está siendo utilizado de la manera correcta, utilizando el 37.6 % por agricultura limpia anual y el 38.1 % por matorrales y en porcentaje menor por bosques secundarios (arbustal 10.7 %) y pastos cultivados (6.1 %). (COMUDE, 2011, p. 37)

Es evidente que la mayor actividad en el uso del suelo se debe a la agricultura y matorrales, lo que garantiza que la actividad económica de la región es por medio de proyectos de agricultura informal y formal. Pero es importante tomar en consideración según lo indica Fuente (2005) que:

El suelo que es utilizado para reforestación natural o antrópica es de suma importancia definir la profundidad de raíces que esta cobertura vegetal presenta, ya que mientras sean más profundas se disminuye la recarga hacia los acuíferos por la alta demanda de agua de las plantas. (p. 51)

De acuerdo con el Plan de Trifinio se tienen seis grupos de suelos dentro de la cuenca Ostúa-Güija: El primer grupo se encuentran los inceptisoles, enrisoles y vertisoles que se ubican en las planicies coluviales y aluviales

de la subcuenca Ostúa, siendo pesados, productivos y poco susceptibles a los agentes erosivos. (CTPT, 2009, p. 23)

El segundo grupo son los andosoles, entisoles, anisoles y molisoles ubicados al pie de monte ondulado al sur de la microcuenca, definidos como pedregosos con poca profundidad, susceptibles a los agentes erosivos y productivamente se categorizan como bajo a medio, considerados como favorables para la producción ganadera o forestal.

2.4. Relieve

La topografía es considerada como la pendiente que posee una porción de terreno, que tiene dominio en la recarga, relacionando que a mayor grado de pendiente se tienen un aumento de escorrentía y por ende se minimiza la recarga hídrica. (Fuentes, 2005, pág. 51)

2.5. Geología

El área de investigación se encuentra geológicamente ubicada al norte del arco volcánico de Guatemala y al sur de la falla de Jocotán. Las fallas que imperan regionalmente se encuentra la falla Cuilco-Chixoy-Polochic, el sistema de falla Motagua y sistema de falla Jocotán, pero tiene un comportamiento estructural de acuerdo con la traza del Graven de Ipala y al sur de la falla de Jocotán.

Regionalmente el área está comprendida según Informe de Producción del Proyecto Minero Cerro Blanco (2013), por tres grupos, siendo estos:

depósitos cuaternarios aluviales/coluviales; secuencia denominada Salinas, que consiste en tobas volcanoclásticas del Plioceno y secuencias subyacentes volcano-sedimentarias denominada grupo Mita de edad Paleoceno-Eoceno como roca base el grupo Mita que corresponde a rocas volcánicas y sedimentarias y el grupo Salinas que comprenden vulcanoclastos, conglomerados y caliza.

Según Luna, et al., (2013,) indica que:

El área de investigación es una zona de origen volcánico, especialmente de tipo ignimbrítico, lavas de composición dacítica-riolítica, basaltos y feldespatos. El vulcanismo en la región está relacionado a erupciones fundamentalmente basálticas. Además, lo conforman rocas intrusivas, las cuales se encuentran fracturadas y altamente meteorizada que forman parte del Grupo Padre Miguel. Así mismo se describe que se ubican en el área 9 volcanes identificados como Mita, San Diego, Cerro Quemado, El Tule, El Puente, Mazatepeque, Suchitán, Ipala y el Chingo. Así mismo indican que se presentan manifestaciones hidrotermales actualmente. (p. 18)

2.5.1. Rocas metamórficas (Pzm)

Como basamento a nivel regional, se encuentran las rocas metamórficas (Pzm), que corresponden a dos secuencias de rocas que afloran al sur del valle del Motagua. La secuencia más antigua de alto grado se ha denominado como

Complejo Las Ovejas y la secuencia de bajo grado corresponde a Filitas San Diego.

2.5.2. Rocas carbonatadas (Ksd)

“Las rocas sedimentarias se encuentran espacialmente en la zona central” (CPT, 2009, pág. 25).

Según lo describe Barrera (2016):

La unidad de caliza (Ksd) se encuentra ubicada en zonas cercanas a la aldea San Juan Las Minas y el caserío El Amatillo aflorando en las quebradas, con una composición petrográfica principalmente de calcita, dolomita, cuarzo y componentes esqueléticos, clasificando según Dunham como caliza granular lodosa *Packstone*. (p. 37)

2.5.3. Capas rojas de formación subinal (Ktsb)

“La formación se ha definido como una secuencia continental, constituida por conglomerados, areniscas, lutitas y calizas, con espesores pequeños que aumentan con dirección al noroeste de Guatemala con espesores de 600 a 800 m” (CPT, 2009, pág. 26). Presenta una coloración rojiza, con intercalaciones de materiales de diferente granulometría, con contactos superior e inferior de la unidad son discordantes, con depósitos aluviales y Grupo El Tambor, respectivamente. (Donelly, Horne, Finch, & López Ramos, 1990).

2.5.4. Rocas volcánicas

“El vulcanismo de esta zona es de composición básica, relacionada con el sistema estructural por el graben de Ipala con cuerpos magma de alta profundidad, clasificando el vulcanismo del tipo estromboliano-hawaiano” (CTPT, 2009, pág. 25).

Dentro de las unidades que corresponden a rocas ígneas se encuentran los depósitos ignimbríticos, lavas riolíticas y dacitas de edad Oligocénico-Miocénicas que se encuentran clasificadas dentro del grupo Padre Miguel de acuerdo con el estudio realizado por Trifinio (2009) pero de acuerdo con ello “las lavas debido a su edad no presentan las condiciones originales de permeabilidad, por lo que no representan un potencial para acuíferos, únicamente que esta unidad se encuentre fuertemente fracturada [porosidad secundaria]” (p. 26).

Las rocas intrusivas de acuerdo con su composición varían entre granodioritas a gabros, con un enfriamiento lento a profundidades, pero debido a los agentes erosivos los materiales sobrepuestos son removidos y afloran los materiales en condiciones de alto fracturamiento o alto grado de meteorización. (CTPT, 2009, pág. 26)

Según Barrera (2016) “La unidad de Toba (Tb) que se encuentra aflorando en la carretera que conduce a la aldea Asuncioncita y Asunción Mita” (p. 43). La toba del tipo cristalino con una textura afanítica y fenocristales subhedrales, que se encuentra en contacto discordante con la unidad de basalto y composición mineralógica de cuarzo, vidrio, bytownita, opacos, fragmentos líticos y ortosa. La segunda identificada en el área ha sido la toba lítica que consiste en una unidad

con una textura fanerítica y porfirítica, aflorando principalmente en carretera que conduce a la aldea Asuncioncita.

Como lo indica Barrera (2016) “la unidad de Basalto (Ba) se encuentra muy extensiva en el área de investigación” (p. 46).

Aflorando principalmente en las aldeas Estanzuela, Guevara y Chavarría, con bloques subredondeados de aproximadamente 25 cm hasta 2 metros de dimensión, presenta un suelo de coloración rojiza, que ha sido generado por la oxidación de minerales ferromagnesianos (anfíboles y piroxenos), siendo muy particular al norte del volcán Suchitan. Presenta una composición mineralógica con una matriz de plagioclasas y un mínimo porcentaje de olivinos, con minerales accesorios como ortopiroxenos y magnetita. (Barrera, 2016, p. 50)

En la sección de anexos se muestran las unidades geológicas a nivel regional de la cuenca Ostúa-Güija, dentro de esta cuenca se localiza la microcuenca (área delimitada de color rojo) de esta investigación (río Morán). Litológicamente la cuenca Ostúa-Güija presenta rocas plutónicas, rocas de la formación Subinal (capas rojas), carbonatos, filitas, migmatita, mármol, esquistos, gneis, coladas de lava, tobas, pómez y aluviones cuaternarios.

2.6. Hidrología

A nivel regional la cuenca está constituida por 14 ríos, con un aporte principal al sistema el río Ostúo o Grande de Mita, que nutre o alimenta a los ríos Mongoy, Talguapa, Tamasulapa y otros riachuelos del lugar.

La disposición topográfica direcciona los flujos de agua hacia el área de Asunción Mita, al río principal que abastecen a la población, desde el área rural principalmente la aldea Trapiche Vargas hacia la zona urbana, esto de acuerdo con lo reportado por Entre Mares de Guatemala.

Según estudios realizados por parte de la entidad minera Cerro Blanco, se han determinado dos tipos de acuíferos en el área, que corresponden a capas de acuíferos libres y capas de acuíferos confinados. Los acuíferos libres se están constituidos en unidades de origen volcánicas y sedimentos aluviales, presentando un fracturamiento con porosidad secundaria, ubicado muy superficial, permeable y saturamiento parcial. Las capas de acuífero confinado de base poseen una baja permeabilidad y se encuentran a mayor profundidad, saturación y presión, que generalmente presentan un estrado superior impermeable.

De acuerdo con EVERLIFE (2007):

Los mantos acuíferos confinados poseen una distribución vertical y horizontal, con dirección hacia los planos de fracturamiento, lo que podría considerarse que se puede comportar como bolsas de agua aisladas por unidades de roca impermeable, por consiguiente, ser drenados por medio de planos de fracturas hacia los nacimientos de agua. (p. 167)

Las condiciones hidrotermales muy particulares en el área se han estudiado por parte de la entidad minera Cerro Blanco, obteniendo temperaturas en el nivel freático de 95-160 °C, donde estos acuíferos están por debajo de la sucesión sedimentaria y subyaciendo la roca dacita,

con niveles similares entre 451-464 msnm, generando un sistema de corriente más continuo, así como un menor confinamiento. Presenta un patrón de drenaje tipo detrítico-subparalelo, con un flujo direccionado hacia el noreste a sureste, constituido por diversas unidades hidrogeológicas, según la permeabilidad de los materiales y capacidad para transmitir agua, detallados como: rocas sedimentarias con permeabilidad variable, rocas volcánicas fracturadas con permeabilidad alta a moderada y los depósitos aluviales con porosidad variable y alta permeabilidad. (EVERLIFE, 2007, p. 168 y 169)

En la subcuenca de los ríos Pansigüis y Cushapa que está en el departamento de Jalapa, específicamente al norte de la microcuenca río Mora, Herrera y Brown (2011) establecieron que “el agua subterránea tiene una dirección oeste a este, controlado estructuralmente por el graben de Ipala y el horst de Pinula, con una transmisividad baja de 17 a 55 m²/día” (p. 50). El acuífero tiene un espesor de 150 m aproximadamente, un coeficiente de almacenamiento de 3×10^{-4} y conductividad hidráulica de 0,11 a 0,4 m/día, lo que define que corresponde a un acuífero confinado por material volcánico (capas de ceniza).

Los principales ríos que se encuentra en la cuenca Ostúa-Güija es el río Ostúa que corresponde al río principal de la cuenca, con una longitud aproximada de 105 kilómetros. Los ríos que tributan principalmente al río Ostúa se encuentra el río Blanco, río Frío, río Chaparrón, río Juan Cano, río Güirila, río Los Amates, río Mongoy, río Tahuapa, río San Pedro, río Chapemo, río Tamaluapa, río Chaparrón y río Morán.

2.6.1. Estaciones meteorológicas

El departamento de Jalapa reporta una precipitación anual de 1616 mm y una temperatura de 20.3 siendo la estación más alejada del área de investigación. El departamento de Jutiapa reporta una precipitación anual de 1295 mm y una temperatura de 26.3 y el municipio de Asunción Mita con una precipitación anual de 1167 mm y temperatura de 25.4, siendo evidente que reporta una menor precipitación y mayor temperatura de acuerdo con las otras estaciones, datos reportados de acuerdo con datos climáticos mundiales.

2.7. Geomorfología

Fisiográficamente Guatemala está clasificada en diferentes regiones, definida por las regiones de Llanura Costera del Pacífico, Pendiente Volcánica Reciente, Tierras Altas Volcánicas, Tierras Altas Cristalinas, Depresión del Motagua, Tierras Altas Sedimentarias, Depresión de Izabal, Tierras Bajas Interiores de Peten, Cinturón Plegado del Lacandón y Montañas Mayas. El área de investigación de acuerdo con el Plan Estratégico Participativo (2007):

Está ubicada en la región Tierras Altas Volcánicas, en la zona de vida denominada como bosque seco subtropical, con un bosque nuboso debido a la existencia del volcán Suchitán, con alturas que van alrededor de 700 metros en el borde la cuenca Ostúa, el volcán de Suchitán alcanzan los 2,043 metros sobre el nivel del mar. (p. 26)

De acuerdo con el mapa fisiográfico regional de la cuenca en estudio, se puede observar la distribución de las unidades fisiográficas que se caracterizan por las pendientes topográficas, constituida en la parte central por conos

volcánicos (ubicado el volcán Suchitán), y hacia el noroeste se extiende la planicie aluvial volcánica, y hacia el noroeste y noreste las montañas volcánicas orientales.

Al norte del área de investigación, específicamente en el municipio de San Luis Jilotepeque del departamento de Jalapa se realizó una investigación, que ha permitido definir las zonas de recarga hídrica del sistema acuífero a través de dos unidades geomorfológicas, que es el horst de Pinula que corresponde a la Montaña Pinula (65 % de la subcuenca) que posee una alta permeabilidad y la segunda es la unidad de graben de Ipala que posee suelos arcillosos con baja permeabilidad. (Herrera & Brown, 2011, pág. 52)

2.8. Unidades hidrogeológicas

De acuerdo con el CTP (2009) ha realizado una clasificación a nivel regional de la cuenca Ostúa-Güija, haciendo referencia que se tienen tres unidades hidrogeológicas principales, que consisten en sedimentos aluviales y coluviales, rocas fracturadas y rocas poco fracturadas.

2.8.1. Acuíferos porosos

Se han identificado como las unidades formadas por sedimentos aluviales que han tenido un transporte por agentes fluviales, los cuales presentan espesores aproximados de 29 y 80 m, conformado por clastos subredondeados a redondeados de diferente granulometría compuestas principalmente por fragmentos de rocas ígneas, siendo material con baja reactividad química. “La

conductividad eléctrica del agua en estos acuíferos, se detecta entre 250 y 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una composición tipo bicarbonatada cálcica a sódica” (CTP, 2009, pág. 51).

2.8.2. Acuíferos fracturados

Este tipo de acuífero se define por la capacidad que tiene la roca que ha sido generada por la tectónica de las rocas y a la resistencia que poseen para su fracturamiento, como por ejemplo las rocas volcánicas y sedimentarias. En el estudio realizado por Trifinio (2009) especifica que “las aguas provenientes de estos acuíferos son aprovechados por manantiales, presentando una composición química de tipo bicarbonatada cálcica o sódica, con baja salinidad y conductividad eléctrica de 300 a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ” (p. 51).

2.8.3. Acuíferos fracturados de baja porosidad

Está formada principalmente por rocas volcánicas fracturadas con un aprovechamiento en zonas de manantiales, presentando una carga elemental de que clasifica las aguas del tipo cálcica bicarbonatada clorurada, o bicarbonatada sulfatada, con mayor concentración de sales y una conductividad eléctrica de hasta 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. (CTPT, 2009, p. 51)

2.8.4. Acuíferos locales generados por sistemas de fallas geológicas

La tercera clasificación de acuíferos efectuada por la CTP (2009) “son las zonas de recarga generadas por un fallamiento o fracturamiento de un sistema local, provocando que las rocas de origen volcánicos como basaltos y andesitas

tengan mayor conductividad hidráulica (media a baja) siendo el lugar propicio para pequeños acuíferos, siendo evidentes en manantiales” (p. 51).

La entidad Cerro Blanco evaluó que las aguas superficiales y subterráneas tienen un comportamiento de dirección de flujo (noreste a sureste). Así mismo lograron identificar dos acuíferos que presentan parámetros distintos, compuestos por varias unidades hidrogeológicas, que han sido clasificadas según la permeabilidad de los materiales y capacidad de transmitir agua.

En el estudio realizado en el área de Cerro Blanco se clasifican las unidades hidrogeológicas según el grado de permeabilidad, de manera ascendente de la siguiente manera: rocas sedimentarias que corresponden a una unidad con permeabilidad variable, constituida principalmente por caliza, conglomerados, areniscas y lutitas; las rocas volcánicas presentan un fracturamiento, con permeabilidad que va de alta a moderada y los depósitos aluviales es una unidad con porosidad variable y permeabilidad alta.

2.8.5. Rocas sedimentarias

Las rocas carbonatadas denominadas caliza, se encuentran estratificadas y presentan alta permeabilidad, especialmente cuando presentan fracturamiento. Estas rocas presentan una discontinuidad lo que dificulta definir los límites superiores al momento de la recarga subterránea. Son constituidas principalmente como brechas, areniscas, conglomerados y lutitas con baja permeabilidad, porosidad primaria como secundaria por fracturas, con un leve fracturamiento. (EVERLIFE, 2010, p. 4)

La roca caliza debido a su pequeño espesor (600 a 800 m) no representan importancia para potenciales acuíferos, pero en el caso de las capas rojas presenta grandes espesores y por su contenido de lutitas que poseen una granulometría fina que están intercaladas con conglomerados y areniscas de igual manera no son acuíferos representativos. Las unidades que si representan potencial para abastecimiento de aguas subterráneas son los depósitos aluviales acumulados en las planicies aluviales, que representan espesores de hasta 200 m. (CTPT, 2009, pág. 27)

Los depósitos aluviales como lo plantea EVERLIFE (2010) “corresponden a una edad cuaternaria, con porosidad primaria en los acuíferos que lo contiene, es decir con buena permeabilidad, que son transportado por corrientes fluviales del río Ostúa, formando así el depósito del valle de Asunción Mita” (pág. 5).

2.8.6. Rocas ígneas

Las rocas volcánicas constituyen el acuífero superior (freático) en las partes montañosas como Cerro Blanco y Cerrón en el sector norte y hacia el oeste en los cerros, como Tultepeque, Estanzuela y El Reparo, donde forman manantiales que alimentan los riachuelos y quebradas, especialmente en la época seca. Se tienen identificados varios manantiales de agua fresca en la parte oeste del río Ostúa, como La Vegona y Agua Zarca a 3 y 7 kilómetros al norte del poblado de Asunción Mita, estos manantiales marcan el contacto entre las rocas volcánicas

permeables arriba y las capas impermeables por debajo (arcillas), siendo evidente las diferencias de permeabilidad entre las unidades dando un confinamiento a semiconfinamiento al acuífero inferior. (EVERLIFE, 2010, p. 4)

2.9. Acuíferos

La capacidad con que cuenta las unidades roca para almacenar y transmitir agua es muy importante para poder clasificar los acuíferos. En términos generales lo describe Martínez, et al., (2005) como “la factibilidad de una roca para transferir agua de un lugar a otro, de manera que tenga la permeabilidad para almacenar agua en las capas geológicas, para llegar a formar parte de las aguas subterráneas” (p. 75). Se define un acuífero como “una formación geológica que tiene la capacidad de transmitir y almacenar líquidos significativamente, permitiendo su circulación a través de sus poros y grietas o fracturas” (CTPT, 2009, p. 31).

Los acuíferos pueden clasificarse según sus condiciones naturales, los acuíferos que emergen a la superficie por poros y fracturas de la roca se definen como Acuífero Libre que posee una presión atmosférica. Es decir que en cualquier punto que se encuentre debajo de la superficie freática el agua se encontrará a una presión atmosférica mayor. “Considerando en este tipo de acuífero que las unidades de roca no generan ningún tipo de presión al agua que almacenan” (Martínez, et al., 2005, pág. 76).

El segundo tipo de acuífero es el confinado, se da cuando este se encuentra aislado de la superficie atmosférica, presenta una saturación de agua y está ejercida por una presión constante y mayor a la atmosférica. En caso se

llegará a perforar un acuífero confinado, el agua va a alcanzar el equilibrio entre la presión sometida en ese momento y la presión atmosférica (Martínez, et al., 2005).

Al equilibrio del agua se le ha denominado artesianismo, y si el agua se encontrara en la capacidad de sobrepasar la superficie topográfica, se le denomina surgencia, al momento en que entra en equilibrio, a la cota alcanzada se le denomina nivel piezométrico. Y el tercer tipo de acuífero que se encuentra en las unidades confinantes permitiendo el paso del flujo de agua hacia el exterior o interior, se le denomina acuífero semiconfinado (Martínez, et al., 2005, pág. 77).

La porosidad de las rocas va a definir las condiciones del acuífero, los que presentan porosidad primaria (sedimentos como arenas y gravas) y el segundo tipo son con porosidad secundaria, generados por fuerzas secundarias que provocan un fracturamiento en la roca (calizas, basaltos, granitos, areniscas, entre otras rocas de origen volcánico intrusivas o extrusivas). El tercer tipo de acuíferos es el cársticos que como su nombre lo indica corresponde a rocas carstificadas como calizas, dolomitas y yeso, permitiendo un movimiento del agua entre las cavernas o aberturas que han sido generadas por la disolución. (CTPT, 2009, p. 32)

2.10. Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica se ha definido como la rama que se encarga de evaluar la calidad química del agua, al referirse a aguas subterráneas se habla de hidrogeoquímica, tomando en consideración que el agua es el mayor solvente de todo material que se encuentre en contacto con ella, durante el proceso del ciclo hidrológico que incluye la precipitación infiltración, escurrimiento, ya que se disuelve todo material que tenga contacto con ella. (CTPT, 2009, p. 33)

De acuerdo con Santillán (2010):

Es el estudio de las aguas y sus reacciones entre la interacción agua/roca de acuerdo con las condiciones geológica en que se encuentre, teniendo evolución durante el tiempo y espacio, desde aguas del tipo bicarbonatadas que se asocian a la interacción de agua pluvial con dióxido de carbono a cloruradas que se obtienen por la interacción con diferentes unidades rocosas. (p. 23)

En las campañas de exploración minera, una de la técnica utilizada para la evaluación y búsqueda de yacimientos es a través de análisis geoquímicos de las aguas y sedimentos, debido a que son indicadores potenciales para poder determinar posibles orígenes de zonas de interés minera, aportando información valiosa del comportamiento elemental de acuerdo con el flujo en los cuerpos geológicos. Los modelos conceptuales de acuerdo con Morán, et al., (2016)

aportan información sobre la distribución geoquímica de las aguas que se encuentran subterráneamente, para determinar el comportamiento de la interacción e influencia con el sistema hidrotermal y antrópica.

2.10.1. Características físicas y químicas de las aguas subterráneas

Para la evaluación de la calidad de las aguas, es necesario conocer las condiciones físicas y químicas, para deducir información sobre su carga elemental y ambiente de interacción con agentes naturales o antrópicos que puedan modificar su calidad, que varían al transcurrir el tiempo (Martínez, et al., 2005, pág. 169).

El calcio, magnesio y sodio lo define Martínez et al., (2005) “como parte del grupo de los cationes y cloruros sulfatos, los aniones están comprendidos entre 1 y 1 000 ppm corresponden a los bicarbonatos” (p. 172).

“Los elementos secundarios se presentan son menos frecuentes con concentraciones que van desde 0.01 a 10 ppm, conformado en el grupo de los cationes al hierro, estroncio y potasio; y en el de los aniones: carbonatos, nitratos y fluoruros” (Martínez et al., 2005, p. 174).

Según Martínez et al., (2005) “para realizar una evaluación de las aguas es importante considerar los parámetros fisicoquímicos como Sólidos Disueltos Totales (SDT), Temperatura, Alcalinidad, Potencial de Hidrógeno pH, Dureza, Potencial Redor Eh y Conductividad eléctrica” (p. 170).

Para el análisis de parámetros físicos y químicos de las aguas se utilizan gráficos de columnas, tipo tarta, radial y poligonal para comprender el comportamiento conforme a su concentración y tiempo. Lo que permite realizar comparativos de distintos análisis, de la distribución de aniones y cationes. Los diagramas de Collins nos ayudan a clasificar las aguas de acuerdo con su contenido de aniones y cationes dados en meq/L. (Mis, 2017, pág. 19)

“Otro método son los diagramas de Stiff o también llamado de polígono, que hacen referencia a concentraciones al igual de Stiff solo que graficado por medio de rectas paralelas equidistantes” (Martínez, et al., 2005, pág. 169).

En una investigación realizada en Guadalajara se analizó el comportamiento elemental en las aguas que corresponden a un ambiente volcánico, predominando las aguas de $\text{Na}^+\text{HCO}_3^-$, es decir que las rocas presentan mayor contenido de sodio, seguidamente están las aguas de $\text{Na}^+\text{Mg}^{2+}\text{Ca}^{2+}\text{HCO}_3^-$ y $\text{Na}^+\text{Ca}^{2+}\text{HCO}_3^-$, por lo que se analizó la interacción de los ambientes y el comportamiento del elemento en las zonas de recarga.

“Tomando en consideración que el probable origen de los contaminantes por nitratos se debe a fertilizantes utilizado en la agricultura en zonas parcelares rurales y aguas de producto residuales en áreas urbanas” (Moran, et al., 2016, pág. 68).

2.10.2. Clasificación según la dureza

La dureza del agua se puede clasificar según las concentraciones de carbonatos, según los niveles de dureza, en la tabla I se indican las cantidades de sales en ppm y su denominación correspondiente.

2.10.3. Clasificación según el pH

El pH se puede clasificar de acuerdo con la concentración de ion hidronio (H_3O^+) presente en la muestra, para ello se puede realizar de forma *in situ* o en el laboratorio. En la parte final del trabajo se detalla el nivel de potencial de hidrógeno que podría ser detectado en una muestra, a través del cual se pueden nombrar el tipo de agua, como por ejemplo aguas ácidas o aguas débilmente básicas.

2.10.4. Clasificación según iones mayores dominantes

Las aguas también pueden clasificarse a través de su contenido de iones mayores dominantes, utiliza para ello herramientas gráficas para su representación. Como expresa Vega (2018) “las agua por contenido de anión o catión podría sobrepasar el 50 %, pero al momento que este no sea mayor a ello, se identifican con los dos más abundantes” (p. 39).

Para realizar el análisis respectivo, se pueden emplear varias metodologías para graficar los resultados de análisis químicos obtenidos. En la investigación de Vega (2018) establece que:

Los aniones en las aguas subterráneas se representan comúnmente como SO_4^{2-} , $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ y $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, y como cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$.

Mientras que en aguas superficiales los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- , y los cationes Na^+ + Ca^{+2} y Mg^+ . Así mismo, hace referencia a Custodio y Llamas, (1976) con relación al uso de diagramas múltiples, que se han desarrollado, con la finalidad de clasificar las aguas superficiales a través de diagramas circulares (sectoriales) y poligonales (radiales). Los métodos más utilizados para la clasificación de aguas están los gráficos de *Piper* y *Stiff* principalmente. (p. 39)

2.10.4.1. Diagramas *Piper-Hill-Langelier*

“Este diagrama se expresa como uno de los métodos ideales para representar las concentraciones de aniones y cationes de forma conjugada, lo que permite clasificar químicamente las aguas” (Juárez, 2017, pág. 19).

2.10.4.2. Diagramas de *Stiff*

La representación gráfica del diagrama de *Stiff* es a través de semi rectas paralelas, que en el eje de las abscisas se detalla las concentraciones de los elementos en ppm o meq/L, y en el eje de las ordenadas del cuadrante izquierdo se definen los cationes y en el lado derecho los aniones. En el capítulo de los anexos se expresa ascendentemente los elementos detectados en el agua, para graficar un polígono que de acuerdo con tamaño y orientación preferencial se pueden nombrar y por ende caracterizar las aguas.

2.11. Uso de las aguas subterráneas

El agua que es captada de los depósitos subterráneos es por medio de los manantiales, para poder abastecer a los pobladores de una gran parte del municipio de Asunción Mita, siendo muy puntual la captación del agua en zonas de fallas o fracturamientos en las unidades geológicas. En el estudio realizado por EVERLIFE (2010) en el manantial de La Vegona se han identificado cinco puntos de salida de agua subterránea, siendo los más conocidos El Zapote, Zapotillo y Prolac. El agua que es captada de estos manantiales es almacenada en tanques de concreto.

El manantial de Agua Zarca cuenta con un tanque de captación en condiciones similares al de La Vegona, y con cinco salidas de rebalse. De acuerdo con Entre Mares de Guatemala, S.A., la producción del manantial de La Vegona es de 4,320 m³/día y de Agua Zarca de 3,500 m³/día lo que indica caudales entre 5 a 18 l/s en cada punto de salida, con captaciones continuas de 24 h/d. (EVERLIFE, 2010, p. 6)

2.11.1. Demandas insatisfechas crecientes

El agua que es captada de los depósitos subterráneos es por medio de los manantiales, para poder abastecer a los pobladores de una gran parte del municipio de Asunción Mita, siendo muy puntual la captación del agua en zonas de fallas o fracturamientos en las unidades geológicas.

El municipio de Asunción Mita, del departamento de Jutiapa, para el año 2010 tenía una población total de 40,702 habitantes, para el año 2018 se

incrementó a un total de 48 297 habitantes, mostrando un índice de crecimiento del 15.7 % (Instituto Nacional de Estadística de Guatemala, (1985 - 2019). Del total de viviendas en el municipio, 11 206 cuentan con tubería en la vivienda, 880 poseen tubería fuera de la vivienda, 31 hogares se abastecen mediante chorros públicos, 234 cuentan con agua de pozos, 5 viviendas recolectan agua de lluvia, 20 viviendas suministran agua por medio de ríos o lagos, 63 casas emplean manantiales, 41 hacen uso de servicios de distribución mediante camiones o toneles y 225 hogares emplean otro medio para proveer agua a sus familias (INE, 1985-2019).

2.11.2. Agua subterránea e industria

Según el COMUDE de Asunción Mita la actividad económica del municipio se orienta hacia la agricultura, el comercio, acuicultura pecaría y la industria. En el sector industrial las principales actividades son la pecuaria (ganadería), la producción agroindustrial (derivados de la leche) y artesanal (carpintería, herrería, ladrilleras, entre otras) y la extracción minera perteneciente al proyecto minero cerro blanco (COMUDE, 2011).

Según Luna, (2005) la actividad agroindustrial de la zona trabaja en base a la producción pecuaria específica del ganado, es decir, guardan una estrecha relación entre sí, ambas son de las principales industrias en Asunción Mita. La industria ha ganado mayor importancia en los últimos años, representando La Industria manufacturera textil y alimenticia ha ganado una gran importancia en los últimos años, representando un 7.4 % de la actividad económica del municipio (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Asunción Mita, Jutiapa, 2018).

Las actividades pecuarias utilizan en su mayoría ríos y nacimientos de agua para su producción, además bebederos y equipo de riego para pasto (García et al., 2013). El autor autores Osorio (2013) en su estudio *Huella hídrica en leche y carne bovina*, indicó que en las regiones de los ríos y los lagos (Chile) la producción de un litro de leche tomó alrededor de 484 y 712 litros de agua y entre 26.897 y 27.848 litros de agua por kilo de carne.

El proyecto minero Cerro Blanco, efectúa la extracción de plata y oro por medio de túneles, por lo que es necesario la succión de los acuíferos para minimizar el nivel freático, para avanzar en las rampas del túnel con la finalidad de llegar a las zonas mineralizadas que han proyectado.

Debido a las aguas de infiltración de los acuíferos, es necesaria la recolección de dichas aguas, por lo que especifican en el Estudio de Impacto Ambiental que se construirán pozos para distribuir los volúmenes de agua encontrada durante el avance de la excavación y será diseñados de acuerdo con los volúmenes estimados. Los pozos actuarán como receptores del agua canalizada por las cunetas provenientes de la infiltración, y ser trasladadas por medio de bombas que desfogarán el agua por medio de tubería, para ser dirigidas hacia las piletas de almacenamiento y enfriamiento, utilizando dichas aguas para actividades de excavación, riego de caminos, riego de plataformas y de especies forestales. (EVERLIFE, 2007, p. 72)

2.11.3. Agua subterránea y poblaciones

El INE en su censo nacional de población y vivienda (1985-2019) la mayoría de los habitantes del municipio de Asunción Mita admitió depender de acuíferos subterráneos para abastecer sus necesidades diarias (alrededor de un 97 %).

La mayoría de las viviendas en el municipio cuentan con tubería en la vivienda o fuera de esta, un grupo menor depende de los chorros públicos o tiene acceso a un pozo. Un grupo mucho menor (3 %) hace unos de otras fuentes como los ríos, lagos o agua de lluvia INE 1985-2019.

2.11.4. Agua subterránea y agricultura

El abastecimiento de agua para este sector agrícola es la alimentación por el río Ostúa, abasteciendo una extensión de 500 manzanas, lo que es evidente que puede hacer uso del agua superficial para proyectos agrícolas, siempre y cuando tengan las calidades para riego.

El agua subterránea representa una importancia para la calidad alimentaria, ya que son cuerpos de agua que no han sido sometidos a altas contaminaciones en su mayoría como caso contrario con las aguas superficiales, siempre y cuando los acuíferos no se encuentren siendo contaminados directamente por algún tipo de actividad industrial, urbana o natural. En la investigación realizada por Paz (2013) “en el año de 1998 se traslada la administración de riego a los usuarios constituidos como Asociación de Usuarios de la Unidad de Riego de Asunción Mita” (p. 1). Debido a la importancia de este recurso para el municipio.

El costo del abastecimiento de agua potable en el municipio para uso agrícola está en función de la operación, mantenimiento y administración, definida como cuota de servicio de riego, estableciendo el pago por millar de m³ servidos por hectárea y riego. (Paz, 2013, pág. p. 16)

Los problemas identificados es la falta de gestión del agua de manera sistemática y racional de las aguas de riego, por lo que aumenta la posibilidad de causar un impacto por contaminación a las aguas por posibles fuentes de agua de derivación (ríos), generando un desaprovechamiento del agua de riego, causando daños a terrenos, cultivos, viviendas, accesos o alguna. (Paz, 2013, p. 7)

De acuerdo con la información detallada, el total del agua para uso de riego es utilizada un 20 % para cultivo de cebolla, 10 % para cultivo de granos básicos principalmente maíz, por lo que se ha implementado un canal de riego por gravedad para abastecer las zonas de cultivo, contribuyendo mejoras de calidad y reducción de insumo de agua hasta un 60 %. (Paz, 2013, p. 18)

2.12. Principales problemas de las aguas subterráneas

A través de programas de protección al lago de Güija así como el proyecto minero que ha generado información técnica y monitoreos ambientales con

apoyo de la organización AMAR, para la protección y manejo de la cuenca. Los niveles de las aguas de acuerdo con EVERLIFE (2007) muestran:

Una reflexión sometida por la topografía del noreste al sureste hacia el río Ostúa, es decir, que todas las aguas subterráneas descargan al valle principal de origen aluvial, y se tiene pérdida por efecto de la evapotranspiración, uso doméstico, uso agrícola o como flujo de agua a la laguna de Güija. (p. 2)

2.12.1. Problemas ambientales naturales

Derivado de las actividades mineras del tipo artesanal (extracciones en ríos o canteras) como aprovechamiento de metales que presentan un grado de complejidad mayor, se han presentado mayores problemas en el ámbito social por el tipo de extracción que se realiza en el área de investigación.

Por parte del personal técnico del MEM en el año 2010 se llevó a cabo un muestreo de aguas establecer o identificar los posibles contaminantes como las concentraciones atípicas de algunos elementos (principalmente arsénico) que se dirigen hacia los cuerpos de agua que desembocan hacia el lago de Güija, por lo que deducen que dichas anomalías se debe al ambiente geológico que imperan en la zona, siendo elementos que se transportan a través del medio acuático hasta surgir en las zonas de descarga del sistema como por ejemplo los manantiales calientes. Los pozos indican que contribuyen contenidos fisicoquímicos de origen

antropológico, recomendando así una vigilancia ambiental en el sistema hidrológico de dicha zona. (UGSA, 2010, pág. 42)

Como parte de la investigación realizada por el proyecto geotérmico, indica que la actividad térmica superficial se manifiesta en las comunidades de Cerro Blanco, El Tule, Bomba de Agua y Trapiche Vargas, haciendo relación que la colina Cerro Blanco está ubicada a cercanía de las fallas geológicas, haciendo una relación con las fuentes termales y las unidades litológicas-estructurales. (EVERLIFE, 2007, p. 7)

El arsénico se encuentra en aguas naturales en variables concentraciones, que son expresadas comúnmente como mg/L haciendo referencia en dicho estudio definiendo que el arsénico es movilizado de forma natural, por fluidos hidrotermales o emisiones volcánicas hacia la atmósfera, por minerales que presentan asociaciones polimetálicas (Luna, et al., 2010; Ferrecio et al., 2000 y Cáceres et al., 1992).

Se tienen instalada una planta para la eliminación de arsénico dentro de las instalaciones de Proyecto Cerro Blanco, con la finalidad de poder precipitar las concentraciones de metales pesados que están en los mantos de los acuíferos que son drenados de los de los túneles, para garantizar su funcionalidad, se llevan controles y monitoreos constantes (substracción es del 90 %), siempre y cuando cumpla con los estándares por el MARN y del Banco Mundial. (Luna et al., 2013, pág. 49)

2.12.2. Problemas ambientales antropogénica

A continuación, se presentan los problemas ambientales antropogénica.

2.12.2.1. Población

Uno de los factores muy importantes que se relacionan al cambio físicoquímico del sistema hídrico del área es el antropogénico, por lo que el crecimiento poblacional del área de investigación y el manejo de desechos sólidos por parte de la municipalidad son de suma importancia para conservar una calidad de agua óptima.

La población de la aldea Trapiche Vargas es de 1,027 personas y equivale al 19.35 % de la población total del municipio, siendo su dependencia económica principalmente la producción agrícola que comprende la producción de maíz, sorgo y frijol en forma asociada. (COMUDE, 2011, p. 15)

2.12.2.2. Manejo de desechos

El sistema de desagüe de aguas residuales y servidas, así como desechos de basura común, tiene un precio de Q.10.00 por vivienda o negocio; a un 80 % de la población del casco urbano y a 7 comunidades del área rural, indicando que las bajas recuperaciones de los ingresos de pago son muy bajos por lo que no pueden ampliar y mejorar dicha cobertura. Pero se ha

identificado que va en aumento los basureros clandestinos debido a la falta de gestión ambiental y educación entre los pobladores, identificándose un total de 20 en el año 2009. (COMUDE, 2011, p. 45)

Los residuos sólidos se han venido en aumento debido al crecimiento urbano y rural, por lo que son deficientes, generando serios daños a la salud y desarrollo del municipio si no se llegan a tomar las medidas correctivas para una buena gestión. (Plan de Desarrollo Municipal, 2011, p. 46)

2.13. Uso de suelo

El uso del suelo Asunción Mita de acuerdo con el Plan de Desarrollo Municipal el 5 % que pertenecen al total de dicho municipio, es utilizado por asentamientos por el aumento demográfico, el 25 % está siendo mal utilizado y otra fracción del 5 % está constituida por cuerpos de agua

En este sentido, el mayor uso del suelo en la región es por agricultura limpia anual (37.6 %) y matorrales (38.1 %), seguidamente está en un porcentaje menor el uso de la tierra por bosques secundarios (arbustal 10.7 %) y pastos cultivados (6.1 %). (COMUDE, 2011, p. 37)

Es evidente que la mayor actividad en el uso del suelo se debe a la agricultura y matorrales, lo que garantiza que la actividad económica de la región es por medio de proyectos de agricultura informal y formal.

2.13.1. Actividad pecuaria

“La actividad en este sector está enfocada primordialmente por ganado vacuno de engorde y ganado porcino, localizándose en las aldeas de Cerro Blanco y San Rafael Cerro Blanco, conformada por proyectos familiares y multifamiliares” (COMUDE, 2011, p. 50).

2.13.2. Actividad industrial

La actividad industrial en este sector es muy baja, identificando entre ellas la planta procesadora de leche, que producida leche en polvo, queso, crema y mantequilla, que pertenecía a la empresa Productos Lácteos (PROLAC), que actualmente pasó a ser parte de la Cooperativa Integral Ujiapa R.L. (COMUDE, 2011, p. 49)

Aunado a ello se encuentra la entidad minera Cerro Blanco que realiza la extracción de oro y plata a través de túneles.

Al norte de Asunción Mita, está autorizado el proyecto minero Cerro Blanco con número de registro LEXT-031-05, autorizado para explotar en el año 2007 por parte del Ministerio de Energía y Minas. Como expresa Menéndez (2013) “la alteración del agua se debe a su circulación natural y por su ocupación en el proceso minero modificando así sus cualidades” (p. 19).

Otro de los probables contaminantes en el área principalmente arsénico como es que se debe a la actividad antropogénica como actividad minera, procesos metalúrgicos y combustión de combustibles fósiles (Luna, et al., 2010; Ferrecio et al., 2000 y Cáceres et al., 1992).

2.14. Contaminación

El material de desechos se genera a través de varios procesos industriales, mineros y domésticos. El mayor problema de las aguas con altas toxicidades que se descarguen directamente en el ambiente, siendo una práctica muy común en el territorio nacional. Los desechos generados por la actividad antrópica en el área son generalmente descargados hacia zonas receptoras de cuerpos de agua, lo que provoca infiltración al subsuelo de contaminantes, por lo que no se tiene un control de la infiltración y plumas de contaminación que llegan hasta los mantos acuíferos. (Taylor, Owen, & Tuinhof, 2010, pág. 86)

En la industria minera, se han identificado diversos tipos de impacto generado al ambiente, como parte de la actividad de extracción de minerales. El proyecto minero Cerro Blanco con número de registro LEXT-031-05, se autorizó para la extracción del mineral a través del método de minado subterráneo, por medio de túneles y galerías, siendo necesario para realizar los avances de exploración disminuir los niveles de aguas

subterránea, por lo que utilizan el dragado del agua. (Menéndez, 2013, p. 20)

En todo tipo de actividad antrópica se genera impactos al ambiente, en el caso de la actividad agrícola, es compleja ya que es muy extensiva y no es puntual, pero de acuerdo con estudios realizados, se determinó que los sedimentos que se generan por la erosión pueden provocar un aporte de elementos o sustancias químicas, pesticidas, y nutrientes, principalmente el fósforo y el nitrógeno como uso fertilizante y crianza de animales. (Amaya, 2015, pág. 59)

3. MARCO METODOLÓGICO

La metodología que se utilizó durante la investigación se divide en dos procesos principales: cuantitativos y cualitativos, el cual se detalla a continuación:

3.1. Marco metodológico o metodología validada

A continuación, se presenta el marco metodológico o metodología validada.

3.1.1. Etapa de recopilación y análisis bibliográfico

En esta etapa se realizó la recolección de información inicial sobre estudios técnicos y científicos hidrogeológicos y geoquímicos, que aportaron un soporte bibliográfico a la investigación, así como mapas cartográficos e imágenes satelitales para verificar las condiciones del área de investigación. Los estudios preliminares regionales y locales se utilizaron de manera que se relacionó la información generada durante la investigación, para obtener información respaldada por investigaciones debidamente comprobadas experimentalmente con metodologías ya validadas que fueron implementadas en el proyecto de investigación.

3.1.2. Etapa de trabajos de campo

Esta etapa se desarrolló específicamente en el área que comprende la investigación, a través de encaminamientos en las zonas de acceso, recabando información relacionada con las condiciones geológicas, geomorfológicas, fisiográficas, hídricas y sociales.

Es importante resaltar que el acceso hacia las comunidades (aldeas, caseríos, viviendas, fincas, potreros o cualquier propiedad), se realizó en acompañamiento del personal de la municipalidad, con previa autorización por parte de los propietarios, para poder realizar el trabajo de campo lo que completa la información necesaria.

La etapa de campo se ejecutó en tres fases, que comprende en el reconocimiento y mapeo de unidades geológicas, identificación de las zonas de descarga del sistema hídrico a través de manantiales y la recopilación de información social con el uso de encuestas aleatorias en algunas comunidades que se encuentran en la zona de estudio. A continuación, se describe cada una de las fases ejecutadas en la etapa de campo.

3.1.2.1. Fase 1

Reconocimiento y mapeo de unidades litológicas y estructuras geológicas; por medio de una breve descripción de unidades, de manera que se obtuvo información geológica del área de forma superficial únicamente.

3.1.2.2. Fase 2

Se realizó un recorrido, con la visita cada una de las áreas que comprenden las estaciones de monitoreo establecidas por el MARN y el proyecto minero Cerro Blanco, obteniendo los parámetros in situ como temperatura, potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica que nos permitieron determinar las condiciones de descarga del acuífero, así también, identificar los manantiales calientes que se ubican en la zona de descarga de la microcuenca río Morán.

3.1.2.3. Fase 3

La tercera fase de campo se realizó en conjunto con la fase 1 y 2, que consiste en la utilización de la técnica de encuesta, recabando información concerniente a la población que habita en la parte baja de la microcuenca en estudio, para identificar el abastecimiento de agua de las comunidades, ya sea por medio de pozos (mecánicos o artesanales), manantiales, ríos, quebradas o por entubado municipal. Así también el uso de las aguas para actividades domésticas, agrícolas, ganaderas, entre otras.

Esta información fue utilizada para definir el impacto de las comunidades de influencia en el área de descarga de la microcuenca con relación al uso y manejo del agua, identificando las necesidades de la población para el abastecimiento del vital líquido, donde se propusieron mejoras de uso de acuerdo con su composición geoquímica.

3.1.3. Etapa de laboratorio

En el proyecto de investigación no se realizó la fase de laboratorio, debido que se utilizaron resultados de laboratorio obtenidos por la línea base del proyecto minero Cerro Blanco y la asociación AMAR, dicha información fue solicitada por información pública en el Ministerio de Energía y Minas, así también se utilizarán resultados de agua del proyecto Agua Futura, el cual se desarrolló durante el año 2019 y 2020. Las solicitudes de la información giradas a estas entidades se adjuntan en el apartado de anexos. Los análisis de laboratorio fueron analizados con el método de ICP.

3.1.4. Etapa de gabinete

En esta fase se procedió al análisis e interpretación de toda la información recabada en las fases anteriores. Primeramente, se inició con la tabulación de datos de los resultados fisicoquímicos, por medio de una base de datos en Microsoft-Excel, y se continuó con la digitalización de información. Como parte del programa de investigación se utilizó información de los resultados obtenidos parte del proyecto Agua Futura y muestreo de agua durante la fase de campo, así mismo la línea base de monitoreo de aguas, realizados por parte de la licencia minera “Proyecto Minero Cerro Blanco” y la asociación AMAR.

3.1.4.1. Método del cálculo hidrológico

El balance hídrico se realizó utilizando el software de Sistemas de Información Geográfica, y con información obtenida de tres estaciones meteorológicas del INSIVUMEH más cercanas al área de investigación, que nos permitió definir el comportamiento hídrico, haciendo uso de datos de precipitación y temperatura, logrando obtener mapas de isolíneas (precipitación) e isotermas (temperatura), que a través del modelo de Holdridge (Ho) se calculó la evapotranspiración potencial (ETP) con la multiplicación de temperatura y la constante de dicho modelo que es 58.93.

- Evapotranspiración potencial por el modelo de Holdridge (Ho)

En el modelo de Holdridge (1959) está basado principalmente en la temperatura media del aire multiplicada por un coeficiente único (C_{HO}), siendo esta una constante utilizada principalmente para regiones tropicales y subtropicales, expresada una simple expresión para estimar evapotranspiración potencial (ETP), actualmente definida como evapotranspiración de referencia

(ETO) la siguiente expresión es función de la temperatura del aire comprendida entre los 0 °C y 30 °C (biotemperatura), que determina el ritmo e intensidad de los procesos fisiológicos de las plantas [fotosíntesis, respiración y transpiración] y la tasa de evaporación directa del agua contenida en el suelo y en la vegetación. (ALLEN *et al.*,1998; ASCE-EWRI, 2005 y Vega y Jara 2009). El modelo original de Holdridge tiene la siguiente forma:

$$ETp = C_{HO} T$$

Siendo,

$$C_{HO} = 58,93 (PUT/NUT)$$

Donde,

ETp – evapotranspiración potencial mm tiempo⁻¹

T – temperatura del aire °C

PUT – periodo de unidad de tiempo, días y

NUT – número de unidades de tiempo en un año, 366 ó 365 días.

Holdridge (1959) considera que C_{HO} de 58,93 es para estimaciones anuales y 0,161 para estimaciones de evapotranspiración diarias.

- Balance hídrico (BH)

La metodología para el cálculo de balance hídrico (BH) fue a través de la relación entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP), considerando lo siguiente: $BH = P/ETP$.

$BH < 1$ = Exceso hídrico

$BH = 1$ Estabilidad hídrica

$BH > 1 =$ Déficit hídrico.

Para ello se utilizaron tres estaciones meteorológicas, que están ubicadas en los municipios de Jalapa, Jutiapa y Asunción Mita, donde se obtuvieron datos de precipitación promedio anual en milímetros y temperatura media anual en grados centígrados.

A partir de las estaciones por medio del Software ArcGIS se generaron las isoyetas de precipitación y las isotermas de temperatura para la cuenca Ostúa-Guija. Utilizando la herramienta de interpolación se generan los ráster a partir de las estaciones, y con la herramienta de contornos se crean las isotermas para la temperatura e isoyetas para la precipitación.

- Evapotranspiración potencial (ETP)

Para hallar el balance hídrico, se realizó a través del SIG con las isoyetas e isotermas, para conocer la evapotranspiración potencial EPT, calculado con la herramienta de álgebra de mapas utilizando la constante de Holdridge (1959) considera que C_{HO} de 58,93 y la temperatura. Para generar dicho cálculo se procedió a obtener el balance hídrico aplicando la fórmula de balance hídrico, utilizando datos de la precipitación y evapotranspiración potencial como se establece en la fórmula.

3.2. Método hidrogeoquímico

Para determinar las características hidrogeoquímicas, se realizó la tabulación de resultados químicos de muestreo de aguas superficiales y subterráneas, procesando los datos de forma estadística, y posteriormente fueron analizados y modelados geoquímicamente. El modelamiento geoquímico

se elaboró utilizando el software ArcGIS con la herramienta de *Spatial Analyst Tools*, específicamente con el método de “*Kriging*” para observar el comportamiento elemental en las aguas superficiales.

El método *Kriging* es un método de interpolación que usa para generar nuevos valores en base a unos ya conocidos, son utilizados principalmente para estimar la distribución de algunas concentraciones. Las isoyetas son líneas generadas por un *ráster* que es el producto de la interpolación de los puntos que tiene la interpolación del área de estudio, posterior a este *ráster* se extraen las curvas mediante la herramienta de contorno del ArcGIS, para obtener las isoyetas, lo que permitió tener una interpretación del comportamiento elemental de las aguas superficiales y subterráneas del área de descarga de la microcuenca río Morán.

3.2.1. Clasificación de tipos de aguas

La metodología utilizada para la clasificación de aguas según el contenido de aniones y cationes, a través de diagrama de PIPER y STIFF. El diagrama de Piper-Hill-Langelier es un diagrama triangular que representa los resultados en tres componentes que en su totalidad deben representar un 100 % en su composición. Consiste en dos triángulos equiláteros que representa el tipo de aguas según su contenido de aniones y cationes, y en un rombo se proyecta el contenido de los de los triángulos para establecer el tipo de aguas, lo cual permite establecer de forma directa el tipo de agua en relación con las facies hidroquímicas.

Los diagramas de Stiff consisten en polígonos que representa la distribución geográfica de la composición de las aguas, que consiste en tomar, sobre semirrectas paralelas, segmentos proporcionales a la concentración de

cada ión y catión (meq/L), y por último unir los extremos para formar un polígono. Con el diagrama de Stiff se puede representar la variación entre aniones y cationes según su contenido, con polígonos orientados, y con ello determinar las características básicas del agua.

3.3. Técnicas de análisis de información

Se elaboraron histogramas de los datos obtenidos de la línea base y su comportamiento elemental, así como gráficas, por medio de los porcentajes de frecuencia acumulada, para observar el comportamiento geoquímico del agua. La distribución geoquímica del agua se analizó mediante la elaboración de mapas isovalóricos, con el método de interpolación espacial utilizando técnicas y programas de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS.

Entiéndase por interpolación un procedimiento matemático que se utiliza para predecir el valor de un atributo en una localización precisa a partir de puntos vecinos ubicados en el interior de la misma región, donde el de la mínima curvatura trata de generar una superficie de interpolación.

3.3.1. Método cuantitativo

Este método consiste en las observaciones en campo y recolección de datos y antecedentes del área, los cuales fueron sometidos a procesos lógicos y análisis, finalizando por medio de discusiones de resultados y conclusiones según los objetivos y planteamiento del problema.

Como parte importante en el procesamiento de datos de información, se utilizó para ello el análisis bivalente a través de correlación lineal con el método de Pearson únicamente para verificar el comportamiento gráfico de los datos no

para obtener un modelo matemático. Así mismo se elaboraron histogramas de los datos obtenidos de la línea base y su comportamiento elemental.

3.3.2. Método cualitativo

Se realizó un levantamiento geológico a través de información obtenida en la fase de campo, por medio de caminamientos por veredas, caminos, quebradas y acceso donde fue posible observar los afloramientos de las unidades geológicas de forma superficial, definiendo su ubicación espacial y clasificación de acuerdo con sus características macroscópicas. Con dicha información se determinó la distribución geológica del área de investigación, para poder definir la relación según las concentraciones químicas de las aguas.

Al obtener los resultados cuantitativos, se procedió al análisis cualitativo de la información a través de la caracterización de las aguas y cartografía geológica, generando un modelo geoquímico conceptual del área. La distribución geoquímica del agua se analizó mediante la elaboración de mapas isovalóricos, con el método de interpolación espacial utilizando ArcGIS con la herramienta de *Spatial Analyst Tools*, específicamente el método de “*Kriging*”. Entiéndase por interpolación un procedimiento matemático que se utiliza para predecir el valor de un atributo en una localización precisa a partir de puntos vecinos ubicados en el interior de la misma región, donde el de la mínima curvatura trata de generar una superficie de interpolación.

4. RESULTADOS OBTENIDOS, CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS

4.1. Fisiografía

- **Suelos**

El área de estudio se encuentra comprendida dentro de la microcuenca Río Morán, específicamente en la zona de descarga del sistema hídrico, por lo que es importante detallar cada una de las unidades de suelo de acuerdo con la clasificación de Simmons, definiendo que el área de está conformada principalmente por suelos de origen volcánico.

De acuerdo con esta clasificación se encuentran los suelos Culma (Cul) que están en dirección noreste del área de investigación; poseen un buen drenaje con una textura franco-arenosa a arenosa. Seguidamente tenemos los suelos Suchitan (Sui) que conforma la parte suroeste de la microcuenca, son desarrollados de cenizas volcánicas, con una textura franco-arenosa a franco, con un relieve muy inclinado.

Al sureste encontramos el suelo Güija (Gu) que va con dirección hacia el lago de Güija, que son desarrolladas de rocas de origen metamórficas, con una textura arcillosa muy fina; y hacia el sur encontramos los suelos de Valles (SV) que se han desarrollado en la zona más plana de la región. En la parte alta de la microcuenca encontramos los suelos Jalapa (Jl) que son provenientes de ceniza volcánica y tobas, con un drenaje excesivo de textura franco-arenosa muy fina.

- Uso de suelo

De acuerdo con la categorización del uso de suelos de acuerdo con Simmons, el área que comprende la microcuenca río Morán está comprendida en su mayor porcentaje por matorrales y seguidamente por pastizales, que se distribuyen en toda la microcuenca, y pequeñas secciones el suelo es utilizado para agricultura anual. En la parte sur donde se ubica la zona de descarga de la microcuenca en estudio, con una topografía más plana, se encuentran los cultivos permanentes herbáceos y una pequeña fracción de área boscosa.

“La región está comprendida en una zona de alta producción agrícola, principalmente por cultivos de maíz, sorgo y frijol en forma asociada” (COMUDE, 2011, pág. 15). Durante la etapa de campo es evidente que el cultivo de melón y sandía es muy extensivo, ya que la mayoría de las zonas con una topografía plana, están siendo aprovechadas por este tipo de cultivo, por lo que se tienen grandes hectáreas cubiertas por este tipo de actividad agrícola como se logra observar en la fotografía aérea.

Figura 2.

Cultivo de melón en la microcuenca río Morán e imagen satelital



Nota. Fotografía panorámica de cultivo de melón en el área de estudio, imagen satelital que remarca la zona cultivada con dicho producto. Elaboración propia.

La ganadería es una actividad económica principal en la región oriental, específicamente en esta zona se cuenta con varias propiedades que están siendo utilizadas para crianza de ganado vacuno, tanto en zonas con topografía plana como quebrada, donde el suelo es utilizado para la siembra de pastizales para su alimento.

Figura 3.

Ganado vacuno en el área de la microcuenca río Morán



Nota. Fotografía panorámica de zona utilizada para ganado vacuno en el área de estudio, imagen satelital que remarca la zona productiva. Elaboración propia.

En la parte más alta de la microcuenca, el suelo está cubierto por vegetación nativa de la región, que no ha tenido alguna intervención humana, observando un suelo muy poco desarrollado, debido a las condiciones particulares de la región por su baja precipitación y proceso de meteorización del material rocoso.

Figura 4.

Área cubierta con vegetación nativa de la región



Nota. Fotografías que muestran la cubierta vegetal nativo del área, principalmente en las partes más altas. Elaboración propia.

4.1.1. Geomorfología local

El área de la microcuenca río Morán se encuentra dentro de la cuenca Ostúa-Güija, con una dimensión aproximada de 81.26 km², que cuenta como río principal “Morán”, que drena con dirección noroeste-sureste tributando varias quebradas. Las pendientes del área van desde 0 grados hasta 45 grados aproximadamente que topográficamente la microcuenca posee una pendiente mayor en la parte norte en los conos volcánicos y hacia el oeste donde se ubica otra secuencia de dichos conos.

En el área de investigación se caracteriza por encontrarse en un ambiente geomorfológico volcánico, es decir, las geoformas que presenta están construidas por procesos eruptivos magmáticos ya sea de forma explosiva o lávico, entre otras, que puede generar desde pequeños conos volcánicos hasta mesetas de lava de grandes extensiones, siendo importante considerar que la composición del material volcánico (magmas) van a determinar en gran manera el comportamiento morfométrico como la generación de cráteres, laderas volcánicas, mesetas o coladas de lava.

En la parte norte de la microcuenca se encuentra una secuencia de conos volcánicos que han sido definidos como conos volcánicos (CV) del sistema volcánico Suchitán. Estos presentan una pendiente mayor a 50 grados, y se distribuyen de forma secuencial con una alineación preferencial Norte-Sur, así como conos aislados en la parte central del área de estudio.

Figura 5.

Conos volcánicos en el área de estudio de la microcuenca río Morán



Nota. Fotografía panorámica de la unidad geomorfológica definida como conos volcánicos. Elaboración propia.

Dentro del mismo ambiente volcánico se presenta la planicie volcánica (PV) como se muestra en la Figura 6, ubicada al sur de la microcuenca Morán, es decir, en la parte más baja de la zona de descarga del sistema hídrico, con una pendiente que va de 0 a 3 grados.

Figura 6.

Planicie volcánica en el área de estudio de la microcuenca río Morán



Nota. Fotografías de la unidad geomorfológica definida como planicie volcánica, ubicada principalmente al sureste del área de estudio. Elaboración propia.

Se tienen las montañas volcánicas (MV) que están formadas por material volcánico con pendiente media, que abarca la mayor cantidad de área montañosa.

Figura 7.

Montañas volcánicas en el área de estudio de la microcuenca río Morán



Nota. Fotografías de la unidad geomorfológica definida como montañas volcánicas, coordenadas GTM, Y1585871-X594521, ubicada principalmente en el área montañosa. Elaboración propia.

Otro tipo de ambiente identificado es el fluvial, que consiste en la formación de canales a partir de corrientes de agua que transportan sedimentos sobre la superficie, por lo que aceleran el proceso erosivo y de acumulación esto de acuerdo con el grado de pendiente que presente y a la carga hidráulica, formando diversas geoformas como valles aluviales, llanuras aluviales, llanuras de inundación, así como terrazas aluviales. El río Morán representan una de las geoformas aluviales más importantes, que va a desembocar con dirección sur hacia el río Ostúa, formando así un valle aluvial.

4.2. Geología local

El área de estudio se encuentra ubicada geológicamente en una zona con actividad volcánica, lo que ha desencadenado un sistema hidrotermal activo, acompañado de un régimen estructural bajo el arco volcánico de Centroamérica.

Conformado generalmente por unidades de rocas volcánicas y sedimentos del terciario y cuaternarios. Durante el proceso de investigación, se realizó la etapa de campo a través de un recorrido por el área, así mismo con información geológica obtenida por el Proyecto Minero Cerro Blanco a través de las entidades del Ministerio de Energía y Minas y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, se detallan las unidades geológicas principales que se distribuyen de forma superficial, que fue elaborado a escala 1:50,000, donde las unidades geológicas digitalizaron en base a información del proyecto minero Cerro Blanco y visita de campo.

4.2.1. Unidad de depósitos terciarias

Está compuesta principalmente por rocas volcánicas provenientes de flujos de lava de basaltos y sedimentos volcánicos, que se distribuyen a en la zona desde sedimentos a lo largo de las riberas de los tributos de agua, como en los flancos y faldas de algunos conos volcánicos. Estas rocas se han definido como las más recientes. Los sedimentos que son transportados constantemente por la hidráulica de los cuerpos de agua presentan fragmentos de diversos diámetros sub redondeados que van de gravas a limos, de rocas ignimbritas, calizas, conglomerados entre otras principalmente de origen volcánico.

Figura 8.

Unidad de depósitos terciarios, aluvión



Nota. Fotografía de la unidad geológica de depósitos de aluvión, en los márgenes del río Ostúa.
Elaboración propia.

4.2.2. Unidad de depósitos coluviales

Están comprendidos por rocas basálticas con bloques que van de 1.5 metros a 30 centímetros de diámetro aproximadamente con aristas angulosos, que da indicios de un transporte por gravedad proveniente de erupciones volcánicas basálticas de esta región. El suelo desarrollado en esta zona posee una coloración rojiza debido a la alteración por meteorización o agentes externos de los piroxenos y anfíboles que están presentes en esta unidad.

Figura 9.

Unidad de coluviones



Nota. Fotografías de la unidad geológica de coluviones. Elaboración propia.

Los minerales que se pueden observar macroscópicamente en el basalto son en su mayor porcentaje las plagioclasas, presenta una composición mineralógica con una matriz de plagioclasas y un mínimo porcentaje de olivinos.

Figura 10.

Depósitos de coluvión



Nota. Fotografías de la unidad geológica de coluviones de basaltos macroscópicamente. Elaboración propia.

El grupo Mita se ha considerado como el grupo más antiguo, esto de acuerdo con investigaciones realizadas por el proyecto minero Cerro Blanco, quienes han definido a través de perforaciones la intercepción de este grupo probablemente de edades del Paleoceno-Eoceno, compuesto por rocas de origen volcánico y sedimentario

4.2.3. Unidad de rocas volcánicas

Dentro de las unidades que corresponden a rocas ígneas se encuentran los depósitos ignimbríticos, lavas riolíticas y dacitas de edad Oligocénico-Miocénicas que clasificadas dentro del grupo Padre Miguel.

4.2.3.1. Flujos basálticos

La unidad de roca de flujos basálticos se distribuye en la mayor parte del área de investigación, siendo importante considerar que el volcán Suchitan está ubicado al Oeste del área y el volcán Ixtepeque al Norte, siendo esta unidad proveniente de la actividad volcánica de esta región. Las rocas basálticas presentan una estructura relacionada con procesos post-eruptivos por meteorización denominado como estructuras en piel de cebolla, esta fue evidente en los afloramientos en quebradas al norte del área de estudio, con suelos de coloración rojiza, que ha sido generado por la oxidación de piroxenos y anfíboles. Presenta una composición mineralógica con una matriz de plagioclasas y un mínimo porcentaje de olivinos, con minerales accesorios como ortopiroxenos y magnetita. (Barrera, 2016, p. 50)

Figura 11.

Flujos basálticos, aflorando en coordenadas GTM Y 1585043-E589524



Nota. Fotografías de la unidad geológica de flujos de basaltos, aflorando principalmente en los márgenes de los ríos, coordenadas GTM Y1585043-E589524. Elaboración propia.

4.2.3.2. Unidad de Toba (Tb)

La unidad de Toba (Tb) aflora en la carretera que conduce a la aldea Cerro Blanco y se distribuye principalmente en la propiedad que comprende el proyecto minero, esta posee una textura fanerítica y porfirítica con fenocristales subhedrales, con una composición mineralógica de acuerdo con descripción macroscópica de cuarzo, vidrio, minerales opacos y fragmentos líticos, en contacto discordante con la unidad de basalto.

Figura 12.

Unidad de Toba (Tb)



Nota. Fotografías de la unidad geológica de Toba, aflorando a un costado de la carretera que conduce hacia la aldea Cerro Blanco. Elaboración propia.

4.2.3.3. Unidad de flujo dacítico (Tb)

El afloramiento identificado durante la etapa de campo que corresponde a la unidad de flujo dacítico, se ubica en el corte de carretera que conduce hacia la aldea Cerro Blanco, que presenta una coloración gris clara, con fenocristales principalmente de cuarzo y feldespatos sódicos, con una matriz vítrea.

Figura 13.

Unidad de Dacita (Dt)



Nota. Fotografías de la unidad geológica de Dacita, aflorando a un costado de la carretera que conduce hacia la aldea Cerro Blanco. Elaboración propia.

El área de investigación se encuentra geológicamente ubicada al norte del arco volcánico de Guatemala y al sur de la falla de Jocotán. Las fallas que imperan regionalmente se encuentra la falla Cuilco-Chixoy-Polochic, el sistema de falla Motagua y sistema de falla Jocotán, pero tiene un comportamiento estructural de acuerdo con la traza del Graven de Ipala y al sur de la falla de Jocotán.

En el capítulo de anexos, se muestra el comportamiento preferencial de los lineamientos, siendo Norte-Sur lo que se podría asociar al fallamiento del graven de Ipala.

4.3. Características hidrológicas de la cuenca

A continuación, se presentan las características hidrológicas de la cuenca.

4.3.1. Morfometría de la microcuenca

La microcuenca río Moran está comprendida por un área de 81.26 km², pero el área de descarga en estudio es de 40 km², para este cálculo fue necesario utilizar el total del área de la microcuenca, y así entender el comportamiento de esta, para definir sus características físicas, se procedió a realizar el cálculo del índice de Gravelius, factor de forma y factor de alargamiento.

4.3.1.1. Parámetros de forma

- Forma de la cuenca

Estas características son importantes debido a que están relacionadas con el tiempo que le toma al agua desde las partes altas (parteaguas) o extremos hasta llegar al punto de salida de la microcuenca.

$$Cg = P \div (2\sqrt{\pi(A)}) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

Cg: Coeficiente de Gravelius

P: Perímetro de la cuenca en Km

A: Área de la cuenca en Km²

Cg1 1.00 – 1.25: Cuenca redonda a oval redonda

Cg2 1.25 – 1.50: Cuenca de oval redonda a oval oblonga

Cg3 1.50 – 1.75: Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga

De acuerdo con la fórmula establecida, se realizó el cálculo utilizando los datos que se encuentra en la tabla IV, donde se obtuvo un coeficiente de compacidad de 1.27, y de acuerdo con la clasificación anterior, se puede definir que la microcuenca Río Morán corresponde a una cuenca de oval redonda a oval oblonga.

$$Cg = (40.9 \text{ km}) \div (2\sqrt{\pi(81.26 \text{ km}^2)}) = 1.27$$

- Factor de forma

El factor de forma se definió como un parámetro que determina la tendencia de la cuenca, para ello se utilizó la fórmula de factor, donde el área de la microcuenca es dividida por la longitud de la misma elevada al cuadrado.

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

F: Factor de forma

L: Longitud de la cuenca en Km (8.079 Km)

A: Área de la cuenca en Km² (42.98 Km²)

$F > 1$: Cuenca achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

$F < 1$: Cuenca alargada, baja susceptibilidad a las avenidas

Según el cálculo realizado se obtuvo un factor de forma de 0.458, lo que se podría definir como una cuenca alargada, de baja susceptibilidad a las avenidas.

$$F = \frac{81.26}{13.32^2} = 0.458$$

- Índice de alargamiento

El índice de alargamiento nos va a definir de acuerdo con la forma de la cuenca el comportamiento que tiene como lo es el movimiento del agua en los drenajes y el arrastre, haciendo referencia a los parámetros de longitud y ancho, según se detalla en la siguiente fórmula:

$$I_a = \frac{L}{B} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

I_a : Índice de alargamiento

L_m : Longitud máxima Km

B_m : Ancho mayor Km

$I_a > 1$: Cuenca alargada

$I_a \approx 1$: Cuenca achatada y por lo tanto el cauce principal es corto

Se obtuvo un índice de alargamiento de 1.48, lo que se puede definir que la microcuenca en estudio es alargada ya que el resultado es menor a 1.

$$I_a = \frac{13.45}{9.050} = 1.48$$

4.3.1.2. Parámetros de relieve

- Pendiente media del cauce (j)

Se define como la relación entre el desnivel de la altitud del cauce y su longitud, como se detalla en la siguiente fórmula:

$$j = \frac{DA}{L} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

DAC: Es el desnivel de altitud en km

L: Longitud del cauce

$$j = \frac{0.7 \text{ km}}{15.29 \text{ km}} = 0.045$$

4.4. Hidrología de la microcuenca

De acuerdo con la disponibilidad de información de tres estaciones meteorológicas como precipitación y temperatura, se realizó el cálculo de la cuenca Ostúa-Güija a través de software de Sistemas de Información Geográfica, que permitió definir el comportamiento hídrico, generando a través de esto mapas de isolíneas (precipitación) e isotermas (temperatura), que a través del modelo

de Holdridge (Ho) se calculó la evapotranspiración potencial (ETP) con la multiplicación de temperatura y la constante de dicho modelo que es 58.93.

Con el resultado de los mapas de ETP y de isolíneas se realizó un cálculo algebraico de mapas para obtener el Balance Hídrico –BH- de la cuenca Ostúa-Güija, utilizando la relación de Precipitación dividido con la ETP. De acuerdo con los resultados obtenidos en el BH se estableció el exceso, estabilidad y déficit hídrico de la cuenca.

- $BH < 1$ = Exceso hídrico
- $BH = 1$ Estabilidad hídrica
- $BH > 1$ = Déficit hídrico

Como resultado obtenido de este cálculo y de acuerdo con los mapas generados, el comportamiento de disminución de temperatura y aumento de precipitación en la zona noroeste de la microcuenca establece que el balance hídrico es mayor a 1 en la zona noroeste, por lo que hay un exceso hídrico abarcando los municipios de San Carlos Alzatate, Monjas y cabecera departamental de Jalapa.

En la zona central se tiene una estabilidad hídrica que comprende los municipios de Santa Catarina Mita, El Progreso, cabecera departamental de Jalapa y San Manuel Chaparrón principalmente, y en la parte sureste se tiene un déficit hídrico con dirección hacia El Salvador, que abarca los municipios de Asunción Mita, Atescatempa, Agua Blanca y Concepción Las Minas principalmente, siendo evidente que el déficit abarca el municipio de investigación.

La microcuenca río Morán presenta un comportamiento con mayor precipitación siendo de 1257.42 mm aproximadamente en la parte noroeste y temperatura menor de 24.75 °C, y una precipitación menor hacia el sureste siendo de 1138.09 mm y temperatura mayor de 26.09 °C. Con ello se obtuvo un cálculo de balance hídrico de 0.86 en la parte alta y 0.74 en la zona sur de descarga, presentando mayor déficit hídrico en la descarga.

En el capítulo de los anexos, se muestra un resumen del cálculo de balance hídrico de la cuenca Ostúa-Güija, con un 41.17 % de déficit hídrico, un exceso de 16.44 % y un 42.38 % de estabilidad hídrica del total del área de superficie. En el caso de la microcuenca Río Morán presenta un déficit, siendo este mayor con un 35.35 % del área total de la microcuenca.

4.5. Características hidrogeoquímicas de las aguas

A continuación, se presentan las características hidrogeoquímicas de las aguas.

4.5.1. Estaciones de monitoreo de agua superficial y subterránea

Para establecer el comportamiento geoquímico tanto de las aguas superficiales como subterráneas, se describieron las estaciones monitoreadas tanto por el proyecto minero Cerro Blanco, con acompañamiento de la Asociación de Monitoreo Ambiental (AMAR) y algunos puntos de interés por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para control y seguimiento de dicha actividad minera. Por lo que se obtuvieron los resultados de análisis fisicoquímicos de algunos puntos de aguas superficiales y subterráneas, como de nacimientos y manantiales que fueron evaluaron desde el año 2015 hasta el

año 2019. Dentro de la información evaluada se encuentran algunos puntos monitoreados por la Cooperación Italiana debido a que se ha considerado como sitio piloto de investigación como parte de la Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos.

En la Figura 14 y la Tabla 1 se presentan los puntos de monitoreo evaluados con sus respectivas coordenadas en sistema UTM WGS84 zona 16 con descripción de ubicación.

Dentro de los resultados obtenidos por parte del MARN, MEM, AMAR y Cooperación Italiana, no todos los puntos de monitoreo presentan información homogénea de todos los elementos analizados, por lo que se analizaron y complementaron de acuerdo con su disponibilidad. En el apartado de Anexos 6 se adjuntan las cartas de solicitud correspondiente de la información ante estas entidades para ser utilizada la información para la presente investigación.

Figura 14.

Ubicación de estaciones de monitoreo



Nota. Mapa que muestra la localización del área de investigación, con sus respectivas estaciones de monitoreo. Elaboración propia, realizado con SIG.

Tabla 1.*Estaciones de monitoreo superficial y subterránea y parámetros de medición*

Estaciones	X	Y	Observaciones	pH	OD (ppm)	CE (μS/c)	T (°C)
SW-4	211376	1586706	Río Tancushapa, aguas arriba	7.69	3.40	387	25
SW-6	216703	1586886	Río Morán, aguas arriba	7.80	4.64	240	30.26
SW-7	214444	1585913	Puente de Tablas	8	4.72	935	25.05
SW-8	209731	1585966	Río Grande de Mita, aguas arriba	8.63	10.97	299	32.29
SW-9	216583	1585139	Río Morán, aguas abajo	7.75	5.12	405	25.79
SW-13	216711	1585060	Río Ostúa, después de la confluencia río Morán	7.84	5.99	441	728.72
MW-10	212165	1587079	Pozo de Monitoreo Campo	6.88	1.52	629	42.13
MW-2.2	212232	1587080	Pozo de Monitoreo El Salitre	6.61	3.06	1707	38.41
HS-5	215990	1586798	Agua termal, Trapiche Vargas	6.88	2.34	3650	100
DPT-1	212460	1588444	Descarga de Planta de Tratamiento	8.39	6.43	2443	29.58
EPT -1	212345	1588400	Entrada de Planta de Tratamiento	8.24	3.76	2331	29.58
MW-14	212501	1588252	Pozo de Monitoreo Proyecto	6.81	2.40	2080	33.89
MWL-1	212258	1588506	Pozo de Monitoreo Lodos	6.25	3.15	1152	32.06
HS-1	212405	1587238	Manantial termal	6.25	4.43	2832	45.29
NTV	214569	1588055	Nacimiento	7.89	5.24	218	27.67

Nota. Ubicación de las estaciones de monitoreo y parámetros de medición obtenidos. Elaboración propia.

Durante la fase de campo se realizó el recorrido en algunos puntos de monitoreo donde fue posible el ingreso, por lo que se obtuvo el acompañamiento por parte de personal de la Municipalidad de Asunción Mita Jutiapa, AMAR y personal del Proyecto Minero Cerro Blanco, debido a que algunos puntos de monitoreo se encuentran dentro de las propiedades de dicho proyecto.

El equipo utilizado para medición es un multiparamétrico, obteniendo los parámetros como temperatura, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, así como una sonda para medición de nivel freático de los pozos de agua de control que se encuentran dentro del proyecto minero Cerro Blanco. En el Apéndice 1 se realiza una breve descripción de algunos puntos de monitoreo más significativos que fueron visitados.

4.6. Clasificación de las aguas superficiales y subterráneas con el método de *Stiff* y *Piper*

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de información pública proporcionados por el MARN, MEM y AMAR, se procedió a la tabulación de aniones y cationes de las diferentes estaciones de monitoreo. Para dicho análisis se utilizaron los diagramas de *Piper* y *Stiff* para clasificar las aguas de acuerdo con su composición química presente, tanto en aguas superficiales como en aguas subterráneas.

Para identificar los puntos de monitoreo y los resultados obtenidos, fueron analizados a partir del año 2015 y año 2019, realizando una comparación del comportamiento durante estos años. Con la utilización del software HatariChem se graficaron los resultados de contenido de aniones y cationes en miligramos por litro mg/L y fueron ubicados espacialmente en un mapa para su representación espacial de acuerdo con los puntos o estaciones de monitoreo, los diagramas de *Stiff* que presentan una colocación azul corresponden a aguas superficiales, los de color verde a nacimientos de agua o manantiales y los de color marrón representan aguas subterráneas, es decir provenientes de pozos.

Según los resultados obtenidos en este tipo de diagramas, en el año 2015 las aguas superficiales tienen un comportamiento químico muy similar, siendo

aguas con mayor contenido de bicarbonatos y carbonatos, caso contrario a las aguas de origen hidrotermal, que representan mayor concentración de cloruros y sodio, lo que las define como aguas del tipo cloruradas sódicas, al igual que el manantial hidrotermal de Trapiche Vargas que se clasifica como clorurada sódica.

La representación en el diagrama de Piper (ver figura 4.3 en Anexo 4), se observa que los pozos de agua subterránea identificados como MWL-1 y MW-14 como aguas típicas de un ambiente de aguas subterráneas con ciertas concentraciones de yeso, por lo que se ubican en la sección superior del diagrama.

Otra proporción de estaciones se ubica en la sección izquierda, por lo que se consideran como aguas cálcicas bicarbonatadas que podría corresponder a aguas poco profundas con recargas de agua superficial, por lo que ahí están ubicadas las estaciones de monitoreo de aguas superficiales como SW-3, SW-4, SW-5, SW-8, SW-13.

Otra sección de datos que se ubica en la parte derecha que corresponden a aguas de origen subterráneo como lo son las estaciones HS5, MW-2.2, ETP-1, DTP-1 que son típicas de aguas de mezcla con el sistema profundo, y una última estación que se ubica en la parte central inferior los puntos de aguas superficial SW-7, SW-9 y el pozo MW-10 que corresponden también a aguas de mezcla con interacción hidrotermal, y el pozo MW-14 que corresponden a aguas más profundas que se encuentran influenciadas por el intercambio iónico.

Los resultados de monitoreo del año 2019 fueron proyectados de la misma manera que la del año 2015, logrando observar que el comportamiento elemental tanto en las aguas superficiales y subterráneas es muy similar, teniendo mínimas

varianzas en su clasificación. Es muy evidente que las aguas poseen una carga de ciertos elementos químicos que son muy representativos de la región, siendo aguas superficiales con concentraciones de iones de carbonatos y bicarbonatos, pero en el caso de las aguas subterráneas tienen cierta particularidad de altas concentraciones de cloruros y sulfatos.

En el capítulo de anexos se grafican los resultados del comportamiento iónico tanto de las aguas superficiales como subterráneas del año 2019, es evidente que el pozo MW-14 está en la parte superior del gráfico típico de un ambiente de aguas subterráneas con ciertas concentraciones de yeso, pero a diferencia del año 2015, el pozo MWL-1 está en la parte izquierda clasificando las aguas muy poco profundas y relacionadas con las aguas superficiales.

4.7. Modelo hidrogeoquímico conceptual según los parámetros fisicoquímicos de las aguas y su interacción

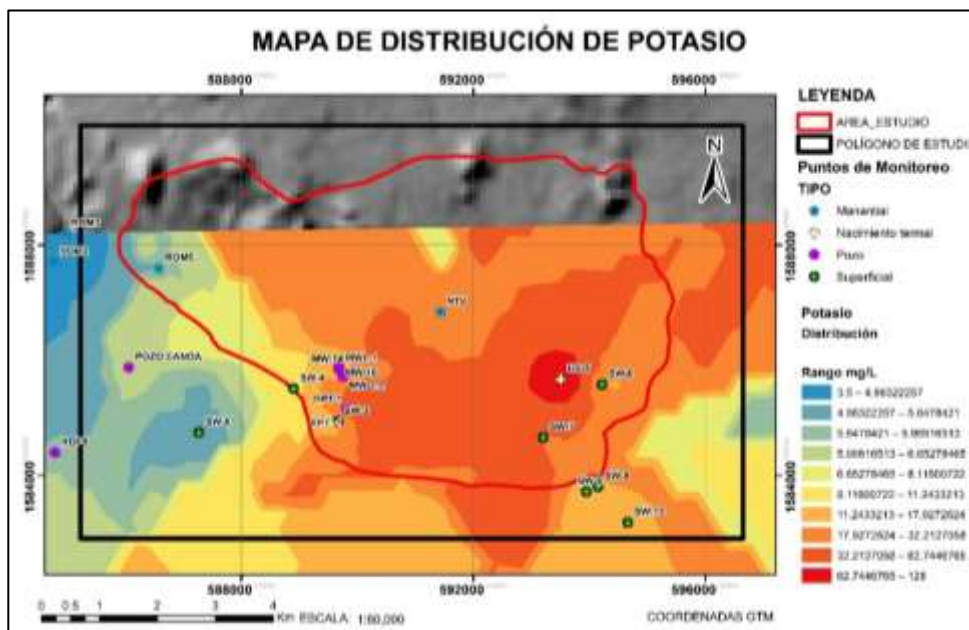
Para realizar el análisis geoquímico de las aguas y su comportamiento elemental de acuerdo con la interacción con el sistema hidrotermal de la zona de estudio, fue necesario evaluar de forma espacial algunos elementos que se consideraron claves para definir el comportamiento geoquímico de los sistemas de agua superficial y subterráneo, para ellos se utilizó el software de Sistemas de Información Geográfica.

Es importante indicar que, en la proyección, se tomaron en cuenta únicamente los puntos de las estaciones de monitoreo de agua, ya que la metodología aplicada es por medio de interpolación de datos, que tiene la finalidad de generar nuevos valores en base a los que ya tenemos conocidos, lo que genera isoyetas que interpola las concentraciones entre cada punto evaluado.

Los elementos fueron analizados de manera individual con la herramienta de interpolación Kriging de SIG, se pudo visualizar el comportamiento elemental de acuerdo con sus concentraciones. A continuación, se muestran los modelos de concentración de elementos en las aguas superficiales y subterráneas del área de investigación.

Figura 15.

Modelo químico de distribución de potasio



Nota. Distribución química de concentración de los elementos fosforo, fosfatos, aluminio y potación. Elaboración propia, realizado con SIG.

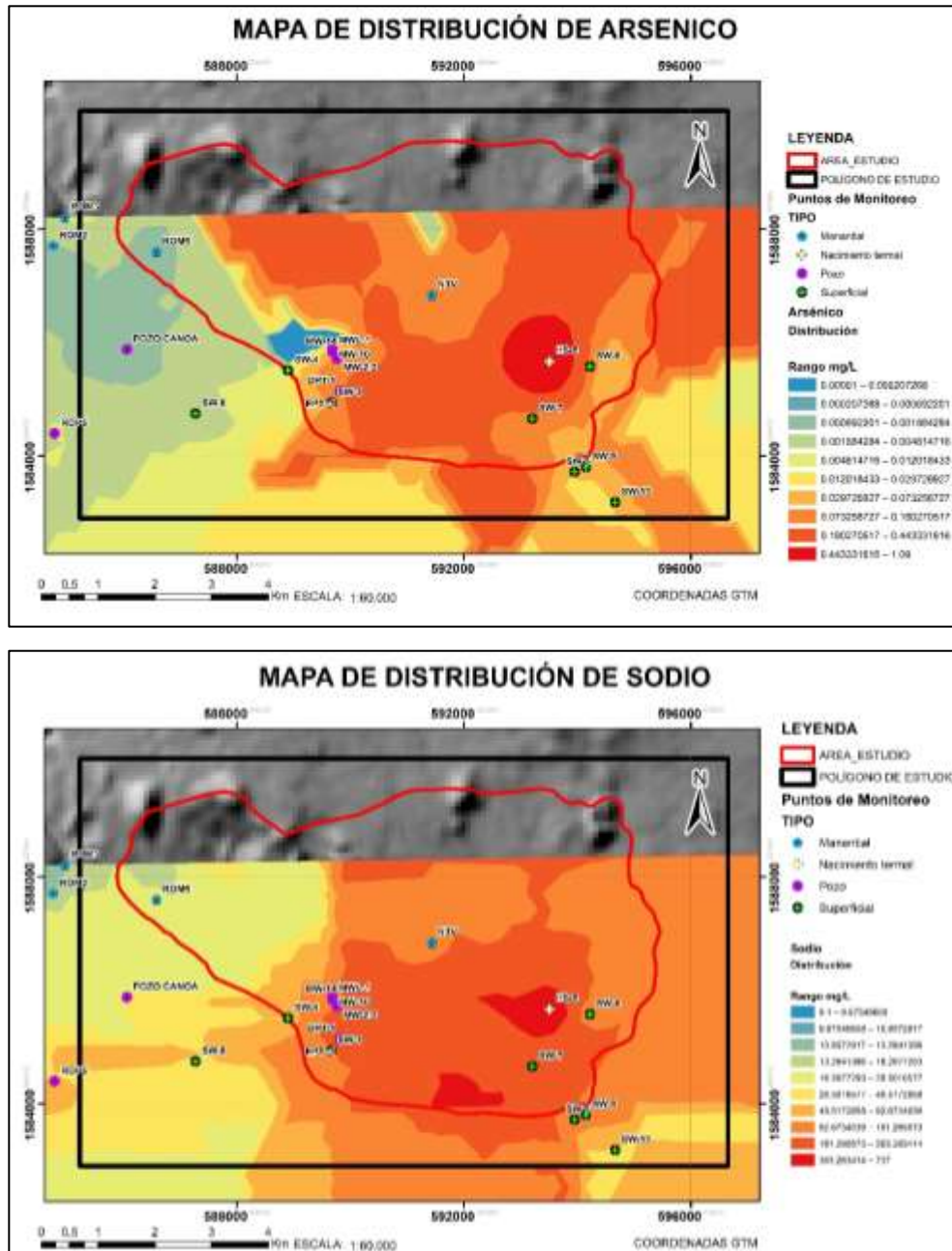
La distribución espacial de los elementos y potasio están en la parte sureste de la zona de descarga de la microcuenca en estudio, concentrado principalmente en el manantial de agua termal Trapiche Vargas HS-5. En el caso del elemento aluminio, la mayor concentración está al suroeste del área, específicamente en la zona donde se ubica el punto de monitoreo SW-8 que es

aguas arriba del río Grande de Mita, con un potencial de hidrógeno de 8.63, oxígeno disuelto de 10.97 ppm y conductividad eléctrica de 299 $\mu\text{S}/\text{c}$.

Los elementos de arsénico, cloro, boro y sodio han sido modelados y se detallan en la figura 4 y 5, son elementos indicadores de un ambiente hidrotermal, ya que nos pueden aportar las interacciones que existen en el sistema. Considerando lo anterior, se puede observar en los modelos de distribución, que la mayor concentración de los elementos antes mencionados está concentrada principalmente en la zona de pozos cercanos al proyecto minero y el manantial termal Trapiche Vargas, lo que es indicativo que existen interacciones de aguas muy profundas de sistemas termales activos.

Figura 16.

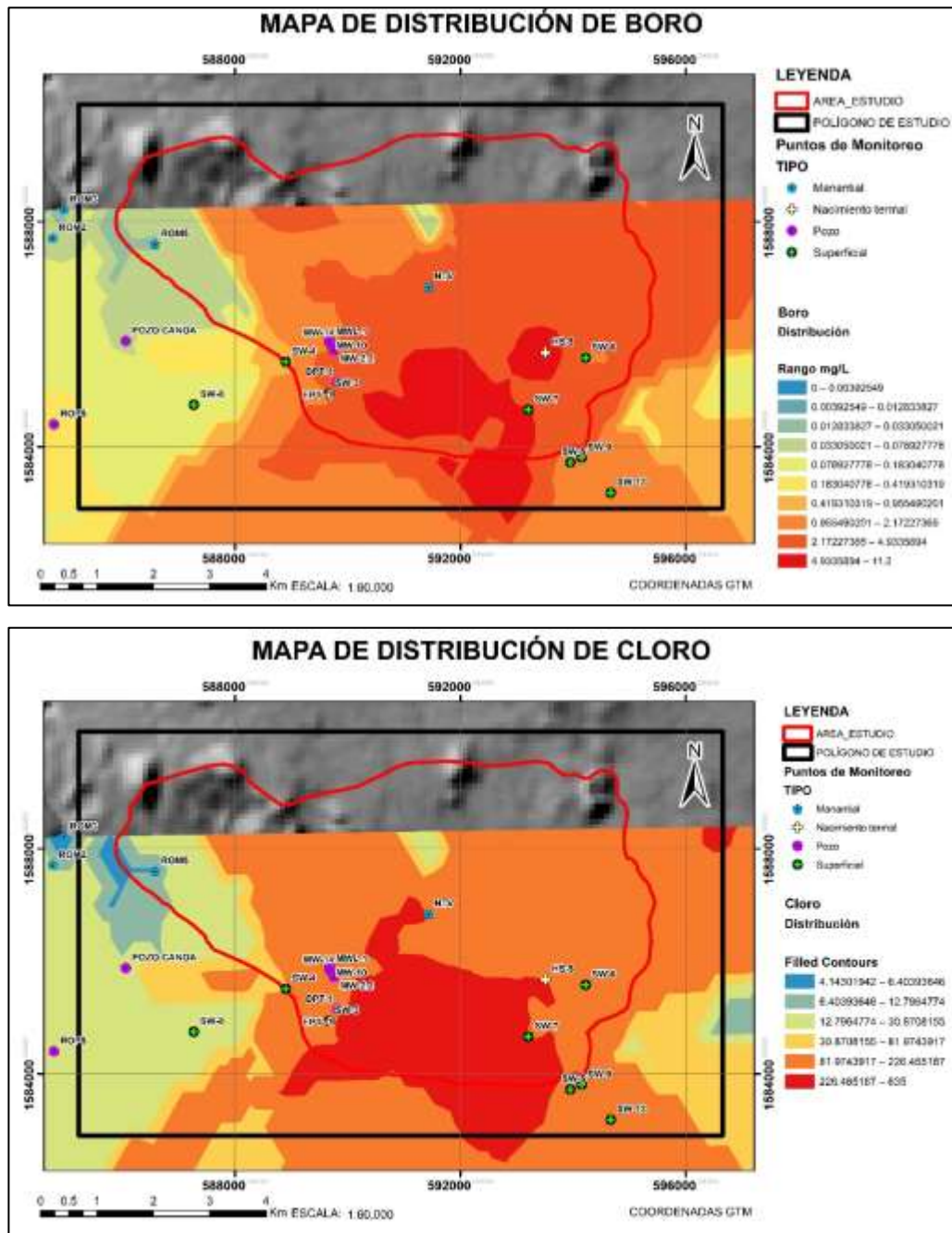
Modelo de distribución de arsénico y sodio



Nota. Distribución geoquímica de concentración de los elementos arsénico y sodio. Elaboración propia, realizado con SIG.

Figura 17.

Modelo de distribución de cloro y boro



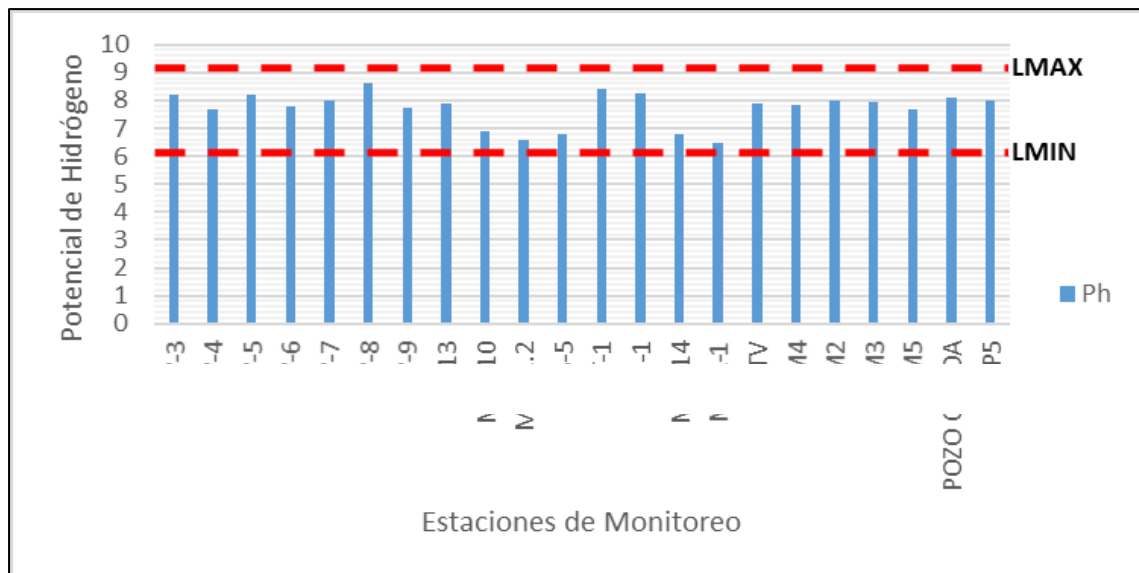
Nota. Distribución geoquímica de concentración de los elementos boro y cloro. Elaboración propia, realizado con SIG.

4.8. Relación geoquímica que tienen las aguas superficiales y someras con las aguas profundas

Las aguas superficiales y subterráneas fueron analizadas con los elementos más representativos en los resultados de laboratorio, siendo necesario evaluar concentraciones de algunos elementos, como su comportamiento y relación con otras estaciones de monitoreo, a través de gráficos en Microsoft Excel se proyectaron las concentraciones en miligramos por litro.

Figura 18.

Potencial de hidrógeno en las estaciones de monitoreo



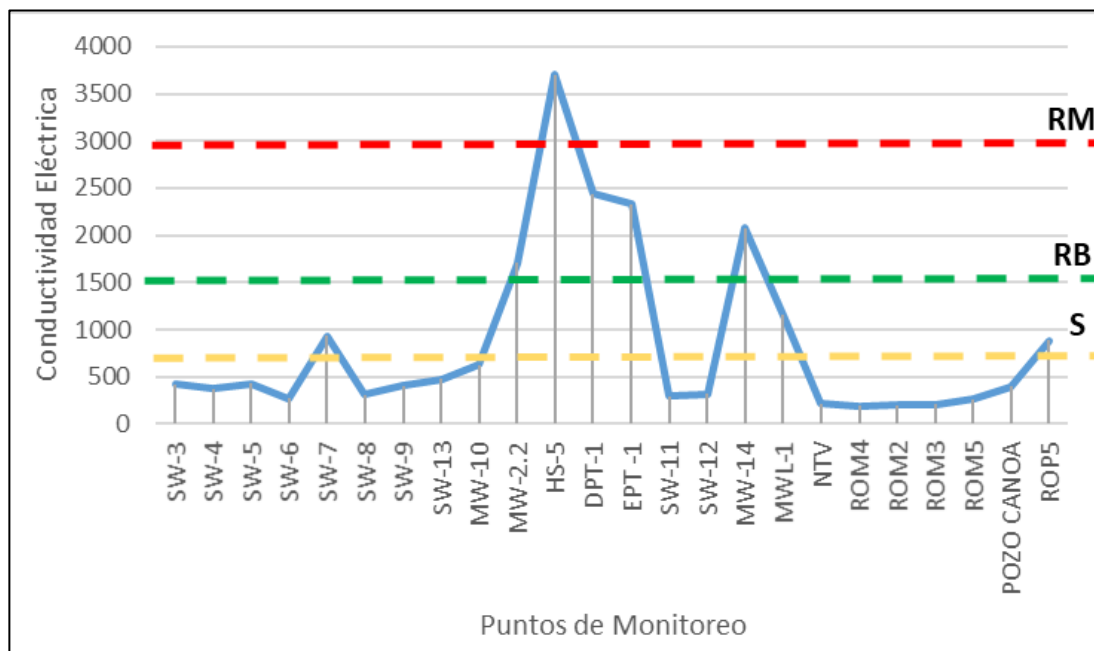
Nota. Gráfica el pH obtenido en cada una de las estaciones de monitoreo analizadas, con línea discontinua de coloración roja que indica el límite máximo y el límite mínimo. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

El potencial de hidrógeno es uno de los factores primordiales para analizar el comportamiento de los elementos de acuerdo con su grado de acidez, por lo que se representó el pH de las estaciones, identificando las estaciones SW-8 mayor a 8.5.

La conductividad eléctrica es muy elevada principalmente en las estaciones HS-5, DPT-1, MW-14 y ETP-1, que están entre un rango de 2500 a 3700 $\mu\text{S}/\text{c}$ definidas con riesgo moderado a bajo. Uno de los puntos muy interesantes en su comportamiento es la estación superficial SW-7 y los pozos ROP5 y MW1, con una conductividad casi llegando a los 1000 $\mu\text{S}/\text{c}$.

Figura 19.

Estaciones de monitoreo con resultados de campo 2019 y 2021

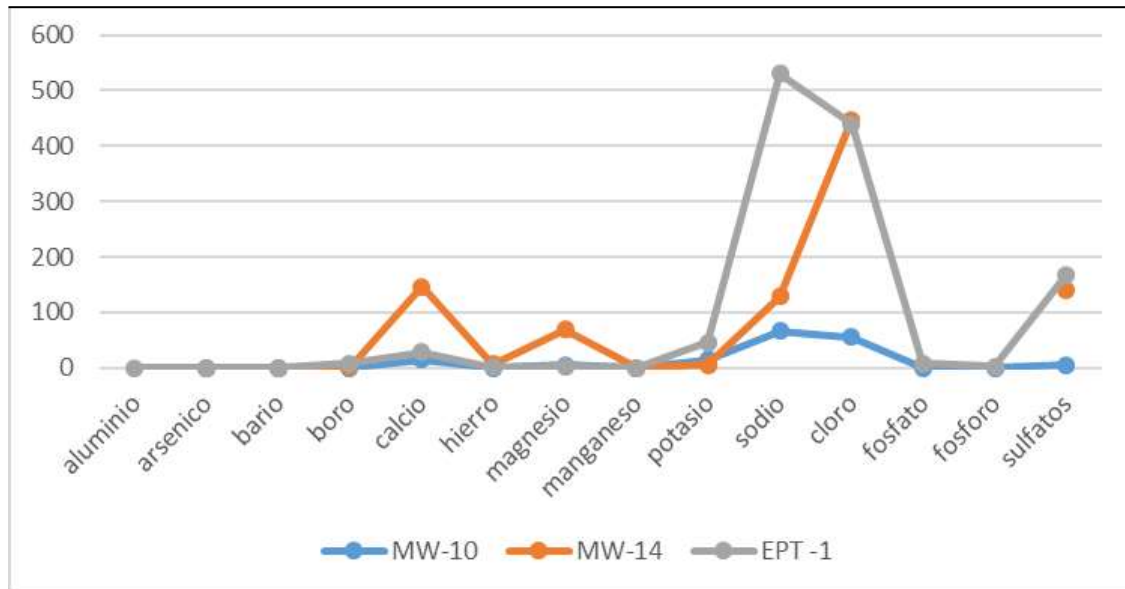


Nota. La CE graficada con relación a los rangos permitidos en aguas, RM: Riesgo Moderado, RB: Riesgo Bajo, S: Saludable. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Las aguas subterráneas presentan en el gráfico concentraciones de sodio y cloro, principalmente en las estaciones MW-14 y EPT-1 que ambos son aguas profundas, pero a diferencia de la estación MW-10 que sus concentraciones son bajas en comparación con los otros puntos.

Figura 20.

Estaciones de monitoreo MX-10, MW14 y ETP1, con resultado de 2019

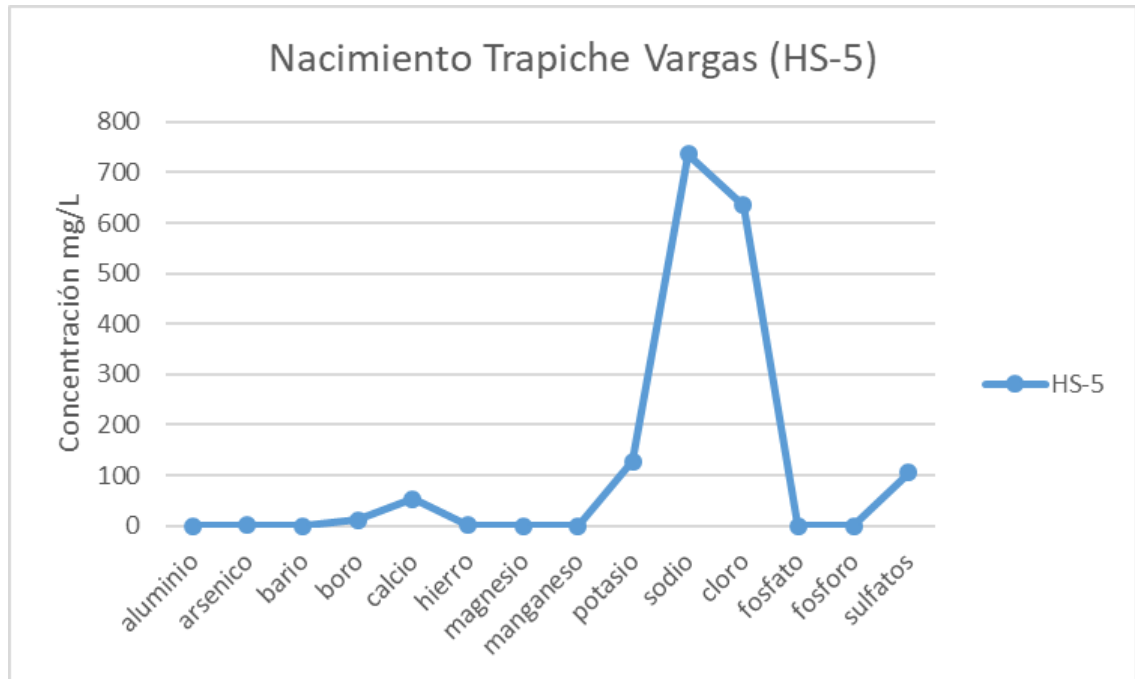


Nota. Concentraciones elementos en aguas subterráneas. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

El manantial hidrotermal de Trapiche Vargas fue evaluado de forma gráfica, presentando un comportamiento muy similar a la estación ETP-1, probablemente tenga relación con ese tipo de sistemas, ya que esta última es agua que proviene de las zonas profundas de la mina subterránea del proyecto minero que es drenada para evitar la inundación de las galerías de los túneles.

Figura 21.

Estación HS5 Trapiche Vargas, de acuerdo con resultados del 2019

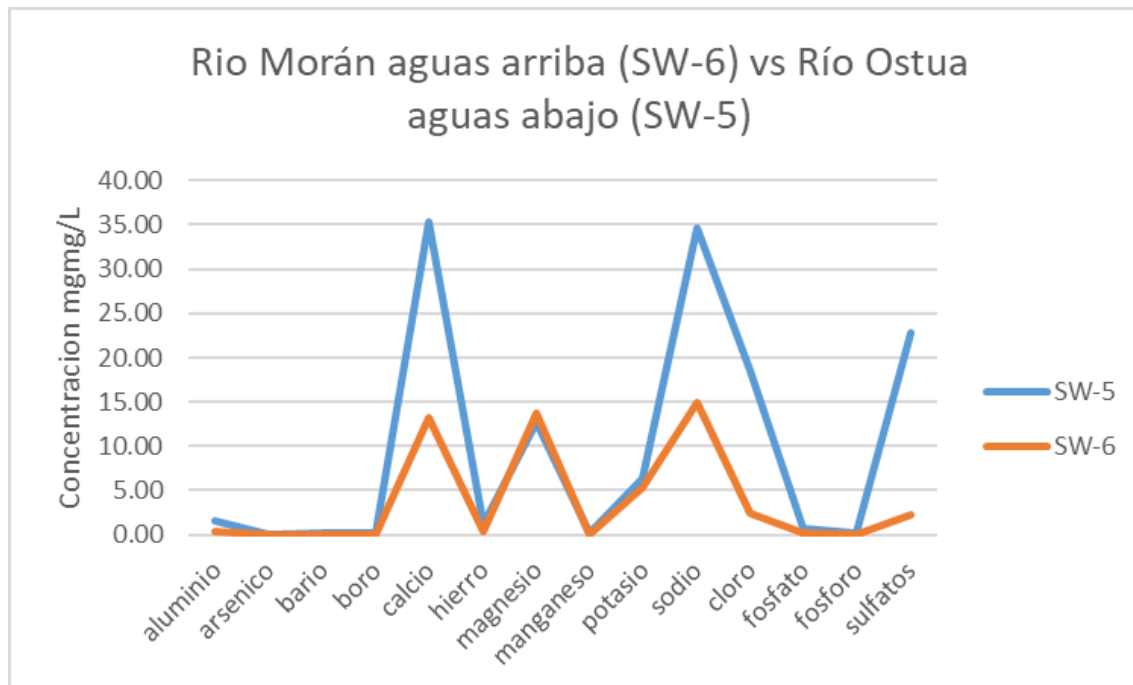


Nota. Concentraciones elementos en nacimiento de agua termal. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Las aguas superficiales tienen concentraciones muy significativas de calcio, magnesio, sodio y sulfatos, con un comportamiento similar entre las estaciones SW-5 y SW-6.

Figura 22.

Estaciones de monitoreo de aguas superficiales, con resultados del 2019

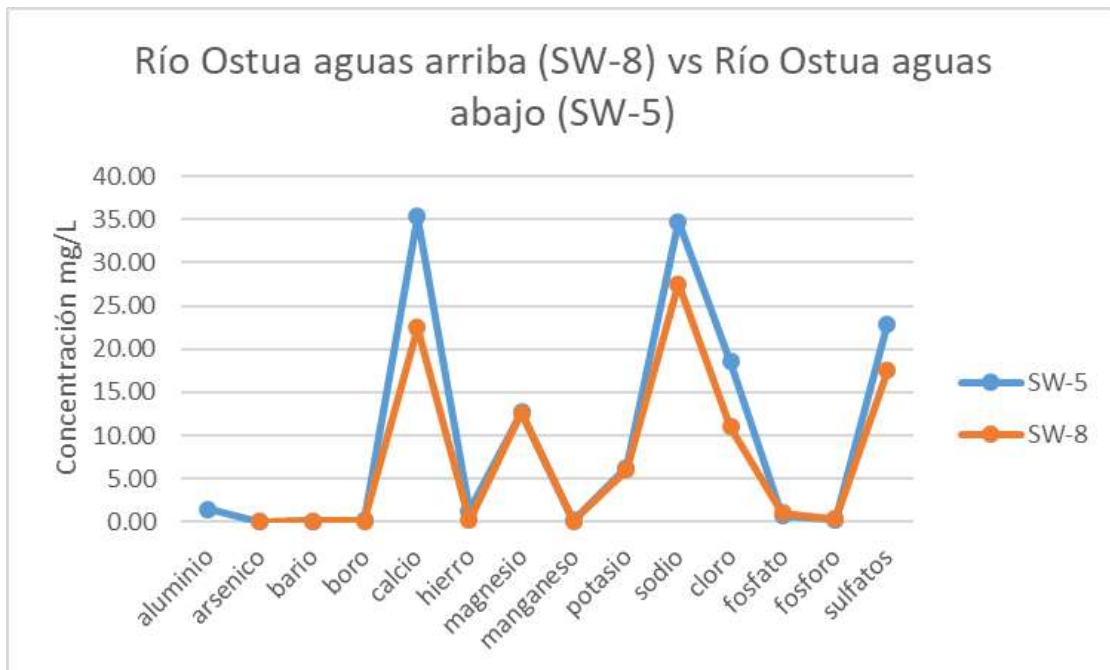


Nota. Concentraciones elementos en aguas superficiales. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

La concentración de elementos del río Ostúa se evaluó de acuerdo con las estaciones SW-8 y SW-5 aguas arriba y abajo, determinando que el comportamiento químico es muy similar y no presenta algún cambio brusco de concentración, únicamente un leve aumento en concentraciones de elementos mayoritarios como calcio, sodio, cloro y sulfato, pero este en la parte baja del río.

Figura 23.

Río Ostúa aguas arriba (SW-8) vs. aguas abajo (SW-5)

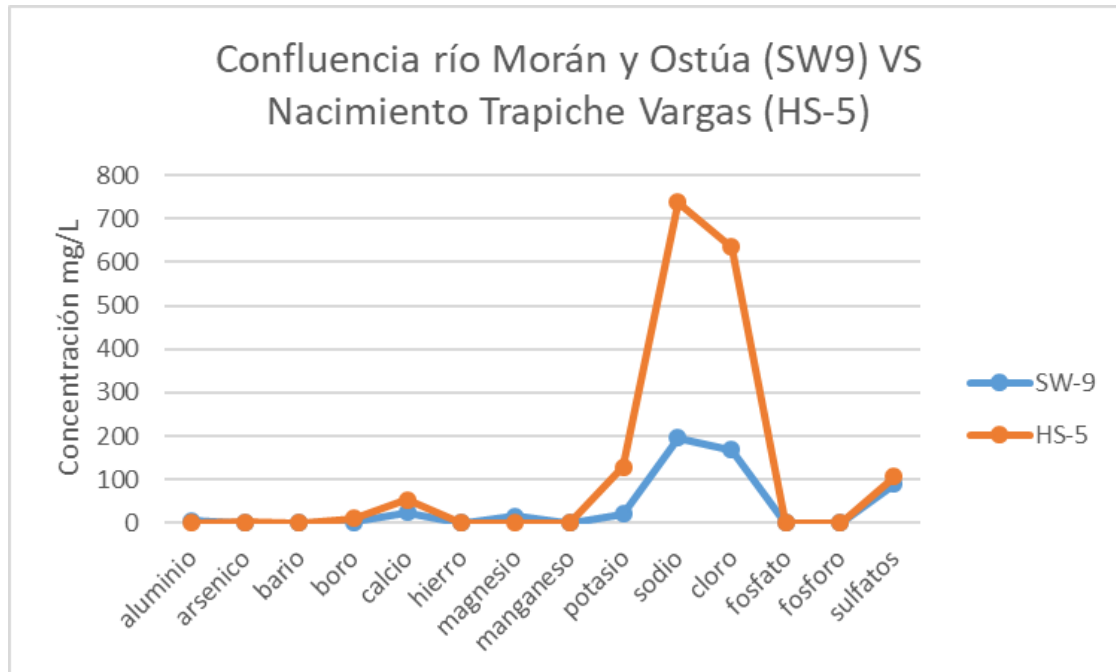


Nota. Concentraciones elementos en aguas superficiales. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Uno de los puntos de monitoreo que han presentado algunas cargas elementales diferentes a las aguas superficiales es el SW-9, ya que este recibe aguas provenientes del nacimiento hidrotermal Trapiche Vargas, lo que provoca una modificación química en las aguas superficiales. Se observa que presentan un comportamiento parecido solo que en menor proporción con las aguas superficiales por la dilución que se genera.

Figura 24.

Confluencia río Morán y Ostúa vs. nacimiento Trapiche Vargas

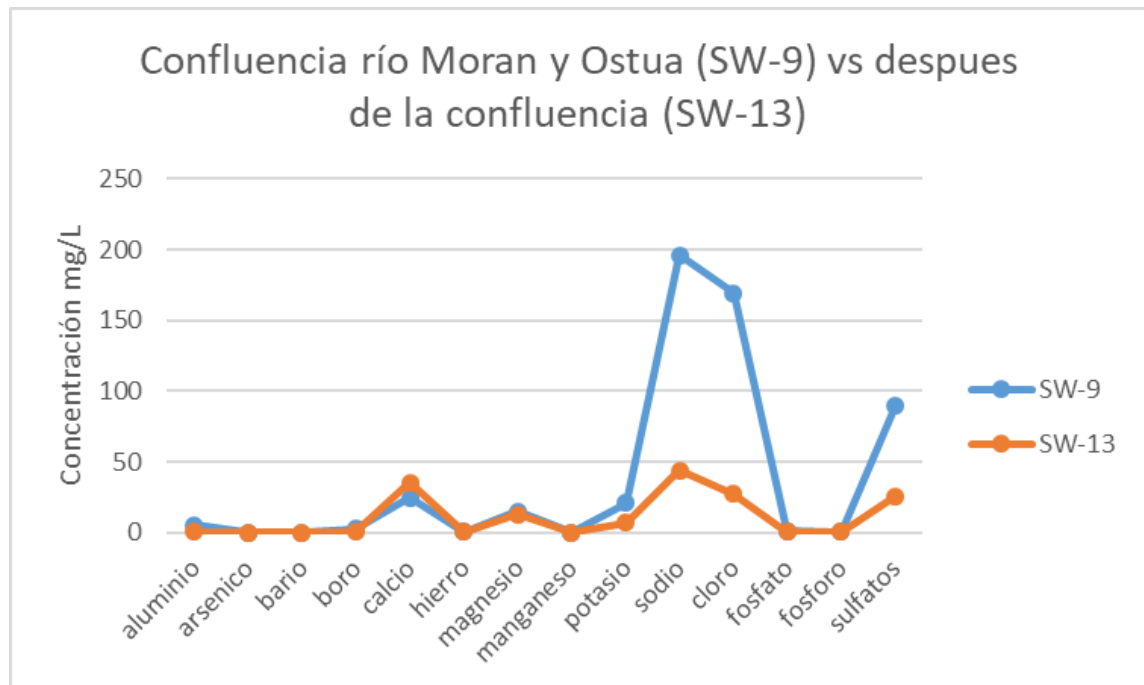


Nota. Concentraciones elementos comparativo con agua superficial y subterránea. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

La concentración de cloro y sodio en la estación SW-9 está en concentraciones que van de 200 a 175 mg/L, pero va disminuyendo significativa en el punto de monitoreo SW-13 después de la confluencia del río Morán y Ostúa.

Figura 25.

Confluencia río Morán y Ostúa vs. después de la confluencia



Nota. Concentraciones elementos en aguas superficiales. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

4.9. Uso de las aguas subterráneas según sus condiciones geoquímicas, a través de normas internacionales para proyectos productivos

De acuerdo con información obtenida del Plan de Desarrollo Municipal de Asunción Mita, se establece que el uso actual del suelo es principalmente para la producción de granos básicos como el maíz y frijol, así también para los pastos naturales.

Durante los últimos años se tiene un aumento en la producción agrícola del melón y este se expande hacia la zona urbana de acuerdo con lo reportado.

Según lo reportado por los pobladores en el PDM 2019, en los últimos años se han enfrentado a problemas con la actividad agrícola debido a que son afectados con las sequías, generando pérdidas en los cultivos principalmente maíz y frijol, obteniendo pérdidas económicas en las familias que en su mayoría dependen de esta actividad.

En el área de investigación cuentan con ganado bovino, donde la principal actividad es la producción de lácteos, promovida por una Asociación de Ganaderos de esta región para implementar tecnificación en dicha producción.

Para las dos actividades económicas que fueron mencionadas, es necesario el uso del recurso hídrico tanto para las agrícolas como en las ganaderas, por ende, se propone a continuación el uso de las aguas de acuerdo con su contenido químico.

La producción agrícola en Guatemala actualmente no cuenta con un normativo o ley que regule la calidad de las aguas para ser utilizada en los cultivos, lo que genera una gran incertidumbre en los procesos productivos, ya que no son monitoreadas las fuentes de agua utilizadas para el riego.

En el presente análisis se utilizó la Norma de calidad del agua para uso agrícola del Comité de Consultores de la Universidad de California, la cual fue publicada en el año 1984 por Ayers y Wescot, y posteriormente la FAO en el año de 1987 las adaptó.

El agua para uso agrícolas fue analizada conforme a los elementos que se presentan en la tabla 2, donde los resultados resaltados en color azul corresponden a los que están fuera de los parámetros máximos permisibles por

la FAO y la Norma Chilena de calidad de agua del Instituto Nacional de Normalización (INN).

Tabla 2.

Datos comparativos con la FAO y Norma Chilena del INN

ID	OBSERVACIONES	ARSÉNICO	BORO	HIERRO	MANGANESO	CLORO
		FAO/INN	FAO/INN	FAO/INN	FAO/INN	FAO/INN
		0.10/0.10	0.73/0.75	/5.0	0.2/0.20	/200
SW-3	Río Tancushapa, aguas abajo	0.0263	0.13	0.89	0.33	7.9
SW-4	Río Tancushapa, aguas arriba	0.0071	0.0500	1.44	0.1	5.5
SW-5	Río Grande de Mita, aguas abajo	0.0103	0.1500	1.26	0.144	18.5
SW-6	Río Morán, aguas arriba	0.0028		0.36	0.02	2.4
SW-7	Puente de Tablas	0.06	5.5500	0.95	0.34	394
SW-8	Río Grande de Mita, aguas arriba	0.003	0.0300	1.41	0.07	5.9
SW-9	Río Morán, aguas abajo	0.0599	1.9100	0.5	0.06	129
SW-13	Río Ostúa, después de la confluencia río Morán	0.0131	0.2800	0.35	0.101	27.4
MW-10	Pozo de Monitoreo Campo	0.0042	0.3500	0.54	0.07	55.7
MW-2.2	Pozo de Monitoreo El Salitre	0.145	4.7200	0.04	0.3	
HS-5	Agua termal, Trapiche Vargas	1.09	11.2000	0.82	0.36	635
DPT-1	Descarga de Planta de Tratamiento	0.034	7.7100	0.665	0.0395	463
EPT-1	Entrada de Planta de Tratamiento	0.438	7.5300	1.37	0.063	433.5
SW-11	Lago de Güija, San Juan la Isla	0.00385	0.0700	0.125	0.075	8.05
SW-12	Lago de Güija, desagüe Río Ostúa	0.0043	0.0650	0.15	0.05	8.15
MW-14	Pozo de Monitoreo Proyecto	0.0016	1.95	7.07	0.08	447
MWL-1	Pozo de Monitoreo Lodos	0.0139	0.08	0.87	0.84	6.7

Nota. Estaciones de monitoreo con resultados de elementos comparados con la FAO y Norma Chilena del INN. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Las aguas provenientes del manantial hidrotermal denominado como Trapiche Vargas, identificado como HS-5, presenta los parámetros de arsénico, boro, manganeso, cloro y conductividad eléctrica, por encima de los límites máximos para ser utilizada como agua de riego.

Las aguas subterráneas recolectadas de las galerías del proyecto minero ETP-1 presenta elementos como el arsénico, boro, cloro, y parámetros físicos como potencial de hidrógeno y conductividad, que están por encima del límite establecido por la FAO. En el caso de las aguas tratadas identificadas como

DTP-1, tienen condiciones similares al ETP-1, pero con la diferencia que el arsénico se encuentra dentro del rango permitido a diferencia del sulfato que está por encima del límite máximo.

El pozo MW-14 que corresponde a aguas profundas ubicado dentro del proyecto minero, tienen un alto contenido de hierro, boro y cloro que sobrepasa el límite permitido, así mismo el parámetro de conductividad eléctrica, que está clasificada como aguas que pueden ser usadas para plantas tolerantes en suelos permeables, con métodos de manejo cuidadoso como en las estaciones HS-5, DTP-1 y ETP-1.

En el caso de las aguas superficiales, que son comúnmente utilizadas para riego, es importante indicar que en el punto de monitoreo SW-3, el contenido de manganeso y el potencial de hidrógeno están por encima del límite máximo, así también se identificó el punto SW-7 que presenta elementos como el boro, manganeso y cloro fuera de los límites permitidos para riego.

En el reglamento de descargas de aguas residuales, en el acuerdo gubernativo No. 236-2006 se establecen los criterios y requisitos para la descarga y reúso de aguas residuales, haciendo mención en la literal c promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Características hidrogeoquímicas a partir de las condiciones geogénicas de la microcuenca en estudio, y su relación con el sistema hidrotermal

Los diagramas binarios se han utilizado para poder interpretar la interacción entre elementos indicadores de ambientes hidrotermales y su relación con las aguas frescas, para ello se analizaron aguas superficiales como subterráneas. Para realizar los diagramas de correlación se utilizó como elemento trazador conservativo el cloro “Cl”, ya que no es afectado o sufre modificaciones en interacción con agua-roca, por lo que es un elemento indicador de los ambientes hidrotermales.

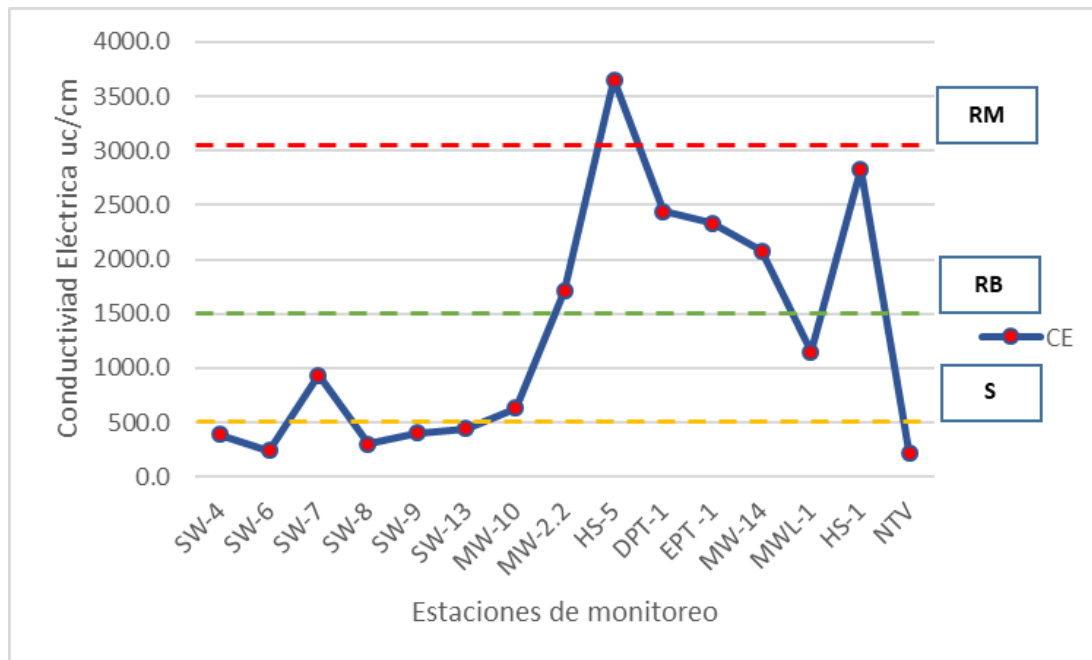
La conductividad eléctrica es un indicativo muy importante para determinar si las aguas tienen cierta interacción con ambientes termales, ya que representa la salinidad en las aguas, pero de acuerdo con los resultados obtenidos en campo durante el año 2021, los que presentan una conductividad mayor son las aguas profundas detectadas en los pozos, y esto se debe a que existe una interacción con sales que podrían aumentar la CE y dar indicios de aguas muy antiguas por sus altas profundidades, teniendo cierta relación con otras estaciones y manantiales por las filtraciones de dichas aguas.

De acuerdo con lo indicado por Zhen (2009), que “las aguas geotérmicas, tienen una conductividad por arriba de los 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, caso contrario a los nacimientos (entre 39 a 294 $\mu\text{S}/\text{c}$), puede indicar las descargas o filtraciones que posee el sistema y su relación con ambientes geotérmicos” (pág. 10). En el caso

particular de la presente investigación, la CE que comprenden las estaciones HS-5, ETP-1, DTP-1, MW-14, MWL-1, HS-1, son aguas que van de 1,000 a 3,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo que nos muestra que existe una relación con el sistema hidrotermal.

Figura 26.

Estaciones de monitoreo de acuerdo con etapa de campo del 2021



Nota. CE en aguas superficiales y subterráneas donde se compara con los rangos marcados con línea discontinua con RM: Riesgo Moderado, RB: Riesgo Bajo, S: Saludable. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

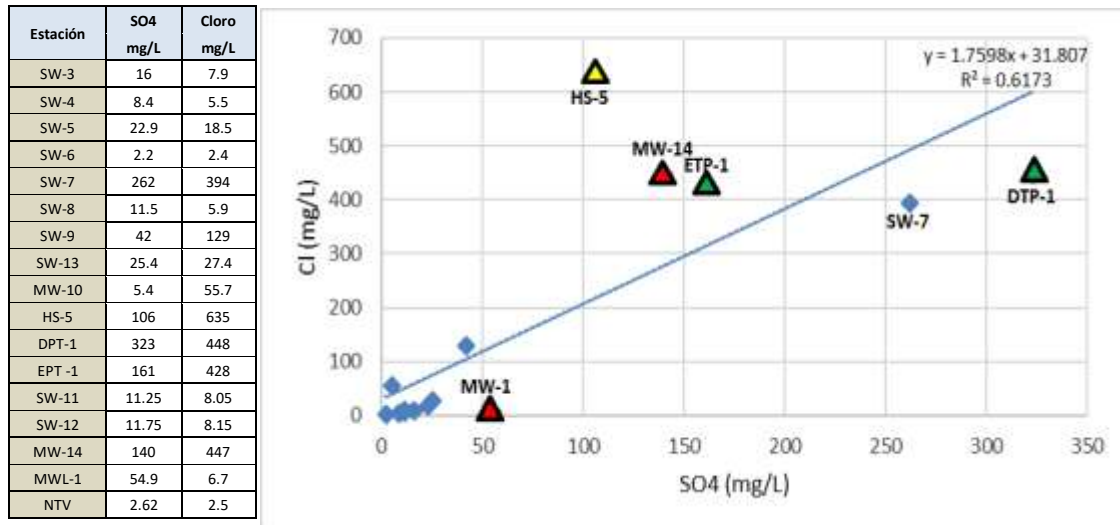
Los cloruros y los sulfatos se encuentran en concentraciones muy elevadas en estaciones de aguas subterráneas y manantial hidrotermal de Trapiche Vargas, lo que se podría asociar que son aguas que tienen relación directa y están siendo migradas o calentadas por vapor en un sistema activo.

Los cloruros son producto de salmueras o aguas termales y los sulfatos son componentes de minerales como pirita o algún tipo de sulfuros que es de ambientes volcánicos del alta a baja sulfuración, siendo esta zona un depósito epitermal muy importante por su alta concentración de metales que están asociados a oro y arsénico, por ambiente volcánico y fallamiento.

De acuerdo con los resultados analizados de la concentración de sulfatos, la estación de descarga de aguas subterráneas hacia la quebrada Regina (DTP-1) que viene previamente tratada para eliminación de As, posee una concentración de 323 mg/L y las aguas provenientes de los acuíferos profundos de las galerías de mina (ETP-1) tiene 161 mg/L, el pozo de monitoreo MW-4 con 140 mg/L, el manantial de Trapiche Vargas con 106 mg/L y en el caso de las aguas superficiales, la estación SW-7 es la que presenta mayor concentración siendo de 262 mg/L. De acuerdo con lo anterior, estos puntos tienen interacción con el sistema hidrotermal, ya que los flujos de agua son calentados por vapor y gases generados por el sistema hidrotermal, en el caso del punto SW-7 de agua superficial, es debido a la descarga del HS-5 hacia dicha quebrada.

Figura 27.

Diagrama de correlación lineal simple del Cl vs. SO₄ del 2019



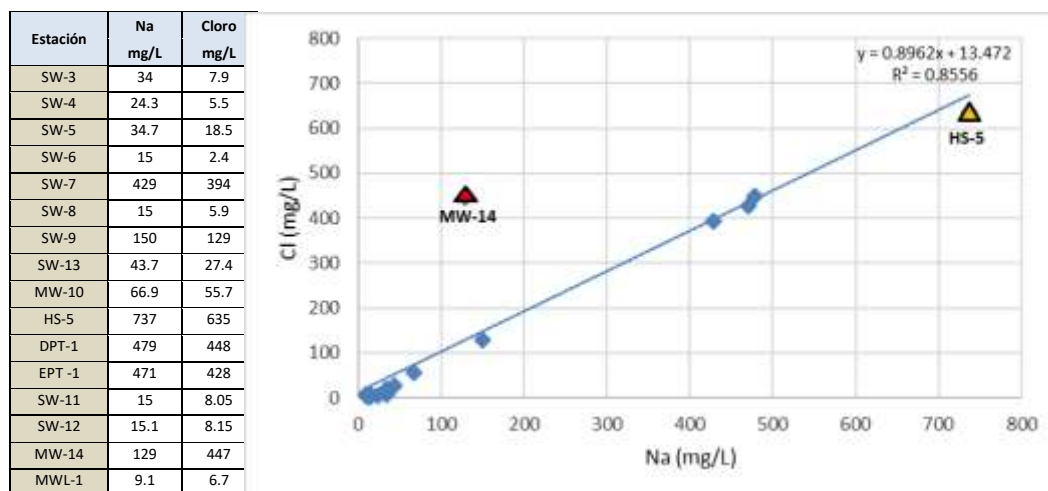
Nota. Diagrama de la zona de descarga de la Microcuenca río Morán. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

La relación que existe con los cloruros y los sulfatos de acuerdo conl análisis de correlación lineal, los resultados de las estaciones presentan linealidad, pero no se encuentran dentro de dicha tendencia el pozo MW-14 (SO₄: 140 y Cl:447) y el manantial termal Trapiche Vargas (SO₄: 106 y Cl:635).

En la figura 28 se muestra el comportamiento del Na y Cl, observando que es muy similar a la relación lineal entre el Cl y el SO₄, a excepción del manantial Trapiche Vargas que sigue la línea de tendencia, pero nuevamente el pozo MW-14 está fuera de la pendiente con una concentración de Na:129 y Cl:447), la carga de dicho elemento llega a estar presente tanto en aguas superficiales como subterráneas debido a la meteorización que sufre la roca con contenido de calcio o magnesio liberando el sodio.

Figura 28.

Diagrama de correlación lineal simple del Cl vs. Na del 2019

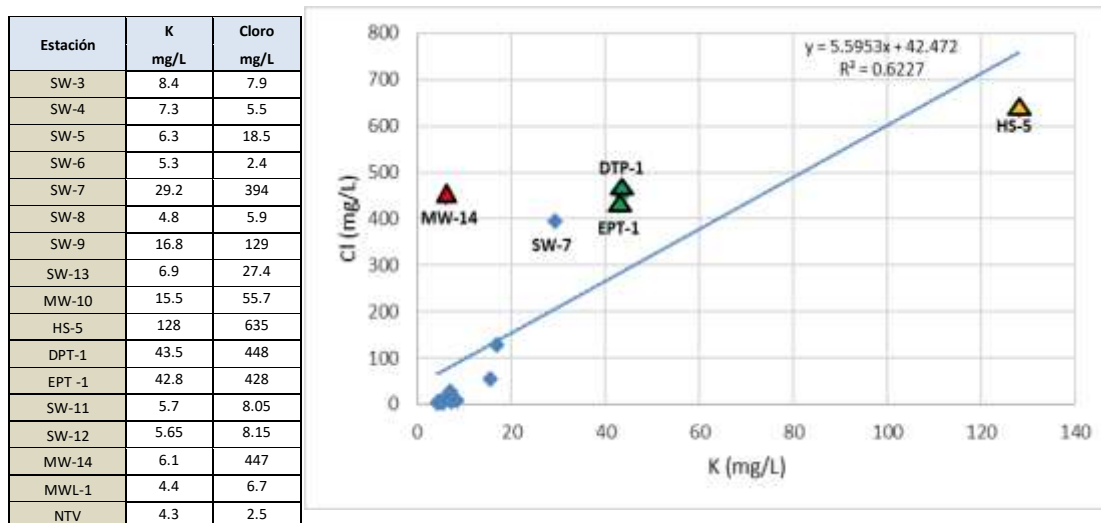


Nota. Zona de descarga de la Microcuenca río Morán. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Otro elemento indicador de este sistema hidrotermal es la concentración de potasio, pero las estaciones de monitoreo que presentan mayor concentración son el HS-5 con 128 mg/L, seguida por DTP-1 con 45.65, EPT-1 con 44.65, MW2.2 con 35.81 y el SW-9 que corresponde a agua superficial. El nacimiento presenta la mayor concentración lo que es evidente que tiene migración de aguas muy profundas. En el gráfico el potasio presenta cierta linealidad con los cloruros, exceptuando únicamente la estación MW-14 que tiene una concentración de 6.1 mg/L de potasio y 447 mg/L de cloro.

Figura 29.

Diagrama de correlación lineal simple del Cl vs. K del 2019

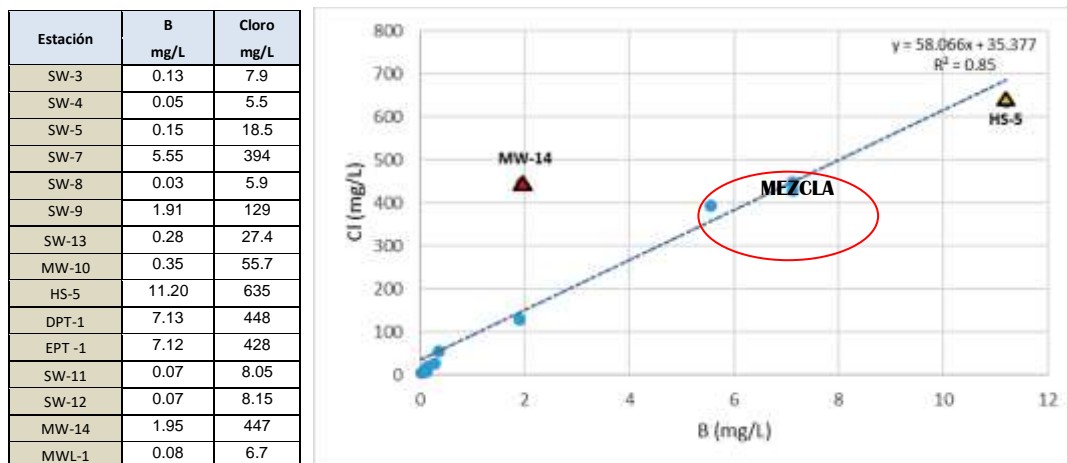


Nota: Zona de descarga de la Microcuenca río Morán. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

El boro es otro elemento indicador del comportamiento del sistema hidrotermal y su relación tanto con las aguas superficiales como subterráneas, por lo que se analizó la relación lineal con el Cl, determinando su linealidad, pero se exceptúa la estación MW-14. Con una concentración de B de 1.956 mg/L y de Cl de 447 mg/L.

Figura 30.

Diagrama de correlación lineal simple del Cl vs. B de 2019



Nota. Zona de descarga de la Microcuenca río Morán. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

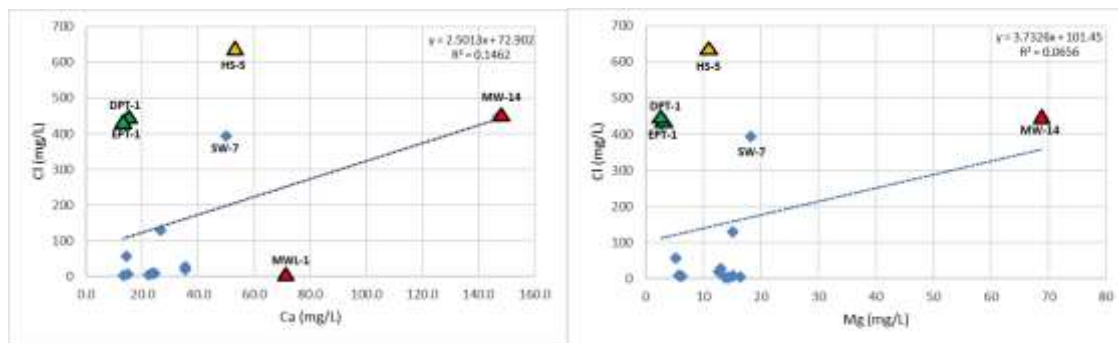
Para obtener un mejor análisis entre el Cl y B, se comparó la relación inversa de Cl/B, el cual nos determina el comportamiento de las aguas, y su relación con el sistema hidrotermal, donde se puede establecer que donde la razón aumenta, la temperatura disminuye y por ende existe mayor mezcla con aguas frescas; y cuando la razón disminuye, se tiene un aumento de temperatura, y por lo tanto una migración de aguas más directa del sistema hidrotermal, como en este caso se analizaron los puntos importantes, obteniendo que, el manantial HS-5 tiene una razón menor por lo que hay un aumento de temperatura, lo que nos indica que tiene una relación más directa a la zona hidrotermal.

Para continuar analizando el sistema, se evaluó la relación inversa entre el Na y Mg, logrando determinar que las aguas subterráneas correspondientes principalmente al manantial hidrotermal HS-5 y los puntos ETP-1 y DTP1 (aguas subterráneas), con una mayor razón, lo que nos da un indicador que hay un

aumento de temperatura y son aguas con muy poca mezcla con aguas frescas, es decir tienen una migración más directa de la zona hidrotermal, a comparación con los pozos MW14, MW-2.2 y el agua superficial SW-7 donde la razón disminuye y se obtiene mezcla en el sistema, ya que la temperatura va disminuyendo y por ende hay entrada de aguas frescas.

Figura 31.

Diagramas de correlación lineal del Cs vs. Cl y Mg vs. Cl del 2019



Nota. Zona de descarga de la Microcuenca río Morán. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

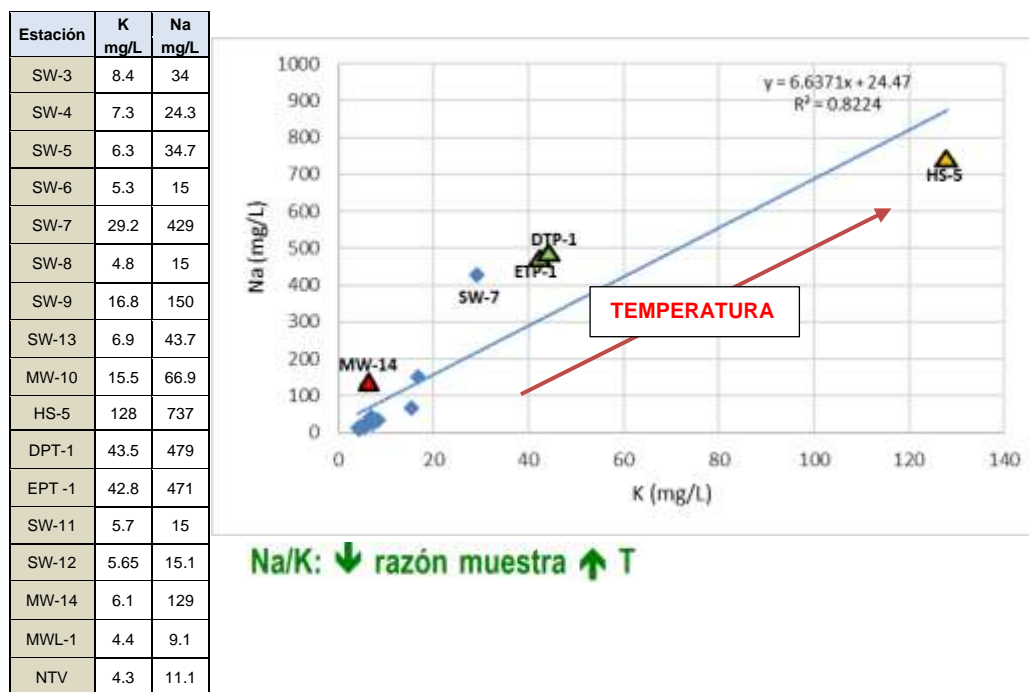
En el gráfico 16 se analizaron los elementos de Na y K, observando que las aguas con menor concentración presentan una tendencia hacia las aguas con mayor contenido elemental. De acuerdo con la línea de tendencia, las aguas que son representadas en la parte inferior corresponden a aguas con menos interacción en el gráfico pertenecen al mismo sistema geotérmico.

Al hacer la relación entre Na/K, se obtiene que a menor razón, se tiene un incremento de temperatura, siendo evidente que las aguas que tienen mayor interacción con aguas frescas o someras, es debido a la mezcla posee, disminuyendo así la temperatura; y al obtener mayor razón comparada como es el caso del manantial HS-5, es un indicador que existe una migración más directa

con poca a mínima mezcla, ya que se obtuvo una mayor temperatura (por arriba de los 100 °C), por lo que tiene una conexión más directa al sistema, siendo la zonas de mayor ascenso de fluidos. En los puntos DTP-1 y ETP1 que corresponden a aguas subterráneas, muestran una razón mayor, por lo que se considera que existe una mezcla en el sistema por aguas más frescas o someras, por ende, se tiene mayor dilución de los elementos.

Figura 32.

Diagrama de relación Na vs. K del 2019 zona de descarga



Nota. Relación entre sodio y potasio, para evaluar zonas de mezcla en el sistema hidrotermal. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

5.2. Clasificar las aguas superficiales y subterráneas a través del método de *Piper* y *Stiff* de acuerdo con las concentraciones de aniones y cationes

Las aguas fueron clasificadas de acuerdo con su contenido de aniones y cationes tanto en aguas superficiales como subterráneas, en el caso de los diagramas para los resultados del año 2015, las aguas superficiales presentan mayor contenido de bicarbonatos y carbonatos, esto se debe a que son aguas poco profundas, es decir que son aguas más frescas, y que podrían tener contacto con algún tipo de roca carbonatada.

Las aguas que tienen algún tipo de contacto con la zona de hidrotermalismo, presentan mayor contenido de cloruros y sodio, es decir son de tipo cloruradas sódicas, que corresponden principalmente al manantial hidrotermal de Trapiche Vargas y pozos de agua. Este tipo de aguas se consideran que tienen interacción con el sistema hidrotermal de esta zona, ya que son aguas que se movilizan en un ambiente con alta temperatura y los fluidos de las corrientes que ascienden a través de fracturas o fallas son calentadas por vapores.

La representación en el diagrama de Piper se observa que los pozos de agua identificados como MWL-1 y MW-14 son aguas típicas de un ambiente de subterráneo con ciertas concentraciones de yeso. Una fracción de estaciones se clasifican como aguas cálcicas bicarbonatadas que podría corresponder a aguas poco profundas con recargas de agua superficial, por lo que ahí están ubicadas las estaciones de monitoreo de aguas superficiales como SW-3, SW-4, SW-5, SW-8, SW-13.

La otra sección de datos corresponde a aguas de origen subterráneo como lo son las estaciones HS5, MW-2.2, ETP-1, DTP-1 que son típicas de aguas profundas y antiguas definidas como cloruradas sódicas, y una última estación donde se ubican los puntos de aguas superficial SW-7 y SW-9 en conjunto con el pozo MW-10, que corresponden a aguas con mezcla del sistema profundo y somero, es decir se encuentran influenciadas por el intercambio iónico.

Los resultados de monitoreo del año 2019 fueron proyectados de la misma manera que la del año 2015, logrando observar que el comportamiento elemental tanto en las aguas superficiales y subterráneas es muy similar, teniendo mínimas varianzas en su clasificación. Es muy evidente que las aguas poseen una carga de ciertos elementos químicos que son muy representativos de la región, siendo aguas superficiales con concentraciones de iones de carbonatos y bicarbonatos típicos de aguas someras, pero en el caso de las aguas subterráneas tienen cierta particularidad de altas concentraciones de cloruros y sulfatos siendo indicadores de ambientes hidrotermales.

En los resultados del año 2019, el pozo MW-14 es típico de un ambiente de aguas subterráneas con ciertas concentraciones de yeso, pero a diferencia del año 2015, el pozo MWL-1 está como aguas muy poco profundas y relacionadas con las aguas superficiales.

El comportamiento del manantial de Trapiche Vargas y las aguas de descarga de la planta de tratamiento del Proyecto Minero Cerro Blanco son muy similares al del año 2015 (cloruradas sódicas), por lo que siguen siendo aguas profundas y antiguas, que alcanzan una alta temperatura hasta llegar a ebullición ya que podrían estar siendo calentadas por vapor. El punto de monitoreo SW-9 de agua superficial y el pozo MW-10, corresponden a aguas profundas

mezcladas con aguas someras, que se encuentran influenciadas por el intercambio iónico.

5.3. Modelo hidrogeoquímico conceptual según los parámetros fisicoquímicos de las aguas y su interacción

Los modelos conceptuales de acuerdo con Morán, Ledesma, Maknecht y Ramos (2016), “aportan información sobre la distribución geoquímica de las aguas que se encuentran subterráneamente, para determinar el comportamiento de la interacción e influencia con el sistema hidrotermal y antrópica” (pág. 68).

En el estudio técnico realizado por Geotermia Oriental de Guatemala S.A. en Cerro Blanco, se elaboró un modelo conceptual del sistema geotérmico, indicando que se encuentra asociado al vulcanismo bimodal de rocas denominadas basalto-riolita, con pequeños conos y flujos de escoria basáltica, flujos riolíticos y cúpulas cercanas al área, con un reservorio que presenta una temperatura aproximada de 240° centígrados al este de Cerro Blanco y profundidad mayor a 1000 metros. La composición química de este reservorio se reporta que es de cloruro de sodio-bicarbonato y contenido de gas aproximado de 0.4 % en peso. (Geotecnología, Contrucción y Servicios , Sociedad Anónima, 2019, pág. 1749)

El presente modelo conceptual fue elaborado con información obtenida por el proyecto Geotermia Oriental de Guatemala S.A., análisis de información existente y datos obtenidos en campo, tomando en consideración las condiciones geológicas y químicas de las aguas. Para ello se levantó un perfil con dirección

de orientación SW-NE, logrando definir a nivel superficial las unidades geológicas más significativas del área, y su proyección hasta los -2000 msnm de acuerdo con el modelo existente. Aunado a ello, se tomaron de referencia las estaciones de monitoreo más significativas para ser analizadas y evaluadas con los reservorios, y las posibles interacciones del sistema hidrotermal tanto con las aguas subterráneas como superficiales.

En el sistema se tomó en consideración una falla principal que es de tipo normal con dirección Norte-Sur, siendo un conducto directo de los fluidos hidrotermales hacia la superficie, una de las evidencias observadas en campo, es que existe emanaciones de aguas (manantiales calientes) con altas temperaturas y conductividad eléctrica que sobrepasa los 2,000 $\mu\text{S}/\text{c}$, por lo que es evidente que las aguas están siendo calentadas por vapores, y tienen interacción con el reservorio intermedio.

Otro punto importante analizado en el sistema, es el nacimiento de agua termal Trapiche Vargas HS-5, donde se evaluaron los parámetros fisicoquímicos, arrojando valores de temperatura al grado de ebullición, conductividad eléctrica de 3,650 $\mu\text{S}/\text{c}$ y concentración de cloro de 635 mg/L, considerando que el reservorio líquido profundo tienen concentraciones de cloro de 600 ppm y temperatura de 240 °C según lo indicado por Geotermia Oriental de Guatemala S.A., por lo que asocia a que la migración del sistema profundo es más directa por el sistema de descarga HS-5.

Para entender el comportamiento de dicha migración, se definió en el modelo hipotéticamente que el agua es transportada por medio de una fractura abierta con orientación Este-Oeste, siendo este un conducto directo de los fluidos de agua, que ascienden a la superficie con temperaturas de ebullición.

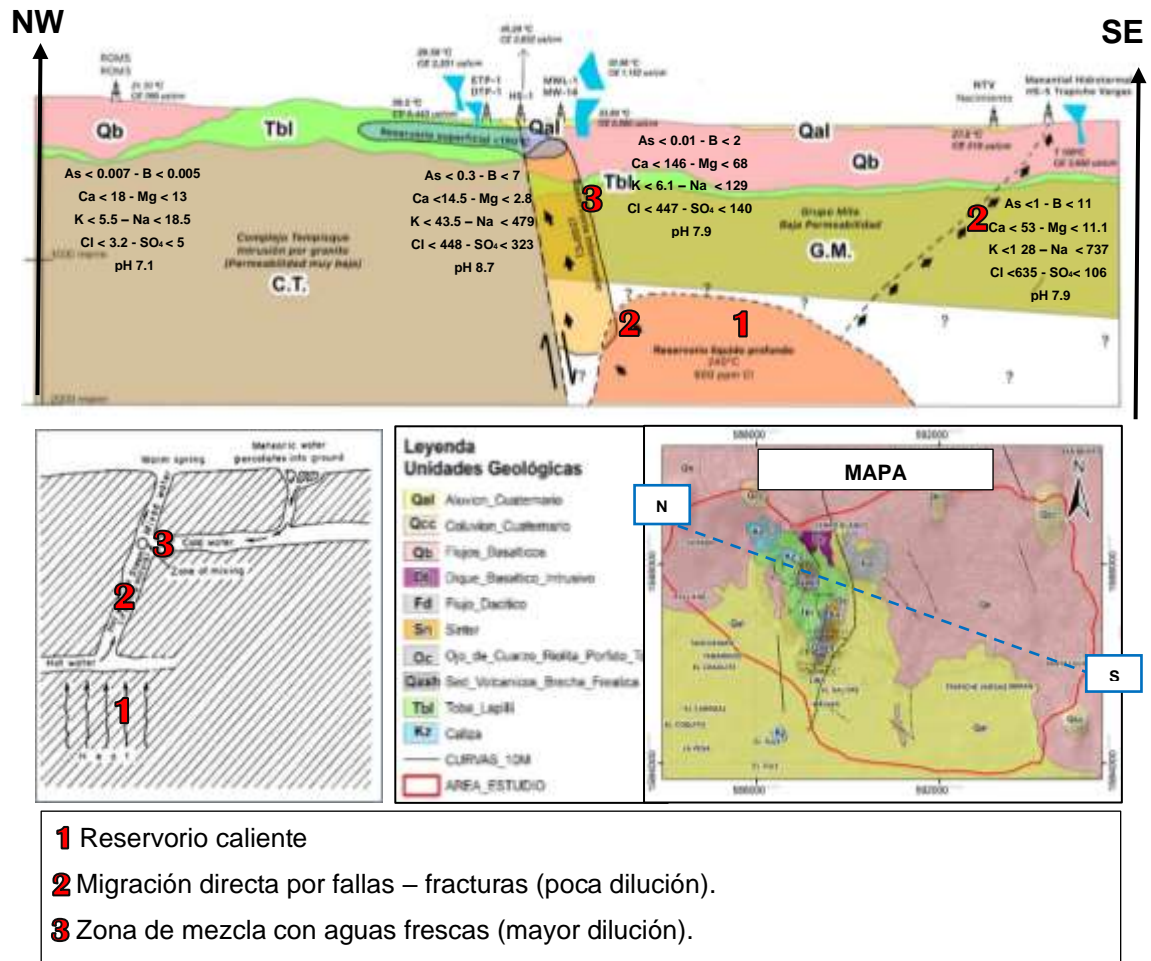
Los puntos de monitoreo ETP-1 y DTP-1 son aguas subterráneas clasificadas químicamente como sulfatadas cloruradas sódicas al igual que el punto HS-5, con concentraciones de cloro de 400 mg/L aproximadamente y CE de 2,400 a 2,300 $\mu\text{S}/\text{c}$, por lo que podrían ser aguas calentadas por vapor del reservorio intermedio, y asciende por el sistema de falla. Considerando la concentración del Cl y CE que disminuye con relación al manantial HS-5, se determina que en los puntos de monitoreo ETP-1 y DTP-1 hay ingreso mínimo de aguas frescas al sistema, ya que el Cl se va diluyendo, al igual que las sales presentes y por ende hay una disminución de CE.

La movilización de los fluidos de aguas hidrotermales de los puntos de monitoreo ETP-1 y DTP-1, al igual que los nacimientos de aguas termales, es a través del fallamiento principal (orientación norte-sur), siendo este un conducto de las aguas profundas, pero al momento de transcurrir por dicha zona de debilidad, va teniendo mezclas de aguas frescas, es por ello por lo que hay mayor dilución de cierto elementos y aumento de elementos indicadores de aguas meteóricas.

El punto MW-14 presentan aguas del tipo Cloruradas Cállicas, con 447 mg/L de cloro y CE de 2,080 $\mu\text{S}/\text{c}$. El pozo MWL-1 presenta mezclas tanto de aguas superficiales como subterráneas, ya que son aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas, y se relacionan con la composición química de las aguas superficiales.

Figura 33.

Modelo de hidrogeoquímico conceptual del área de estudio



Nota. Elaborado con información obtenida por el proyecto Geotermia Oriental de Guatemala S.A., análisis de información existente y datos obtenidos en campo. Elaboración propia, realizado con SIG.

- Paragénesis de la mineralización y la geoquímica de la mineralización y su implicación con la hidrogeoquímica en Asunción Mita, Jutiapa

En principio, es importante comprender que el área de estudio está conformada principalmente por suelos de origen volcánico y se encuentra ubicada geológicamente en una zona con actividad volcánica, lo que ha desencadenado un sistema hidrotermal activo, acompañado de un régimen estructural bajo el arco volcánico de Centroamérica.

Asimismo, se caracteriza por encontrarse en un ambiente geomorfológico volcánico, construida por procesos eruptivos magmáticos, siendo importante considerar que la composición del material volcánico (magmas) determina en gran manera el comportamiento morfométrico como la generación de cráteres, laderas volcánicas, mesetas o coladas de lava.

Derivado de ello; se puede deducir que la relación entre la paragénesis de la mineralización, la geoquímica de la mineralización y su implicación con la hidrogeoquímica en un entorno hidrotermal con presencia de suelos volcánicos, se encuentra una zona hidrotermal activa con altas temperaturas subterráneas. En dicha área, la paragénesis de la mineralización incluye minerales como arsenopirita, que son ricos en arsénico. Estos minerales, sin duda alguna se formaron debido a la interacción del agua caliente con las rocas volcánicas y las soluciones ricas en arsénico.

La geoquímica de la mineralización muestra considerables concentraciones de arsénico en los minerales presentes en la zona hidrotermal. Los análisis geoquímicos revelan la composición química de estos minerales y proporcionaron información sobre las condiciones de formación en un entorno rico boro, sodio, cloro y arsénico.

La implicación con la hidrogeoquímica se relaciona en cuanto al mecanismo de cómo el agua caliente subterránea enriquecida en los minerales mencionados anteriormente (dentro de ellos el arsénico) afecta y es afectada por la calidad del agua subterránea. A medida que el agua subterránea circula a través de las rocas que contienen estos minerales, puede disolver pequeñas cantidades de este elemento. Esto puede resultar en la presencia de arsénico en el agua subterránea, lo que podría tener implicaciones para la salud humana si se utiliza para consumo humano.

La interacción del agua caliente subterránea con los minerales antes mencionados también puede liberar estos elementos en el agua, lo que podría afectar la composición química y la calidad del agua en la región. Además, el arsénico es conocido por ser un contaminante químico y su presencia en el agua subterránea puede tener impactos negativos en los ecosistemas acuáticos y en la salud de los seres vivos que dependen de estas fuentes de agua.

En esta área de estudio, correspondiente a una zona hidrotermal con presencia de los minerales antes mencionados, la paragénesis de la mineralización y la geoquímica de la mineralización están relacionadas, ya que los minerales ricos en arsénico y el resto de ellos, afectan la composición química del agua subterránea.

La hidrogeoquímica entra en juego al considerar cómo la interacción entre el agua caliente subterránea y los minerales antes mencionados afectan la calidad y la composición del agua en la región. Este análisis exploratorio parte de las características geológicas y químicas encontradas. Para obtener información precisa sobre la paragénesis, la geoquímica y la hidrogeoquímica en esta zona hidrotermal, se deben seguir realizando estudios científicos, así como ir generando y actualizando datos de campo realizados por expertos en la materia.

5.4. Relación geoquímica que tienen las aguas superficiales y someras con las aguas profundas

Para analizar la relación que existe entre las aguas, uno de los factores físicos muy importantes es la Conductividad Eléctrica, ya que de acuerdo con Zhen, (2009), establece que las aguas geotérmicas, tienen una conductividad por arriba de los 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que no corresponde a las aguas frescas o nacimientos, con una CE entre 39 a 294 $\mu\text{S}/\text{c}$, siendo este un parámetro importante para indicar las descargas o filtraciones que posee el sistema y su relación con ambientes geotérmicos, es por ello que se pudo evaluar en este estudio, que las estaciones HS-5, DPT-1, MW-14 y ETP-1, están entre un rango de 2500 a 3700 $\mu\text{S}/\text{c}$. (pág. 10)

Uno de los puntos muy interesantes en su comportamiento es la estación superficial SW-7 y los pozos ROP5 y MW-1, con una conductividad casi llegando a los 1000 $\mu\text{S}/\text{c}$, lo que no da la pauta a que existe relación entre dichos puntos, e interacción con el sistema hidrotermal, ya sea por calentamiento de vapores y gases, así como filtraciones del sistema a las aguas superficiales.

En el caso de las aguas subterráneas, las concentraciones de sodio y cloro, principalmente en las estaciones MW-14 y EPT-1 tienen un comportamiento muy similar, ya que corresponden a aguas subterráneas, y debido a sus componentes se establece que son aguas relacionadas al sistema hidrotermal, a diferencia del pozo MW-10 que sus concentraciones son bajas en comparación con los otros puntos.

Se pudo determinar que entre los puntos del manantial hidrotermal HS-5 y la estación EPT-1 tienen un comportamiento muy similar, esto se debe a que ambas aguas corresponden al mismo sistema, que están influenciadas directamente y calentadas por vapores y gases, lo que hace la diferencia con aguas frescas.

Las aguas superficiales evaluadas, han presentado parámetros *fisicoquímicos* muy similares, pero a diferencia de la estación SW-9, que presentó un comportamiento muy similar a las aguas hidrotermal, y esto se debe a que dicho punto tiene una descarga directa del manantial hidrotermal Trapiche Vargas, lo que provoca una modificación química en sus aguas, con concentraciones de cloro y sodio (129 y 150 mg/L), pero al momento en que las aguas continúan su trayectoria, estas concentraciones se van diluyendo, por ende disminuyen significativa hasta llegar al punto de monitoreo SW-13 (27.4 y 43.7 mg/L).

5.5. Directrices de uso de las aguas subterráneas según sus condiciones geoquímicas, a través de normas internacionales para proyectos productivos

La FAO (Food and Agriculture Organization UNESCO) en 1976 estableció el límite máximo permisible para el boro de 0.73 mg/L para agua de riego, de acuerdo con el análisis comparativo con los resultados obtenidos en las estaciones de monitoreo analizadas, se identifica que los puntos de monitoreo MW-2.2, HS-5, DTP-1, ETP-1 y MW-14 son aguas de tipo subterráneo, que corresponden a pozos que se encuentran principalmente dentro del proyecto minero, exceptuando al agua termal Trapiche Vargas que es un nacimiento de agua de origen profundo, dichos puntos sobrepasan las concentraciones aptas para ser utilizadas para uso agrícola.

En el caso de las estaciones SW-9 y MW-14 tienen contenido de boro menor a 2 mg/L, por lo que pueden ser utilizadas para cultivo moderadamente sensible como arveja, zanahoria, rábano, papa y pepino. Por lo tanto, los puntos de monitoreo que tengan menor contenido a 4 mg/L pueden ser utilizadas también para cultivos moderadamente tolerantes como melón, lechuga, repollo, apio, avena, maíz, alcachofa, tabaco, mostaza.

Los puntos de monitoreo de agua superficiales que tienen un contenido de boro menor a 1 mg/L son los siguientes: SW-3, SW-4, SW-5, SW-8, SW-13, SW-11, SW-12 y los pozos de agua subterránea identificados como MW-10 y MWL-1 tiene bajo contenido de boro, por lo que puede ser utilizada para cultivos sensibles como durazno, cereza, ciruela, vid, cebolla, ajo, trigo, cebada, girasol y frutillas.

La estación MW-2.2 del pozo de monitoreo El Salitre, presenta contenido de boro de 4.7 mg/L y la estación de agua superficial SW-7 con 5.5 mg/L, por lo que se considera que podría ser utilizar para cultivos tolerantes como tomate, alfalfa, arveja, perejil, remolacha. (British Columbia, 2003, p. 2)

“Las estaciones de monitoreo DTP-1 y ETP-1 tienen contenido de boro de 7.7 mg/L y 7.5 mg/L, y la estación HS-5 del agua termal Trapiche Vargas con 11.2 mg/L, siendo agua con mayor contenido de dicho elemento, por lo que se considera utilizar para cultivos muy tolerante como espárragos” (Brithish Columbia Water Quality, 2003, p. 2).

De acuerdo con lo establecido por la FAO, la concentración recomendada de arsénico en agua para uso de riego es de 0.10 mg/L, tomando en

consideración dicho parámetro, se determinó que las estaciones MW-2.2, HS-5 y ETP-1 tienen concentraciones de As que sobrepasan el límite recomendado. Se han realizado diversos estudios relacionados a la carga de arsénico en aguas para uso agrícola y consumo humano, por lo que se considera un metal pesado que genera amenaza a la salud humana, y su concentración en aguas es la forma en que podría llegar hacia el cuerpo humano, por productos que han sido manejados con aguas con altas concentraciones de dicho elemento.

El arsénico tiene la capacidad de acumularse en las plantas, ya que se acumula primeramente en las raíces, seguidamente en las hojas y por último en las semillas o frutos, siendo importante que las aguas son utilizadas para riego con concentraciones mayores a las recomendadas por la FAO, debe considerarse el tipo de fruto a cultivar y que parte del cultivo se va a consumir, ya que no se recomienda el consumo de raíces u órganos que se encuentren en la tierra.

La conductividad eléctrica es un factor importante de evaluar en las aguas para uso de riego, ya que su alta presencia, puede provocar daños en el crecimiento y la función del enraizamiento, por lo que las concentraciones de sales solubles en el agua deben estar controlada previo a ser utilizadas para riego, en el caso.

El cloro es un elemento muy importante para las plantas en fertilización, y que de acuerdo con su concentración se puede ser utilizado para diversos tipos de cultivo que tienen la capacidad de absorber dicho elemento, es por ellos que existen ciertas plantas que son más y menos tolerantes a los altos niveles de concentración, tanto en el suelo, como al agua de riego. Se han realizado varias clasificaciones de acuerdo con que la planta sea estimulada o no al crecimiento. En el análisis realizado en las aguas subterráneas y superficiales, se pudo

establecer que las estaciones SW-7, HS-5 y DTP-1, se encuentran en el rango que va de 394 a 645 mg/L, superando el límite de la FAO y del INN, por consiguiente, hay plantas tolerantes que podrían soportar concentraciones por debajo de los límites.

Debido a las condiciones químicas que presentan las aguas subterráneas, principalmente en las estaciones evaluadas, se puede establecer que para ser uso en las actividades agrícolas, es importante ser tratadas para la eliminación de ciertos elementos que sobrepasan los límites permisibles de acuerdo con las normas internacionales evaluadas, ya que pueden provocar daños a la salud humana al consumo de los productos.

El tipo de análisis efectuado es únicamente para proyectos productivos, ya que se enfocó principalmente en la agricultura siendo esta actividad una de las principales en la región y con mayor demanda, además los pozos evaluados en el sistema, se encuentran en su mayoría dentro del proyecto minero Cerro Blanco, y son utilizados únicamente para control y monitoreo de la actividad, por lo que aún no es viable realizar análisis de calidad de agua para consumo humano, ya que presenta altas cargas de elementos que deben ser tratados.

CONCLUSIONES

1. Se realizó un modelo conceptual hidrogeoquímico con base a información obtenida por el proyecto Geotermia Oriental de Guatemala S.A., análisis de datos existente y etapa de campo, de acuerdo con las condiciones geológicas y químicas de las aguas. Se determinó la primera zona, que comprende las aguas subterráneas con interacción directa del sistema hidrotermal, donde las aguas están siendo migradas directamente del sistema, con una mínima mezcla o dilución con aguas frescas, el punto HS-5 denominado el manantial de aguas termales Trapiche Vargas es la evidencia de dicha condición geoquímica, ya que moviliza aguas hacia la superficie por medio de una fractura abierta con orientación Este-Oeste, siendo evidente concentraciones >600 mg/L de Cl, con una CE >3600 μ S/c lo que es típico de ambientes termales. La segunda zona identificada es la de mezcla, es decir donde las aguas subterráneas migran desde el sistema termal, y durante el proceso de transporte por medio de la falla principal con orientación Norte-Sur, entra en contacto con aguas más frescas o someras, y son calentadas por vapores y gases, siendo evidente que las concentraciones de Cl, Na y la CE van disminuyendo por procesos de dilución siendo evidente en los puntos MW-2.2, DTP-1, ETP-1.
2. Las características hidrogeoquímicas de la microcuenca en estudio, aportaron información para poder establecer su relación con el sistema hidrotermal, entre ellos se encuentran los diagramas binarios por medio de un modelo de regresión lineal de algunos elementos que son representativos en las aguas tanto superficiales como subterráneas, para lo cual se consideraron los cloruros y sulfatos; elementos que dan una

representación de las aguas de origen hidrotermal muy particular de esta zona. Otro parámetro es la Conductividad Eléctrica, donde se establece que las estaciones HS-5, DPT-1, MW-14, ETP-1, que están entre un rango de 2500 a 3700 us/cm. Así mismo se analizó la relación entre cloruros y sulfatos; cloruros y potasio; cloruros y magnesio; determinando que las estaciones DTP-1, ETP-1, MW-4, HS-5 (aguas subterráneas) al igual que la estación de agua superficial SW-7, están siendo intervenidas por el mismo sistema, es decir que se encuentran conectadas al sistema hidrotermal, ya que las aguas subterráneas son calentadas por vapor e interactúan con aguas superficiales, a diferencia de las otras estaciones evaluadas.

3. Las aguas fueron clasificadas de acuerdo con su contenido de aniones y cationes tanto en aguas superficiales como subterráneas. Los pozos de agua MWL-1 y MW-14 son aguas típicas de un ambiente de subterráneo con ciertas concentraciones de yeso, y las estaciones SW-3, SW-4, SW-5, SW-8, SW-13 se clasifican como aguas cálcicas bicarbonatadas que podría corresponder a aguas poco profundas con recargas de agua superficial. La otra sección de datos corresponde a aguas de origen subterráneo como lo son las estaciones HS5, MW-2.2, ETP-1, DTP-1 son típicas de aguas profundas definidas como cloruradas sódicas, los puntos de aguas superficial SW-7 y SW-9 en conjunto con el pozo MW-10, corresponden a aguas con mezcla del sistema profundo y somero, es decir, se encuentran influenciadas por el intercambio iónico. Es muy evidente que las aguas poseen una carga de ciertos elementos químicos que son muy representativos de la región, siendo aguas superficiales con concentraciones de iones de carbonatos y bicarbonatos, pero en el caso de las aguas subterráneas tienen cierta particularidad de altas concentraciones de cloruros y sulfatos.

4. El Modelo Hidrogeoquímico conceptual propuesto consiste en un perfil con dirección de orientación SW-NE, logrando definir a nivel superficial las unidades geológicas más significativas del área, y su proyección hasta los -2000 msnm de acuerdo con el modelo existente. Como resultado se obtuvo una zona de migración directa a través de una fractura, siendo el manantial hidrotermal Trapicha Vargas HS-5 ya que hay presencia Cl, Na, B, y menor concentración de Ca y Mg, siendo aguas del tipo cloruradas sódicas típicas de ambientes hidrotermales. Existe una zona de migración importante que es a través del fallamiento principal (Norte-Sur) de la zona que provocó la mineralización del yacimiento metálico Au-Ag, donde se ubican los puntos ETP-1, DTP-1, MWL-1 y los nacimientos termales como el HS-1 que están en dirección a la zona de falla, presentan altas concentraciones de elementos de Cl, SO₄ y CE, pero va disminuyendo con relación a la zona de migración directa, por lo que nos da indicios que ahí existe mezcla con otras aguas frescas, pero siguen siendo calentadas por vapores y gases. La tercera zona de interacción es la zona de mezcla con aguas más frescas, ya que se tiene dilución del Cl y otros elementos indicadores, y hay aumento de Ca y Mg que son típicas de aguas meteóricas y someras, así también una disminución de la CE, por ende, se está teniendo mayor relación con otras aguas.
5. En cuanto a la relación geoquímica que tienen las aguas superficiales y subterráneas se determinó por medio de varios parámetros fisicoquímicos, donde se pudo verificar su comportamiento en ambos tipos de aguas, El manantial hidrotermal de Trapiche Vargas fue evaluado de forma gráfica, logrando evidenciar que su comportamiento es muy similar a algunos pozos de agua, principalmente a la estación ETP1, que son aguas provenientes de zonas profundas. Las aguas superficiales tienen concentraciones muy significativas de Ca, Mg, Na y SO₄, con un

comportamiento parecido a las otras estaciones de aguas, a diferencia del punto SW-9, que presenta algunas cargas elementales diferentes a las aguas superficiales, y se debe a que recibe descargar de aguas provenientes del nacimiento hidrotermal Trapiche Vargas HS-5, lo que provoca una modificación química en dichas aguas. Por lo tanto, de acuerdo con el tipo de aguas que presentan en el área, se pudieron definir que existen aguas con interacción con el sistema profundo que están siendo calentadas por gases y vapores, y otras aguas subterráneas que sus niveles de concentración elemental son menores, por consiguiente, son aguas con poca interacción con el sistema o tiene mayor dilución o mezcla.

6. Las directrices de uso de las aguas subterráneas deben seguir siendo monitoreadas al igual que las aguas superficiales principalmente para uso agrícola, en este caso se determinó que actualmente cumplen con los parámetros estipulados por la FAO y la INN con relación a su contenido de As, B, Fe, Mg y Cl, excepto el punto de monitoreo SW-7 Puente Las Tablas, ya que este sobrepasa los límites de B, Mg y Cl. En el caso de los pozos de agua se encuentra el MW-10 y el MWL-1, cumpliendo con su contenido elemental según las normas internacionales a excepción de la concentración de magnesio ya que sobrepasa los límites, pero puede ser tratado para su reducción o eliminación. Dichos pozos se encuentran dentro del proyecto Cerro Blanco, por consiguiente, no están para uso de la población.
7. Los puntos SW-9 y MW-14 tienen contenido de boro menor a 2 mg/L, por lo que pueden ser utilizadas para cultivo moderadamente sensible como arveja, zanahoria, rábano, papa y pepino, al igual que las estaciones MW-2.2 que tiene contenido a 4 mg/L pueden ser utilizadas también para

cultivos moderadamente tolerantes como melón, lechuga, repollo, apio, avena, maíz, alcachofa, tabaco, mostaza. Las estaciones MW-2.2, HS-5 y ETP-1 tienen concentraciones de As que sobrepasan el límite, por lo que se debe considerar el tipo de fruto a cultivar y que parte del cultivo se va a consumir, ya que no se recomienda el consumo de raíces u órganos que se encuentren en la tierra, ya que genera amenaza a la salud humana. El cloro presente en las aguas analizadas muestra que las estaciones SW-7, HS-5 y DTP-1, ETP-1 y MW-14 se encuentran en el rango que va de 394 a 645 mg/L, superando el límite de la FAO y del INN, por consiguiente, hay plantas tolerantes que podrían soportar concentraciones por debajo de los límites, pero en estos puntos en particular no son aptos para cultivos.

RECOMENDACIONES

1. A la Municipalidad de Asunción Mita, del departamento de Jutiapa, que tome en consideración la evaluación química de sus aguas al momento de la apertura de pozos o manantiales que serán utilizados tanto para el consumo humano como para proyectos productivos, ya que no todas las aguas presentan las condiciones óptimas, por lo que deben ser tratadas como corresponda.
2. Realizar un estudio más detallado sobre la paragénesis de migración, que pueda establecer los intercambios entre el sistema hidrotermal y los depósitos epitermales, y así poder comprender mejor el modelo hidrogeoquímico conceptual.
3. Es importante al momento de realizar perforaciones de pozos para consumo humano ya sea municipal o privado, que tomen en consideración las interacciones de las aguas con los sistemas hidrotermales, ya que deben realizar estudios hidrogeológicos detallados para realizar perforaciones en lugares aptos tanto en cantidades como calidades.
4. Utilizar las aguas superficiales analizadas para uso exclusivo en proyectos productivos, siempre y cuando tomen en consideración el tipo de cultivo, ya que cumplen con los parámetros estipulados por la FAO y la INN con relación a su contenido de As, B, Fe, Mg y Cl, a excepción del punto de monitoreo SW-7 Puente Las Tablas ya que este sobrepasa los límites mencionados. Es importante que se analicen los parámetros microbiológicos para uso agrícola.

5. Al proyecto minero “Cerro Blanco” darle seguimiento, protección y control de calidad tanto para usos agrícolas como para consumo humano a los pozos de agua MW-10 y el MWL-1, ya que su contenido en los elementos analizados cumple las normas internacionales para uso agrícola, a excepción del Mg en el pozo MWL-1 que puede ser tratado.
6. De acuerdo con las condiciones de las aguas subterráneas que tienen interacciones con el sistema hidrotermal como lo es el manantial Trapiche Vargas HS-5, SW-7, DTP-1, presentan concentraciones de elementos que no permiten que las aguas sean utilizadas para proyecto productivos, por lo que se recomienda implementar tecnologías de tratamiento y remediación adecuadas para reducir los niveles de elementos químicos y asegurar que el agua cumpla con los estándares de calidad.
7. A la Municipalidad de Asunción Mita como al Proyecto Minero Cerro Blanco, implementar sistemas de educación para la comunidad local, a los usuarios de agua y a los trabajadores del proyecto sobre la importancia de la conservación y el uso responsable del agua subterránea en un área hidrotermal.
8. Implementar un Plan de Contingencia, en caso de eventos inesperados por encontrarse en un ambiente hidrotermal activo, que incluya procedimientos de emergencia y estrategias de respuesta.

REFERENCIAS

- Amaya, Á. (2015). *Evaluación Hidrogeoquímica e Hidroquímica de la subcuenca del río Aranchacal*. [Tesis de Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos, Universidad de El Salvador]. Repositorio institucional.
- Bardales, W., Castañón, C., & Herrera, J. (2019). *Tendencias observadas e índices de cambio climático*. Universidad del Valle de Guatemala.
- Comisión Trinacional del Plan Trifinio, ES -CTPT-. (2009). *Trifinio: los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del río Lempa. Programa para la promoción de la administración del agua como bien público regional en la cuenca alta del río Lempa en la región del Trifinio*. CTPT.
- Consejo Municipal de Desarrollo (COMUDE) del Municipio de Asunción Mita; Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia; Dirección de Planificación Territorial. (2011). *Plan de Desarrollo Municipal de Asunción Mita, Jutiapa 2011-2025*. SEGEPLAN.
- Everlife, Sociedad Anónima. (2007). *Programa de trabajo y plan de mitigación para la construcción de dos túneles de exploración de 300 m cada uno en Cerro Blanco*. Autor.
- Everlife, Sociedad Anónima. (2010). *Evaluación de Impacto Ambiental, Proyecto Geotérmico Cerro Blanco*. Autor.

Fuentes, J. C. (2005). *Determinación de principales áreas de recarga hídrica natural y de la calidad del agua en la microcuenca del río Cotón, Baja Verapaz, Guatemala*. [Tesis de maestría en manejo sustentable de suelo y agua, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Geotecnología, Construcción y Servicios Sociedad Anónima. (2019). *Justificación para modificación del contrato de autorización definitiva otorgada a Geotermia Oriental de Guatemala S.A. para la instalación de una central geotérmica en Cerro Blanco*. Autor.

González, W. (2011). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá*. [Tesis de maestría en manejo y gestión de recursos hidrogeológicos, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio institucional.

Herrera, I. R., & Brown, O. (2011). Propuesta de una metodología para la estimación de las áreas de recarga hídrica en Guatemala. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4), 48-52
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:24h8wyHMYu8J:scielo.sld.cu/pdf/rcta/v20n4/rcta09411.pdf+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=gt>.

Instituto Nacional de Estadística de Guatemala. (1985 - 2019). *XII Censo Nacional de población y VII de vivienda*. INE.
<http://redatam.censopoblacion.gt/bingtm/RpWebEngine.exe/>

- Luna Aroche, J. R., Cosillo Pinto, A., Gordillo de Marchena, C., Vendrell, P., Solís, L. y Navichoque, G. (2013). *Análisis de la información en la cuenca Ostúa-Güija, con énfasis en la calidad de las aguas subterráneas, y la incidencia del Proyecto Minero Cerro Blanco*. Centro de Investigaciones de Energía y Minas.
- Martínez, P., Martínez, P., & Castaño, S. (2005). *Fundamentos de Hidrología*. Mundi-Prensa.
- Méndez, G. E. (2013). *Diagnóstico Ambiental y Actividades de Gestión Ambiental, Desarrolladas en el Proyecto Minero Cerro Blanco, Asunción Mita, Jutiapa, Guatemala*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Asunción Mita, Jutiapa. (2018). *Sectores generadores de empleo Municipio de Asunción Mita, Jutiapa, Guatemala*. MAGA. <http://www.trinacional.simsan.org/index.php/>
- Mis, A. (2017). *Aplicación del balance iónico y construcción de diagrama de Piper para la evaluación del potencial industrial de las aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala*. [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.
- Morán, J., Ledesma, R., Manknecht, J., & Ramos, J. (2016). *Rockwater interactions and pollution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, Mexico, using inverse geochemical modeling*. McGraw-Hill.
- Ochoa, W., & Rivera, P. (2020). *Variabilidad climática en el municipio de Asunción Mita, Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Paz, C. H. (2013). *Análisis del trabajo de la administración de la Unidad de Riego de Asunción Mita, Jutiapa, del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación a los usuarios del servicio en el período de 1994-2009. Guatemala.* Universidad Rafael Landívar.

Santillán, I. Á. (2010). *Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero del Valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, México.* Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.

UGSA. (2010). *Informe Técnico acerca de Calidad del agua en Cerro Blanco INF-UGSA-16-04-08-10.* Ministerio de Energía y Minas.

UNESCO. (2015). *Estrategia Regional para la Evaluación y Gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en las Américas.* Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe.

Zhen Wu, B. Y. (2009). *Calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua para consumo humano de la microcuenca de la quebrada Victoriam Curubandé, Guanacaster, Costa Rica.* Universidad Estatal a Distancia Vicerrectoría Estatal a Distancia Escuela de Ciencias Exactas y Naturales.

APÉNDICES

Apéndice 1.

Estaciones de monitoreo de agua superficial y subterránea.

Aguas Superficiales

Área 1: Punto de monitoreo SW-4

El área donde se ubica el punto de monitoreo se encuentra ubicado específicamente en la parte de arriba del riachuelo Tancushapa, en coordenadas UTM WGS84 Zona 16N X:211370, Y:1586898 dentro del proyecto minero Cerro Blanco, es decir al suroeste del Cerro Pedernal, con una definición de suelo con textura limo-arenosa y una capa de cobertura vegetal significativa, siendo evidente que en sus alrededores el área tiende a ser utilizada principalmente para proyectos ganaderos, con cierto grado de vegetación que ha prosperado debido a que es parte del límite de la propiedad del proyecto minero. De acuerdo a los parámetros obtenidos en campo, se tiene un potencial de hidrógeno de 7.69, oxígeno disuelto de 3.40 ppm y conductividad eléctrica de 387 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 25.04 °C.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 1.

Punto de monitoreo SW-4 que se encuentra en la parte de arriba del riachuelo Tancushapa.

Área 2: Punto de monitoreo SW-7



Está ubicada en el riachuelo Tancushapa, a un costado del puente identificado como Las Tablas, con influencia de corrientes de agua que pertenecen a los ríos de Tancushapa y Tempisque, este se encuentra dentro de la aldea Trapiche Vargas, teniendo influencia de población cercana, así como actividad ganadera de las propiedades aledañas. Presenta muy poca carga de vegetación en el área, lo que no aporta una cobertura vegetal en la ribera del río, únicamente árboles frutales. Es importante indicar que aun costado del punto de monitoreo se encuentra una gran extensión de cultivo de maíz, donde los químicos fertilizantes que son utilizados en dicha actividad probablemente tengan influencia en el riachuelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los parámetros físicos del agua, presentó un potencial de hidrógeno de 8 y oxígeno disuelto de 4.72 ppm, con una conductividad eléctrica de 935 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 25.05 °C.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 2.

Riachuelo Tancushapa, estación de monitoreo SW-7



Área 3: Punto de monitoreo SW-8

Se ubica en coordenadas UTM WGS84 Zona 16N X:209731, Y:1585966 en aguas arriba del río Grande de Mita. De acuerdo a los parámetros obtenidos se tiene un potencial de hidrógeno de 8.63, oxígeno disuelto de 10.97 ppm, conductividad eléctrica de 299 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 32.29 °C.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 3.

Aguas arriba del río Grande de Mita, estación de monitoreo SW-8



Área 4: Punto de monitoreo SW-13

Se ubica a cercanías de la aldea Trapiche Vargas, en la parte baja del río Ostúa, con carga hídrica de los ríos Tancushapa y Morán, con un mayor caudal. El uso de las propiedades aledañas es principalmente siembra lo que disminuye la protección del suelo y cobertura vegetal.

Como parte de la información importante para el balance hídrico, se procedió a realizar el aforo en dicho punto de monitoreo, el cual se detalla en el apartado de Balance Hídrico. Como parte de la información recabada en campo, se obtuvo un potencial de hidrógeno de 7.87, con oxígeno disuelto de 5.99 ppm y conductividad eléctrica de 441 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 28.72 °C, siendo importante considerar que el río presenta un ancho aproximado de 10 metros y

Continuación Apéndice 1.

profundidad promedio de 0.5 metros en época de verano, esto de acuerdo al aforo realizado en dicho punto.

Fotografía 4.

Punto de monitoreo SW-13, parte alta del río Morán



Área 5: Punto de monitoreo SW-6

Está ubicada en la parte alta del cauce del río Morán, específicamente en coordenadas UTM WGS84 Zona 16 X:216703, Y:1586886, obteniendo los parámetros físicos de potencial de hidrógeno de 7.80, oxígeno disuelto de 4.64 ppm, con una conductividad eléctrica de 240 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 30.26 °C.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 5.

Punto de monitoreo SW-6, parte alta del río Morán



Área 6: Punto de monitoreo SW-9

El área donde se encuentra el punto de monitoreo de agua superficial se encuentra en la parte de abajo del río Morán, específicamente en coordenadas UTM WGS84 X:216583, X:1585139, donde se pudo observar que no se tiene en sus alrededores población o algún tipo de uso de tierra que pueda influenciar este punto, pero es agua proveniente de la parte alta y que posteriormente se une al río Ostúa. Este afluente posee un caudal muy bajo en verano, el cual fue medido y es detallado en el apartado de Balance Hídrico, con una longitud aproximada de 5 metros y una profundidad de 0.30 metros.

Se obtuvo una medición en campo en época de verano, un potencial de hidrógeno de 7.75, oxígeno disuelto de 5.12 ppm y 405 $\mu\text{S}/\text{c}$ de conductividad eléctrica a una temperatura de 25.79 °C.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 6.

Punto de monitoreo SW-9, parte baja del río Morán



Aguas con migración directa del sistema hidrotermal

Área 7: Punto de monitoreo HS-5

Uno de los puntos importantes de la investigación se encuentra en esta área, ya que presenta ciertas características particulares del ambiente hidrotermal, siendo el nacimiento de agua termal Trapiche Vargas, ubicado en coordenadas UTM WGS84 X:215990, X:1586798 presenta una temperatura por encima de los grados de ebullición, que emana a la superficie a través de una fractura orientada en dirección Este-Oeste, siendo uno de los puntos principales que evidencia el comportamiento hidrotermal de la zona. El agua proveniente del sistema hidrotermal se dirige hacia la quebrada que presenta una mezcla con el sistema superficial.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 7.

Nacimiento termal Trapiche Vargas, punto de monitoreo HS-5



De acuerdo con ellos se procedió a tomar los parámetros físicos en época de verano. Las condiciones de temperatura del manantial hidrotermal, se encontraban en punto de ebullición, pero para ello fue necesario que la temperatura disminuyera a 47 °C con un potencial de hidrógeno de 6.88, oxígeno disuelto de 2.34 ppm y conductividad eléctrica de 3650 $\mu\text{S}/\text{c}$, siendo peculiar este último dato, debido a que se encuentra por arriba del parámetro en aguas frescas.

Continuación Apéndice 1.

Las aguas antes mencionadas son descargadas del sistema hidrotermal por medio de la fractura, y dirigidas hacia una quebrada de agua fresca que es denominada por los pobladores como quebrada de “Los Avila”, observando en los alrededores de dicho nacimiento termal que existe vegetación denominada como Tule, que se caracteriza por zonas de aguas con altas temperaturas.

Área 8: Punto de monitoreo DPT-1

El área está ubicada en las coordenadas UTM WGS84 X:212460, X:1588444 que corresponde a la descarga de la planta de tratamiento de aguas provenientes de pozos de aguas profundas extraídos de los túneles aperturados por la actividad minera, que son sometidas a un proceso de remoción de arsénico y enfriamiento para ser descargados a la quebrada Regina, por lo que es un punto importante para considerar al momento del análisis de la microfrecuencia.

Fotografía 8.

Punto de monitoreo subterráneo DPT-1, descarga de la Planta de Tratamiento de agua subterránea de Mina Cerro Blanco



Continuación Apéndice 1.

Los resultados obtenidos en campos de los parámetros físicos es un potencial de hidrógeno de 8.39, con oxígeno disuelto de 6.43 ppm y conductividad eléctrica de 2443 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 29.58°C.

Área 9: Punto de monitoreo EPT-1

Dicha área se encuentra en las coordenadas UTM WGS84 X:212345, X:1588400 donde está el punto de monitoreo ETP-1, que corresponde a la entrada de aguas subterráneas profundas bombeadas de los túneles sin ningún proceso químico de eliminación de arsénico. Presentando un potencial de hidrógeno de 8.24, con oxígeno disuelto de 3.76 ppm y conductividad eléctrica de 2331 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 29.58°C, siendo evidente que tiene menor OD que las aguas de descarga de la estación DPT-1.

Fotografía 9.

Punto de monitoreo subterráneo EPT-1 Pozo de Mina Cerro Blanco



Continuación Apéndice 1.

Área 10: Punto de monitoreo MW-14

Se ubica el pozo de monitoreo de nivel de agua MW-14 que es utilizado por el proyecto minero Cerro Blanco, ya que es muy importante para poder controlar el acuífero y los avances en la actividad minera, por lo que se encuentra dentro de su propiedad privada, y no posee ningún tipo de bomba para sustracción del agua, por lo que fue necesario extraer el agua por medio de un

Continuación apéndice 1.

muestreador tipo probeta. El punto de monitoreo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM WGS84 X:212501, X:1588252.

Los parámetros físicos obtenidos en época de verano presentan un potencial de hidrógeno de 6.81, oxígeno disuelto de 2.40 ppm y conductividad eléctrica de 2080 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 33.89°C, con un nivel freático de 4.70 metros, según información obtenida en campo, la profundidad de perforación del pozo es de 30 metros aproximadamente.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 10.

Punto de monitoreo subterráneo MW-14 Pozo de Mina Cerro Blanco



Área 11: Punto de monitoreo MW-10

El segundo punto también corresponde a un pozo de monitoreo por el proyecto minero, el cual se encuentra dentro de su propiedad privada, y no posee ningún tipo de bomba para sustracción del agua, por lo que fue necesario extraer el agua por medio de un muestreador tipo probeta. El punto de monitoreo se encuentra ubicado en las coordenadas UTM WGS84 X:212165, X:158707.

Los parámetros físicos obtenidos en época de es un potencial de hidrógeno de 6.88, oxígeno disuelto de 1.52 ppm y conductividad eléctrica de 629 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 42.13°C, con una profundidad de 52 metros de agua.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 11.

Punto de monitoreo subterráneo MW-10 Pozo de Mina Cerro Blanco



Área 12: Punto de monitoreo MW-2.2

El pozo de monitoreo identificado como MW-2.2 es conocido como El Salitre, ubicado en coordenadas UTM WGS84 X:212232, X:1587080, dentro de la propiedad del proyecto minero, con un potencial de hidrógeno de 6.61, oxígeno disuelto de 3.06 ppm y conductividad eléctrica de 1707 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 38.41°C, con una profundidad de 2.69 metros de agua y de acuerdo a información obtenida en campo el pozo fue perforado a 25 metros aproximadamente de profundidad.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 12.

Punto de monitoreo subterráneo MW-2.2 Pozo de Mina Cerro Blanco



Área 13: Punto de monitoreo MWL-1

En dicha área se encuentra el pozo de monitoreo conocido como Lodos, que está ubicada en la parte de atrás de las trincheras, con el objetivo de monitorear si existe algún tipo de percolación del material que ha sido encapsulado durante el proceso de minado, está coordenadas UTM WGS84 X:212258, X:1588506 y se encuentra dentro de la propiedad del proyecto minero.

Los parámetros físicos obtenidos en campo durante la época de verano es un con un potencial de hidrógeno de 6.25, oxígeno disuelto de 3.15 ppm y conductividad eléctrica de 1152 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 32.06°C, con una profundidad de 5.71 metros y se desconoce la profundidad el pozo perforado.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 13.

Punto de monitoreo subterráneo MWL-1 Pozo de Mina Cerro Blanco



Área 14: Punto de monitoreo HS-1

Dentro del sistema hidrotermal, se tiene otra zona de emanación de aguas subterráneas termales específicamente en coordenadas UTM WGS84 X:212405, X:1587238 que se encuentra ubicada a orillas de la carretera que conduce hacia la aldea Cerro Blanco, donde se tiene elaborada una pileta de concreto.

Se tomaron los parámetros físicos en campo durante la época de verano, con un potencial de hidrógeno de 6.25, oxígeno disuelto de 4.43 ppm y conductividad eléctrica de 2832 $\mu\text{S}/\text{c}$ a una temperatura de 45.29°C, que se considera como la zona de descarga del sistema hidrotermal.

Continuación Apéndice 1.

Fotografía 14.

Punto de monitoreo HS-1, emanadero de agua termal a un costado de la carretera principal que conduce al proyecto minero Cerro Blanco



Nacimiento de agua fresca

Área 15: Punto de monitoreo NTV

Como parte del sistema de aguas someras, se encuentra el nacimiento de agua fresca denominado como “Nacimiento Trapiche Vargas” ubicado en coordenadas UTM WGS84 X:214569, X:1588055 el cual distribuye agua en su mayoría a la aldea Trapiche Vargas. Este manantial se ve impactado en gran manera en la época de verano esto de acuerdo a información proporcionada por pobladores, ya que el nivel freático es muy bajo que no permite emerger a la superficie.

Se tomaron los parámetros físicos en campo durante la época de verano, con un potencial de hidrógeno de 7.89, oxígeno disuelto de 5.24 ppm y conductividad

Continuación Apéndice 1.

eléctrica de 218 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a una temperatura de 27.76 $^{\circ}\text{C}$, que se considera como la zona de descarga del sistema hidrotermal.

Fotografía 15.

Punto de monitoreo superficial NTV, nacimiento de agua



Nota. Fotografías del punto de monitoreo NTV, donde se analizaron los parámetros físicos del agua utilizando un multiparamétrico. Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1.

Parámetros de calidad física y química del agua

Parámetros de calidad física del agua

Temperatura (T)

Es un parámetro muy importante para determinar el ambiente en que se encuentran las aguas superficiales y subterráneas, lo que establece el grado de calor de un cuerpo sólido o líquido, expresada comúnmente en grados centígrados (°C) y es medida con un termómetro de mercurio o digital. La temperatura in situ se mide con un multiparamétrico que incluye una sonda con medidor de temperatura. La temperatura de las aguas puede indicar si los cuerpos de agua están expuestos a los rayos del sol directamente o están siendo cubiertas por vegetación, el agua puede presentar una temperatura menor (Amaya, 2015, pág. 126)

Las aguas con influencia hidrotermal presentan temperaturas elevadas que van desde 40 y 96 °C y mayor a 100 °C, pero dichas aguas se descargan de forma natural hacia el sistema superficial, de tal forma que modifican el ambiente natural en que se encuentran las especies que viven en dichas aguas, generando reducción de oxígeno lo que produce el aumento de bacterias, esto de acuerdo a la OMS (1998).

Continuación Anexo 1.

Potencial de Hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno determina el contenido de ión hidrógeno en un medio acuoso, al evaluar su concentración se pueden clasificar en aguas alcalinas, que presentan un pH por arriba a 7 y las aguas con menor a 7 son ácidas. Este es usado como una zona o cuerpo contaminado, debido a que si las aguas superficiales presentan un pH entre 6,5 y 8,5 no son indicadores de posible contaminación, considerando que los organismos acuáticos liberan y capturan dióxido de carbono durante la fotosíntesis (Zhen Wu, 2009, pág. 9). Es definido por Amaya (2005, pag. 61) como una propiedad muy importante que define el desarrollo y procesos biológicos y químicos de los cuerpos de agua.

Sólitos Disueltos Totales (SDT)

Está comprendida según Zhen (2009, p. 10) en su mayoría la materia orgánica como sólidos disueltos en sales y gases. Las concentraciones pueden variar la calidad del agua principalmente para consumo humano, ya que pueden provocar un mal sabor al momento de ser ingeridos, y su medida está dada en mg/l o en ppm. (Amaya, 2015, pág. 62).

Las aguas geotérmicas tienen la característica muy particular en contenido de sólidos disueltos, a que se han reportado por encima a los 10,000 mg/L, considerando que las aguas de origen hidrotermal están siendo descargadas en los manantiales (Zhen Wu, 2009, pág. 10).

Conductividad eléctrica (CE)

Evalúa las concentraciones totales de sales solubles en los cuerpos de agua, expresada en unidades de microsiemen por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Según Zhen, (2009, pág. 10) puede ser medido con un conductímetro o multiparamétrico, que determina la actividad eléctrica que poseen los iones que están en la disolución. Así mismo expresa Zhen (2009, pág. 10) que “las aguas

Continuación Anexo 1.

geotérmicas, tienen una conductividad por arriba de los 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, caso contrario a los nacimientos, con una CE entre 39 a 294 $\mu\text{S}/\text{c}$, así también puede indicar las descargas o filtraciones que posee el sistema y su relación con ambientes geotérmicos”.

Turbidez

Es evaluado generalmente por observaciones ya que presenta partículas de diversa granulometría que están suspendidas en el agua, lo que provoca la pérdida de transparencia del agua. De acuerdo a Vega (2018, p. 18), las partículas que están suspendidas podrían ser coloides de limos, arcillas y otros materiales finos.

“Su medida puede ser calculada por unidades de luz diseminada, limitando la penetración de la luz solar generada por sólidos suspendidos en el agua, lo que minimiza el incremento de las especies vegetales acuáticas, su concentración es expresada en miligramos de SiO_2/L ” (Amaya, 2015, pág. 62).

Parámetros de calidad química del agua

Oxígeno Disuelto (OD)

El porcentaje de oxígeno que se presenta de forma disuelta en el agua a una altura y temperatura específica está relacionado a la presión atmosférica y temperatura por la variación de la saturación de oxígeno, en invierno la solubilidad es mayor y verano es lo contrario (Zhen Wu, 2009, pág. 11). Las aguas que presentan concentraciones de OD muy elevadas nos da un indicativo de una calidad mejor en caso contrarios presente concentraciones muy bajas, las posibilidades de vida acuática disminuyen por la falta de oxígeno. (Amaya, 2015, pág. 63).

Continuación Anexo 1.

Cloruros (Cl^-)

Se han detectado como fuentes naturales las salmueras o aguas termales, así como mineral hallita. Las concentraciones de cloruro en las aguas geotérmicas se encuentran entre 5,000 y 6,000 mg/L (Zhen, 2009, pág.15).

Sulfatos (SO_4^{2-})

Se expresan como el componente mayoritario de los minerales como piritita se encuentran presentes en ambientes volcánicas y de alta zona de fallamiento, siendo muy frecuente en la naturaleza. La concentración en las aguas dulces se ha detectado con niveles muy bajos, pero en áreas que estén relacionadas a hidrotermalismo con aguas de mayores profundidades se detectan mayores cargas elementales, aproximadamente entre el rango de 40 y 50 mg/L (Zhen, 2009, pág. 15).

Fluoruro (F^-)

El fluor puede ser detectado de forma natural, especialmente en los minerales como fluorita o apatito, pero en prospecciones minera se a determinado que no es muy común en altas concentraciones, por lo que en ríos detectan muy bajas concentraciones, pero en acuíferos profundos va en aumento, haciendo la relación con ambientes hidrotermales, con concentraciones entre el rango de 2 y 3 mg/L (Zhen, 2009, pág. 15).

Potasio (K^+)

Es un elemento indicador de aguas en contacto o de origen hidrotermal al momento que presente elevadas concentraciones que van desde 500 y 600 mg/L, ya que son aguas que provienen de zonas muy profundas y se pueden detectar en nacimientos de agua a causa de infiltraciones dadas. (Zhen Wu, 2009, pág. 13)

Continuación Anexo 1.

Calcio (Ca^{2+}) y Magnesio (Mg^{2+})

El calcio y magnesio son elementos muy abundantes en la naturaleza ya que se encuentra como componentes mayoritarios en las rocas de origen sedimentario como calizas, dolomíticas y minerales como calcita, yeso, anhidrita, entre otros, por lo que sus concentraciones en el agua son de fuentes principalmente naturales. De acuerdo a Zhen (2009, p. 14) las aguas pueden ser definidas por su dureza de acuerdo a las concentraciones de dichos elementos, por lo que generalmente las aguas subterráneas presentan mayor dureza. “Las principales fuentes de Magnesio en aguas naturales es la dolomita; mientras que, en aguas salinas predomina el cloruro de magnesio (MgCl_2)” (Vega, 2018, p. 22).

Sodio (Na^+)

Las concentraciones de sodio en el agua se dan por procesos naturales debido a la meteorización de sufren las rocas y/o minerales debido a los agentes del agua. En la investigación realizada por Zhen (2009, p. 13) hace referencia citando a Hounslow (1995) donde se indica que el sodio se origina del intercambio natural que se tiene al momento de que una arcilla que presente contenido de calcio o magnesio, estas reacciones liberando el sodio. Así mismo hace referencia a que las aguas profundas con interacción con ambientes geotérmicos se encuentran superiores a los 3000 mg/L.

Hierro (Fe)

Este elemento se considera muy abundante en la naturaleza, ya que en estado natural se puede encontrar en minerales ferrosos, es decir al momento que un mineral sufre oxidación por agentes principalmente agua. “En contacto con el OD en el agua, las sales ferrosas se convierten en férricas por oxidación y se precipitan en forma de hidróxido férrico. Esta precipitación es inmediata con un pH superior a 7,5, siendo más fuerte su concentración en aguas subterráneas que no están en contacto con el aire.” (Vega, 2018, pág. 24).

Continuación Anexo 1.

Boro (B)

Se ha considerado en estudios que el boro está presente en la naturaleza, pero sus concentraciones no son tan predominantes en las aguas, considerado como fuente del desarrollo de las plantas. Las aguas que tienen interacción con zonas geotérmicas profundas presentan concentraciones de boro que van desde 50 a 60 ppm, siendo un indicador importante en las interacciones de aguas subterráneas profundas y someras.

Sílice (SiO₂)

La sílice es un elemento muy abundante en las naturales como silicatos, por lo que, en las aguas de origen geotérmico, la sílice se detecta entre 500 a 600 mg/L, pero las aguas que no posee una interacción con el sistema de altas temperaturas, es producto de la disolución de rocas y minerales presentes en la zona.

Nota. Se presentan los parámetros físicos y químicos que se evalúan en el monitoreo de agua. Obtenido de Zhen Wu, B. Y. (2009). *Calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua para consumo humano de la microcuenca de la quebrada Victoriam Curubandé, Guanacaster, Costa Rica*. p. 45. Escuela de Ciencias Exactas y Naturales.

Anexo 2.

Clasificación del agua con base en su dureza

Denominación	(en ppm)
Muy suave	0 – 15
Suave	16 – 75
Media	76 – 150
Dura	151 – 300
Muy dura	> 300

Nota. Clasificación del agua según su dureza, que va de muy suave a muy dura, valores expresados en ppm. Obtenido de Zhen Wu, B. Y. (2009). *Calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua para consumo humano de la microcuenca de la quebrada Victoriam Curubandé, Guanacaster, Costa Rica.* p. 45. Escuela de Ciencias Exactas y Naturales.

Anexo 3.

Clasificación del agua en base al pH

Tipo	Nivel de pH
Fuertemente ácida	$\leq 3,5$
Ácida	$3,5 < x \leq 5,5$
Débilmente ácida	$5,5 < x \leq 6,8$
Neutra	$6,8 < x \leq 7,2$
Débilmente básica	$7,2 < x \leq 8,5$
Básica	$> 8,5$

Nota. Clasificación del agua según su potencial de hidrogeno, que va de fuertemente ácida a básica, valores expresados en niveles de pH. Obtenido de Zhen Wu, B. Y. (2009). *Calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua para consumo humano de la microcuenca de la quebrada Victoriam Curubandé, Guanacaster, Costa Rica.* p. 48. Escuela de Ciencias Exactas y Naturales.

Anexo 4.

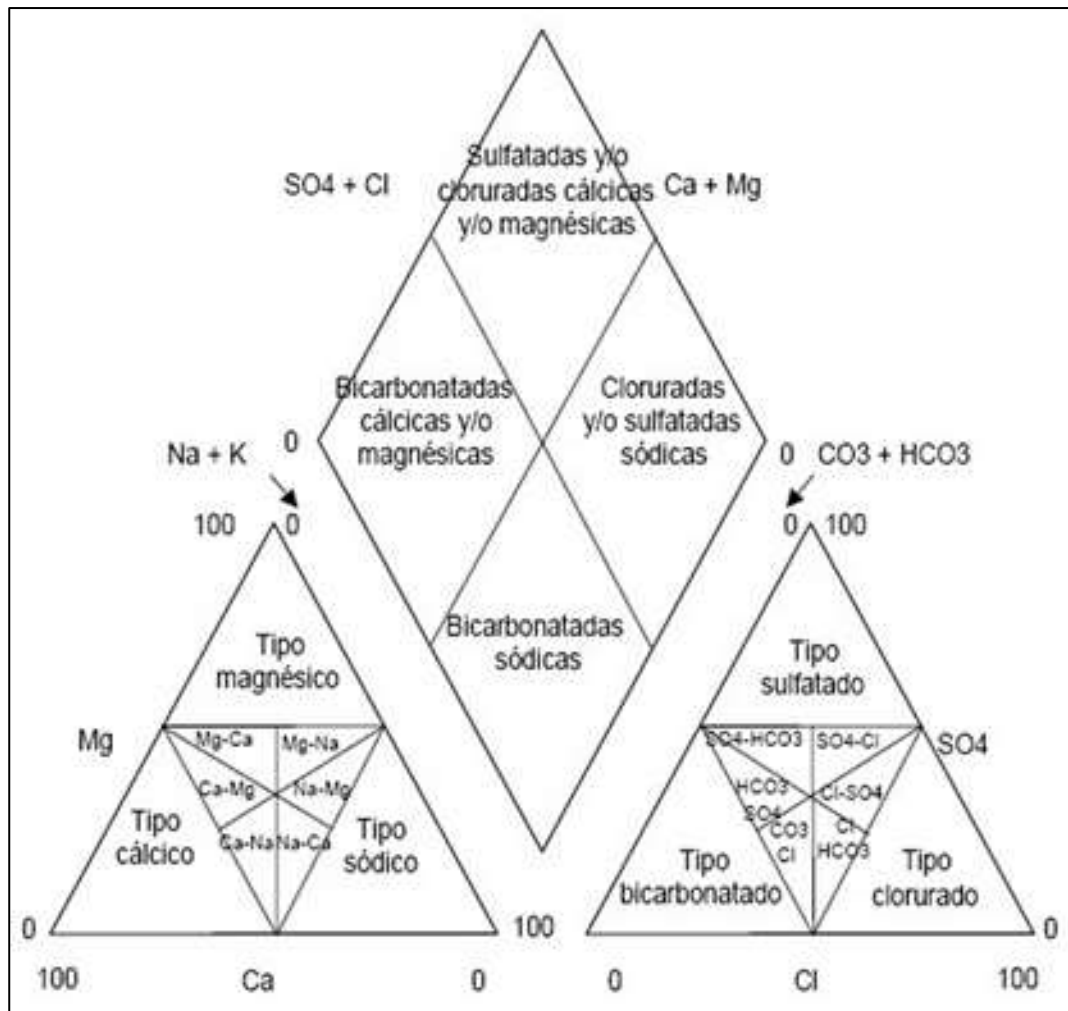
Distribución de agua potable

Tub ería en la vivienda	Tub ería fuera de la vivienda	Ch orro público	P ozo perforado	A gua de lluvia	Mana ntial o nacimiento	ca mión o tonel	Ot ro
11 206	88 0	31	2 34	5	63	41	2 25

Nota. Información de la distribución de agua potable en el municipio de Asunción Mita, Jutiapa, durante el período de 1985 al 2019. Obtenido de INE (2019). *Resultado del XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda* (<http://redatam.censopoblacion.gt/bingtm/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CPVGT2018&lang=esp>) consultado el 20 de mayo de 2020. De dominio público.

Anexo 5.

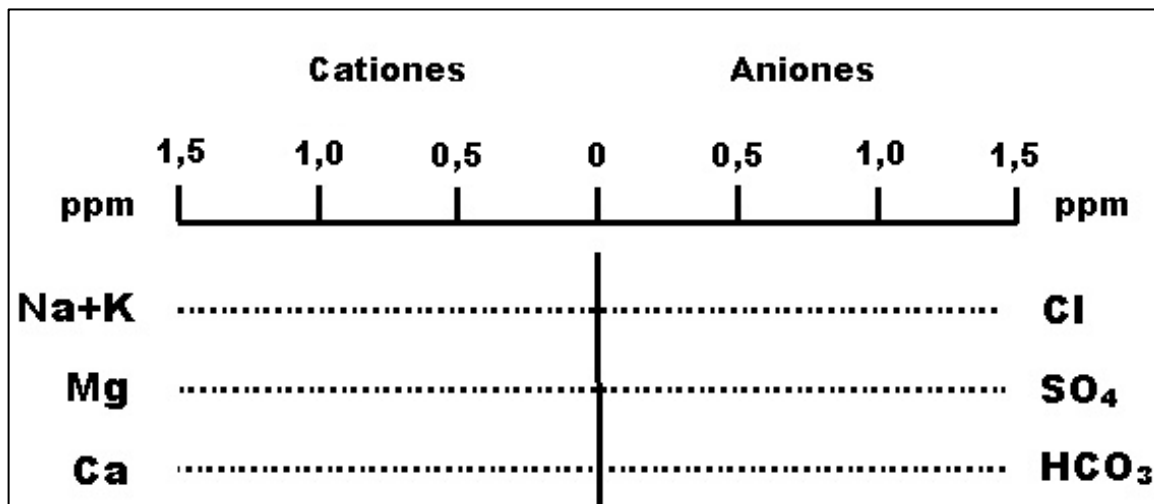
Diagrama de Piper-Hill-Langelier



Nota. Diagrama de Piper-Hill-Langelier que es utilizado para la clasificación de aguas, de acuerdo a su contenido de aniones y cationes. Obtenido de (<http://www.tiloom.com/diagramas-de-piper/>), consultado el 05 de diciembre de 2019. De dominio público.

Anexo 6.

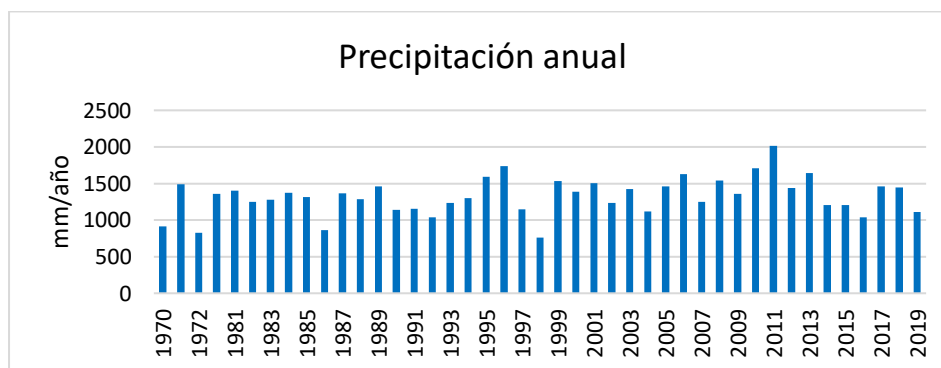
Diagrama de Stiff



Nota. Diagrama de Stiff que se utiliza para clasificar el agua según su contenido de cationes y aniones. Obtenido de (<http://www.tiloom.com/diagramas-de-piper/>), consultado el 05 de diciembre de 2019. De dominio público.

Anexo 7.

Precipitación anual en el municipio de Asunción Mita, Jutiapa



Nota: Gráfico que muestra la precipitación anual desde el año 1970 al 2019, del municipio de Asunción Mita, Jutiapa. Obtenido de Ochoa & Rivera, (2020), *Variabilidad climática en el municipio de Asunción Mita*. p. 102. Universidad de San Carlos de Guatemala.