



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA
DE NICARGUA,
MANAGUA**
UNAN - MANAGUA

**RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA
INGENIERÍA GEOLÓGICA**

Seminario de graduación para optar a título de Ingeniero Geólogo.

**“ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA Y GEOQUÍMICA DE AGUAS TERMALES DEL
SUR DEL VOLCÁN MOMBACHO ORIENTADO A PROSPECCIÓN DE RECURSO
GEOTÉRMICO”.**

Presenta:

Br. Lisbeth de los Ángeles Herrera García

Tutor:

MSc. Gema Velásquez Espinoza

Asesor:

Ing. Mayela Sánchez

Managua, 2017

Agradecimientos

A mi familia, por su espíritu alentador, permanente apoyo y comprensión.

A mi tutora Ing. Gema Velásquez y mi asesora Mayela Sánchez por la paciencia y buena voluntad de guiar esta investigación.

A la Empresa Nicaragüense de Electricidad, dirigida por el Ing. Ernesto Tiffer; por quien dicho trabajo ha sido posible.

A la Dirección de Estudios Geotérmicos de ENEL, Ing. Melba Sú, Ing. Ariel Zuñiga quienes han sido de gran apoyo durante el desarrollo de la investigación.

A mis compañeros, por sus observaciones, sugerencias y recomendaciones a fin de enriquecer esta investigación.

A todos, muchas gracias.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA

2017: "AÑO DE LA UNIVERSIDAD EMPRENDEDORA"

15 de noviembre, 2017

MSc. Elim Campo

Director
Departamento de Tecnología
Presente

Estimado Msc. Campo

El motivo de la presente es para comunicarle que he dirigido y revisado el trabajo de Seminario de Graduación elaborado por la Br.: **Lisbeth de los Ángeles Herrera García** de la carrera de Ingeniería Geológica de la UNAN-Mangua. Dicho trabajo lleva por título **"Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recursos geotérmico"**.

Dado lo anterior, ratifico que el trabajo realizado contiene conocimientos que son científicamente aceptados y técnicamente prácticos, enmarcados en el tema.

Sin más a que referirme, me despido deseándole éxito en sus labores diarias.

Atentamente

MSc. Gema Velásquez Espinoza
Telf.: 8539-3056
Coord. Carrera de Ing. Geológica
Departamento de Tecnología/Facultad de Ciencias e Ingeniería

¡A la libertad por la Universidad!

Resumen

Los recursos geotérmicos en Nicaragua han sido objeto de estudio a partir de 1956, desde entonces diversos estudios de reconocimiento se han llevado a cabo a fin de identificar el potencial geotérmico del país, Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, 2002.

El volcán Mombacho se ubica en el área de interés geotérmico Masaya-Granada-Nandaime, que comprende un área 300 km², por lo cual las investigaciones geotérmicas elaboradas han sido a escala regional, se tomó el área sur del volcán Mombacho (80 km²) para la investigación a fin de elaborar una base de datos a escala semidetalle 1: 20 000 para el área en cuestión.

El objetivo principal de este trabajo ha sido actualizar la carta geológica del área y la caracterización geoquímica de los manantiales que afloran, enfocado a prospección de recursos geotérmicos. Se llevaron a cabo muestreos de rocas y muestreo de aguas (manantiales).

La configuración geológica está compuesta por depósitos volcánicos Cuaternarios y material reciente fluvial de Caldera de Apoyo y volcán Mombacho (Pilato, 2004). Se realizó un análisis morfoestructural del área entre las que destaca la falla Laguna Blanca, evidenciada por el ascenso de una serie de manantiales en su eje norte y una serie de lineamientos NE – SO y N – S.

El área en donde se ubican las manifestaciones termales corresponde a la zona de ascenso del sistema geotérmico del volcán Mombacho. Se identificaron tres grupos de aguas: cloruradas cálcicas – magnésicas y cloruradas sódicas, aguas bicarbonatadas cálcicas de las cuales se ha concluido que en su mayoría corresponden a aguas geotérmicas calentadas por vapor y algunas de ellas presentan un proceso de mezcla con aguas más superficiales. Los resultados del diagrama D'Amore revelan que las aguas están en transición por dos tipos de roca caja, en lo que se distinguen aguas que circulan por rocas volcánicas relativamente someras que probablemente estén en contacto con el basamento rocoso del volcán Mombacho y aguas que circulan por rocas sedimentarias (Formación Brito (?), sugiriendo una circulación de los fluidos muy profunda.

La geotermometría de cationes principales indica una temperatura de reservorio de 180-280°C, valor que resulta atractivo para futuras investigaciones a fin de conocer la génesis y comportamiento del reservorio geotérmico de volcán Mombacho.

Contenido

Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Localización y vías de acceso.	6
1.3 Generalidades del área.	9
1.4 Justificación.....	11
1.5 Planteamiento del problema.....	13
1.6 Objetivos.....	14
Capítulo II. Marco teórico.	15
2.1 Contexto tectónico y geológico regional.	15
2.2.1 Contexto tectónico de América Central.....	15
2.2.2 Geología regional de Nicaragua.....	17
2.2 Recurso geotérmico.	18
2.2.1 Geoquímica de aguas geotérmicas.....	19
2.2.2 Clasificación de los fluidos termales.	21
2.2.3 Diagramas de clasificación de las aguas.	23
2.2.4 Geotermómetros de agua.	27
Capítulo III. Metodología.....	30
3.1 Trabajo de gabinete.....	30
3.2 Exploración geológica-geoquímica.....	31
3.2.1 Muestreo geológico.	31
3.2.2 Métodos de análisis geológico.	32
3.2.3 Muestreo geoquímico.....	35
3.2.4 Métodos de análisis geoquímicos de los resultados de laboratorio.	37
3.3 Tipo de investigación y enfoque.	38

3.4 Materiales e instrumentos.	38
3.5 Variables	41
Capitulo IV. Análisis y discusión de los resultados.	42
4.1 Geomorfología.....	42
4.1.1 Unidad de origen volcánico (V).	42
4.1.2 Unidad de origen denudacional (D).....	45
4.1.3 Unidad de origen fluvial (F).	47
4.2 Geología local	50
4.2.1 Unidad Caldera de Apoyo.	50
4.2.2 Unidad Mombacho	54
4.3 Geología estructural	61
4.3.1 Fallamiento NE - SO	61
4.3.2 Lineamientos.....	61
4.3.3 Estructuras circulares.....	62
4.3.3 Fracturas menores	64
4.4 Geoquímica	66
4.4.1 Parámetros físicos	68
4.4.2 Composición química de las aguas.....	72
4.4.3 Clasificación de las aguas.....	73
4.4.4 Geotermometría de agua	79
Conclusiones	81
Recomendaciones	83
Anexos	88

Índice de figuras.

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio. INETER (2004), USGS, NOAA, Esri (20179. Editado: Herrera, 2017.	8
Figura 2. Contexto geológico de América Central, (Frischbutter, 2002).	15
Figura 3. Mapa de las provincias geológicas de Nicaragua (Hodgson, 2000).	17
Figura 4. Esquema transversal se un sistema hidrotermal-volcánico activo en volcanes andesíticos (Hedenquist and Lowenstein, 1944).	19
Figura 5. Diagrama de D´Amore & Panichi, 1983.	25
Figura 6. Diagrama de Piper-Hill-Langelier.	26
Figura 7. Diagrama triangular de cationes principales Na-K-Mg (Giggenbach, 1988).	29
Figura 8. Interpretación del análisis estructural, Aguas Agrias	63
Figura 9. Análisis estructural del Cauce río El Pital	64
Figura 10. Análisis estructural de las lavas de Guachipilín	65
Figura 11. Sitios de muestreo de agua para análisis físico-químico	66
Figura 12. Interpolación de los valores de pH de las muestras de agua del sur del volcán Mombacho.	68
Figura 13. Interpolación de los valores de conductividad de las muestras de agua del sur del volcán Mombacho.	69
Figura 14. Interpolación de los valores de temperatura de las muestras de agua del sur del volcán Mombacho.	70
Figura 15. Diagrama de Schoeller para las muestras del sur del volcán Mombacho.	75
Figura 16. Diagrama de Cl-SO ₄ -HCO ₃ para las muestras del sur del volcán Mombacho.	76
Figura 17. Diagrama de Piper para las aguas del sur del volcán Mombacho.	78
Figura 18. Diagrama de geotermómetros Na-K-Mg para las muestras del sur del volcán Mombacho.	79
Figura 19. Diagrama de D´Amore & Panichi para las aguas del sur del volcán Mombacho.	80

Índice de fotos.

Foto 1. Unidad de campos de lava.....	43
Foto 2. Unidad de caída piroclástica (V10)..	44
Foto 3. Unidad de peniplanicie (D5).....	45
Foto 4. Unidad coluvial con pendiente (D10).	46
Foto 5. Unidad denudacional con severos movimientos de masa (D11)..	47
Foto 6. Unidad de llanuras de inundación o canales de ríos abandonados (F3).	48
Foto 7. Unidad de pantano (F5).	49
Foto 8. Depósitos de caída de Caldera de Apoyo (Qvap).....	51
Foto 9. Columna estratigráfica de los depósitos de Caldera de Apoyo.....	52
Foto 10. Depósitos fluviales de Apoyo (Qflap).	53
Foto 11. Lavas andesíticas en bloques (Qlmo).....	55
Foto 12. Lavas escoriaáceas (Qlesmo).	56
Foto 13. Depósito de avalancha (Qlavamo).....	58
Foto 14. Depósito coluvial (Qcolmo).	59
Foto 15. Depósito residual (Qrmo).....	60
Foto 16. Sitios de muestreos de agua	60

Índice de tablas.

Tabla 1. Coordenadas UTM del polígono de estudio, Datum WGS84.	6
Tabla 2. Clasificación de las aguas de acuerdo a su origen y contenido de sólidos totales disueltos (Gorrel, 1958).....	20
Tabla 3. Constituyentes de los fluidos geotérmicos (IGM, 1985).	21
Tabla 4. Resumen de los parámetros evaluados en el Sistema Holandés de Clasificación Geomorfológica, ITC (Zuidam, 1975).	33
Tabla 5. Métodos analíticos utilizados por el Laboratorio de Geoquímica de ENEL.	36
Tabla 6. Materiales e instrumentos.	39
Tabla 7. Variables y operacionalización.	41
Tabla 8. Resultados de los análisis químicos de laboratorio de ENEL	72
Tabla 9. Resultados del balance iónico.....	73

Tabla 10. Ordenamiento de cationes y aniones.	74
---	----

Índice de anexos

Anexo. 1 Diagrama de Streckeisen (QAPF)	88
Anexo. 2. Clasificación geomorfológica para mapeo a semi-detalle según método Holandés, ITC (Zuidam, 1975).....	89
Anexo. 3. Descripción de secciones delgadas.....	93
Anexo. 4. Fichas de campo para muestreo geoquímico	99
Anexo. 5. Mapa de muestras de roca y agua.	100
Anexo. 6. Mapa geomorfológico.	101
Anexo. 7. Mapa geológico.	102

Acrónimos, siglas y abreviaturas.

A.D	Antes de Cristo
AIEA	Agencia Internacional de Energía Atómica
ASTER/TR	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer/Thermal Reflection
AVAC	Arco Volcánico de América Central
BI	Balance Iónico
CNE	Comisión Nacional de Energía
ENACAL	Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados
ENEL	Empresa Nicaragüense de Electricidad
FUNCOG	Fundación Cocibolca
FUNDENIC-SOS	Fundación Nicaragüense de Desarrollo Sostenible
IGA	Asociación Internacional de Geotermia
IGEM	Instituto Geológico Minero de España
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
ITC	Instituto Internacional de Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra
IGG-CIGEO	Instituto de Geofísica y Geología/Centro de Investigaciones Geocientíficas
MEM	Ministerio de Energías y Minas
MW	Megawatt
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
QAPF	Cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa, feldespatoídes
SIG	Sistema de Información Geográfica
UTM	Universal Transverse Mercator
km	Kilómetros
Km ²	Kilómetros cuadrados
msnm	Metros sobre el nivel del mar
°C	Grados centígrados
mm ³	Milímetros cúbicos
tds	Sólidos totales disueltos

ppm	Partes por millón
mg/L	Miligramos por litro
meq/L	Miliequivalentes por litros
$\mu\text{S/cm}$	Micro siemens por centímetro
ec.	ecuación

Capítulo I. Introducción.

El volcán Mombacho es un estrato volcán profundamente diseccionado perteneciente a la cadena volcánica Cuaternaria de Nicaragua.

La presencia del sistema hidrotermal del volcán Mombacho, se pone de manifiesto por: (i) la actividad fumarólica permanente en el cráter, (ii) la presencia de fuentes termales en las laderas bajas del edificio volcánico y (iii) el colapso del flanco sur del edificio volcánico generado por la fuerte hidrotermalización (Shea et al., 2008).

En el presente trabajo se muestran los resultados de la actualización geológica y caracterización geoquímica de las manifestaciones termales superficiales ubicadas en el sector del complejo de Lagunas Mecatepe-Río Manares ubicadas en sur del volcán Mombacho, cubriendo un área de investigación de 80km², llevando a cabo estudios a semi-detalle de la configuración geológica y las variaciones de las características físico-químicas de las aguas.

El análisis de la información se ha realizado mediante la utilización de varias técnicas y herramientas tales como fotogeología, petrografía, diagramas triangulares para agua, estimación de temperaturas profundas a través de geotermometría y otras que han permitido evaluar las condiciones geológicas y geoquímicas del recurso ubicado en el área investigada.

De tal manera que se pone en manifiesto la existencia de un recurso geotérmico, en donde el área investigada corresponde a la zona de descarga del sistema geotérmico del volcán Mombacho. La zona de descarga también conocida como zona de up flow es evidenciada por el afloramiento de una serie de manantiales termales con temperaturas >32°C, precipitación de algunos minerales de alteración hidrotermal como lo es el kaolin y calcita.

Algunos de los patrones estructurales sirven de ascenso a los fluidos termales de la zona, caso claro del eje norte de Laguna Blanca.

1.1 Antecedentes.

MCBIRNEY y WILLIAMS (1964), en su estudio " El origen de la depresión Nicaragüense " exponen que el graben tiene una extensión de 800 km, desde El Salvador, oeste de Nicaragua hasta llegar al noroeste de Costa Rica. También aseveran que la vaguada está claramente relacionada con las voluminosas erupciones volcánicas intermitentes durante el Terciario Tardío. El graben tiene su mejor expresión en la región donde se ubican los lagos de Managua y Nicaragua. Indican que la fosa ocurrió cerca del final del Mioceno principio del Plioceno.

HODGSON G., (1976), realizó la " Geología y Sismicidad del Área de la Feria de Granada", menciona la avalancha de rocas al norte del volcán Mombacho en forma de abanico que cubre gran parte del área de la feria y que forman las numerosas isletas de Granada.

IECO-LAHMEYER, (1980), a través del Inventario de Recursos Geotérmicos, incluido en el Plan Maestro de Desarrollo Eléctrico 1977-2000 Nicaragua, ejecutó estudios geológicos en el área de interés geotérmico Masaya-Granada-Nandaime. En el sector del volcán Mombacho identificaron dos lahares: Un lahar al noreste, el cual dio origen a las Isletas de Granada, y un lahar al sur del edificio volcánico. Definieron que las principales rocas son hiperstena-augita y andesita.

OLADE, (1981), clasificó al volcán Mombacho como un estratovolcán que ha producido importantes coladas de composición variable, desde andesitas hasta andesitas basálticas, con intercalaciones de niveles piroclásticos, a menudo con carácter freatomagmático. Los centros relativamente más antiguos parecen haberse establecido preferencialmente sobre una directriz tectónica noreste-suroeste, mientras que aquellos más recientes según una directriz norte-sur o noreste-suroeste. Todo esto incluido en el Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Nicaragua.

ELC-ElectroConsult, (1982), realizó una serie de investigaciones geocientíficas de superficie, incluidas dentro del Estudio de Pre-factibilidad del Área Geotérmica Masaya-Granada-Nandaime, donde se determinó una zona de 70 km² en la cual

hay una elevada probabilidad de existencia de uno o más sistemas geotérmicos de alta entalpía, que, según consideraciones vulcanológicas, sugieren que éstas sean adecuadas para producción comercial.

El trabajo de HRADECKÝ, (1987) que trata el estudio del volcán Mombacho y sus alrededores. Su estudio es acompañado por el mapa geológico a escala 1:50000 que abarca: volcán Mombacho, la zona Granada – Nandaime y la zona volcánica Zapatera, situada al lado sureste. Se discuten rasgos estructurales y petroquímicos.

En 1998, HRADECKÝ realizó el estudio geológico para reconocimiento de riesgo natural y vulnerabilidad geológica en el área de Masaya y Granada. Abarcan la parte oeste del volcán Mombacho. Mapas publicados en este estudio son: Mapa geológico a escala 1:100,000. Mapas del desarrollo geodinámico y del riesgo geológico en escala 1:50,000 y con su metodología correlacionan los trabajos de la etapa anterior. En el trabajo aprovechamos algunos datos de dataciones radiométricas para diferenciar la edad de las rocas.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA, 2001), por medio del Proyecto Regional de Transferencia de Tecnología para el Desarrollo de la Energía Geotérmica y su Manejo Ambiental, evaluó los campos geotérmicos Mombacho y Tipitapa por medio de técnicas químicas e isotópicas, determinando que las aguas se encuentran con un moderado componente clorurado-sódico, para el área del Sur del Volcán Mombacho.

Comisión Nacional de Energía, (CNE, 2001), a través de la Evaluación del Área de Masaya-Granada-Nandaime incluida en el Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, elaboró un plano geológico-estructural y vulcanológico del área, en el cual se señalaron estructuras de fallas, zonas de deslizamiento, flujos volcánicos y las diversas unidades litológicas determinadas en reconocimientos de campo.

Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL, (2001), en su Informe Geoquímico Preliminar de las Áreas de Prospección Geotérmica: Mombacho-Tipitapa, efectúa análisis químicos a los manantiales del sector Sur del volcán

Mombacho (Las Plazuelas, Laguna Blanca, Laguna Verde, Laguna de Jirón, Laguna Santa Isabel), determinando que éstas aguas tienen un comportamiento de aguas cloruradas, con concentraciones significativas de bicarbonatos.

PILATO, M., (2004) realizó el " Estudio Geológico con Énfasis en Peligrosidad por Inestabilidad de Laderas del Volcán Mombacho ". A través de la generación de la base geológica, geomorfológica y estructural se evaluaron las zonas más susceptibles a inestabilidad de laderas, siendo las comunidades de San Joaquín, Pancasán, San Carlos, Los Ranchones, Agua Agrias las áreas con mayor grado de peligrosidad por inestabilidad de laderas. Geológicamente el área se compone de materiales volcánicos Cuaternarios (lavas y piroclastos) y material reciente (aluviales y coluviales); geomorfológicamente el fenómeno de avalancha (bloques de lavas) constituyen al menos un 30% del área, peniplanicie y depósitos aluviales constituyen el 70%.

AVELLÁN (2004) realizó el "Estudio Geológico de la parte norte del volcán Mombacho y las Isletas de Granada" en el cual se incluye la identificación y evaluación de los posibles factores condicionantes del colapso en la ladera noreste. Avellán estimó un volumen total deslizado de 5,512,500,000 m³ deslizados los cuales actualmente ocupan en su mayoría el sector de las Isletas de Granada.

EI PROGRAMA DE MAPEO TOPOGRÁFICO ESCALA 1:50,000 DEL ÁREA DEL PACÍFICO DE NICARAGUA, 2004 a cargo del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y la Agencia Internacional de Cooperación del Japón (JICA) ha sido la para la elaboración de mapas geológicos, geomorfológicos entre otros.

SHEA et al., (2007) en el estudio Contraste de los mecanismos de emplazamiento de avalanchas de escombros en volcán Mombacho (Nicaragua) proporcionado por análisis estructural y de facies. Este estudio permitió definir tres colapsos: Colapso en Flanco noreste (Las isletas), Colapso en Flanco sur (El Cráter), Colapso en Flanco sureste (La Danta), los cuales ocurrieron en eventos diferentes. Los materiales de los eventos son similares, a excepción del estado de alteración y la cantidad de material removido en cada colapso. Determinaron que los lahares no

estaban relacionados a actividad volcánica, sino al sistema de fallas normales, altas pendientes y alteración hidrotermal del área.

K. GAROFALO et al., (2007), en el estudio Gases fumarólicos en volcán Mombacho (Nicaragua); presencia de especies de gases magmáticos y su implicación para monitoreo volcánico, concentrado en el cráter Sur del volcán Mombacho efectuaron análisis geoquímico e isotópico. La química observada y composición isotópica de los fluidos indicó que este sistema volcánico, aunque no ha experimentado eventos eruptivos en el último siglo, puede ser considerado activo y eventualmente peligroso.

NATHAN D. STANSELL (2013), en su estudio Edades de radiocarbón para datación de las avalanchas de escombros de volcán Mombacho (Nicaragua) determinó las edades de las avalanchas: Norte (Las Isletas) ocurrió entre 140 – 345 A.D; Sur (El Cráter) ocurrió entre 270 – 650 A.D.

1.2 Localización y vías de acceso.

El área de investigación está localizada en el Departamento de Nandaime (Figura 1) en el suroeste de Nicaragua, al sur del volcán Mombacho abarcando las hojas topográficas de: Isla Zapatera (3051-III) y Nandaime (2951-III) a escala 1:50 000, publicadas por el Instituto de Estudios Territoriales (INETER, 2014).

La extensión del área de investigación es de 80 km², abarcando principalmente el depósito de avalancha de escombros El Cráter (Pilato, 2004), el conjunto de lagunas Aguas Agrias – Manares – Mecatepe y sitios adyacentes comprendidos en las coordenadas UTM de la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas UTM del polígono de estudio, Datum WGS84.

Vértices	Norte	Este
1	1296000	606000
2	1296000	616000
3	1304000	606000
4	1304000	616000

Las vías de acceso que nos permiten llegar al área de estudio son:

1. La carretera Panamericana No. 2, que representa la principal vía de comunicación con la capital Managua, hacia el Norte, y con la ciudad de Rivas hacia el Sur, y con los países limítrofes de Honduras, hacia el Norte, y Costa Rica, hacia el Sur.
2. La carretera Nacional No. 4, que conecta Granada con Masaya y Managua.
3. La carretera Nacional No. 6, que une Granada y Nandaime.

En general se cuenta con una autopista pavimentada todo tiempo de 61km, hasta el empalme La Granadilla, a partir de este punto la red vial del área está integrada por 11km de autopista todo tiempo de revestimiento ligero (Los Ranchones, Aguas

Agrias, Las Plazuelas, Mecatepe, Santa Rosa, Dolores) y senderos en óptimas condiciones en la estación seca que nos permiten ingresar a las diferentes localidades del área en cuestión (El Limonal, Georgino Andrade, San Luis de Manares, Veracruz, Arlen Siú, El Guachipilín).

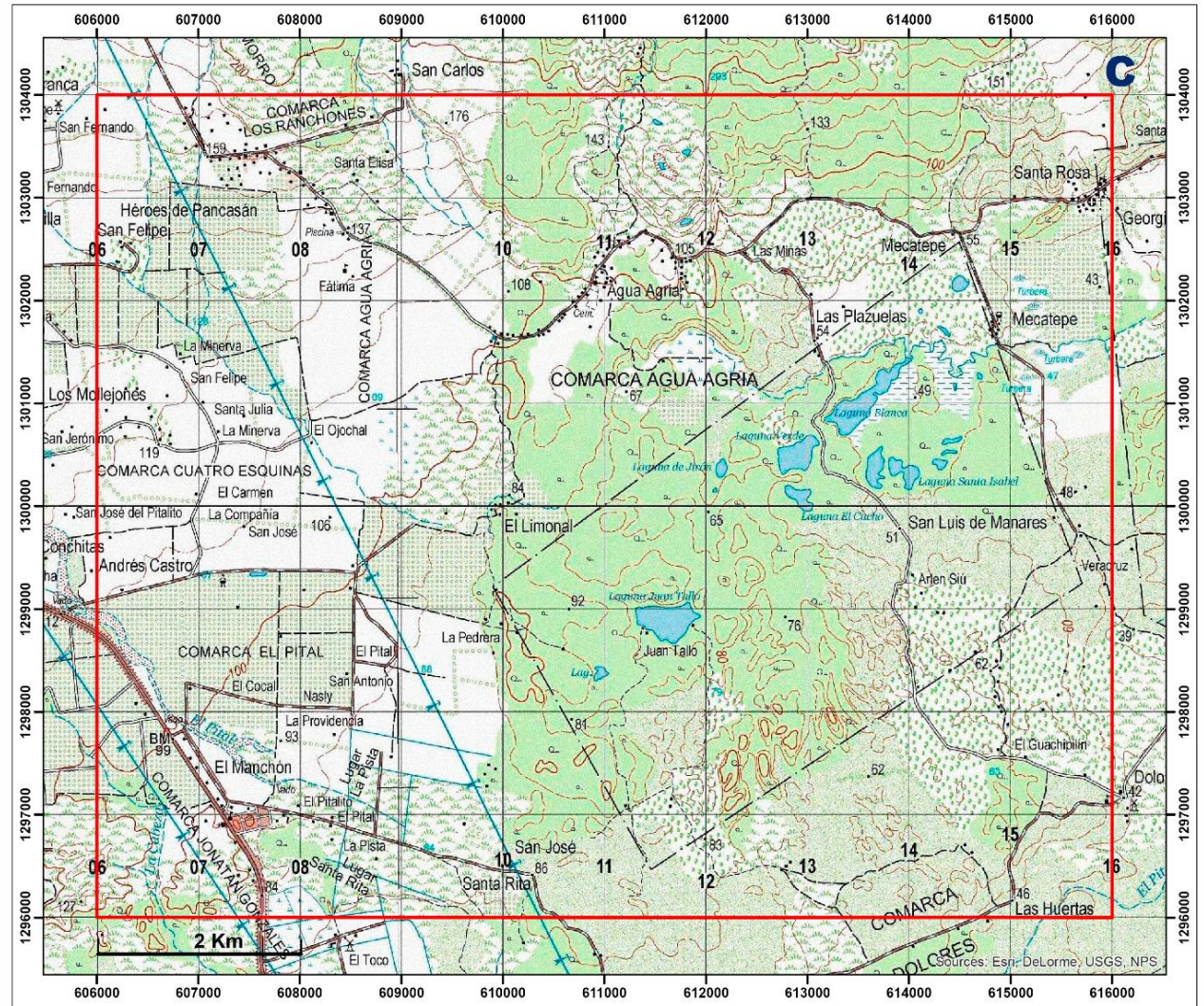
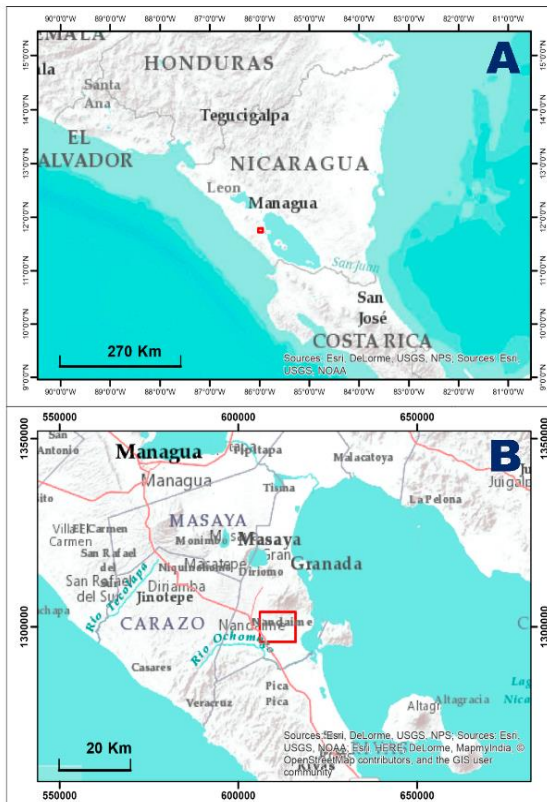


Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a la prospección de recurso geotérmico.

Área de estudio

A. y B. Macro localización del área de estudio

C. Micro localización del área de estudio



Fuente de datos: INETER (2014), USGS, NOAA, Esri, 2017
Editado: Herrera, 2017
Proyección: Mercator UTM WGS84 16N

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio. INETER (2004), USGS, NOAA, Esri (2017). Editado: Herrera, 2017.

1.3 Generalidades del área.

- **Clima.**

En el área existen dos zonas climáticas, una zona subtropical de transición húmeda en la parte baja del volcán Mombacho entre los 560 y 200 msnm y una zona climática tropical húmedo por debajo de los 200 msnm en el área de Mecatepe - Manares, siendo la precipitación pluvial de 1,300 mm³ anual, concentrada especialmente entre mayo y octubre (FUNDENIC, 2013).

Dado a la escasa elevación sobre el nivel del mar la temperatura promedio anual es de 27° C.

- **Flora.**

La vegetación del volcán Mombacho y Mecatepe-Manares presenta una transición de mosaico entre los diversos ecosistemas presentes dado a los diferentes niveles altitudinales. Los rangos altitudinales, la humedad, el viento y las intervenciones antrópicas son los principales factores que inciden en la formación de los siguientes tipos de vegetación:

- Bosque decíduo o bosque seco se ubica en las partes más bajas del volcán, por debajo de los 560 msnm. La flora de Mombacho es catalogada en aproximadamente 752 especies de plantas distribuidas en 71 familias y 153 géneros (Castañeda et al, 1999). Entre las especies más sobresalientes se encuentran: Ceiba Pentandra, Albizzia Caribazo, Plumeria Rubra, Enterolobium Cyclocarpum, Esterculia Apetala, Cinecio Arberescen.
- Bosque tropical de transición húmedo que circunda las lagunas Mecatepe – Manares (FUNDENIC, 2013). Las especies más sobresalientes se encuentran: Ceiba Pentandra, Spondias purpurea, Bactris minor, Lechuga de agua y Lemna spp, Thipa spp, entre otros, (FUNDENIC, 2013).

- **Fauna.**

Se ha constatado la presencia de un total de 44 especies de mamíferos silvestres. La diversidad total de especies mamíferos registra Marsupiales (zarigüeyas),

Mirmecophagido (oso colmenero), Cingulados (armadillo), Quirópteros (murciélagos), Primates (monos), Roedores (guatusa, ardillas, ratas y ratones), Lepóridos (conejos), Artiodáctilos (vendos y saínos) y especies de Carnívoros (mapaches, pizote y tigrillos).

Numerosas aves de hábitos acuáticos pernoctan y anidan en la vegetación flotante y emergente de las lagunas, se distinguen: Ardeidas, Egretta garzetta, Anas, Psarocolius, Ramphastidae, entre otros.

Entre los reptiles se han reportado 19 géneros, 21 especies y 11 familias que incluyen: Serpientes, Iguanas, Anfibios, entre otros.

Entre los peces se encuentran: Parachromis, Diplodus annularis y Oreochromis, (FUNDENIC, 2013).

- **Hidrogeología e hidrología.**

La Reserva Natural volcán Mombacho, se encuentra como parte de la Cuenca Río San Juan N° 69. (Constitución de la República de Nicaragua, Ley del Agua N°620.) Comprendida dentro de una sub cuenca hidrográfica y dos micros cuencas; El Río Brujo, El Río Manares mismos que forman parte del complejo de lagunas de Mecatepe – Manares que irrigan laderas bajo y una serie de lagunas localizadas en el sector de las Plazuelas y Mecatepe que dan origen al ambiente de pantano en la zona, Fundación Cocibolca (FUNCOC, 2006).

1.4 Justificación.

Uno de los grandes problemas de Nicaragua al igual que la mayor parte de los países del llamado tercer mundo, es su dependencia energética, relacionada directamente con la importación de grandes volúmenes de petróleo. Ante el crecimiento de la demanda energética del país, es menester invertir en proyectos que busquen satisfacer esta necesidad no obviando que se debe perseguir el desarrollo económico de manera sostenible en armonía con el medio ambiente como parte integral de una reestructuración en la industria energética.

El Cinturón de Fuego del Pacífico es la zona del planeta que concentra la mayor cadena de volcanes y sitios de actividad sísmica alrededor de los bordes del océano Pacífico. Nicaragua está ubicada en un segmento de este Cinturón de Fuego y su dinámica está marcada por el proceso de subducción de la placa Coco por debajo de la placa Caribe, este proceso genera la cadena volcánica Cuaternaria de Nicaragua misma que otorga al país condiciones geológicas adecuadas para la formación de yacimientos geotérmicos. El Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua (CNE, 2001) estima una reserva energética de 1529 MW.

Actualmente la explotación de los recursos geotérmicos en el país ha tenido éxito con la explotación de dos campos geotérmicos: campo geotérmico Momotombo que inicio operación en 1993 con una capacidad instalada de 70 MW y San Jacinto Tizate que inició operación en 2005 con una capacidad instalada de 72 MW. La adopción de la energía geotérmica le ha permitido a Nicaragua reducir la importación de bunker, lo que significa un ahorro de \$17 mil millones de dólares anuales y la reducción de emisión de dióxido de carbono CO₂.

En los últimos años el país ha demandado el crecimiento, aplicación y diversificación de las ciencias de la tierra otorgando a la geología un rol muy importante, es por ello que la inclusión de esta ciencia en el sector de energías renovables tiene la capacidad de satisfacer las demandas exigidas, en el caso de la energía geotermia la geología tiene la capacidad de aportar una variedad de información como: identificación de áreas con potencial geotérmico y

caracterización del contexto geológico al que estas áreas están sujetas, con análisis que bien pueden ser de alcance regional hasta una descripción detallada de estas áreas.

La investigación geológica-geoquímica que se pretende desarrollar se ubica en una porción del área geotérmica de Masaya-Granada-Nandaime, propiamente al sur del volcán Mombacho. Esta permitirá revelar y profundizar las características geológicas, estructurales (fallamiento, lineamientos, estructuras circulares) y litológicas del área; así como también las características geoquímicas de las aguas termales, que servirán como base para futuras investigaciones de diferente índole tales como: científico, energía renovable, proyectos socio-económico, entre otros.

1.5 Planteamiento del problema.

Las investigaciones de carácter geológico en Nicaragua datan desde 1966, orientadas a diversos objetivos: científico, económicos, evaluación y mitigación de riesgo, etc. Sin embargo, debido a las adversas condiciones del país en infraestructura, economía, recurso humano, entre otros, las investigaciones geológicas que se han desarrollado son en su mayoría a escala regional.

El área de investigación se localiza propiamente al sur del volcán Mombacho. La información geológica disponible a escala de semidetalle y ha sido orientada a evaluación y mitigación de riesgo por inestabilidad de laderas y monitoreo de gases volcánicos.

Por otra parte, la diversificación de la aplicación de las ciencias geológicas genera información muy valiosa para diferentes sectores. Por lo cual ha efectuado una investigación enfocada a la actualización de la cartografía geológica-geoquímica que permita evidenciar y caracterizar la dinámica del área orientada a la prospección de recursos geotérmicos.

1.6 Objetivos.

- **Objetivo general.**

Actualizar la cartográfica geológica del sur del volcán Mombacho y caracterización geoquímica de las aguas termales orientados a prospección de recurso geotérmico.

- **Objetivos específicos.**

1. Caracterizar unidades litológicas aflorantes en el área de estudio a partir de análisis petrográficos.
2. Realizar un mapeo geológico a escala semidetallada 1:20,000.
3. Clasificar las manifestaciones termales mediante herramientas como diagramas triangulares.
4. Generar mapa de anomalía térmica y distribución de elementos de carácter geotérmico.
5. Estimar temperaturas del recurso mediante geotermometría de agua..
6. Establecer los procesos de interacción agua-roca que pudiesen generar anomalías de elementos mayores usando el diagrama de D'Amore & Panichi.

Capítulo II. Marco teórico.

2.1 Contexto tectónico y geológico regional.

2.2.1 Contexto tectónico de América Central.

América Central forma parte de la placa Caribe, en donde la interacción con las placas Coco y Nazca, entre las placas Norte y Suramericana (Figura 2), produce un complicado patrón estructural de la región (Frischbutter, 2002).

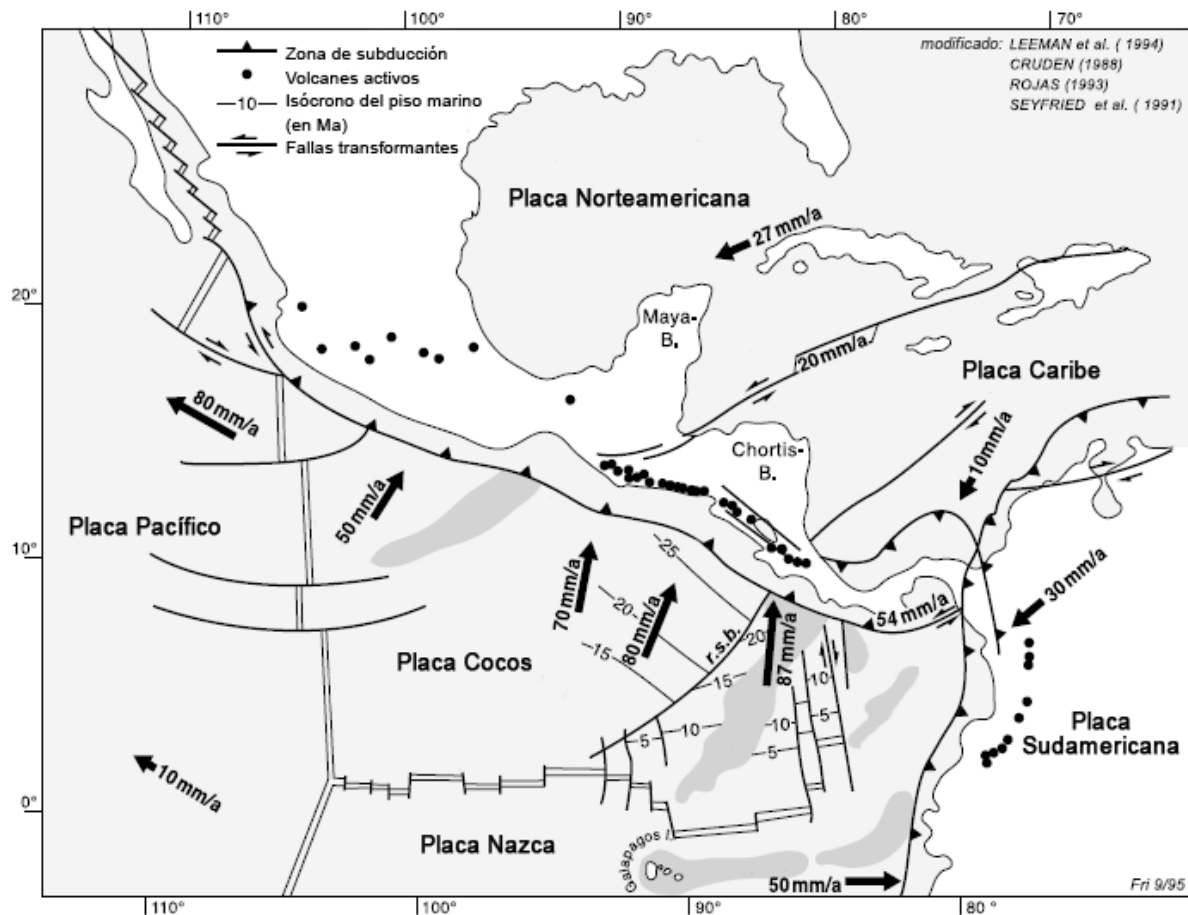


Figura 2. Contexto geológico de América Central, (Frischbutter, 2002).

Nicaragua se ubica en el límite oeste de la Placa Caribe (Dengo, 1985) el cual se desarrolló durante el Neógeno debido a la convergencia de la Placa Caribe. La dirección de subducción de la placa Coco por debajo de la placa Caribe, es

ligeramente oblicua respecto al límite de placa que subduce con una inclinación de 25° en la parte superficial y de 84° en profundidades de 100 – 220 km (Burbach, 1984 y Protti, 1993). Las velocidades estimadas de subducción varían ente 70-80 mm/año (Frischbutter, 2002).

- **Arco Volcánico de América Central.**

Como resultado de la subducción de placa Coco y Caribe se originó el Arco Volcánica de América Central (AVAC) que tiene una extensión de 1,300km paralelo a la Fosa Mesoamericana, extendiéndose desde la frontera entre México y Guatemala hasta el occidente de Costa Rica con una orientación general noroeste-sureste.

El AVAC forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico e incluye cientos de formaciones volcánicas, que van desde estratovolcanes mayores, a domos de lava y conos de ceniza (Carr et al, 2003).

- **Cordillera volcánica de Nicaragua.**

La cadena volcánica de Nicaragua se desarrolla al interior de la Depresión Nicaragüense, se extiende desde el Golfo de Fonseca hacia el sureste, hasta llegar a la frontera con Costa Rica, con una extensión de 380km (Avellán, 2014). Dicha cordillera volcánica se compone de unos 40 edificios, los cuales en su mayoría aparecen agrupados a construir complejos volcánicos que presentan unidades morfológicas distintas y generalmente separadas entre sí por sectores con ausencia, o presencia muy reducida de actividad volcánica. Entre los diferentes complejos volcánicos (Van Wyk de Vries, 1993) se identificó la presencia de tres tipos fundamentales: escudos volcánicos, estratovolcanes y complejos ácidos.

Debido a que la subducción generada entre Coco y Caribe presenta diferentes ángulos, se atribuye la deformación del AVAC y por consiguiente la deformación del Cadena Volcánica de Nicaragua (DeMets, 2001).

La segmentación del AVAC es evidente en el área de Managua donde el eje volcánico se fraccionó en dos segmentos separados por 25 km creándose una zona

de relevo (Carr et al, 2003). Actualmente se identifican como volcanes activos; Cosigüina, San Cristóbal, Telica, Cerro Negro, El Hoyo, Momotombo, Apoyeque, Masaya, Concepción, y en reposo: Apoyo, Mombacho, Zapatera y Maderas.

Sin embargo, la composición química e isotópica de los fluidos de las fumarolas ubicadas en el sector sur (El Cráter) del volcán Mombacho indican que este sistema volcánico, aunque no ha experimentado eventos eruptivos en el último siglo, puede ser considerado activo y eventualmente peligroso (Garofalo et al., 2007).

2.2.2 Geología regional de Nicaragua.

La geología histórica de Nicaragua comenzó durante el Paleozoico y culminó con la intensa actividad volcánica del Cuaternario. (McBirney y Williams, 1965; Hodgson, 1977).

Nicaragua está dividida en cinco Provincias Geológicas (Figura 3.):

- Provincias de la Costa del Pacifico
- Provincia de la Depresión o Graben de Nicaragua
- Provincia Central, Provincia del Norte
- Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica

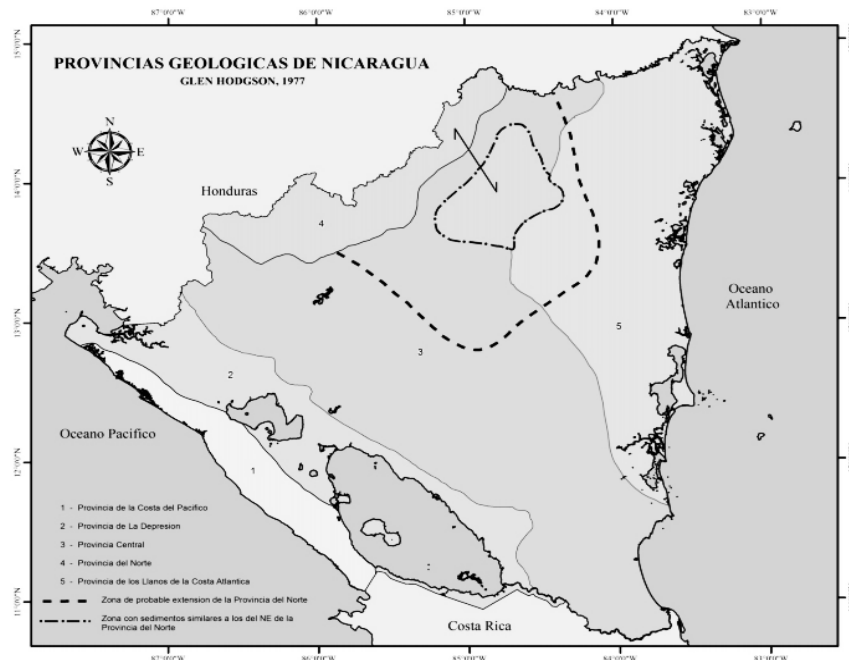


Figura 3. Mapa de las provincias geológicas de Nicaragua (Hodgson, 2000).

- **Provincia de la depresión de Nicaragua.**

Esta Provincia se extiende desde el Golfo de Fonseca hasta el extremo sureste de Nicaragua. Contiene la Cadena Volcánica Cuaternaria Nicaragüense, los lagos de Nicaragua y la Depresión o Graben Nicaragüense, por el cual la provincia recibió su nombre.

Según McBirney y Williams (1965) la Depresión de Nicaragua es el principal rasgo de la actividad tectónica Cuaternaria de América Central, el cual consiste en un medio graben amplio y superficial, con dirección noroeste, entre dos sistemas de fallas normales paralelos. La distribución de los focos volcánicos a lo largo de la Depresión de Nicaragua y de las fracturas norte-sur muestran de manera evidente, la estrecha relación que existe entre la tectónica y la localización del volcanismo en la zona marginal del Pacífico de América Central (Dengo G., et al, 1970).

El origen de la Depresión se atribuye a esfuerzos tensionales producidos en el Pleistoceno ocasionados por la subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe, esto también dio lugar a la formación de la Cadena Volcánica Activa del Cuaternario cuando la actividad volcánica emigró gradualmente en dirección de la Fosa Mesoamericana (Kuang, 1971; Weinberg, 1990).

La geología que caracteriza la provincia son depósitos aluvionales y piroclásticos que están rellenoando la depresión formando un espesor aproximado de 2000m (Hodgson, 2000). Los depósitos piroclásticos se han agrupado en Grupo Las Sierras y Grupo Managua, cada uno con su subdivisión (Kuang, 1971).

2.2 Recurso geotérmico.

Los recursos geotérmicos están conformados por la interacción de tres componentes:

1. Una fuente de calor.
2. Permeabilidad de la roca.
3. Un fluido que transfiere calor.

En la figura 4 se muestran los componentes antes mencionados y una serie de interacciones entre ellos.

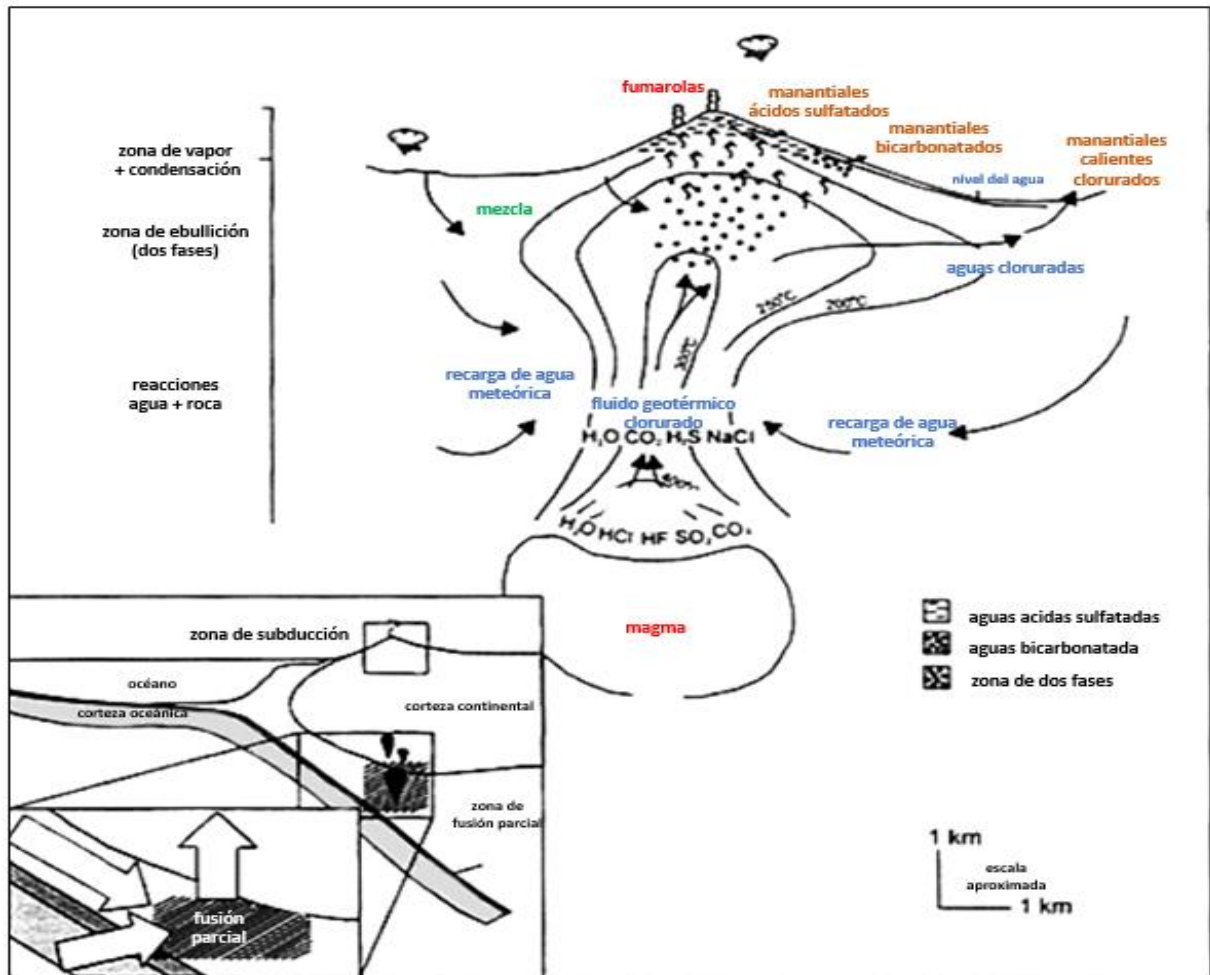


Figura 4. Esquema transversal de un sistema hidrotermal-volcánico activo en volcanes andesíticos (Hedenquist and Lowenstein, 1944).

2.2.1 Geoquímica de aguas geotérmicas.

Las aguas o fluidos geotérmicos asociados a terrenos volcánicos e ígneos pueden resultar de la circulación profunda de aguas meteóricas o de intrusión de recientes rocas, que generan un proceso de convección de soluciones acuosas (Instituto Geológico Minero de España, IGM, 1985).

La composición de los fluidos subterráneos registra la historia en base al tiempo, temperatura y asociaciones rocosas. Los fluidos geotérmicos contienen una amplia variedad y concentración de constituyentes disueltos. Los parámetros químicos más sencillos que se utilizan para caracterizar fluidos geotérmicos son, el contenido de sólidos totales disueltos (tds) en partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/L), conductividad en micro siemens/cm ($\mu\text{S/cm}$) o microhmio/cm ($\mu\text{ohm/cm}$) y pH. Los valores de tds oscilan desde unos cuantos cientos a más de 300,000 mg/L.

Los valores normales de conductividad en aguas dulces están entre 100 y 2000 $\mu\text{S/cm}$, en el agua de mar es del orden de 45,000 $\mu\text{S/cm}$ y en aguas geotérmicas puede alcanzar los 100,000 $\mu\text{S/cm}$, los valores de pH típicos, oscilan desde moderadamente alcalinos (8.5) a moderadamente ácidos (5.5). Un pH es neutro a la temperatura normal del agua subterránea -ni 0 ni ácido- (Tabla 2), (IGM, 1985).

Tabla 2. Clasificación de las aguas de acuerdo a su origen y contenido de sólidos totales disueltos (Gorrel, 1958).

Tipo de agua	Sólidos totales disueltos (tds en mg/L)
Superficial	< 1,000
Subterránea	1000 – 10,000
Salina	10,000 – 100,000
Geotérmica	> 100,000

- **Constituyentes de los fluidos geotérmicos.**

Para un estudio geoquímico convencional dirigido a la exploración de áreas geotérmicas, se requiere la ejecución de análisis químicos de diferentes muestras de aguas superficiales (manantiales, pozos, etc.), que incluye la determinación de los constituyentes inorgánicos, medidas del pH, conductividad eléctrica, gases disueltos y radionucleidos.

El enriquecimiento de estos elementos guías, en las aguas de tipo termal, en relación con las de circulación superficial, puede relacionarse con la termalidad anómala de la zona y al tiempo de permanencia en el subsuelo. Asimismo,

suministran información sobre el tipo de roca a través de la cual migró el fluido hidrotermal (IGM, 1985).

Tabla 3. Constituyentes de los fluidos geotérmicos (IGM, 1985).

	Constituyentes mayoritarios	Constituyentes minoritarios	Constituyentes trazas
Cationes	Calcio	Estroncio	Bario
	Sodio	Rubidio	Plomo
	Potasio	Litio	Vanadio
	Magnesio	Cesio	
Aniones	Sulfatos	Hierro	
	Cloruros	Aluminio	
	Carbonatos	Flúor	
	Bicarbonatos	Mercurio	
	Sílice		
	Boro		

La acidez del agua se expresa en función del contenido de iones de hidrogeno (pH).

2.2.2 Clasificación de los fluidos termales.

De forma esquemática, las aguas subterráneas se pueden agrupar en tres tipos fundamentales (IGM, 1985), en base al contenido total de sales y el tipo de aniones que les acompañan:

- **Aguas Cloruradas Sódicas.**

Aguas de circulación profunda, las sales disueltas en estas aguas son principalmente cloruro de sodio y cloruro de potasio, sin embargo, en aguas más concentradas pueden existir apreciables concentraciones de calcio. Las aguas también contienen alto contenido de sílice y usualmente concentraciones significativas de sulfato, bicarbonato, fluoruro, amonio, arsénico, litio. Rubidio, cesio y ácido bórico. La relación cloruro/sulfato es usualmente alta, el rango de pH va de

moderadamente ácido a moderadamente alcalino (pH 5-9). Los gases disueltos principales son dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno. Las aguas a menudo ocurren en áreas con manantiales en ebullición y actividad de geiser y son comunes para muchas áreas geotérmicas en desarrollo tanto en rocas volcánicas y sedimentarias.

- **Aguas ácidas sulfatadas.**

Aguas ácidas, bajo contenido de cloruro, pueden ser formadas en áreas geotérmicas volcánicas donde el vapor por debajo de los 400 °C se condensa en las aguas superficiales. El sulfuro de hidrogeno del vapor es subsecuentemente oxidado a sulfato. Las aguas ácido sulfatadas son encontradas en áreas donde el vapor sube desde el agua subterránea de alta temperatura y en áreas volcánicas donde en etapas de enfriamiento volcánico solo dióxido de carbono y gases de sulfuro permanecen en el vapor que sube a través de la roca.

Los constituyentes presentes en las aguas son principalmente lixiviados de las rocas. Debido a su naturaleza generalmente superficial, su significado geoquímico es usualmente menor en investigaciones de trabajo.

- **Aguas bicarbonatadas sódicas – cálcicas.**

Aguas ricas en bicarbonatos son originadas ya sea por la disolución de CO₂ o por la condensación de vapor geotérmico en aguas subterráneas libres de oxígeno relativamente profundas. Debido a la ausencia de oxígeno se evita la oxidación del H₂S, la acidez de estas soluciones es debido a la disociación de H₂CO₃. A pesar de ser un ácido débil convierte los feldspatos y arcillas, generando soluciones acuosas neutrales, las cuales son ricas típicamente en sodio y bicarbonato, particularmente a temperatura media-alta. De hecho:

- La baja solubilidad de la calcita previene que las soluciones acuosas aumentan su contenido en calcio
- Potasio y magnesio se fijan en arcillas y cloritas, respectivamente
- Concentración de sulfato está limitada por la baja solubilidad de la anhidrita.

Las aguas bicarbonatadas sódicas se encuentran generalmente en a la zona de condensación de los sistemas de vapor dominante y en las zonas marginales en sistemas liquido-dominante. Sin embargo, aguas de bicarbonato de sodio también están presentes en los yacimientos geotérmicos profundos alojados en rocas metamórficas y/o sedimentarias.

- **Aguas ácidas sulfatadas-cloruradas.**

- a) Estas aguas pueden formarse por muchos procesos, tales como:
- b) Mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas a diferentes profundidades.
- c) Condensación cerca de la superficie de gases volcánicos en aguas meteóricas
- d) Condensación de vapor magmático en las profundidades
- e) Paso de fluidos clorurados a través de secuencias sulfato-soporte (ej. Evaporitas) o litologías que contengan sulfuro nativo.

Estas aguas tienen pH típicos de 2-5, con cloruro y sulfato en proporciones iguales aproximadamente. Las aguas formadas por los procesos C y D pueden ser identificadas por las altas concentraciones de Cl, SO₄ y alto fluoruro.

2.2.3 Diagramas de clasificación de las aguas.

- **Diagrama de Schoeller.**

Compara el logaritmo de la concentración de los constituyentes de un fluido para una serie de análisis, con los constituyentes de cada análisis conectado con una línea. Una amplia gama de concentraciones se puede mostrar, porque se utilizan valores logarítmicos. El efecto de la mezcla con agua diluida (así como ganancia o pérdida de vapor de agua) es para mover la línea que representa un análisis verticalmente sin cambiar su forma. Las pendientes de las líneas entre los constituyentes representan relaciones de concentración. Estos diagramas muestran el efecto de la mezcla en un número de constituyentes. Cuando se presentan muchos análisis, los patrones individuales pueden perderse, pero los patrones de mezcla se mantendrán claros.

Los iones se representan en el eje X, cationes a la izquierda y aniones a la derecha. Es apropiado para estudiar evoluciones temporales de aguas en un mismo punto y variaciones composiciones en muestras de diferentes localidades.

- **Diagrama de D'Amore and Panichi.**

Permite distinguir los grupos de agua basados en las características geológicas del reservorio (roca caja) por el que circula cada muestra de agua (Figura 5), (D'Amore & Panichi, 1983):

Parámetro A: Distingue aguas que han circulado a través de rocas calcáreas (con alto contenido de carbonato y bicarbonatos), de las que han circulado por rocas evaporíticas (con alto contenido de sulfatos).

$$A = \frac{100}{\sum(-)} [HCO_3^{1-} - S_4^{2-}] \quad (\text{ec. 1})$$

Parámetro B: Discrimina aguas que han circulado en rocas evaporíticas (las cuales se han enriquecido de sulfatos) de las aguas que han circulado en rocas sedimentarias enriquecidas con sodio. Su valor es negativo debido a que la cantidad de sodio es mayor que la del sulfato.

$$B = 100 \left[\frac{SO_4^{2-}}{\sum(-)} - \frac{Na^+}{\sum(+)} \right] \quad (\text{ec. 2})$$

Parámetro C: Distingue aguas derivadas de las lavas (volcanitas) de las que pasan por rocas carbonatadas-evaporíticas o de las que se encuentran en el basamento quarzítico regional, se espera un valor negativo debido a la mayor concentración de cloruros que de sodio.

$$C = 100 \left[\frac{Na^+}{\sum(+)} - \frac{Cl^-}{\sum(-)} \right] \quad (\text{ec. 3})$$

Parámetro D: Individualiza aguas que han circulado sobre dolomita ($CaCO_3$ y $MgCO_3$), su valor debe ser alto debido a la poca cantidad de Mg^{2+} que posee un agua geotérmica (si la T aumenta, la solubilidad del Mg disminuye).

$$D = 100 \left[\frac{Na^+ - Mg^{2+}}{\Sigma(+)} \right] \quad (\text{ec. 4})$$

Parámetro E: Su valor es bajo ya que la concentración (Ca + Mg) es baja. Distingue entre aguas circulantes en reservorios carbonaticos de las que se encuentran en reservorio sulfato.

$$E = 100 \left[\frac{Na^{2+} + Mg^{2+}}{\Sigma(+)} - \frac{HCO_3^{-1}}{\Sigma(-)} \right] \quad (\text{ec. 5})$$

Parámetro F: Revela el incremento de K+ en el agua, su valor es negativo ya que el contenido de (Na+ y K+) generalmente es mayor que el calcio.

$$F = 100 \left[\frac{Ca^+ - Na^+ - K^+}{\Sigma(+)} \right] \quad (\text{ec. 6})$$

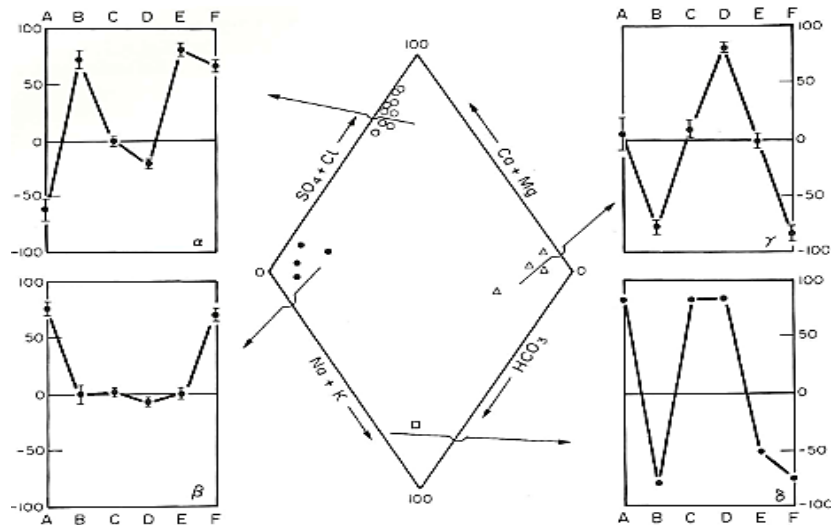


Figura 5. Diagrama de D'Amore & Panichi, 1983.

Comparación entre las representaciones de los datos químicos en el gráfico de diamante y diagrama rectangular definido por los parámetros listados en el texto. (o) Aguas derivadas de la misma serie anhidrita. (●) Aguas circulando en caliza. (Δ) Aguas sometidas a una circulación profunda, probablemente a través de basamento cristalino. (□) Aguas de las formaciones de esquistos. Son considerados como estándares para las aguas circulando en la misma formación.

- **Diagrama de Piper – Hill – Langelier.**

Formado por dos triángulos equiláteros donde se representa, respectivamente la composición aniónica y la catiónica del agua y un campo central romboidal en que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes, (Figura 6).

A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión.

Como anión se suele representar al HCO_3 , SO_4 Y Cl y como cationes a Na , K , Ca y Mg .

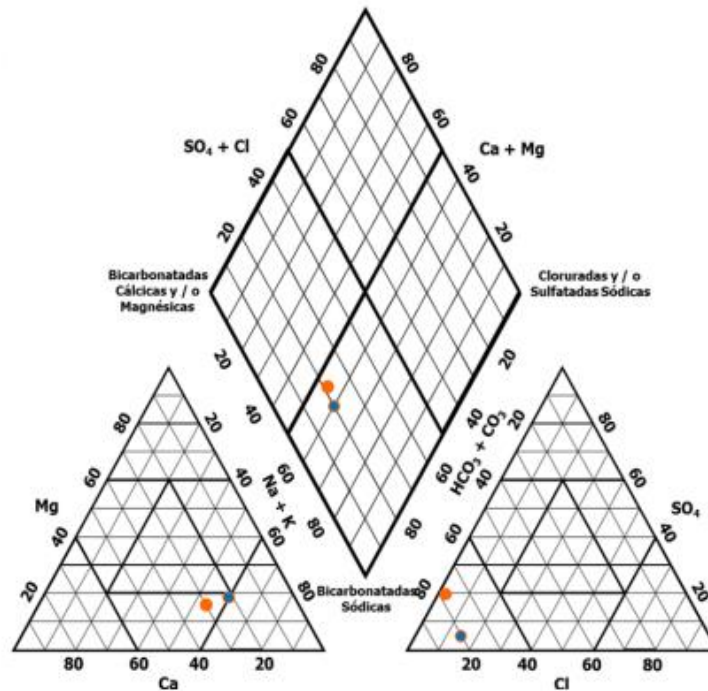


Figura 6. Diagrama de Piper-Hill-Langelier.

- **Diagramas triangulares.**

- a) **Diagrama $\text{Cl} - \text{SO}_4 - \text{HCO}_3$.**

La mayoría de las técnicas geoquímicas pueden ser aplicadas con confianza únicamente a determinados tipos de fluidos con rangos limitados de composición. Cualquier interpretación de las muestras de agua geotérmica, por lo tanto, es mejor llevado a cabo sobre la base de una clasificación inicial. El diagrama ternario $\text{Cl} -$

SO₄ – HCO₃ es una de los esquemas de clasificación de aguas naturales (Giggenbach, 1991) y es utilizado para clasificación de aguas geotérmicas y eliminación de aguas no adecuadas para técnicas geoquímicas.

La posición de un punto de datos en el diagrama triangular se obtiene evaluando primero con la suma S de las concentraciones C_i (en mg/kg) de los tres componentes implicados:

$$S = C_{Cl} + C_{SO_4} + C_{HCO_3} \quad (\text{ec. 7})$$

A partir de la suma (S), se obtienen los porcentajes de Cl y HCO₃, entonces D = % HCO₃ + 0.5% Cl es calculado. El % Cl y D se representan como ejes X y Y, respectivamente.

En este diagrama, los rangos de composición están indicados para varios grupos típicas de agua, tales como aguas volcánicas y aguas calentadas por vapor, aguas maduras y aguas periféricas. Normalmente, el grupo más adecuado para la aplicación de geoindicadores comprenden las aguas neutrales con bajo sulfato, alto cloruro "aguas geotérmicas" a lo largo del eje Cl – HCO₃, cerca de la esquina del Cl, nombradas aguas maduras. Además, no solo pueden ser utilizados para eliminar las aguas no adecuadas, también pueden proporcionar una indicación inicial de las relaciones de mezcla o agrupaciones geográficas. Por ejemplo, el grado de separación entre los puntos de datos para cloruro alto y las aguas bicarbonatadas dan una idea del grado relativo de la interacción de los fluidos cargados de CO₂ a más bajas temperaturas, y de los crecientes contenidos de HCO₃ con el tiempo y la distancia recorrida por el agua subterránea (Giggenbach, 1988).

2.2.4 Geotermómetros de agua.

Los Geotermómetros o termómetros geoquímicos se utilizan para estimar la temperatura del subsuelo de los yacimientos geotérmicos. Hay principalmente tres categorías: geotermómetros soluto, de gas y de isótopos. Los Geotermómetros de soluto pueden ser ampliamente clasificados en dos grupos:

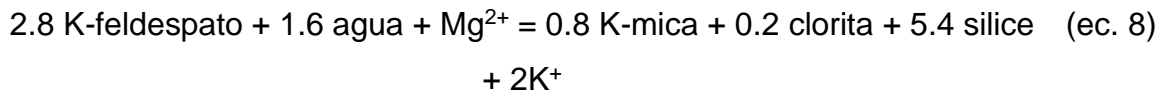
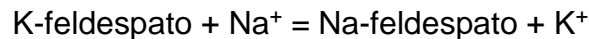
(1) los que se basan en variaciones dependientes de temperaturas y en la solubilidad de los minerales individuales

(2) los que se basan en reacciones de intercambio iónico dependientes de la temperatura que fijan proporciones de ciertos constituyentes disueltos (Fournier, 1991).

Para definir la temperatura de las muestras de aguas, se efectuó análisis de geotermometría de cationes (Giggenbach, 1988).

a) Geotermómetro de Na – K – Mg.

Se utiliza para distinguir aguas equilibradas, parcialmente equilibradas (incluyendo aguas mezcladas) y aguas inmaduras. Los geotermómetros solo se pueden aplicar a las aguas equilibradas y parcialmente equilibradas (Figura 7). El diagrama triangular se basa en la dependencia de la temperatura de dos reacciones.



La posición de un punto de datos en la trama triangular se utilizó por primera vez para obtener la suma S de las concentraciones C_i (en mg/kg) de los tres componentes que intervienen, como en el caso anterior, solo los constituyentes individuales son manipulados de manera diferente.

$$S = C_{\text{Na}}/1000 + C_{\text{K}}/1000 + \sqrt{CMg} \quad (\text{ec. 9})$$

A partir de la suma (S), se obtienen $C_{\text{Na}}/1000$ y \sqrt{CMg} , entonces $D = \sqrt{\%CMg} + 0.5\% C_{\text{Na}}/1000$ es el calculado.

La zona de equilibrio parcial sigue ya sea un mineral que se ha disuelto, pero no ha alcanzado el equilibrio, o una mezcla de agua que ha alcanzado el equilibrio (por ejemplo, agua geotérmica) diluido con agua no equilibrada (por ejemplo, agua subterránea fría). Puntos cerca de la esquina de Mg generalmente

sugieren una alta proporción de las aguas subterráneas relativamente frías, no necesariamente inmaduras (IGM, 1985).

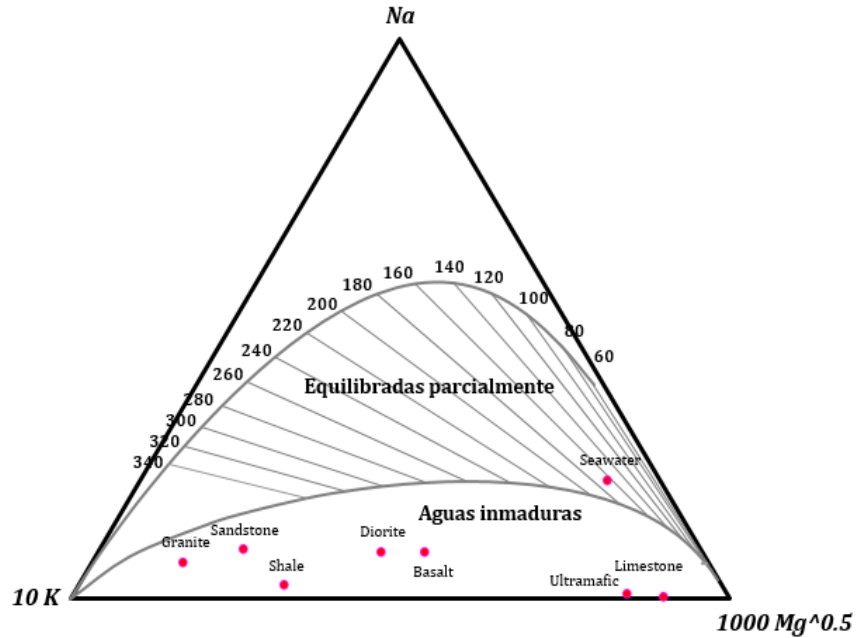


Figura 7. Diagrama triangular de cationes principales Na-K-Mg (Giggenbach, 1988).

Capítulo III. Metodología.

3.1 Trabajo de gabinete.

Se ha realizado un estudio superficial de geología de rocas y geoquímica aguas termales en el sector sur del volcán Mombacho que permita definir las características predominantes del área orientado a exploración de recurso geotérmico en esta zona (CNE, 2001) a escala semidetalle.

A nivel internacional existen guías y/o manuales que nos auxilian a realizar estudios orientados a exploración geotérmica superficial y profunda tales como, la Guía para estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos OLADE, 1994, Guía de las mejores prácticas para exploración geotérmica, (IGA, 2014), entre otros las cuales permiten identificar las herramientas y técnicas más apropiadas para la exploración geotérmica que permitirán caracterizar el recurso a investigar, para la presente investigación se han utilizado las metodologías propuestas por IGA para caracterizar el recurso que estamos investigando.

Diferentes instituciones han realizado investigaciones geocientíficas orientados a exploración geotérmica a escala regional en el país, por lo que se realizaron visitas a centros especializados y empresas relacionados con el tema de estudio, como: INETER, Centro de Investigaciones Geocientíficas (IGG-CIGEO-UNAN, Managua), Ministerio de Energías y Minas (MEM), ENEL, Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL), Ministerios de los Recursos Naturales (MARENA), etc.

En este contexto se revisaron:

- Informes técnicos, estudios, artículos, tesis u otros trabajos realizados previamente en el área de estudio.
- Mapas de interés tales como: topográficos, geológicos, tectónicos, drenaje, con escalas no menor a los 1: 50,000.
- Ortofotomapas, fotografías aéreas e imágenes satelitales tipo ASTER/TR disponibles que abarque el área de estudio.

El acceso a la documentación objeto de análisis permitió identificar aspectos geológicos regionales y geoquímica (muestreos históricos). Simplificando los objetivos de campos en aspectos de geología y geoquímica, mismos que brindaron la pauta para la elaboración de mapas de bases de carácter geológico y geoquímico, condicionante previa a la exploración de campo.

3.2 Exploración geológica-geoquímica.

Los levantamientos geológico y geoquímico fueron realizados en la estación de verano y se realizaron paralelamente para efecto de mayor entendimiento de la dinámica del área, usando como guía los mapas base de carácter geológico y geoquímico a escala 1:50 000 que dieron la pauta para fijar objetivos de campo para investigación a detalle tanto para rocas como para agua.

El estudio geológico realizado por Pilato (2004), ha sido la base de la información geológica para el estudio presentado, sin embargo, debido al detalle que exige la escala en la que se trabajó (esc. 1:25 000) se propone una distribución sistemática de las unidades en el área.

En cuanto a información geoquímica se refiere, partimos de la información expuestas en el Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, (CNE, 2001) y la generación de datos actualizados de las manifestaciones termales identificadas in situ, mismas que han sido sujetas a análisis químico para determinar las características de las mismas.

3.2.1 Muestreo geológico.

El objetivo del levantamiento de campo geológico consiste en confirmar la geología del área, así como la distribución espacial de los mismos e identificar los caracteres dinámicos estructurales que afectan el área.

El levantamiento geológico consistió en:

- Verificación en campo de los elementos identificados en el proceso de análisis de información existente, fotointerpretación y geoprecesamiento de ortofotomapas.

- Medición de patrones estructurales (fallas) tales como: rumbo y buzamiento.
- Muestreo de rocas aflorantes que sean representativos para posterior análisis petrográfico.
- Selección de 8 rocas para elaboración de sección delgada y posterior análisis petrográfico.

3.2.2 Métodos de análisis geológico.

- **Geología y litoestratigrafía.**

El levantamiento geológico permitió la recolección de 45 muestras de roca, las cuales mediante análisis petrográficos macroscópicos y microscópicos de las muestras de rocas se ha definido la geología del área de estudio (Anexo No. 5).

Los análisis se llevaron a cabo mediante:

Análisis:

- macroscópico (20x hasta 50x) para 45 muestras de rocas recolectadas en campo
- microscópico (4X hasta 10x) para 8 secciones delgadas elaboradas en IGG-CIGEO, UNAN-Managua.
- clasificación de las rocas de acuerdo al porcentaje de los minerales predominantes.

La clasificación de las rocas se realizó en base al diagrama Streckeisen o QAPF, el cual es el diagrama oficial para la denominación de las rocas ígneas (Anexo 1).

La elaboración de columnas estratigráficas se realizó utilizando en software Strater v. 5.

A su vez el levantamiento geológico en conjunto con el análisis de fotografías aéreas escala 1: 40 000 y ortofotomapas escala 1:10 000, permitieron definir la distribución espacial de las diferentes unidades litológicas del área para la elaboración del mapa geológico a escala 1: 25 000.

- **Geomorfología.**

Para definir los ambientes geomorfológicos y las geoformas del área de investigación se utilizó el sistema ITC Holandés Clasificación geomorfológica para mapeo a semi-detalle (Zuidam, 1975). El método del ITC pone el énfasis la morfogénesis (nivel visual superior), en un nivel perceptivo más bajo a la litología y en un nivel más discreto la morfocronología, y por debajo de todos ellos el mapa base con la información topográfica.

En relación con los aspectos generales del sistema, la utilización de la morfogénesis como característica principal del método parece acertada.

En la tabla 4 se presenta un resumen de los parámetros involucrados y evaluados en la clasificación geomorfológica ITC que van desde la génesis hasta las características generales de las geoformas.

Tabla 4. Resumen de los parámetros evaluados en el Sistema Holandés de Clasificación Geomorfológica, ITC (Zuidam, 1975).

Génesis	Sub-clase (código)	Unidad (geoformas)	Características generales
Denudacional	D: 1-12		
Denudacional estructural	S: 1-14	montaña, ladera, peniplanicie, mesas, diques, conos de lava, flujos de lava, lahar, terrazas fluviales,	Pendiente Topografía
Volcánico	V: 1-15	flujos de lava, lahar, pantanos, lagos, playas, karst, otros	Patrón de drenaje
Fluvial	F: 1- 11		Grado de alteración de acuerdo a la acción de agentes exógenos.
Marino	M: 1-17		
Kárstico	K:1-12		

- **Geología estructural.**

El análisis de fotografías aéreas a través de estereoscopio de espejos, el análisis de ortofotomapas y el levantamiento de campo son el conjunto de técnicas que han permitido definir la geología estructural.

- **Geoprecesamiento de datos en formato SIG.**

- a) Generación de curvas de nivel.**

Con el software Global Mapper v. 18, se realizó una conexión con el STRM Worldwide elevation data (1 ar-sec Resolution, STRM Plus v.3) para descargar un archivo vectorial (XYZ simple ASCII_text file), el cual contiene puntos de elevación para el área en cuestión.

Una vez obtenida esta base de datos de elevación, se geo procesaron los datos en Qgis, en donde se ha transformado el archivo vectorial a ráster para la generación de curvas de nivel cada 10 m, a las cuales se le aplicó un geoproceto de Generalizar – Chaiken´s Algorithm, para simplificar la geometría de las curvas obtenidas.

- b) Modelo de Elevación Digital.**

Con el software Global Mapper v. 18, se realizó una conexión con el STRM Worldwide elevation data (1 ar-sec Resolution, STRM Plus v.3) para descargar un archivo DEM-30m (digital elevation model), cuya resolución es de 30m.

- c) Elaboración de las cartas geológicas y geoquímicas propuestas a escala 1: 25 000 (geología, estructural, geoquímico).**

- d) Geo procesos aplicados usando Qgis:**

- Vectorial: (geometría, investigación, geoproceto análisis, gestión de datos)
- Ráster
- Georreferenciación
- Proyección
- Conversión
- Extracción
- Análisis
- Diseñador Qgis
- Interpolación IDW: En el método de interpolación IDW, los puntos de muestreo se ponderan durante la interpolación de tal manera que la

influencia de un punto en relación con otros disminuye con la distancia desde el punto desconocido que se desea crear. Esta técnica ha sido aplicada específicamente para representación gráfica de resultados físico-químicos de las manifestaciones termales, pH, conductividad, temperatura, etc., Siendo procesada únicamente de 21km² (ubicados en el sector de complejo de lagunas Mecatepe-Manares) que corresponden al área en donde se ubica la densidad de muestreo de agua, con la finalidad de reducir el margen de error en la interpolación.

3.2.3 Muestreo geoquímico.

Se prepararon equipos y materiales para el muestreo de hasta 15 muestras, de las cuales se tomaron 13 muestras para análisis químico en el Laboratorio Geoquímico de ENEL para la detección y cuantificación de los diferentes parámetros a exponer (pH, Conductividad, STD, Cationes, Aniones, otros). La tabla 5 muestra los diferentes parámetros analizados y el método utilizado para el mismo.

El muestreo se ha realizado de acuerdo a las recomendaciones del laboratorio de geoquímica de ENEL descrito a continuación, sin embargo, para el muestreo de las diferentes especies que se analizaron se aplicaron técnicas o requerimientos específicos para cada una de las especies:

1. Se introduce el termómetro de mercurio (0-100°C) para anotar la temperatura de salida del fluido.
2. Se selecciona un sitio que nos pueda brindar una muestra pura.
3. La muestra se toma inicialmente en un recipiente abierto, el cual es enjuagado con la misma para obtener una muestra pura e inmediatamente después se llena con la cantidad requerida.
4. Se toman 100 ml de la muestra de agua (manantial) y poner a enfriar hasta una temperatura aproximada de 30°C, para hacer pruebas de pH, conductividad, salinidad y temperatura. Una vez obtenida la temperatura requerida, se realizan las pruebas y son anotadas en el Formato para el control de toma de muestras FCA-22. (Anexo 4)

- a) Muestra para análisis de sílice: En una probeta medir una alícuota de 10 ml de muestra y diluir a 100 ml con agua destilada. La muestra se dispone en un envase plástico, se etiqueta y se embala para traslado al laboratorio.
- b) Muestra para análisis de amonio: se toma en envases de vidrio color ámbar de 125 ml/L previamente enjuagado con la misma muestra. Primero se llena hasta la mitad el envase, se procede a añadir 7 gotas de ácido clorhídrico (HCl 1+1), para la preservación de la misma y posteriormente se termina de llenar el envase, este se etiqueta y se embala para trasladar a laboratorio.
- c) Muestra para análisis de carbonatos y bicarbonatos: se utilizan envases de vidrio de 125 ml. Se enjuaga el envase con la misma muestra y posteriormente se llena hasta rebalsar para garantizar que la muestra ni quede expuesta a burbujas de aire. Se tapa inmediatamente la botella, se etiqueta y se introduce a un termo con hielo para garantizar su preservación y la muestra está lista para traslado a laboratorio.
- d) Muestra para análisis de aniones: Se toman en envases de polietileno no transparente de 500 o 1000 ml. Se enjuaga el envase con la muestra y posteriormente se llena en su totalidad y se tapa. En este caso se toma la muestra por duplicado. Los envases se etiquetan, se embalan para su traslado al laboratorio.
- e) Muestra para análisis de cationes: Se toman envases de polietileno no transparente de 500 o 1000 ml, se enjuagan con la muestra. Se llena el envase hasta la mitad y se adicionan 21 gotas de ácido nítrico (HNO₃ 1+1), se agita y se llena en su totalidad, se tapa el envase, se etiqueta y se embala para trasladar a laboratorio. Se hace un duplicado de esta muestra siguiendo los pasos anteriores.

Tabla 5. Métodos analíticos utilizados por el Laboratorio de Geoquímica de ENEL.

Parámetro	Método
Sólidos totales disueltos	Método gravimétrico
pH	Método electrométrico
Conductividad	Método electrométrico
K	Espectrometría de emisión atómica

Na	Método de absorción atómica
Ca	Método de absorción atómica
Mg	Método de absorción atómica
Cl	Método volumétrico / Argentométrico del nitrato de plata
Nitrato (NO ₃)	Método colorimétrico / Brucina
Nitrógeno amoniacal NH ₃	Método del electrodo de ion selectivo
Carbonato (CO ₃) y Bicarbonato (HCO ₃)	Método potencométrico
Fosfato como Fosforo (PO ₄)	Método espectrofotométrico / Ácido vanadomolibdofosforico
Sulfuros de hidrogeno (H ₂ S)	Método valoración por yodometría
Hierro total (Fe)	Método espectrofotométrico / 1-10 fenantrolina
Sulfato (SO ₄)	Método turbidométrico
Sílice (SiO ₂)	Método espectrofotométrico con molibdato de amonio
B	Método valoración potencométrica / Valoración con manitol

3.2.4 Métodos de análisis geoquímicos de los resultados de laboratorio.

- **Evaluación de la calidad de los resultados.**

La calidad de los resultados químicos controla la calidad de los resultados y es por lo tanto muy importante.

Para verificar si los análisis de las aguas son correctos, se utiliza un Balance Iónico (BI) de los componentes disueltos de las aguas.

El BI se basa en el porcentaje de diferencia entre las cargas positivas y las cargas negativas totales.

$$BI = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} * 100 \quad (\text{ec. 11})$$

Para efecto de este estudio los datos que se encuentren "no balanceados" serán incluidos de todas formas, si es que el balance no supera el 10%, rango aceptable para los datos.

- **Ordenamiento de las especies químicas.**

Se realizó un ordenamiento de los principales componentes de las muestras, aniones y cationes de acuerdo a las concentraciones, ordenando de mayor a menor las mismas. Para los aniones se consideraron el cloruro, sulfato y bicarbonato, para los cationes el sodio, potasio, calcio y magnesio.

- **Diagramas para la clasificación de las aguas.**

Los datos han sido evaluados mediante los diferentes diagramas principales:

- Elaboración de los diagramas de D'Amore & Panichi.
- Diagramas Triangulares (Cl-HCO₃-SO₄; Na-K-Mg)
- Diagramas Binarios

3.3 Tipo de investigación y enfoque.

La investigación es de mixta ya que se evaluaron caracteres cualitativos y cuantitativos, en donde definiremos la distribución espacial y características de las unidades geológicas aflorantes en el aérea, en cuanto a geoquímica se refiere cuantificaremos el valor de los elementos en las aguas que presentan anomalía termal y la distribución espacial a través de interpolación de los elementos mayores orientado a prospección de recurso geotérmico.

La investigación se desarrolló al sur del volcán Mombacho, en las comunidades de: Los Ranchones, Aguas Agrias, Santa Elisa, El Limonal, Las Plazuelas, Cuatro Esquinas, El Manchón, Arlen Siu, San Luis de Manares, Veracruz, Guachipilín y Santa Rosa, siendo las diferentes unidades de rocas y los manantiales con temperatura mayor a 28°C las muestras a analizar y procesar de acuerdo a los criterios de la industria de la exploración geotérmica.

3.4 Materiales e instrumentos.

A continuación, en la tabla 6 se presenta listado de los instrumentos que se utilizaron para cada una de las etapas de desarrollo de la investigación realizada.

Tabla 6. Materiales e instrumentos.

Gabinete

Documentos varios

Mapas geológicos:

Isla Zapatera 3051-III, Nandaime 2951-III, Escalas: 1: 50,000, Servicio Geológico Nacional, 1980.

Mapa del área de interés geotérmico Masaya-Granada-Nandaime, Escala: 1: 210,000, GeothermEx, 2000.

Mapa hidroquímico: Mapa hidroquímico del área de interés geotérmico Masaya-Granada-Nandaime, Escala: 1: 210,000, GeothermEx, 2000

Mapas topográficos:

Isla Zapatera 3051-III, Nandaime 2951-III, Escalas: 1: 50,000, Fuente: INETER, 2004.

Fotografías aéreas: Isla Zapatera 3051-III, Escala: 1: 40,000. Líneas de vuelos: 1217, 1218, 1219, INETER 2004.

Ortofotomapas: Numeración: 3051 - 3 - (1,2), 3051 - 3 - (5, 6, 9); 3051 - 4 - (13,14), Escala: 1: 10,000, INETER, 1996.

Estereoscopio de espejos Officeo Galileo

Software QGis 2.14

Exploración geoquímica

GPS Garmin e-trex 30

Mapas de base: geológico-estructural y geoquímico escala 1:50,000

Fotografías aéreas escala 1:40,000

Pica geológica, mango corto, Eastwing

Mazo geológico, mango corto, Eastwing

Brújula Brunton versión americana

Lupa de bolsillo (20x)

Estereoscopio de bolsillo

Ácido clorhídrico al 10%

Cinta métrica (10m)

Multímetro: Conductividad, solidos totales disueltos, temperatura

Termómetro de mercurio (T máx. 100°C)

Bolsas ziploc 2lb (muestras de roca)

Botellas de polietileno de 125 ml

Botellas de polietileno de 500 ml

Botellas de polietileno de 1000 ml

Botellas de vidrio de 125 ml

Agua destilada 2 L

Cinta adhesiva
Marcador
Ficha de muestreo – FCA - 22
Termómetro de Mercurio (0-100°C)
HNO₃ (1+1) 100 ml
HCl (1+1) 100 ml
Cajas plásticas de 50 lb
Cámara fotográfica Nikon 20 MP

Exploración geológica

GPS Garmin e-trex 30
Mapas de base: geológico-estructural y geoquímico escala 1:50,000
Fotografías aéreas escala 1:40,000
Pica geológica, mango corto, Eastwing
Mazo geológico, mango corto, Eastwing
Brújula Brunton versión americana
Lupa de bolsillo (20x)
Estereoscopio de bolsillo
Ácido clorhídrico al 10%
Cinta métrica (10m)
Multímetro: Conductividad, sólidos totales disueltos, temperatura
Termómetro de mercurio (T máx. 100°C)
Bolsas ziploc 2lb (muestras de roca)
Botellas de polietileno de 125 ml
Botellas de polietileno de 500 ml
Botellas de polietileno de 1000 ml
Botellas de vidrio de 125 ml
Agua destilada 2 L
Cinta adhesiva
Marcador

Análisis y geoprocesamiento de datos

Ácido clorhídrico al 10%
Lupa 50x Kyowa Optical
Microscopio electrónico Motic BA310 POL
Cámara Moticam 3.0 MP
Software QGis 2.14 (geoprocesamiento)
Software Diagrammes by Logiciels (diagramas geoquímicos)
Photoshop CS6 (edición de fotografía)
Computador

Papelería varios: libreta de campo, formatos de campo, reglas, lápices, borrador, cinta adhesiva, marcadores, servilletas, toallas de mano, etc.

3.5 Variables

El objetivo general de esta investigación es actualizar la cartográfica geológica del sur del volcán Mombacho y caracterización geoquímica de las aguas termales orientado a prospección de recurso geotérmico.

A continuación, en la tabla 7, se presentan las variables de acuerdo los objetivos específicos planteados y operacionalización de los mismos para la investigación realizada.

Tabla 7. Variables y operacionalización.

	Objetivos específicos	Variables	Indicadores
Geología	Caracterizar unidades litológicas aflorantes en el área de estudio a partir de análisis petrográficos.	Distribución de las unidades litológicas	Mapeo y recolección de muestras de roca representativas. Análisis petrográfico de 8 secciones delgadas.
	Realizar un mapa estructural del área de estudio.	Arreglo estructural	Fallamientos y/o lineamientos Rumbo, buzamiento, extensión.
Geoquímica	Clasificar los termales ubicados en el área de estudio, de acuerdo a su composición química.	Concentraciones de los elementos mayores.	pH conductividad eléctrica temperatura, aniones, cationes, sílice sales STD.
	Generar mapa de anomalía térmica y distribución de elementos de carácter geotérmico.	Distribución de anomalía térmica Clasificación de los termales	

Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados.

4.1 Geomorfología.

El análisis de fotografías aéreas y ortofotomapas permitió definir la geomorfología del área, la cual está controlada por tres ambientes geomorfológicos:

a) Ambiente geomorfológico volcánico: caracterizado por las geofomas construidas a partir de las erupciones volcánicas de carácter lávico y/o explosivo y sus productos.

A este ambiente se le atribuye la Unidad de origen volcánico (V)

b) Ambiente geomorfológico denudacional: la disección de los paisajes por los procesos exógenos se manifiesta en procesos erosivos hídricos y gravitatorios o una combinación de los dos.

A este ambiente se le atribuye la Unidad de origen denudacional (D)

c) Ambiente geomorfológico fluvial: dominado por la acción de las corrientes de agua y el transporte de sedimentos sobre la superficie terrestre.

A este ambiente se le atribuye la Unidad de origen fluvial (F)

El área puede considerarse en la etapa juvenil por escasez de ríos, causas de formación activa de nuevo material, relleno y/o colmatación de depósitos recientes (Anexo 6).

A continuación, se describen las unidades geomorfológicas de acuerdo a la clasificación del sistema Holandés ITC para mapeo a semidetalle (Zuidam, 1975).

4.1.1 Unidad de origen volcánico (V).

a) Campos de lavas (V9).

Está formada por varios eventos de emisiones lávicas del volcán Mombacho (Foto 1), cubren un área aproximada de principalmente en bloques, ubicadas al Oeste del área, en el sector de Santa Rosa, hacia el sur estos están bien representados por bloques que afloran en el sector de Guachipilín, y lavas escoriaáceas que se ubican en el sector Oeste del área, en las comarcas de Santa Elisa, El Limonal y Aguas Agrias.

Morfográficamente se tienen pendientes que varían desde 1 % - 12 % (de inclinación suave), moderadamente disectada, adonde predominan las pendientes de 1 % – 3 %, y muy ocasionalmente aparecen pendientes de hasta 35 %. La cota de elevación varía de 200 – 90 msnm en el este y de los 140 – 60 msnm oeste.

El patrón de drenaje que desarrolla esta unidad es de tipo detrítico a sub-detrítico en las partes más bajas.

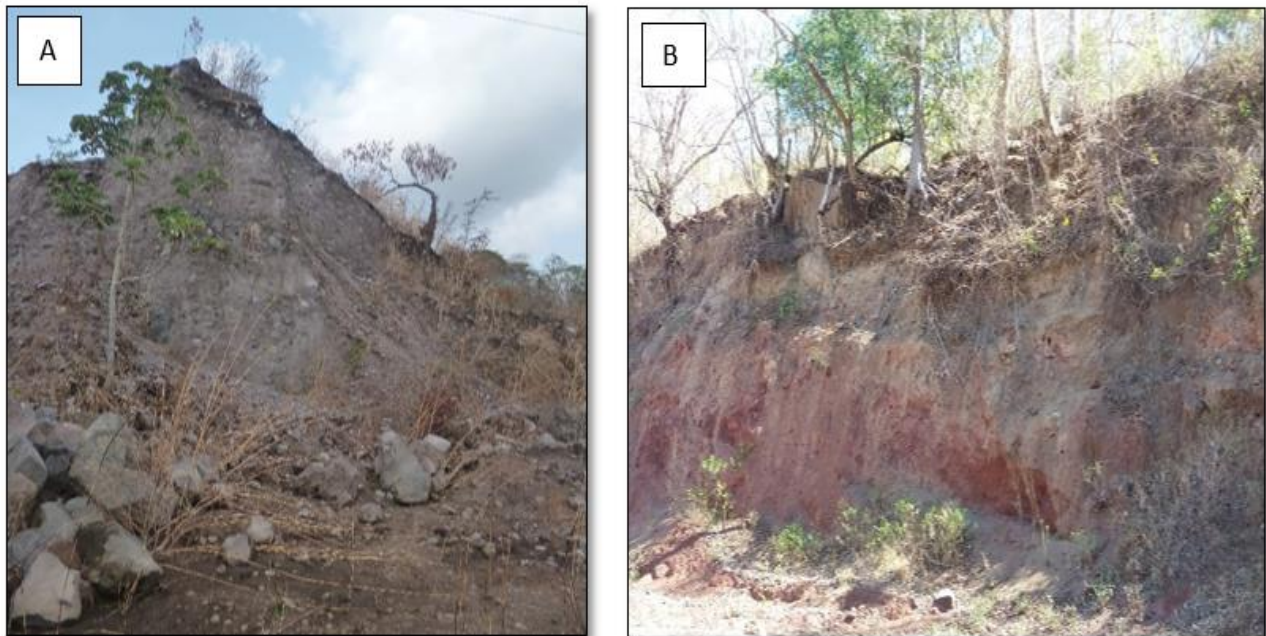


Foto 1. Unidad de campos de lava. **A.** Lavas en bloque de composición andesítica, (UTM 615115E, 1297.538 N, Guachipilín). **B.** Lavas escoreáceas, de composición basáltica, (UTM 611443 E, 1302440 N, Aguas Agrias).

b) Caída piroclástica (V10).

De amplia extensión, comprenden depósitos de caída entre los que se distingue pómez de composición dacítica provenientes de Caldera de Apoyo intercaladas con algunos depósitos de lapilli de composición basáltica del volcán Mombacho, es característico de este tipo de materiales tener gran extensión por ser más finas y viajar más distancia, estos se extienden desde el norte en el sector de la Granadilla (espesor de 4.8m) con dirección hacia el sur hasta llegar a la comarca Jonathan Gonzales (espesor de 2.2m), con elevaciones de 200 - 100 msnm (Foto 2).

Las pendientes son suaves (0 % – 6 %) e incluye la parte media y baja de la pendiente del volcán ligeramente disectada, siendo las partes casi planas (0 % – 3 %) las de mayor relevancia. Las cotas de elevación van desde los 100 – 60 msnm para el sector.

El patrón de drenaje es de tipo detrítico.

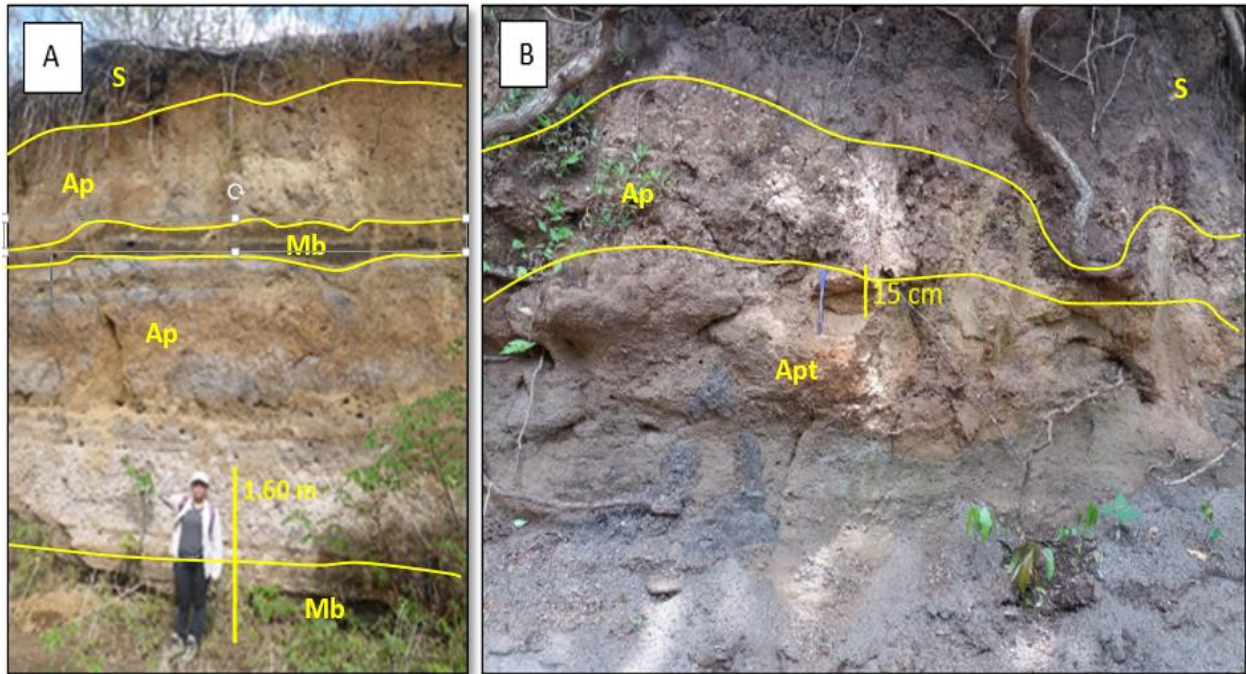


Foto 2. Unidad de caída piroclástica (V10). **A.** Intercalaciones de depósitos de Caldera de Apoyo (Ap) que consisten básicamente en de pómez, lapilli, escoria dacítica en su mayoría y depósitos de Mombacho (Mb) que consisten en cenizas basálticas. En la parte superior se ubica el suelo residual (S), (UTM 606124 E, 1305112 N, Los Ranchones). **B.** Suelo residual (S) y presencia marginada de piroclastos tipo pómez de Caldera de Apoyo (Ap), suprayacente a estos una capa de toba dacítica (Apt), (UTM 608091 E, 1300703 N, El Ojochal).

4.1.2 Unidad de origen denudacional (D).

a. Peniplanicie (D5).

Está ubicada al norte y se extiende desde Santa Elisa y Héroes de Pancasán en dirección sur hasta las comunidades de Cuatro Esquinas, El Pital y Jonathan Gonzáles (Foto 3).

Esta unidad está mayoritariamente compuesta por depósitos piroclásticos de caída, tales como pómez, ceniza, y arenas pertenecientes a Caldera de Apoyo.

Morfográficamente prevalecen terrenos planos con pendiente de 2%. Esta es una zona de erosión.

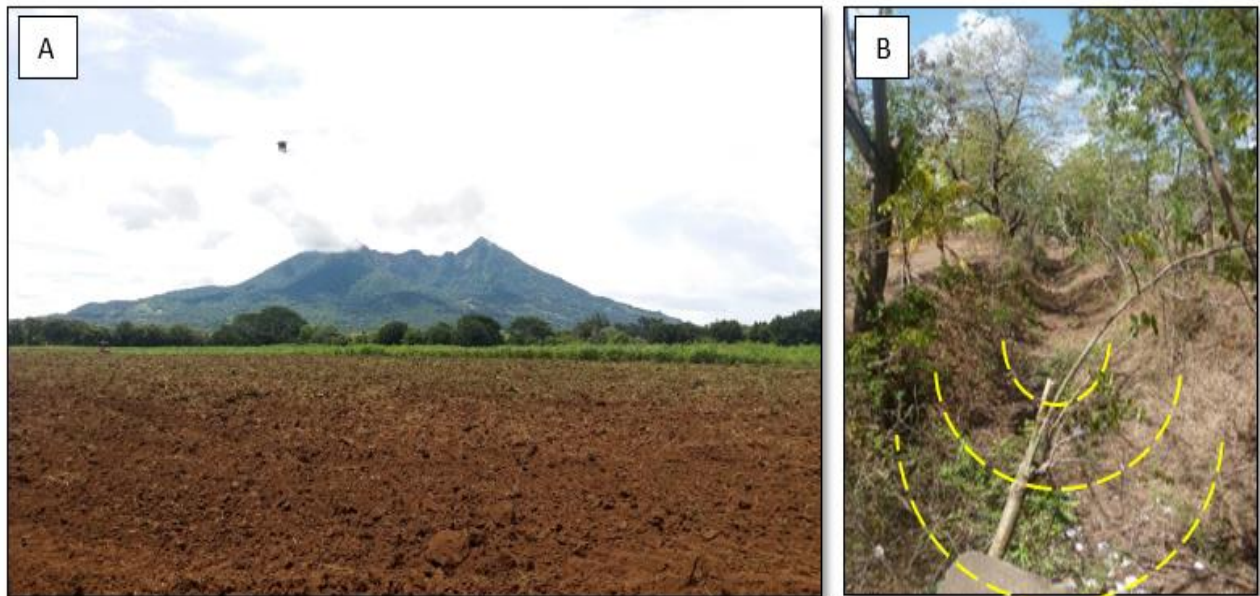


Foto 3. Unidad de peniplanicie (D5). **A.** Terrenos relativamente planos, suelos de aproximadamente 15cm de espesor, sobreyaciendo sobre depósitos de piroclásticos, (UTM 607588 E, 1300585 N Cuatro Esquinas). **B.** Cauce natural, (UTM 611443 E, 1302440 N, Aguas Agrias).

b. Coluvial con pendiente (D10).

Constituido por materiales de diversos tamaños, angulosos a subangulosos distribuidos de forma caótica, sin selección ni estratificación, con regular a pobre consolidación per de litología homogéneos andesita-basáltica, englobados en una

matriz arenosa que se distribuye irregularmente, estos depósitos son adyacentes a las laderas de pendientes moderadas, siendo la alteración, desintegración y acción de la gravedad los agentes principales formadores de estos (Foto 4).

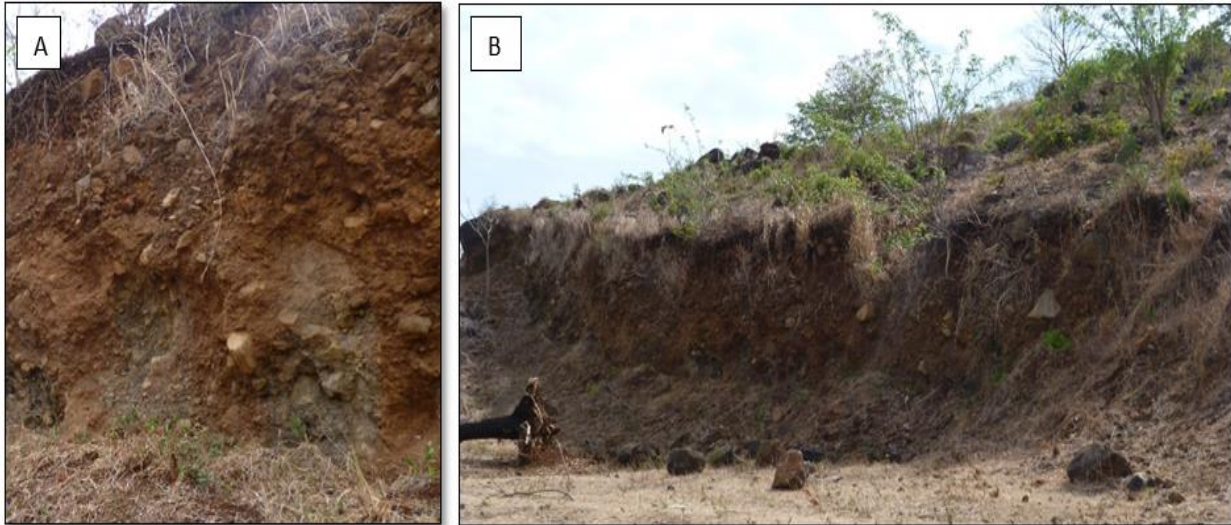


Foto 4. Unidad coluvial con pendiente (D10). **A y B.** Deposito coluvial compuesto de bloques y fragmentos angulosos con diámetro desde los 0.5 – 1 m. La composición predominante de los bloques es andesito-basáltica, la matriz es arenosa se observaron mezcla de fragmentos escoriaáceos, suelo y arena. El depósito presenta alto grado de meteorización (oxidación), (UTM 614697E 1302795, Mecatepe).

c. Unidad denudacional con severos movimientos de masa (D11).

Está ubicada al centro del área abarcándola desde el norte en Las Colinas hasta los alrededores de Santa Ana, siendo la denudacional de áreas con severos movimientos de masa la más predominante del área de estudio, evento que fue originado por la alteración hidrotermal en este sector, de acuerdo a Nathan (2013) el evento del colapso data entre 270 – 650 A.D. Se caracteriza por presentar una morfología irregular típica de avalanchas de escombros, conocida como morfología tipo humocks (o en montículos), (Foto 5).

Morfográficamente se presentan pendientes suaves a escarpadas más o menos disectadas de 1 % – 12 %, siendo las inclinaciones de 1 % – 3 % las de mayor predominio, el rango de alturas es de 50 hasta 200 msnm, siendo las alturas de los montículos de 50 msnm – 168 msnm.

El patrón de drenaje no está bien desarrollado, pero predomina el detrítico en las partes más altas.



Foto 5. Unidad denudacional con severos movimientos de masa (D11). Montículos producto de avalancha de escombros del flanco sur del volcán Mombacho, (UTM 611474E, 1302765 N, Las Colinas).

4.1.3 Unidad de origen fluvial (F).

a. Unidad de llanura de inundación o canales de ríos abandonados (F3).

Unidad subordinada a una serie de cauces (El Pital, Los Ranchones y El Limonal), (Foto 6) que se ubican en el sector oeste del área de investigación con

dirección preferencial hacia el sureste, hacia los valles que se ubican en dirección a Nandaime – Rivas.

Son cauces secos, presentan erosión en cárcavas tipo sección V y sección U las cuales van ganando terreno progresivamente hacia las áreas más altas. La topografía es ligeramente irregular, inundado estacionalmente y básicamente sometido a sedimentación por acumulación fluvial, moderada a severamente disectada.

Morfográficamente está representada por pendientes de 1%-4%. Los sedimentos comprenden varios tipos de materiales con diámetros de 2cm hasta los 10cm. El patrón de drenaje es submeandrónico.



Foto 6. Unidad de llanuras de inundación o canales de ríos abandonados (F3). **A.** Cauce del río El Pital, UTM 12983N, 606138E.

b. Unidad de pantano (F5).

Comprende terrenos casi planos, saturados o cubiertos de agua, cubiertos por árboles y vegetación acuática moderadamente densa. Esta unidad está asociada a Río Manares y al complejo de lagunas Mecatepe - Manares cubriendo un área de 4.5 km².

Morfológicamente está representada por pendientes de 1 % y de menor desarrollo las de 1 % – 6 % al S de Las Plazuelas. Existe el desarrollo de suelos franco – arcillosos de color oscuro. En esta unidad se han desarrollado una serie de lagunas (Laguna Blanca, Laguna Verde, Laguna El Cacho, Laguna Santa Isabel y Laguna de Girón) siendo la Laguna Blanca alimentada por el río El Brujo y una serie de manantiales que afloran que afloran a lo largo del complejo de lagunas, especialmente en Laguna Blanca (Foto 7).



Foto 7. Unidad de pantano (F5). **A.** Ambiente de pantano en los sectores cercanos al complejo lagunas Mecatepe –Manares, (UTM 613301 E, 1300731 N, Laguna Blanca).

4.2 Geología local

El área de estudio forma parte de la Provincia Geológica de la Depresión. Comprende depósitos Cuaternarios al Reciente de caldera de Apoyo y volcán Mombacho (Hradecký 1998, Pilato, 2004).

4.2.1 Unidad Caldera de Apoyo.

Caldera de Apoyo ha sido formada por una serie de erupciones freatoplínicas que destruyeron el estrato volcán denominado Pre –Apoyo hace unos 23 000 años (Sussman, 1982). Siendo los principales productos pómez, cenizas, tobas compactadas, conglomerados y lavas.

Hacia el este del área de estudio en las comunidades de Los Ranchones, Santa Elisa, El Pital, Cuatro Esquinas, predominan depósitos de caldera de Apoyo constituidos por depósitos de caída, principalmente pómez de composición dacítica con intercalaciones de lapilli de composición basáltica.

Para esta unidad se presenta la siguiente secuencia litoestratigráfica agrupada en dos unidades que se han descrito y caracterizado de las más antiguas a las más jóvenes como sigue:

a) Depósito de caída (Qvap).

Representada por depósitos de caída tipo pómez y lapilli que afloran al este y suroeste del área en estudio, generando la geomorfología de peniplanicie, cubriendo un área total de 28 km², (Foto 8).

Los espesores varían desde 13 cm hasta 140 cm y se extienden hasta la ciudad de Nandaime y sus alrededores, la toba aflora sobre suelos Holocénicos (Hradecký, 1998) siendo estas de composición andesítica y dacítica.

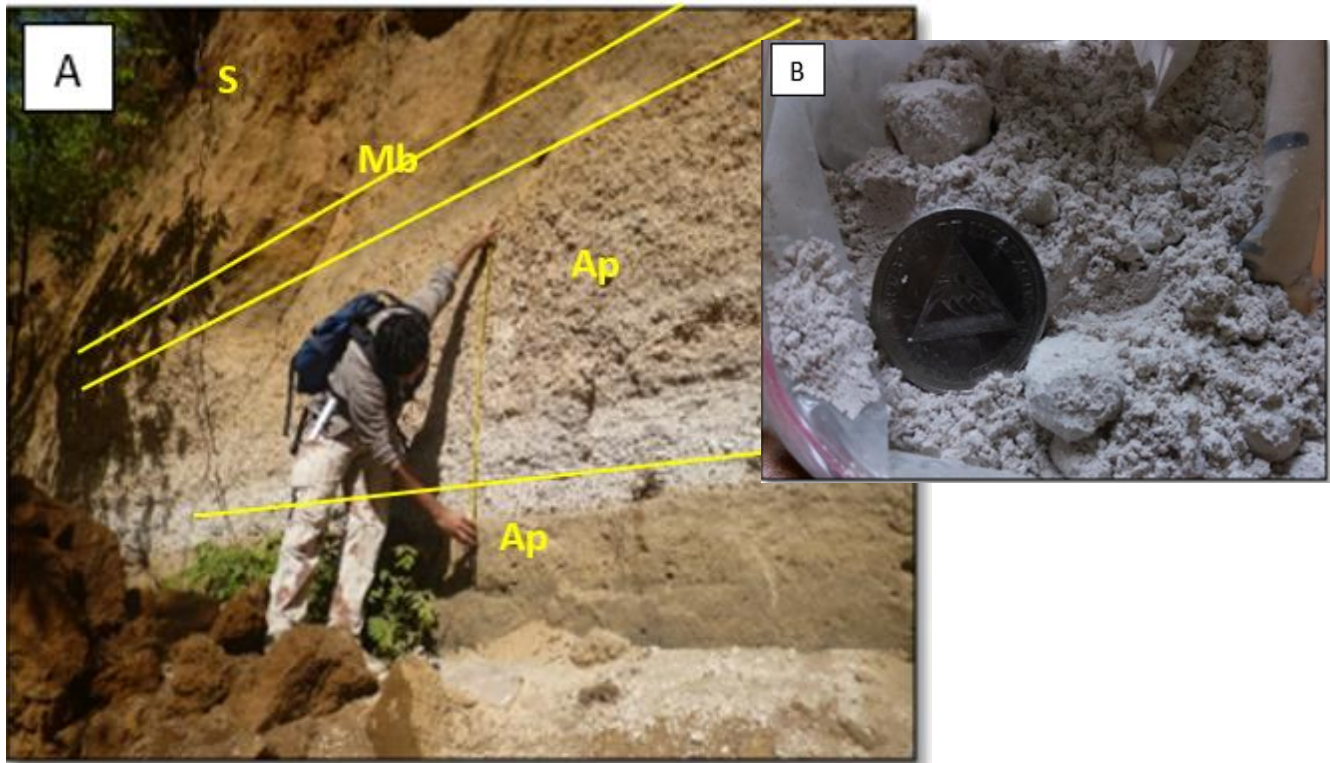


Foto 8. Depósitos de caída de Caldera de Apoyo (Qvap). A. Se distinguen capas de pómez (Ap) intercaladas con pequeñas capas de ceniza y arena de Mombacho (Mb), en la parte superior se ubica una capa de suelo (S) de 1.3 m de espesor. B. Muestra de pómez (Ap), (UTM 606497E, 1303714 N).

En el punto 606491 E 1303714 N, (Foto 9), se expone el perfil descrito de la base al techo: está compuesta por flujo piroclástico, seguida de 5 cm de caída de escoria de lapilli fino, sigue otro depósito de flujo piroclástico de 5 cm, seguido nuevamente por la caída de 80 cm con fragmentos líticos de cenizas, arena y lapilli, que indican procedencia desde el conducto. El siguiente espesor es de 40 cm de escoria de lapilli negro, con gradación normal, hasta 6 cm de diámetro, con intercalación de pequeñas capas de ceniza (1 cm) gris, que indica tiempo de calma en la columna eruptiva, seguida de suelo arcilloso.

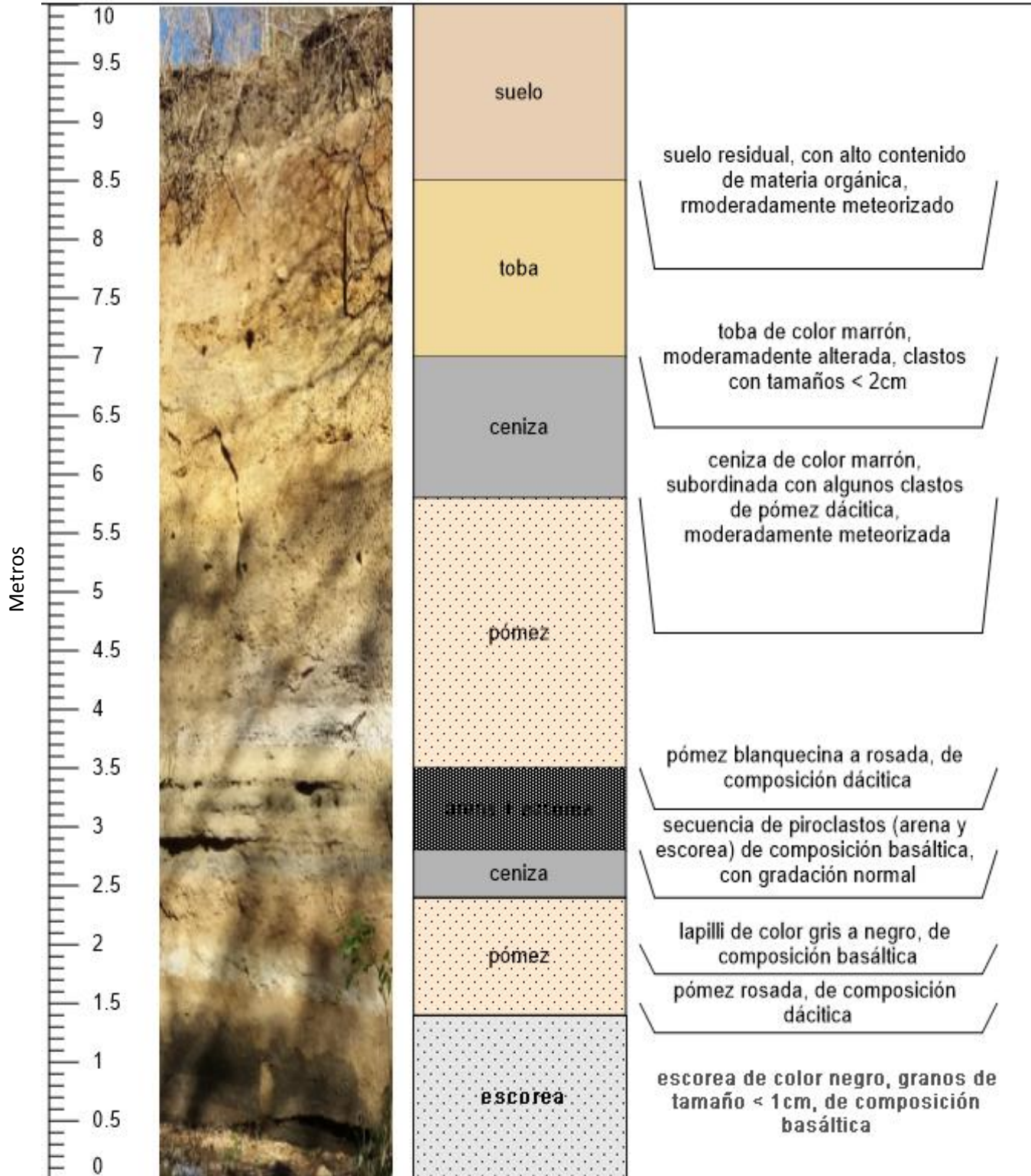


Foto 9. Columna estratigráfica de los depósitos de Caldera de Apoyo. UTM 606491E, 1303714N, La Granadilla.

b. Deposito fluvial Apoyo (Qflap).

Consiste en una serie de productos trabajados por agentes exógenos que se extiende a lo largo de cause principal del Río El Pital, el cual cubre un área de 4.58 km², (Foto 10).

Los materiales que han sido afectados y/o retrabajados en su mayoría corresponden a pómez, arenas (Apoyo) y bloques tipo andesita- basálticos (Mombacho), siendo estos fragmentados en líticas de arenas y gravas gris-blanquecino, marrón, rojizos, con deposición de gradación inversa de fino a grueso (diámetro máximo de 6 cm), con ciclos de 14 cm con fragmentos de pómez redondeados a subredondeados de diámetro 6 cm.

A lo largo del río El Pital se encuentran evidencias de paleocauces con arenas seudoestratificadas, de 2 m de espesor. En la coordenada 605622 E 1299023 N, el cauce se ensancho, originando el depósito de arenas aluviales (con alto contenido de minerales de magnetita) que están siendo explotados como materiales para la construcción.



Foto 10. Depósitos fluviales de Apoyo (Qflap). **A.** Cause de Río El Pital. **B.** Conglomerado de rocas volcánicas producto del transporte de las corrientes del río. (UTM 605622 E 1299023 N, El Limonal).

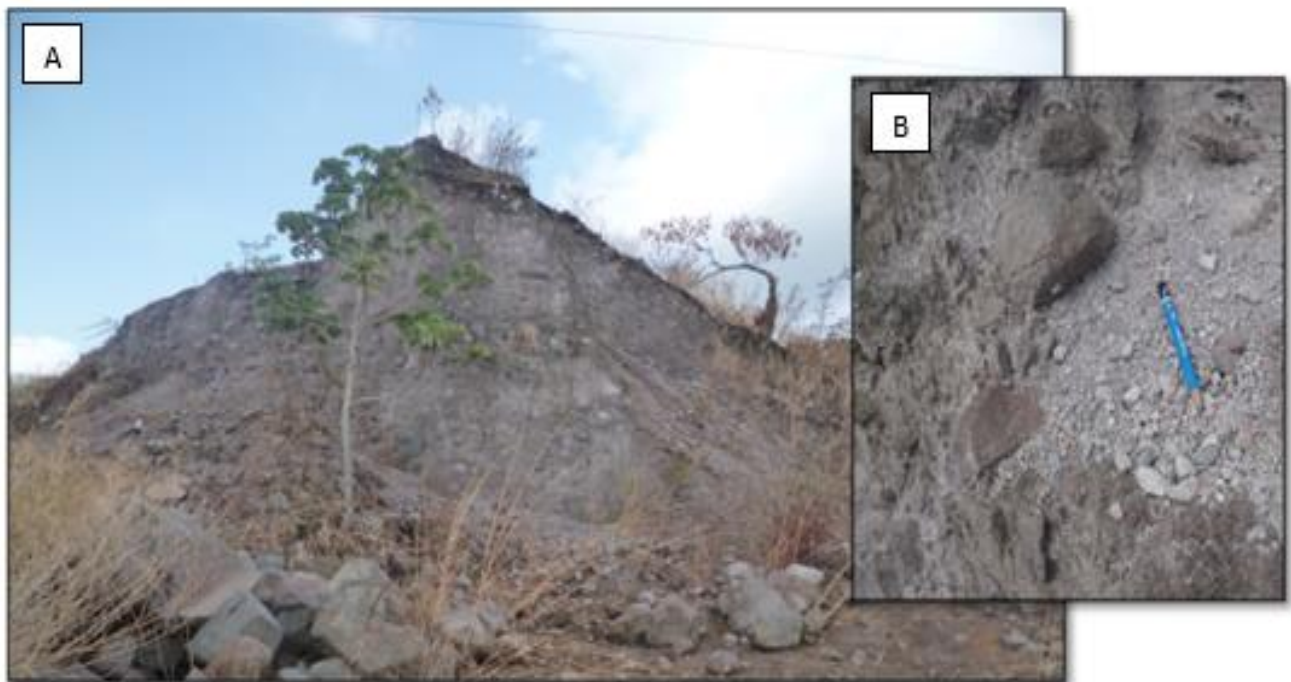
4.2.2 Unidad Mombacho .

Esta unidad, comprende los productos propios del estrato volcán Mombacho, y por ende constituyen la mayoría de rocas que lo conforman, ocupa la mayor parte del área de investigación. Los flujos lávicos individuales se diferencian por su posición que ocupan, superposición y estructura. Los piroclásticos cubren parte de sus pendientes abarcando también las áreas menos altas.

a) Lavas andesíticas en bloques (Qlmo).

La distribución de esta unidad es de poca extensión en superficie (menos de 1km²), debido a que ha sido cubierta por depósitos recientes, principalmente de depósitos de avalancha y aluviales, se ubican en el sector de la comunidad de Guachipillín y Santa Rita, en donde recientemente se realiza extracción para construcción por lo que se han expuesto cortes que permiten la descripción de estas lavas (Foto 11).

Esta unidad consiste en flujos de lava de composición andesítica, con fracturas predominantemente N 25° E. Moderadamente meteorizado



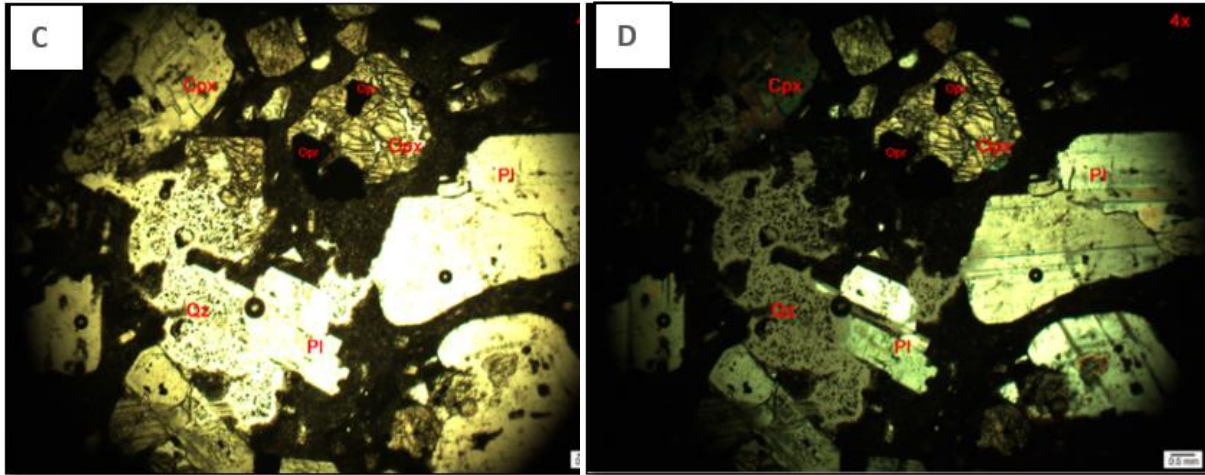


Foto 11. Lavas andesíticas en bloques (Qlmo). **A y B.** Lavas andesíticas en bloque. **C y D.** Sección delgada #SVM0027, de textura hipocristalina, los fenocristales predominantes son de tipo plagioclasa (Pl), ortopiroxeno (Opx), cuarzo (Qz). En algunos cristales de plagioclasa se pueden observar alteraciones de sericita. La matriz está constituida por vidrio volcánico levemente alterado. La muestra se presenta relativamente sana, (UTM 1297538N, 615115E, Guachipilín).

b. Lava escoréacea basáltica (Qlesmo)

La escoria de flujo se encuentra depositada al este del área (Aguas Agrias, El Limonal, San José) coincidiendo con la geomorfología de campo de escorias cubriendo un área de 4.68 km². Su espesor es variable alcanzando hasta los 5.6 m.

La composición es basáltica, presentando bloques con diámetros de 0.3 m hasta 1 m y peso específico muy bajo, con fragmentos piroclásticos tipo escorias y lapilli (de permeabilidad alta) de forma subangular hasta subredondeados, debido a la abrasión del flujo, sin clasificación granulométrica. Se encuentran distribuidos dentro en una matriz de grava, arena, ceniza y abundante limo con apariencia de estructura conglomerática (Foto 12).

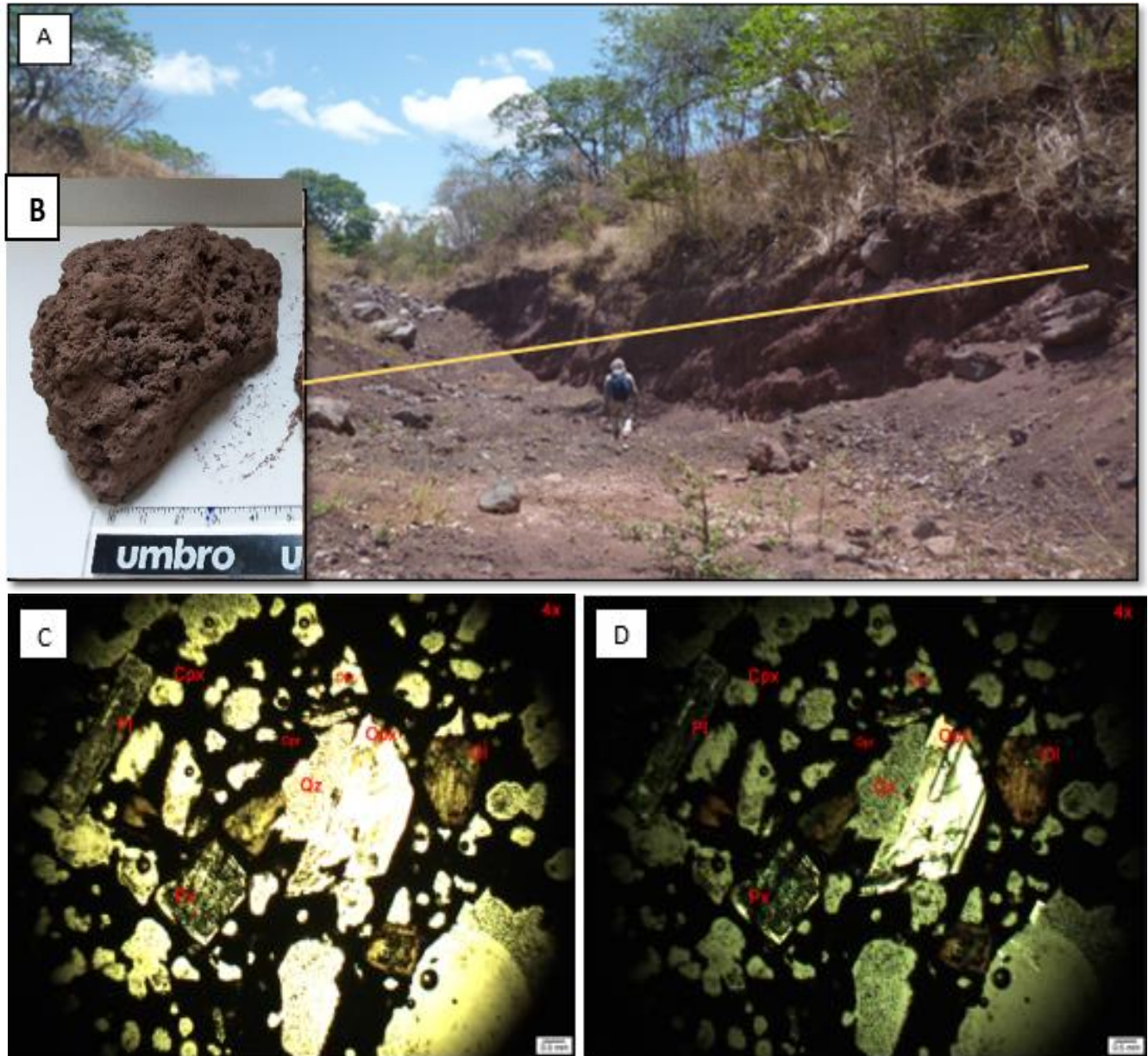


Foto 12. Lavas escoriaeas (Qlesmo). **A y B.** Depósito de lavas tipo escoria. **C y D.** Sección delgada de Muestra #SVM0027, de textura hipocristalina, los fenocristales predominantes son de tipo plagioclasa (Pl), clinopiroxeno (Cpx), ortopiroxeno (Opx), anfíboles, Cuarzo (Qz) y minerales opacos. El clinopiroxeno Olivino (Ol) y las plagioclasa son los minerales predominantes. La matriz ha sido alterada, algunos minerales presentan alteración (oxidación) principalmente en los bordes, (UTM 611856E, 1302780N, Aguas Agrias).

c. Depósito de avalancha (Qlavamo).

Está representada por lavas en bloque del colapso del flanco sur del edificio volcánico del Mombacho, evento que fue originado por la alteración hidrotermal en este sector, de acuerdo a Nathan (2013) el evento del colapso data entre 270 – 650 A.D (Foto 13)

Los bloques del flanco sur del volcán, abarcan desde la cumbre y bajan hasta los alrededores de comarca Dolores, cubren un área de 45.5 km² alcanzando un espesor de 42 m. Las lavas son de tipo andesítica de textura porfirítica, con abundantes plagioclasas, piroxenos y cuarzo en pocas cantidades. Los bloques fueron depositados en disposición de bloque angulosos a sub angulosos mayoría de 1.4 hasta 3 m de diámetro. Estos bloques adoptaron el patrón de la topografía preexistente. Estos ocupan todo el sector suroeste y en menor proporción el flanco sureste del área de investigación.

Las muestras fueron tomadas en las coordenadas 611533E 1303340N en Laguna El Repollal, en donde afloran bloques subangulosos con diámetros mayor diámetro, subangulosos de color gris claro, algunos bloques presentan una pequeña capa tipo cebolla de color blanquecina, producto de precipitación de silice.



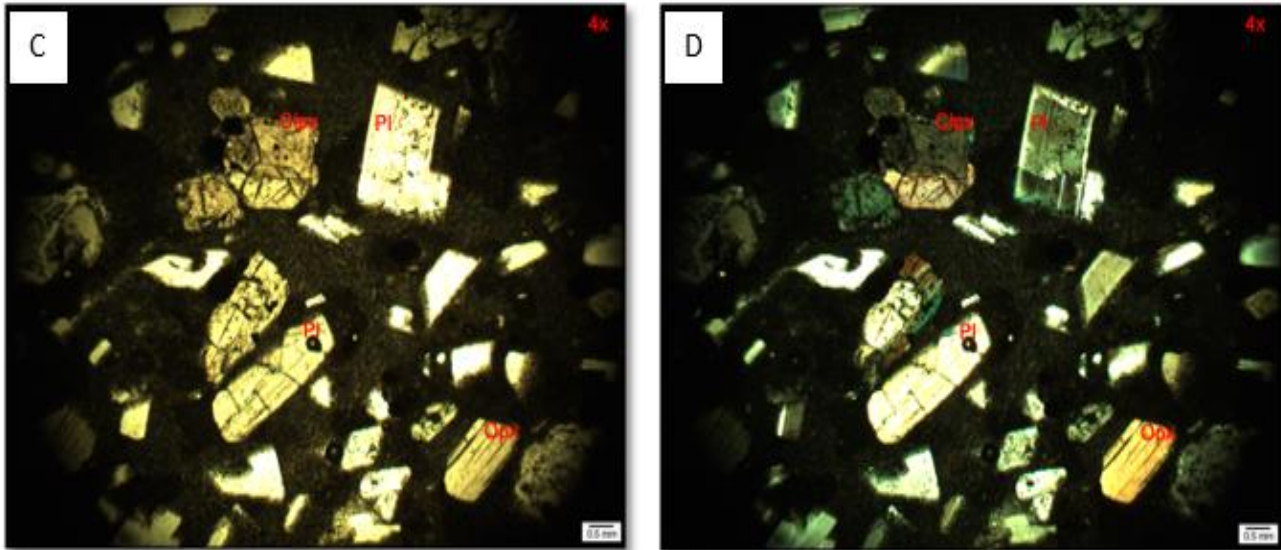


Foto 13. Depósito de avalancha (Qlavamo). **A y B.** Bloques de lava andesíticos. **C y D.** Sección delgada (4x) SVM#0045: Andesita De textura hipocristalina, los fenocristales predominantes son de tipo plagioclasa (Pl), clinopiroxeno (Cpx), ortopiroxeno (Opx), anfíboles, Cuarzo (QZ) en menor proporción y minerales opacos. La plagioclasa el mineral predominante, estas presentan zonaciones indicando el desarrollo de las mismas antes la presencia de diferentes fluidos. La matriz está compuesta por vidrio y pequeños fragmentos de plagioclasas, la muestra se presenta sana, sin alteración, (UTM 611510E 1305101N, Río Brujo – Las Colinas).

d. Deposito coluvial (Qcolmo).

Estos materiales se encuentran depositados en las áreas relativamente bajas, al suroeste coincidiendo en parte con la peniplanicie y en las partes altas del sector de Santa Rosa y Mecatepe (Foto 14).

Dentro de estos depósitos coluviales se han diferenciado flujos de lodo, con espesores de hasta 2 m y material procedente de la zona más alta. En la coordenada 614697E 1302795N con un espesor de casi 2 m, aflora el depósito lahárico el cual presenta bloques de hasta 2 m de diámetro, inmersos en una matriz de pequeños clastos, de diferentes tamaños hasta limos y arcillas. Con disposición caótica, lo que nos indica lo cercano que se encuentra la fuente.

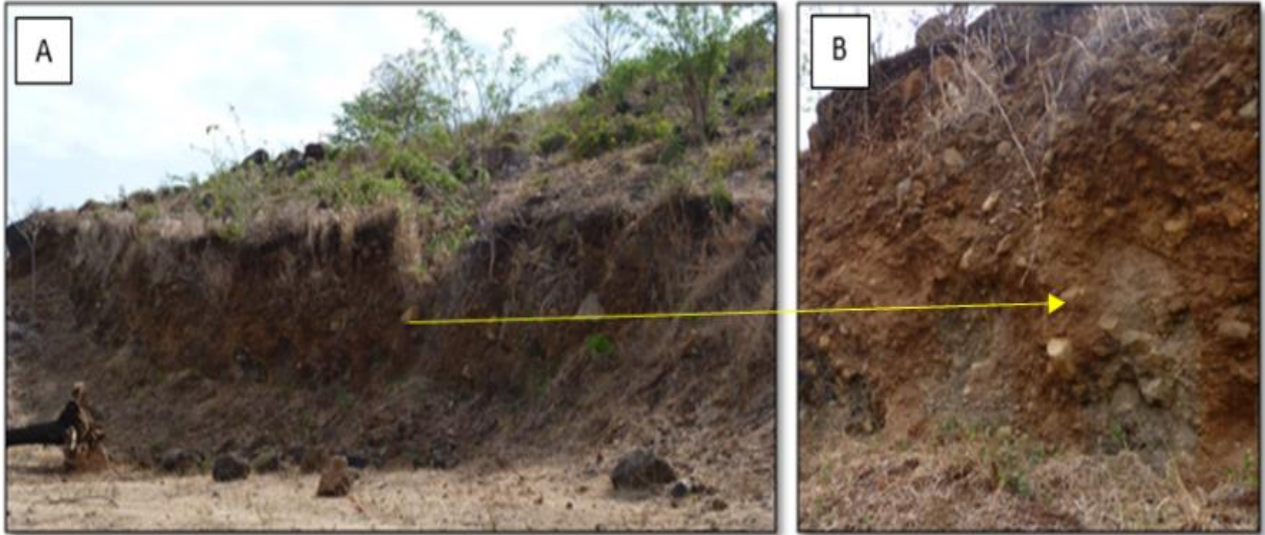


Foto 14. Depósito coluvial (Qcolmo). **A y B.** Deposito coluvial compuesto de bloques y fragmentos angulosos con diámetro desde los 0.5 – 1 m. La composición predominante de los bloques es andesito-basáltica, la matriz es arenosa se observaron mezcla de fragmentos escoriaáceos, suelo y arena. El depósito presenta alto grado de meteorización (oxidación), (UTM 614697E 1302795, Mecatepe).

e. Depósito residual (Qrmo).

Corresponden a esta unidad los materiales de la unidad de avalancha que han sido trabajados por agentes endógenos. Comprende los sectores de Guachipilín, Santa Rita, Veracruz, Arlen Siu, con una extensión aproximada de 22 km² (Foto 15).

Está constituida de suelos franco-arenosos oscuros y arenas limosas rojizas. A lo largo de la costa del lago se observa la presencia de arenas de color oscuro por el alto contenido de magnetitas de contenido variable en la fracción fina. Es común el predominio de arcillas y suelos fósiles.

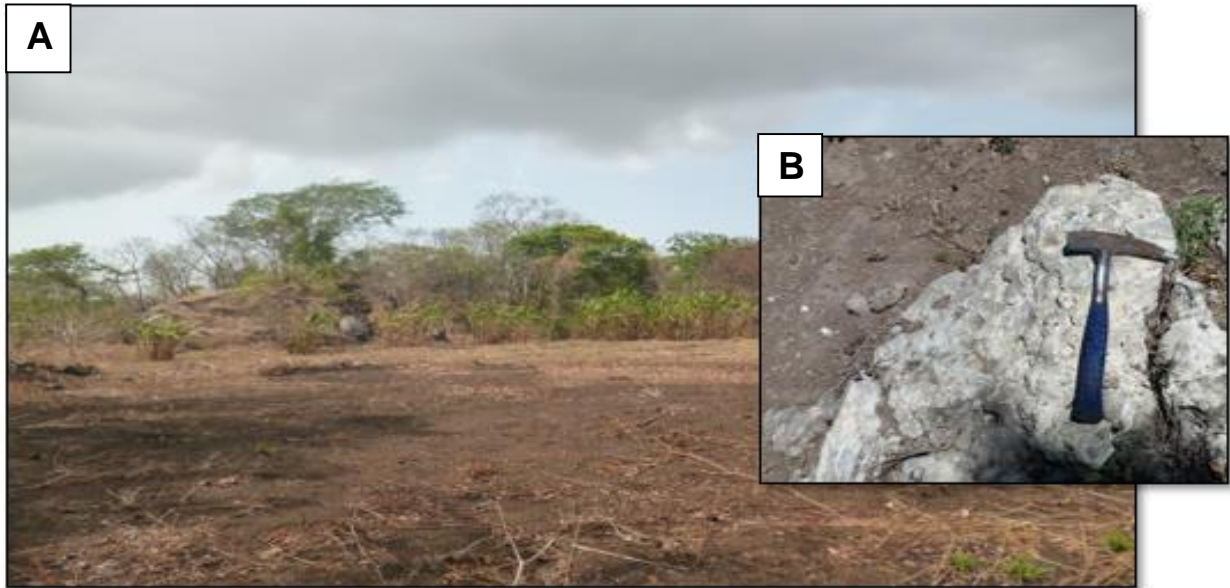


Foto 15. Depósito residual (Qrmo). A. Suelos residuales producto de la acción exógena y antrópica que han afectado a los depósitos de las partes altas. B. Algunas rocas presentan alteración tipo cuarzo (calcedonia) lo que indica que dichas rocas no son autóctonas del área, sino que han sido transportadas, ya que hay indicadores de que fluidos relativamente calientes nos pueden estar generando este tipo de alteración en el sector noreste, (UTM 614976E, 1296335N, Guachipilín).

4.3 Geología estructural

La interpretación del arreglo estructural, que presenta el área de estudio, se ha realizado en base al análisis de fotografías aéreas, ortofotomapas, fisiografía de mapas topográficos, geomorfología y observaciones de campo. Cabe señalar que el reconocimiento de estructuras del área resulta fuertemente impedido por la presencia difundida de productos volcánicos muy recientes, en particular piroclásticos, coladas lávicas y depósitos de avalancha a consecuencia de esto, es posible que estructuras importantes como depresiones volcano-tectónicas, o sea estructuras hundidas de gran extensión controladas por fallas pre – existentes y relacionadas con emisiones volcánicas, características de área volcánicas, no tengan alguna expresión superficial.

De manera general se presentan dos tipos de lineamientos NE –SO que podría estar asociados a los eventos tectónicos del Terciarios y lineamientos N –S, característico del arreglo tectónico Cuaternario. Los lineamientos están claramente definidos por formas del terreno de origen volcánico y endorreico, que se alinean principalmente como manantiales y lomos de obstrucción (Figura 8).

Sin embargo, se pudieron realizar medidas en dos sitios, de los cuales de detallará enseguida:

4.3.1 Fallamiento NE - SO

- Falla Laguna Blanca

Es una estructura que carece de expresión superficial, sin embargo se pone en evidencia debido a la ocurrencia y/o afloramiento de una serie de manantiales de alta temperatura a lo largo del eje norte de Laguna Blanca. La dirección preferencial de esta estructura es de N 46° E con una longitud máxima de la estructura de 3.8 km.

4.3.2 Lineamientos

- **Lineamiento NE – SO**

Por rasgos geomorfológicas se han evidenciado una serie de lineamientos con direcciones preferenciales NE – SO:

- Lineamiento Laguna Cacho-Laguna Blanca: evidenciado por rasgos geomorfológicos, presenta dirección N 50° E con una longitud 1.7 km.
- Lineamiento Laguna Juan Tallo: evidenciado por rasgos geomorfológicos, de dirección N 46° E, con longitud de 1.9 km
- Lineamiento Aguas Agrias – El Limonal: evidenciado por rasgos geomorfológicos, de dirección N 53°E, con 2.8 km de longitud.

• **Lineamientos N – S**

- Lineamiento Santa Rita: evidenciado por rasgos geomorfológicos, de dirección N – S, con 2.7 km de longitud.

4.3.3 Estructuras circulares

- Estructura Aguas Agrias: evidenciado claramente por rasgos geomorfológicos, in situ se identificó un desnivel de al menos 20 m del borde de la estructura respecto al plano de la misma en donde afloran una serie de manantiales de agua fría, sin embargo, debido a que esta estructura se encuentra dentro de la unidad geomorfológica D11, no se fue posible definir la génesis de la misma,
El diámetro aproximado de 1.1 km.

Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

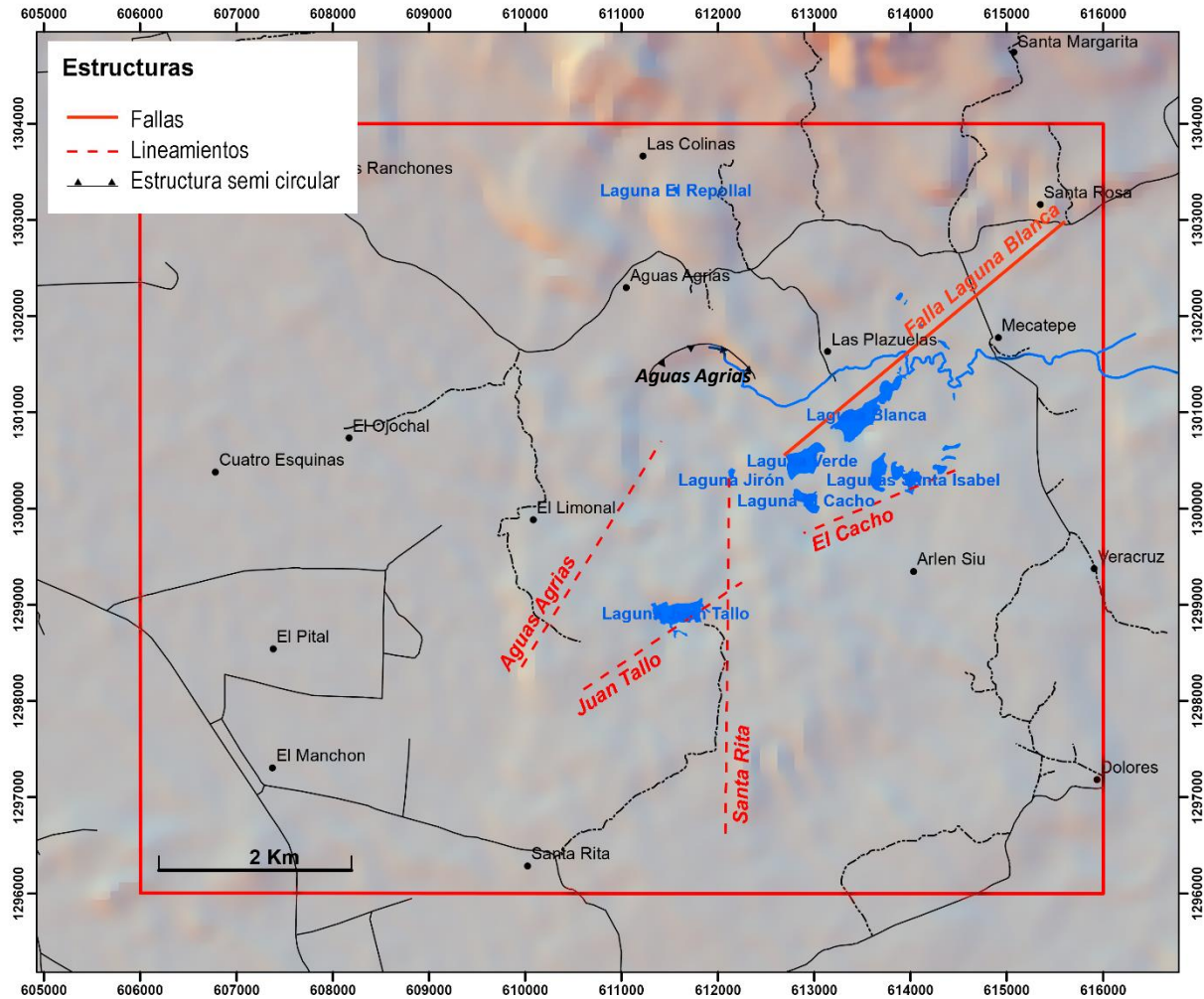


Figura 8. Interpretación del análisis estructural, Vista de superposición de capas: Mapa de sombras 90m, Global Mapper.

1. **Fallas NE-SO:** Falla Laguna Blanca
2. **Lineamientos NE –SO:** Mecatepe, Aguas Agrias, Juan Tallo, Cacho-Blanca
2. **Lineamientos N-S:** Santa Rita
4. **Estructuras semi-circulares:** Aguas Agrias

4.3.3 Fracturas menores

- **Cauce río El Pital**

En el sector del cauce del Rio El Pital se identificaron una serie de fracturas con dirección preferencial NS y NW, las cuales en su mayoría estaban rellenas de Silice.

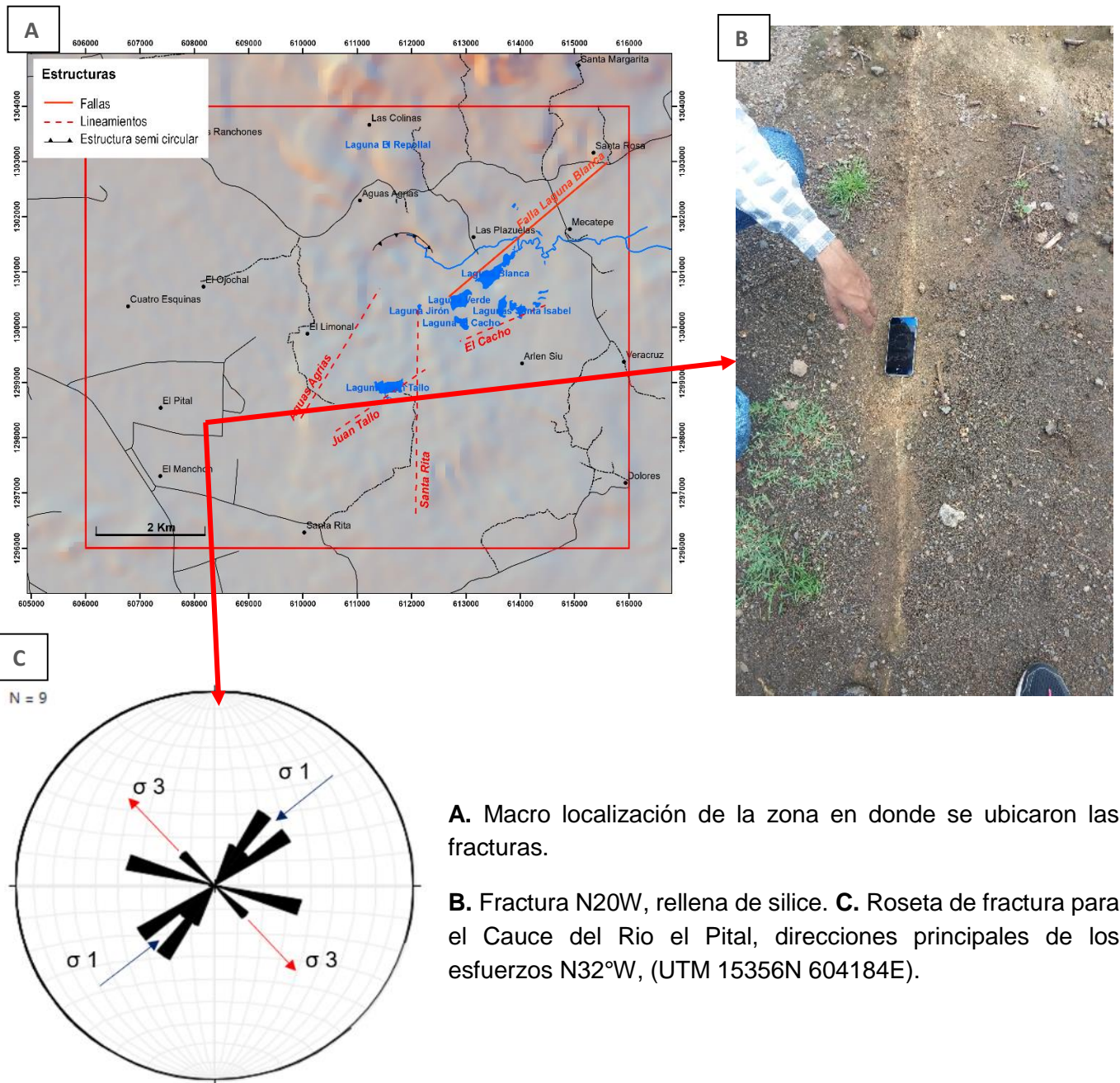
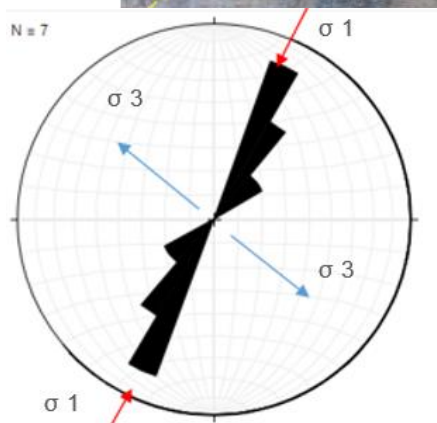


Figura 12. Análisis estructural del Cauce río El Pital

- **Andesitas en bloques, Guachipilín**

Son lavas andesíticas pertenecientes a la unidad Qlmo, este depósito se encuentra moderadamente fracturado, siendo la referencia de las fracturas N25°W, (Figura 10).



A. Sistema de fracturas anastomasado en lavas andesíticas del sector de Guachipilín.

B. Roseta de fracturas, esfuerzos máximos N25W, (1297538N 615115E)

Figura 13. Análisis estructural de las lavas de Guachipilín

4.4 Geoquímica

4.4.1 Manifestaciones termales

La indicación de la existencia de un posible reservorio geotérmico en superficie son las manifestaciones termales.

Las manifestaciones termales se ubican al noreste del área de investigación (Figura 7), están bien representadas por 10 manantiales con temperaturas mayores a los 30°C (LGR, MCTP, MNRS1, LCCH, LVRD, LBLN1, LBLN2, LBLN3, MNRS3, LJNT) que forman parte del complejo de lagunas El Cacho – Verde - Blanca, extendiéndose a lo largo del lineamiento Lagunas de Mecatepe con dirección preferencial N 45° E y 3 manantiales fríos con temperaturas menores a 30°C (RBLC, STRS, AA) que circundan las manifestaciones térmicas, las cuales representarán el background para la investigación realizada.

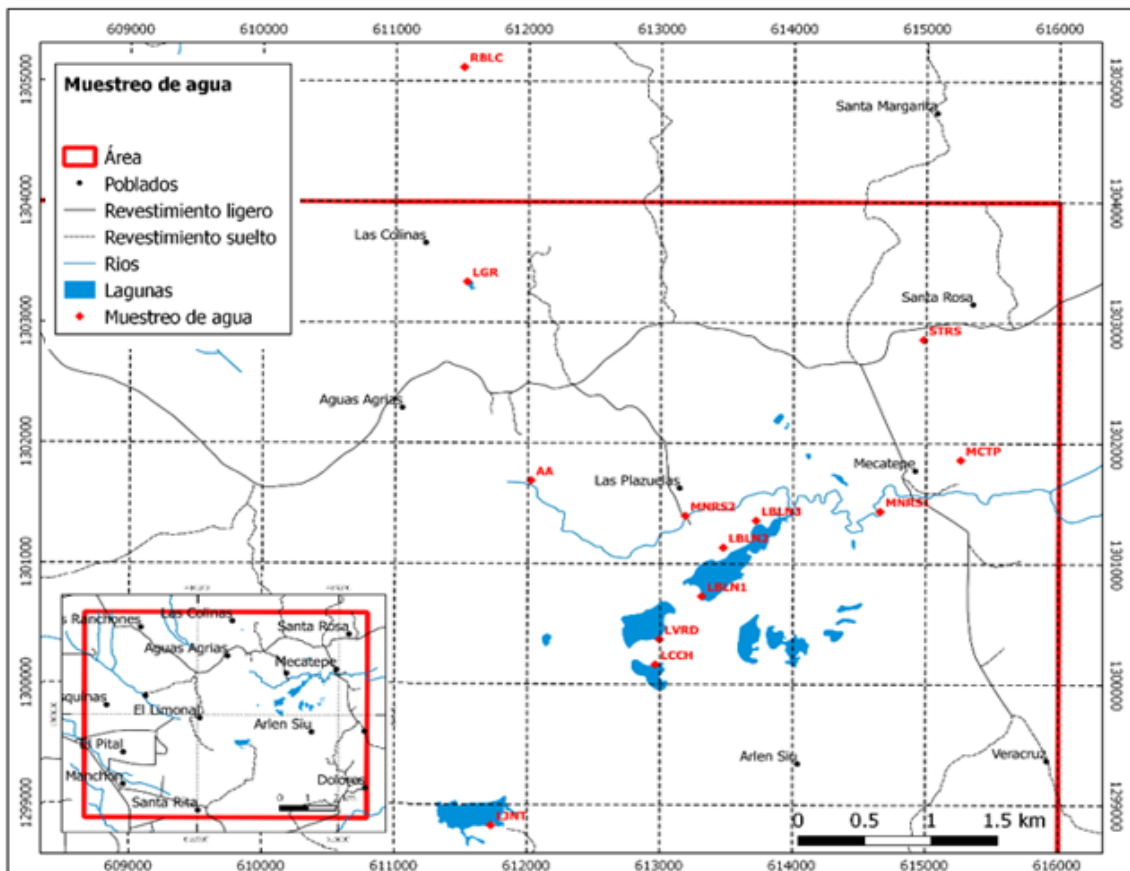


Figura 14. Sitios de muestreo de agua para análisis físico-químico



Foto 16. Sitios de muestreos de agua. **A.** Manantial El Borbollón, Mecatepe 1301861N, 615270E. **B.** Laguna Juan Tallo 1298840N 612023E. **C.** Aguas Agrias 1301689N 612023E. **D.** Laguna Blanca 1301135N 613473E. **E.** Laguna el Repollal 1303336N 611538E. **F.** Santa Rosa 1302861N 614979E.

4.4.1 Parámetros físicos

- pH

Los valores en la escala pH medidos están estrechamente relacionados con la naturaleza química de las fuentes de aguas. Los iones que determinan el pH de las aguas de estas fuentes son el bicarbonato, carbonatos, calcio, fosfato y magnesio siendo estos últimos de menor importancia por tener concentraciones muy bajas (Figura 12).

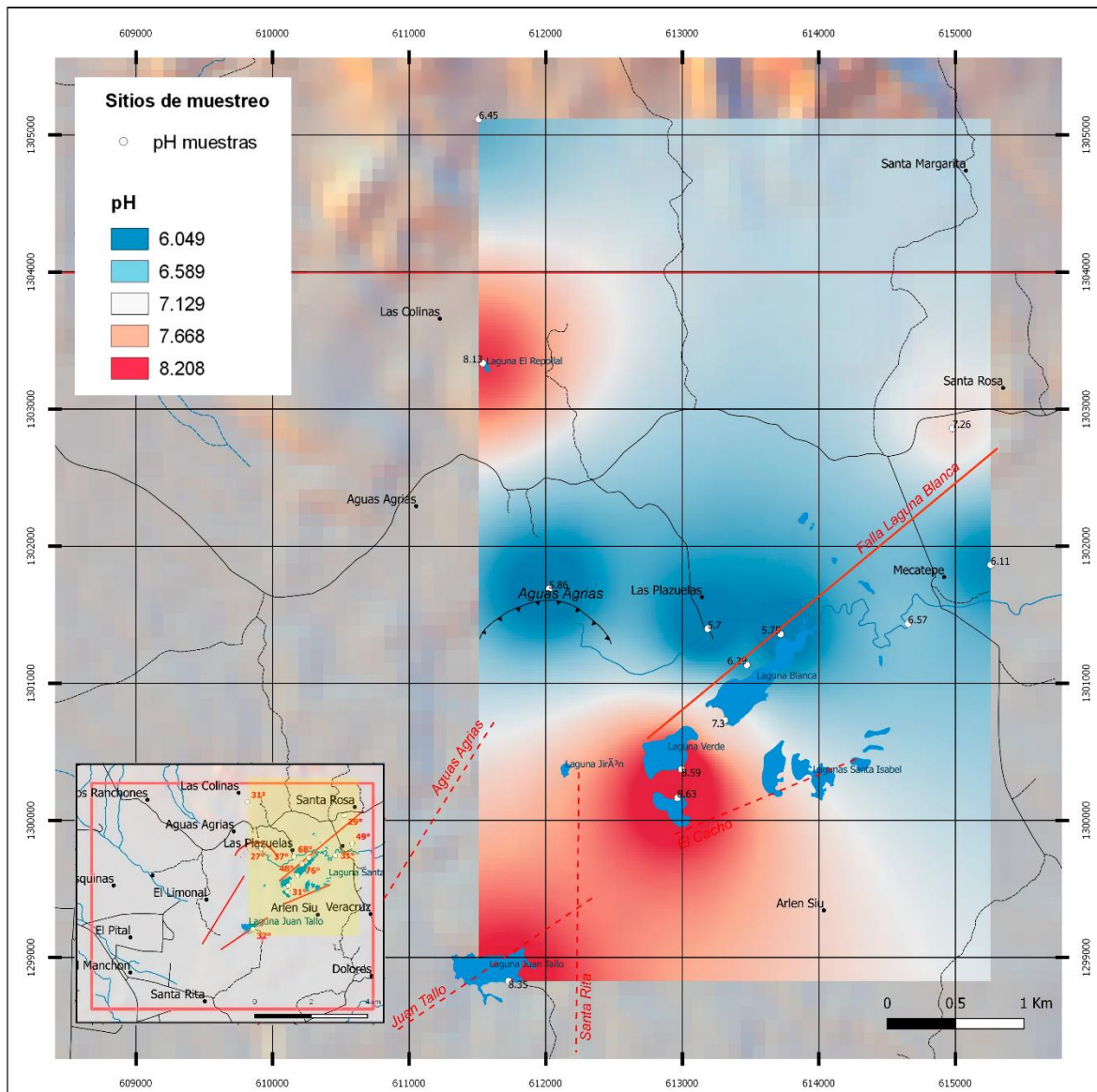


Figura 15. Interpolación de los valores de pH de las muestras de agua del sur del volcán Mombacho.

○ **Conductividad**

La conductividad mostro valores desde los 282 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 2230 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se observa una relación inversa de conductividad con la altura, de igual forma con los sólidos totales disueltos. La conductividad aumenta conforme aumenta los sólidos totales disueltos, como consecuencia del aumento de electrolitos en solución. (Figura 13).

Estos cambios en la conductividad son consecuencia de la naturaleza hidrogeoquímica, la temperatura de los acuíferos y en menor grado de la permeabilización de estos, con aguas superficiales.

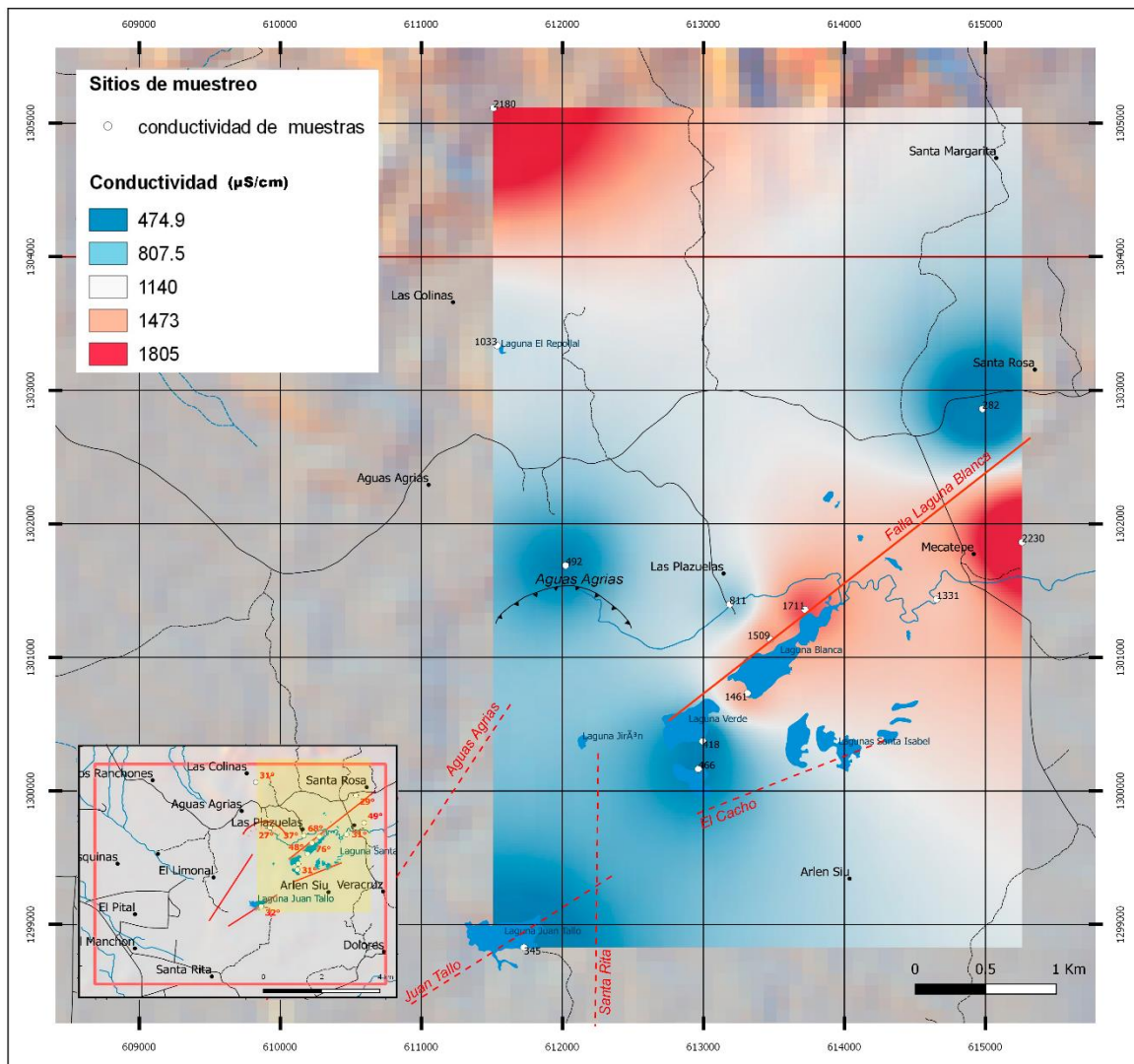


Figura 16. Interpolación de los valores de conductividad de las muestras de agua del sur del volcán Mombacho.

- **Temperatura**

Los rangos de temperatura del punto de emergencia para las diferentes muestras tienen variaciones importantes, siendo la de mayor temperatura la muestra LBLN2 con 76°C y de menor temperatura las muestras AA y RBLC con 27°C respectivamente. En la Figura 14 se muestra la clasificación de las aguas de acuerdo al registro de temperatura tomado en campo.

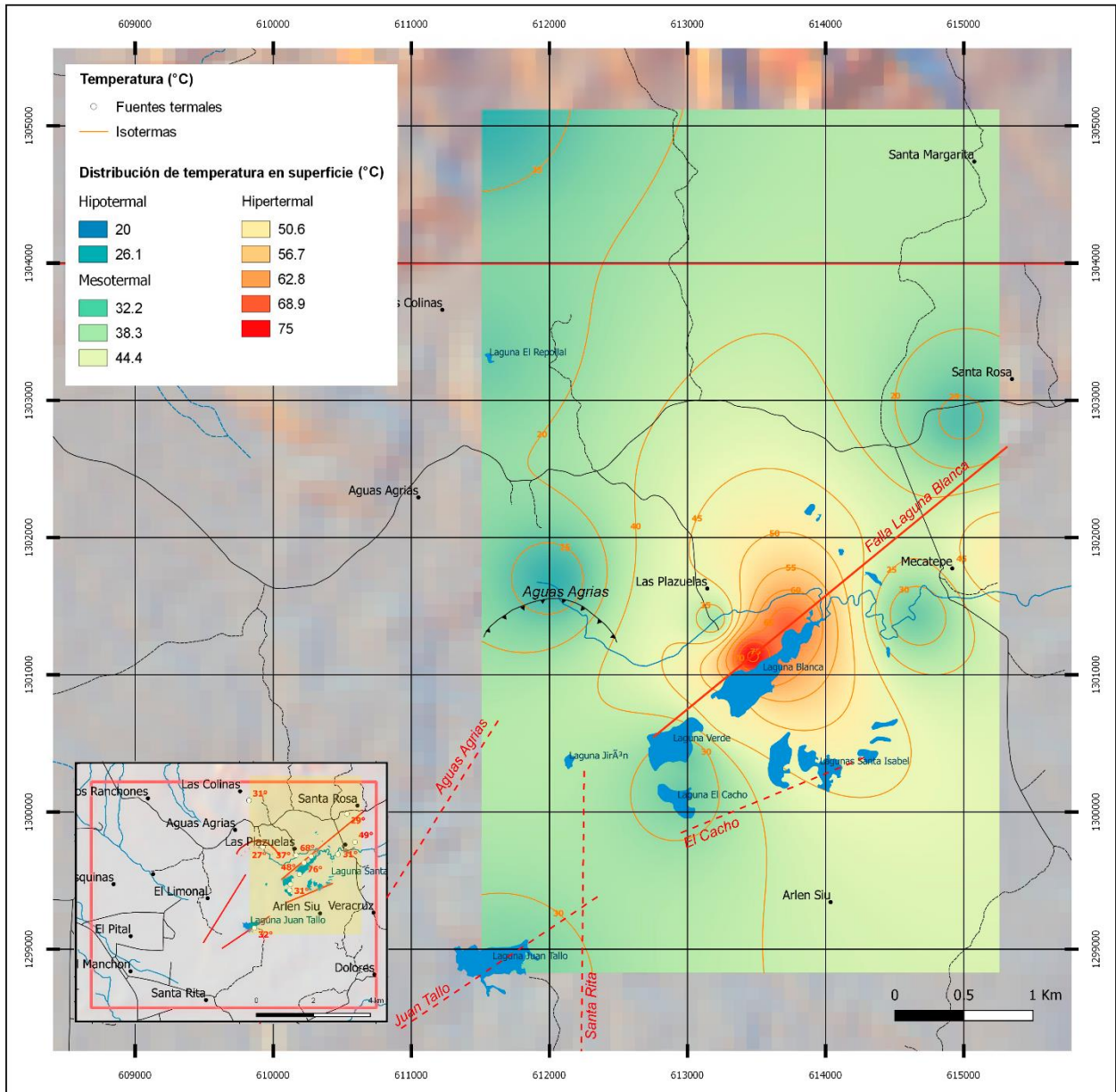


Figura 14. Interpolación de los valores de temperatura de las muestras de agua del sur del volcán Mombacho.

Estas anomalías térmicas están restringidas al área comprendida entre el
complejo de Lagunas Mecatepe – Río Manares

Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

4.4.2 Composición química de las aguas

En la tabla 8 se presentan los datos de los análisis químicos realizados a las muestras de los manantiales ubicados en el sector sur del volcán Mombacho.

Tabla 8. Resultados de los análisis químicos de laboratorio

Fecha	Rg	Sitio	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	NO ₃	PO ₄	Fe T	SiO ₂ T	B	H ₂ S	NH ₃	STD
7/5/2015	027	LGR	47	49	120	33	37	68.27	51.00	543.35	0.17	5.66	< LD	64.25	0.35	2.299	0.608	572
7/5/2015	028	RBLC	100	22	320	34	17	927.74	0.00	219.78	< LD	6.28	< LD	131.98	0.43	0.937	0.451	1956
7/5/2015	029	STRS	18	3	22	9	13	59.65	15.00	134.31	0.58	4.72	< LD	100.55	0.43	0.852	0.999	248
8/5/2015	030	MCTP	237	32	114	36	313	57.87	6.00	561.66	< LD	9.41	< LD	187.28	4.50	0.766	0.533	1402
8/5/2015	031	MNSR1	115	16	90	25	132	123.68	0.00	326.56	1.15	8.68	< LD	131.44	1.90	0.766	0.368	768
8/5/2015	032	LCCH	46	10	23	17	17	29.75	4.21	184.51	< LD	8.05	< LD	129.27	0.35	0.852	0.271	334
8/5/2015	033	LVRD	43	9	16	15	17	27.84	8.17	151.08	< LD	7.43	< LD	114.10	0.43	0.766	0.264	286
8/5/2015	034	LBLN1	150	21	98	26	181	112.83	0.00	449.57	< LD	8.47	< LD	127.65	2.60	< LD	0.478	916
8/5/2015	035	LBLN2	152	19	116	29	197	72.02	21.00	488.40	1.38	8.47	< LD	198.12	2.60	0.724	0.255	950
8/5/2015	036	LBLN3	199	25	90	37	225	141.28	0.00	494.51	< LD	8.99	< LD	263.15	3.03	0.596	0.338	1134
8/5/2015	037	MNRS2	79	16	59	28	136	59.91	18.00	396.83	0.83	5.97	< LD	117.35	1.13	0.681	0.271	520
8/5/2015	038	AA	27	5	62	22	13	42.60	9.00	366.30	1.90	5.76	< LD	109.22	0.43	0.852	0.255	280
9/5/2015	039	LINT	37	6	23	12	14	42.00	0.00	181.58	< LD	4.09	< LD	79.42	0.17	0.766	0.270	146

Rg: registro de laboratorio **STD:** solidos totales disueltos

- **Calidad de los resultados**

El balance iónico (B.I) de las muestras (Tabla 9.) indica que las muestras termales muestran un balance aceptable según el criterio de aceptación con valores menores al 10%. Sin embargo, para las muestras de STRS y MNRS2 se presenta el caso de que estas muestras no se encuentran balanceadas.

Tabla 9. Resultados del balance iónico

Sitio	Cationes	Aniones	B.I %
LGR	12.01	13.08	-4.25
RBLC	23.70	23.39	0.64
STRS	2.70	4.32	-23.02
MCTP	19.80	19.44	0.90
MNRS1	11.98	11.66	1.34
LCCH	4.79	4.27	5.73
LJNT	3.90	4.24	-4.06
LVRD	4.14	3.80	4.25
LBLN1	14.12	14.81	-2.40
LBLN2	15.30	15.75	-1.46
LBLN3	16.87	17.39	-1.52
MNRS2	9.11	12.20	-14.52
AA	6.21	7.56	-9.82

4.4.3 Clasificación de las aguas

- **Cationes y aniones**

En la tabla 10 se presenta el ordenamiento en función de los principales cationes y aniones en mayor presencia para las diferentes. Se observa que la mayoría de las muestras siendo el sodio y calcio los cationes predominantes y bicarbonatos y sulfatos como los aniones dominantes.

Tabla 10. Ordenamiento de cationes y aniones. Datos en mg/L

Rg.	Código	Cationes					Aniones			
		Na	K	Ca	Mg		Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻	
27	LGR	47	49	120	33	Ca>K>Na>Mg	37	68.27	543.35	HCO ₃ ⁻ > SO ₄ > Cl
28	RBLC	100	22	320	34	Ca>Na>Mg>K	17	927.74	219.78	SO ₄ > HCO ₃ ⁻ > Cl
29	STRS	18	3	22	9	Ca>Na>Mg>K	13	59.65	134.31	HCO ₃ ⁻ > SO ₄ > Cl
30	MCTP	237	32	114	36	Na>Ca>Mg>K	313	57.87	561.66	HCO ₃ ⁻ > Cl > SO ₄
31	MNSR1	115	16	90	25	Na>Ca>Mg>K	132	123.68	326.56	HCO ₃ ⁻ > SO ₄ > Cl
32	LCCH	46	10	23	17	Na>Ca>Mg>K	17	29.75	184.51	HCO ₃ ⁻ > SO ₄ > Cl
33	LVRD	43	9	16	15	Na>Ca>Mg>K	17	27.84	151.08	HCO ₃ ⁻ > SO ₄ > Cl
34	LBLN1	150	21	98	26	Na>Ca>Mg>K	181	112.83	449.57	HCO ₃ ⁻ > SO ₄ > Cl
35	LBLN2	152	19	116	29	Na>Ca>Mg>K	197	72.02	488.40	HCO ₃ ⁻ > Cl > SO ₄
36	LBLN3	199	25	90	37	Na>Ca>Mg>K	225	141.28	494.51	HCO ₃ ⁻ > Cl > SO ₄
37	MNRS2	79	16	59	28	Na>Ca>Mg>K	136	59.91	396.83	HCO ₃ ⁻ > Cl > SO ₄
38	AA	27	5	62	22	Na>Ca>Mg>K	13	42.60	366.30	HCO ₃ ⁻ > SO ₄ > Cl
39	LJNT	37	6	23	12	Na>Ca>Mg>K	14	42.00	181.58	HCO ₃ ⁻ > SO ₄ > Cl

- **Diagrama se Schoeller**

En la Figura 15 se muestra del diagrama de Schoeller para las muestras de aguas termales ubicadas al sur del volcán Mombacho, se puede observar que los componentes mayores son Na+K, Ca, Cl, HCO₃+CO₃ y en menor concentración el Mg y SO₄.

Las concentraciones de Cl marcan una distinción entre muestras de aguas que presentaron mayor anomalía de temperatura correspondientes a los manantiales del sector de Las Plazuelas y Mecatepe (MCTP, LBLN1, LBNL2, LBNL3, MNRS2). Sin embargo en el caso de la muestra del Río Manares (MNRS1) se presenta una

anomalía interesante de contenido de Cl, pese a que este no presentaba anomalía térmica.

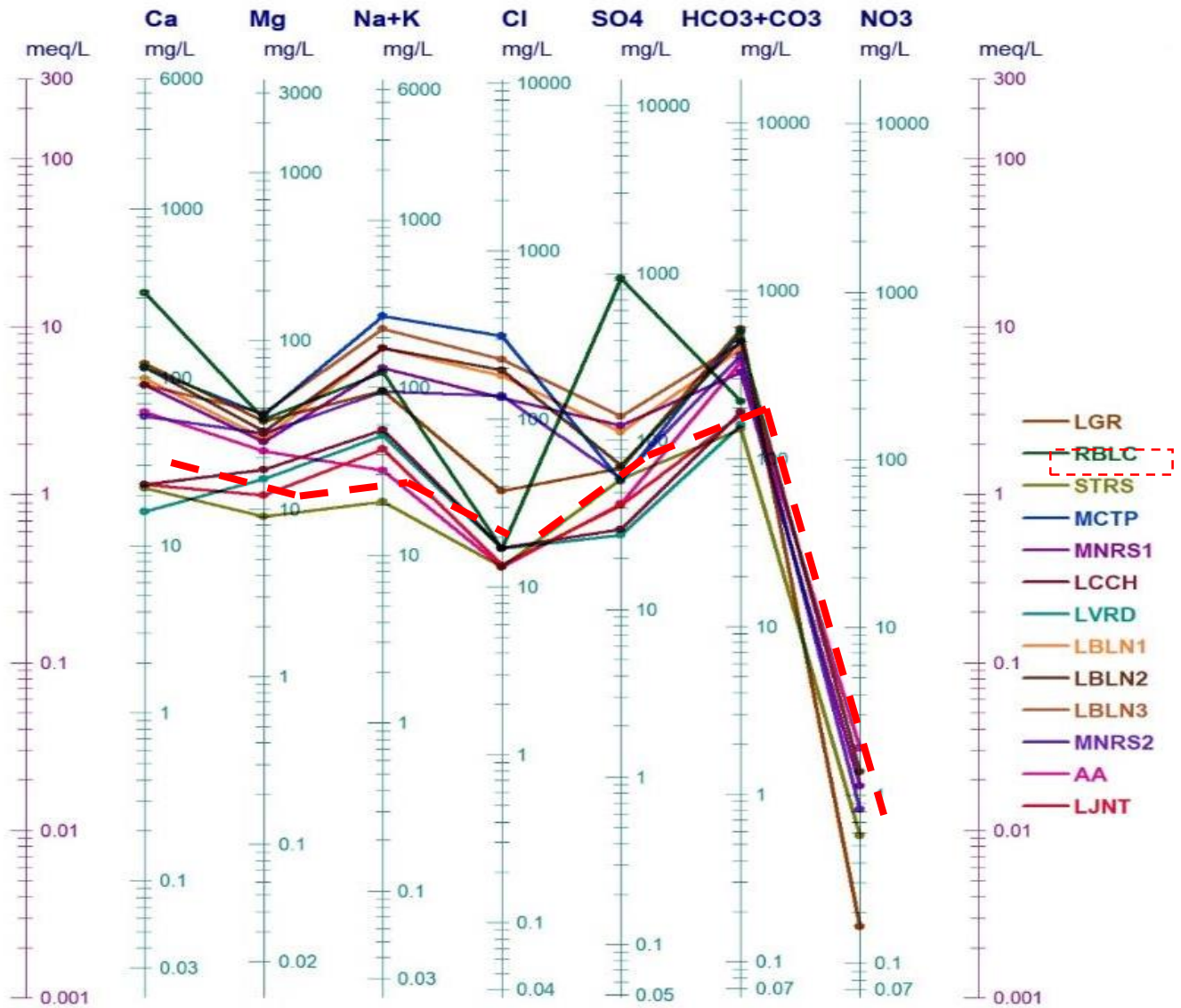


Figura 18. Diagrama de Schoeller para las muestras del sur del volcán Mombacho. Nótese el comportamiento de la muestra de Santa Rosa (STRS), presenta un comportamiento de agua que está siendo ligeramente contaminada por sulfatos y bicarbonatos, sin embargo, esta muestra es característica de aguas de manantiales aptas para consumo tratada debidamente.

- Diagramas triangulares

- a) CI – SO₄ – HCO₃

Se ha elaborado una clasificación en base al contenido de los aniones de mayor concentración CI – SO₄ – HCO₃.

En la figura 16 se muestra que para las muestras del sur del volcán Mombacho, la mayor parte de estas se encuentran en la región de bicarbonato por lo tanto se clasifican como aguas periféricas o bicarbonatadas.

También se observa que la muestra RBLC se encuentra en la región de sulfato, es decir se considera que esta agua está siendo calentada por vapor.

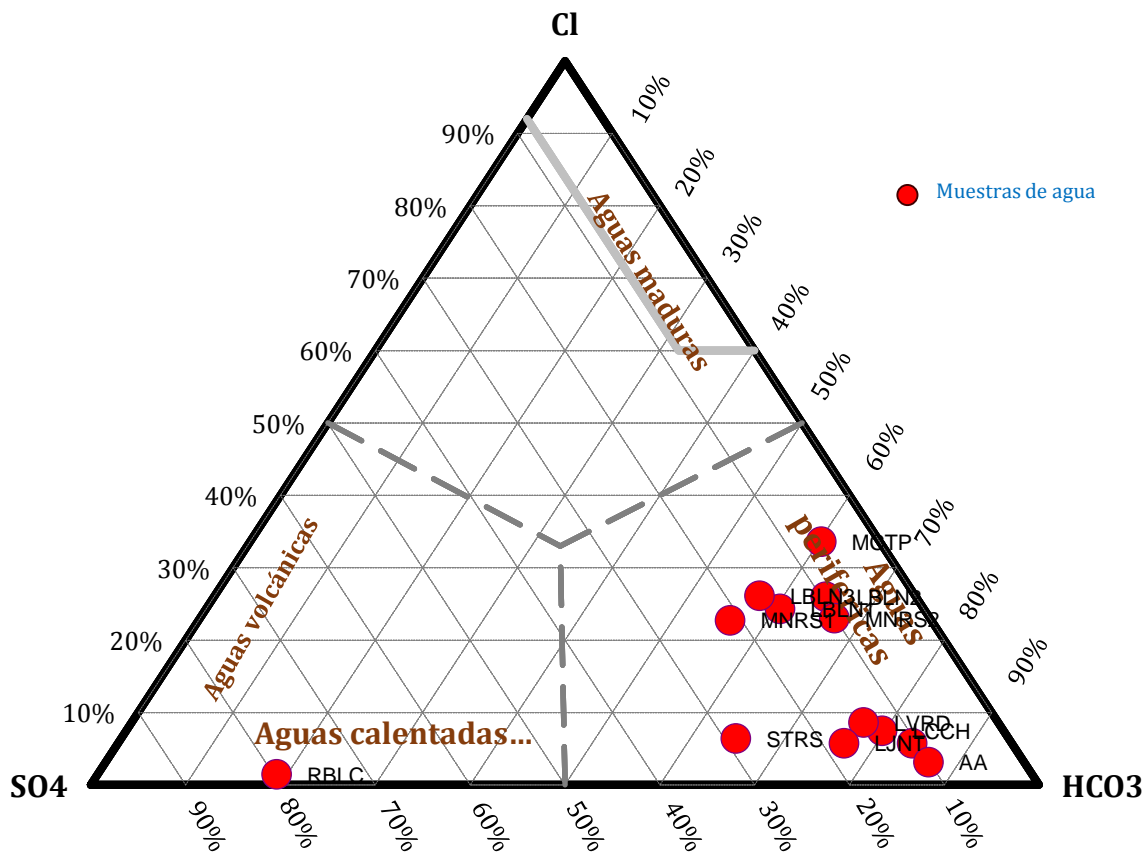


Figura 19. Diagrama de CI-SO₄-HCO₃ para las muestras del sur del volcán Mombacho.

b. diagrama de Piper

Los resultados del diagrama de Piper (Figura 17) permite clasificar las aguas de acuerdo a su ubicación en los diferentes cuadrantes, en el cual encontramos que se distinguen los diferentes grupos de aguas:

Grupo 1. Aguas sulfatadas cálcicas: Pertenecen a este grupo la muestra de Rio Brujo La Colinas (RBLC). Son Aguas ácidas, bajo contenido de cloruro, pueden ser formadas en áreas geotérmicas volcánicas donde el vapor por debajo de los 400 °C se condensa en las aguas superficiales. El sulfuro de hidrogeno del vapor es subsecuentemente oxidado a sulfato. Las aguas ácido sulfatadas son encontradas en áreas donde el vapor sube desde el agua subterránea de alta temperatura y en áreas volcánicas donde en etapas de enfriamiento volcánico solo dióxido de carbono y gases de sulfuro permanecen en el vapor que sube a través de la roca.

El ion principal es el SO₄.

. Grupo 2. Aguas bicarbonatadas cálcicas: Pertenecen a este grupo las muestras de Laguna El Repollal (LGR), Santa Rosa (STRS), Laguna Juan Tallo (LJNT), Laguna Verde (LVRD), Aguas Agrias (AA), Laguna El Cacho (LCCH). El enriquecimiento en bicarbonatos se debe ya sea a la disolución de CO₂ o al condensado de vapor geotérmico. Son características de yacimientos geotérmicos de líquido-dominante.

Grupo 3. Mezcla de aguas: Pertenecen a este grupo las muestras de Laguna Blanca 1 (LBLN1), Laguna Blanca 2 (LBLN2), Laguna Blanca 3 (LBLN3), Manares 1 (MNRS1), Manares 2 (MNRS3) y Mecatepe (MCTP).

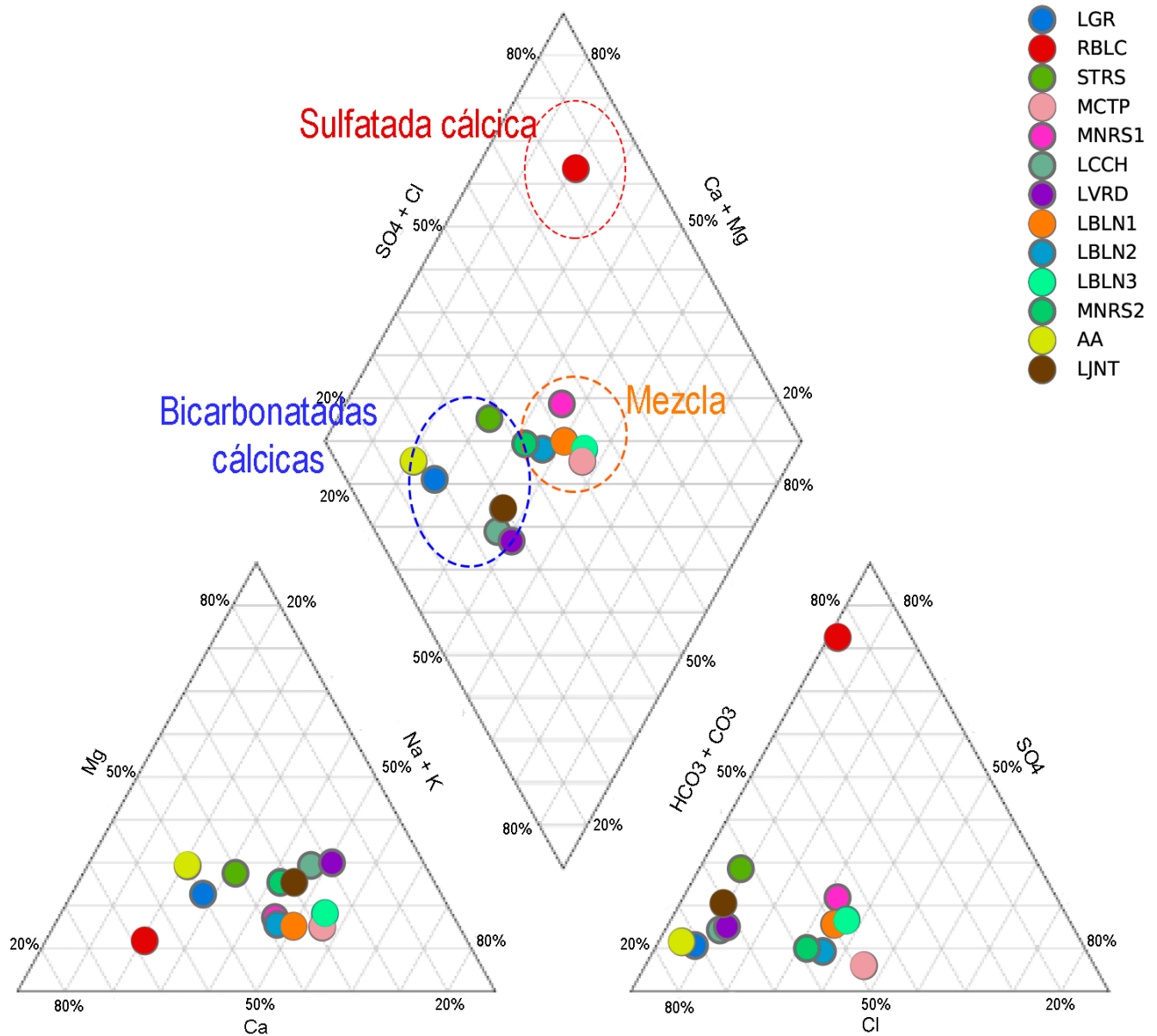


Figura 20. Diagrama de Piper para las aguas del sur del volcán Mombacho.

4.4.4 Geotermometría de agua

a) Na-K-Mg

En la figura 18 se muestra que las aguas del área de investigación se ubican en el vértice del Mg, en la región de las aguas inmaduras. Lo que asevera una mezcla de aguas.

La temperatura estimada en profundidad para estas aguas va desde los 160°C a los 280 °C.

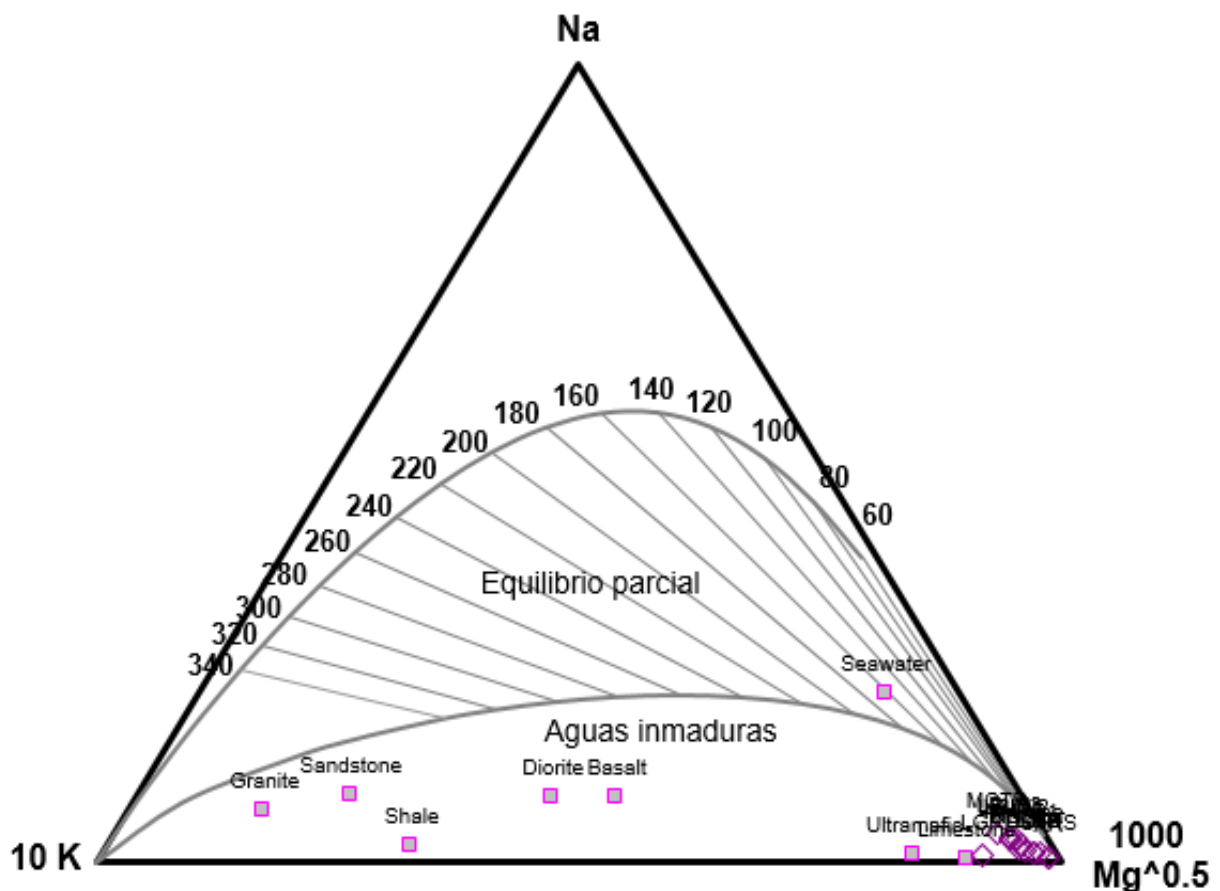


Figura 21. Diagrama de geotermómetros Na-K-Mg para las muestras del sur del volcán Mombacho.

- **Diagrama de D'Amore & Panichi**

Aplicando las ecuaciones (1) – (6) (Capítulo II) para cada uno de los parámetros que se evalúan en el diagrama de D'Amore & Panichi se obtuvo el siguiente resultado:

Las aguas presentan un comportamiento característico de aguas que circulan por yacimientos de cuenca sedimentaria (aguas con alto contenido de carbonatos, bicarbonatos, sulfatos), sin embargo, para la muestra LRBL se presenta un comportamiento más cercano a las aguas que circulan por yacimientos sulfatados, esto debido a que esta muestra está próxima al sistema de fumarolas del volcán Mombacho, en donde predominan los sulfatos.

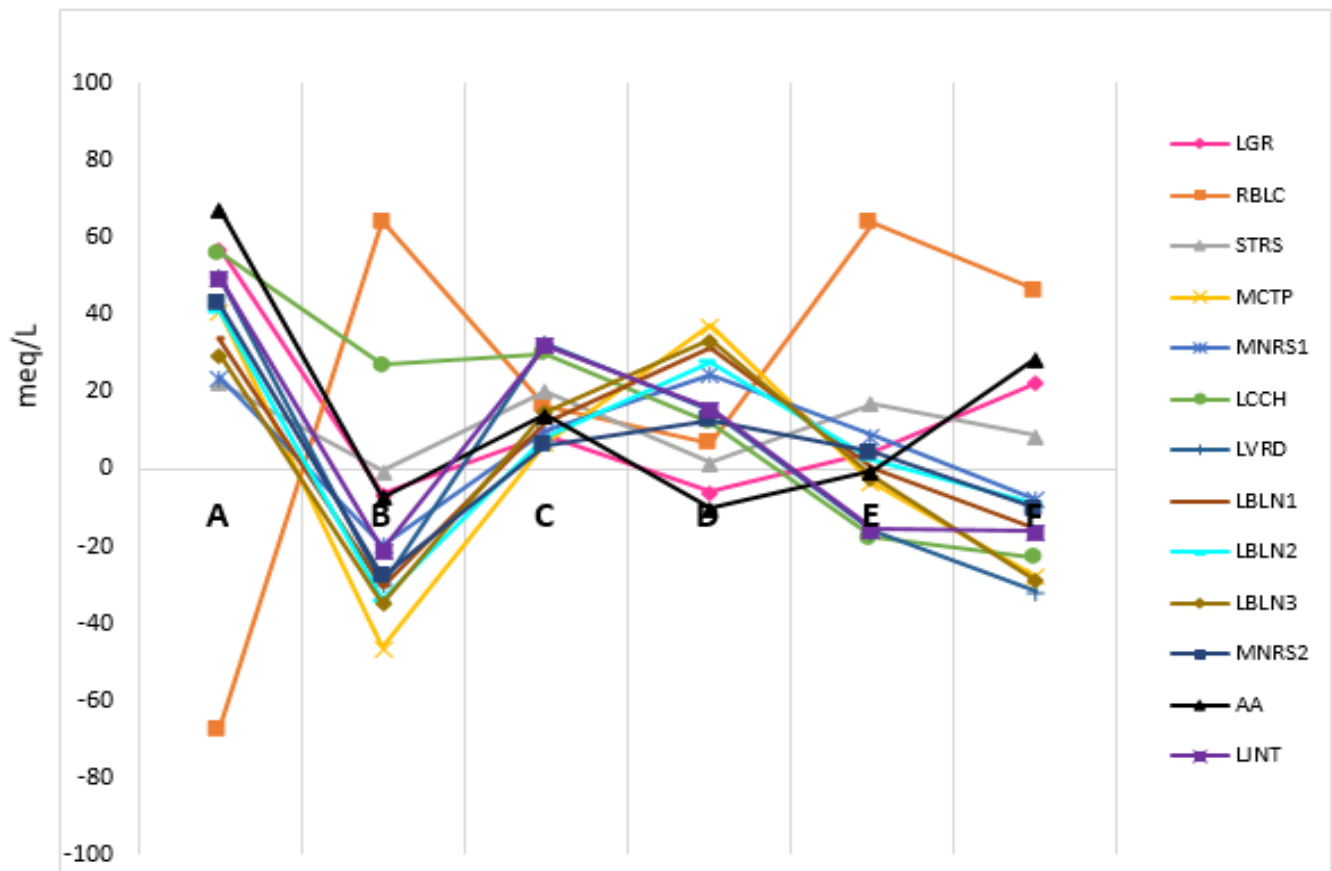


Figura 22. Diagrama de D'Amore & Panichi para las aguas del sur del volcán Mombacho

Conclusiones

Geología

La configuración geológica del área comprende depósitos Cuaternarios y recientes de Caldera de Apoyo representados por piroclastos de caída y depósitos del volcán Mombacho, representado por lavas que van desde andesíticos hasta basálticos.

La distribución de Apoyo está restringida al sector Oeste del área, en cambio Mombacho predomina, abarcando NE, N, S Y SO del área en investigación.

El arreglo estructural revela una serie de estructuras geológicas las cuales he señalado como lineamientos, esto debido a que no presentan expresión superficial, habiendo definido dos direcciones preferenciales para estos, una NE-SO y la otra N-S.; Siendo el lineamiento NE-SO Lagunas de Mecatepe el de mayor interés debido a que una serie de manantiales afloran a lo largo del borde N de esta estructura.

Geoquímica

Las manifestaciones termales están concentradas en el sector sureste del área de investigación, siendo representada por una serie de manantiales cuyas temperaturas más representativas son del orden de los 60°C, excepto por una descarga de 78°, la cual es la temperatura mayor registrada en el sector.

La mayoría de los sitios muestreados tienen un pH ligeramente ácido (5.7 a 6.45).

La clasificación obtenida a través de Piper nos genera tres grupos de agua, bien definidos las cuales en general presentan características de aguas de tipo geotérmico, sin embargo, se puede apreciar una mezcla de aguas superficiales con aguas más profundas (geotérmicas) bien marcada en las aguas

De acuerdo a las características químicas, el agua de los manantiales es probablemente calentada por vapor y/o gases relacionados con fumarolas.

Por otra parte, los resultados del diagrama D'Amore & Panichi, evidencian a estas aguas como aguas típicas de circulación de reservorio sedimentario (evaporitas y/o carbonitas). Por lo que se infiere que la circulación de las mismas es profunda. Tomando en cuenta la geología regional que afecta el área, estas aguas podrían estar en contacto con formación Brito (¿).

Se estima la temperatura de reserva del orden de los 160°C – 280°C.

Recomendaciones

Los aportes de las investigaciones geocientíficas en el desarrollo de la explotación de recursos geotérmicos es de suma importancia para el país, por lo cual:

Es necesario continuar investigando el área, haciendo énfasis en la caracterización hidrotermal a la que han sido sometidas las rocas alteradas, a fin de conocer la evolución de la alteración, entre los cuales se pueden llevar a cabo estudios de difracción de rayos X para muestras de rocas.

La geoquímica es perceptible a cambios, especialmente debido a que los fluidos viajan a través de fracturas, fallas, entre otras estructuras, en este recorrido van arrastrando consigo diferentes elementos, por lo cual un monitoreo de las condiciones químicas de las manifestaciones es menester para el conocimiento de del estado del recurso geotérmico.

Algunos manantiales presentan emanación de gases, los cuales podrían aportar mayor información acerca del origen de los fluidos.

La aplicación de métodos geofísicos en el área podría revelar y/o aseverar un complejo estructural de suma importancia que puede estar favoreciendo al desarrollo del sistema geotérmico.

Bibliografía

Agencia Internacional de Energía Atómica, AIEA, (2001). *Resumen Ejecutivo. Proyecto Regional de Transferencia de Tecnología para el Desarrollo de la Energía Geotérmica y su Manejo Ambiental.* Managua, Nicaragua: ENEL.

Avellán, D., (2004). *Estudio de la parte Norte del volcán Mombacho y las Isletas e Granada.* Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.

Comisión Nacional de Energía, (2001). *Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua. Volumen X. Evaluación del área de Masaya-Granada-Nandaime.* Managua. Nicaragua: CNE.

Charles DeMets, (2001) *A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central America volcanic arc.* Geophysical research letters. Vol. 0, No. 0, Pages 0-0, MO, 2001

Dengo, G., Otto Buhnenberger & Samuel Bonis, (1970). *Tectonics and volcanism along the Pacific Marginal Zone of Central America.* Springer – Verlag, Vol. 59, pp 1215-1232.

Dengo, G., y Case, J., (1990). *The geology of North America. The Caribbean Region.* Vol. H. Colorado.

Elming, S., Widenfalk, L., & Rodríguez, D., (1998). *Investigación científica en Nicaragua.* Proyecto conjunto Suecia-Nicaragua. Luleä.

ELC-ELECTROCONSULT, (1982). *Estudio de Pre-Factibilidad del Área Geotérmica Masaya-Granada-Nandaime.* Managua, Nicaragua: Instituto Nicaraguense de Energía.

Empresa Nicaraguense de Electricidad, ENEL, (2001). *Informe geoquímico preliminar de las áreas de prospección geotérmica: Mombacho-Tipitapa.* Managua, Nicaragua: ENEL.

Frischbutter, A., (2002). *Structure of the Managua Graben, Nicaragua, from remote sensing images.* Geofísica Internacional, Vol. 4, N° 002, p. 87-102.

Fundación Cocibolca, (2006). *Plan de Manejo de la Reserva Natural Volcán Mombacho.*

Fundación Nicaragüense para el desarrollo sostenible, FUNDENIC-SOS, (2013). *Áreas Protegidas de Nicaragua. Primer Tomo, Región Pacífico.*

F. D'Amore et al., (1983) *Algunas observaciones en la clasificación química de aguas subterráneas.* Instituto internacional para los recursos geotérmicos, Pisa, Italia.

Gorrell, HA, (1958) *Clasificación de aguas basados en contenido de cloruro de sodio.* Asociación Americana Petrolera. Boletín Geológico 42: 1-275

Hodgson, G. V., (2000). *Geología Regional: Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua.* Managua, Nicaragua.

Hradecký, P., (1987). *Geología del volcán Mombacho y sus alrededores.* Archivo de INETER, Managua, Nicaragua.

Hradecký, P., (1998). *Estudio geológico para reconocimiento de riesgo natural y vulnerabilidad en el área de Masaya y Granada.* Archivo de INETER, Managua, Nicaragua.

IECO-LAHMEYER, (1980). *Plan Maestro de Desarrollo Eléctrico 1977-2000 Nicaragua.* Managua, Nicaragua: Instituto Nicaragüense de Energía (INE).

Iceland Geosurvey, ÍSOR, (2008). *"Basics of geothermal reservoir physics".* ICEIDA program. Managua.

Instituto Geológico y Minero de España, (1985). *"Análisis metodológico de las técnicas geoquímicas empleadas en prospección geotérmica".*

K. Garofalo et al., (2007) *Gases fumarólicos de volcán Mombacho (Nicaragua); presencia de especies de gases magmáticos y la implicación para la vigilancia volcánica.* Springer-Verlag, 69:785-705.

Luigui Marini (2000) *Técnicas geoquímicas para exploración y explotación de energía geotérmica.* Universidad de Genova, Genova Italia.

McBirney & Williams., (1964). *The origin of the Nicaraguan Depression.* Springer – Verlag. Vol. 27, Issue 1, p. 63

McBirney & Williams, (1965). *Volcanic History of Nicaragua.* Berkeley, University of California Press.

Ministerio de Energías y Minas, MEM, (2009). *Perspectivas geotérmicas de la Laguna de Apoyo y el Volcán Mombacho.*

Ministerio de Educación, La Habana, Cuba, (1981). *Levantamiento geológico.*

M. J. Carr et al. (2013) *Vulcanismo y geoquímica en Centro America: Progreso y problemas.* National Science Foundations Margin Programs.

Nathan D. Stansell, (2013). *Radiocarbon ages for the timing of debris avalanches at Mombacho volcano Nicaragua.* Springer-Verlag, 75:686

Organización Latinoamericana de Energía. (1981). *Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Nicaragua.* Managua, Nicaragua: OLADE.

Peter C. La Femina, (2002). *Bookshelf faulting in Nicaragua.* University of Miami, Miami, Florida, 33149, USA.

Pilato, M., (2004) *Estudio Geológico con Énfasis en Peligrosidad por Inestabilidad de Laderas del Volcán Mombacho.* Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.

Shea, T., van Wyk de Vries, B., & Pilato, M. (2008). *Emplacement mechanisms of contrasting debris avalanches at Volcán Mombacho (Nicaragua), provided by structural and facies analysis.* Springer-Verlag, 899-921.

Servicio Geologico Checo, INETER. (2005). *Investigacion geologica de los riesgos naturales en Nicaragua y en tros pises de America Central.*

Tom Powell et al. (2010) *Hojas de cálculo para geotermia, geoquimica de aguas y de vapor.* Trijecimo-quinta edición del Programa de Geotermia en Ingenieria de Reservorio Geotérmico. Universidad de Stanford, California.

Tupack Obando (2008) Análisis geológico del área Masaya-Granada.

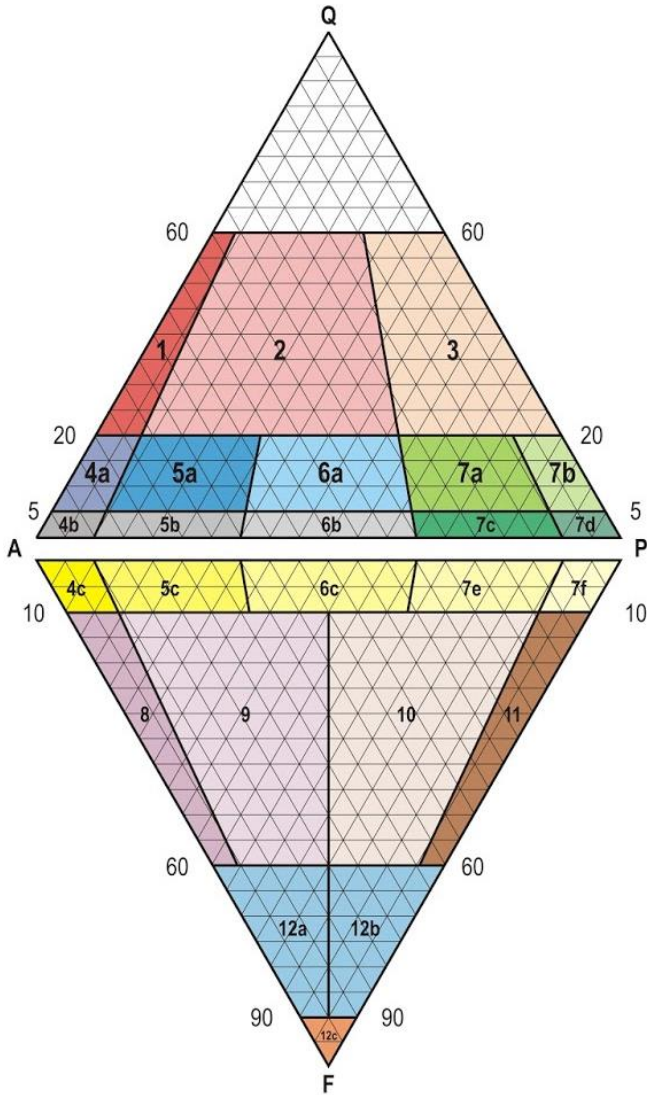
T.W Donnelly, G.S Horne et al., (1990) *Northern Central America; The Maya and Chortis Blocks*. Vol. H. The Caribbean Region. The Geological Society of America.

Giggenbach, W.F, (1988) Equilibrio de solutos geotérmicos derivados de Na-K-Ca como geoindicadores. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765

Giggenbach, W.F, (1991) *Técnicas químicas para exploración geotérmica. Aplicación de geoquímica en reservorios geotérmicos*. Rome, 119-145

Anexos

Anexo. 1 Diagrama de Streckeisen (QAPF)



Clasificación de las rocas ígneas volcánicas	
Según Streckeisen (1979)	
M menor de 90%	Q: Cuarzo
M = 100 - (Q + A + P + F)	A: Feldespato potásico ó feldespato alcalino
	P: Feldespato sódico (Plagioclasa)
	F: Feldespatoide
	M: Minerales máficos
1: Riolita de feldespato alcalino	8: Fonolita
2: Riolita	9: Fonolita tefrítica
3: Dacita	10: Tefrita fonolítica (Basanita si OI es mayor de 10%)
4: Traquitas de feldespato alcalino	11: Tefrita (Basanita si OI es mayor de 10%)
4a: Cuarzo - traquita de feldespato alcalino	12: Foidita
4b: Traquita de feldespato alcalino	12a: Foidita fonolítica
4c: Traquita de feldespato alcalino con feldespatoides	12b: Foidita tefrítica
5: Traquitas	12c: Foidita
5a: Cuarzo - traquita	
5b: Traquita	
5c: Traquita con feldespatoides	
6: Lacitas ó Latitas	Si M es mayor de 90%: Ultramafita
6a: Cuarzo - lacita	
6b: Lacita	
6c: Lacita con feldespatoides	
7: Andesitas y Basaltos (M mayor a 35%)	
7a: Andesita calcoalcalina	
7b: Basalto toleítico	
7c: Mugearita	
7d: Basalto calcoalcalino rico en Al	
7e: Mugearita	
7f: Basalto alcalino y Hawaiita	

Anexo. 2. Clasificación geomorfológica para mapeo a semi-detalle según método Holandés, ITC (Zuidam, 1975).

Mapeo de unidades de origen denudacional (D)		
Código	Unidad	Características generales
D1	Colinas y laderas denudacionales	Laderas suaves a moderadamente inclinadas/onduladas. Topografía moderadamente disectada.
D2	Colinas y laderas denudacionales	Topografía montañosa con inclinación moderadamente empinada o pendiente pronunciada. Moderadamente a severamente disecado
D3	Colinas y montañas	Topografía montañosa con pendiente escarpada a muy empinada. Moderadamente a severamente disecado
D4	Colinas residuales/inselberg	Colinas empinadas a muy empinadas. Moderadamente disecado. Bornhardts de forma redonda, escarpada, irregular con o sin cubiertas del bloque; cúmulos de rocas de tamaño grande
D5	Penillanura	Casi plana, ondulada a ondulada, ligeramente disectada.
D6	Meseta	Casi plana, ondulada a ondulada, ligeramente a moderadamente disectada.
D7	Pies de talud	Pendientes relativamente cortas, casi horizontales. Casi plana ondulada, topografía. No muy disecado
D8	Pie de monte	Suavemente a moderadamente inclinada ondulante a topografía ondulante en los pies o zona montañosas. Moderadamente disecado.
D9	Escarpe	Pendientes empinadas a pendientes muy empinadas. Moderadamente a severamente disecado
D10	Coluvial con pendiente	Ligeras a moderadamente disecadas.
D11	Áreas con severos movimientos de tierra	Topografía Irregular, con pendientes moderadas a abruptas. Moderadamente disecados (deslizamientos, hundimientos y flujos)
D12	Tierras malas	Topografía escarpada a muy empinada. Severamente disecados (con cuchillo, con cresta redonda y tipos de satélite)

Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

Unidades estructurales de origen denudacional estructural (S)		
Código	Unidad	Características generales
S1	Topografía ondulada con sistema de drenaje predominantemente relacionado con patrones de articulación, falla o esquistosidad	Suavemente a moderadamente inclinado. Moderadamente disecado
S2	Ondulante a la cresta rodante y la topografía de la cuenca con sistema de drenaje predominantemente relacionado con afloramiento de rocas encaladas	Suavemente a moderadamente empinada. Topografía con patrón lineal
S3	Topografía montañosa con (Sistemas de drenaje predominantemente relacionados con patrones de articulación, falla o esquistosidad)	Moderadamente empinada. Moderadamente a severamente disecado
S4	Mesas / mesetas estructuralmente controladas	De plano a ondulado topografía, cerca de horizontal a suavemente inclinada en la meseta y con pendiente pronunciada y en las zonas escarpadas.
S5		
S6	Cuesta	Pendientes inclinadas suavemente inclinadas y empinadas pendientes frontales. Ligeramente a moderadamente disecado
S7	Montañas escarpada y	Moderadamente a pendientes de pendiente pronunciada. Moderadamente disecado
S8	Terrazas estructurales denudacionales	Suave a pendientes moderadamente empinadas. Ligeramente a moderadamente disecado
S9	Crestas sinclinales y anticlinales, nariz y zonas de flexión	Moderadamente a pendientes de pendiente pronunciada. Moderadamente disecado
S10	Domos/colinas residuales	Moderadamente a empinadas colinas. Moderadamente disecado
S11	Diques	Moderadamente a los bordes muy inclinados. Moderadamente disecado
S12	Escarpa de fallas y escarpes de líneas de falla.	Moderadamente a muy empinadas. Moderadamente a severamente disecado.
S13	Graben	Suavemente a pendientes moderadamente empinadas / ondulantes a la topografía ondulada. Ligeramente disecado.
S14	Horst	Pendientes moderadamente empinadas / ondulantes a topografía montañosa. Ligeramente a moderadamente disecado

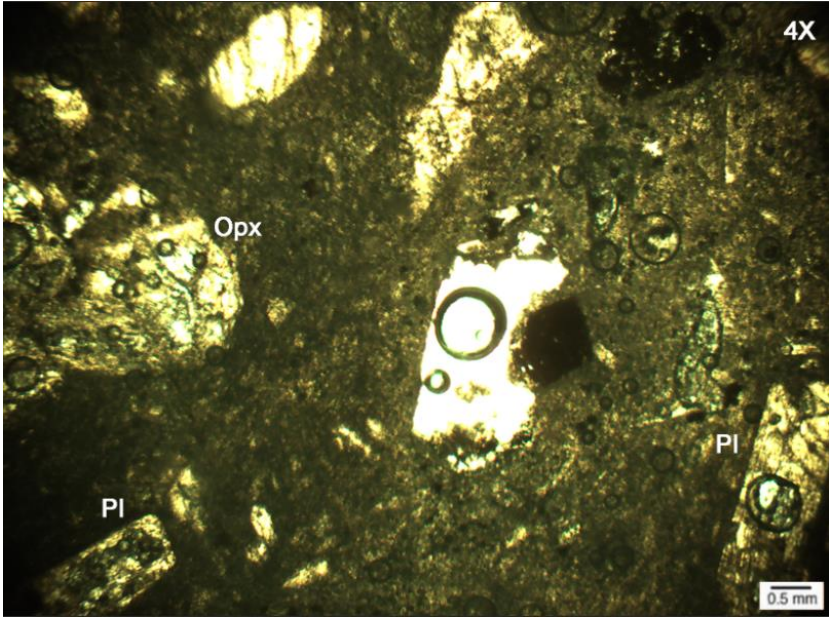
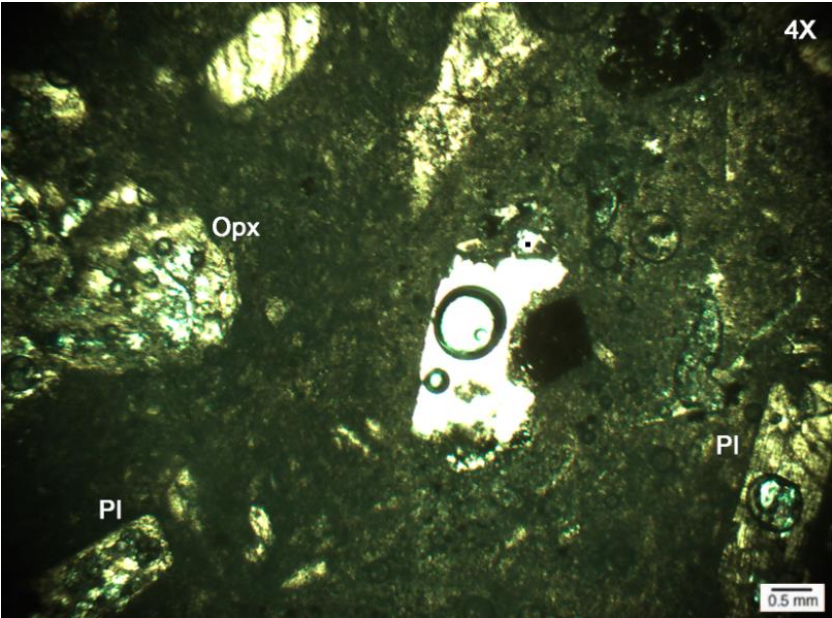
Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

Unidades de origen volcánico (V)		
Código	Unidad	Características generales
V1	Cráter volcánico / cráter de explosión / maar	Planos a depresiones cóncavas de pendiente pronunciada con paredes empinadas a muy empinadas. Moderadamente disecado
V2	Conos volcánicos (cenizas, cenizas y / o conos de salpicaduras)	Empinadas a muy empinadas colinas. Muy empinadas, las laderas del volcán superior. Pistas empinadas, medias e inferiores del volcán. Ligeramente a moderadamente disecado.
V3	Conos volcánicos (cenizas, cenizas y / o conos de salpicaduras)	Empinadas a muy empinadas colinas. Pendiente muy empinada del volcán superior. Pendiente empinada medio e inferior del volcán. Muy disecado
V4	Conos de estratovolcanes / superior; Y las laderas del volcán medio	Empinadas a muy empinadas colinas. Ligeramente a disecado moderadamente
V5	Conos de estratovolcanes / superior; Y las laderas del volcán medio	Empinadas a muy empinadas colinas. Ligeramente a disecado severamente.
V6	Volcán PIEDEMONTE / bajar las laderas del volcán	Pendientes suaves a moderadas. Ligeramente a moderadamente disecado. Adosadas y no terrazas
V7	Volcán PIEDEMONTE / bajar las laderas del volcán	Suave a pendientes moderadamente empinadas. Severamente disecado (partes terrazas y no terrazas)
V8	Solfataras y zonas de fumarolas	Suavemente a pendientes moderadamente empinadas. Ligeramente disecado
V9	Fluidos de lava / flujos / llanuras / mesetas	Suavemente a moderadamente inclinada, ondulante a la topografía ondulada. Ligeramente a moderadamente disecado
V10	Cenizas / lapilli campos / llanuras	Suavemente a moderadamente inclinada, ondulante a la topografía ondulada. Moderadamente disecado
V11	Lahar campo / corrientes / crestas laderas	Suavemente a moderadamente inclinada, ondulante a la topografía ondulada. Ligeramente a moderadamente disecado
V12	Entre planicies volcánicas	Suavemente inclinada, topografía ondulante. Ligeramente a moderadamente disecado; Básicamente sujeto a inundaciones
V13	planes	Empinadas a pendientes muy empinadas similares a flatirons, frecuentemente moderada a severamente disecadas por barrancos o barrancos
V14	Colinas volcánicas denudacionales (volcanes erosionados y remanentes de caldera)	Moderadamente a pendientes pronunciadas. Moderadamente a severamente disecado
V15	Esqueletos / cuellos volcánicos / tapones	Moderadamente a muy empinada. Moderadamente a severamente disecado

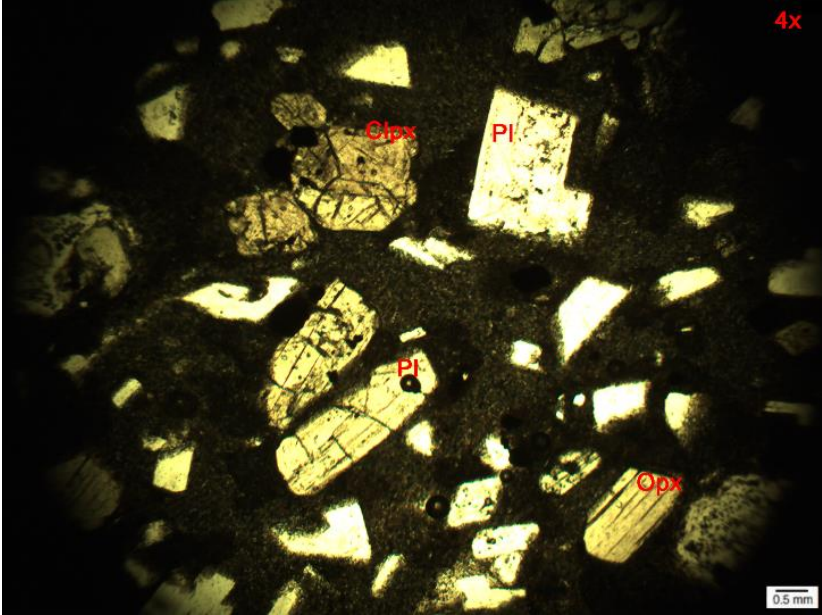
Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

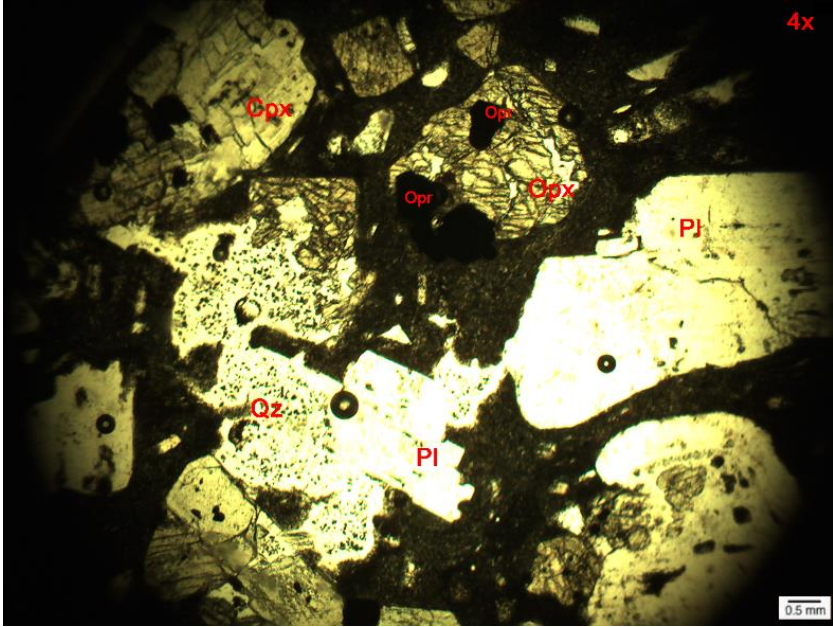
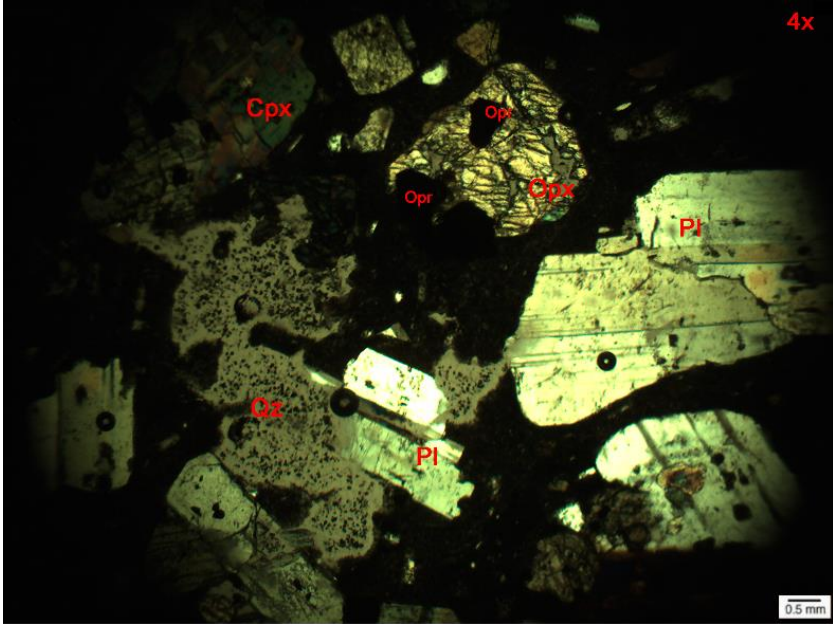
Unidades de origen fluvial (F)		
Código	Unidad	Características generales
F1	Camas de ríos	Casi plana, topografía irregular con cobertura de agua variable y con partes de erosión y acumulación
F2	Lagos y canales de ríos abandonados con agua	Cuerpos de agua
F3	Llanuras de inundación y canales de río abandonados inactivos sin agua	Casi plano, topografía ligeramente irregular, inundado estacionalmente; básicamente sujeta a sedimentación por acumulación fluvial
F4	Diques fluviales, crestas fluviales y zonas de puntos	Topografía suavemente inclinada, estacional / rara vez inundada, sujeto a la puesta en marcha por acumulación fluvial.
F5	Pantanos, cuencas aluviales y fondos antiguos del lago	Topografía plana a casi plana, estacionalmente inundada en raras ocasiones, sujeta a la acumulación lacustre fluvial (pantano: árbol, vegetación, pantano, vegetación arbustiva, tierras bajas: pantanos y pantanos cultivados)
F6	Terrazas aluviales	Topografía casi plana a suavemente inclinada. Ligeramente a moderadamente disecado
F7	Abanicos aluviales activos	Pendientes moderadamente suaves a moderadamente empinadas; Básicamente inundados regularmente y sujetos a sedimentación por acumulación fluvial.
F8	Abanicos aluviales inactivos	Laderas suavemente a moderadamente empinadas; Rara vez inundado a inundaciones y básicamente ligero a moderadamente disectada.
F9	Diques y crestas fluviales-deltaicas	Topografía casi plana, ligeramente irregular, sujeta a inundaciones y sedimentos causados por la acción fluvial, lacustre y marina
F10	Pantanos y cuencas fluvial-deltaico	Topografía plana a casi plana, regularmente a rara vez inundada, causada por acción fluvial, lacustre y la acción marina
F11	Deltas	Topografía casi plana, a veces escalonada, regularmente o raramente inundada

Anexo. 3. Descripción de secciones delgadas.

Muestra SVM#0002 Río Brujo – Las Colinas E 611089, N 1302628, 139 msnm	
Nicoles paralelos	
Nicoles cruzados	
Descripción	Nombre de la roca: Andesita De textura hipocristalina, los fenocristales predominantes son de tipo plagioclasa (Pl), clinopiroxeno (Cpx), ortopiroxeno (Opx) y algunos minerales oscuros. Siendo la plagioclasa el mineral predominante, en algunas plagioclasa se puede observar seriecita. La matriz ha sido alterada. En general la muestra ha sido fuertemente alterada, de coloración gris.

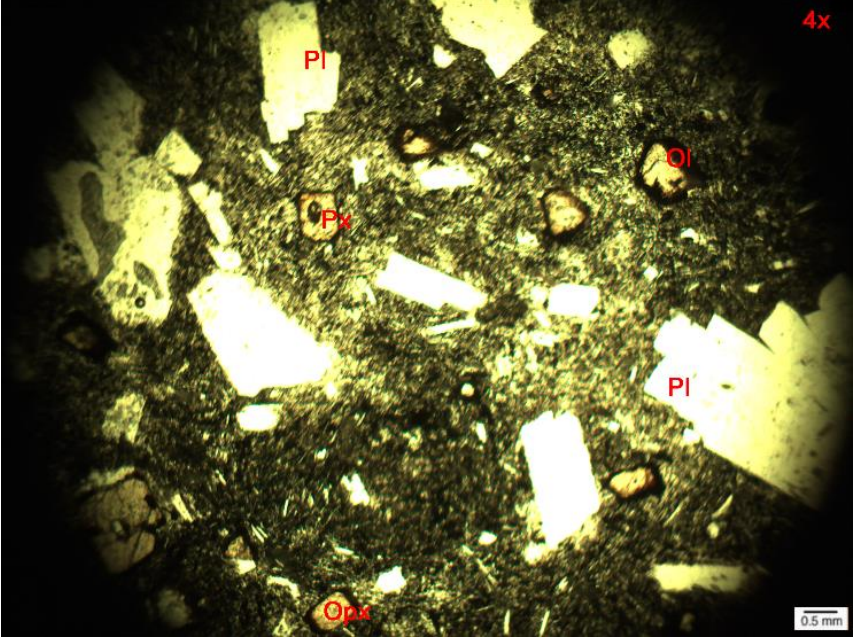
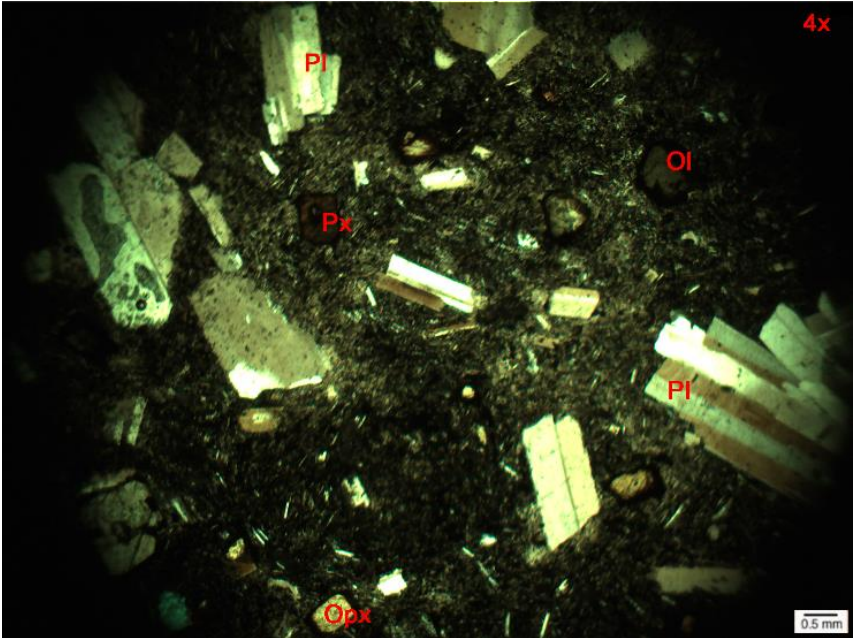
Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

Muestra SVM#0045 Santa Elisa E 610090, N 1302376, 139 msnm	
Nicoles paralelos	
Nicoles cruzados	
Descripción	<p>Nombre de la roca: Andesita</p> <p>De textura hipocristalina, los fenocristales predominantes son de tipo plagioclasa (Pl), clinopiroxeno (Cpx), ortopiroxeno (Opx), anfíboles, Cuarzo (QZ) en menor proporción y minerales opacos. La plagioclasa el mineral predominante, estas presentan zonaciones indicando el desarrollo de las mismas antes la presencia de diferentes fluidos. La matriz está compuesta por vidrio y pequeños fragmentos de plagioclasas, la muestra se presenta sana, sin alteración.</p>

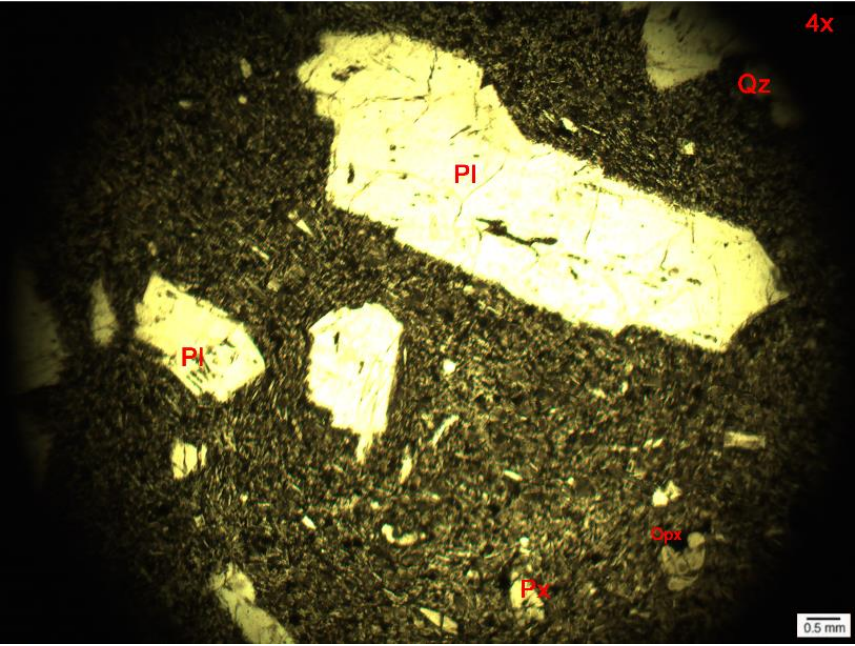
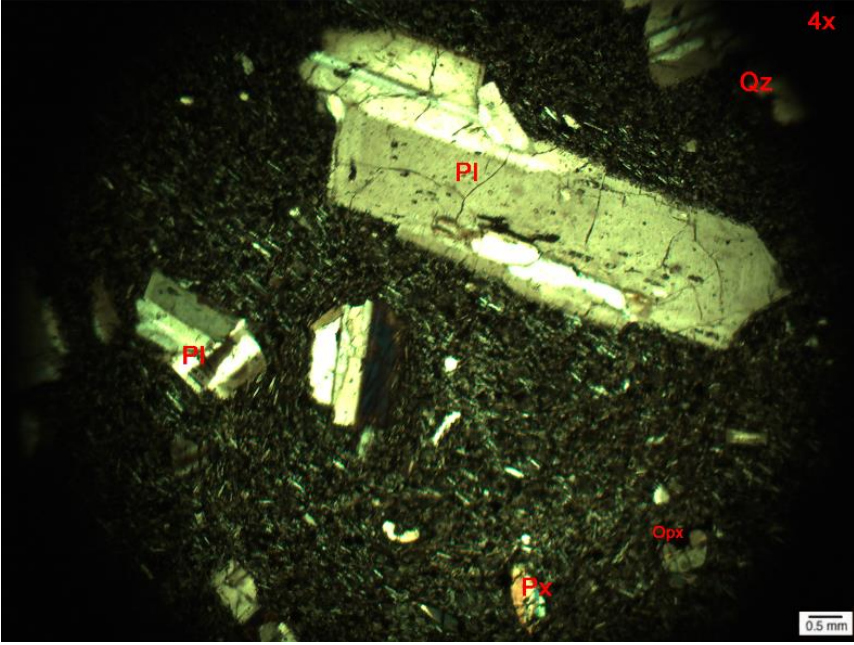
Muestra SVM#0027	
Guachipilín	
E 615115, N 1297538, 139 msnm	
Nicoles paralelos	
Nicoles cruzados	
Descripción	Nombre de la roca: Andesita De textura hipocristalina, los fenocristales predominantes son de tipo plagioclasa (Pl), ortopiroxeno (Opx), Cuarzo (QZ) Y minerales opacos. La plagioclasa el mineral predominante, en algunas plagioclasa se puede observar seriecita. La matriz está compuesta por vidrio y pequeños fragmentos de plagioclasas, la muestra se presenta sana, sin alteración.

Muestra SVM#0044 Aguas Agrias E 611856, N 1302780, 139 msnm	
Nicos paralelos	
Nicos cruzados	
Descripción	<p>Nombre de la roca: Andesita</p> <p>De textura hipocristalina, los fenocristales predominantes son de tipo plagioclasa (Pl), ortopiroxeno (Opx), cuarzo (Qz) y minerales opacos. Las plagioclasas son el mineral predominante, en algunas plagioclasas se puede observar sericita. La matriz está compuesta por vidrio y pequeños fragmentos de plagioclasa, la muestra se presenta relativamente sana.</p>

Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.


Muestra SVM#00358 Guachipilín E 610112 , N 1300434, 139 msnm	
Nicoles paralelos	
Nicoles cruzados	
Descripción	Nombre de la roca: Andesita-basáltica De textura hipocristalina, los fenocristales predominante son de tipo plagioclasa (Pl), ortopiroxeno (Opx), clinopiroxenos Olivino (Ol) y minerales opacos. La matriz está compuesta por vidrio y pequeños fragmentos de plagioclasas, la muestra se presenta sana, sin alteración.

Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

Muestra SVM#0022 Guachipilín E 612768, N 1300290, 53 msnm	
Nicoles paralelos	
Nicoles cruzados	
Descripción	Nombre de la roca: Andesita De textura hipocristalina, los fenocristales predominante son de tipo plagioclasa (PI), ortopiroxeno (Opx), cuarzo (Qz) y minerales opacos. La matriz está compuesta por vidrio y pequeños fragmentos de plagioclasas, la muestra se presenta sana, sin alteración

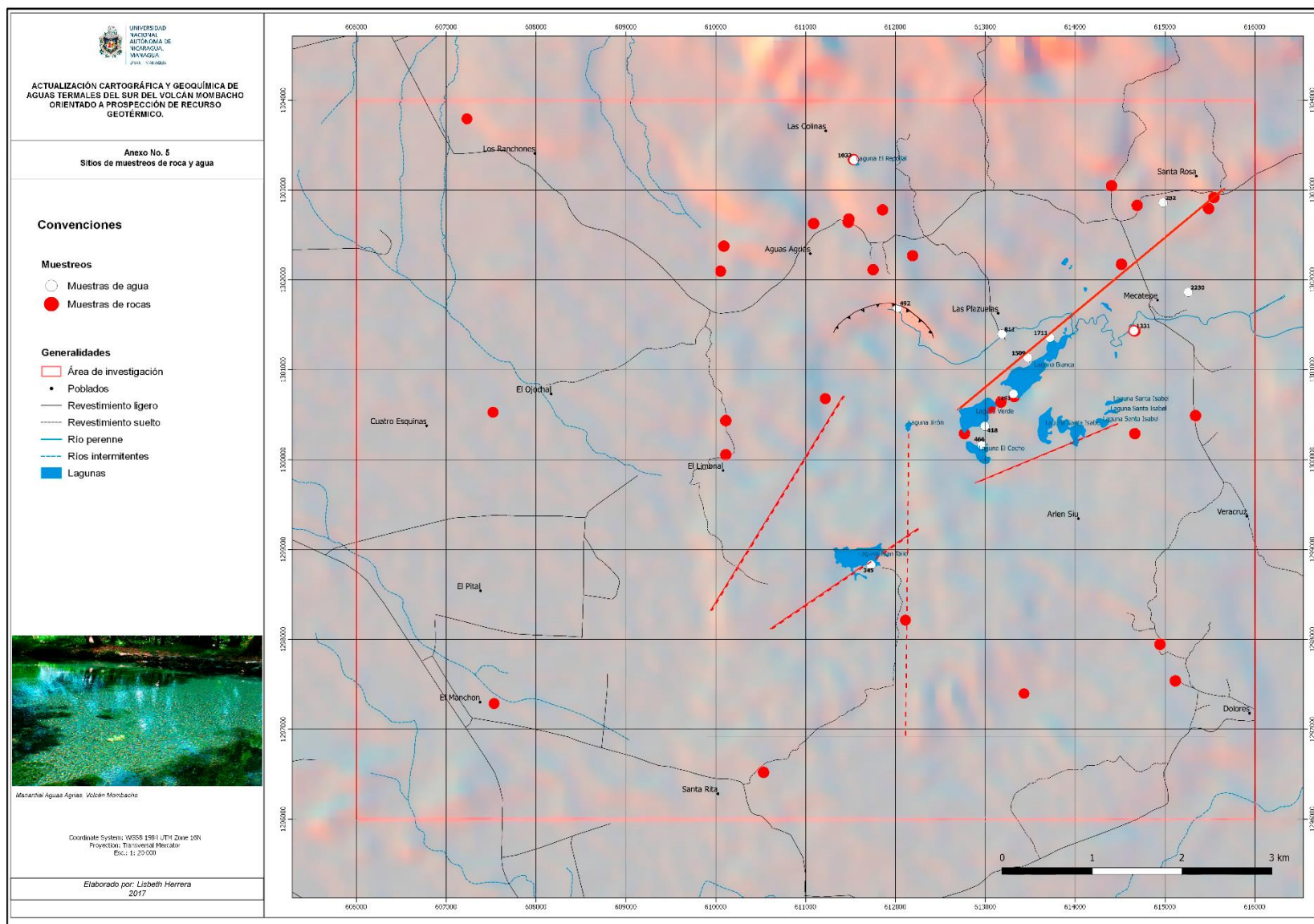
Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

Anexo. 4. Fichas de campo para muestreo geoquímico

	PROCEDIMIENTOS DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS		CÓDIGO :LG-PRT-09 EDICIÓN: 1 FECHA: 2013/02/27	
			Página 11 de 12	
MUESTREO, MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LAS MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE AGUA GEOTÉRMICA				
FORMATO PARA EL CONTROL DE TOMA DE MUESTRAS DE AGUA FCA – 22				
Fecha:		Hora:		Código de muestra:
Lugar de muestreo:		Departamento:		Municipio:
Coordenadas UTM N: E:		Elevación:		Punto de toma:
Matriz	Fuente			
Agua natural	Rio __ Lago __ Mar __ PE __ PP __ Manantial __ Lluvia __			
Agua residual	T. enfriamiento __ Agua tratada __ Domestica __			
Agua geotérmica	Agua separada __ Vapor condensado __ Mezcla __ Reinyección __			
PE: pozo excavado, PP: pozo perforado				
Parámetros medidos en campo				
T °C salida:				
pH:			T °C (pH)	
Conductividad (mS):			T °C (cond.)	
Muestras tomadas en el sitio				
Muestra para análisis de:	Cantidad de envases (und.)	Cantidad de muestra (ml)	Tipo de preservación	Tipo de almacenamiento
Amonio				
Aniones y físicos				
Cationes				
Carbonatos y bicarbonatos				
Silice total y monomérica				
Observaciones				

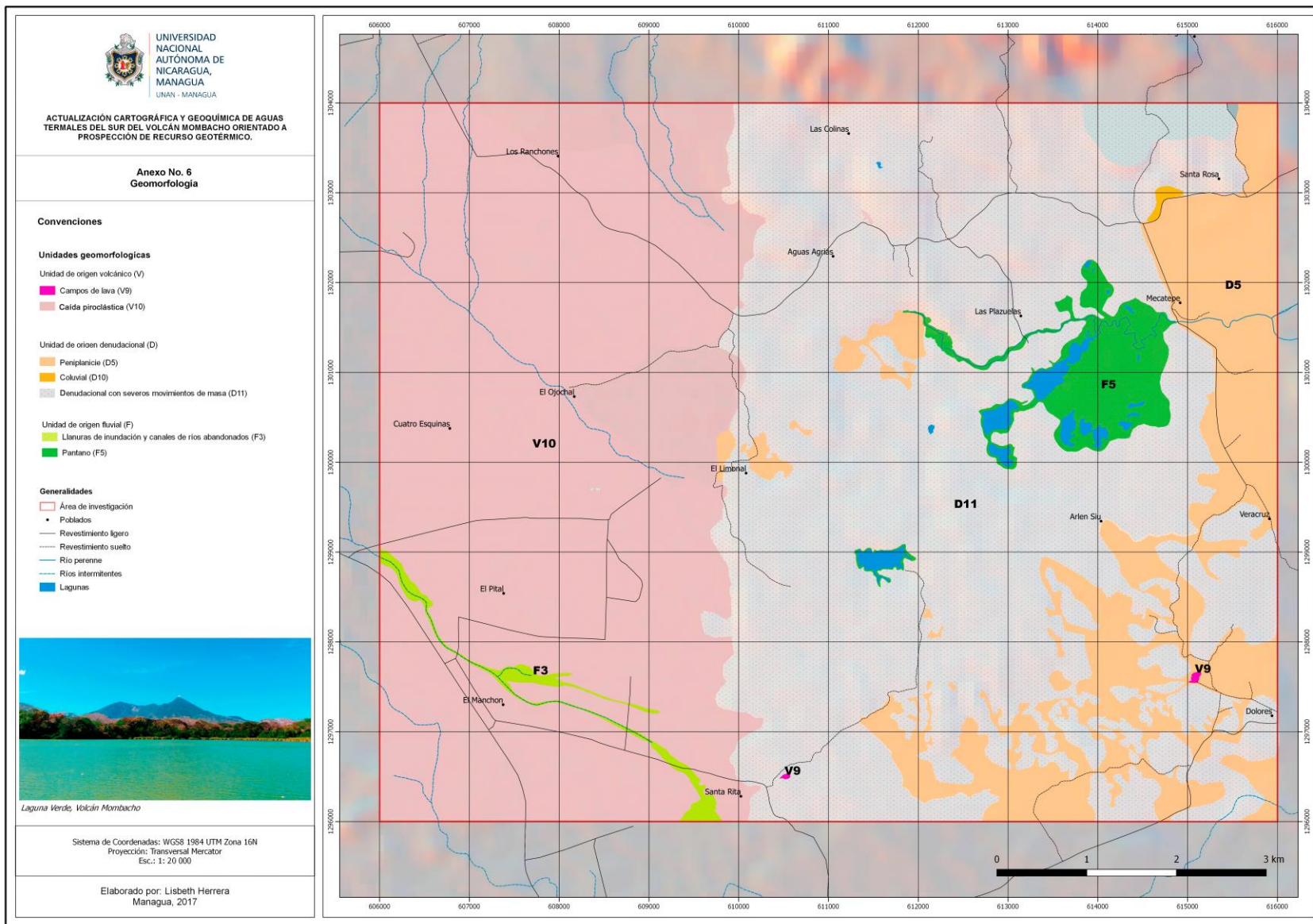
Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

Anexo. 5. Mapa de muestras de roca y agua.



Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

Anexo. 6. Mapa geomorfológico



Actualización cartográfica y geoquímica de aguas termales del sur del volcán Mombacho orientado a prospección de recurso geotérmico.

Anexo. 7. Mapa geológico.

