



**“INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA, HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA
SOBRE EL ORIGEN DEL ARSÉNICO EN LA ZONA DE CAÑAS-BAGACES Y
ALREDEDORES”.**



ELABORACIÓN:

COMISIÓN CIENTÍFICA ORIGEN ARSÉNICO

**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS
UNIDAD DE GESTIÓN AMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO
ÁREA FUNCIONAL DE HIDROGEOLOGÍA-AYA,
LABORATORIO NACIONAL AGUAS
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA (UCR),
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CONTAMINACIÓN AMBIENTAL (CICA-UCR),
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN -DIGH-SENARA.
DIRECCIÓN DE AGUA, MINAE**

DICIEMBRE, 2014

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Andrea Barrantes Acuña.
Geóloga/Ingeniera Civil,
Dirección de Agua-MINAE

M.Sc. Viviana Ramos Sánchez.
Geóloga-Hidrogeóloga
Directora de Área Funcional de Hidrogeología AyA.

Geól. Christian Corrales Díaz.
Geólogo
Área Funcional de Hidrogeología-AyA.

Geól. Mauricio Zúñiga Calderón.
Geólogo
Área Funcional de Hidrogeología-AyA.

Ing.Agr. Melvin Alpízar Marín.
Investigador del CICA-UCR

MSc. Ingrid Vargas Azofeifa.
Geóloga-Hidrogeóloga
Representante Escuela de Geología-UCR

Lic. Roberto Ramírez Chavarría
Geólogo-Ingeniero Civil
Unidad de Investigación del Recurso Hídrico-DIGH-
SENARA.

AGRADECIMIENTOS

Para la elaboración de la presente investigación se contó con la colaboración de diferentes personas e instituciones, las cuales de una u otra manera aportaron sus esfuerzos en el proceso de adquisición y procesamiento de los datos, trámites administrativos, interpretación de la información y el desarrollo final del informe. Se le agradece a:

- A la Administración Superior del AyA, SENARA, UCR y Dirección de Agua-MINAE
- Al Laboratorio Nacional de Aguas del AyA
- Área Rectora del Ministerio de Salud de Cañas y Bagaces
- A la UEN-Gestión Ambiental-AyA
- A la UEN-Investigación-AyA
- Dirección y personal técnico del Área Funcional de Estudios Básicos-AyA
- Dirección y personal técnico del Área Funcional de cuencas Hidrográficas-AyA
- Dirección de la Oficina Regional de Bagaces-AyA
- Dirección de la Oficina Regional de Cañas-AyA
- Escuela Centroamericana de Geología-UCR
- Dirección de Agua-MINAE
- Al Instituto Meteorológico Nacional
- A la Unidad de Investigación -DIGH-SENARA
- Al Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA-UCR)
- Personal técnico del Área Funcional de Hidrogeología
- Estudiantes de la Práctica Geológica 2013, ECG-UCR
- Estudiantes de la Práctica Geológica 2014, ECG-UCR
- Empresa HIDROTERRA LTDA.
- A la Dirección de Geología Minas-MINAE.
- A las diferentes Asadas y comunidades de Cañas, Bagaces y alrededores que facilitaron información, permisos de ingreso a propiedades, pozos, comentarios y acompañamiento en el trabajo de campo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Ubicación.....	2
1.2	Objetivo General.....	2
1.3	Objetivos Específicos	2
1.4	Justificación del Proyecto.....	3
1.5	Metodología.....	4
2	GEOLOGIA	6
2.1	Sedimentitas paleógenas (Miembro Zapotal de la Formación Barra Honda)	6
2.2	Grupo Aguacate.....	6
2.2.1	Lavas intraignimbríticas de Taboga	8
2.2.2	Lavas Higuérón	8
2.2.3	Subunidad de Basaltos Quebrada Leona.....	8
2.2.4	Subunidad de Brechas jabilla	8
2.2.5	Rocas Hidrotermalizadas del Cerro Pelado.....	10
2.3	Formación Bagaces.....	10
2.3.1	Flujos soldados de la Fm. Bagaces.....	13
2.3.1.1	Flujos soldados de Bagaces	13
2.3.1.2	Subunidad de Flujos soldados Río Santa Rosa	14
2.3.2	Flujos no soldados de Bagaces.....	15
2.3.2.1	Flujos Pumíticos no soldados de Bagaces	15
2.3.2.2	Flujos no soldados del río Magdalena.	16
2.3.2.3	Subunidad Pómez Sandillal	18
2.3.2.4	Subunidad Tobas de ceniza Sandillal	19
2.3.2.5	Subunidad de Flujos de Pómez Santa Rosa	20

2.3.2.6	Flujos pumíticos no soldados Montano	22
2.3.2.7	Depósitos fluviales antiguos	32
2.4	Formación Río Liberia	34
2.4.1	Flujo de Pómez con biotita y anfíboles.	36
2.5	Flujos Guayabo.....	38
2.5.1	Flujos Pumíticos no soldados Salitral	38
2.5.1.1	Subunidad Punta de Palo	39
2.5.2	Flujos Pumíticos no soldados Buena Vista	41
2.5.3	Flujos Pumíticos no soldados La Ese.....	41
2.6	Formación Monteverde.....	42
2.6.1	Subunidad andesitas Vergel	43
2.6.2	Subunidad de Andesitas Santa Rosa	44
2.6.3	Subunidad de Brechas Santa Rosa	46
2.6.4	Subunidad de andesitas Tovar.....	48
2.6.5	Subunidad andesitas Líbano.....	50
2.6.6	Basaltos y Andesíticas basálticas Alto el Zoncho	51
2.6.7	Subunidad Andesitas Pueblo Nuevo	54
2.6.7.1	Lahar Los Ángeles	57
2.6.8	Lahares Río Piedra	60
2.7	Lavas y piroclastos del Cerro Chopo.....	62
2.7.1	Lavas y Piroclásticos Basálticos del Corobicí.....	63
2.7.2	Unidad de Basaltos del Cerro Chopo	63
2.7.3	Subunidad Piroclastos Cerro Chopo	65
2.7.4	Subunidad piroclastos Quebrada Grande.	67

2.7.5	Piroclastos Mata de Caña	68
2.8	Lavas, piroclastos y debris del Volcán Tenorio	69
2.8.1	Lavas del cerro Espiritu Santo	69
2.8.2	Paleolavas-Neolavas del volcán Tenorio y piroclastos de río Chiquito.....	69
2.8.3	Debris del volcán Tenorio	70
2.8.4	Debris avalanche de La Fortuna.....	70
2.9	Depósitos Cuaternarios.....	70
2.10	Contexto estructural de la zona de estudio	71
3	CLIMATOLOGÍA	75
3.1	Datos climatológicos	75
3.2	Estaciones meteorológicas.....	76
3.3	Aforos Diferenciales.....	77
3.4	Pruebas de Infiltración.....	78
3.5	Clasificación de Suelos.....	81
3.6	Estimación de la recarga mediante balance hídrico de suelos.....	85
3.7	Estimación de la extracción de aguas subterráneas y superficiales.....	86
4	HIDROGEOLOGÍA.....	88
4.1	Características Hidrogeológicas.	88
4.2	Técnicas para detección de Arsénico en roca y suelo.	90
4.2.1	Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X (XRF):	90
4.2.1.1	Muestras de suelos	91
4.2.1.2	Sistema de irradiación y conteo	91
4.2.1.3	Análisis Cualitativo y Cuantitativo.....	92
4.2.2	Difracción de rayos “X” en roca pulverizada.....	92

4.2.3	Espectrofotómetro de Absorción Atómica.....	93
4.2.3.1	Parte experimental	93
4.2.4	Equipo Portátil de Fluorescencia de Rayos X.....	94
5	HIDROGEOQUÍMICA	96
5.1	Metodología para el muestreo y análisis de aguas	96
5.2	Resultados.....	102
5.2.1	Iones mayores.....	102
5.2.2	Arsénico en el agua	104
6	INVENTARIO DE POTENCIALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN	108
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

1 INTRODUCCIÓN

La Sala Constitucional en la resolución N° 2013-007598 de las 14:30 del 5 de junio de 2013, Expediente N° 13-004193-0007-CO, dispone lo siguiente:

“Se ordena a Daisy María Corrales Díaz y Javier Vargas Tencio, por su orden Ministra de Salud y Gerente General del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, o a quienes ocupen esos cargos, que de inmediato emitan las instrucciones requeridas y coordinen lo necesario para que en el plazo de seis meses, se determine científicamente la causa de la contaminación del agua para consumo humano con Arsénico en Guanacaste y la zona norte de Alajuela, para cuyo efecto deberán coordinar con el SENARA y las municipalidades afectadas, sin demérito de que participen otras entidades, como institutos universitarios de investigación...”

El 5 de setiembre 2013, se firma el “CONVENIO MARCO DE COOPERACIÓN ENTRE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA Y EL INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS, posteriormente y con el objetivo de trabajar en forma conjunta en el tema del Origen del Arsénico el diez de octubre del 2013 se firmó el “CONVENIO ESPECÍFICO DE COOPERACIÓN TÉCNICA ENTRE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA Y EL INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS”.

Seguidamente a la firma de estos convenios en octubre 2013, se crea la Comisión Científica Origen del Arsénico, en la cual participan además del AyA y la UCR, el MINAE y el SENARA, como entidades directamente vinculadas con la temática de interés. Esta comisión reúne las capacidades de la academia y de las instituciones, tanto en aspectos científicos, profesionales, logísticos, equipamiento y recursos financieros.

1.1 Ubicación

La zona de estudio se ubica en la parte Este de la provincia de Guanacaste, donde se definieron tres zonas de interés: “Zona de Cañas, Zona de Bagaces y Zona Intermedia”.

Las zonas de Cañas y Bagaces representan respectivamente 219,01 km² y 198,16 km², mientras la zona intermedia representa alrededor de 1140,5 km². La Fig.1, comprende el área total de la zona de estudio.

1.2 Objetivo General

- Determinar el origen del arsénico en el Agua Subterránea en la zona de Bagaces, Cañas y alrededores, con el fin de brindar herramientas científicas sólidas que permitan tomar decisiones en el abastecimiento de agua potable.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar el cartografiado geológico de la zona como insumo para establecer el modelo geológico conceptual de la zona.
- Calcular el balance hídrico de los acuíferos de la zona para conocer la recarga potencial.
- Definir las características hidráulicas de los acuíferos de la zona para definir el sistema de flujo regional.
- Definir las condiciones hidrogeoquímicas en el agua subterránea.
- Generar una gestión adecuada en relación al uso del agua subterránea en la zona de estudio.

1.4 Justificación del Proyecto

La calidad del agua potable es de suma importancia para la salud. El agua es esencial para la vida y todos deben disponer de un abastecimiento satisfactorio (suficiente, salubre y accesible).

El arsénico es una de las 10 sustancias químicas que el Organismo mundial de la Salud (OMS) considera más preocupantes para la salud pública, debido a los efectos por consumo o por exposición prolongada (Kabay, 2010). El arsénico es uno de los elementos químicos presentes en el agua de consumo humano que menos se ha estudiado en el país y que tiene importancia para la salud de la población a largo plazo. De acuerdo a la normativa nacional y mundial (OMS), el límite máximo admisible en aguas de consumo humano es de 0,01 mg/l.

En general, en América Latina la presencia del arsénico en el ambiente y específicamente en las fuentes de agua captadas para consumo humano se debe a factores naturales de origen geológico (Argentina, Chile, México, Perú) (Sancha; O`Ryan; Marchetti; Ferreccio, 1998), así como a actividades antropogénicas que involucran la explotación minera y refinación de metales por fundición (Bolivia, Chile y Perú), procesos electrolíticos de producción de metales de alta calidad como cadmio y zinc (Brasil), y en menor proporción en la agricultura el empleo de plaguicidas arsenicales orgánicos (México) (Cebrián; Albores; García-Vargas, 1994).

La presencia natural de arsénico en aguas superficiales y subterráneas de América Latina está asociada al vulcanismo terciario y cuaternario. El arsénico en las aguas superficiales y en las aguas subterráneas proviene de la disolución de minerales, la erosión y desintegración de rocas y por deposición atmosférica. También en forma mineral, aerosoles y en el agua se puede encontrar arsénico en sus formas trivalente y pentavalente, según las condiciones del medio. Con mayor frecuencia en el agua superficial predominan las formas oxidadas y en el agua subterránea sobre todo, en la más profunda, las formas reducidas (Cebrián; Albores; García-Vargas, 1994).

Dentro de las funciones del estado, la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos (acuíferos) es imprescindible para asegurar la correcta utilización de los mismos, disminuyendo los riesgos de déficit, deterioros en su calidad y otras implicaciones

ambientales negativas de diversa índole. En vista que se ha detectado arsénico en las aguas subterráneas de la región hace necesario conocer sobre el estado de las aguas subterráneas para la planificación del uso y conservación de dicho recurso. Con el presente estudio se busca generar investigación en los acuíferos para determinar el origen del arsénico en las aguas subterráneas en la zona de Bagaces, Cañas y alrededores.

1.5 Metodología

La metodología que se empleó durante la ejecución del trabajo consistió en:

- Revisión y recopilación de trabajos e investigaciones (Geología, hidrogeología, estructural, calidad de agua y datos meteorológicos) que se encuentran en diferentes instituciones SENARA, AyA, Escuela Centroamericana de Geología y otras.
- Ubicación de pozos y nacientes, además de la medición de niveles en pozos perforados en la zona de interés.
- Geología de campo y análisis estructural.
- Balances Hídricos a partir del método de Balance de humedad de suelos por Schosinsky (2006) y para el cálculo de la evapotranspiración potencial (E.T.P), mediante la metodología de Hargreaves y Samani (1985).
- Pruebas de infiltración con el método del doble anillo.
- Aforos diferenciales en los principales ríos de la zona para definir influencia y efluencia (En la zona de Cañas: Río Cacao-Magdalena, Río Santa Rosa, Río Cañas, En la zona de Bagaces: Río Blanco, Río Piedras, Río Paso Ancho, Río Estanque, Quebrada Cofradía).
- Muestreo geotécnico de suelos, distribuido en toda la zona de interés.
- Análisis de la calidad de las aguas subterráneas.

- Técnicas para la detección de Arsénico en rocas y suelos (Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X (portátil y en laboratorio), Difracción de rayos X en roca pulverizada y Absorción Atómica).
- Técnicas para la detección de Arsénico en aguas (determinación de arsénico total y otros elementos traza mediante la técnica de espectrometría de plasma inductivamente acoplado con un detector de masas (ICP-MS)).

2 GEOLOGIA

A continuación se procede a detallar las características geológicas de cada una de las unidades de roca definidas a partir de un mapeo de campo a escala detallada 1: 25000, sin embargo se presenta en la Fig. 2, a escala 1:50 000, por una presentación gráfica. Además la correlación litoestratigráfica regional se fundamentó en la bibliografía existente.

La descripción de las formaciones geológicas regionales y las subunidades de roca definidas en campo se realiza de la más antigua a la más reciente en edad. Los contactos entre cada formación y subunidad, además de la estratigrafía de todas las formaciones de rocas descritas en este apartado se muestran a continuación.

2.1 Sedimentitas paleógenas (Miembro Zapotal de la Formación Barra Honda)

Aiazzi et al (2004), describe estas rocas sedimentarias como el basamento de la zona de estudio, compuesto por areniscas y limolitas estratificadas en niveles delgados de tonos claros. Además se indica por parte de los autores la presencia de canales de erosión rellenos con sedimentos de granulometría mayor en los estratos de mayor espesor.

Aiazzi et al (2004), indica la presencia de estas rocas restringidas al sector de la fila Catalina de la hoja topográfica Cañas, escala 1: 50 000 del IGN, regionalmente se ubica en el sector suroeste de la zona de estudio (Fig. 2. Mapa Geológico de la zona de estudio).

2.2 Grupo Aguacate

Según lo menciona Kycl et al (2010), el Grupo Aguacate es parte del antiguo arco volcánico, compuesto principalmente por lavas basálticas (basalto-andesíticas), rocas piroclásticas, brechas, tobas y subordinado por sedimentos vulcano clásticos.

Está cortado por intrusiones de química variada, en algunas partes hay cuerpos subvolcánicos de riolitas, dacitas, andesitas y basaltos y en otros casos intrusiones más profundas como granitos, dioritas hasta gabros.

Para el Grupo Aguacate es también característica la presencia de una intensa alteración hidrotermal la que se manifiesta de diferentes tipos. Algunas están asociadas a intrusiones de composición ácida principalmente riolítica y otras asociadas a una alteración hidrotermal aurífera de carácter regional. Además esta última se caracteriza por la variedad multicolor que obtiene las rocas alteradas y por la presencia de vetas de cuarzo.

En la parte superior de la Formación Brechas La Unión se caracteriza por presentar en la base, brechas con clastos de hasta un metro de diámetro de color verde, y están sobreyacidas por brechas con partículas que alcanzan 0.25 m de color morado a rojizo, recubiertas por estratos delgados de tobas e ignimbritas blancas, el espesor de las brechas puede alcanzar 200 m (Kusmaul & Sprechmann, 1984)

Las Brechas volcánicas del Grupo Aguacate en su mayoría son de composición basalto-andesitas (“tipo Brecha La Unión”) se presentan con espesores variables, que se alternan con diferentes capas de lavas andesíticas (también de diferentes espesores) y tobas de lapilli. Su delimitación se dificulta debido a los pocos afloramientos que se presentan en la zona y por su composición petrográfica que es similar a las lavas basálticas y basalto-andesíticas de los alrededores. Los clastos tienen un tamaño de unos pocos milímetros hasta unos 70 cm, predominan los de 20 cm, son angulares y subangulares. En mayor cantidad se observan clastos pequeños de andesita porfídica, menos común son clastos de los diferentes tipos de tobas. La matriz de los aglomerados también es basalto-andesita recristalizada. La dureza depende del grado de alteración principalmente de la hidrotermal, los no alterados presentan mayor dureza y los alterados por ejemplo los que se encuentran en la mina de oro Bellavista o en los alrededores de la mina La Unión, son de dureza débil o frágil (Kycl et al, 2010).

Dentro de esta formación se encuentra una zona de alteración hidrotermal definida por el Laboratorio Nacional de Los Alamos Nuevo México (LANL; MIEM & ECG, 1987), dicha zona se extiende de forma continua desde Los Montes del Aguacate al oeste del Valle Central, hasta las estribaciones del Cerro Pelado ubicado al suroeste de la zona de estudio (Fig. 2).

2.2.1 Lavas intraignimbríticas de Taboga

Estas lavas corresponden con la base de la secuencia volcánica regional, Aiazzi et al (2004), indican que estas rocas se componen por fenodacitas hasta fenobasaltos, localmente prismáticos, en los alrededores de la Fila Nambiral se presentan buenos afloramientos asociados a estas rocas. A partir de dataciones radiométricas de Ar-Ar se estima una edad de $5,45 \pm 0,23$ Ma, correlacionándose con el Mioceno terminal (Aiazzi et al, 2004).

2.2.2 Lavas Higuero

Estas lavas forman parte de la base de la secuencia volcánica regional, esta unidad de lavas se compone de fenobasaltos y fenoandesitas intercaladas localmente con depósitos epiclásticos (Aiazzi et al, 2004). Regionalmente estas lavas se pueden correlacionar con algunos afloramientos de vulcanitas presentes en la cordillera de Tilarán.

2.2.3 Subunidad de Basaltos Quebrada Leona

Se tienen pocos datos de esta subunidad, pero dada su ubicación bajo las brechas Cerro Jabilla se pueden asociar al Grupo Aguacate, esto en la parte basal, dado que no se tienen muchos datos acerca de las relaciones con otras lavas cercanas. Sumadas a estas lavas se tienen otras aflorantes en las cercanías de la cima del cerro Mina las cuales se asocian a la formación Monteverde, pero por simplicidad y falta de datos en el área dadas las condiciones de caminos y abundante vegetación ambas subunidades se colocan en el mapa geológico como Basaltos Quebrada Leona sureste (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

2.2.4 Subunidad de Brechas jabilla

Cubre en su parte más oriental el Cerro Jabilla, y en su parte más occidental el Cerro Pan de Azúcar el cual se encuentra a 1 km sureste de la ciudad de Cañas. Buenos afloramientos se pueden encontrar en el cauce del río Cañas en el punto 268915 N, 424830 E, así como en la Quebrada Leona (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Presenta una geometría irregular, con contactos no visibles y algunas apófisis de composición andesítico augítica, estas se relacionan con la Formación Monteverde, que es de carácter fisural.

Los clastos son monomíticos de composición andesítico basáltica, en su mayoría sin alteración. Presentan una morfología angular a sub angular. Con tamaños máximos 1,5 a 2,0 m de diámetro y tamaños medios entre los 20 y 30 cm. La matriz se compone de una arena de color grisáceo claro, con fragmentos cristalinos (plagioclasa, piróboles) en una textura masiva (Foto 1). Su grado de soldamiento es intermedio. Los clastos se encuentran soportados por la matriz, con distribución caótica. Algunos pueden encontrarse con contactos puntuales y cóncavos, en un porcentaje de 20% del volumen. Por lo general su parte más expuesta presenta una desgasificación, con vacuolas de diámetro máximo de 1 cm y medio 0,5 cm (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

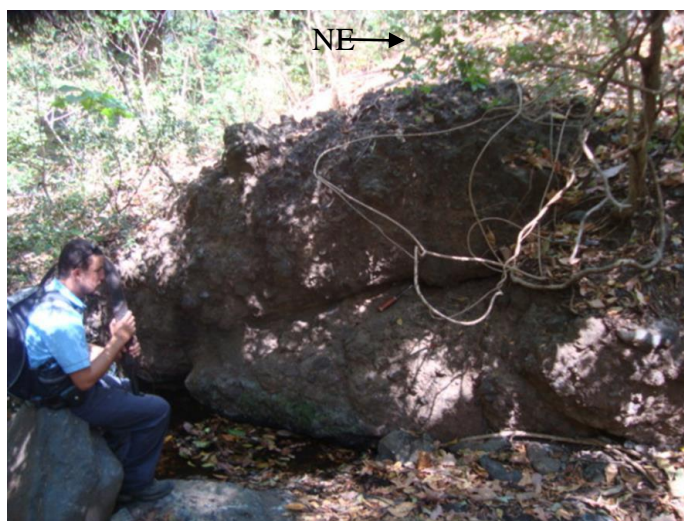


Foto 1. Rocas de la subunidad de brechas Cerro Jabilla.

Según Aiazzi (2004), al correlacionarlas con otras unidades aledañas sugiere una edad Plioceno Inferior, a su vez la relaciona con el Grupo Aguacate en su parte más occidental. Se considera su origen como flujos de bloques y cenizas, a partir de domos andesíticos relacionados con el vulcanismo del Cerro Pelado. Esta subunidad brechas cerro Jabilla se asocia según Aiazzi (2004) con las Brechas lávicas del Cerro Pelado-Paraíso.

2.2.5 Rocas Hidrotermalizadas del Cerro Pelado

Aiazzi (2004), menciona la falta de información acerca del origen del Cerro Pelado, y las dudas que existen acerca de si se trata de un domo, cuello o cono volcánico silicificado (Alteración hidrotermal) y profundamente disectado por la erosión y procesos gravitatorios. Estas mineralizaciones son típicas de las presentes en el Grupo Aguacate. La silicificación ha de ser más joven que las rocas que altera y posiblemente previa a las lavas Monteverde (Aiazzi, 2004).

2.3 *Formación Bagaces*

Fue definida primero por Dondoli (1950) como toba gris, y definida por Dengo (1962) como Formación Bagaces. La fuente de la Formación Bagaces es desconocida, esto debido a la ausencia de calderas que a menudo son relacionadas con el origen de volúmenes importantes de ignimbritas. (Andreas, 2005).

El espesor de la Formación Bagaces en el parque Nacional Santa Rosa es estimado en 500 m (Mainieri, 1976). Esta Formación es subdividida por Chiesa *et al* (1987) en tres unidades:

- Pre Carbonal
- Carbonal
- Post Carbonal

Pre-Carbonal

Corresponde con la toba más vieja dentro de la formación Bagaces. Se estima un espesor aproximado de 10 m. Presenta una distribución lateral y vertical difícil de predecir. Se clasifica con un grado de soldamiento incipiente. Presenta una matriz ligeramente compacta que contiene un sorteo pobre, el cual sugiere transporte. El color de la matriz es amarillo, la cual cambia y se vuelve más oscura desde la parte inferior a la parte superior.

El tamaño de los fragmentos de pómez es variable, en el fondo tienen una coloración amarilla y presentan una media de 0,7 cm y un máximo de 2,5 cm de diámetro, mientras los fragmentos grisáceos en la parte superior de la unidad, presentan una media de 1 cm y un

máximo de 10 cm. Contiene vesículas esferoidales con un diámetro de hasta 0,1 cm. Los líticos corresponden con el 5% del volumen total, los cuales son de composición riolítica, se presentan con una media de 0,5 cm y un tamaño máximo de 1 cm. (Andreas, 2005).

Carbonal

Con un espesor aproximado de 60 m. Contiene foliación en su base, y presenta un característico enfriamiento por contracción térmica en su parte intermedia. La roca es muy densa y es rica en cristales. No presenta características volcánicas, como fiammes pumíticos o fragmentos de vidrio. En su parte superior se convierte en brecha, con un espesor aparente de 1,5 m, rico en una zona de vesículas. Chiesa *et al.* (1987) asume que la unidad Carbonal puede ser una ignimbrita extremadamente soldada, que perdió todas sus evidencias morfológicas. Andreas (2005) considera que es más probable que la unidad Carbonal sea un flujo de lava, ya que la densidad en las columnas producto del enfriamiento es mucho mayor, a la que presenta una toba soldada. Vogel *et al.*, (2004) estima el porcentaje de silicio en alrededor del 65,7 al 68,9 vol %. Debido a la falta de edificios o calderas Andreas (2005) asume que la Formación Bagaces fue emplazada por una fuente que ha sido tapada por la actividad volcánica reciente como el Rincón de la Vieja.

Post-Carbonal

Conformada por 3 unidades.

1. Limbo

Limbo I: una ignimbrita con un espesor de 12 m, con un grado de soldamiento de incipiente a no soldada, con pómez, relativamente poco sorteada, con un color en la matriz gris oscuro en partes amarillento. La toba es muy rica en pómez, en un volumen del 50% al 70%. Las partes más alteradas presentan un color amarillento, 15% corresponde con una pómez gris, y 15% con una pómez negra. Presenta vesículas con un tamaño de 0-0,1 cm. La toba contiene menos del 5% de líticos con una media de 1,0 cm y un máximo de 2,0 cm de diámetro.

Limbo II: presenta un espesor de al menos 60 m, es un toba rica en cristales. La matriz es de color gris, con pómez amarillenta, con diámetros de los fiammes con una media de 2,0 cm y una máxima de 2,5 cm.

2. Poza Salada

Poza Salada I: ubicada en la base de poza salada, es una toba no soldada, con un espesor de 2,40 m. Corresponde con una pómez en un matriz de grano fino. Desde la base es de color amarillenta y se convierte a grisácea en la parte superior. Se divide en 5 capas, con una laminación parcial.

Poza Salada II: con un espesor de 1,50 m, arriba de la capa no soldada. Presenta una transición de color de un color grisáceo a un café grisáceo. También es no soldada, pero más consolidada que la capa inferior (Poza Salada I). Con un grano de tamaño grueso y más terroso. Con escasa pómez, y un alto contenido de líticos (20% vol) que presenta un tamaño máximo de 5,5-6 cm.

Poza Salada III: con un espesor de 7-9 m, corresponde con una toba de matriz gris a gris oscura, con fiammes negros. Se encuentra subdivida en capas, las capas más superiores son ricas en fiammes, con porcentajes del 30%, y tamaños medios de 4 cm y similares tamaños máximos. Presenta un porcentaje de líticos del 12%, con tamaños medios de 0,7 cm, máximos de 1,2 a 1,5 cm. Los líticos son muy diversos, contenidos en una matriz de vidrio con plagioclasa. Este vidrio es de composición dacítica.

Poza Salada IV: presenta un espesor de 5-6 m, con un grado de soldamiento incipiente a parcialmente soldado con pómez. La matriz es de color púrpura grisáceo con un alto contenido de pómez, con tamaños máximos de 8cm y medios de 8 cm. La pómez es de color grisácea, y presenta vesículas con tamaños máximos de 0,2 cm. Presenta plagioclasa con una abundancia del 2-15%, con tamaños máximos de 1 mm. El contenido de líticos disminuye desde las capas subyacentes, presenta una composición riódacítica.

3. Santa Rosa

Presenta un espesor aproximado mayor a los 12 m, con una matriz de color rojo grisáceo, en algunos afloramientos es gris a gris oscuro. El grado de soldamiento varía de soldada con fiammes a densamente soldada. Los fiammes se encuentran en un volumen de 5 al 20%, con tamaños medios de 0,8 cm en su base a 2 cm en su parte superior. Las vesículas presentan tamaños aproximados de 0,15 cm, partes compactas se encuentran ausentes. Los líticos presentan un gradación normal, con un volumen del 3 al 8%, en la base presentan tamaños medios de 1,1 cm y en la parte superior de 0,3 cm. los clastos son de composición dacítica (Andreas, 2005).

2.3.1 Flujos soldados de la Fm. Bagaces

Esta Formación se encuentra dividida en dos unidades:

2.3.1.1 Flujos soldados de Bagaces

Litoestratigráficamente esta subunidad es correlacionada con la subunidad Falconiana (Unidad Informal), definida en la Práctica geológica-AyA (2014), litológicamente esta subunidad consiste de tobas soldadas brechosas con fiammes de vidrio que contienen dentro fenocristales de plagioclasa, además de fragmentos de roca y pómez.

Esta toba brechosa sobreyace una toba de pómez de color gris a veces rosado que se encuentra en contacto lateral con depósitos epi-volcanoclásticos (Foto 2).

Bajo esta toba de pómez gris rosada y los depósitos epi-volcaniclásticos se encuentra una toba gris con líticos y plagioclasa (Fig. 3). Su espesor es de al menos 47 m (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).

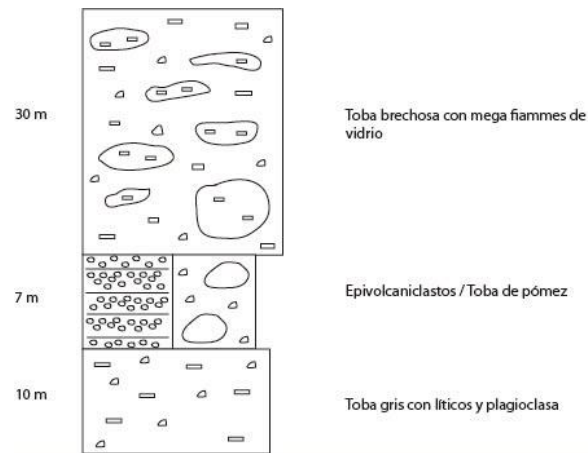


Fig. 3: Columna litoestratigráfica de la Subunidad Falconiana.



Foto 2. Afloramiento tipo Subunidad Falconiana.

2.3.1.2 Subunidad de Flujos soldados Río Santa Rosa

Durante la Práctica geológica-AyA (2013), se define la unidad informal Flujos soldados río Santa Rosa. Esta unidad aflora predominantemente en el cauce del río Santa Rosa en el sector de Cañas, Guanacaste (Foto 3); y presenta una gran extensión que comprende la parte media de la zona de estudio de Cañas y alrededores, y algunos afloramientos aislados cerca del río Magdalena donde la erosión y el posible fallamiento han expuesto las rocas.

Se encuentran buenos afloramientos en el cauce del río Santa Rosa donde se pueden distinguir varios tipos de ignimbritas los cuales varían en contenido de vidrio y clastos líticos así como fíamez. Los afloramientos en su mayoría se encuentran en buenas condiciones, poco alterados a excepción de algunos localizados en las cercanías de la quebrada Vergel (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).



Foto 3. Contacto de ignimbritas cafés con ignimbritas pumíceas.

2.3.2 Flujos no soldados de Bagaces

Estos flujos están divididos en dos subunidades que se describen a continuación:

2.3.2.1 Flujos Pumíticos no soldados de Bagaces

Consta de varias unidades de flujos de pómez caracterizados por diferentes contenidos de pómez y cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíboles y biotita. Sobreyacen localmente lavas del Grupo Aguacate y están subyacidos por depósitos epiclásticos y por lavas de Monteverde (Civelli *et al*, 2005).

Civelli *et al* (2005), indican además que cada uno de los flujos que componen la subunidad se encuentra definidos usualmente por paleosuelos que los separan y oleadas piroclásticas, y definen la subunidad denominada Flujos de Montano, en la cual indican espesores mínimos de 10 metros en la localidad con el mismo nombre en el sector de Bagaces, además mencionan la presencia de al menos 4 tipos diferentes de flujos.

Civelli *et al* (2005), limitan la extensión de estos flujos en un área aproximada a los 30 km², representando una facie distal (escaso espesor, abundancia de matriz de cenizas, líticos pequeños. Además se indica que este flujo presenta algunas afinidades con otros flujo denominado “flujo de Sandillal”, el cual se extiende hasta la ciudad de Cañas.

2.3.2.2 Flujos no soldados del río Magdalena.

Durante la Práctica geológica-AyA (2013), se detalló la presencia de flujos no soldados asociados a la Formación Bagaces, estos flujos presentan una amplia distribución en la parte NW de la zona de estudio en Cañas, en las cercanías del tajo Chopo en la coordenadas 271794 N / 418592E; amplios afloramientos en el río Magdalena, así como en el río Santa Rosa y zonas cercanas al poblado de Cañas aflorando principalmente en quebradas intermitentes.

Como localidad tipo se ubica el río Magdalena, esto dados a los importantes afloramientos en su cauce, tales afloramientos poseen alturas considerables de mínimo 20m en el punto 275035 N / 418140 E. En este mismo punto se ubican rasgos estructurales importantes que serán descritos más adelante en el capítulo de geología estructural, además en esta ubicación se observan buenas condiciones de los afloramientos pocos signos de alteración y litologías consistentes con las observadas en los demás afloramientos.

Son rocas poco consolidadas, con abundantes clastos de pómez con tamaños entre 2 y 5 mm de diámetro (e inclusive ocasionalmente más grandes), materia orgánica (troncos calcinados) en una matriz de ceniza fina de color morado pálido a rosado, muy porosa con pequeños fragmentos de líticos incluidos (tamaño menor a 1 mm) así como también bloques andesíticos de hasta 40 cm de diámetro.

Presenta coloraciones moradas-rosadas cuando sana y variando de tonos más claros e inclusive llegando a ser blancos cuando se encuentran arcillitizadas (Foto 4 y 5). Dentro de esta misma unidad se encuentran variaciones en la composición de la ignimbrita, siendo en el punto 273129 N / 418514 E, más masiva y consolidada, además de poseer un espesor menor de 3m pero conservando la composición característica de la unidad; espacialmente la

cantidad de materia orgánica varia, pero este hecho se considera indicador del área por el que pasó el flujo piroclástico, por este hecho no se puede considerar una variación en el tipo de ignimbrita, sino solo una variación en la cobertura vegetal preexistente en el área.



Foto 4. Flujo no soldado en estado meteorizado, coloraciones blancas en la matriz muy arcillitizada.



Foto 5. Flujo no soldado de menor espesor visto (3 m) sobreyacido por paleoaluvión y un flujo de pómez transicional a suelo.

Basándose en la interpretación de perfiles, la revisión de bibliografía y datos de pozos del SENARA, se estima un espesor de 50 m, este varía desde 3m en el 273129 N / 418514 E, hasta 25 m en el río Magdalena e inclusive más de 50m en interpretaciones de pozos cerca del centro de Cañas. Estratigráficamente se ubica debajo de las tobas de ceniza Sandillal, bajo los basaltos del cerro Chopo y un contacto lateral y superior ocasional con las andesitas de Pueblo Nuevo.

2.3.2.3 Subunidad Pómez Sandillal

Estos flujos se ubican en los alrededores del poblado de Sandillal, Cañas, su extensión abarca cerca de los 10km². Son diferenciables dos eventos constituidos por tobas de lapilli pumítico. Buenos afloramientos se encuentran en la carretera hacia el Poblado la Cueva, al SW de la ciudad de Cañas. Regionalmente se correlacionan con los flujos denominados como “Lapillita de Pómez” definida durante la Práctica geológica-AyA (2014), los cuales serán abarcados más adelante.

El primer evento del flujo de Pómez Sandillal, presenta un matriz de grano medio a fino de color blancuzco, las pómez son vesiculares poco densas (volumen del 8%), con tamaños máximos entre los 2 a 3 cm y tamaños medios de 1 cm, soportados por la matriz con formas redondeadas a subredondeadas, y una mala selección. La matriz está conformada por los mismos constituyentes de la fracción gruesa, con cristales de plagioclasa. La presencia de líticos es muy puntual y sus tamaños rondan un intervalo 0,2 a 0,5 cm. El segundo evento presenta una matriz café blancuzco, el tamaño del lapilli pumítico máximo es de 1cm, el volumen es entre el 7 al 8%. La variación composicional en el tipo de líticos aumenta, pueden distinguirse algunos de coloración rojiza que no superan los 3 a 4 mm. El espesor visto en el campo es variable, en los márgenes más orientales de la sub unidad pueden encontrarse un espesor de unos 15m 270031 N / 417611 E, mientras que en su parte más occidental entre los 2 a 3 m (Foto 6).



Foto 6. Afloramiento de máximo espesor visible del flujo de pómez Sandillal.

Estos flujos se encuentran sobreyacidos localmente por la sub unidad de Tobas Sandillal hacia el norte, cerca de la Planta Hidroeléctrica Sandillal y a su vez es subyacida por depósitos epiclásticos (Foto 7).

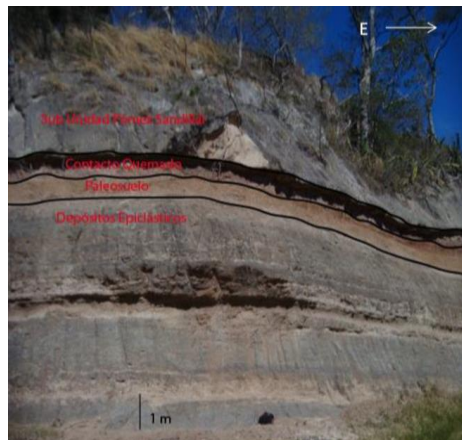


Foto 7. Contactos inferiores del flujo de pómez Sandillal.

2.3.2.4 Subunidad Tobas de ceniza Sandillal

Presenta una extensión de 1,47 km² al sureste del poblado de Sandillal. Esta subunidad se encuentra sobreyaciendo de forma local a los flujos no soldados del Río Magdalena, así como a la Subunidad Pómez Sandillal, y localmente se encuentra subyaciendo a las Lavas Cerro Nubes (Fm. Monteverde), cerca de la Planta Hidroeléctrica Sandillal se observa un afloramiento de 4 m de espesor, se trata de una toba con matriz de ceniza media a gruesa

color café, la cual engloba materiales volcániclasticos redondeados a subredondeados que van desde milimétricos a clastos de hasta 15 cm, estos últimos se presentan de manera localizada en el afloramiento. Presenta además una estratificación paralela, y se observan varios ciclos de gradaciones normales dentro de cada paquete estratificado. También se encuentra con muy poco fracturamiento, sin embargo se aprecia un espaciamiento entre cada una de las fracturas el cual llega a ser de hasta 5 cm (Foto 8A Y 8B).

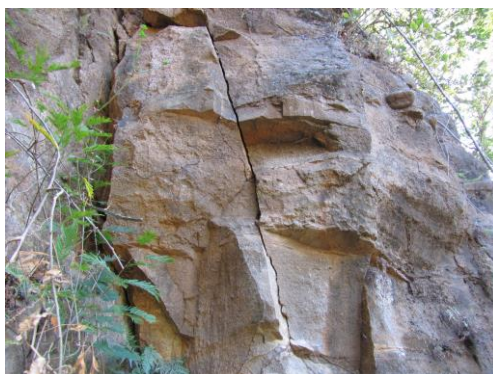


Foto 8A. Tobas de ceniza Sandillal (271247 N / 415834 E)



Foto 8B. Tobas de ceniza Sandillal (271247 N / 415834 E)

2.3.2.5 Subunidad de Flujos de Pómez Santa Rosa

Se encuentran buenos afloramientos en el cauce del rio Santa Rosa en el cantón de Cañas, en las coordenadas 270846 N / 425289 E, en un deslizamiento de alrededor de 15 m de altura y 25 m de corona de deslizamiento, también se observan afloramientos dispersos en la parte E del área de estudio en cortes de la carretera entre Líbano y Tilarán, y otras quebradas aledañas cercanas al poblado de Líbano; estos no superan las dimensiones de 10 m de altura por 30 m de largo e inclusive aproximadamente 500 m de largo en la localidad de Líbano

donde en su mayoría presentan formas rectangulares (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Se considera la localidad tipo los afloramientos descritos en el río Santa Rosa debido a su tamaño y condiciones del afloramiento. Según la distribución de los flujos se puede interpretar una forma de depósito de relleno del relieve preexistente, esto dado que no se observan en partes altas solo en cauces de ríos (Foto 9).



Foto 9. Deslizamiento donde afloran los flujos de pómez Santa Rosa, la parte superior muestra cierto nivel de retrabajo.

Son flujos de pómez masivos de grano bastante fino menor a 0,5 mm, presentan cristales de biotita en porcentajes alrededor de un 3%, por lo que corresponden con una etapa de vulcanismo más explosivo en el área; coloraciones blancas en la matriz en el deslizamiento mostrando variaciones en otros afloramientos de café a grisáceo debido a alteraciones. En la localidad tipo se observan marcas de retrabajo en la parte superior indicado por presencia de bloques rocosos redondeados incluidos en la matriz con diámetro promedio de 15 cm, estos se encuentran con presencia significativa de óxidos de hierro. Al considerarse un flujo que posee características de “manteado” o relleno del área es difícil asignar un espesor real, sumado a esto no se tienen datos de esta unidad en la bibliografía consultada; por tanto se le asigna un espesor máximo de 30 m en las cercanías del río Santa Rosa y una variación de espesor hacia el Este cerca de Líbano donde se espera un espesor menor a los 15 m (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).

Presenta relaciones estratigráficas superiores y laterales con los flujos soldados del río Santa Rosa, específicamente las ignimbritas líticas y de igual forma con las andesitas Santa Rosa y basándose en el tipo de afloramiento se puede asociar a una edad comprendida entre el pleistoceno y el holoceno.

Regionalmente los flujos Santa Rosa se correlacionan con los flujos llamados “Toba blanca de ceniza media” y “Epiclastos”, los cuales se definieron en la Práctica geológica-AyA (2014), además se correlacionan con los flujos de “Pómez Tilarán” definidos en la Campaña Geológica (2008).

2.3.2.6 Flujos pumíticos no soldados Montano

Esta unidad se correlaciona con los Flujos de Montano descritos por Civelli *et al* (2005).

Estos flujos son definidos dentro de la unidad llamada Arbolito (Unidad informal), durante la Práctica geológica-AyA (2014), la secuencia se encuentra conformada por al menos 8 flujos diferentes que se muestran en la Fig. 4.

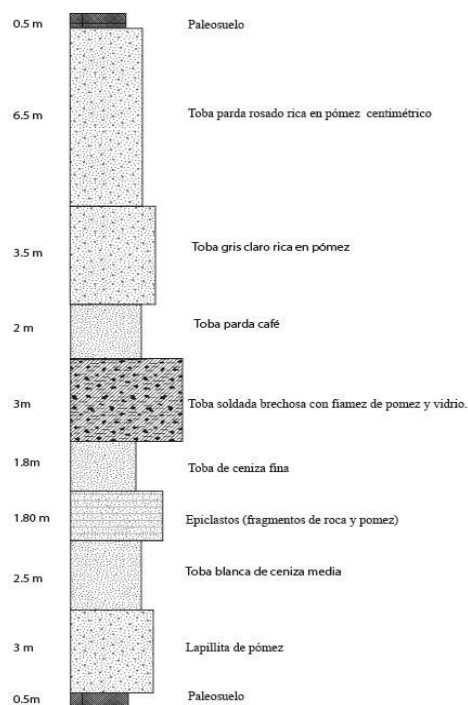


Fig. 4. Columna estratigráfica de la Unidad Arbolito.

Esta sub-unidad aflora en el sector de Bagaces Centro, se extiende hacia el Este hasta el río Blanco y hacia el Sur en zona de confluencia de los ríos Bagaces y Villa Vieja. La cima de esta unidad presenta sus mejores afloramientos en las cercanías del poblado de Arbolito, por lo que se define como afloramiento tipo (coordenadas Lambert Norte 401385 E / 278273 N), correspondiendo a varias capas de tobas no soldadas con abundante matriz de ceniza y rica en fragmentos de pómez de milimétricos a centimétricos (Foto 10A), mientras la base de esta unidad tiene su mejor exposición al sur de Bagaces en las coordenadas Lambert Norte 399267 E / 276318 N, que corresponde a una intercalación de depósitos no soldados color blanquecino (Foto 10B).

Presenta al menos 25 m de espesor, es correlacionable con el Miembro Superior de la Formación Bagaces según Proyecto Acuasub, (1975) y los Flujos Pumíticos no Soldados de la Formación Bagaces Civelli *et al* (2005). Se le asigna una edad Pleistoceno temprano (Proyecto Acuasub, 1975).

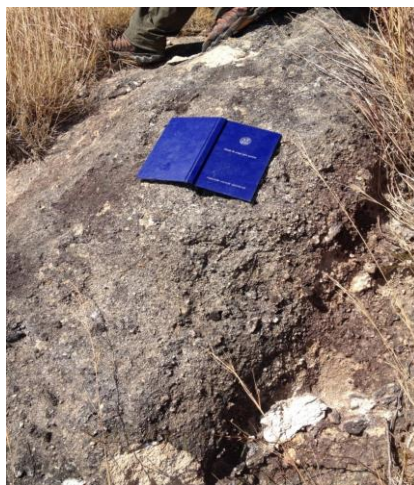


Foto 10A. Afloramiento tipo superior de la Unidad Arbolito.



Foto 10B. Afloramiento tipo inferior de la Unidad Arbolito.

A continuación se describe cada capa de la Unidad Arbolito (Fig 4), empezando de la más antigua a la más reciente.

1. Lapillita de pómez:

Esta capa representa la base de la unidad, tiene un espesor de 3 m, se encuentra delimitada en la parte inferior por un paleosuelo color café rojizo con un espesor máximo observado de 0.5 m (Foto 11). Corresponde a una capa de toba color blanco amarillento no soldada compuesta por clastos de pómez con una abundancia del 80% tamaño lapilli angulosos en su mayoría de 2 cm y hasta 7 cm de diámetro en contacto clasto-soportado, dispuestos de forma caótica o con gradación inversa de manera local, con coloraciones verdosas en el contacto superior, líticos grises subangulares de hasta 1 cm de diámetro y con una abundancia del 10%; la matriz es escasa de ceniza fina y corresponde a menos del 10%. No se observan minerales en la matriz ni dentro de las pómez.



Foto 11. Lapillita con gradación inversa subyacida por paleosuelo.

2. Toba blanca de ceniza media.

Se encuentra sobreyaciendo en forma paralela a la capa anterior (**Lapillita de pómez**), con un espesor máximo observado de 2.5 m. Corresponde a una toba no soldada y poco compactada color blanco (Foto 12), con matriz de ceniza media (80%), pómez milimétricos bien clasificados subredondeados (15%), líticos milimétricos color negro (3%), y cristales tabulares de color blanco brillante milimétricos (3%).



Foto 12. Toba de ceniza media sobreyaciendo capa de lapillita de poméz.

3. Epiclastos (Fragmentos de roca y pómez):

Sobreyace la capa anterior (Toba blanca de ceniza media), de forma paralela ondulada. Consta de una capa color gris amarillenta a rojiza moderadamente compactada con 1.8 m de espesor máximo observado (Foto 13), con matriz de arena media-fina (40%), pómez (40%) subredondeados, milimétricos y hasta de 1 cm de diámetro, fragmentos de roca (30%) de

redondeados a subredondeados milimétricos y de hasta 2 cm de diámetro con colores blancos, naranjas y amarillentos; los contactos son clasto-soportados en su mayoría pero también se encuentran contactos matriz-soportados. Esta capa puede presentar laminación paralela plana.



Foto 13. Capa de epiclastos gris amarillento con laminación paralela.

4. Toba de ceniza fina

Sobreyace la capa de Pómez Santa Rosa, los Epiclastos de la sub unidad Arbolito y el Flujo de Pómez Tilarán, tiene un espesor máximo observado de 1.5 m (Foto 14). Matriz cinerítica fina color rosado blancuzco (70%), no soldada y moderadamente compactada con cristales de 0.5 a 1 mm tabulares translúcidos de brillo amarillo latón (20%), cristales negros de 0.5 a 3 mm posiblemente anfíboles (10%), y otros con coloraciones rojizas (3%) (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 14. Toba de ceniza fina.

5. Toba soldada brechosa con fiammes de pómez y vidrio.

El espesor máximo observado de esta capa es de 3 m. La roca presenta una matriz cinerítica fina (60%) color gris claro cuando está sana y moraduzco cuando se observa alterada, plagioclasas en la matriz de 1 a 3 mm (15%), fragmentos de roca angulares (10%) de colores negro y pardo de 2 mm a 1 cm, fragmento de pómez y vidrio volcánico (5%) de 3 mm de diámetro en promedio, fiammes de pómez morados y obsidiana de 3 mm hasta 7 cm de largo (10%) (Foto 15 y 16). Algunos sectores de Arbolito presentan vacuolas vacías como burbujas de desgasificación de hasta 1 cm de largo por 3 mm de ancho (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).

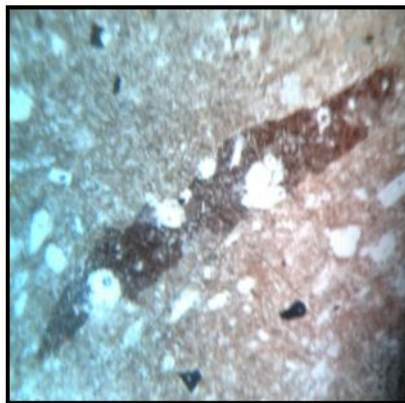


Foto 15 Muestra DD9-1 N// utilizando 4x zoom, fiamme de pómez de 30 mm de largo.



Foto 16. Muestra DD9-1 NX utilizando 4x zoom, plagioclasas dentro de círculos amarillos muy abundantes en esta roca y líticos dentro de círculos rojos.

La roca se encuentra en forma masiva así como columnar, con fracturas hexagonales de hasta 50 cm de largo (Foto 17, 18 y 19). El espesor máximo observado de esta toba brechosa es de 30 m (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 17. Toba brechosa con mega fiammes de vidrio.



Foto 18. Fiammes de vidrio con plagioclasas dentro.



Foto 19. Disyunción columnar en tobas brechosas con mega fiammes.

6. Tobas ricas en pómez

Dentro de estos materiales geológicos se diferencian tres eventos distintos debido a características composicionales y físicas como el color. Se procede a describir las tres tobas de estos flujos.

- Toba parda café.

Esta capa posee un espesor máximo observado de 1.5 m; se encuentra subyacente por la toba saldada con fiammes. Consta de un depósito no soldado moderadamente compacta de color pardo café (Foto 20), con matriz fina (65%), fragmentos de pómez milimétrico (20%) subredondeado de máximo 0.3 cm contactos flotantes y puntuales, cuarzo (7%), biotita (menos de 3%) otros líticos milimétricos en un 5% (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 20. Toba pardo café roca en pómez.

- Toba gris blancuzca con pómez

Se encuentra sobreyaciendo la toba parda café y posee un espesor máximo observado de 3.5 m. Corresponde a una roca no soldada poco compactada con matriz cinerítica media a gruesa (65-75%), color gris blancuzco (Foto 21), con una cantidad de 10-15% de líticos milimétricos (fragmentos de roca color gris oscuro), 20% de pómez fibroso color blanco con tamaños que

van desde un centímetro hasta 8 cm de diámetro, dispuestos de forma caótica y en contacto matriz soportado. Se caracteriza por los fragmentos de pómez que sobresalen de la matriz por erosión diferencial, hay ausencia de cristales tanto en la matriz como en la pómez; además en las cercanías del centro de Bagaces puede mostrar fracturas rellenas color blanco, subparalelas, tanto verticales como horizontales muy particulares observables en cortes a orillas de las carreteras (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 21. Toba gris blancuzca con pómez centimétricos rica en matriz.

- Toba parda rosada con pómez

Esta capa posee un espesor máximo observado es de 6.5 m, sobreyace concordantemente la toba gris blancuzca anterior y está sobreyacida por un paleosuelo de 50 cm de espesor y conglomerados asociados vistos en varios puntos desde Arbolito hasta el río Piedras. Consta de una roca no soldada y moderadamente compacta con matriz cínerítica gruesa (60%) de color pardo-rosado (Foto 22), fragmentos de pómez (25%) subangulares centimétricos de hasta 15 cm, otros líticos (fragmentos de roca) milimétricos hasta 0.5 cm (15%). Comparte ciertas características con la capa subyacente, como los pómez sin cristales que sobresalen de la matriz por lo que hay que prestar atención a su coloración, granulometría de la matriz y tamaño de los fragmentos de pómez (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 22. Toba parda rosada con pómez centimétricos rica en matriz cinerítica de grano grueso.

2.3.2.7 Depósitos fluviales antiguos

Estos depósitos fluviales antiguos son descritos por Aiazzi et al (2004), en donde se indica que corresponden con depósitos aluviales gruesos, localmente depósitos pumíticos retrabajados y tierras de diatomeas.

Durante la Práctica geológica-AyA (2013), se describen dos tipos de materiales geológicos los cuales se describen a continuación:

1. Materiales retrabajados

Se observan señales de retrabajo de materiales en el cauce del río Santa Rosa, estos se evidencian por estar constituidos por materiales pumíceos con clastos rocosos incluidos además de mostrar cierta laminación y endurecimiento. Se pueden observar en varias unidades descritas tales como los flujos de pómez Sandillal y ciertas zonas del aluvi3n del río Santa Rosa específicamente en el punto 271261 N / 419217 E; este presenta un afloramiento aislado y no se tienen mayores datos que composicionales al respecto, tampoco se tiene claridad del origen del material pumíceo que se localiza en afloramiento (Foto 23).

Composicionalmente posee clastos de pómez con tamaños promedio de 0,3 mm hasta 2 cm, líticos redondeados de entre 2 cm hasta 30 cm de diámetro, se observa alteración y cierto grado de laminación, además de erosión diferencial (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).



Foto 23. Materiales re trabajados en el río Santa Rosa, nótese la erosión diferencial del material en la parte superior.

2. Diatomitas

De estas rocas no se tiene un afloramiento propiamente dicho, pero dado que se observan bloques de tamaño considerable a lo largo de la quebrada azul en las coordenadas 266540 N / 427450 E; además de relatos hablados acerca de explotación de estas rocas en el pasado, se prefiere hacer mención de ellas. Como ya se mencionó se encuentra bloques en la quebrada Azul caracterizados por su bajo peso y composición levemente laminada, se observan (dentro de estos bloques) materiales gruesos tipo grava en la base, así como gradación normal de material fino hacia arriba con presencia de materia orgánica como ramas y hojas de plantas. Sumado a esto estas roca parecen tener una distribución localizada en ciertos puntos tanto en la parte NE de la zona de estudio, como también en la parte NW cerca del sistema de fallas Montes de oro, en las coordenadas 273155 N / 418514 E (Foto 24 y 25) (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 24. Diatomitas de la quebrada Azul, bloques comunes observados en tal cause.



Foto 25. Afloramiento cercano al sistema de fallas Montes de Oro, la forma irregular posiblemente se deba al colapso de un bloque sobre la secuencia en deposición y después su posterior continuidad.

2.4 Formación Río Liberia

Originalmente fue descrita por Dóndoli (1950) como “Toba Blanca”. Posteriormente fue definida como “Formación Liberia” (Dengo, 1962) el cual las caracterizó como ignimbritas formadas por acumulación caótica de cenizas pomáceas de diferentes tamaños y poco aglutinadas, generalmente ricas en cuarzo, feldespatos, biotita y fragmentos de pómez, así como fragmentos líticos; características que en su mayoría se refieren al flujo de pómez de biotítica del río Liberia descritas más detalladamente por Chiesa (1991), el cual señala su importancia como capa guía del Pleistoceno Inferior.

Este flujo pumítico está constituido por abundante matriz, pómez blancas y redondeadas, fragmentos líticos y cristales de cuarzo, biotita, plagioclasa y pocos anfíboles (Civelli *et al*, 2005), siendo la abundancia de biotita como fenocristal su característica más particular. De acuerdo a Chiesa (1991) los espesores varían desde 50 m en Liberia hasta los 2 m en Bagaces, con lo cual concluyó que este flujo se originó de un área próxima a los actuales Domos de Cañas Dulces.

Esta unidad aflora en el sector del Sitio Tinajas, hacia el Norte del poblado de Salitre de Bagaces. Se extiende aproximadamente sobre la cota de 100 m.s.n.m en el sector Norte de Bagaces hasta la ruta nacional 165, y de la ruta nacional 164 al Este hasta el río Paso Hondito y luego sobre el río Blanco (Fig. 5). La unidad no presenta un afloramiento tipo pues en la zona de estudio solo afloran algunas de sus litologías típicas en diferentes puntos (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).

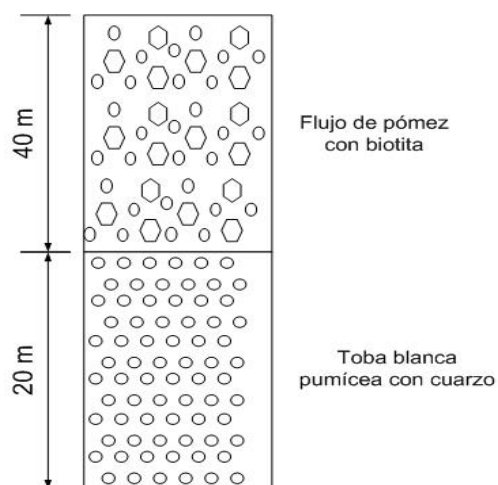


Fig. 5: Columna litoestratigráfica de las unidades Tinajas y Punta de Palo.

No obstante, el camino conocido como Paso del Cusuco que va desde la ruta nacional 164 hasta el río Estanque (288600 N / 401200 E, hasta 286400 N / 401800 E; coordenadas Lambert Norte), se puede apreciar la mayor parte de la secuencia litoestratigráfica de esta unidad. En este sector se observa un pequeño aluvión en la parte superior que sobreyace a un conjunto de tobas con abundante matriz cinerítica blancuzca, deleznable a parcialmente soldada, rica en pómez blancos redondeados milimétricos a centimétricos. Sin embargo, su

característica mineralógica composicional distintiva con otras unidades adyacentes es su alto contenido de cristales de cuarzo, biotita y anfíboles (Foto 26).

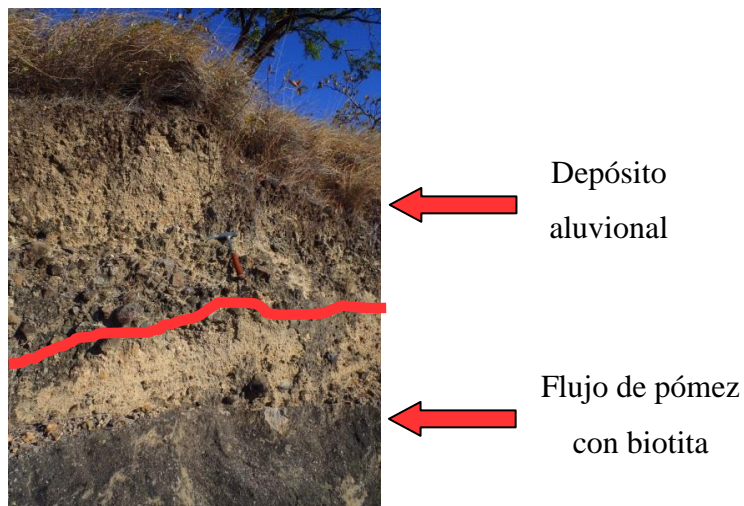


Foto 26 Afloramiento sobre el Camino del Cusuco donde se observa la secuencia superior de la Unidad Tinajas.

También presenta intercalaciones de tobas soldadas con pómez y líticos centimétricos, con cristales de plagioclasas. Esta unidad sobreyace a la Unidad Punta de Palo y no fue observado su techo, por lo que se considera la unidad superior de la columna litoestratigráfica de la zona estudiada (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA). Esta podría correlacionarse con la Unidad Río Liberia descrita por Civelli *et ál*, 2005. La unidad está compuesta por los siguientes estratos:

2.4.1 Flujo de Pómez con biotita y anfíboles.

Esta capa es la base de la unidad cuyo límite inferior estratigráfico con la Unidad Punta de Palo es con un paleosuelo de al menos 2 m de espesor hacia el sector SE del Sitio Tinajas, y con un depósito epivolcanoclástico rico en lapilli de pómez de 1.5 m de espesor hacia el sector SW, con cristales de biotita y anfíboles. Está compuesta por una matriz pumícea

milimétrica a centimétrica, blanca a amarillenta clara cuando está más afectada por la meteorización, (60-80%), parcialmente soldada (Foto 27).

Con pómez de 1 mm a 10 cm (ceniza gruesa y lapilli), blancos, de redondeados a subredondeados (10-30%), clasto-soportado; fragmentos líticos de hasta 1 cm de diámetro como tamaño máximo, de subangulosos a subredondeados (5-15%); y cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita y algunos anfíboles de hasta 2 mm de tamaño promedio de cristales (3-15%). Destaca la forma hexagonal planar de los cristales de biotita. Todos estos componentes están distribuidos caóticamente dentro de la matriz. Esta unidad tiene un espesor observable de hasta 40 m, aflora usualmente de forma masiva y en algunos sectores muy afectada por diaclasamientos cuyas fracturas están rellenas de material color blanco rosada, con espesores de relleno máximos de hasta 30 cm (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 27. Muestra del flujo de pómez con biotita y anfíboles.

Esta capa está intercalada con capas de tobas grises soldadas, de matriz cinerítica (70-90%), con pómez subangulosos de 1 mm a 8 mm (10-15%), fragmentos líticos de 1 mm a 3 mm, subangulosos (5-10%), con cristales de plagioclasa y cuarzo, no mayores a 2 mm (\square 3%), de forma masiva, soldada, con distribución caótica de componentes en su matriz, con espesores observables de hasta 2 m máximo o en secuencias rítmicas de pulsos con separación de superficies quemadas o simplemente una superficie de color gris oscuro con cierta alteración (Foto 28). En algunos sectores en la cercanía de la base litoestratigráfica, esta litología presenta vesículas de 5 cm de largo y 2 cm de ancho (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 28. Toba soldada con pómez y vesículas.

2.5 *Flujos Guayabo*

Los distintos flujos se encuentran subyacidos por el flujo del Río Liberia y se han separado en tres miembros con base en su textura, posición estratigráfica, color, contenido de cristales, pómez, líticos y mineralogía (Chiesa *et al*, 1992); A continuación se describen los miembros de acuerdo a los autores antes referidos:

2.5.1 Flujos Pumíticos no soldados Salitral

Está constituido por un flujo que contiene pómez (5-25%), líticos (5-25%) y cristales de plagioclasa (10-15%) cuarzo, ortopiroxeno y poco anfíbol (suma 10%) en una matriz de cenizas gruesas (50-80%) con colores variables entre blanco, gris y rosado. Las pómez tienen una dimensión media de 2-3 cm, pero pueden alcanzar hasta 30 cm con una evidente gradación normal desde la base hasta el techo del depósito; generalmente son muy vesiculares y con estructura fluidal. Los líticos tienen siempre naturaleza lávica, a veces escoriácea angulosos centimétricos. El espesor varía de pocos metros hasta 50 m cerca del borde de la caldera (Chiesa *et al*, 1992).

Durante la Práctica geológica-AyA (2014), se define la subunidad Punta de Palo (Informal), la cual se asocia a los Flujos Salitral anteriormente descritos, se procede a detallar esta subunidad.

2.5.1.1 Subunidad Punta de Palo

Aflora en el sector del Sitio Punta de Palo, hacia el Noreste de Bagaces. Se extiende aproximadamente sobre la cota de 100 m.s.n.m hasta la cota 200 m.s.n.m; y entre el río Paso Hondito y río Blanco. La unidad no presenta un afloramiento tipo pues en el área de estudio solo afloran algunas de sus litologías típicas de la unidad en diferentes puntos (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).

No obstante, el trayecto donde mejor se puede observar la secuencia de esta unidad es sobre las márgenes del río Blanco y quebrada Cofradía a la altura de las coordenadas Lambert Norte 283000 N / 405800 E.

En este sector se observa un paleosuelo en la parte superior en contacto con la Unidad Tinajas (290857 N / 402919 E, Foto 29).

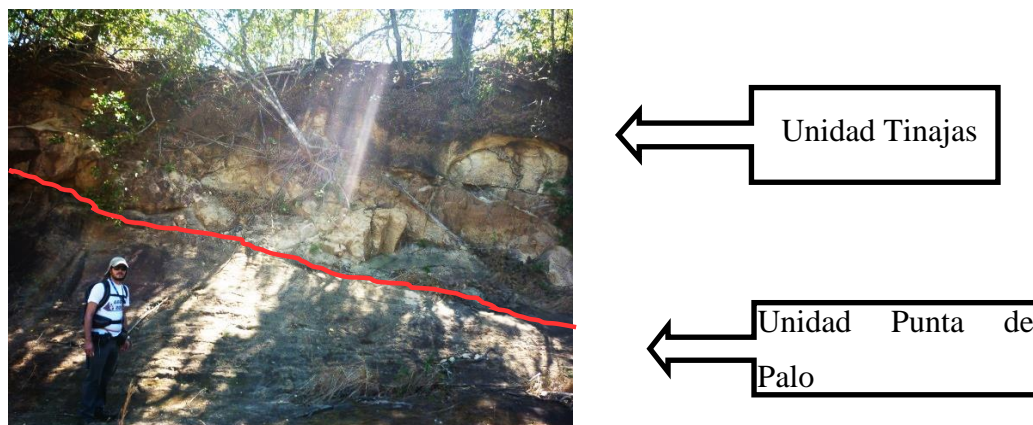


Foto 29. Contacto entre las Unidades Tinajas y Punta de Palo.

Lo distintivo de esta unidad es que no presenta biotita ni anfíboles respecto a la composición distintiva de la Unidad Tinajas. Si presenta un contenido apreciable de cuarzo. Entre los estratos de esta unidad están:

1. Toba blanca pumícea con cuarzo

Es la base de la secuencia. Con 2 m de espesor visible, es una roca gris claro, con matriz cinerítica fina a media (50-65%), pómez fibroso blanco (25-30%) milimétrico hasta de 2 cm, mal seleccionado; fragmentos de líticos (10-15%) algunos de color rojizo milimétricos a centimétricos; cristales de cuarzo de hasta 2 mm, en promedio de 1mm (5-10%) (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA). La roca está bien soldada con fracturas verticales (Foto 30).



Foto 30. Muestra de toba blanca pumícea con cuarzo de la base de la Unidad Punta de Palo.

2. Toba brechoza soldada con cuarzo

Material masivo y fracturado. Roca compuesta por 50-60% de matriz de ceniza gruesa color gris, 10-20% de pómez blanca con estructura tipo fiammes (alargados), 15-20% de líticos milimétricos indiferenciados con algunos centimétricos, 10-15% de cuarzo. Esta roca presenta una textura fluidal por lo que se interpreta como una ignimbrita (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).

3. Toba gris con cuarzo

Esta se encuentra sobreyaciendo a la ignimbrita. La roca está constituida por un 60-65% de matriz de ceniza fina color gris, con 15-20% de pómez color pardo claro de hasta 7 cm de diámetro promedio de tamaño la cual posee cristalizaciones de plagioclasas (Foto 31).

Además de un 10-15% de líticos milimétricos indiferenciados y 15% de cuarzo. La roca se encuentra bien soldada (Práctica geológica 2014, inf. Interno AyA).



Foto 31. Muestra de toba gris lítica con cuarzo de la Unidad Punta de Palo

2.5.2 Flujos Pumíticos no soldados Buena Vista

Constituido por una matriz de ceniza gris claro (40-60%) con pómez (15-60%), líticos (5-15%) y abundantes cristales de anfíbol (15%), plagioclasa, cuarzo, clinopiroxenos y minerales opacos contenidos en las pómez y en la matriz. Las pómez, bien vesiculares, tienen una dimensión media de 3-4 cm, sin embargo, en función de una frecuente gradación desde normal hasta inversa, pueden llegar a los 35 cm.

Los líticos alcanzan hasta los 10 cm; tienen composición lávica y están distribuidos de modo homogéneo. Es muy extenso (150 Km²) y tiene espesores variables que llegan hasta los 30 m en el borde de la caldera (Chiesa *et al*, 1992).

2.5.3 Flujos Pumíticos no soldados La Ese

Los flujos de La Ese representan las unidades más recientes con por lo menos 3 diferentes flujos piroclásticos constituidos por pómez (60-70%) y líticos (5-10%) con escasa matriz de ceniza. Los cristales en la pómez o en la matriz parecen totalmente ausentes (aférrica). Las pómez son blancas, redondeadas y llegan hasta 15 cm, pero usualmente son inferiores a 3 cm de diámetro y con moderada vesicularidad. Los líticos son muchos más reducidos (0.5-1 cm) y tienen forma angulosa y naturaleza lávica (Chiesa *et al*, 1992).

2.6 Formación Monteverde

Según Chávez & Sáenz (1980), constituye un altiplano o meseta. Se considera que son producto de efusiones ocurridas a lo largo de fisuras con fenómenos de recurrencia.

Madrigal (1980), considera su origen en un volcanismo fisural asociado con el Río Abangares, para la formación de la unidad “Andesita Columnar”. Para la otra unidad que define, asume la formación a partir de grandes coladas alargadas que en el área antes citada, quedaron como relictos de erosión. Es reconocida en algunos sectores por su típica forma en mesetas de lava y por lavas frescas, donde permite su distinción. (Aiazzi *et al.* 2004).

Madrigal, (1980) considera un espesor para esta formación en el área de las Juntas de Abangares entre 200 y 225 m, de acuerdo con manifestaciones topográficas. Se considera asociada con fracturas corticales con dirección E-W hasta WNW-ESE (Alvarado *et al.* 1992).

Está constituida por coladas andesíticas frescas, con una típica forma de plataforma, presenta diferentes niveles, posiblemente en correspondencia con diversos frentes de coladas (Aiazzi *et al.* 2004).

Se le reconoce en algunos sectores por su típica forma de meseta de lava y por lavas frescas (p.ej. entre Sandillal y Los Ángeles), mientras que en otros sectores, no resulta tan obvia la distinción (Aiazzi *et al.* 2004).

Sobreyace discordantemente a las rocas del grupo Aguacate (Brechas del Cerro Pelado-Paraíso) y a la Formación Bagaces (Flujos no soldados). Se encuentra localmente un flujo de pómez infrayaciendo a la formación Monteverde pertenecientes a la formación Bagaces. (Aiazzi *et al.* 2004). Alvarado *et al.* (1992) le asignan un ámbito de formación entre 1 y 2 m.a y divide esta formación en Brecha Paraíso y Lavas Cerro Nubes Monteverde.

Durante la Práctica geológica-AyA (2013) y Bonilla *et al.* (2008), se definieron 8 subunidades (Informales), asociadas a la Formación Monteverde, las cuales se describen detalladamente a continuación.

2.6.1 Subunidad andesitas Vergel

Se ubican en las cercanías de la quebrada Vergel, en la margen derecha del río Cañas en los alrededores del punto 269792 N / 419857 E, y el punto 269850 N / 421600 E, donde se presentan lavas fracturadas verticalmente por efecto de enfriamiento con direcciones preferenciales de S30°E, además intenso diaclasado al parecer por esfuerzos en la zona. Los afloramientos tienen dimensiones entre los 2 y 5 m de alto por 20 m de largo (en ocasiones), en ellos las rocas en general se encuentran sanas y con pocos signos de alteración, además se encuentran en forma de meseta en la parte central del área de estudio semejando la topografía mostrada por las andesitas de Pueblo Nuevo la cual es bastante uniforme y aunque en este caso no presenta los signos de alteración como los de las andesitas Pueblo Nuevo (Foto 32).



Foto 32. Afloramiento de las andesitas Vergel. Coordenadas 269760 N, 419854 E.

Macroscópicamente se considera una roca afanítica porfirítica de color gris-morado oscuro con fenocristales de plagioclasa de alrededor de 2 mm de largo y piriboles poco observables a simple vista. Las rocas sanas presentan coloraciones oscuras y cristales de plagioclasa grandes y levemente arcillitizados, las muestras alteradas presentan coloraciones más claras con tonos de morado y algunas pátinas de óxido. Microscópicamente poseen textura holocristalina porfirítica ligeramente seriada, con fenocristales de plagioclasa y augita en una matriz microlítica. Ocasionalmente se presentan algunas alteraciones correspondientes con calcita mezclada con arcillas, las cuales dan una coloración café poco birrefringente (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Las rocas se clasifican como andesitas augíticas (Foto 33).

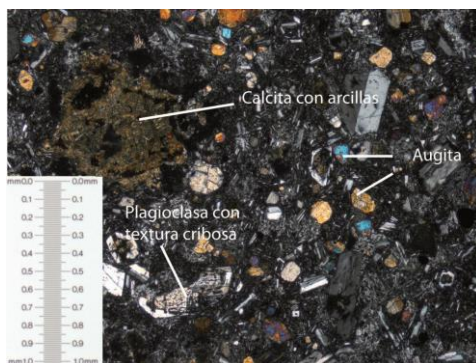


Foto 33. Lámina delgada de la muestra C12-6 correspondiente con las andesitas Vergel. NX- 4X.

Esta subunidad se asocia con la formación Monteverde, al igual que las andesitas Pueblo Nuevo; esto dado las similitudes que ambas presentan en cuanto a composición, sin embargo, se hace notar que tales andesitas están asociadas a diferentes niveles de coladas de lava o bien se encuentran formando partes distales (andesitas Vergel) o partes más proximales (Pueblo Nuevo) de una colada de lava que cubre la zona, esto dadas también diferencias en el tamaño de cristales y matriz así como contenido de opacos. Dada la morfología de la zona se puede discutir que tal formación fue cortada por el río Santa Rosa para dar origen a la morfología tipo meseta sobre la que se encuentran las andesitas Vergel (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Presenta relaciones estratigráficas en la base con los flujos solados del río Santa Rosa y en la parte de arriba es sobreyacida por coluvios y suelo. Al ser asociadas con la Fm. Monteverde, se les asigna una edad de plioceno superior según Aiazzi (2004).

2.6.2 Subunidad de Andesitas Santa Rosa

Incluidas dentro de la unidad de andesitas se distribuyen de manera basal en la parte NE del área de estudio en la zona de Cañas, en el cauce del río Santa Rosa y Quebrada Grande, la localidad tipo se encuentra en las inmediaciones del río Santa Rosa y en la finca del mismo nombre donde se encuentran afloramientos en la margen derecha del río; de igual forma los mejores afloramientos se ubican tanto en la finca Santa Rosa como en la quebrada Grande donde se observan afloramientos de dimensiones de 25 m de altura por 30m de largo

(Foto 34) con intensos diaclasados en dirección predominante Nf y lajas con inclinación N30°E (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).



Foto 34. Afloramiento de sobre la quebrada Grande, rocas masivas fracturadas.
Coordenadas 270678 N, 425259 E.

En este afloramiento particular, se observan partes más masivas, seguidas de secciones fracturadas e inclusive levemente plegadas para finalizar en una parte más masiva al E del afloramiento. En cuanto a los afloramientos aguas arriba también se observan fracturas y diaclasas, así como rocas con mayor grado de alteración, las cuales se extienden hasta las cercanías de la carretera Líbano-Tilarán, donde igualmente se encuentran con un importante grado de alteración. La generalidad de los afloramientos presentan cierto grado de alteración (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Las rocas presentan comúnmente coloraciones grises oscuras cuando sanas, un porcentaje de plagioclasas aproximado entre los 15% con tamaños entre los 1 y 2 mm de largo, con pocos piriboles observados en ocasiones no alcanzan el 5% y de tamaños menores a 1 mm, esto dentro de una matriz gris oscura a media con microlitos de plagioclasa, en afloramientos ubicados más al norte se nota mayor alteración dando la matriz una coloración en ocasiones rosada grisácea, así como se encuentran fracturas rellenas por zeolitas (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Microscópicamente presenta una textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de plagioclasa y augita en una matriz microlítica. Presenta muchas cavidades entre cristales y relleno secundario de zeolitas. Mineralógicamente se comprende de plagioclasas, augitas, zeolitas, además de leves alteraciones de óxidos de hierro en la matriz (Foto 35).

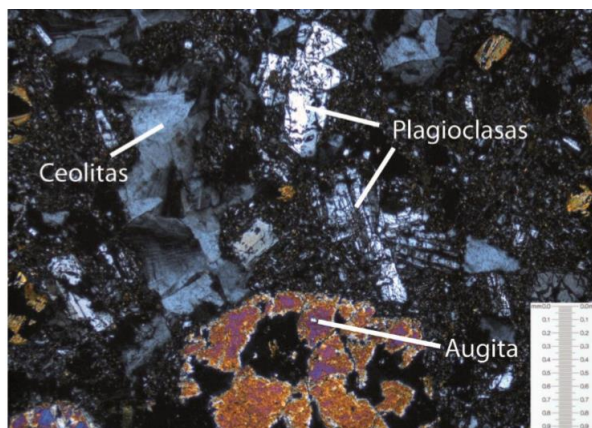


Foto 35. Sección microscópica de las andesitas Santa Rosa, nótese la importante cantidad de zeolitas en la muestra.

Estratigráficamente se ubican bajo la subunidad de brechas Santa Rosa y dada la restricción de la unidad a la zona no se conoce un espesor real, pero en superficie no supera los 40 m, además según sondeos del Instituto Costarricense de Electricidad en la zona se considera un espesor no menor a 250 m, Estrada (1985).

2.6.3 Subunidad de Brechas Santa Rosa

Ubicada en el alto Cartago y limitada por el Río Cañas en su parte sur y la Quebrada Grande en la parte norte. Presenta una extensión de 3 km sentido oeste-este. Buenos afloramientos se encuentran en la carretera de Líbano hacia Tilarán, en el cruce con la Quebrada Chiquito. Esta unidad es diferenciada por aspectos composicionales de la sub unidad Santa Rosa (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Los afloramientos presentan una geometría irregular, con clastos de tamaños centimétricos (Foto 36). Su composición es polimíctica, de origen volcaniclástico de los cuales pueden diferenciarse clastos andesíticos, a su vez algunas tobas soldadas de variada coloración. Su morfología es sub angular a sub redondeada (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).



Foto 36. Clastos de granulometría menor de la subunidad de brechas Santa Rosa.

La matriz se compone de arena de grano medio a fino de color café claro, con un grado de soldamiento intermedio. Son visibles algunos líticos en un porcentaje de 5% del volumen, cristales no son visibles. La abundancia de los clastos ronda en un 20% del volumen, se encuentran soportados por la matriz y su distribución es caótica, presentan una alteración intermedia a óxidos de hierro (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Cabe destacar que dentro de esta unidad se incluyó un afloramiento característico, ubicado en el margen izquierdo de la quebrada Grande, propiamente en las coordenadas 270521 N / 424710 E, su geometría es irregular, sin contactos evidentes en sus márgenes (Foto 37), presenta una extensión de unos 10 m de largo por 3 m de alto.

La composición de sus clastos es polimíctica con fragmentos de origen volcánico de los cuales pueden diferenciarse en las muestras de mano basaltos, tobas y pómez; su morfología es sub angular a sub redondeada, con tamaños centimétricos, máximos de 0,7 m y una media de 0,35 m. La matriz es areno-limosa de color blanco amarillento, con presencia de cristales y lapilli. Se encuentra con un grado de soldamiento muy bajo, los clastos están soportados por la matriz y rondan en un 20% del volumen. Su distribución es caótica (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).



Foto 37. Afloramiento de posible debris avalanche.

Lo particular de este afloramiento es su posible origen; esto de acuerdo a la distribución y composición de la matriz y los clastos; los afloramientos de brecha descritos anteriormente presentan morfologías completamente diferentes, aunque su descripción es incluida en este apartado debido a su geometría, posiblemente su origen se encuentre asociado a un debris avalanche (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

2.6.4 Subunidad de andesitas Tovar

La localidad tipo se ubica en el Cerro Tovar, ubicado al SW de la ciudad de Tilarán. Se encuentran buenos afloramientos de lavas en el Río Santa Rosa en su margen norte en el punto 272808 N / 429032 E (Foto 38).

En la parte superior del cerro se pueden encontrar rocas de diámetros entre 1,5 a 2 m, de color gris claro, semi fracturadas y con pseudolapiaz. La roca sana presenta una textura afírica con coloraciones gris oscuro en la matriz.

Aunque en su parte más basal (Río Santa Rosa) presenta una textura afanítica porfirítica con fenocristales de plagioclasa hidratados, con tamaños máximos de 3 x 2 mm (45%) y piríboles xenomórficos con diámetros máximos de 1 mm en un 18%. Todo esto en una matriz de grano fino color gris oscuro (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

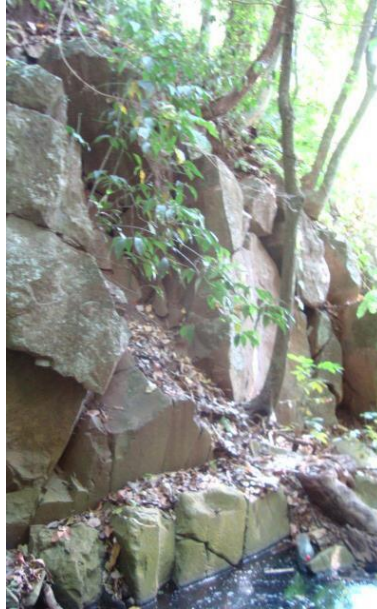


Foto 38. Afloramientos característicos de la unidad andesitas Tovar.

Las muestras de mano presentan una variación textural de su parte alta a su parte más baja, esto puede ser debido a diferentes niveles que se relacionan con diversos frentes de colada (Aiazzi, 2004). De acuerdo al análisis se define la roca como una andesita augítica (Foto 39). Presenta textura holocristalina porfirítica, con fenocristales de augita, olivino y plagioclasa dentro de una matriz intergranular compuesta por microlitos de plagioclasa, augita, clorita verde y opacos con textura fluidal. Algunas zonas localizadas presentan alteración a óxidos de hierro (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

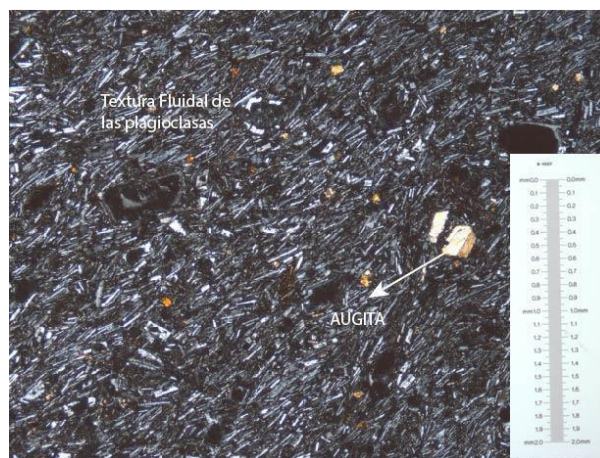


Foto 39. Sección microscópica de la muestra del cerro Tovar.

2.6.5 Subunidad andesitas Líbano

Se encuentran cubriendo un área de 4 km². Buenos afloramientos en la Quebrada maravilla en su cruce con la carretera hacia el Líbano, así como en los tajos Piedra Viva (266624 N / 428111 E) y el Líbano. Los afloramientos de lava masivos ligeramente alterados; en su cercanías se encuentran flujos pumíceos infrayacentes muy locales (Foto 40) con un espesor aproximado de 3 m en el punto 266403 N, 428115 E.

Macroscópicamente son visibles cristales de plagioclasa en un porcentaje del 15% con tamaños máximos de 2 mm de largo por 1 mm de ancho y medios de 5 mm x 5 mm. Los piróboles se observan en un porcentaje del 10% con tamaños máximos de 1 mm. Los cristales no presentan una dirección preferencial. La matriz es de grano fino de color gris verdoso. Se encuentra con pátinas de alteración de coloración naranja de 1 mm de espesor, posiblemente óxidos de hierro. La roca meteorizada (Foto 40) es de color blanco parduzco, se pueden ver los cristales de feldespato completamente arcillitizados e hidratados (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

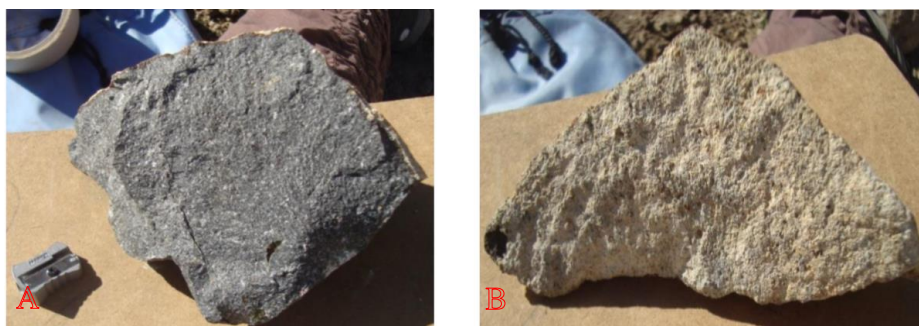


Foto 40. A: Muestra sana de las andesitas Líbano, B: Muestra alterada de la misma unidad.

Su textura es holocristalina xenomórfica porfirítica, con fenocristales de plagioclasa (25%), augita (20%) y opacos (5%). Todo esto en una matriz de textura intergranular, seriada (50%), compuesta por microlitos de plagioclasa, clorita verde y opacos (Foto 41).

Presenta alteración propilítica (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA). Se puede relacionar esta unidad con la formación Monteverde (Aiazzi, 2004). De acuerdo con el vulcanismo efusivo se ubica entre 2 y 1 m.a (Alvarado *et al.*, 1992) Pleistoceno Inferior.

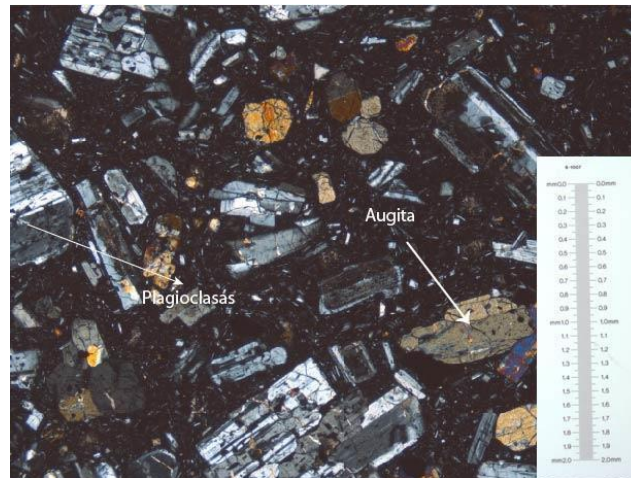


Foto 41. Sección microscópica de las andesitas Líbano. 4X-NX

2.6.6 Basaltos y Andesíticas basálticas Alto el Zoncho

Esta subunidad (Informal), fue definida por Bonilla et al. (2008), la aflora principalmente en el sector Este del área de estudio (Fig. 2 Mapa geológico). Se presenta a lo largo de cortes en los caminos así como en quebradas de esta zona. Las dimensiones y calidad de los afloramientos son muy variables. Para esta subunidad se define como localidad tipo un corte en los alrededores del Alto el Zoncho en las coordenadas 272212 N / 431748 E (Foto 42).

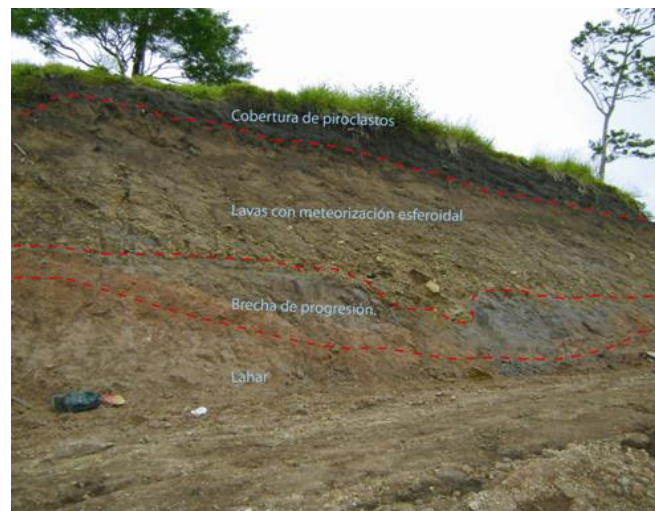


Foto 42. Corte realizado para la construcción de un residencial en los alrededores del Alto El Zoncho (272212 N / 431748 E).

Esta unidad está compuesta por lavas masivas las cuales presenta un alto grado de meteorización. Estas se presentan en la mayoría de afloramientos como bloques de lavas con meteorización esferoidal dentro de una matriz limo-arcillosa de colores rojizos-anaranjados, producto de la alteración de las mismas lavas (Bonilla et al., 2008).

Las lavas meteorizadas presenta tonalidades rojizas hasta anaranjadas, en estado sano estas presentan tonalidades grises-azules y se observan cristales de feldespatos y máficos, estos cristales en estado de meteorización se presentan alterados a arcillas.

Microscópicamente las rocas presentan fenocristales de plagioclasas y olivinos inmersos en una matriz con textura hialopilitica con microlitos principalmente de plagioclasas y augita. La presencia de fenocristales de piroxenos es mínima (Bonilla et al., 2008).

Estas lavas en diferentes afloramientos se presentan sobreyaciendo una brecha de tonalidades moradas con clastos angulares monomícticos correspondientes a fragmentos de lavas, los cuales muchas veces se encuentran alterados completamente a arcillas. Estas brechas corresponden a las brechas de progresión de las diferentes coladas de lava (Foto 43).

El espesor de esta subunidad varía desde espesores mínimos de 3m, hasta máximos medidos de 8 m (Bonilla et al., 2008).



Foto 43. A: Fotografía en la que se presenta la colada de lava con su respectiva brecha de progresión, la cual tiene tonalidades moradas. B: Fotografía en la cual se observa con más detalle la meteorización esferoidal que presentan los diferentes bloques.

Al sureste del poblado de Tronadora a lo largo de diferentes cauces (274583 N / 435653 E, 275048 N / 435926 E), estas coladas se presentan más masivas con contactos puntuales entre los diferentes bloques de lavas (Foto 44).



Foto 44. Coladas de lava masiva al sureste del poblado de Tronadora

En el sector oeste y suroeste de Tejona (276212 N / 430638 E), se presentan como bloques masivos con meteorización esferoidal, inmersos en una matriz limo arcillosa color café rojizo, producto de la misma meteorización, los núcleos se conservan sanos con patinas delgadas entre 2 y 5 mm. El espesor a nivel de afloramiento alcanza los 3 metros, se encuentran sobreyacidas por piroclastos de caída y su base no se observó (Bonilla et al., 2008). La roca sana es color gris oscura de textura afanítica porfirítica con pocos fenocristales de piroxenos, plagioclasas y olivinos alterados. Microscópicamente presenta una textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de plagioclasa, olivinos y piroxenos (Bonilla et al., 2008). Kussmaul (2008, en comunicación oral) menciona que se pueden correlacionar con los basaltos de plateau que se encuentran en la base del Cerro Chopo, descritos por Ramírez (1973) (Foto 45).



Foto 45. A: Afloramiento ubicado en el poblado de Tejona, basaltos cubiertos por piroclastos de caída. B: Meteorización esferoidal de los basaltos en la localidad de Tejona.

2.6.7 Subunidad Andesitas Pueblo Nuevo

Pertenciente a la unidad de andesitas; se extiende sobre la parte norte del área de estudio de Cañas, un kilómetro al Este a partir del tajo Chopo hasta la parte alta de la cuenca del río Santa Rosa en las cercanías de Tilarán.

La localidad tipo se ubica en las coordenadas 273149 N / 422291 E, en una de las entradas a la localidad de Pueblo Nuevo y corresponde con un corte en la carretera entre Cañas y Tilarán. Los afloramientos de esta unidad se encuentran dispersos por la zona norte y noreste del área de estudio, se ubican en cortes de carretera y en las Quebradas Azul y las Pulgas.

Al ser aflorante la parte más superficial de la unidad en los cortes de carretera, estos se encuentran en avanzados grados de alteración, solo se puede observar roca sana en las quebradas Azul y las Pulgas donde las rocas se encuentran desde alteradas hasta completamente sanas conforme se descende (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA). Los afloramientos no se encuentran en dimensiones mayores a los 15 m de largo por 3 m de alto. Un rasgo distintivo de estas rocas es que se encuentran en disposición de lajas (Foto 46), tanto como en los cortes de carretera como en las quebradas, en los primeros también se puede observar una disposición de meteorización esferoidal; en la parte más basal observada se encuentra una distribución masiva, como en la Quebrada Azul en las

coordinadas y en la Quebrada las Pulgas donde también se encuentra una parte sana y otras alteradas en las coordenadas 274265 N / 420477 E.



Foto 46. Afloramiento de la subunidad Andesitas pueblo Nuevo, nótese la disposición en lajas de la roca. Coordenadas 274253 N / 428191 E, quebrada Azul.

Macroscópicamente la roca se considera una andesita con textura afanítica porfirítica de color gris oscuro no vesicular cuando sana, cristales de plagioclasa no orientados e hipidiomórficos con tamaños máximos de 3 mm en la localidad tipo, poca cantidad observable de piróboles con tamaños menores a 1 mm, así como una matriz fina con componentes no determinados macroscópicamente (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA). Las rocas alteradas toman coloraciones moradas en la matriz y por lo general las plagioclasas se encuentran arcillitizadas, también se encuentran gran cantidad de vesículas debido al desprendimiento de cristales y su posterior reemplazamiento por óxidos de hierro los cuales alcanzan un porcentaje significativo de la matriz en rocas alteradas (Fotos 47 y 48). Microscópicamente las rocas poseen textura holocristalina porfirítica con fenocristales de plagioclasa y augita en una matriz microlítica con abundantes opacos.

Se presentan ocasionalmente cristales de hipersteno como mineral accesorio en la roca (>1%), la roca se clasifica como una andesita augítica (Foto 49).



Foto 47. Meteorización esferoidal en rocas de la subunidad descrita, tipo de alteraciones comunes en la zona. Coordenadas 273149 N / 422291 E.



Foto 48. Aspecto general de las rocas con alto grado de alteración en la zona. Coordenadas 276409 N / 428481E.

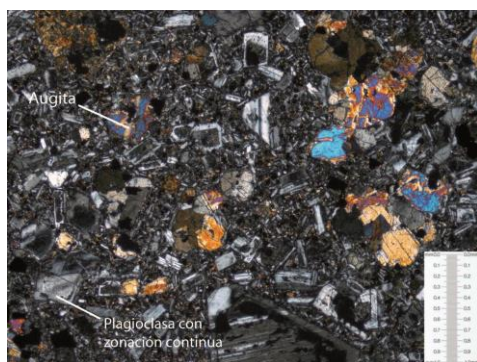


Foto 49. Sección microscópica de una de las andesitas de la subunidad Pueblo Nuevo. NX-4X.

Esta subunidad se ha definido como una serie de coladas de lava de composición andesítica muy similares entre sí, variando características de la matriz y contenido de minerales como augita y opacos como fenocristales y componentes en la matriz, así como el tamaño de grano de esta (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Presenta relaciones estratigráficas en la parte superior con el lahar los Ángeles y los basaltos del Cerro Chopo, así como sobreyace a los flujos soldados del río Santa Rosa (contactos inferidos), así como también a los flujos no soldados del río Magdalena y en algunas localidades en la quebrada Pulgas se observa sobreyacida por un flujo ignimbrítico soldado, posiblemente relacionado con las ignimbritas con fiámez observadas en las cercanías (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Esta subunidad se relaciona con la Fm Monteverde compuesta por el mismo tipo de roca y con una edad según Aiazzi (2004) de plioceno superior.

2.6.7.1 Lahar Los Ángeles

Esta unidad se encuentra asociada a las lavas Pueblo Nuevo y se encuentran distribuidas en el sector Este de la zona de estudio en Cañas, desde el poblado de los Ángeles hasta las cercanías de la quebrada Azul, se encuentran buenos afloramientos solo en cortes de carretera dado que en la zona hay una intensa actividad ganadera, por lo que se observan únicamente potreros con laderas de baja inclinación y con rocas afectadas por pseudolapiaz en su parte más alta; morfológicamente tales lomas en los potreros se observan alineadas en dirección N-S y con abundantes depresiones entre ellas en las cuales se forman pequeñas lagunas (Foto 50).

Su localidad tipo se considera en la zona de los Ángeles ya que en el área se encuentran aflorando en gran medida los bloques de los potreros, en las coordenadas 275189 N / 428382 E; se ubican los mejores afloramientos de esta unidad, tales se encuentran alterados y arcillicitizados con bloques sanos flotando en la matriz, todos los afloramientos registrados no superan los pocos metros de alto por más de 10 m de largo; esto al ser una unidad que se

encuentra extensamente ubicada desde aproximadamente los 276000 N / 428000 E, hasta el punto 272000 N / 424000 E (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).



Foto 50. Vista generalizada de las lomas alineadas con rumbo N-S. Coordenadas 274400 N / 425730 E.

Se define como un lahar con características tipo *hummocky*, con materia orgánica carbonizada incluida en la matriz (Foto 51) y con bloques desde centimétricos (9 cm) hasta métricos (1,17 m); tales clastos incluidos en la matriz corresponden macroscópicamente con andesitas augíticas con fenocristales de plagioclasa de tamaños no mayores a 2 mm de largo, con piróboles en baja proporción con tamaños no mayores a 1 mm, microscópicamente se identifican como rocas con textura holocristalina ligeramente seriada y con aglomerados ocasionales de plagioclasas en una matriz intergranular, su contenido mineralógico corresponde con plagioclasas, augita, magnetita y ligeras alteraciones a epidota presentes en la matriz (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Sumado a esto se logra ubicar una pequeña secuencia piroclástica sobre el lahar, la cual consiste de capas de lapilli sobre tobas de ceniza finas y bajo estas una sección del lahar transicional a suelo (Foto 52), tal secuencia se encuentra restringida en la parte N en las coordenadas 275189 N / 428392 E y se extiende de manera lineal cerca de un kilómetro al sur de este punto sobre el corte de la carretera. En las inmediaciones de la carretera entre

Cañas y Tilarán en el punto 274657 N / 422291 E, aún se puede observar esta secuencia pero solo con las tobas de ceniza con un espesor promedio de 20 cm encontrándose alterada y dando una coloración gris-marrón debido a la transición a suelo de esta, se encuentra sobreyaciendo el lahar el cual también varía su espesor de poco más de 1 m hasta poco menos de 50 cm en este punto.



Foto 51. Madera carbonizada, evidencia de que el flujo corresponde con un lahar.



Foto 52. Secuencia piroclástica que sobreyace localmente al lahar.

Coordenadas 275189 N / 428392 E.

Por su relación estratigráfica sobreyace a las andesitas de pueblo nuevo y se considera como la unidad más reciente de la zona, y como centro de emisión se considera probable un origen del volcán Tenorio, esto dado que según literatura consultada (Aiazzi 2004) define los lahares del Tenorio como tipo *hummocky*, además de mapear algunas partes de este cerca de la zona de Cañas. Se le asocia una edad de pleistoceno hasta el Holoceno ya que se puede

relacionar esta unidad con los lahares del Tenorio correspondientes a esa misma edad (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

2.6.8 Lahares Río Piedra

Esta subunidad (Informal), fue definida por Bonilla et al. (2008), y se correlaciona temporal y espacialmente con la subunidad de lahares descrita por la Práctica geológica-AyA (2013), la unidad de Lahares río Piedras se ubica en el sector Este del área de estudio. Esta unidad se encuentra aflorando a lo largo de diferentes cauces y cortes de carretera. La calidad y dimensiones de los afloramientos son variables. Se encuentra en sectores como lentes interdigitados dentro de la unidad de lavas andesíticas Monteverde. Para esta unidad se define como localidad tipo, los afloramientos a lo largo del Río Piedras (284361 N / 428654 E), esta constituido por un 70% de clastos polimícticos angulares a sub-redondeados de 20 cm como máximo, mal seleccionados, presentan contacto punto y en menor medida flotante (Bonilla et al. 2008). La estructura es caótica, clastos de composición andesítica principalmente con lentes de arcilla amarillentos con bordes plásticos de color negro en una matriz limo arenosa café amarillenta. En la zona norte, cerca de la quebrada de Aguacate (4282570 N / 434880 E) (Foto 53), presentan espesores que rondan los 5 m como máximo, compuesto por una matriz areno- arcillosa de bloques polimictícos, algunos con evidente grado de meteorización y mala selección. Los contactos predominantemente son flotantes pero con existencia de puntuales en menor medida (Bonilla et al. 2008).



Foto 53. A: Lahar ubicado a lo largo del cauce del Río Piedras. B: Lahar ubicado cerca de la Quebrada Aguacate.

Al norte del poblado Silencio (273507 N / 437002 E), los lahares se caracterizan por presentar clastos polimícticos con formas angulares hasta redondeados, tamaños de los clastos variables con máximos de hasta 50 cm, fragmentos de pómez de 10 cm, muchos de los fragmentos y clastos se presentan alterados completamente a arcillas y en algunos se diferencian cristales de feldespatos de tonalidades blancas. La matriz es limo-arcillosas con tonalidades rojizas hasta moradas (Foto 54A). En el Alto El Zoncho (272212 N / 431748 E) los contactos entre los clastos en general son puntuales o flotantes y presentan una distribución bimodal con modos de 20 cm. y 5 cm. Dentro de este lahar se encuentran cinco niveles arcillosos de aproximadamente 2 cm. cada uno y presentan alternancias de colores blancos y rojos, este presenta un espesor mínimo de 3m y sobre este sobreyace un contacto quemado de 1m de espesor producto una secuencia de lava. (Foto 54B). Estratigráficamente estos lahares se encuentran en contacto lateral con las diferentes unidades de lavas recientes.



Foto 54. A: Fotografía de lahar ubicado al norte del poblado el Silencio a lo largo del cauce del río Tronadora. (273507 N / 437002 E). B: Fotografía de lahar ubicado en la zona del Alto El Zoncho (272212 N / 431748 E), en esta ubicación se observan los diferentes niveles arcillosos dentro del lahar.

Al este del poblado de tronadora en la Quebrada Corpus (274433 N / 438086 E) el lahar presenta una matriz grisácea a morada con clastos polimícticos mal seleccionados y presentan tamaños decimétricos a métricos, mientras que el lahar ubicado al este del Alto El Zoncho en un corte de carretera (273187 N / 423890 E), presenta granulometría de clastos de hasta de 1-2 mm, aparentando más corresponder con un flujo piroclástico o una toba de lapilli. (Foto 55).



Foto 55. Fotografía de lahar ubicado al este del Alto El Zoncho en un corte de carretera (273187 N / 423890 E).

2.7 Lavas y piroclastos del Cerro Chopo

Según Mora (1977), el cerro chopo consiste en un cono de piroclastos de tamaños variados: cenizas fina, lapilli y bombas tipo corteza de pan, este material corresponde con un fase de erupción stromboliana en la historia del volcán. Además de un conjunto de relictos de pequeñas coladas de lava de composición latítica, aflorantes en el sector norte y noreste del cerro, en un conjunto de relictos de pequeñas coladas blocosas emanadas de la antigua chimenea. Estratigráficamente sobreyace a la formación Monteverde y los flujos pumíticos de la formación Bagaces. Su edad según dataciones absolutas indican una edad de 1,8 m.a en el pleistoceno inferior. Las lavas aflorantes en su alrededor son de un origen especulativo, el cual al igual que el cono puede corresponder con un origen del tipo fisural. Durante la Práctica geológica-AyA (2013), se definieron 2 subunidades (Informales), asociadas a las Lavas y Piroclastos del Cerro Chopo y su periodo de actividad, además Bonilla et al. (2008), describe una subunidad de tefras las cuales se asocian con una de las subunidades descritas en la Práctica geológica-AyA (2013), las cuales se describen detalladamente a continuación.

Civelli et al. (2005), definen aspectos geoquímicos de la unidad de Lavas y piroclastos basálticos del Corobicí, los cuales son correlacionados dentro de este mismo apartado.

Esta Lavas y piroclastos del Cerro Chopo, se dividen en cinco subunidades que se describen a continuación:

2.7.1 Lavas y Piroclásticos Basálticos del Corobicí

Civelli et al. (2005), publican los aspectos químicos de esta subunidad, e indican la presencia de cuatro afloramientos de lavas básicas asociadas al Cerro Chopo inclusive los cuales se encuentran más o menos alineados en sentido NW-SE y ubicados al frente del eje volcánico y que poseen un carácter toleítico. Esta subunidad aflora a lo largo del río Corobicí, otros afloramientos más limitados se encuentran en las cercanías de la quebrada Ceiba y entre el río Blanco y las Lomas la Tigra. Chiesa et al. (1994), describe estos conos como estratos conformados por bombas y lapilli inconsolidadas en gradación inversa, además de aglomerados soldados con coladas de lava subordinadas de composición basáltica. Además durante la Práctica geológica-AyA (2013), se define una subunidad de Conos basálticos, la cual a pesar de que no se tienen muchos datos al respecto, sobresalen por su topografía, además se tienen datos petrográficos aportados por el análisis de secciones delgadas en las cercanías de la planta de energía Sandillal, los cuales nombran a las rocas como andesitas augíticas; tales rocas corresponden con un serie de alineamientos con dirección NE-SE e incluyen al cerro Chopo. El origen de tales cerros podría corresponder a un origen fisural por Fallamiento en el área como se expone acerca del cerro Chopo.

2.7.2 Unidad de Basaltos del Cerro Chopo

Se localizan únicamente en las zonas cercanas al Tajo Chopo y se distribuyen cerca de esta misma zona un máximo de 1,5 km hacia el N, se tomó como localidad tipo el Tajo Chopo dado que a escasos 50 metros al N en las coordenadas 272853 N / 420263 E se encuentran buenos afloramientos de esta unidad (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA). Los afloramientos de esta unidad por lo general corresponden con bloques superficiales de hasta 4 m de largo por 2 m de alto dispuestos en forma lajeada y levemente vesicular además de estar afectados por pseudolapiaz, estos corresponden con la parte superior de la unidad y dan apariencia de una colada blocosa en superficie también se encuentran paredes de roca de apariencia fresca de al menos 10 m de alto por 20 m de largo, en este tipo de afloramientos se encuentran comúnmente indicios de meteorización esferoidal y un lajeamiento de las rocas. En general se encuentran rocas sanas, con escasos signos de meteorización, patinas de alteración poco gruesas y rocas de gran dureza (Foto 56).



Foto 56. Bloques basálticos de la unidad basaltos cerro Chopo. Punto 273076 N / 420108 E.

Son rocas con textura afanítica porfirítica con fenocristales de olivino verdes poco alterados en una matriz gris claro sin vesículas. Contiene cristales de olivino de tamaños promedio entre los 1,2 mm y 1,5 mm por lo general bastante sanos, pocos fenocristales de plagioclasa, así como pocos piróboles dentro de la matriz. Microscópicamente el basalto presenta una textura hipocristalina con textura fluidal en la matriz y fenocristales de plagioclasa augita y ortosa además de una composición levemente vacuolar. Las rocas se clasifican como basalto latítico augítico (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA). Esta unidad presenta un espesor aproximado según interpretaciones y literatura consultada de entre 40 y 60 m, tales espesores máximos se encuentran cerca del foco de emisión que corresponde con el Cerro Chopo y representa un episodio fisural a temprana edad antes de la aparición del cono piroclástico y por lo tanto es la base de este. Se presume una edad pleistocénica o más joven a esta edad ya que corresponde con la parte superior de la secuencia observada en el área, sumado a esto Mora, (1977) le asigna una edad similar basándose en criterios similares (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

Presenta relaciones estratigráficas en la parte inferior con las Andesitas Pueblo Nuevo al este y los flujos no soldados del Río Magdalena al norte, así como un contacto superior con el cono piroclástico del cerro Chopo (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

2.7.3 Subunidad Piroclastos Cerro Chopo

Se ubican exclusivamente conformando el cerro Chopo en un área no mayor a 1 km², en las coordenadas 272726 N, 426226 E donde se ubicaron varios puntos en un afloramiento extenso correspondiente con un tajo del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, tal posee medidas de 200 m de largo y se evidencian cortes de cerca de 25 m de altura; también se cuentan con datos obtenidos de otro afloramiento en la carretera entre Cañas-Tilarán en el punto 272375 N / 41924 E, y de litología muy similar a la observada en el tajo. En general el afloramiento ubicado en el tajo se encuentra poco o nada alterado, esto en parte puede deberse a la intensa extracción de material de este para su utilización en caminos y otras obras de infraestructura en contraste el otro afloramiento observado muestra signos de alteración posiblemente debido a la vegetación presente en la zona. Consiste de una secuencia piroclástica tanto de oleada como de caída compuesta por tobas de lapilli gruesa (granos entre 2 - 5,5 cm) intercaladas con tobas de lapilli media-fina (grano entre 2 mm - 2 cm) y tobas de ceniza gruesas-medias (granos menores a 2 mm), todas ellas presentan bombas basálticas ocasionales tipo corteza de pan con tamaños variables entre los 6 cm y los 50 cm de diámetro, en la Foto 57 se observa un ejemplo de una de ellas (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).



Foto 57. Bombas basálticas encontradas en las paredes del tajo Chopo.

En la estructura de la secuencia se nota la gradación inversa de los piroclastos, así como también en ciertas zonas del tajo se pueden observar planos de estratificación medibles con dirección de buzamiento N10W/22° (Foto 58), pero tales ángulos se incrementan según la

altura debido a la cercanía con el centro de emisión. Se especulan varios focos de emisión esto en relación con las direcciones de inclinación de las capas de piroclastos a lo largo del afloramiento que van desde N20E (en el caso de los piroclastos de la carretera) hasta los N10°W de los del tajo (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

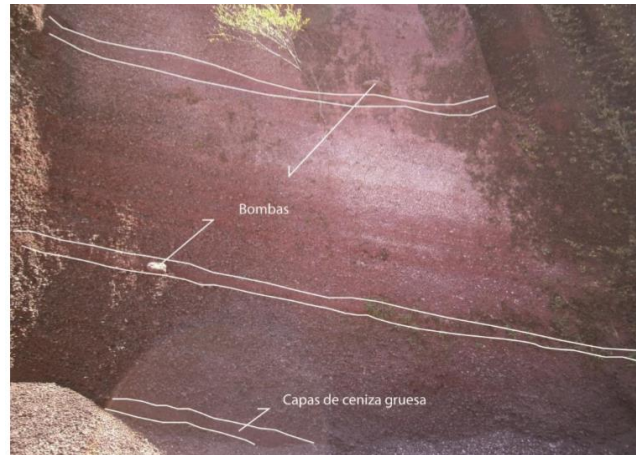


Foto 58. Gradación inversa, las capas marcadas constituyen las pocas capas de finos sobreyacidas por material grueso.

Se ubican contactos inferiores con los basaltos del Cerro Chopo, entre estos hay contactos quemados de al menos 30 cm de espesor con materia orgánica calcinada (truncos). No se encuentran relaciones superiores con ninguna unidad ya que esta corresponde con los eventos más recientes en el área de estudio. Al igual que los basaltos del cerro Chopo, los piroclastos se asocian a un origen fisural posterior a la expulsión de los basaltos, tal fisura se especula en una dirección aproximadamente N, dados los datos de esfuerzos regionales y fallamiento en el área. Al considerarse la unidad más joven en el área se le asigna una edad aproximada de pleistoceno inferior-medio, según dataciones hechas por Aiazzi (2004).

2.7.4 Subunidad piroclastos Quebrada Grande.

Se encuentra restringido a 2 afloramientos ubicados en las márgenes de las Quebradas, Grande, Chiquito y Cabra al SW de la ciudad de Tilarán. En las coordenadas 270114 N / 428112 E (Foto 59), aflora una secuencia de cenizas y lapilli interestratificados, los cuales presentan una inclinación hacia el N30W/32° (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).

De acuerdo a la columna tefraestratigráfica en la base se encuentra un toba de lapilli, de 150 cm de espesor en una matriz café claro, sus diámetros máximos son de 5 cm y medios de 0,5 cm. Con líticas de composición máfica, formas esferoidales, son equidimensionales y presencia de bombas ocasionales, sobreyacido por una toba de ceniza de un espesor de 25 cm, color gris claro, con líticas de composición máfica y cristales de plagioclasa. Su parte más superior se constituye por una toba de lapilli de 150 cm de espesor, la cual contiene varias laminaciones donde es posible diferenciar diversas potencias del evento debido a la gradación normal, sus constituyentes llegan a tener diámetros máximos de 2,5 cm (Práctica geológica 2013, inf. Interno AyA).



Foto 59. Afloramiento de piroclastos de oleada quebrada Grande.

2.7.5 Piroclastos Mata de Caña

Esta unidad se localiza “manteando” la topografía alta principalmente, corresponden a una secuencia de tefras, lapilli y predominantemente cenizas finas a medias (Bonilla et al. 2008). Muestra espesores máximos de toda la secuencia completa de aproximadamente 6 m (Fig. 6).

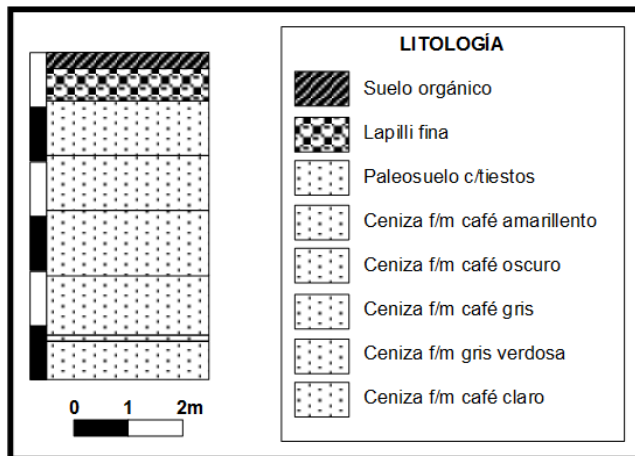


Fig 6. Columna de la Unidad Informal de Tetras Mata de Caña, a partir de los espesores máximos encontrados.

Descritas de la base al techo, la secuencia consiste en, una toba fina, de color café claro, poco consolidada, de aproximadamente 70 cm de espesor, puede presentar de manera muy localizada pequeños fragmentos de carbón de ~4 mm; sobreyaciéndola se encuentra una capa con poca continuidad lateral de ceniza gris verdosa, consolidada, de aproximadamente 10 cm de espesor como máximo, esta tefra es sobreyacida por una toba de ceniza media a fina, de color café grisácea consolidada de 1,10 m de espesor, contiene clastos esporádicos y redondeados de pómez de aproximadamente 1 cm de diámetro (Bonilla et al. 2008). Por encima de ésta, se localiza una capa de ceniza media a fina poco consolidada, de color café oscuro y aproximadamente 1,20 m de espesor como máximo, sobreyaciéndola se encuentra una capa de ceniza fina café-amarillenta muy alterada a arcilla, de aproximadamente 1 m de espesor. Posteriormente, sobre la misma, se localiza un paleosuelo de ceniza fina a media, de color negro poco consolidado, que presenta un espesor máximo de 1 m, y contiene trozos de carbón (2cm x 1,5 cm) que varían en porcentaje dependiendo de la localidad. En la localidad

de Mata de Caña, se presenta la mayor densidad de los mismos, y se localizan en los niveles medio y superior de esta capa de paleosuelo. Sobreyaciendo toda la secuencia anterior, se ubica una capa de lapilli fina no consolidada café oscuro de aproximadamente 60 cm de espesor, y finalmente sobre toda la secuencia anterior, se sitúa una capa de suelo orgánico de 30 cm de espesor que puede o no, estar presente a lo largo de la zona de estudio (Bonilla et al. 2008). En la zona sur del área de estudio, en el poblado de El Silencio (272141 N / 439071 E) esta unidad tiene un espesor mínimo de 2 cm, en el cual se identificaron 4 capas, una de estas correspondía a un horizonte de lapilli fino gris, el cual presenta en los cortes de carretera, un relieve negativo, lo que indica que en el momento que se depositó, lo hizo sobre una topografía irregular preexistente; localmente se presenta como una toba de lapilli de color café-naranja bien soldada en las coordenadas 272292 N / 438939 E (Bonilla et al. 2008).

2.8 Lavas, piroclastos y debris del Volcán Tenorio

En este apartado se incluyen los materiales igneos recientes asociados al volcán tenorio, estos materiales son descritos por Aiazzi (2004), y Civelli et al. (2005), donde se clasifican como lahares, lavas recientes, debris avalanche y debris flow. A continuación se describen estas subunidades.

2.8.1 Lavas del cerro Espíritu Santo

Están constituidas por coladas andesíticas de diferentes texturas, generalmente no se encuentran como afloramientos sino como bloques en los potreros y sectores escarpados (Civelli et al., 2005). Morfológicamente forman parte de los flancos de un antiguo volcán, en el cual todavía se reconocen los valles colgados y su flanco austral, debido a la formación de una estructura de colapso en su sector norte. Aunque petrográficamente sus lavas son andesíticas, se le asocia con la caldera de Guayabo, cuyo borde de colapso está constituido por lavas basálticas.

2.8.2 Paleolavas-Neolavas del volcán Tenorio y piroclastos de río Chiquito

Son Lavas y rocas piroclásticas asociadas al vulcanismo y macizo del volcán tenorio. En el mapa se incluye una subunidad que se refiere a depósitos piroclásticos que afloran cerca de

río Chiquito. Aflora principalmente en el flanco Sur del volcán Tenorio, y los depósitos piroclásticos (Tefras) de río Chiquito (Civelli et al., 2005).

2.8.3 Debris del volcán Tenorio

Chiesa et al. (1994), describe esta subunidad como depósitos epiclásticos presentes al suroeste del cono principal del volcán Tenorio, también descritos como Lahar del Tenorio, sin embargo se menciona por Civelli et al. (2005), la presencia de una topografía tipo hummocky en las cercanías de la Hacienda Tenorio, lo cual indica que se trató de un debris avalanche que probablemente por incorporación de agua o por la presencia de acuíferos en el flanco colapsado del volcán, se transformó en un debris flow. Su espesor se estima en cerca de 200 metros (Civelli et al., 2005)

2.8.4 Debris avalanche de La Fortuna

Al suroeste del cono principal del Miravalles se encuentran unos depósitos epiclásticos descritos como debris avalanche de la Fortuna (antiguamente como de San Bernardo), los cuales presentan cierta morfología asociada a hummockys en el sector de La Fortuna (Civelli et al., 2005). Este debris aflora entre la caldera de Guayabo, el cerro del Espíritu Santo y la plana de Casa Vieja Norte. Su espesor se estima en cerca de 100 metros (Civelli et al., 2005)

2.9 *Depósitos Cuaternarios*

Los depósitos cuaternarios definidos en toda la zona de estudio, se pueden asociar a varias génesis y restringir a ciertas ubicaciones espaciales, durante la Práctica geológica-AyA (2013), y la Práctica geológica-AyA (2014), se indican diferentes tipos de depósitos cuaternarios dentro de los cuales se hace mención a terrazas fluviales, terrazas aluviales, aluviones recientes y depósitos antropogénicos.

2.10 Contexto estructural de la zona de estudio

De manera regional la geodinámica en la Cordillera de Tilarán se relaciona con tres fases tectónicas; la fase I producto de la colisión entre la placa Norteamericana y la Placa Suramericana origina un eje compresivo NW-SE, que se traduce con fallamiento intenso lateral con componente inversa o normal.

El fallamiento transtensivo NW-SE con componente inversa, origina el ascenso de los magmas del Grupo Aguacate, con un estilo de volcanismo fisural, explosivo o lávico (Mioceno Superior, Plioceno Inferior). El arribo de la dorsal semejante a la Cocos (Mioceno-Plioceno), generó un cambio en la dirección de esfuerzos principal a un sentido N-S, lo que se refleja en la intrusión de diques basálticos con rumbo NNW-SSE. Posteriormente al cesar la compresión N-S, se reinstaura la fase de deformación I, con el mismo rumbo de compresión NW-SE, el cual origina la intrusión de masas principalmente granodiríticas a través de los fallamientos transtensivos normales con componente lateral diestra (Villegas, 1997).

En el Plioceno inferior y Superior la convergencia entre las placas Norte y Sur disminuye, dando paso a la fase II, que genera una reorganización de los esfuerzos, provocando la reinstauración de la compresión E-W, existente antes del Mioceno Superior, caracterizada por un fallamiento principalmente lateral con componente inversa o normal. En esta etapa se origina un vulcanismo sumamente explosivo y heterogéneo, el cual da paso a la extrusión de un “plateau” lávico denominado Formación Monteverde a través de fallamientos transténsiles con sentido E-W. Con el arribo de la dorsal de Cocos hace aproximadamente un 1 m.a, pone fin a este proceso.

La tercera fase con la arribo de la Dorsal de Cocos imprime un nuevo estilo de fallamiento con una compresión sentido NNE-SSW, con fallamientos laterales, conjugados diestros y siniestros y el cese del vulcanismo dentro de la Cordillera. Actualmente la región se encuentra en un estado de quiescencia sísmica (Villegas, 1997).

Montero & Denyer (2011), han descrito un arreglo de fallas neotectónicas en la península de Nicoya, donde en la parte central de la península predominan bloques limitados por fallas de

desplazamiento de rumbo dextral con rumbo N-S, dentro de las cuales se reconocen fallas sinestrales de rumbo E-NE, oblicuas sinestrales-inversas con rumbo E-W e inversas con rumbo NW.

Este arreglo de fallas y las relaciones espaciales entre los diversos tipos de fallas, se explican por traslación al norte de la península y la transrotación que ocurre dentro de los bloques (Montero & Denyer, 2011).

Montero & Alvarado (1988), indican la presencia de un importante sistema de fallamiento en la zona de Bagaces y alrededores, el cual tiene un rumbo de N-S de tipo normal y con una componente de rumbo dextral, la cual influye en el ascenso de magma en algunos focos subterminales. Según Montero & Alvarado (1988), este fallamiento se encuentra asociado al graben La Fortuna-Peje, y a estructuras profundas más intensas levantadas a modo de pequeños horst. A esta falla se le asocian los terremotos de 1935 y 1941 de Bagaces.

Montero & Alvarado (1988), indican además que el fallamiento N-S implica un desplazamiento morfológico en la zona de la Caldera de Guayabo, y además el graben de La Fortuna se podría extender hasta las inmediaciones del centro de Bagaces, donde existen fallas normales y fracturas con rumbo NNE-SSW y algunas N-S, este fracturamiento podría conformar el término austral relativo del graben y se asociarían estas fracturas con posibles fallas antitéticas.

Fernández et al., (1997), indican la presencia de un fallamiento orientado en sentido noroeste paralelo al Embalse Arenal, las cuales tienen una longitud variable entre 10 y 20 km.

Climent et al., (2003), consideran la presencia de 4 grandes fallas locales activas de gran relevancia para la región Chorotega, a saber: Falla Chiripa, Falla Cote-Arenal, Falla Bagaces y Falla Caño Negro.

Regionalmente en el sector Este del área de estudio se encuentran la falla Chiripa, la cual es una falla de rumbo NNW de unos 20 km de longitud, ubicada al suroeste del lago de Arenal. Además la Falla Cote-Arenal, es una falla de traza semi-curvilínea con rumbo NW-SE hasta WNW- SSE que se extiende por más de 20 km con el bloque sur descendido (Climent et al., 2003).

En el área de estudio predomina un régimen compresivo en sentido NNE-SSW. Este sentido de compresión se evidencia en el campo en los pares conjugados, los cuales a ser analizados sugieren este sentido preferencial. Sin embargo esta dirección de compresión no se experimenta en toda el área de estudio, debido al efecto de rotación que experimenta la zona.

Este efecto de rotación ha sido descrito por Montero & Denyer (2011) en el cual fallas dextrales con sentido N-S producen un régimen transrotacional en los bloques internos con una rotación alrededor de un eje vertical en el sentido de las manecillas del reloj. El acomodo de los bloques internos se evidencia con las fallas sinestrales en sentido NE-SW, las cuales permiten que los bloques se desplacen y se ajusten a la rotación. Esta rotación provoca que en el la zona norte se experimente un efecto de tensión, por lo que ocurren fallamientos normales con buzamientos hacia el sur, produciendo así un medio graben en la zona norte del área de estudio. Aiazzi et al (2004), indica la existencia de una serie de fallas dentro del área de estudio, tales fallas según la Práctica geológica-AyA (2014), corresponden bien con los alineamientos observados en ríos y la topografía. La mayoría de los fallamientos son de movimiento lateral con componentes verticales.

Durante la Práctica geológica-AyA (2014), se analizó como el fracturamiento observado en la zona de bagaces y alrededores es más importante en el sentido de la compresión, y es posible notarlo en la rosa de rumbos (Fig. 7), donde el 14 % de las fracturas medidas presentan un rumbo de 30 a 40°azimut, además de otras con rumbo entre 0 y 80° azimut, las cuales son producto del fallamiento sinestral predominante en la zona.

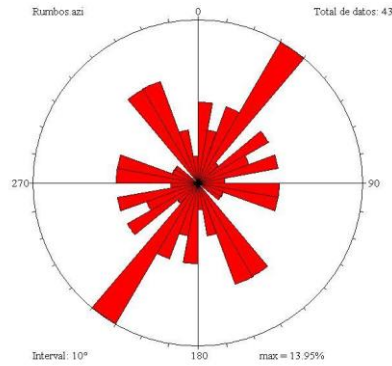


Fig. 7. Rosa de rumbos de las fracturas observadas en el campo.

También hay presentes fracturas con rumbos entre 320 y 340 azimut, las cuales pueden corresponder con el fallamiento dextral-normal observado en Finca Gaviota en la zona suroeste de de Bagaces. En cuanto a las direcciones de buzamientos de estas fracturas y fallas, son predominantemente hacia el NW, tal y como se muestra el rosa de buzamientos (Fig. 8), no obstante hay direcciones de buzamiento en todo sentido.

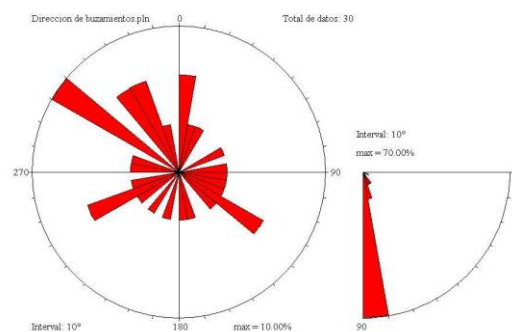


Fig. 8. Rosa de buzamientos de fracturas observadas en el campo.

Finalmente en donde sí se marca una tendencia clara es en el ángulo de buzamiento, el cual se encuentra entre el rango de 80 y 90° en 70% de los datos tomados, y que corresponde muy claramente con el fallamiento de rumbo predominante en la zona.

3 CLIMATOLOGÍA

3.1 *Datos climatológicos*

La región Pacífico Norte es una de las zonas más secas y cálidas del país. Se caracteriza por un periodo seco que va de diciembre a marzo. En este periodo precipita un 4% del total de lluvia anual. El Alisio es el viento dominante. Abril es un mes de transición y en mayo se establecen las lluvias alrededor de la tercera década del mes. El primer periodo lluvioso se da entre mayo y agosto cuando precipita el 50% del total de lluvia anual. En junio ocurre el primer máximo de lluvia, al intensificarse los vientos suroeste, que provocan fuertes tormentas locales y fuertes aguaceros. Entre julio y agosto, los vientos Alisios vuelven a intensificarse y como consecuencia se presenta el veranillo del Pacífico o canícula. Un segundo periodo lluvioso se extiende desde setiembre hasta noviembre. Durante setiembre y octubre se produce el mayor aporte de lluvia, asociado con una mayor influencia de eventos ciclónicos. El 46% de la lluvia anual, precipita en este segundo periodo lluvioso. Noviembre es un mes de transición hasta el periodo seco. En general, presenta promedios de lluvia anual entre 1500 y 2500 mm (APÉNDICE 1).

Las temperaturas máximas durante el día pueden promediar 33°C, mientras durante la noche la temperatura puede ser de 22° (Cuadro 1).

Cuadro 1. Promedios de Temperatura Mensual (°C)
 ESTACION: 76055 HACIENDA MOJICA IMN
 LATITUD: 10°27'09''N, LONGITUD:85°09'54''O
 ALTITUD: 40 msnm
 PERIODO: 2000-2013

Mes	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura media (°C)
Enero	24,5	31,5	27,5
Febrero	24,8	32,6	27,9
Marzo	25,0	33,6	28,5
Abril	25,4	34,7	29,2
Mayo	24,4	34,0	28,1
Junio	24,0	32,6	27,4
Julio	23,9	32,2	27,4
Agosto	23,4	32,5	27,0
Setiembre	23,0	32,2	26,6
Octubre	22,9	31,4	26,0
Noviembre	23,2	31,2	26,6
Diciembre	23,8	31,3	27,1

3.2 Estaciones meteorológicas

La zona de estudio de acuerdo a la división hidrometeorológica del Instituto Meteorológico Nacional, donde se encuentran dos estaciones automáticas.

- Estación Hacienda Mojica, número 76055, ubicada entre las coordenadas Lat.10°27 N, Long. 85°09W, a una elevación de 40 msnm, con información desde el año 1999 al 2013 (Foto 60).



Foto 60. Estación Mojica

3.3 Aforos Diferenciales.

En la zona de estudio se realizaron un total de 121 aforos diferenciales en los principales ríos de Cañas, y 165 aforos diferenciales en Bagaces. Estos aforos se efectuaron con una distancia promedio de 500 m entre cada punto, según las condiciones encontradas.

Estos aforos se realizaron en los meses de setiembre-octubre-noviembre-Diciembre 2013, enero-febrero-marzo-abril-mayo-junio y julio 2014, para un total de 286 aforos diferenciales.

Para realizar las medidas de la velocidad del flujo de agua en los ríos estudiados se usaron los molinetes tipo Pigmeo y el Price tipo AA, que sirve para determinar la velocidad de la corriente en canales abiertos, arroyos, ríos, mares y tuberías de circulación forzada.

Los ríos que se aforaron fueron: Río Piedras y afluentes, Río Blanco y afluentes, Quebrada Cofradía-Río Montenegro-Río San Jerónimo, Río Paso Ancho y sus afluentes, Río Estanque-Río Bagaces, Río Cacao-Río Magdalena, Río Santa Rosa y sus afluentes y Sección Baja del Río Cañas.

Las mediciones de caudal se realizaron en secciones que reunían las siguientes condiciones:

- Velocidades paralelas en todos los puntos y que formen ángulo recto con la sección transversal.
- Lecho del río uniforme y estable.

El comportamiento de influencia y efluencia, se trabajó en cada punto de aforo con un error de instrumentación de +/- 5%. En la Fig. 9, se muestra el análisis de cada río aforado (APÉNDICE 2).

3.4 Pruebas de Infiltración.

Para determinar la conductividad hidráulica de la zona no saturada en el área de estudio, se realizaron pruebas de infiltración en el suelo mediante la metodología del doble anillo concéntrico o también conocida como metodología de Müntz (Custodio y Llamas, 1988), la forma en la que se llevaron a cabo estas pruebas de infiltración siguió la metodología establecida por el Área Funcional de Hidrogeología la cual se muestra en el Cuadro 2, Las Fotos 61, 62 y 63 representan un ejemplo de una prueba de infiltración en cada una de las zonas de estudio.

Cuadro 2. Metodología para la elaboración de pruebas de infiltración.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	DURACIÓN
Ubicación de las pruebas de infiltración en cada una de las zonas de estudio.	1- Definir la ubicación espacial donde se realizarán las diferentes pruebas de infiltración dentro de la cuenca según los objetivos del estudio. Se buscan sitios que no tengan alteraciones antrópicas como remoción del suelo, rellenos artificiales, compactaciones del suelo etc.	10 a 30 minutos.
Equipo de campo	Los equipos de campo necesarios para la elaboración de las pruebas de campo se compone de los siguientes instrumentos: <ol style="list-style-type: none"> 1. Juego de anillos. 2. Recipientes con agua. 3. Mazo. 4. Cronómetro. 5. Libreta de campo. 6. Nivel. 7. Pala 8. Regla. 	10 a 30 minutos
Instalación de los anillos	1- Se localiza un sitio bastante representativo en el campo según las coordenadas establecidas por el profesional a cargo. 2- Debido al objetivo fundamental asociado con la elaboración	10 a 30 min (dependiendo del acceso al sitio)

	<p>de las pruebas de infiltración en esta zona de estudio, el cual radica en la determinación de la recarga potencial de acuíferos en la zona, la instalación de los anillos se realiza en la superficie topográfica tal y como se encuentra de forma natural, pues se pretende medir la capacidad de infiltración de una zona tal y como la precipitación interacciona con la superficie.</p> <p>3- Se coloca el cilindro más grande sobre el suelo y se golpea con el mazo sobre un trozo de madera de tal manera que se inserte de manera homogénea en el suelo, hasta que profundice 15 cm.</p> <p>4- Luego se centra el anillo pequeño dentro del más grande y se procede de la misma forma (El golpe debe ser uniforme sobre los anillos para evitar que la penetración en el suelo sea distinta y por ende la infiltración vertical del agua no sea homogénea)</p>	
Aplicación del agua en los anillos	<p>1- Se coloca una regla en el anillo interno para llevar el control del descenso del agua.</p> <p>2- Se llena con agua primero el anillo externo, para que este genere una barrera o bulbo de infiltración y así el agua que infiltra mediante en el anillo interno descienda verticalmente.</p> <p>3- Luego se llena el interno de 0 cm (nivel del suelo) hasta 7,5 cm, a partir de este momento inmediatamente se inicia la toma de medidas de descenso del agua, hasta que el nivel descienda a los 2,5 cm. El volumen de agua contenido en el anillo externo y en el anillo interno debe ser el mismo, al igual que el nivel de referencia al iniciar las medidas. Esto conlleva a una infiltración homogénea verticalmente, sin que se forme una cortina horizontal en el suelo e influya en el descenso de los anillos.</p> <p>4- Una vez iniciada la prueba se llevan a cabo la toma de medidas por un tiempo de 2 horas, se deberán de tomar los datos con un cronómetro según los intervalos establecidos (Metodología de mínimos cuadrados).</p>	2 horas
Cálculo de la velocidad de infiltración	<p>1- Una vez tomados los datos, procesados en oficina y analizados por el profesional responsable se procede a ingresarlos a la hoja electrónica, denominada "Tabla para cálculo mínimos cuadrados para pruebas de infiltración" donde se determina la velocidad de infiltración en cm/min a partir del valor de infiltración estabilizado.</p> <p>2- Con estos valores se forma un gráfica, en la cual los valores de infiltración acumulados se colocan en el eje y los del tiempo acumulado en el eje x.</p> <p>3- Una vez establecida la gráfica se corrobora el dato de la tabla y además se analiza la tendencia de la gráfica.</p> <p>5- A partir de este procedimiento se adquiere el valor de velocidad de infiltración cm/min el cual es igual a la permeabilidad cm/min.</p>	15-30 min.



Foto 61. Prueba de infiltración llevada a cabo en la zona de Cañas



Foto 62. Prueba de infiltración llevada a cabo en la zona de Bagaces.



Foto 63. Prueba de infiltración llevada a cabo en la zona Intermedia. (Alrededores de Tierras Morenas).

En total se realizaron 352 pruebas de infiltración en toda la zona de estudio siguiendo la metodología anteriormente descrita, en la zona definida como “Bagaces” se llevaron a cabo 114 pruebas de infiltración, en la zona de “Cañas” se hicieron 103 pruebas de infiltración, en la zona intermedia compuesta por la “cuenca media del río Tenorio” se realizaron 57 pruebas de infiltración y en la zona de “Tierras Morenas” se llevaron a cabo 78 pruebas de infiltración.

Los resúmenes de estas pruebas de permeabilidad se muestran en el APÉNDICE 3.

3.5 Clasificación de Suelos.

Las muestras de suelo del tipo “inalteradas” fueron recogidas por medio de tubo shelby de PVC de 2” cuando era posible, sin embargo, la mayoría de la recolección de este tipo de muestras fue realizada por medio de la extracción de un cubo de suelo (de unos 10 x 10 x 15 cm), el cual era retirado cuidadosamente por medio de macana o cuchillo, posteriormente era etiquetado (Ensayo de porosidad) y era envuelto con papel encerado, luego con papel aluminio y con cinta adhesiva y finalmente los cubos eran colocados en una hielera de forma ordenada para evitar golpes de las muestras que llegaran a provocar su desintegración.

Las muestras del tipo “alteradas” fueron recogidas por medio de 3 bolsas plásticas de 3 kilos cada una, en cada una fue colocado aproximadamente 2 kg de material de suelo removido, el mismo era recogido por medio de una pala pequeña y dispuesto en cada una de las bolsas, las cuales fueron doblemente reforzadas para evitar ruptura, posteriormente las bolsas eran rotuladas (1. Ensayo de granulometría, 2. Ensayo de límites de Atterberg y 3 Capacidad de campo y punto de marchitez).

Ensayo de CC y PM, respectivamente) con etiquetas dentro y fuera de las bolsas, estas últimas llevaban cinta adhesiva para evitar humedad. Finalmente, las bolsas eran dispuestas en bolsas de mayor tamaño de forma ordenada.

Para cada una de las 110 muestras “inalteradas” fueron aplicados los ensayos ASTM D854 (Gravedad específica) y ASTM D7263 (Densidad aparente ó peso específico aparente). Por su parte, para dos de las bolsas de cada muestra fueron aplicados los ensayos de

Granulometría (AASHTO T 27/11) y Límites de Atterberg (AASHTO T 89/90). Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de la empresa CACISA. Por último, el material de suelo de la bolsa restante utilizado para aplicar los ensayos de Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez (PM), realizados por el laboratorio del INTA.

A continuación se muestran las Fotos de la 64 a la 71 que resumen el proceso de muestreo en campo:



Foto 64. Identificación y selección del sitio de muestreo junto con personal del AyA.



Foto 65. Selección de horizonte de muestreo.



Foto 66. Extracción de muestra inalterada.



Foto 67. Protección de muestra inalterada.



Foto 68. Rotulación de muestra inalterada.



Foto 69. Remoción de muestra alterada.



Foto 70. Recolección en bolsas de muestra alterada.



Foto 71. Rotulación de muestra alterada.

Los resultados de este muestreo se presentan en el APÉNDICE 4.

3.6 Estimación de la recarga mediante balance hídrico de suelos

Para esta estimación de recarga potencial se utilizó la metodología de Schosinsky (2006), la cual se obtiene mediante un balance hídrico de suelos.

El balance consiste en determinar la lluvia que recarga el acuífero, a partir de la parte de lluvia infiltrada, y que una vez completado su ciclo en el suelo se convierte en agua de percolación. Este método contempla varios parámetros (meteorológicos y los propios del suelo) los cuales se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 3: Parámetros necesarios para la metodología de Schosinsky (2006)

Datos necesarios	Fuente de los datos
Capacidad de infiltración Factor por infiltración	Pruebas de infiltración en campo
Capacidad de campo Punto de marchitez Densidad del suelo Humedad de suelo inicial	Análisis de muestras de suelo
Profundidad de raíces	Observación en campo y uso de suelo
Factor por pendiente	Modelo de elevación digital y reclasificación
Factor por vegetación	Uso de suelo y reclasificación
Precipitación media mensual	Datos IMN
Evapotranspiración potencial	Metodología de Hargreaves y Samani (1985)

Los valores de la evapotranspiración potencial utilizados se calculan a partir de los datos de la estación meteorológica Mojica (Cuadro 4).

Cuadro 4: Valores de ETP, según metodología de Hargreaves y Samani (1985).

Meses	Temperatura promedio (°C)	ETP (mm)
Enero	27,5	112,50
Febrero	27,9	116,4
Marzo	28,5	147,73
Abril	29,2	154,86
Mayo	28,1	156,75
Junio	27,4	139,56
Julio	27,4	141,68
Agosto	27	148,96
Setiembre	26,6	141,79
Octubre	26	133,48
Noviembre	26,6	117,53
Diciembre	27,1	112,80

A partir de la geología de campo se delimitaron 46 unidades para las cuales se determinó la recarga potencial. El cálculo se resume en el APÉNDICE 5.

3.7 Estimación de la extracción de aguas subterráneas y superficiales

El cálculo de extracción de agua subterránea se realiza a partir del inventario del Registro Nacional de Concesiones de Aprovechamiento de Aguas de la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) (incluye concesiones otorgadas, solicitudes nuevas y prórrogas en trámite, concesiones canceladas y solicitudes de amnistía). El Cuadro 5 muestra el resumen del caudal extraído. A partir de estos datos, se toma en cuenta el caudal explotado por los pozos (349,21 l/s) y manantiales (193,155), y su uso.

Se incluye también el dato del caudal de uso de fuerza hidráulica. Se aclara que estos caudales son derivados del complejo hidroeléctrico Arenal-Corobici-Sandilla por el ICE y algunas hidroeléctricas privadas (Cuadro 5). Posteriormente parte de este caudal es aprovechado por SENARA y otros usuarios para proyectos de riego (caudal contabilizado nuevamente en el apartado "ríos").

Cuadro 5: Estimación de extracción (l/s)

Tipo	Nacientes	Pozos	Ríos	Fuerza hidráulica	Total
Acueducto	160,91	268,71	36	0	465,62
Agroindustrial	0	0	1507,2	0	1507,2
Agropecuario	6,735	2,6	7330,02	0	7339,355
Comercial	1,18	1,25	0	0	2,43
Consumo Humano	3,505	15,62	2,57	0	21,695
Fuerza hidráulica	0	0	0	138943	138943
Industrial	0,08	41,84	7,16	0	49,08
Riego	16,275	14,13	79598,49	0	79628,895
Turístico	4,47	5,06	0,05	0	9,58
Total	193,155	349,21	88481,49	138943,00	227966,855

En el APÉNDICE 6 se presenta la hoja electrónica utilizada en el cálculo de los balances hídricos de suelos.

4 HIDROGEOLOGÍA

4.1 Características Hidrogeológicas.

Con base en la información de la geológica local, la información de los pozos de la Base del SENARA, del AyA y lo observado en el campo, fue posible definir un modelo hidrogeológico conceptual para las formaciones existentes en la zona (Fig. 10).

Se elaboraron cuatro perfiles hidrogeológicos (Fig. 11), donde se pudo definir lo siguiente:

1. Perfil “A-A”:

Se presenta una secuencia de aluvión, seguida por Flujos no soldados de Bagaces (tobas), posteriormente por los Flujos soldados de Bagaces (ignimbritas) y por último el Grupo Aguacate.

Dentro secuencia se pueden diferenciar cuatro acuíferos: A. Acuífero Aluvional, donde el nivel se oscila entre los 5 m de profundidad, se caracteriza por ser un Acuífero Libre. B. Acuífero de Flujos no soldados de Bagaces (tobas), donde el nivel oscila entre los 15 y 25 m de profundidad, se caracteriza por ser un Acuífero Libre. C. Acuífero de Flujos soldados de Bagaces (ignimbritas), se caracteriza por ser un acuífero confinado y por último D. Acuífero Grupo Aguacate, por ser un acuífero confinado (en algunos sectores) como lo muestran algunos pozos con surgencia.

2. Perfil “B-B”:

La secuencia está constituida por tobas, ignimbritas y lavas pertenecientes a los Flujos soldados de Bagaces y se caracteriza por ser un acuífero libre. Dentro de esta secuencia se encuentran depósitos fluviales antiguos muy localizados.

3. Perfil “C-C”:

Se encuentra constituido por tobas, pertenecientes a los Flujos no soldados de Bagaces y se caracteriza por ser un acuífero libre. Se da la presencia de un lacustre. Se observa que ambas secuencias son cortadas por un cono volcánico correspondiente a la Subunidad de Andesitas Pueblo Nuevo y el basamento constituido por lavas del Grupo Aguacate.

4. Perfil “D-D”:

Se encuentra constituido por los flujos soldados, lacustre, flujos no soldados y las lavas del Grupo Aguacate.

Se procedió a realizar una discriminación de los pozos por acuífero con el objetivo de definir las direcciones de flujo de los acuíferos en estudio donde se indica lo siguiente:

A. Acuífero Aluvial, tiene una dirección de flujo hacia el suroeste y tiene un gradiente hidráulico de $5,22 \times 10^{-4}$.

B. Acuífero Flujos no Soldados, tiene una dirección de flujo hacia el suroeste y tiene un gradiente hidráulico entre $2,7 \times 10^{-3}$ y $2,1 \times 10^{-2}$.

C. Acuíferos Flujos soldados, tiene una dirección de flujo hacia el sur y tiene un gradiente hidráulico entre 0,01 y $9,3 \times 10^{-4}$. La Transmisividad de este acuífero es de $78 \text{ m}^2/\text{d}$.

D. Acuífero Grupo Aguacate, tiene una dirección de flujo hacia el oeste franco y tiene un gradiente hidráulico entre $1,1 \times 10^{-2}$ y $9,0 \times 10^{-4}$.

En el APÉNDICE 7, se muestra la Base de datos empleados para el correspondiente modelo conceptual.

4.2 Técnicas para detección de Arsénico en roca y suelo.

Se emplearon tres técnicas especializadas para la detección de Arsénico en suelos y rocas en el Laboratorio y además se implementó el uso de un equipo portátil de Fluorescencia de Rayos X para análisis de Arsénico en rocas y suelos en el campo, las cuales se describen a continuación:

4.2.1 Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X (XRF):

Se recolectaron un total de 50 muestras en roca en la zona de estudio y fueron procesadas por el Laboratorio CICANUM, de la Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares.

Es una técnica de análisis con carácter no destructivo que permite la determinación cualitativa y la concentración absoluta (% o mg/kg (ppm)) de los elementos químicos que conforman una determinada matriz. Los elementos detectados dependen del número atómico, de la energía del irradiador propio del tubo de rayos X y una cantidad mínima detectable propia del sistema y del tipo de muestra analizada (CICANUM, 2014).

La identificación de los elementos encontrados en una matriz se logra por fenómeno de fluorescencia de los rayos “X”, en cual consiste en la emisión de rayos “X”, característicos de cada uno de los elementos que han sido ionizados internamente por la radiación electromagnética. La irradiación con el tubo de rayos “X” de plata (Ag) permite ionizar internamente los elementos que se encuentran dentro de un rango de energías que varía entre 1.5 Kev (Al K α) y 19.6 kev (Mo K β), incluyendo el arsénico (As K α =10,53 kev y As K β =11.72 kev).

Los rayos X son detectados y contados en un sistema de espectroscopia basado en un analizador multicanal que discrimina por energía y forma un espectro de fotopicos independientes, cuya energía identifica el elemento y su intensidad es proporcional a su concentración medida en % en mg/kg (ppm).

La emisión de rayos “X” se presenta únicamente durante el tiempo en que la muestra seleccionada es sometida a la irradiación de un tubo de rayos “X”. Esta irradiación no

modifica ni la estructura ni la composición química de la matriz, por lo que la muestra analizada permanece inalterada luego de la irradiación. Esta condición no destructiva caracteriza la Florescencia de Rayos “X”.

La concentración de cada elemento es proporcional a la intensidad de cada fotopico pero sus valores finales dependen de la comparación con el material de referencia, cuya matriz sea semejante o igual al tipo de muestra analizada. En fluorescencia de rayos “X” esta condición se logra cuando la relación entre la radiación primaria dispersada por la muestra (radiación Compton) y la no dispersada (radiación Rayleigh), sea semejante entre la muestra y el material de referencia.

4.2.1.1 Muestras de suelos

Las muestras valoradas en el presente análisis corresponden a rocas localizadas en las zonas de Cañas-Bagaces y sus alrededores (Fig. 12). Se presentan adecuadamente pulverizadas hasta una malla 100. Cada muestra solo se homogeniza, sin alterar su estructura ni ser sometida a ningún proceso químico previo. De cada muestra se conforman tres pastillas de 1 g cada una, con el fin de obtener los resultados en promedio y su desviación estándar respectiva. Cada pastilla, identificada siguiendo el código señalado, se somete a irradiación de una fuente primaria de rayos “X” y a conteo de la radiación característica de cada elemento lo que conforma un espectro de rayos “X”.

4.2.1.2 Sistema de irradiación y conteo

El sistema de irradiación consiste en una configuración que está definida por un tubo de rayos “X” Mini-X de Amptek que opera entre 10 KV – 40 KV y entre 5 μ A – 200 μ A, con un blanco de plata (Ag) cuya radiación impacta la muestra con un ángulo de 132.5°.

La radiación característica de cada uno de los elementos que forman la matriz estudiada así como la dispersión (Compton y Rayleigh), de la radiación primaria se recibe en un detector XR-100 CR marca Amptek, acoplado a un procesador digital con fuente de poder. La señal

se recoge en una computadora en la cual se opera el programa ADMCA para desplegar el espectro de rayos “X”.

4.2.1.3 Análisis Cualitativo y Cuantitativo

En cada espectro de rayos “X” dispersivo en energía se identifican los fotopicos correspondientes a los elementos respectivos. Su identificación se opera únicamente con la correspondiente energía de emisión de los rayos “X” propios de cada elemento, caracterizados por las emisiones $K\alpha$ y $K\beta$, esta última con una intensidad 10 veces menor que la primera, ya que en algunos elementos no es observable.

Para cuantificar los elementos de interés, se requiere contar un material de referencia apropiado y relacionado con el tipo de muestra estudiada. Para el presente estudio de muestras de roca, se utiliza el estándar del Organismo Internacional de Energía Atómica, identificado SL-1, que es apropiado para el análisis de arsénico presente en suelos y rocas.

Adicionalmente, el material de referencia, permite calcular la CMD (Cantidad Mínima Detectable) del sistema de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos “X”, para el tipo de muestra analizada. Esta cantidad significa que el sistema de rayos “X”, solo permite analizar concentraciones de los elementos, que sean superiores a esta cifra, pero no puede observar el fotopico respectivo, ni calcular concentraciones inferiores a esta cifra.

Para el caso concreto del Arsénico, su cantidad mínima detectable corresponde a 12 mg/kg (ppm), lo que significa que el sistema analiza solo cantidades superiores a esta cifra. Los datos se muestran en el APÉNDICE 8 y Fig 12.

4.2.2 Difracción de rayos “X” en roca pulverizada

Se efectuaron un total de 50 muestras en roca y fueron procesados por la Escuela de Química, de la Universidad de Costa Rica.

La Difracción de Rayos “X” (DRX) en polvos fue utilizada para analizar la composición mineralógica de muestras de suelos (n=5). El equipo utilizado fue el D8 Advance marca

Bruker. El equipo realiza barridos en 2θ de 5° a 65° con un incremento de $0,017^\circ$ por paso y una velocidad por paso equivalente de 584s. Para la comparación e identificación de minerales presentes en las muestras, se utilizó la base de datos de difracción de rayos-x en polvos PDF-2 del 2007 ICDD, International Centre for Diffraction Data.

Los datos se muestran en el APÉNDICE 8 y Fig. 12.

4.2.3 Espectrofotómetro de Absorción Atómica

Se efectuaron un total de 50 muestras en suelo y fueron procesadas por los Laboratorio Aqylasa y Agrotec.

Las determinaciones se efectuaron con un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Analytik Jena Zeenit 700 P con microcomputador, corrector de fondo incorporado Se utilizó horno de grafito de plataforma, a temperatura estabilizada, Automuestreador y corrector por efecto Zeeman. Las condiciones para el análisis y los programas de temperatura para cada elemento se encuentra documentado en el Software del equipo. La concentración de cada metal se expresa en $\mu\text{g/L}$ obtenida a partir de la curva de calibración.

Las disolución estándares para la obtención de las curvas de calibración se prepararon a partir de disoluciones madre de $100 \pm 3 \text{ mg/L}$, preparadas por dilución de disolución patrón, J.T. Baker trazable a la NIST con una concentración de $1\ 000 \pm 1 \text{ ppm}$ en medio de HNO_3 al 5 % (grado trazas). Todos los patrones y las muestras se prepararon con agua destilada La Curva de Calibración se preparo utilizando estándares: As, (5,0, 10,0 20, 50,0) $\mu\text{g/L}$.

4.2.3.1 Parte experimental

1. La muestra de suelo es secada a una temperatura no superior a $40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, hasta masa constante, constituyendo lo que se denomina “suelo seco al aire”. Las ventajas de usar el suelo seco al aire consisten en que generalmente posee un contenido de humedad óptimo para manipularlo y procesarlo, Air –dry loss.

El secado de la muestra se puede realizar a temperatura ambiente

2. La muestra de suelo para el análisis una vez que se llevo a cabo el método de cuarteo para homogenizarla, se separa y se tamiza a las mallas de un tamizador con los siguientes números de malla seleccionados: 35, 50, 120 y 200, se tomo como base 1 kg de suelo seco.

3. Una vez obtenida la fracción fina se pesa 0.2500 g de suelo de malla 200, se agregan 6 mL HNO₃ 65% libre de metales (Fluka) y 4 mL de peróxido de hidrogeno.

La digestión de las mismas se hace en un horno de microondas por 30 min.

La solución resultante se diluyó a 50 mL con una solución de HNO₃ al 1% en agua desionizada. Se hacen un duplicado y un blanco. El % de recobro se determinó preparando una solución estándar de concentración conocida a la cual se le realizo el mismo procedimiento que a las muestras.

La concentración de Arsénico se expresa en mg/kg obtenida a partir de la curva de calibración.

Los datos se muestran en el APÉNDICE 8 y Fig. 12.

4.2.4 Equipo Portátil de Fluorescencia de Rayos X

Los equipos portátiles de campo para el análisis de rocas y suelos con tecnología de Fluorescencia de Rayos X, “XRF” (Foto 72); son equipos de alta tecnología implementados en la investigación geológica para determinación de Arsénico insitu y elementos químicos asociados.

Estos equipos, una herramienta sumamente importante pues debido a su capacidad analítica de espectrometría por fluorescencia de rayos X, además de su resistencia para uso en el campo y su fácil portabilidad por su tamaño y peso, podrá brindar cientos de ensayos en rocas y suelos por día, con una fiabilidad analítica garantizada. Los equipos de análisis XRF proporciona una herramienta de alta potencia en la cual puede visualizar en tiempo real la composición química elemental de las rocas y suelos, proporciona además la seguridad de tener información de alta calidad y certeza con respecto a información proporcionada por análisis de laboratorios, con la ventaja de que con los equipos XRF se obtiene de forma más veloz y eficiente para la toma de decisiones de gran importancia en proyectos de índole ambiental geológico.



Foto 72. Equipo Portátil de Fluorescencia de Rayos “X” y su uso en el campo

En el APÉNDICE 8, se muestran los datos adquiridos en el campo y en la Fig. 12, su ubicación espacial.

5 HIDROGEOQUÍMICA

Se caracterizaron las aguas subterráneas, manantiales y aguas superficiales a partir de las concentraciones de los iones mayores y los elementos traza incluyendo arsénico, para tratar de determinar su posible relación con el medio geológico y explicar el origen del arsénico en el agua de consumo humano.

5.1 Metodología para el muestreo y análisis de aguas

Se realizaron dos muestreos durante el 2014 en la red definida para tal fin. El primero en febrero, los sitios muestreados fueron 12 pozos de agua fría, 2 pozos de agua termal, 7 manantiales fríos y tres manantiales termales y 5 ríos. En el segundo muestreo se analizaron 12 pozos de agua fría, 2 de agua termal, 6 manantiales de agua fría, 7 manantiales termales, 5 ríos, la ubicación de la muestras se presenta en la Fig. 13 y APÉNDICE 9. Las muestras fueron recolectadas por personal del CICA de la Unidad de Muestreo y del Laboratorio Nacional de Aguas del AyA.

Se calculó la electroneutralidad (E.N.) o balance de error para determinar la calidad de los datos y los que superaron el 15% no fueron usados para la clasificación en Piper. Los análisis de laboratorio de las muestras de aguas fueron realizados en los laboratorios de Calidad de Aguas del CICA-UCR y en el Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

$$\text{EN. (\%)} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} * 100$$

En cuanto a la toma y preservación de las muestras se realizó el procedimiento sugerido por (Mc Cleskey et al., 2004). Las muestras de agua se filtraron para remover la mayor parte de material coloidal y microorganismos que puedan afectar la relación As (III)/As (V). Se utilizaron filtros con membranas de 0.45 µm de acetato de celulosa Sartorius Stedim Biotech Minisart. Las muestras para metales se acidificaron para prevenir la oxidación y precipitación de hidroxíóxidos de Fe y Mn que pueden coprecipitar y/o adsorber el As; y en general para

preservar el estado de valencia original de los metales. Cada muestra para arsénico fue acidificada con 500 μL de ácido nítrico ultrapuro Ultrex-II al 70%. Se utilizaron botellas oscuras de polietileno para evitar la fotoreducción del Fe (III) la cual tiene a su vez efecto sobre la reducción del As (III) en presencia de luz. La especiación en campo se realizó a través de filtros descartables de arsénico (Arsenic Speciation Cartridges) los cuales se muestra en la Foto 73, estos dispositivos contienen un material adsorbente que retiene el As (V) y no adsorbe el As (III), por eso se llenaron dos botellas en el campo, una filtrada (As III) y otra sin filtrar (As total), luego por diferencia se calculó la concentración de As (V). Finalmente las muestras fueron refrigeradas aproximadamente a 4 grados Celsius hasta su análisis.



Foto 73 Muestreo de agua usando filtros descartables para especiación del arsénico

En el campo se midieron los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, alcalinidad.

Para la determinación de parámetros físico-químicos in situ, todos los equipos se calibraron previamente, empleando las siguientes disoluciones certificadas: pH 4,0; pH 7,0; pH 10,0; disolución de sulfito de sodio (cero oxígeno), disolución ORP 240 mV y disolución de conductividad 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para medir la temperatura se utilizó un termómetro electrónico RURACO con un rango de -40 a 232 $^{\circ}\text{C}$. Se utilizó también un medidor multiparamétrico

marca Hanna H198129 con sensor de temperatura, conductividad y pH; dispositivo de campo marca ProfiLine pH 3210 WTW, electrodo para pH y ORP marca SenTix (mV); oxímetro marca YSI 550 A.

La alcalinidad se determinó volumétricamente mediante su valoración con ácido clorhídrico (HCl) a una concentración conocida expresada en mol/L en dos pasos, el primero con el indicador fenolftaleína hasta su decoloración y el segundo con el indicador anaranjado de metilo.

Los análisis realizados se resumen en el Cuadro 6. Los análisis de laboratorio de las muestras de aguas fueron realizados por el CICA-UCR y el Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados, la Foto 74 muestra los tipos de botella y el etiquetado usado en el campo para identificar las muestras de agua.

Se instalaron dos colectores de agua de lluvia en la zona. Los análisis se realizaron en los laboratorios de Calidad de Aguas del CICA y del Laboratorio Nacional de Aguas del AyA. Se tomaron muestras con duplicado para los análisis de arsénico totales.



Foto 74. Tipo de embase y etiquetas usadas para identificar las muestras en el campo

Cuadro 6. Resumen de los parámetros analizados en las muestras de agua según el laboratorio

CICA	AyA
Iones mayores (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , NH_4^+)	Color aparente, conductividad, dureza de Ca, dureza total, pH, temperatura, turbiedad, alcalinidad
As total en muestra filtrada y muestra sin filtrar	Ca, K, Na, SO_4 , Cl, F, PO_4 , Mg, Ni, NO_3 , NO_2
Elementos traza: Al, Fe, Mn, U, Zn, Cu, Sb, Cd, Co, V, Pb, Ni, Se, Sn, Ag, Cr, Hg, Si	(HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , As, Al, Sb, Cd, Cu, Cr, F, PO_4 , Fe, Mg, Mn, Hg, Ni, NO_3 , NO_2 , Pb, Se, Zn)**

** Solo determinado en los sitios muestreados en febrero, 2014

La metodología analítica utilizada para el análisis de las aguas es la siguiente¹:

- Nitritos (MAQA-03): la concentración de nitrito en agua se determinó por espectroscopia molecular visible. Para ello se utilizó sulfanilamidiazotada y N-(1-naftil)-etilendiamina que forman un complejo coloreado rosa en un medio ácido con el pH entre 2,0 y 2,5. Se midió la absorbancia del complejo a 541 nm para su cuantificación por medio de la ley de Lamber-Beer.
- Fósforo total (MAQA-01): la concentración de ortofosfato en agua se determinó por espectroscopia molecular visible. Para ello se usó ácido molidofosfórico como cromogénico que se reduce con cloruro de estaño para formar en medio ácido un complejo coloreado azul intenso, cuya absorbancia se midió a 541 nm para su cuantificación por medio de la ley de Lamber-Beer.
- La determinación de arsénico total y otros elementos traza en aguas (As, Al, Fe, Mn, U, Zn, Cu, Sb, Cd, Co, V, Pb, Ni, Se, Sn, Ag, Cr, Hg), se efectuó mediante la técnica de espectrometría de plasma inductivamente acoplado con detector de masas (ICP-MS), en el cual la muestra es introducida al plasma por nebulización neumática a través de una cámara de rocío. El aerosol de la muestra es llevado al centro del plasma

¹ Métodos de Análisis Químico Ambientales (MAQA) del CICA-UCR, realizados de acuerdo con: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21a. Edición 2005. Prepared and Published jointly by: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Managing Editor Mary Ann H. Franson. American Public Health Association, Washington.

de argón de alta temperatura donde la muestra es atomizada e ionizada para producir una nube de iones cargados positivamente. Los iones extraídos son identificados y cuantificados mediante un analizador de masas cuadrupolo, que puede barrer todo el rango de masas y realizar un análisis multielemental. El resultado obtenido se comparó con las rectas de calibración para obtener la concentración de los diferentes elementos en la muestra. El límite de detección de la técnica utilizada para la determinación de As total es $0,33\mu\text{g/L}$. En muchas de las muestras analizadas el resultado fue el límite de detección, por lo tanto no puede asumirse una concentración entre 0 y ese valor, el contenido para esos lugares se tomó como 0.

- Determinación de aniones por cromatografía iónica (MAQA-20): Las concentraciones de aniones se determinaron por cromatografía aniónica. Este método se basa en la migración diferencial de los analitos a través de una columna mediante un flujo a presión. Se cuantifican las concentraciones de fluoruro, cloruro, bromuro, nitrato, fosfato y sulfato. Se usa aminometano (pH 4) o una columna Metrosep A Supp 5 100/4,0 mm (cromatografoMetrohm) con una fase móvil $3,2\text{ mmol}$ de Na_2CO_3 y $1,00\text{ mmol}$ de NaHCO_3 , los aniones se separan por diferencia de carga y también de peso molecular y son detectados mediante la diferencia producida en la conductividad de la respectiva fase móvil.
- Determinación de sodio y potasio por Fotometría de Emisión de Llama (MAQA-31): La cuantificación de la concentración de sodio y de potasio se realizó por fotometría de emisión de llama con longitud de onda seleccionada a 589 nm y a $766,5\text{ nm}$, respectivamente. La muestra se atomiza en una llama para que se lleve a cabo la excitación en condiciones cuidadosamente controladas y reproducibles. La línea espectral es aislada por medio de la utilización de filtros y la intensidad de la luz es proporcional a la concentración del elemento según la ley de Lamber-Beer.
- Determinación de amonio (MAQA-38): Determinación de la concentración de amonio mediante espectroscopia de absorción molecular, mediante la generación de un complejo coloreado azul intenso, el indofenol, en medio básico con hipoclorito y

fenol, reacción catalizada por el nitroprusiato de sodio. Este compuesto tiene un máximo de absorción a 640 nm.

- Determinación de sílice (MAQA-14): La concentración de silicatos en medio acuoso se realizó por espectroscopia de absorción molecular, mediante la generación de un complejo coloreado con molibdato de amonio en medio ácido a pH = 1,2. Para evitar la interferencia del fosfato, se añadió ácido oxálico. El complejo coloreado amarillo absorbe a 410 nm y la concentración se determinó en una curva de calibración de acuerdo con la ley de Lambert-Beer.
- Sólidos totales (MAQA-16): la cantidad de materiales sólidos, disueltos, en suspensión o dispersos, se determinó gravimétricamente, con la diferencia de masa de un papel de filtro a través del cual se hizo pasar la muestra.
- Determinación de calcio por valoración con AEDT (MAQA-09) y Determinación de dureza total por valoración con AEDT (MAQA-10): la concentración de calcio, de magnesio y los valores de dureza total, cálcica y magnésica, se determinaron volumétricamente mediante una valoración con una disolución patrón de ácido etiléndiaminotetra acético (AEDT). El resultado se expresa en términos de miligramos de carbonato de calcio por litro. El AEDT actúa como un quelante ante el Ca^{2+} y el Mg^{2+} . Se puede diferenciar entre ambos cationes controlando el pH del medio pues en medio básico, el magnesio precipita como hidróxido. El punto final de la valoración se detecta con la murexida, que vira de rosado a púrpura.

5.2 Resultados

Se realiza un análisis comparativo de los resultados del primer muestreo realizado en febrero y el de julio del 2014.

5.2.1 Iones mayores

En la Fig. 14, se observan los grupos predominantes de agua según su contenido de iones mayores en la zona de estudio en los dos muestreos (Cuadro 7). Las aguas se pueden clasificar como bicarbonatadas cálcico-sódicas-magnésicas, bicarbonatadas sódico-cálcicas, sulfatadas cálcicas y cloruradas sódicas. Además se identifica una zona de mezcla entre las aguas bicarbonatadas.

Cuadro 7. Tipos de agua según los iones mayores disueltos en aguas

Grupos identificados	Tipo de agua	Códigos de los sitios
Grupo I	Bicarbonatada cálcico-magnésica	Man-05, TM-1, PZ-03, Man-06, CS-108, CS-151, PZ-RE-01
Grupo II	Bicarbonatada sódica	Man-01, Man-02, CS-79, CS-99, ME-251
Grupo III	Sulfatada cálcica o magnésica	Man-09, Man-08
Grupo IV	Clorurada sódica	Man-10, Man-11
Grupo V	Mezcla	ME-308, PZ-RE-02, TE-79, TE-80, ME-257, CS-153, Man-07, Man-08, Man-11

El agua de todos los pozos es de tipo bicarbonatado cálcica o sódica, o tienen una mezcla de ambos cationes, estas aguas se interpretan como aguas de origen meteórico. La mayor parte de las aguas de los manantiales son de tipo bicarbonatadas, solo cuatro manantiales tienen agua tipo sulfatada cálcica o clorurada sódica, tres de ellas son de origen termal (Man-09, Man-10 y Man-11 son aguas termales).

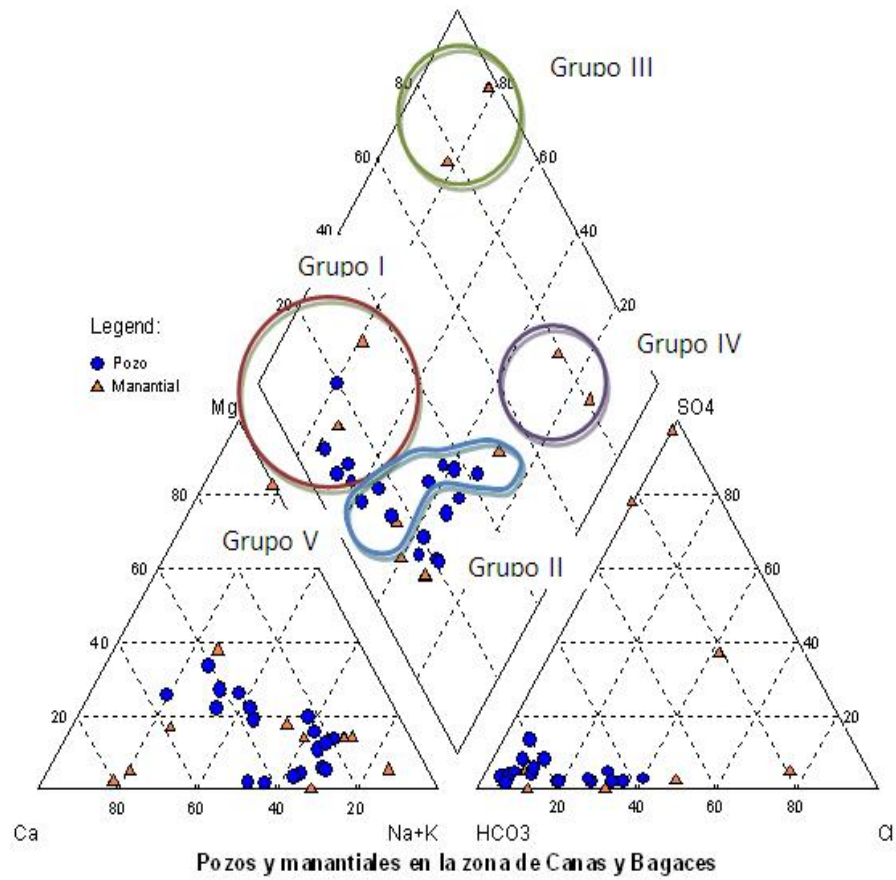


Fig. 14. Ubicación de muestras de agua subterránea de pozos y manantiales en el Diagrama de Piper. Se graficaron únicamente las muestras que tienen E.N. <15%.

5.2.2 Arsénico en el agua

La Fig. 15, muestra las concentraciones de arsénico para muestras seleccionadas de febrero y julio, se observa que las mayores concentraciones corresponden con las muestras de agua de la Q. Salitral, el Manantial MAN-10 y el MAN-11.

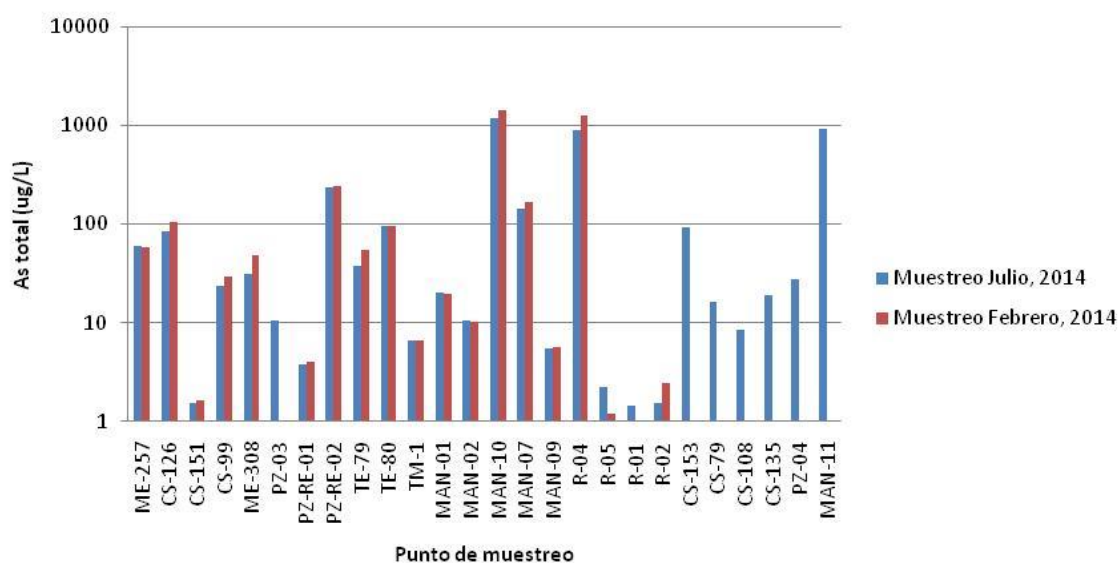


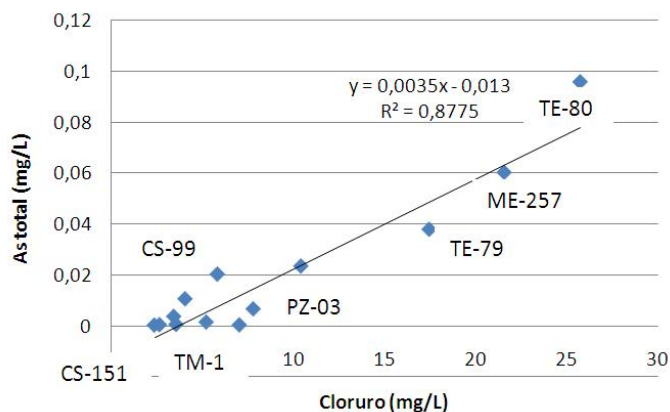
Fig. 15. Comparación de las concentraciones de arsénico total para muestras seleccionadas.

La muestra Man-11 se localiza en los alrededores de La Gotera en Cañas en un manantial termal, que tiene unos 7 metros de diámetro con desprendimiento de gases en el centro (Alvarado, 2008), dicho autor reportó una temperatura hacia los borde del manantial de 50 grados Celsius, lo cual se constató en el muestreo de julio 2014, donde se midió una temperatura de 49,8 grados C. Este sitio se caracteriza por la presencia de travertino en los alrededores. Alvarado (2008) recomienda estudiar esta zona con fines geotérmicos.

Se determinó una correlación positiva entre las concentraciones de cloruro vs arsénico total para muestras seleccionadas de manantiales y pozos (Fig. 16A y B). Esta condición se atribuye a que estas aguas han circulado en zonas donde hay influencia termal, característica que es muy común en la zona de estudio debido al fallamiento activo y al gradiente geotérmico regional.

Se graficaron los resultados de bicarbonato vs arsénico para el primer muestreo (Fig. 17), sin embargo no se observó ninguna correlación significativa, por lo que se considera que el agua que tiene concentraciones de arsénico considerables son aguas que tienen mayores tiempos de residencia que las meteóricas (Grupo I y II).

A)



B)

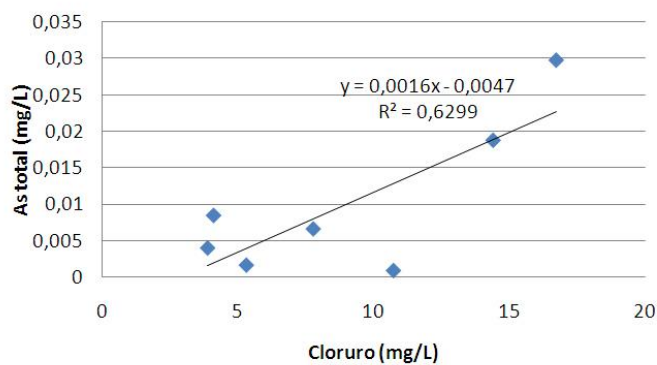


Fig. 16 Concentraciones de cloruro vs arsénico total para muestras seleccionadas de manantiales y pozos. A) Datos del primer muestreo realizado en febrero del 2014, B) Datos del segundo muestreo, julio, 2014.

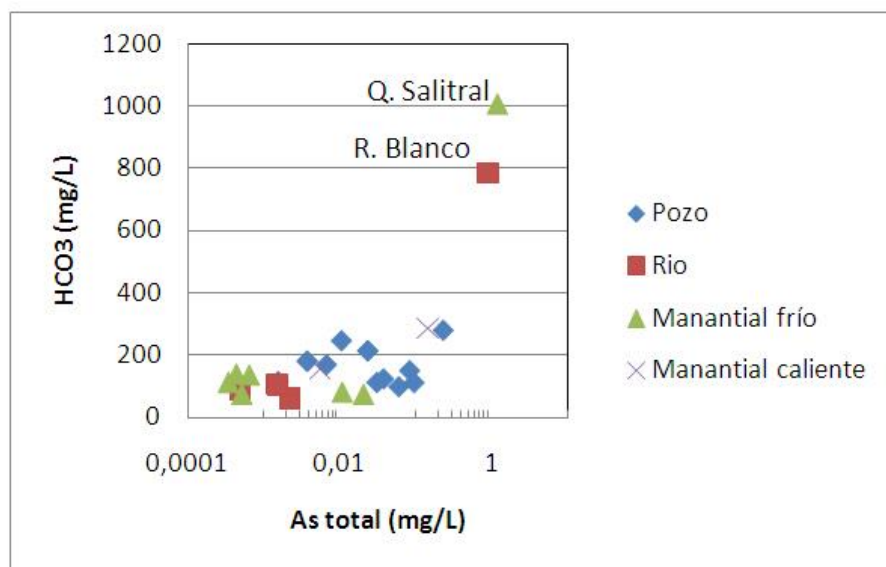


Fig. 17 Bicarbonato vs arsénico total para los resultados del muestreo de julio, 2014.

Tal y como se indica en el Cuadro 8 y se muestra en la Fig. 18, varias muestras de agua presentan temperaturas superiores a los 28 grados, la cual se puede explicar por el fallamiento activo existente como lo evidencian las muestras de los sitios ME-308, TE-79, TE-80, los cuales se localizan cerca de la falla propuesta por Montero & Alvarado (1988) que originó el terremotos de Bagaces en 1935 y 1941. Los manantiales Man-9 y Man-10 y los pozos PZ-03, PZ-RE-01 y PZ-RE-02 también se localizan en zonas de fallas o bien coinciden con lineamientos (Fig. 13).

Cuadro 8. Arsénico vs temperatura para sitios seleccionados del muestreo de febrero, 2014.

Código	Temperatura	Arsénico total
	°C	mg As/L
ME-308	29.3	0.031033
PZ-03	28.4	0.010614
PZ-RE-01	28.4	0.003749
PZ-RE-01	28.4	0.003754
PZ-RE-02	40	0.2319
TE-79	30.3	0.037943
TE-80	29.3	0.095817
MAN-01	30.3	0.020364
MAN-02	30.3	0.010671
MAN-10	46.7	1.188
MAN-07	34.2	0.1435
MAN-09	34.2	0.005545

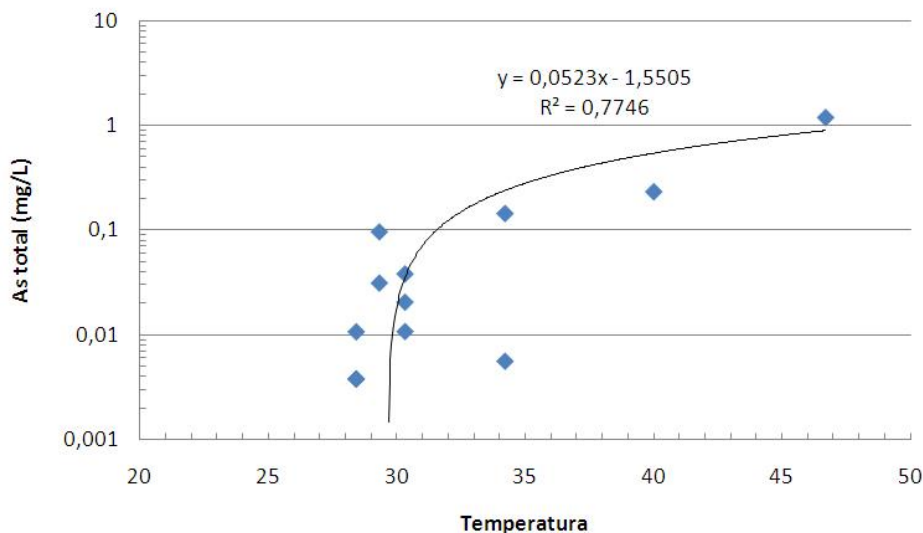


Fig. 18. Correlación entre la temperatura y la concentración de arsénico total para muestras seleccionadas.

En cuanto a la especiación del arsénico realizada en el campo se determinó que en general predomina el As (V) en más del 95% de las muestras analizadas (Fig. 19), a excepción de dos muestras, la Man-10 y la Q. Salitral. La muestra Man-10 tiene una proporción de aproximadamente de 1:1 de arsénico III y V y esta agua es termal. La Q. Salitral tiene también influencia termal según las concentraciones de iones disueltos, contenido de STD, conductividad eléctrica.

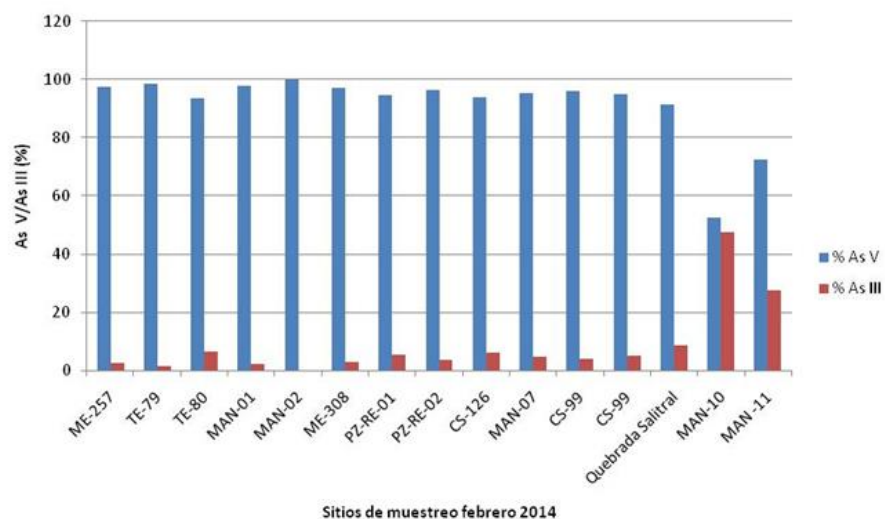


Fig. 19. Distribución porcentual de las especies Arsénico (As III y As V)

6 INVENTARIO DE POTENCIALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN

El suelo es una mezcla compleja natural de elementos (minerales, agua, aire, vacíos, organismos, entre otros). Debe entenderse como uso del suelo, aquel que los seres humanos hacen de la superficie terrestre, el cual abarca la gestión y modificación del medio ambiente natural, para convertirlo en un ambiente construido. Por ejemplo, campos de sembradío, pasturas y asentamientos humanos, entre otros. Se puede definir también, como las acciones, actividades e intervenciones que las personas realizan sobre un determinado tipo de superficie de relieve, para producir algo en ella, modificarla o mantenerla; se habla entonces también, de uso actual del suelo, pasado o futuro.

Hay que tener claro que las actividades de uso que se desarrollan sobre el suelo, pueden ser tanto puntuales como areales, por lo tanto, esto es un aspecto a considerar, ya que una actividad extensiva, si es bien llevada, puede que no tenga incidencia negativa en el suelo o en el agua subterránea, mientras que una actividad puntual, puede que sea responsable de ser un gran foco de contaminación.

En este sentido, un inventario y clasificación sistematizada de los usos del suelo, constituyen una práctica fundamental, en la búsqueda del origen de ciertos contaminantes en el medio hidrogeológico, para mediante la correlación de este levantamiento, con otros factores, como geología, muestreo de suelos, muestreo de calidad de aguas, análisis petrográficos e hidrogeoquímicos; pueden ser insumo por ejemplo, descartar si la procedencia del Arsénico es natural (geológica), o es ocasionada por la incidencia del hombre sobre el terreno.

Para hacer el inventario, idealmente se debe contar con un registro minucioso de todas las actividades de uso desarrolladas sobre el suelo (APÉNDICE 10).

En conclusión, durante el 2014 se levantaron 124 puntos de control de campo en Cañas, 117 en Bagaces y 93 en la zona intermedia que se ubica entre estas dos áreas (Fig. 20). Donde los usos actuales del suelo muestreados en la zona de estudio, corresponden en general a las siguientes categorías:

- Ganadería (de ovejas, vacas, cerdos)
- Agricultura (zonas de cultivos)
- Piscicultura
- Pastos
- Bosques
- Tacotales
- Urbano
- Botaderos de basura
- Cementarios
- Tajos
- Minas
- Zonas de estibo, almacenamiento, parqueo de vehículos pesados, contenedores o maquinaria
- Suelos descubiertos (excepto tajos, minas, zonas de estibo y zonas de cultivos cosechados y retirados).
- Industrias

A partir del levantamiento de fuentes potenciales efectuado, se indica que no se asocian al uso de compuestos que contienen arsénico.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En la zona de estudio se determinó la presencia de 9 formaciones geológicas, las cuales se indican a continuación de más antigua a más reciente:

A. Formación Barra Honda, corresponde con rocas de tipo sedimentario de ambiente marino profundo.

B. Grupo Aguacate, corresponden en su mayoría con rocas antiguas de origen ígneo de tipo efusivo compuestos por lavas y brechas volcánicas.

C. Formación Bagaces (Flujos soldados y Flujos no soldados), corresponden con mega eventos explosivos de origen volcánico con presencia de ignimbritas y tobas de diferentes composiciones, además de paleosuelos calcinados y depósitos fluviales antiguos intercalados entre las subunidades que las componen.

D. Formación Río Liberia, corresponden con tobas de ceniza con presencia de micas, anfíboles y cuarzo principalmente, con materiales retrabajados localmente.

E. Formación Guayabo, corresponden con varios eventos explosivos conformados por tobas de cenizas, pómez y líticos procedentes de una antigua estructura volcánica al norte de la zona de estudio.

F. Formación Monteverde, son lavas recientes, lahares y depósitos de piroclastos presentes en el sector noreste de la zona de estudio.

G. Lavas y Piroclastos del Cerro Chopo, esta formación se encuentra asociada a un magmatismo monogenético compuesto por secuencias piroclásticas de cenizas, escoria, bombas y lavas blocosas

H. Lavas y piroclastos del volcán Tenorio, constituido por depósitos magmáticos efusivos recientes, con presencia de avalanchas volcánicas, flujos de barro y coladas de lava de tipo blocosa.

I. Depósitos Cuaternarios, consisten de terrazas fluviales-aluviales, y aluviones recientes generados por procesos de arrastre y depositación de los ríos y quebradas de la

zona, además de travertinos formados debido a procesos hidrotermales. Se incluyen dentro de este grupo los depósitos antropogénicos generados recientemente por actividades mineras en la zona.

2. La Unidad de Flujos Soldados Bagaces, se caracteriza por estar influenciado por la presencia de la Falla Bagaces, que tiene un desplazamiento dextral con componente normal, a la cual se encuentran asociados varios sistemas de fallas sinestrales con rumbo NE-SW y que atraviesan esta unidad de Flujos Soldados Bagaces y la unidad subyacente del Grupo Aguacate, se debe indicar que en estas trazas de estas fallas se encuentran evidencias de hidrotermalismo y concentraciones altas de arsénico en el agua subterránea muestreada como lo son los sectores de Aguacaliente y Santa Isabel.

3. En cuanto al sistema de fallamiento N-S, se asocia a la presencia de un graben tectónico denominado La Fortuna-Peje, el cual se extiende desde el poblado de Guayabo hasta el norte de Bagaces y en algunos sectores continua hasta la unidad de Flujos soldados de Bagaces, donde se muestran fuentes termales alineadas en dirección N-S, con concentraciones altas de arsénico en el agua subterránea muestreada, como es el caso de la zona de Aguacaliente.

4. Al sur de la ciudad de Cañas, se presentan fuentes termales alineadas con concentraciones altas de arsénico en el agua subterránea muestreada, debido a las fallas (N-S) que atraviesan las rocas del Grupo Aguacate y que generan hidrotermalismo con depósitos de travertinos.

5. La precipitación anual correspondiente al período de 1991 al 2014 es de 1321,5 mm, la cual fue registrada en la Estación Mojica. En cuanto a la Evapotranspiración anual fue determinada a partir de la Metodología Hargreaves y Samani (1985), la cual fue de 1624,05 mm.

6. La zona de estudio presenta un caudal de recarga de 6824,16 l/s, el cual fue estimado mediante el método de Balance Hídrico de suelos, donde se elaboró un balance para cada una de las 46 unidades litológicas. Las Formaciones con mayor recarga son: Aluviones recientes: 1133,57 l/s, Flujos soldados Bagaces: 797,09 l/s, Debris del Volcán Tenorio: 551,658 l/s, Flujos pumíticos nos soldados de Bagaces: 506,015 l/s y Subunidad Andesitas Pueblo Nuevo: 497,177 l/s. Estas 5 formaciones corresponden al 51,07 % de la recarga total, las restantes 41

unidades litológicas corresponden con el 48,93% de la recarga total las cuales cubren un área mayor.

7. En la zona de estudio se estimó una descarga de: nacientes en concesión 193,155 l/s, pozos 349,21 l/s, lo cual equivale a un 7,94 % del volumen de la recarga total.

8. A partir de los aforos diferenciales realizados en los principales ríos de la zona de estudio, y asociado al comportamiento estructural, se comprobó que las fallas geológicas son uno de los principales factores que regulan el comportamiento de influencia o efluencia de los ríos. Otro factor que determina la influencia o la efluencia son los contactos litológicos debido a los cambios de permeabilidades de las unidades geológicas.

9. A partir del análisis hidrogeológico de los perfiles realizados se han diferenciado cuatro acuíferos:

A. Acuífero Aluvional, donde el nivel se encuentran a los 5 m de profundidad, se caracteriza por ser un acuífero libre. Presenta una dirección de flujo hacia el suroeste y tiene un gradiente hidráulico de $5,22 \times 10^{-4}$.

B. Acuífero de Flujos no soldados de Bagaces (tobas), donde los niveles se encuentran entre los 15 y 25 m de profundidad, se caracteriza por ser un acuífero libre. Dentro de esta secuencia se encuentran depósitos fluviales antiguos muy localizados. Presenta una dirección de flujo hacia el suroeste y tiene un gradiente hidráulico entre $2,7 \times 10^{-3}$ y $2,1 \times 10^{-2}$.

C. Acuífero de los Flujos soldados de Bagaces, se caracteriza por ser un acuífero confinado y tiene una dirección de flujo hacia el sur y tiene un gradiente hidráulico entre 0,01 y $9,3 \times 10^{-4}$. La Transmisividad de este acuífero en los pozos estudiados es de $78 \text{ m}^2/\text{d}$.

D. Acuífero Grupo Aguacate, es un acuífero confinado (en algunos sectores) como lo muestran algunos pozos con surgencia. Presenta una dirección de flujo hacia el oeste franco y tiene un gradiente hidráulico entre $1,1 \times 10^{-2}$ y $9,0 \times 10^{-4}$.

10. Se realizó un muestreo de 50 sitios en rocas en diferentes formaciones geológicas, con el método de Difractometría de rayos X, de las cuales solo 5 muestras presentan minerales asociados al arsénico, los cuales son:

A. Sulfuro de Arsénico (AsS) asociado a procesos hidrotermales, arcillas, carbonatos (travertinos) y rocas asociadas con potencial aurífero.

B. Oropimente (As_2S_3), generado por procesos hidrotermales y por sublimación de emanaciones volcánicas, posiblemente transportado a la zona de estudio por procesos de arrastre.

C. Arsenolita (As_2O_3), mineral secundario formado por oxidación de otros minerales de arsénico, y posiblemente transportado y depositado por procesos de erosión.

D. Claudetita (As_2O_3), mineral secundario formado por oxidación de minerales de arsénico y procesos hidrotermales.

11. En cuanto a la metodología de Fluorescencia de rayos X, se realizaron en 50 muestras de rocas de las cuales 4 de ellas presentan concentraciones altas de arsénico que varían entre 35 ppm y 4715 ppm, asociando según el levantamiento de campo a sitios con presencia de fallamiento activo, hidrotermalismo, depósitos de travertinos y rocas asociadas con potencial aurífero.

12. Se recolectaron 50 muestras de suelo para ser analizadas usando un espectrofotómetro de absorción atómica para determinar arsénico, de los cuales 23 valores reportados varían entre 0 y 0,05 mg/kg; 24 muestras presentan valores entre 0,05 y 7,3 mg/kg; y solo 3 muestras con reportan valores superiores a los rangos anteriores, la muestra de mayor concentración se encuentra en los alrededores del poblado de La Gotera con un valor de 36 mg/kg de suelo seco.

13. Se efectuó un levantamiento en la zona de estudio de 334 puntos de fuentes potenciales de contaminación, que asociadas a las cuatro técnicas para la cuantificación de arsénico se pudo definir que el sitio de mayor relevancia son las rocas asociadas con potencial aurífero en la zona de Líbano, con valores que varían entre 114 y 2826 ppm.

14. Las aguas subterráneas de pozos y manantiales en la zona de estudio se clasifican como bicarbonatadas cálcico-sódicas-magnésicas y bicarbonatadas sódico-cálcicas, principalmente, a lo que se atribuye un origen meteórico. Las aguas de los manantiales termales se clasifican como sulfatadas cálcicas y cloruradas sódicas, las cuales se localizan en zonas de falla y lineamientos estructurales.

15. Algunos pozos privados usados para consumo humano tienen concentraciones mayores a 10 µg/L, por lo que están excediendo la normativa nacional para consumo humano, esta situación ya les fue comunicada a los dueños para que tomen las medidas correctivas adecuadas.

16. Los mayores valores de arsénico en agua se encuentran en muestras de manantiales termales localizados en zonas de fallas geológicas, además considerando los resultados de los análisis de arsénico en suelos y las características hidrogeoquímicas de las aguas se propone un origen natural del arsénico en el agua subterránea.

17. En más 95% de las muestras analizadas la especie dominante de arsénico en agua es As (V), sin embargo en dos muestras termales la concentración de As (III) es superior al 30 % del arsénico total.

18. Basados en los estudios geológicos, estructurales, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, realizados en la presente investigación, se indica que la presencia del arsénico en las aguas subterráneas, tiene su origen asociado a los diferentes sistemas de fallas geológicas que se encuentran atravesando las secuencias litoestratigráficas, a procesos de hidrotermalismo y a rocas asociadas con potencial aurífero.

19. Debido a las condiciones particulares de tipo geológicas, estructurales, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas se indica:

“Que en la zona de estudio delimitada en la Fig.1, que dada las características particulares de la zona y en aras de evitar un impacto negativo a la salud, el interesado deberá realizar dentro de la Solicitud de perforación y concesión de aguas subterráneas, ante Dirección de Agua-MINAE, un análisis de la calidad del agua incluyendo el arsénico. Si su uso es de consumo humano, deberá cumplir con el Reglamento de Calidad de Agua Potable (Decreto 32327-S),

publicado en la Gaceta 84, del 3 de mayo del 2005, donde su valor es de 10 µg/l, de superar este valor el pozo no será autorizado. De cumplir con la norma, deberá presentar al Ministerio de Salud de la zona más cercano (Decreto 32327-S), cada tres meses un análisis de calidad incluyendo el arsénico, asegurando la calidad del agua del pozo”.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIAZZI, D., FIORLETTA, M., CIVELLI, G., CHIESA, S. & ALVARADO, G.E., 2004: Geología de la Hoja Cañas. - Rev. Geol. Amér. Central, 30: 215-223.
- ALVARADO, G.E., KUSSMAUL, S., CHIESA, S., GILLOT, P.-Y., WÖRNER, G. & RUNDLE, C., 1992: Cuadro cronoestratigráfica de las rocas ígneas de Costa Rica de Costa Rica basado en dataciones radiométricas. -j. South Amer. Earth Sci. 6(3): 151-168.
- ALVARADO, I., 2008: Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente. 335 pags. Edit. UNED.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION, 2005: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21a. Managing Editor Mary Ann H. Franson. American Public Health Association, Washington.
- ANDREAS, D., 2005: The Bagaces Formation in the Guanacaste Province, Costa Rica; Refined stratigraphy and petrology. Kiel, Germany, Diplomado Aleman, IFM-GEOMAR.
- BONILLA, M., CALDERÓN, M., CAMACHO, J., DELGADO, C., MONGE, M., MORA, M., ROJAS, M., SALAZAR, J., SANABRIA, I., SÁNCHEZ, D., ULLOA, A. 2008: Diagnóstico geológico del Sector NW del Lago Arenal. Módulo 1 Geología. - 62 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- CARMONA, T., & CHAMORRO, C., 2013: Informe Práctica geológica 2013: Cuenca río Santa Rosa y parte media de la cuenca del río Cañas, Guanacaste.- AyA Informe interno, 75 pp.
- CHAVES, R. & SÁENZ, R., 1974: Geología de la cordillera de Tilarán (Proyecto Aguacate, 2a fase).- Dirección de Geol. Minas y Petról., San José, Inf Téc. Notas Geol. 12(53):11-49.

- CHIESA, S., 1991: El Flujo de Pómez Biotítica del Río Liberia (Guanacaste), Costa Rica.-
Rev. Geol. Amér. Central, 13: 73- 84.
- CHIESA, S., CIVELLI, G., YVES, P., MORA, O., & ALVARADO, G. 1992: Rocas
piroclásticas asociadas con la Formación de la Caldera de Guayabo, Cordillera de
Guanacaste, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 13: 73- 84.
- CHIESA, S., CORELLA M., & MORA, O., 1987: Geología de la Meseta ignimbrítica de
Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica. ICE, Proyecto geotérmico Miravalles,
unpublished report.
- CIVELLI, G., LOCATI, U., BIOGGERO, B., CHIESA, S., ALVARADO, G &
MORA, O. 2005: Geología de la Hoja Tierras Morenas.- Rev. Geol. Amér.
Central, 33:99-110.
- CLARK, I. & FRITZ, P. 1997: Environmental Isotopes in Hydrogeology.- 328 págs.
CRC Press LLC. Lewis Publishers, New York.
- CEBRIÁN, M. E., ALBORES, A., GARCÍA, G., DEL RAZO, L. M. 1994: Chronic Arsenic
Poisoning In Humans: The Case Of Mexico. Arsenic in the Environment. Part II:
Human Health and Ecosystem Effects. Pág.94-100, México.
- CLIMENT, A; SALGADO, D; SLOB, S. & VAN WESTEN, C.J; 2003: Amenaza Sísmica y
Vulnerabilidad Física en la ciudad de Cañas, Guanacaste, Costa Rica. Capacity
building for natural disaster reduction (CBNDR) Regional action program for Central
America (RAPCA). ICE-CNE. 27 págs.
- DENGO, G., 1962: Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. in: A Volume to Honor A.F.
Budington: A GSA Special Volume (edited by A.E.J. Engel, H.L. James, and B.F.
Leonard), Geological Society of America, 133-161.
- DONDOLI, C., 1950: Liberia and ist surrounding area. Bol Tecn. Ministerio Agric. E
Industria, Costa Rica, 8pp.

- ESTRADA, J., 1985: Estudio geológico – geotécnico para la fundación de la presa Santa Rosa. [Tesis Lic], E.C.G., UCR, 136p.
- FALLAS, M., SEQUEIRA, J., VARGAS, J.D. & SALAS, L.A., 2014: Informe Práctica geológica 2014: Cartografiado geológico de Bagaces y alrededores, en la provincia de Guanacaste. - AyA Informe interno, 75 pp.
- FERNÁNDEZ, M; ROJAS, W; TAYLOR, W. & ARROYO, I; 1997: Sismicidad y KUSSMAUL, S., & SPRECHMANN, P., 1984: Estratigrafía de Costa Rica (América Central), II: Unidades Litoestratigráficas Igneas. – En: Sprechmann, P. (Ed) Manual de Geología de Costa Rica. Vol 1. San José. Universidad de Costa Rica. 291-299.
- HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A., 1985: Reference crop evapotranspiration from temperature.- Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99.
- KYCL, P., ŽÁCEK, V., CECH, S., GRYGAR, R., HRAZDÍRA, P., HUAPAYA, S., KARENOVÁ, J., KONDROVÁ, L., MENDOZA, E., METELKA, V., MIXA, P., ŠEVCÍK, J., VOREL, T., HRADECKÁ, L., REJCHRT, M., & ŠVÁBENICKÁ, L., 2010: Estudio Geológico de las hojas 3246 II – Miramar, 3246 III - Chapernal y 3246 IV – Juntas. [Segundo borrador]. – 263 págs. Servicio Geológico Checo (CGS) en cooperación con la Dirección de Geología y Minas (DGM) y Ministerio de Ambiental y Energía (MINAE).
- LANL; MIEM & ECG, 1987: Atlas geoquímico de los cuadrángulos de San José y Golfito, Costa Rica. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, Ministerio de Industrias, Energía y Minas, San José, Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología, San Jose, Costa Rica.- Escala 1:200 000, Los Alamos N.M.
- MADRIGAL, O., 1980: Geología y Potencial de una Parte del Distrito Minero de Abangares, Guanacaste, C.R., Tesis de Licenciatura, E.C.G., UCR.
- MAINIERI, A., 1976: Guanacaste geothermal project, technical pre-feasibility geology report. Instituto Costarricense de Electricidad, San José, internal report revised for GeothermEx Inc.

- MONTERO, W. & ALVARADO, G. E., 1988: Los terremotos de Bagaces de 1935 y 1941: Neotectonismo transversal a la Cordillera Volcánica de Guanacaste, Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*: 12(1-2):69-87.
- MONTERO, W. & DENYER, P., (2011): Fallamiento Neotectónico de la Península de Nicoya y su relación con el Escape Tectónico del Antearco Centroamericano.- *Rev. Geog. Amer. Central*, 45:9-52.
- MORA, S., 1977: Estudio Geológico del Cerro Chop. – *Rev. Geogr. Amer. Central*: 5–6: 189–199.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 2004: Guías para la calidad del agua potable. Tercera Edición, Ginebra.
- PROYECTO ACUASUB (1975): Investigación de aguas subterráneas en zonas seleccionadas.- 261 págs. 50 mapas; Naciones Unidas, New York (informe técnico).
- RAMIREZ, O., 1973: Estudio geológico y geotectónico de una faja de terreno atravesada por el posible trazado de la carretera entre Tilarán y Fortuna. -71 pag. Univ. de Costa Rica, San José. [Tesis Lic].
- SCHOSINSKY, G.; 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. - *Revista Geológica de América Central* 34-35: 13-30.
- VILLEGAS, A., 1997: Geodinamica de la Cordillera de Tilarán, Relación entre la Vulcanología y la Tectonica, Guanacaste, Costa Rica., Tesis de Licenciatura, E.C.G., UCR.
- VOGEL, T.A., PATINO, L.C., ALVARADO, G.E. & GANS, P.B., 2004. Silicic ignimbrites within the Costa Rica volcanic front evidence for the formation of continental crust.- *Earth Planet. Sci. Lett* (en prensa).
- Hoja Topográfica MONTEVERDE 1: 50000, 3-IGCR, 3147 IV.-San José, 1989.
- Hoja Topográfica TEMPISQUE 1: 50000, 3-IGCR, 3147 III.-San José, 1987.
- Hoja Topográfica TIERRAS MORENAS 1: 50000, 3-IGCR, 3147 I.-San José, 1989.

Hoja Topográfica CAÑAS 1: 50000, 3-IGCR, 3147 II.-San José, 1988.

Hoja Topográfica ARENAL 1: 50000, 1-IGCR, 3247 IV.-San José, 1966.

Hoja Topográfica TILARÁN 1: 50000, 3-IGCR, 3247 III.-San José, 1993.

9. APÉNDICES