

# FORMACIÓN BAGACES: CARACTERIZACIÓN DE SUS UNIDADES PARA LA IDENTIFICACIÓN DE DEPÓSITOS Y LITOFACIES

## BAGACES FORMATION: CHARACTERIZATION OF UNITS FOR IDENTIFICATION OF DEPOSITS AND LITHOFACIES

Juan P. Solano<sup>1\*</sup>, Percy Denyer<sup>1,2</sup>, Wendy Pérez<sup>3</sup>, Óscar H. Lücke<sup>1,2</sup> y Pilar Madrigal<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

<sup>2</sup> Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

<sup>3</sup> Erwatec Ingenieurgesellschaft GmbH, Kiel, Alemania

\* Autor para contacto: [juan314solanomonge@gmail.com](mailto:juan314solanomonge@gmail.com)

(Recibido: 10/09/2018; aceptado: 22/01/2019)

**RESUMEN:** La base de la cordillera volcánica de Guanacaste está conformada, en su mayoría, por una potente secuencia de depósitos piroclásticos de edades entre el Mioceno y el Pleistoceno, las cuales corresponden a las formaciones Bagaces y Liberia. En el presente trabajo la propuesta estratigráfica para cada una de las unidades de la Formación Bagaces se determinó a partir de la composición y variaciones verticales en sus depósitos. Las litofacies fueron caracterizadas mediante el análisis de quince núcleos de perforación, levantamiento de secciones estratigráficas en el campo y la recopilación de análisis de secciones delgadas. Las tobas Potrerillos, Limbo I, Sandillal, Pan de Azúcar, Limbo II (Superior), Poza Salada, Santa Rosa, La Casona (depósito Superior), Monte del Barco, Río Colorado y Montenegro corresponden con depósitos complejos que presentan variaciones verticales. Mientras que las tobas Alto Mirador, Rama de Nance, Limbo II (Inferior), Mata de Caña, La Casona (depósito Inferior), Cuajiniquil y Cañas son depósitos sencillos. Los centros eruptivos que originaron las tobas Mata de Caña y La Casona debieron estar cercanos al poblado de Curubandé. Con respecto a la evolución magmática, se considera que existe una variación cíclica entre magmas ligeramente más ácidos o básicos.

**Palabras clave:** Bagaces, estratigrafía, litofacies, depósito piroclástico, ignimbrita, cuenca Tempisque, Guanacaste.

**ABSTRACT:** The base of Guanacaste Volcanic Range is formed predominantly by an interesting sequence of pyroclastic deposits with ages ranging between Miocene and Pleistocene, which correspond with the Bagaces and Liberia formations. In this stratigraphic proposal, the units of the Bagaces Formation have been identified based on their composition and vertical variations. The unit's lithofacies was characterized through the analysis of fifteen borehole cores, stratigraphic field sections and the compilation of thin section analysis. The Potrerillos, Limbo I, Sandillal, Pan de Azúcar, Limbo II (Upper deposit), Poza Salada, Santa Rosa, La Casona (Upper deposit), Monte del Barco, Río Colorado y Montenegro Tuffs correspond to complex deposits which present vertical variations. While the Alto Mirador, Rama de Nance, Limbo II (Lower deposit), Mata de Caña, La Casona (Lower deposit), Cuajiniquil and Cañas Tuffs are simple deposits. The eruptive centers that originated the tuffs Mata de Caña and La Casona must have been located close to the town of Curubandé. The magmatic evolution shows a cyclicity behavior between slightly more acidic or basic magmas.

**Keywords:** Bagaces, stratigraphy, lithofacies, pyroclastic deposit, ignimbrite, Tempisque basin, Guanacaste.

## INTRODUCCIÓN

La base de la cordillera volcánica de Guanacaste (NW de Costa Rica) se encuentra conformada por una geoestructura denominada por Dengo (1962) como la Meseta Volcánica de Santa Rosa. Esta meseta está compuesta por las formaciones Bagaces y Liberia, que corresponden con una serie de depósitos piroclásticos del Pliopleistoceno, que cubrieron una topografía irregular formada por litologías variables, compuestas principalmente por rocas ígneas del Jurásico y Cretácico, que conforman el basamento de Costa Rica y rocas sedimentarias marinas del Paleógeno. En su base sobreyace a un flujo dacítico del Mioceno Superior y durante su formación coexistieron diversos eventos volcánicos extrusivos. Esta meseta ha sido objeto de diversos estudios de índole cartográfica, geoquímica y petrológica. El área del presente estudio, cubre una superficie cercana a los 850 km<sup>2</sup>. Geográficamente, limita con el océano Pacífico y la península de Santa Elena al W, con la península de Nicoya al S y con la actual cordillera volcánica de Guanacaste al NE. La reconstrucción de las erupciones que dieron paso a la Meseta Volcánica de Santa Rosa es de gran importancia para entender la evolución de la historia geológica de un vulcanismo que finalmente construye la estructura volcánica que hoy constituye la cordillera volcánica de Guanacaste.

El propósito de este trabajo consiste en la definición de las litofacies de cada una de las unidades que componen a la Formación Bagaces. Esto se lleva a cabo mediante la descripción de

núcleos de perforación y secciones estratigráficas, estas últimas en sitios estratégicos, con el fin de identificar las variaciones verticales de cada depósito piroclástico y su interpretación genética. Como base estratigráfica se emplea la propuesta de Alvarado y Denyer (2019).

Para la definición regional de la Formación Bagaces, se tomaron en cuenta los depósitos piroclásticos posteriores a la Dacita Carbonal, ubicados en la vertiente pacífica, así como fue definido por Denyer, Aguilar y Montero (2014). Por tanto, no se contemplan los depósitos de edad Mioceno en la cuenca Tempisque, ni los depósitos en la cuenca San Carlos (vertiente caribe).

### La Formación Bagaces dentro de la cuenca Tempisque

La Formación Bagaces se ubica dentro de la cuenca Tempisque, la cual posee un registro litológico desde el Jurásico hasta la actualidad, compuesto por rocas de diferentes firmas y tipos. El basamento se compone por rocas con afinidad oceánica con edad mayor a los 83 Ma (Dengo, 1962; Tournon, 1984; Denyer y Gazel, 2009).

Sobre el basamento se ubican gran cantidad de rocas sedimentarias con diferentes ambientes de depositación datadas desde el Coniaciano hasta el Mioceno Inferior. La Formación Sabana Grande (pelagitas con aporte terrígeno) del Coniaciano al Campaniano (Astorga, 1987; Flores, 2003; Bandini, Flores, Baumgartner, Jackett y Denyer, 2008), representa la base sedimentaria.

Temporalmente, posterior a la Formación Sabana Grande se encuentran las formaciones El Viejo y Santa Ana (sedimentos carbonatados) del Campaniano Medio al Maastrichtiano (Schmidt-Effing, 1974; Denyer et al. 2014); la Formación Piedras Blancas (sedimentos carbonatados hemipelágicos), con edad Campaniano-Maastrichtiano (Denyer et al. 2014), y la Formación Barbudal (erosión del Complejo de Nicoya), ubicada en el Campaniano Inferior (Rivier, 1983; Flores, 2003).

Seguidamente, se identifican la Formación Curú (turbiditas) entre el Maastrichtiano Medio-Superior y el Paleoceno Superior (Astorga, 1987); la Formación Barra Honda (secuencia carbonatada con diferentes sistemas depositacionales) del Paleoceno Superior (Calvo, 1987; Denyer et al., 2014); y la Formación Descartes (sedimentos turbidíticos volcanoclasticos y carbonatados) entre el Paleoceno Superior-Eoceno Inferior (Astorga, 1987; Pizarro, 1993).

El final del amplio registro sedimentario, en esta cuenca, está conformado por las formaciones Junquillal y Punta Pelada (somerización de la cuenca y plataformas someras de energía variable) durante el Oligoceno y el Mioceno Inferior (Baumgartner et al., 1984; Sprechmann, Astorga, Fernández y Calvo, 1993; Sprechmann, Astorga, Fernández y Calvo, 1994; Baumgartner-Mora, Baumgartner y Tschudin, 2008; Denyer et al., 2014; Andjic, Baumgartner-Mora y Baumgartner, 2016).

A partir del Mioceno, las rocas de la cuenca Tempisque son preferencialmente ígneas. Contemporáneo a la base de la Formación Bagaces son de fácil reconocimiento cuatro eventos relevantes. El primer evento corresponde con Tobitas Lomas Barbudal (evento sedimentario local), del Mioceno Tardío a Plioceno (Aguilar y Alvarado, 2004). El segundo evento está conformado por la Formación Grifo Alto (transición del eje magmático de Costa Rica) de edad variable entre 8,7 y 2,97 Ma (Alvarado y Gans, 2012; Denyer et al., 2014). El siguiente evento lo conforma las Dacitas Carbonal (rocas volcánicas con una típica estructura columnar) datadas en  $8,05 \pm 0,009$  Ma (Alvarado y Gans, 2012). Por último, las Lavas Pelón de la Bajura (cuerpos lávicos fisurales) del Pleistoceno (Chiesa Alvarado, Pecchio, Corella y Zanchi, 1994; Gillot, Chiesa y Alvarado, 1994).

Cercano a los eventos explosivos finales de la Formación Bagaces se encuentra el registro de la Formación Alcántaro (vulcanismo dacítico y explosivo) del Pleistoceno (Tournon, 1984; Funaioli y Rossi, 1991; Kempster, 1997). También destacan otras unidades geológicas, como las formaciones Grifo Alto y Monteverde (últimas fases del antiguo eje magmático) con edades entre 2,1 y 0,9 Ma (Civelli, Locati, Bigioggero, Alvarado y Mora, 2005; Alvarado, 2009); y el Lacustre Loma Camastro (rocas sedimentarias continentales) del Pleistoceno Inferior a Medio (Barahona et al., 2001).

Después la Formación Bagaces se tiene registro de la Formación Cañas Dulces (vulcanismo extrusivo dacítico) de 1,4 a 0,8 Ma (Tournon, 1984; Funaioli y Rossi, 1991; Kempster, 1997); y la Formación Liberia (vulcanismo explosivo) durante el Pleistoceno (Deering, Vogel, Patino y Alvarado, 2007).

Los depósitos actuales de la cuenca Tempisque se componen de las rocas producto de la actividad de los estratovolcanes de la cordillera volcánica de Guanacaste y de procesos erosivos activos.

### **Subdivisiones de la Formación Bagaces a través del tiempo**

La primera mención fue por Dóndoli (1950) como “toba gris” diferenciable de los depósitos de la Formación Liberia. Luego, Dengo (1962) la eleva al rango de Formación y agrupa varias tobas grises con sus depósitos lacustres asociados. Bohnenberger (1968) en su estudio fotogeológico y su posterior comprobación de campo ubica en esta formación depósitos piroclásticos-tobas, sus rocas sedimentarias asociadas (producto de la erosión y redepositación de las tobas), y hace mención de rocas basálticas al sureste de Cañas. Sin embargo, no menciona claramente si pertenecen a la Formación Bagaces.

La primera división de la formación en miembros fue por parte de Naciones Unidas (1975) donde se hace referencia a los miembros Inferior, Medio y Superior. El Miembro Inferior se compone de facies lacustres y fluvio-lacustres, el Miembro Intermedio está compuesto por ignimbritas, lavas y tobas aglutinadas, y el Miembro Superior está conformado por tobas aglutinadas a soldadas.

Chiesa, Bettoni y Confortini (2004) proponen un arreglo estratigráfico que incluye un evento lávico extrusivo (Dacitas Carbonal). Esta reorganización la proponen bajo los siguientes nombres: Serie de flujos piroclásticos Pre-Carbonal, Flujo cerros Carbonal y Serie de flujos piroclásticos Post-Carbonal. Donde el Flujo cerros Carbonal equivale a las Dacitas Carbonal y las restantes unidades a depósitos piroclásticos desde el Mioceno hasta el Pleistoceno.

Aiazzi, Fiorletta, Civelli, Chiesa y Alvarado (2004) y Civelli et al. (2005) emplean la subdivisión de flujos soldados y flujos pumíticos no soldados para referirse a diferentes depósitos piroclásticos interdigitados con depósitos epiclásticos.

Alvarado y Gans (2012) actualizan la propuesta de Naciones Unidas (1975) de la siguiente forma: Bagaces Basal o Carbonal, conformado por las Dacitas Carbonal y las rocas piroclásticas infrayacentes; Bagaces Inferior o Barbudal comprendido por coladas de lava y depósitos piroclásticos; Bagaces Intermedio o fluvial compuesto por depósitos sedimentarios del paleo Tempisque y Bagaces Superior, en el cual sólo se ubican depósitos piroclásticos.

Denyer et al. (2014) y trabajos recientes, dividen los eventos lávicos en Dacitas Carbonal y Lavas Pelón de la Bajura de la Formación Bagaces. A consecuencia de esto la Formación Bagaces, bajo el conocimiento estratigráfico actual, se establece como depósitos piroclásticos y sedimentarios del Mio-Plioceno y parte del Pleistoceno.

## MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en tres etapas. Primero, se recopilaron datos existentes de micro y macro petrografía de las unidades descritas en la Formación Bagaces. Con el objetivo de conocer algunos componentes afines para su posterior comparación con los datos nuevos y reinterpretación.

Seguidamente, se realizó la descripción y el análisis de rocas extraídas como núcleos de perforación de 15 piezómetros (equivalentes a 2201 m de perforación) del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA) en la región Tempisque. Los piezómetros fueron correlacionados por Solano

(2018) y corresponden a los códigos AH-10, CN-1, CN-6, CN-7, CU-2, CU-16, CU-18, ME-3, ME-4, ME-5, ME-12, ME-19, PZ-01, PZ-02 y PZ-04, según la base de datos de SENARA. Además, se desarrolló el levantamiento de secciones estratigráficas en sitios representativos. A consecuencia de este análisis, se reconoce la presencia de dos nuevas unidades: Toba Potrerillos y Toba Mata de Caña.

Finalmente, se caracterizaron de los depósitos piroclásticos. Para esto, existen tres líneas base para la descripción de los depósitos piroclásticos: unidades de flujo, unidades de enfriamiento y litofacies. La primera consiste en la división por evento. Las unidades de enfriamiento, como lo dice su nombre se dividen por la afinidad del proceso bajo el que se enfriaron los flujos piroclásticos, ya sea por flujos continuos de diferentes temperaturas o un flujo con diferencias en enfriamiento (Smith, 1960). Por último, la determinación de litofacies se basa en la descripción litológica.

En el caso de la Formación Bagaces, por tratarse con depósitos piroclásticos relativamente antiguos y por la dificultad de determinar unidades de flujo o enfriamiento, se empleó la descripción por litofacies. Esta se basa en:

- Correlación litológica de piezómetros.
- Análisis de facies: la definición de facies se realizó con base en las litofacies para depósitos de corrientes de densidad, determinadas por Branney y Kokelaar (2002). Seguidamente se compararon los resultados obtenidos con la sección ideal de Sparks, Self y Walker (1973) para ignimbritas. Algunos detalles de estas clasificaciones se muestran en el apartado Aspectos acerca del análisis de facies para rocas piroclásticas al final de este capítulo.
- Selección: esta etapa se desarrolló con el software “ImageJ (1.6.0)”... (National Institutes of Health., 2016) con el uso de imágenes binarias de algunas muestras representativas.
- Soldamiento: el soldamiento fue interpretado con base en mediciones de índice de aplastamiento. Este valor fue obtenido mediante mediciones microscópicas en clastos pumíticos hialinos de Solano (2018).
- Análisis de facies de cristalización: se analizaron las secciones delgadas, realizadas por

Solano (2018) con el fin de reconocer características de interés para la identificación de facies de cristalización según Streck y Grunder (1995). Posteriormente estos valores fueron ajustados a la escala de soldamiento propuesta por Quane y Russell (2005).

### Aspectos acerca del análisis de facies para rocas piroclásticas

Branney y Kokelaar (2002) desarrollan un método de descripción de ignimbritas sin genético mediante litofacies, con el objetivo de evitar comparaciones a modelos de emplazamiento específicos y connotaciones a secuencias ideales. Las litofacies las agrupan en: toba lapillítica masiva, brecha lítica masiva a estratificada, aglomerado masivo, capas y chimeneas pobres en finos, patrones de gradación vertical, estratificación difusa y estratificación fina, tobas estratificadas, capas ricas en pómez y lentes, depósitos lapillíticos masivos y con estratificación paralela, tobas con estratificación paralela y laminación paralela, y litofacies eutaxíticas, reomórficas y similares a lavas. En el presente estudio se emplea el término **litofacies masiva** para hacer mención a la litofacies de toba lapillítica masiva, y **rica en pómez, rica en escoria o rica en pómez y escoria** para referirse a la litofacies de capas ricas en pómez y lentes.

Sparks et al. (1973) definen una ignimbrita como una roca piroclástica compuesta predominantemente por material juvenil con estructuras que indiquen un origen por flujo piroclástico. Además, subdividen e interpretan una ignimbrita en tres capas: capa 1 (depósito de oleada piroclástica), capa 2 (depósito de la unidad de flujo - subdividido en capa 2a y 2b) y capa 3 (depósito de ceniza).

Sparks et al. (1973) aclaran que la ausencia de capas de una sección ideal es debido a:

- Ausencia de la capa 3: producto de la erosión de los depósitos o que no hubiese una erupción explosiva continua después del emplazamiento del flujo piroclástico.
- Ausencia de la capa 2a: a consecuencia de la baja cizalla y baja fuerza de dispersión de granos en la base del flujo.

- Ausencia de la capa 1: tratan esta capa como un depósito separado, determinándola como precursora de una actividad de flujos piroclásticos, y consideran la parte inferior de un depósito de flujo piroclástico a la capa 2a.

### TEFROESTRATIGRAFÍA DE LAS UNIDADES DENTRO DE FORMACIÓN BAGACES

La propuesta estratigráfica empleada comprende un total de 17 unidades, de las cuales cuatro forman parte del Pleistoceno y las restantes del Plioceno. Además, se consideran dos unidades reconocidas únicamente en piezómetros (Toba Potrerillos y Toba Mata de Caña) y la unificación de dos unidades (Toba Montenegro y Toba Rodeo Viejo; Fig. 1). Desde el punto de vista de la clasificación, se emplearon las clasificaciones de Pettijohn, Potter y Sevier (1987) y Fisher (1966)

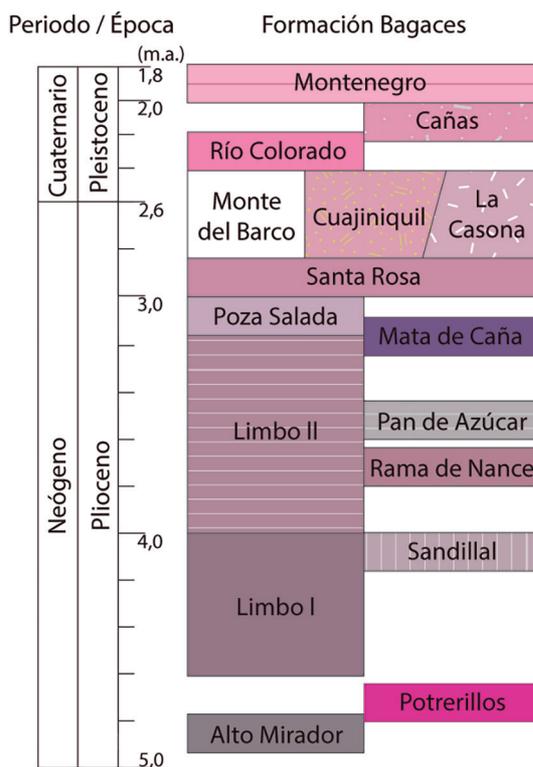


Fig. 1: Columna estratigráfica de la Formación Bagaces. Basada en el capítulo IV (Alvarado y Denyer: en Denyer (2019)).



para los apartados composicional y granulométrico respectivamente (Fig. 2A). La clasificación composicional muestra una tendencia de las unidades es hacia las tobas vítreas y la clasificación granulométrica indica lapillitas. Por tanto, se reconoce una fuerte componente de vitroclastos y una clasificación granulométrica influenciada por el tamaño de las muestras. En la Fig. 2 (apartados 2B y 2C) se muestran porcentajes totales composicionales y granulométricos por litofacies. Por otra parte, el detalle en los porcentajes por componente se encuentra en la Fig. 3. Además, los valores de selección y soldamiento medidos se agrupan en las Fig. 4 y Fig. 5.

### Toba Alto Mirador

Mencionada por Szymanski (2007) como toba Tajo Pelón y por Schindlbeck et al. (2016) Toba Alto Mirador. Szymanski (2007) ubica dentro de esta unidad dos tobas y dos niveles epiclásticos. Fue reconocida en pequeños afloramientos al sur y sureste de Bagaces, y en un piezómetro al oeste de Liberia (Fig. 6).

En el presente estudio se considera a la Toba Alto Mirador como un depósito de toba con lentes pumíticos. Se compone de una litofacies rica en pómez y sus características principales son: fenocristales de biotita en pómez, lentes de pómez y líticos no reconocibles. Caracterizada por ser una toba rosada clara con vitroclastos (12-72%), cristaloclastos (8-15%) y litoclastos (3-10%). Presenta pobre selección ( $\sigma_{\phi}=3,74$ ) (con contactos flotantes y el soldamiento varía entre rango II a IV ( $OB=0,58-0,75$ )). Los lentes dentro de esta litofacies llegan a ser de hasta orden métrico.

Su espesor máximo es de 20 m en un afloramiento reconocido en un polígono de tiro a dos kilómetros al oeste de Cañas (414842/266733 LN). Es sobreyacida por la Toba Potrerillos (piezómetro CN-1) y el contacto inferior no fue evidenciado.

### Toba Potrerillos

Se presenta como una nueva unidad dentro de la Formación Bagaces. Se caracteriza por presentar una base con *fiammes* blancos

y un techo con escoria. Fue reconocida desde el noroeste de Curubandé hasta el suroeste de Bagaces en siete de los piezómetros estudiados (AH-10, CN-1, CN-6, ME-4, ME-5, ME-12 y ME-19). Además, su punto de reconocimiento más occidental es cercano al cauce del río Tempisque (Fig. 7).

Se encuentra conformada por varias litofacies masivas consecutivas en la vertical. La base se diferencia por la presencia de una toba con clastos de lavas, obsidiana, pómez gris y *fiammes* blancos y vítreos. Es una toba rosado claro con vitroclastos (35-40%), cristaloclastos (15-20%) y litoclastos (10%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,85$ ) y presenta contactos flotantes a puntuales. El soldamiento es de rango IV ( $OB=0,76$ ).

En la sección inferior sus principales componentes son líticos no reconocibles y pómez gris y blanca. Es una toba color gris que varía a rosado, celeste, café y morado. Presenta vitroclastos (19-50%), cristaloclastos (<13-25%) y litoclastos (6-19%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,59$ ) con contactos flotantes. Son típicas las manchas de óxidos anaranjado intenso.

Seguidamente la sección superior es una toba con líticos no reconocibles, lavas y escoria. Es una toba gris café con vitroclastos (26-57%), cristaloclastos (8-15%) y litoclastos (3-27%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,37$ ) con contactos flotantes, por otra parte el soldamiento varía entre los rangos I y III ( $OB=0,23-0,68$ ), sin embargo, presenta facies de cristalización típica de una zona parcialmente desvitrificada con textura microlítica-escarchada.

Por último, el techo es una toba con líticos no reconocibles y escoria. Corresponde con una toba gris blancuzca, con vitroclastos (<5%), cristaloclastos (8%) y litoclastos (10-20%). Presenta contactos flotantes a puntuales y el soldamiento varía entre los rangos I y IV ( $OB=0,44-0,77$ ).

Su espesor máximo es cercano a los 25 m en el piezómetro ME-12. Es sobreyacida por tobas indiferenciadas, depósitos sedimentarios y las Lavas Pelón de la Bajura. Sobreyace a la Toba Alto Mirador (piezómetro CN-1) y tobas indiferenciadas.

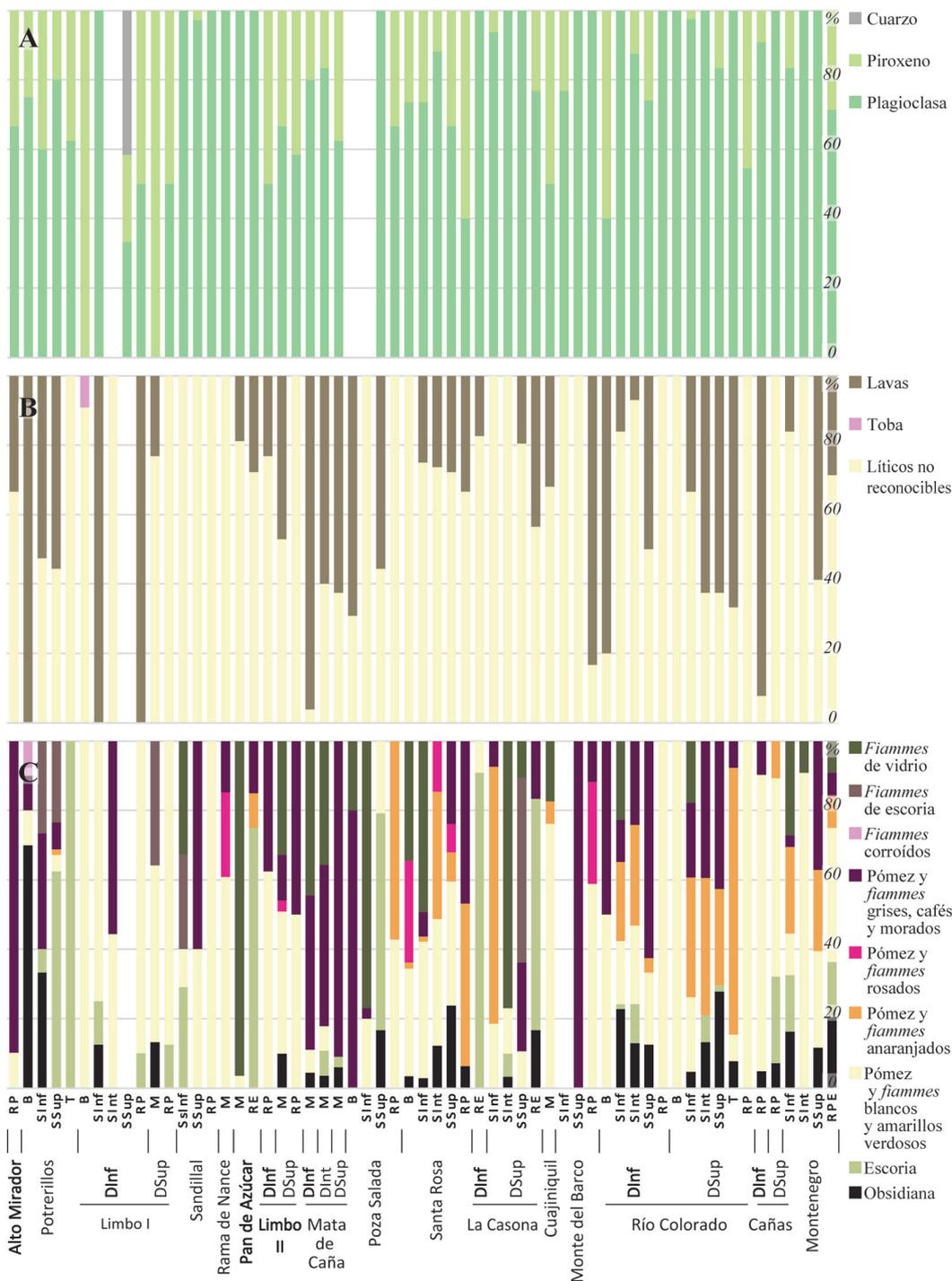


Fig. 3: Distribución de porcentajes petrográficos según tipo de componente y litofacies. A. Cristaloclastos. B. Litoclastos. C. Vitroclastos. B: base, DInf: depósito Inferior, DInt: depósito Intermedio, DSup: depósito Superior, M: masiva, RE: rica en escoria, RPE: rica en pómez y escoria, RP: rica en pómez, SInf: sección inferior, SInt: sección intermedia, SSup: sección superior y T: techo.

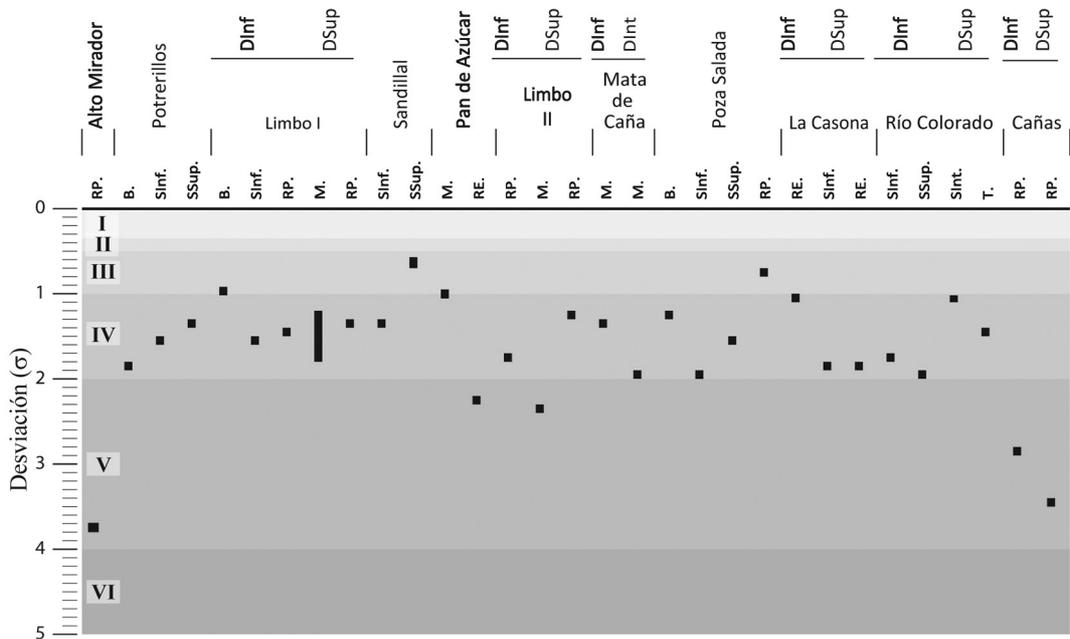


Fig. 4: Valores de selección. I-VI Rango de valores. I: selección muy buena, II: selección buena, III: selección moderada, IV: selección pobre, V: selección muy pobre, VI: selección extremadamente pobre. B: base, DInf: depósito Inferior, DInt: depósito Intermedio, DSUp: depósito Superior, M: masiva, RE: rica en escoria, RPE: rica en pómez y escoria, RP: rica en pómez, SInf: sección inferior, SInt: sección intermedia, SSUp: sección superior y T: techo.

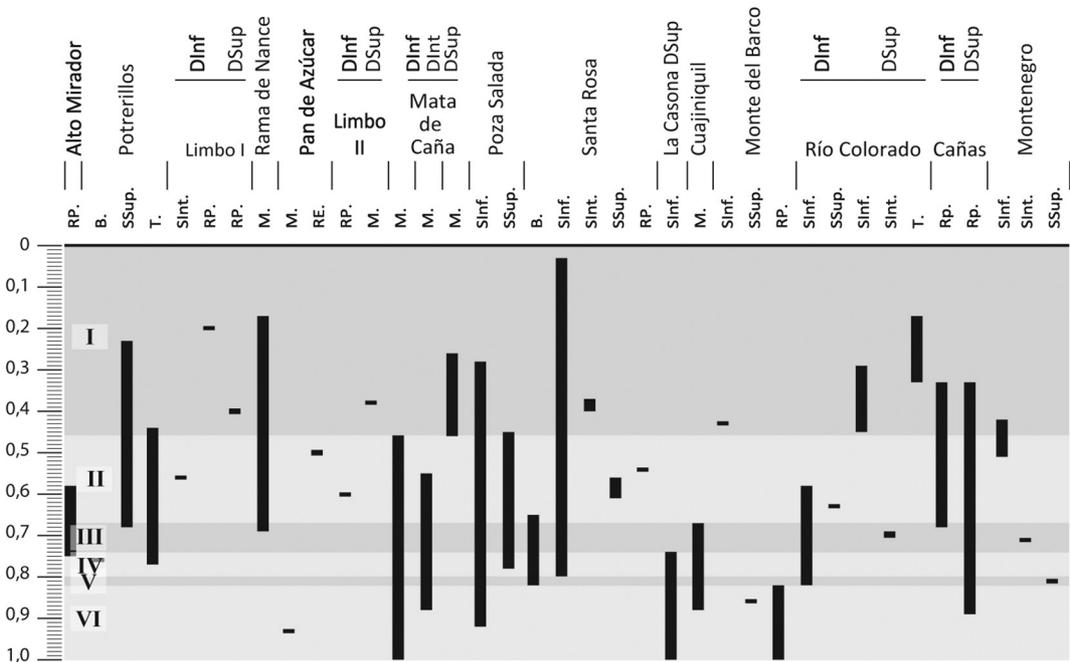


Fig. 5: Valores de soldamiento. I-VI Rango de valores. B: base, DInf: depósito Inferior, DInt: depósito Intermedio, DSUp: depósito Superior, M: masiva, RE: rica en escoria, RPE: rica en pómez y escoria, RP: rica en pómez, SInf: sección inferior, SInt: sección intermedia, SSUp: sección superior y T: techo.

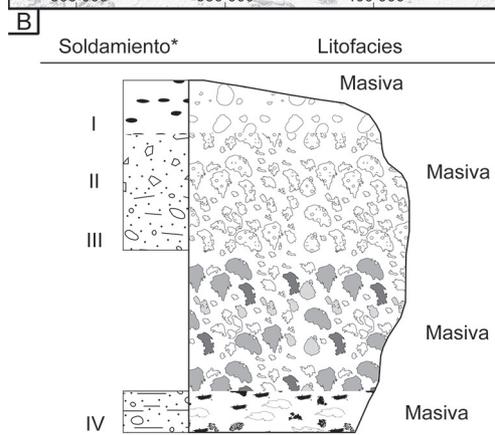
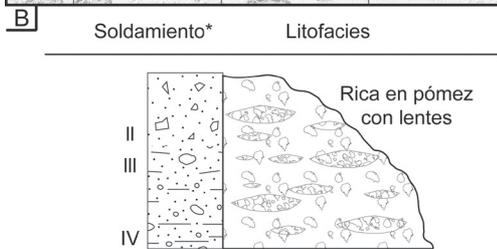


Fig. 7: Toba Potrerillos. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

Fig. 6: Toba Alto Mirador. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. C. Simbología utilizada en figuras 6 a 21, según el componente principal de cada depósito.

**Toba Limbo I**

Unidad definida por David (2005) como Laguna El Limbo I conformada por una ignimbrita

no soldada a incipientemente soldada con pómez (según la clasificación de Streck y Grunder, 1995) con una matriz gris oscuro y tonos amarillentos, vitroclastos de pómez amarillos, grises y negros, y líticos no reconocibles. Petrográficamente contiene pómez amarilla, gris y negra; plagioclasa, opacos, cuarzo, apatito, óxidos y líticos no reconocibles (David, 2005). Su distribución se limita al parque nacional Santa Rosa. Específicamente el camino a playa Naranjo, tres piezómetros (CN-7, ME-4 y ME-12) al suroeste de Liberia y hacia el noreste de Cañas (Fig. 8).

En esta unidad se reconocen dos depósitos piroclásticos. El depósito Inferior incluye litofacies masivas y una litofacies rica en pómez. Las litofacies masivas se subdividen en base, sección inferior, sección intermedia y sección superior. La Base es una toba con variedad de líticos. Es una toba amarillo claro, muy meteorizada con vitroclastos (40%), cristaloclastos (10%) y litoclastos (<50%). Presenta muy buena selección ( $\sigma_{\phi}=0,97$ ) con contactos puntuales. Son típicas en esta variación las pátinas anaranjado claro.

La sección inferior es una toba con pómez blanca y *fiammes* anaranjado claro. Específicamente es una toba gris claro con vitroclastos (<40%), cristaloclastos (<5%) y litoclastos (3%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,61$ ) con contactos flotantes. Es frecuente observar un frente de meteorización anaranjado de hasta 2 mm.

La sección intermedia es una toba con líticos no reconocibles, obsidiana y *fiammes* de pómez blanca. En detalle, es una toba color gris claro con vitroclastos (40-45%) y litoclastos (11%). Presenta contactos flotantes y puntuales, mientras que el soldamiento se ubica en el rango II ( $OB=0,56$ ).

La sección superior es una toba cristalina. Es una toba blanca con cristaloclastos (24%). Exhibe contactos flotantes.

La litofacies rica en pómez es una toba con abundante pómez amarilla. Es una toba gris con vitroclastos (70%), cristaloclastos (<2%) y litoclastos (20%). Además, se reconoció materia orgánica. La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,52$ ) con contactos suturados entre clastos. Hacia la base se encuentran *fiammes* de pómez blanca y escoria gris. El soldamiento está comprendido en el rango I ( $OB=0,2$ ).

El depósito Superior presenta una litofacies masiva y una litofacies rica en pómez. La litofacies masiva es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* de escoria. Corresponde con una toba gris oscuro con vitroclastos (23%), cristaloclastos (8%) y litoclastos (13%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,22-1,79$ ) con contactos flotantes y poco lineales. Hacia la base aparecen *fiammes* de pómez blanca y *fiammes* de escoria gris.

La litofacies rica en pómez es toba con líticos no reconocibles y pómez blanca. Específicamente es una toba gris verdosa a café con vitroclastos

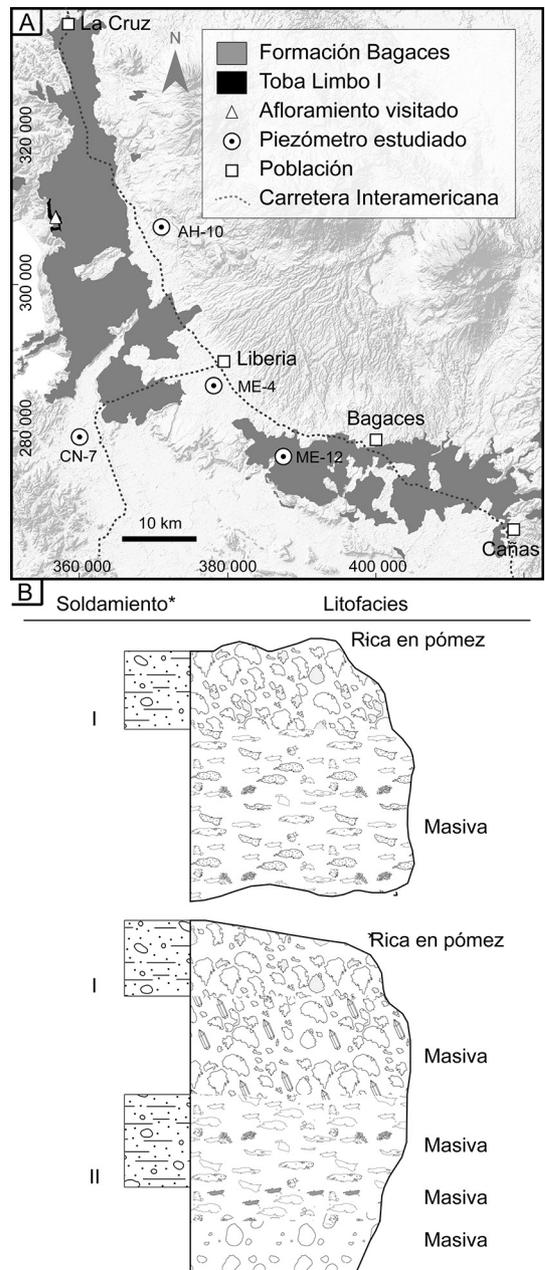


Fig. 8: Toba Limbo I. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

(20-80%), cristaloclastos (<10%) y litoclastos (10%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,37$ ) con contactos flotantes y puntuales, a su vez el soldamiento es de rango I ( $OB=0,4$ ).

El espesor máximo observado de esta unidad fue de 16 m, en el piezómetro CN-7. En el camino a playa Naranjo sobreyace a la Dacita Carbonal y es sobreyacida por la Toba Limbo II, además en los piezómetros estudiados (CN-7 y ME-4) sobreyace a tobas no diferenciadas y es sobreyacida por la Toba Poza Salada y un depósito de coluvio.

### Toba Sandillal

Nombrada Sandillal por Schindlbeck et al. (2016) y definida por Semm (2005) como Río Tenorio para referirse a una toba blanca amarillenta con líticos amarillos, blancos y rosados de tamaño lapilli. En su mayoría no exhibe soldamiento y hacia la base presenta enriquecimiento en líticos. En el caso de la estratigrafía empleada en este estudio, la extensión de la Toba Sandillal se reduce a las cercanías de la represa hidroeléctrica Sandillal al norte de Cañas y no fue identificada en los piezómetros estudiados (Fig. 9).

Abarca dos litofacies masivas y una litofacies rica en pómez. Las litofacies masivas se subdividen en la sección inferior compuesta por una toba vidriosa con escoria y *fiammes* de escoria. Es una toba café vidriosa con vitroclastos (52-55%), cristaloclastos (10-25%) y litoclastos (1%). La selección es buena ( $\sigma_\phi=1,34$ ) con contactos flotantes y un frente de meteorización anaranjado de 6 mm.

La sección superior es una toba con disyunción columnar y cristaloclastos de plagioclasa y piroxeno. Específicamente es una toba gris claro a oscuro con vitroclastos (5%), cristaloclastos (36%) y litoclastos (4%). Presenta muy buena selección ( $\sigma_\phi=0,51$ ) con contactos flotantes. En esta litofacies es común encontrar disyunción columnar con columnas de hasta 60 cm.

La litofacies rica en pómez es una toba con pómez blanca. En detalle es una toba gris oscuro con vitroclastos (50-70%), cristaloclastos (7%) y litoclastos (10%). Muestra contactos flotantes.

El espesor máximo visible es de 4 m y tiene una edad mayor a los 4 Ma. De acuerdo a la edad y su ubicación sobreyace a la Toba Alto Mirador y es sobreyacida por la Toba Rama de Nance.

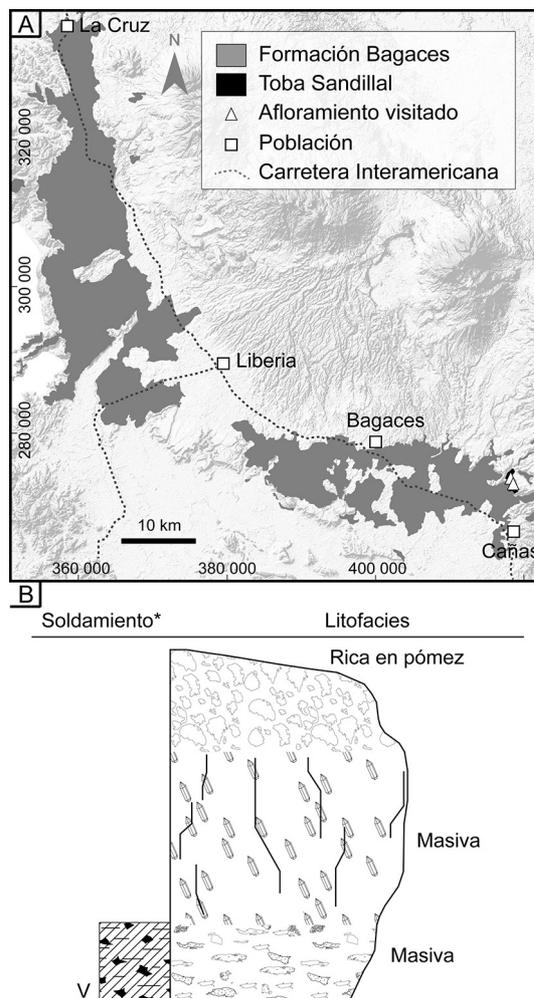


Fig. 9: Toba Sandillal. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

### Toba Rama de Nance

Nombrada por Barrantes (2018) para referirse a una ignimbrita gris blancuzco a violáceo con plagioclasa, piroxeno, lavas dacíticas, obsidiana, escoria y pómez. Dentro del área de estudio se distribuye a través de afloramientos alargados hacia el sur de Bagaces (Fig. 10).

Esta unidad contiene una litofacies masiva correspondiente con una toba con vetas silíceas

con relieve positivo, líticos no reconocibles y pómez blanca. En detalle es una toba gris a rosada claro con vitroclastos (15-60%), cristaloclastos (<15%) y litoclastos (<21%). El contacto entre clastos es flotante y el soldamiento varía de rango I a III ( $OB=0,17-0,69$ ). Algunas características propias de esta unidad son un frente de meteorización negro de hasta 1 mm y vetas silíceas amarillas de hasta 5 cm de grosor, a causa de erosión diferencial.

El espesor máximo encontrado en los sitios visitados para este trabajo es de 2 m. Sin embargo, según Barrantes (2018) llega a tener decenas de metros de espesor. Es sobreyacida por la Toba Pan de Azúcar y su contacto inferior no fue reconocido.

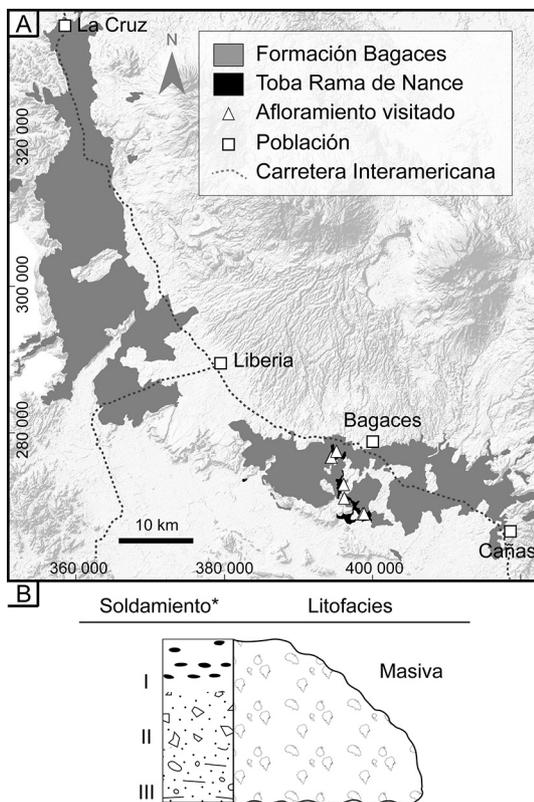


Fig. 10: Toba Rama de Nance. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

## Toba Pan de Azúcar

Definida por Szymanski (2007) como una toba gris oscuro a café, densamente soldada con *fiammes* vítreos. Además, es mencionada por Schindlbeck et al. (2016). Se despliega desde el suroeste de Cañas hasta el oeste de Bagaces y fue detallada en dos piezómetros (ME-5 y ME-19; Fig. 11).

En la Toba Pan de Azúcar se identificaron dos litofacies. Una masiva conformada por una toba que forma bloques de orden métrico y contiene líticos no reconocibles y de lavas, pómez blanca y *fiammes* vítreos cristalinos. En detalle es una toba negra vidriosa, con vitroclastos (9-28%), cristaloclastos (3-40%) y litoclastos (10-16%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,01$ ) con contactos flotantes y el soldamiento es de rango VI ( $OB=0,93$ ). En afloramiento se reconoce por presentarse en bloques de orden métrico.

La litofacies rica en escoria representada por una toba con líticos no reconocibles, escoria y *fiammes* grises. Es una toba gris oscuro a gris café, con vitroclastos (12-40%), cristaloclastos (3-15%) y litoclastos (18%). Pobremente seleccionada ( $\sigma_{\phi}=2,21$ ) con contactos flotantes y un soldamiento de rango II ( $OB=0,5$ ). Además, cuando se presenta la muestra muy meteorizada tiende a formar líneas de óxidos.

Se reconoció un espesor máximo de 6 m. Sobreyace a la Toba Rama de Nance y tobas indiferenciadas y es sobreyacida por una zona hidrotermal y tobas indiferenciadas.

## Toba Limbo II

Definida por David (2005) como El Limbo II y caracterizada por ser una toba parcialmente soldada con *fiammes* rica en cristales, con pómez grises. Microscópicamente, presenta pómez gris amarillenta; cristaloclastos de plagioclasa, opacos, magnetita, apatito y micas; y líticos ígneos negros (David, 2005).

Esta unidad fue reconocida a lo largo de la costa pacífica desde el camino a playa Naranjo (dentro del parque nacional Santa Rosa) hasta el

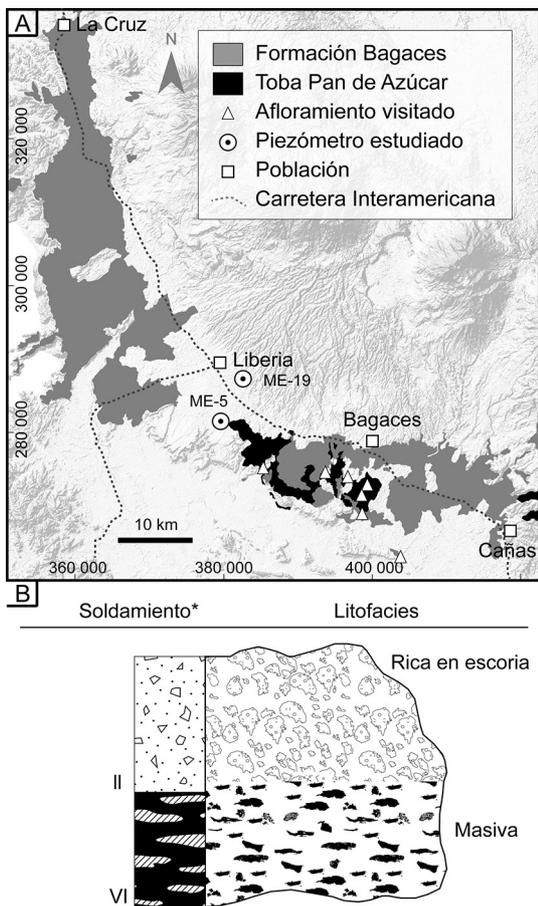


Fig. 11: Toba Pan de Azúcar. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

sur del golfo de Papagayo. Además, se visualizó en cuatro de los piezómetros analizados (AH-10, CN-1, ME-4 y ME-12; Fig. 12).

Se reconocieron dos depósitos. El depósito Inferior compuesto por una litofacies rica en pómez y se identifica como una toba con líticos no reconocibles y pómez blanca. Se compone específicamente de una toba gris oscuro a café grisáceo con vitroclastos (19-40%), cristaloclastos (11-30%) y litoclastos (<13%). La selección es buena ( $\sigma_\phi=1,71$ ) con contactos flotantes y el soldamiento es de rango II ( $OB=0,6$ ).

Por otra parte, el depósito Superior presenta dos litofacies: una masiva y una rica en pómez. La litofacies masiva correspondiente a una toba con

líticos no reconocibles, lavas, obsidiana y *fiammes* grises. Corresponde con una toba gris café con vitroclastos (44-61%), cristaloclastos (<9%) y litoclastos (<8-17%). Presenta pobre selección ( $\sigma_\phi=2,38$ ) con contactos flotantes y su soldamiento es de rango I ( $OB=0,38$ ).

La litofacies rica en pómez se caracteriza por ser una toba con líticos no reconocibles y pómez blanca y amarilla. Específicamente es una toba

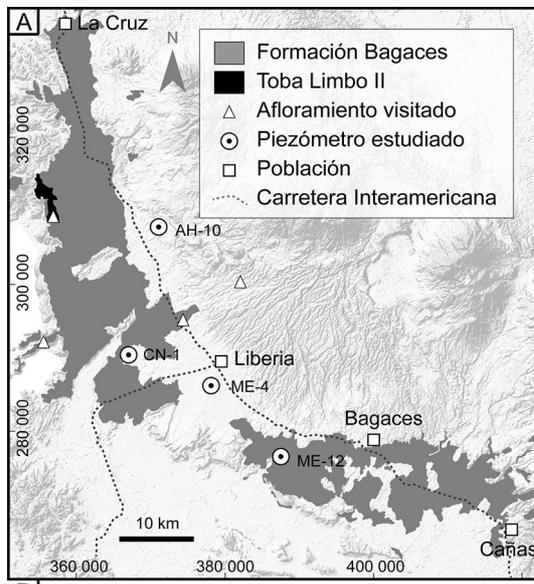


Fig. 12: Toba Limbo II. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

Fig. 12: Toba Limbo II. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

gris claro (sin meteorización) y amarilla claro (meteorizada) con vitroclastos (40%), cristaloclastos (10-12%) y litoclastos (5%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,28$ ) con contactos puntuales. Algunas veces con pátinas anaranjadas.

El espesor ligeramente mayor a 7 m en el camino a playa Naranjo. Sobreyace depósitos sedimentarios asociados a la erosión de eventos piroclásticos anteriores y a la Toba Limbo I y es sobreyacida por las tobas Poza Salada y Mata de Caña, esta última en piezómetros.

### Toba Mata de Caña

Representa una nueva unidad dentro de la Formación Bagaces. La misma no aflora en superficie, pero fue reconocida en seis piezómetros (AH-10, CN-1, CU-16, CU-18, ME-4 y ME-12). Se interpreta como tres depósitos diferenciables por líticos, *fiammes* de escoria y *fiammes* vítreos. Se distribuye hacia el suroeste de Curubandé a través de 15 km, aproximadamente (Fig. 13).

Se identificaron tres depósitos, cada uno compuesto por una litofacies masiva. El depósito Inferior es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* grises y vítreos. Específicamente una toba gris violácea con tonos azules y anaranjados, con vitroclastos (<35-45%), cristaloclastos (6-25%) y litoclastos (<6-26%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,34$ ) con contactos flotantes. El soldamiento fue determinado a partir de facies de cristalización que varían entre zona fase de vapor a zona parcialmente desvitrificado con texturas microlítica y axiolítica (Rango de II a VI).

El depósito Intermedio es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* vítreos y de escoria. A detalle corresponde con una toba gris oscura violácea con vitroclastos (<41-50%), cristaloclastos (<14-21%) y litoclastos (<13-25%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,93$ ) con contactos flotantes. Por otra parte, el soldamiento varía entre los rangos II y VI ( $OB=0,55-0,88$ ) correspondiente a una zona parcialmente desvitrificada evidenciada con textura microlítica. Además, presenta manchas anaranjadas, pátinas negras, textura eutaxítica y desvitrificación a nivel macroscópico.

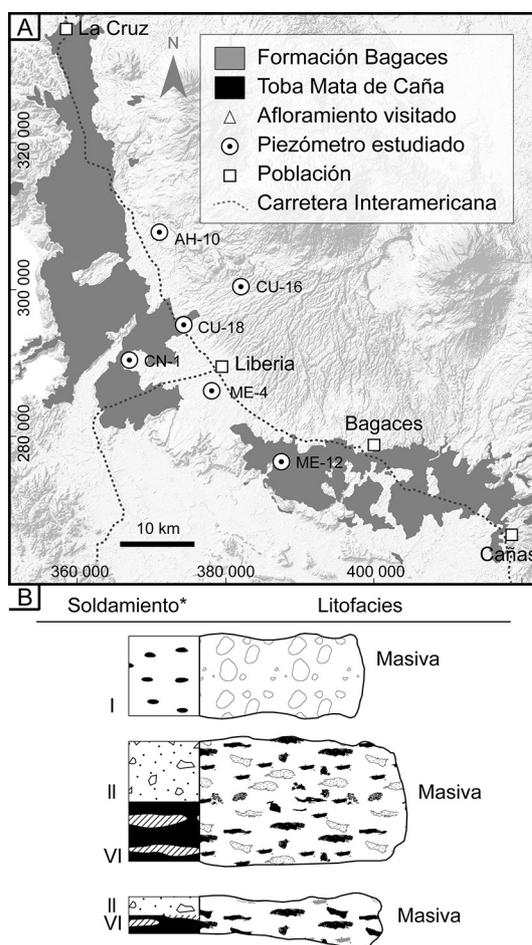


Fig. 13: Toba Mata de Caña. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

El contacto con el depósito Inferior está dado por un nivel de 15 mm de concentración de fenocristales (50%), de plagioclasa, cuarzo, piroxeno y clastos negros y es muy friable.

El depósito Superior es una toba con lavas. Es una toba gris violácea con vitroclastos (10-33%), cristaloclastos (<8%) y litoclastos (33-54%). Expone contactos flotantes y presenta soldamiento de rango I ( $OB=0,26-0,46$ ).

El mayor espesor de esta unidad es cercano a los 63 m. Sobreyace a la Toba Limbo II y tobas indiferenciadas y es sobreyacida por las tobas Santa Rosa, Poza Salada y tobas indiferenciadas, y las Lavas Pelón de la Bajura.

## Toba Poza Salada

Definida por Marquardt (2005) como cuatro depósitos piroclásticos diferenciables por la presencia de líticos andesíticos a dacíticos y que el depósito III presenta *fiammes* vítreos de gran tamaño. En microscopía destacan pómez gris claro, gris café, gris oscuro y negra; cristaloclastos de plagioclasa, opacos, cuarzo, apatito y óxidos; y líticos negros ígneos (David, 2005). Los afloramientos de esta unidad se distribuyen a través de una franja desde el parque nacional Santa Rosa hasta el río Tempisque. Además, fue reconocida en cinco piezómetros (AH-10, CN-7, CU-16, CU-18 y PZ-02; Fig. 14).

La Toba Poza Salada incluye varias litofacies masivas (base, sección inferior y sección superior) y una litofacies rica en pómez. La base es una toba con líticos no reconocibles. Es una toba gris claro con vitroclastos (25%) y litoclastos (65%). En general presenta buena selección ( $\sigma_{\phi}=1,21$ ).

La sección inferior es una toba con disyunción columnar de orden métrico, líticos no reconocibles, lavas, pómez amarillo-verdosa y *fiammes* vítreos. Es una toba gris claro con vitroclastos (30-65%) y litoclastos (5-10%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,9$ ) con contactos flotantes y puntuales, mientras que el soldamiento varía entre los rangos I y VI ( $OB=0,28-0,92$ ) y una facies de cristalización de zona de esferulitos evidenciada por las texturas esferulítica y microlítica. En el camino a playa Naranjo es normal la presencia de materia orgánica (3%) y es típica la visualización de disyunción columnar.

La sección superior es una toba con líticos no reconocibles, pómez gris y *fiammes* grises, vítreos y escoriáceos. Específicamente presenta vitroclastos (18-24%), cristaloclastos (3-20%) y litoclastos (6-18%). Esporádicamente presenta escorias irregulares de hasta 20 cm. La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,54$ ) con contactos flotantes, soldamiento variable entre I y IV ( $OB=0,45-0,78$ ) y algunas veces presenta vetas de calcita. En esta sección es típico encontrar fracturamiento columnar con diaclasas distanciadas hasta 1,5 m. La litofacies rica en pómez

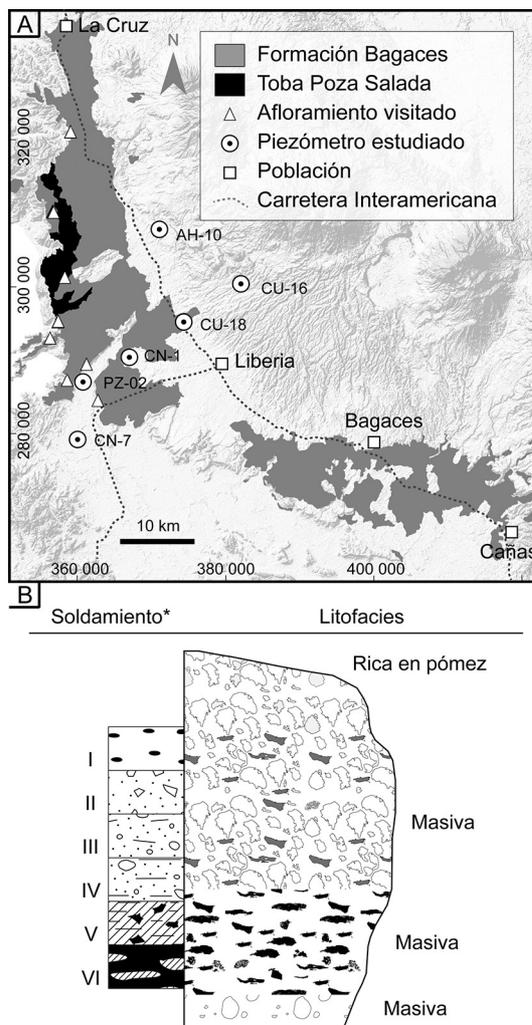


Fig. 14: Toba Poza Salada. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

es una toba con líticos no reconocibles y pómez amarillo-verdosa. Corresponde con una toba gris claro, rojo oscuro cuando se meteoriza, con vitroclastos (55-60%), cristaloclastos (<15%) y litoclastos (8-20%). Presenta muy buena selección ( $\sigma_{\phi}=0,73$ ) con contactos flotantes.

Su mayor exposición es de 17 m en el piezómetro CU-18. Sobreyace a las tobas Mata de Caña, Limbo I y Limbo II, y tobas indiferenciadas y es sobreyacida por las tobas Cuajiniquil y Santa Rosa, y tobas indiferenciadas.

## Toba Santa Rosa

Definida por Mansor (2005) en mención a una toba densamente soldada a parcialmente soldada con pómez. A nivel microscópico, David (2005) identificó vitroclastos de pómez, gris, y gris amarillenta; cristaloclastos de plagioclasa y cuarzo; y líticos ígneos gris oscuro. En el sector noroeste presenta una distribución similar la Toba Poza Salada, en la parte central fue identificada en ocho piezómetros (AH-10, CN-1, CU-18, ME-3, ME-4, ME-5, ME-19, PZ-02) y hacia el sureste se reconoce en afloramientos ligeramente aislados (al oeste de Cañas; Fig. 15).

En esta unidad se reconocen dos tipos de litofacies: una masiva y una rica en pómez. Las litofacies masivas se identifican como: base, sección inferior, sección intermedia y sección superior. La base es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* blancos y negros. Detalladamente es una toba negra rojiza, con vitroclastos (18-36%), cristaloclastos (13-34%) y litoclastos (22-28%). Presenta contactos flotantes a puntuales y soldamiento de rango variable entre II a V ( $OB=0,65-0,82$ ). Algunas características de esta litofacies son vetas rojas silíceas y fractura concoidea en la matriz.

La sección inferior es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* negros. En específico una toba gris claro a violácea, con vitroclastos (36-45%), cristaloclastos (6-34%) y litoclastos (14-17%). Contiene contactos flotantes, por otra parte el soldamiento varía de I a V ( $OB=0,03-0,8$ ) y la facies de cristalización corresponde con zona de fase de vapor por la presencia de textura axiolítica.

La sección intermedia es una toba con disyunción columnar, líticos no reconocibles, lavas, pómez blanca y *fiammes* blancos. Es una toba gris claro a violácea, con vitroclastos (29-50%), cristaloclastos (5-17%) y litoclastos (12-19%). Exhibe contactos flotantes. A su vez las mediciones de soldamiento indican un valor de I ( $OB=0,37-0,4$ ) con una facies de cristalización de zona fase de vapor a partir de textura axiolítica. Son típicas las manchas negras y anaranjadas. En esta sección es típica la disyunción columnar.

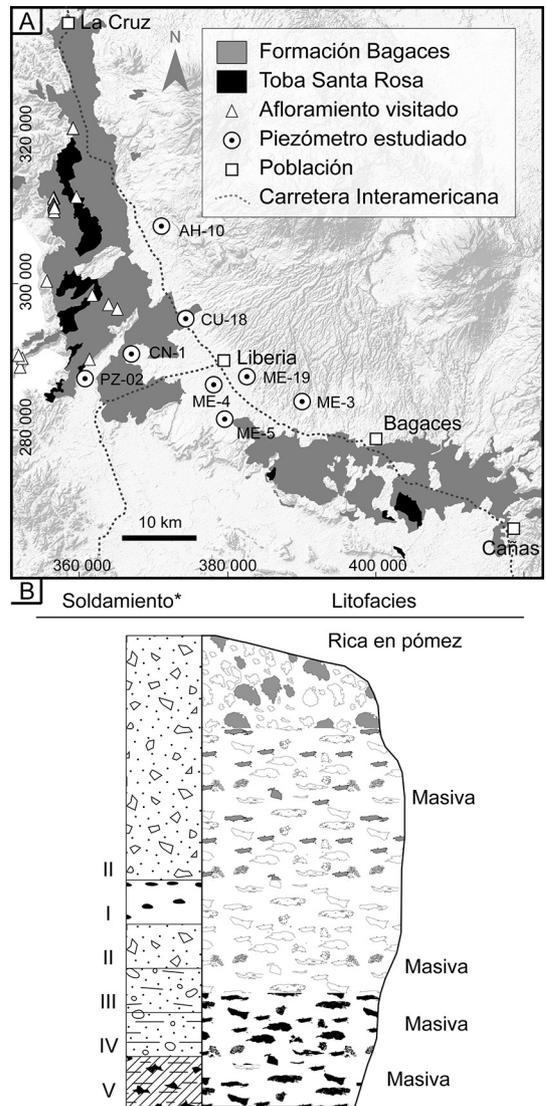


Fig. 15: Toba Santa Rosa. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

La sección superior es una toba con líticos no reconocibles, lavas, obsidiana, pómez gris y *fiammes* grises. Es una toba gris rosada a gris celeste, con vitroclastos (30-42%), cristaloclastos (8-30%) y litoclastos (15-18%). Expone contactos flotantes y un soldamiento de rango II ( $OB=0,56-0,61$ ).

Por último la litofacies rica en pómez es una toba con líticos no reconocibles y pómez

anaranjado. Esta litofacies corresponde con una toba gris rosada, con vitroclastos (7-32%), cristaloclastos (13-25%) y litoclastos (18-30%). El contacto flotante a puntual es típico en macroscopía y soldamiento de rango II ( $OB=0,54$ ).

El mayor espesor observado fue cercano a los 25 m. Subyaciendo a la Toba Santa Rosa están las tobas Mata de Caña y Poza Salada, tobas indiferenciadas y las Lavas Pelón de la Bajura, mientras que es sobreyacida por las tobas La Casona y Río Colorado, y tobas indiferenciadas.

### Toba La Casona

Definida por Ziegler (2005) como una toba amarilla a café amarillenta con pómez, líticos y escoria; con una dirección de emplazamiento hacia el oeste (según isopletas de líticos). Al microscopio David (2005) reconoció pómez y escoria negra; plagioclasa, cuarzo, piroxeno y magnetita; y líticos no reconocibles arcillosos, e ígneos rojos. Esta unidad fue reconocida a través de toda el área de estudio a manera de afloramientos aislados y en seis de los piezómetros analizados (AH-10, CN-1, CU-16, CU-18, ME-3 y ME-4; Fig. 16).

Constituida por dos depósitos piroclásticos; el depósito Inferior tiene una litofacies rica en escoria correspondiente con una toba con líticos no reconocibles, lavas y escoria. Es una toba café con vitroclastos (13-50%), cristaloclastos (7%) y litoclastos (24-41%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,07$ ) con contactos flotantes.

El depósito Superior presenta varias litofacies masivas y una litofacies rica en escoria. Las litofacies masivas se reconocen como: sección inferior, intermedia y superior. La sección inferior es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* grises y anaranjados. Se compone de una toba gris clara a café grisácea con vitroclastos (9-27%), cristaloclastos (6-16%) y litoclastos (5%). Bien seleccionada ( $\sigma_{\phi}=1,82$ ), con contactos flotantes y fracturas irregulares. Con facies de cristalización de una zona parcialmente desvitrificada por la presencia de textura microlítica indicando un soldamiento de rango variable entre IV y VI.

La sección intermedia es una toba con líticos no reconocibles, obsidiana y *fiammes* vítreos. Es una toba gris a café grisáceo con vitroclastos

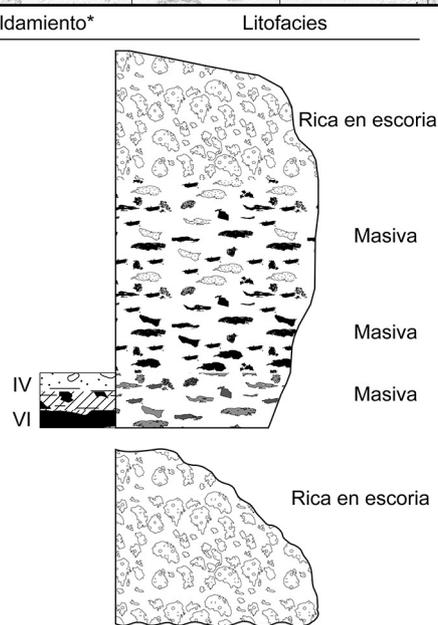
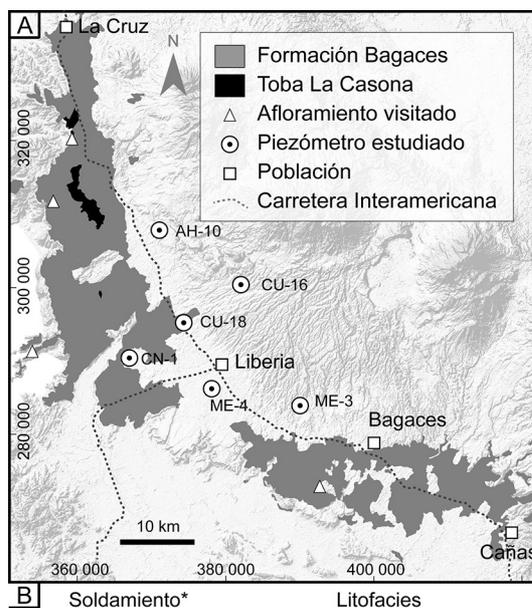


Fig. 16: Toba La Casona. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

(23-45%), cristaloclastos (10-35%) y litoclastos (9-12%). Presenta contactos flotantes.

La sección superior es una toba con líticos no reconocibles, escoria y *fiammes* vítreos. Es una toba café con tonos morado, gris y anaranjado y con vitroclastos (25-42%), cristaloclastos

(4-5%) y litoclastos (30-41%). Contiene contactos flotantes. Hacia la base aparecen *fiammes* de vidrio cristalinos. Hacia el techo las escorias son redondeadas, de hasta 20 cm.

Por último, la litofacies rica en escoria es una toba con líticos no reconocibles, lavas, obsidiana y escoria. Comprende una toba café oscuro a café claro con vitroclastos (16-30%), cristaloclastos (6-13%) y litoclastos (17-46%). La selección es buena ( $\sigma_p=1,82$ ) con contactos flotantes. Hacia la base presenta *fiammes* negros y *fiammes* de escoria.

La sección de mayor espesor reconocido para esta unidad es de 41 m. Sobreyace a la Toba Santa Rosa y tobas indiferenciadas y es sobreyacida por la Toba Río Colorado, tobas indiferenciadas y niveles epiclásticos.

### Toba Cuajiniquil

Se identifica como una toba blanca masiva. Fue diferenciada entre los pueblos de Cuajiniquil y La Cruz (al noroeste del área de estudio) y hacia el oeste de Liberia, principalmente en piezómetros (CN-1, CN-7, PZ-01 y PZ-04; Fig. 17).

La Toba Cuajiniquil se compone de una litofacies masiva rica en pómez, y se caracteriza por ser una toba con pómez blanca y cumulos de cuarzo, la cual por efecto de erosión conforma bloques de hasta orden métrico. En macroscopía es una toba blanca (poco meteorizada) a gris claro (meteorizada) con vitroclastos (34-46%), cristaloclastos (9-12%) y litoclastos (25%). Medianamente seleccionada con contactos flotantes y soldamiento variable entre II y VI ( $OB=0,67-0,88$ ), corroborada con una facies de cristalización de zona de esferulitos. Algunas veces se observa textura perlítica en la matriz y aflora dispuesta en bloques de hasta orden métrico.

El mayor espesor de esta unidad medido fue cercano a los 14 m. La Toba Cuajiniquil es subyacida y sobreyacida por tobas indiferenciadas y rocas epiclásticas.

### Litofacies Monte del Barco

Mencionada ignimbrita Abomal por Schindlbeck et al., (2016). Identificada en el campo como una

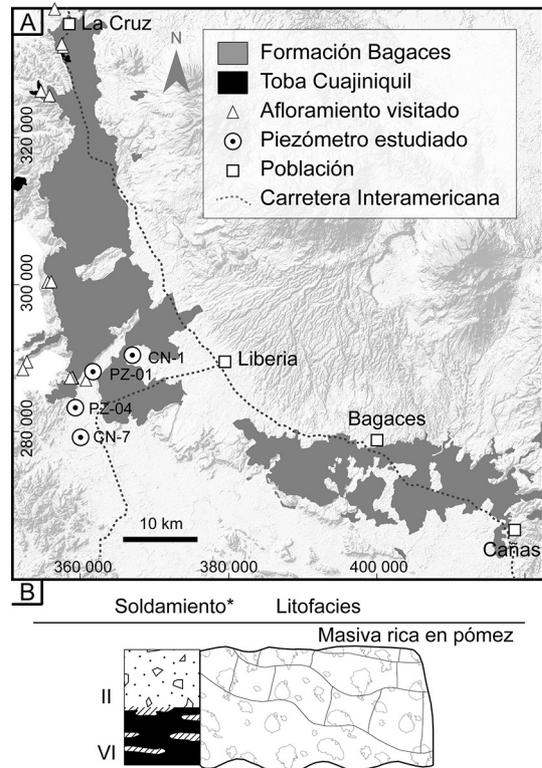


Fig. 17: Toba Cuajiniquil. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

toba gris con variaciones verticales. Representa la base de la Toba Río Colorado (Fig. 18), sin embargo Solano (2018) reconoció diferencias petrográficas entre ambas. Se reconoció en dos piezómetros (CN-1 y CN-7).

Esta unidad se encuentra conformada por dos litofacies masivas y una litofacies rica en pómez. Las litofacies masivas son nombradas: sección inferior y superior. La sección inferior concuerda con una toba con disyunción columnar y líticos no reconocibles. En específico es una toba gris oscuro con cristaloclastos (13%) y litoclastos (10%). Exhibe contactos flotantes y soldamiento I ( $OB=0,43$ ). En la base de esta sección se visualizan clastos imbricados y el techo de esta sección tiende a formar disyunción columnar.

La sección superior es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* de pómez. Es una toba negra con vitroclastos (30%), cristaloclastos

(25%) y litoclastos (8%). Muestra contactos flotantes, mientras que el soldamiento es de rango VI ( $OB=0,86$ ) y facies de cristalización de zona fase de vapor con textura axiolítica.

Por otra parte, la litofacies rica en pómez es una toba con lavas y pómez verde amarillenta, gris y blanca. A detalle es una toba gris claro (poco meteorizada) a café (fuertemente meteorizada) con vitroclastos (28-68%), cristaloclastos (4%) y litoclastos (12%). Expone contactos flotantes y soldamiento rango VI con facies de

cristalización de zona fase de vapor, determinada por textura axiolítica.

La sección estratigráfica de mayor espesor es de 17 m en las cercanías de Hacienda Monte del Barco (358599/287277 LN). Sobreyace tobas indiferenciadas y es sobreyacida por la Toba Río Colorado.

**Toba Río Colorado**

Definida por Kempter (1997) para referirse a una toba gris lavanda moderadamente soldada con plagioclasa alineada, pómez y lavas andesíticas. Además, la mayoría de las muestras de Szymanski (2007) de las unidades Hacienda Ciruelas y Barbudal Canal se ubican dentro de esta toba. En micropetrografía se reconocen cristaloclastos de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y opacos alineados (Kempter, 1997; David, 2005). En sección delgada muestra pómez gris, gris rojiza y blanca; cristaloclastos de feldespato y cuarzo; y líticos arcillosos, e ígneos rojos (David, 2005). Muestra una amplia distribución desde La Cruz hasta al sureste de Liberia y fue reconocida en 11 piezómetros (CN-1, CN-7, CU-16, CU-18, ME-3, ME-4, ME-5, ME-12, ME-19, PZ-02 y PZ-04; Fig. 19).

Se reconocen dos depósitos de corrientes de densidad piroclástica. Ambas con litofacies masivas y una litofacies rica en pómez. Las litofacies masivas del depósito Inferior se describen desde la base hasta una sección superior. Una base conformada por una toba con líticos no reconocibles y lavas. Es una toba amarillo claro, con vitroclastos (6%), cristaloclastos (20-25%) y litoclastos (15-50%). A escala de afloramiento el contacto es flotante. Es típico de esta litofacies que la plagioclasa rodee a los clastos, que asemeja una textura fluidal.

La sección inferior es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* anaranjados y negros. En específico es una toba gris oscuro a negra, violácea cuando está meteorizada, con vitroclastos (46-55%), cristaloclastos (<5-18%) y litoclastos (23%). La selección es buena ( $\sigma_0=1,77$ ) con contactos flotantes. A su vez el soldamiento varía entre II y V ( $OB=0,58-0,82$ ). Es usual en esta sección que los bordes de las

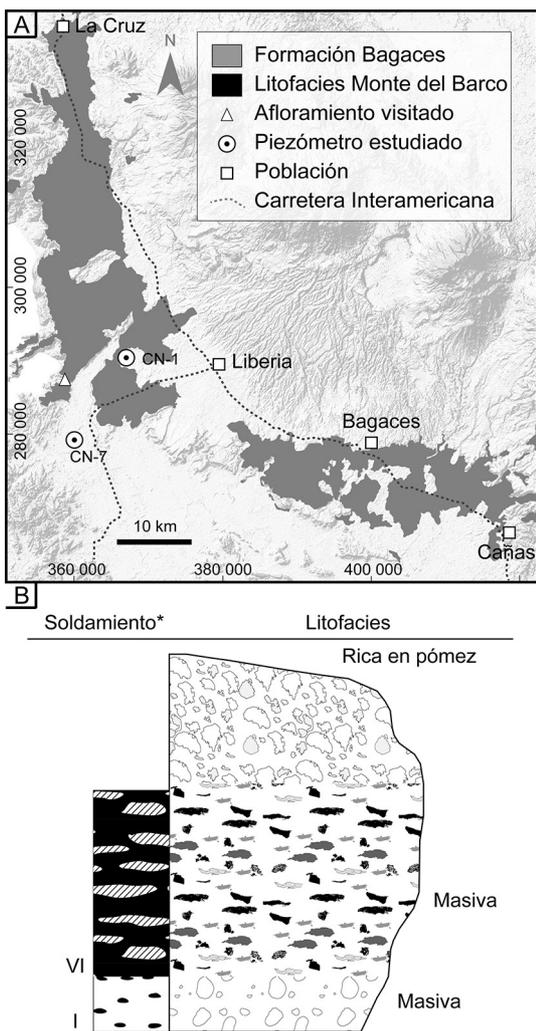


Fig. 18: Litofacies Monte del Barco. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

rocas sean negras, algunas veces los componentes indican la dirección del flujo y la presencia de afloramientos blocosos.

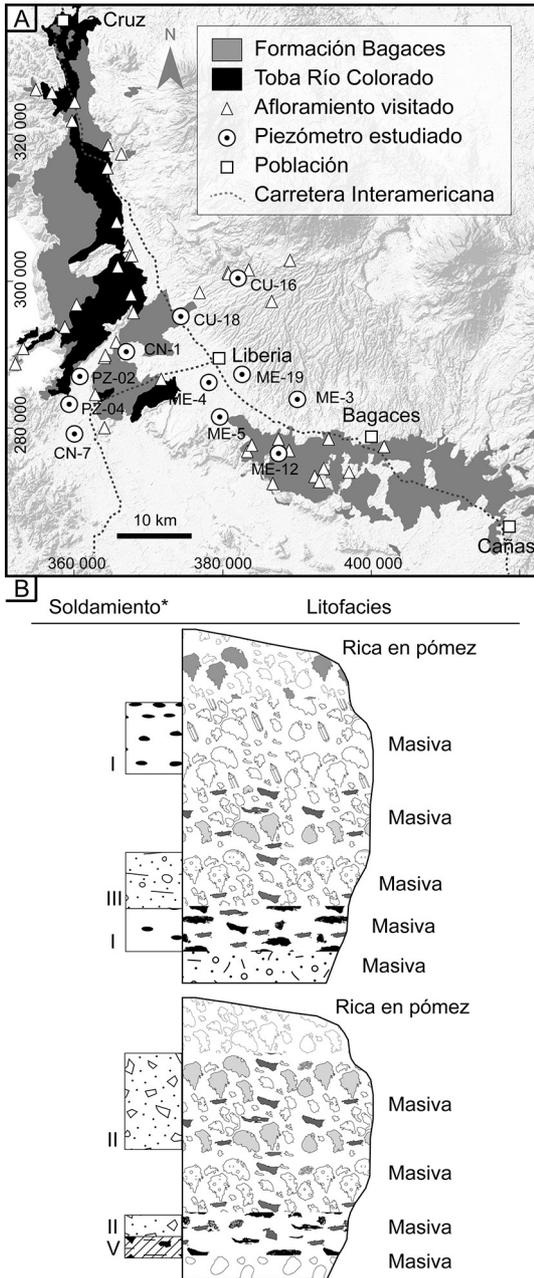


Fig. 19: Toba Río Colorado. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

La sección intermedia es una toba con líticos no reconocibles, escoria, pómez anaranjada y *fiammes* anaranjados. Al detalle es una toba gris claro a oscuro, café cuando se encuentra meteorizada, con vitroclastos (39%), cristaloclastos (8%) y litoclastos (43%). En muestra de mano el contacto es flotante.

La sección superior es una toba con disyunción columnar incipiente, lavas, pómez amarillo verdoso y gris y *fiammes* gris. Corresponde con una toba gris oscuro a rosada, con vitroclastos (15-24%), cristaloclastos (6-27%) y litoclastos (<10%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,93$ ) con contactos flotantes y soldamiento rango II ( $OB=0,63$ ). Son típicos los frentes de meteorización amarillo claro de hasta 3 mm; vetas anaranjadas menores a 1 mm y la presencia de pómez corroída, además, de la presencia de disyunción columnar incipiente y vetas silíceas.

La litofacies rica en pómez es una toba con líticos no reconocibles y pómez blanca. Es una toba gris claro meteorizada adquiere un color anaranjado, con vitroclastos (15%), cristaloclastos (2-5%) y litoclastos (1%). Presenta contactos flotantes.

En el caso del depósito Superior, las litofacies masivas se identifican desde una base a un techo. La base está constituida por una toba con pómez blanca; específicamente es una toba blanca, con vitroclastos (5-15%), cristaloclastos (10-15%) y litoclastos (8%). Contiene contactos flotantes y los clastos no son de un tamaño mayor a los 2 cm.

La sección inferior es una toba blocosa, con líticos no reconocibles y *fiammes* anaranjados y negros. Corresponde con una toba negra a gris claro, violácea con el aumento de meteorización, con vitroclastos (39-42%), cristaloclastos (3-20%) y litoclastos (16%). Exhibe contactos flotantes, mientras que el soldamiento es de rango I ( $OB=0,29-0,45$ ).

La sección intermedia es una toba con líticos no reconocibles, escoria y *fiammes* anaranjados y vítreos. Es una toba gris, anaranjado claro por aumento en el grado de meteorización, con vitroclastos (28-38%), cristaloclastos (10%) y litoclastos (7-8%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,09$ ) con contactos flotantes, por otra parte el soldamiento es de rango III ( $OB=0,69-0,7$ ).

La sección superior es una toba con disyunción columnar, líticos no reconocibles, pómez gris y anaranjada y *flammes* gris. En detalle es una toba gris claro, anaranjada con el aumento en el intemperismo, con vitroclastos (29-54%), cristaloclastos (18%) y litoclastos (<8%). Muestra contactos flotantes y puntuales. Esta sección se caracteriza por poseer disyunción columnar.

El techo es una toba con líticos no reconocibles, lavas y pómez anaranjada. Es una toba anaranjada a gris, con vitroclastos (22-33%), cristaloclastos (3-20%) y litoclastos (4-15%). La selección es buena ( $\sigma_{\phi}=1,49$ ) con contactos flotantes y soldamiento I ( $OB=0,17-0,33$ ).

Por último, la litofacies rica en pómez es una toba con líticos no reconocibles y pómez anaranjada. Esta es una toba blanca verdosa, con vitroclastos (23-24%), cristaloclastos (9-11%) y litoclastos (4%). Expone contactos flotantes y puntuales.

El espesor mayor medido en secciones estratigráficas fue de 55 m, en el piezómetro CN-7. El contacto inferior de esta unidad es con las tobas Poza Salada, Santa Rosa, La Casona, tobas indiferenciadas, las Lavas Pelón de la Bajura y niveles epiclásticos y el contacto superior es con las tobas Cañas, Montenegro y Río Liberia, y niveles epiclásticos.

### Toba Cañas

Definida por Semm (2005) para hacer mención a una toba blanca amarillenta, no soldada, con pómez blanca, amarilla y rosada, predominantemente de tamaño lapilli, cristaloclastos de plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol, y líticos no reconocibles. En el presente estudio se agrupan las Unidades Cañas y Sandillal propuestas por Semm (2005). Su distribución es hacia el oeste de Cañas y en los alrededores de Bagaces. A su vez fue identificada en dos de los piezómetros trabajados (Fig. 20).

Se identificaron dos depósitos de tobas de flujo, cada una con una litofacies rica en pómez. El depósito Inferior es una toba con líticos no reconocibles, lavas y pómez blanca. En detalle es una toba gris a café claro con vitroclastos (41-50%), cristaloclastos (4-11%) y litoclastos (4-12%). Presenta pobre selección ( $\sigma_{\phi}=2,82$ ) con contactos flotantes y soldamiento variable entre rango I y III ( $OB=0,33-0,68$ ).

El depósito Superior es una toba con líticos no reconocibles, escoria, pómez blanca y negra. Específicamente es una toba blanca a gris claro y café con vitroclastos (19-50%), cristaloclastos (<20%) y litoclastos (15-17%). La selección es pobre ( $\sigma_{\phi}=3,41$ ) con contactos flotantes, mientras que el soldamiento varía entre los rangos I y VI ( $OB=0,33-0,89$ ) y presenta una facies de cristalización de zona parcialmente desvitrificada evidenciada por textura microlítica.

Su espesor máximo medido fue cercano a los 19 m (en el piezómetro ME-12). Sobreyace a la Toba Río Colorado y depósitos epiclásticos y es sobreyacida por las tobas Montenegro y Río Liberia.

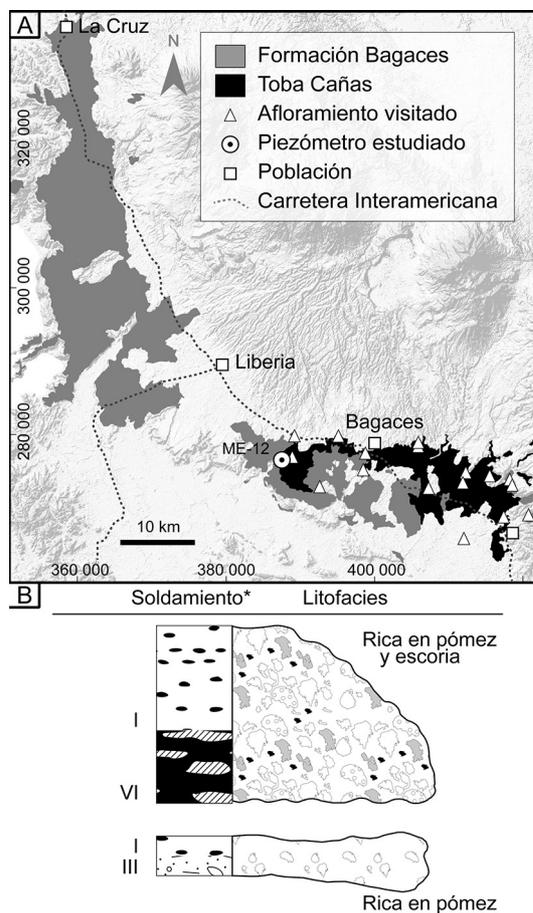


Fig. 20: Toba Cañas. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

## Toba Montenegro

Esta unidad agrupa las unidades Curubandé, Montenegro, Papagayo y Meco propuestas por la Barahona et al. (2001), Semm (2005), Szymanski (2007) y Schindlbeck et al. (2016) en las Tobas Montenegro y Rodeo Viejo. Las cuales Solano (2018) unifica en la Toba Montenegro a partir de criterios micropetrográficos. En el presente estudio se considera válida la propuesta de Solano (2018). La Toba Montenegro ha sido descrita como una ignimbrita grisácea, moderadamente soldada, con plagioclasa, piroxeno, fragmentos líticos, pómez, escoria, *fiammes* de pómez. Presenta una buena distribución desde el sur de La Cruz hasta el oeste de Cañas (Fig. 21) y fue identificada en dos de los piezómetros estudiados (CN-1 y ME-12).

La Toba Montenegro contiene litofacies masivas y una litofacies rica en pómez y escoria. Las litofacies masivas se identifican como sección inferior, intermedia y superior. La sección inferior es una toba con disyunción columnar, líticos no reconocibles y *fiammes* vítreos. Específicamente es una toba negra a café violácea, con vitroclastos (39-50%), cristaloclastos (5-18%) y litoclastos (23-25%). En afloramiento el contacto es flotante. Por otra parte, el soldamiento varía entre I y VI ( $OB=0,42-0,51$ ), con variación de las facies cristalinas de zona fase de vapor a zona de esferulitas determinadas por las texturas axiolítica, microlítica y esferulítica. En esta sección se presenta la visualización de disyunción columnar y alteración hidrotermal a través de vetillas de hasta 5 x 2 cm, estas últimas fueron observadas cerca del sitio Rodeo Viejo.

La sección intermedia es una toba con líticos no reconocibles y *fiammes* blancos. En detalle es una toba gris claro a café claro, con vitroclastos (15-22%), cristaloclastos (5-6%) y litoclastos (9-11%). Presenta contactos flotantes y soldamiento de rango III ( $OB=0,71$ ).

La sección superior es una toba con líticos no reconocibles, lavas y *fiammes* grises. Es una toba gris claro a gris violácea, con vitroclastos (32-44%), cristaloclastos (<10%) y litoclastos (13-17%). Contiene contactos flotantes y la presencia de soldamiento de rango V ( $OB=0,8-0,81$ ).

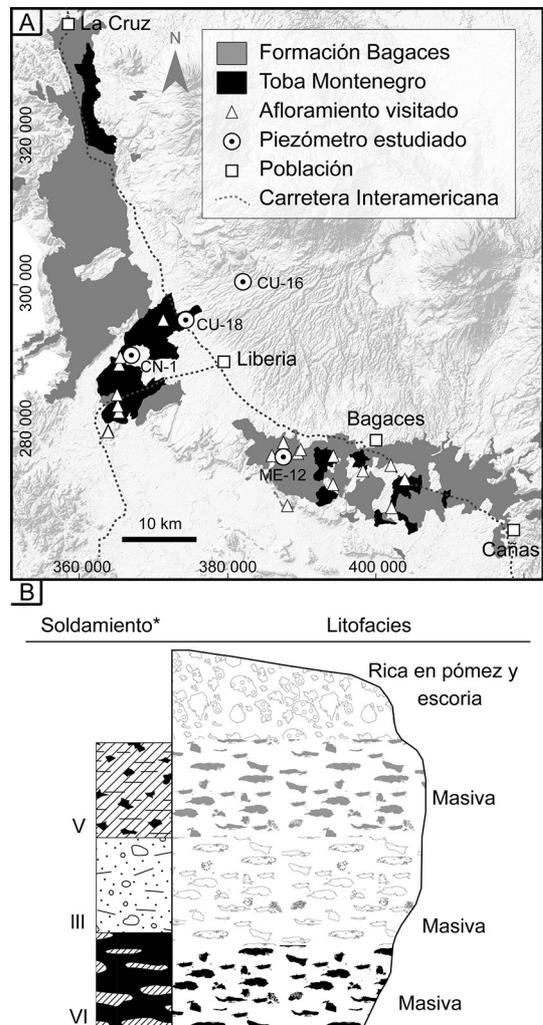


Fig. 21: Toba Montenegro. A. Distribución en el área de estudio y sitios visitados. B. Litofacies de la unidad. Simbología de columna en figura 6.

La litofacies rica en pómez y escoria es una toba con líticos no reconocibles, escoria y pómez blanca. En profundidad es una toba gris claro, café oscuro por meteorización, con vitroclastos (25-44%), cristaloclastos (14-28%) y litoclastos (7%). Exhibe contactos flotantes. La pómez blanca varía a tonos rosados y anaranjados según su grado de meteorización.

Su espesor máximo es cercano a los 7 m (piezómetro ME-12). Sobreyace a las tobas

Río Colorado y Cañas y es sobreyacida por la Toba Río Liberia y tobas indiferenciadas.

## INTERPRETACIÓN GENERAL

Las unidades de la Formación Bagaces fueron conocidas en detalle con base en la descripción macroscópica de núcleos de perforación y el levantamiento de secciones estratigráficas. Los principales productos obtenidos de esta descripción son: (1) la clasificación de los depósitos según su afinidad petrográfica y la división propuesta por Cas y Wright (1987); (2) el conocimiento de las variaciones verticales agrupadas como litofacies y su interpretación basadas en el análisis propuesto por Branney y Kokelaar (2002); (3) la correlación entre las unidades y la sección ideal para una ignimbrita propuesta por Sparks et al. (1973). A continuación se hace la interpretación de las diferentes litofacies y depósitos de las diferentes unidades de la Formación Bagaces según las descripciones. El cuadro 1 es una síntesis de las litofacies principales con sus características para una fácil identificación de campo.

### Toba Alto Mirador

La Toba Alto Mirador se correlaciona con un depósito de flujo de pómez por su tendencia bimodal entre matriz y pómez. Las litofacies ricas en pómez con lentes por lo general son muy variables en cuanto a valores de selección. Este tipo de litofacies pueden ser formadas por depositación inestable a causa de una oleada piroclástica, que permita el desarrollo de depósitos piroclásticos no uniformes, con segregación de pómez por dos medios diferentes: flotabilidad por mecánica del flujo o descenso por densidad. En el caso de la Toba Alto Mirador se valora como un depósito de una oleada piroclástica con segregación de pómez por densidad por la presencia de lentes de pómez a lo largo de la vertical y de tamaño diverso. Por otra parte, se dificulta saber si es la unidad más antigua dentro de la Formación Bagaces o un depósito de oleada piroclástica de la Toba Limbo II, equivalente a un depósito de capa 1 según Sparks et al. (1973). Esto debido a que son petrográficamente similares y se expone en afloramientos dispersos hacia el

oeste del área de estudio (Solano, 2018). Además, Sparks et al. (1973) sugieren que: (1) las oleadas piroclásticas pueden ser precursores de flujos piroclásticos o pueden suceder durante la misma actividad volcánica; (2) su emplazamiento es más extendido que el de los flujos piroclásticos; (3) se ubican bajo la capa 2a. Por tanto, partiendo de su afinidad petrográfica se necesitan estudios estadísticos en geoquímica a detalle en los componentes de los depósitos de las tobas Alto Mirador y Limbo II para conocer más acerca de su parentesco. No es posible detallar en su correlación a partir de criterios de campo. Esto se debe a que son parte de las unidades basales de la Formación Bagaces y están expuestas a procesos fuertes de erosión (típicos de zonas tropicales) además de tener una distribución geográfica aislada.

### Toba Potrerillos

La Toba Potrerillos se relaciona genéticamente con un depósito de flujo de pómez y escoria. Muestra variaciones verticales producto de niveles de soldamiento por efecto de carga durante su enfriamiento.

### Toba Limbo I

Los depósitos de la Toba Limbo I son clasificados como ignimbritas, donde la pómez es el principal componente. El depósito Inferior se deduce que tuvo una fábrica direccional al poseer una base rica en clastos. La dirección no fue conservada debido a procesos de compactación, ya que no hay evidencias de chimeneas de desgasificación o reomorfismo. Además, estos líticos tuvieron un corto periodo de residencia en la zona de cizalla por contener clastos de gran tamaño y forma irregular. Los cortos periodos de residencia también suelen ser producto de una baja pendiente o la presencia de anomalías topográficas durante el emplazamiento. Sin embargo, no se reconocieron características para determinar entre estos factores. Las variaciones verticales son producto de cambios en el soldamiento por carga o la presencia de diferentes niveles de transporte en el emplazamiento. Hacia el techo tiende a ser bimodal, donde la gradación

Cuadro 1

Principales litofacies y características para su identificación en campo.

Unidad	Clasificación del depósito(s)	Litofacies principal(es) y características para su identificación
Toba Alto Mirador	Flujo de pómez / ignimbrita	Litofacies rica en pómez: lentes de pómez, hasta de orden métrico
Toba Potrerillos	Flujo de pómez y escoria	Litofacies masiva - base: <i>fiammes</i> blancos. Litofacies masiva - techo: escoria
Toba Limbo I	Flujo de pómez / ignimbrita*	Depósito Inferior-litofacies masiva-sección intermedia: pómez vario color. Depósito Superior-litofacies masiva: <i>fiammes</i> de escoria
Toba Sandillal	Flujo de pómez / ignimbrita	Litofacies masiva - sección inferior: escoria. Litofacies rica en pómez: pómez blanca, pueden tener el centro gris y bordes anaranjados por procesos de meteorización
Toba Rama de Nance	Flujo de pómez / ignimbrita	Litofacies masiva: frente de meteorización negro y vetas silíceas que sobresalen sobre la matriz
Toba Pan de Azúcar	Flujo de pómez y escoria	Litofacies masiva: <i>fiammes</i> vítreos cristalinos con índices de aplastamiento muy elevados
Toba Limbo II	Flujo de pómez / ignimbrita*	Depósito Inferior-litofacies rica en pómez: pómez vario color (blanca, gris, café amarillento y morado claro) Depósito Superior-litofacies masiva: <i>fiammes</i> negros cristalinos
Toba Mata de Caña	Inferior: Flujo de pómez y líticos Intermedio: Flujo de pómez Superior: Flujo de pómez y líticos	Su particularidad principal son los tonos violáceos en su matriz gris Litofacies masiva - depósito Inferior: líticos Litofacies masiva-depósito Intermedio: <i>fiammes</i> grises y negros Litofacies masiva-depósito Superior: pómez café claro blanca, gris y anaranjada
Toba Poza Salada	Flujo de pómez y escoria	Litofacies masiva - sección inferior: disyunción columnar y <i>fiammes</i> vítreos cristalinos de orden métrico
Toba Santa Rosa	Flujo de pómez / ignimbrita	Litofacies masiva-sección intermedia: <i>fiammes</i> blancos
Toba La Casona	Flujo de pómez y líticos*	Se reconoce en el campo por sus tonos de café en la matriz y sus abundantes clastos de escoria (de hasta orden métrico)
Toba Cuajiniquil	Flujo de pómez / ignimbrita	Litofacies masiva: tendencia a generar bloques de orden métrico y a nivel petrográfico presenta un color blanco característico y cumulitos de cuarzo
Toba Río Colorado	Flujo de pómez / ignimbrita*	Su particularidad principal es su típico tono violáceo Depósito Inferior-litofacies masiva-sección superior: <i>fiammes</i> anaranjados y disyunción columnar incipiente Depósito Superior-litofacies masiva-sección intermedia: escoria y <i>fiammes</i> anaranjados y vítreos
Toba Cañas	Inferior: Flujo de pómez / ignimbrita Superior: Flujo de pómez y escoria	Depósito Inferior: <i>fiammes</i> amarillo claro Depósito Superior: escoria
Toba Montenegro	Flujo de pómez y escoria	Litofacies masiva-sección inferior: <i>fiammes</i> vítreos y disyunción columnar en su sección inferior

\*Unidades con dos depósitos.

inversa en clastos de pómez es producto de segregación y tendencia del flujo a comportarse granularmente. El depósito Superior se explica como una litofacies masiva que suprimió las zonas de cizalla por compactación del depósito y no tener evidencias de fábrica direccional. El techo de este depósito tendió a ser un flujo granular con un proceso de segregación que permitió la boyancia de clastos de pómez, líticos y escoria.

### **Toba Sandillal**

La Toba Sandillal se correlaciona con una ignimbrita, con base en que la pómez es el principal clasto. Se interpreta un mecanismo de depositación con diferentes niveles de transporte por presentar variaciones verticales. El inferior desarrolló soldadura, el intermedio con disyunción columnar y el superior con un enjambre de pómez por comportamiento granular y segregación por boyancia durante el emplazamiento.

### **Toba Rama de Nance**

La Toba Rama de Nance es una ignimbrita dado a su alto contenido de clastos de pómez y selección pobre. A su vez describe un proceso de enfriamiento uniforme al tratarse de una toba masiva sin variaciones verticales composicionales y las variaciones en soldamiento se atribuyen a efecto de carga en el depósito.

### **Toba Pan de Azúcar**

La Toba Pan de Azúcar se correlaciona con un depósito de flujo de pómez enriquecido en escoria. Se reconoce un proceso de depositación que permitió suprimir la zona de cizalla y una distribución uniforme de los clastos de escoria al estar su base fuertemente soldada respecto al techo.

### **Toba Mata de Caña**

La Toba Mata de Caña se compone de tres depósitos diferenciables por sus distintas afinidades micropetrográficas (Solano, 2018). El depósito Inferior se correlaciona con una ignimbrita con alto porcentaje de líticos; el depósito Intermedio

con un flujo de pómez y el depósito Superior con una ignimbrita con rica en líticos. Se asocia esta unidad a un proceso agradacional al relacionarse que los depósitos sean masivos, las zonas de cizalla hayan sido suprimidas y la sucesión de un depósito Inferior rico en *fiammes*, seguido de un depósito Intermedio con *fiammes* y pómez y un depósito Superior con abundante pómez. Además, la sucesión es característica de un rápido emplazamiento que permitió el enfriamiento de los tres depósitos como una sola, evidenciado en los valores de soldamiento obtenidos. Se estima esta unidad como el depósito de un conjunto de corrientes de densidad piroclásticas emplazadas sobre la posición actual de los ríos Blanco y Tempisque, con un posible centro eruptivo cercano al poblado de Curubandé. Esto de acuerdo a la distribución de las litofacies y el aumento de espesor de las mismas a hacia el noreste.

### **Toba Limbo II**

La Toba Limbo II se interpreta como dos depósitos de ignimbrita, por su contenido predominante de clastos de pómez, pobre selección y evidencias de altas temperaturas de depositación. El depósito Inferior fue un flujo granular monótono, por su bajo valor de soldamiento y la poca deformación en clastos de pómez. Mientras, el depósito Superior presenta gradación *coarse tail*, típica de depósitos de flujos piroclásticos. El emplazamiento de esta unidad fue a través de valles topográficos de acuerdo a la distribución espacial y su ubicación en piezómetros. Se establecen dos lóbulos: uno en dirección a la península de Santa Elena y el otro en concordancia con la dirección actual de los ríos Blanco y Tempisque.

### **Toba Poza Salada**

La Toba Poza Salada se clasifica como un depósito de flujo de pómez rico en escoria. Se identifica una fábrica direccional destruida por compactación del flujo al tener una base rica en líticos sin orientación. Las litofacies de esta unidad sufrieron un enfriamiento uniforme, por el supuesto que se presentan tres niveles diferentes: el inferior con un desarrollo de altos niveles de soldadura,

un nivel intermedio enriquecido en escoria y con disyunción columnar y un nivel superior con un comportamiento de flujo granular que permitió la segregación de clastos de pómez. Donde el aumento en soldadura en el nivel inferior está dado por carga. Por su distribución se comprende que los afloramientos cercanos al golfo de Papagayo concuerdan con una facies distal, evidenciado porque la litofacies rica en pómez tiene mayores espesores en sitios cercanos a La Cortina (frente de algunos cientos de metros que representa el límite oeste de la Formación Bagaces). Mientras que, las muestras de piezómetros cercanos al pie de la cordillera volcánica de Guanacaste corresponden con una facies proximal o una facies intermedia afectada por un valle topográfico, ya que las litofacies masivas muestran sus mayores espesores cerca del eje del Sinclinal de Tobas (estructura delimitada por Bohnenberger, 1968).

### **Toba Santa Rosa**

La Toba Santa Rosa concuerda con una ignimbrita por su alto contenido de pómez. La variación en el soldamiento de la sucesión de litofacies masivas es producto de un proceso de enfriamiento común afectado por carga. Esta unidad presenta un comportamiento similar a la Toba Poza Salada donde se interpreta una facies distal cerca del pueblo de Guardia por un aumento en el espesor de la litofacies rica en pómez. A su vez se aproxima una facies proximal o intermedia, a consecuencia de una anomalía topográfica, cerca del Sinclinal de Tobas por el aumento en el espesor de las litofacies masivas.

### **Toba La Casona**

La Toba La Casona se clasifica como dos depósitos de flujos de pómez enriquecidos en líticos de acuerdo con sus características petrográficas. Se infiere un posible centro eruptivo cercano al pueblo de Curubandé debido a que el depósito Inferior tiene un mayor espesor en los piezómetros próximos al pueblo. Por otra parte, el depósito Superior desarrolló diferentes etapas de soldamiento y litofacies en sus secciones más espesas ubicadas cercanas al Sinclinal de Tobas.

### **Toba Cuajiniquil**

La Toba Cuajiniquil representa un depósito de flujo de pómez bimodal compuesto principalmente por matriz y pómez. Se toma en cuenta un enfriamiento uniforme del depósito al poseer una única litofacies masiva sin variaciones verticales, con un amplio rango de soldamiento. Este último a consecuencia del efecto de la carga. Esta unidad tuvo un emplazamiento a través de valles topográficos (comportamiento similar a la Toba Limbo II), con dos lóbulos principales: el primero en dirección hacia la península Santa Elena y el segundo en concordancia con el cauce de los ríos Blanco y Tempisque.

### **Litofacies Monte del Barco**

La Litofacies Monte del Barco es una ignimbrita, por su alto contenido de fragmentos de pómez. Se identifica una fábrica direccional con un amplio tiempo de residencia de los clastos en la zona de cizalla, al tener una base rica en líticos imbricados de tamaño pequeño. Se aclara un enfriamiento uniforme en toda la unidad por poseer una base rica en líticos, seguidamente un enriquecimiento en *fiammes* y finalmente un techo rico en pómez.

### **Toba Río Colorado**

Los depósitos de la Toba Río Colorado se clasifican como ignimbritas. Se reconoce un enfriamiento homogéneo en los depósitos por su arreglo vertical donde las litofacies masivas varían en función del tipo de *fiammes* y el techo corresponde con una litofacies rica en pómez. Además, el desarrollo de *fiammes* en su parte inferior se relaciona al aumento del soldamiento de los depósitos hacia su base. En el caso específico del depósito Superior de esta unidad, su litofacies base es correlacionable a una capa 2a según la sección ideal propuesta para una ignimbrita por Sparks et al. (1973). Con base en la ausencia de gradación tipo *coarse tail* y clastos de gran tamaño. Estos últimos a consecuencia de los tiempos de tránsito en la zona

cizalla y la dispersión de granos a la base de un flujo piroclástico.

### **Toba Cañas**

La Toba Cañas posee dos depósitos. El depósito Inferior se correlaciona con un flujo de pómez, porque tiene una tendencia bimodal de matriz y pómez. El depósito Superior es relacionado con un flujo de pómez enriquecido con escoria. Ambos depósitos fueron influenciados por efectos de carga durante su enfriamiento esto al mostrar *fiammes* hacia su base y clastos de pómez en su techo, y un aumento de soldamiento hacia su sección inferior.

### **Toba Montenegro**

La Toba Montenegro se clasifica como un depósito de flujo de pómez enriquecido en escoria. Se refiere a un depósito afectado por carga y de enfriamiento homogéneo por variar de una base rica en *fiammes* a un techo con clastos de pómez y escoria de tamaños de hasta orden centimétrico. En el sitio Rodeo Viejo esta toba expone alteración hidrotermal, se deduce que hubo alguna fuente de agua o anomalía local que permitiera el desarrollo de esta.

## **SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Los depósitos de las unidades de la Formación Bagaces presentan diferencias en su fábrica, soldamiento, génesis, distribución y variaciones verticales a partir del análisis macropetrográfico y la correlación piezométrica, por lo que se considera que existió más de un centro eruptivo. Con base en la distribución espacial y las variaciones verticales, el centro eruptivo de las tobas Mata de Caña y La Casona debió estar cercano al pueblo de Curubandé.

Los emplazamientos de los flujos piroclásticos fueron diferentes: algunos a través de valles topográficos, como las tobas Mata de Caña, Limbo II y Cuajiniquil, y otros fueron capaces de modificar por completo la topografía, como las

tobas Poza Salada, Santa Rosa, La Casona, Río Colorado, Cañas y Montenegro.

Se comprobó y complementó la propuesta estratigráfica que facilitaron Guillermo E. Alvarado y Percy Denyer.

La definición genética muestra diferencias de aporte en las unidades de la Formación Bagaces, por ejemplo: el contenido relevante de escoria en las tobas Potrerillos, Pan de Azúcar, Poza Salada, Cañas (depósito Superior) y Montenegro, y la fuerte presencia de líticos en las tobas Mata de Caña (depósitos Inferior y Superior) y La Casona, este último producto de la incorporación de rocas ajenas a la erupción durante el emplazamiento del flujo piroclástico.

Los valores de selección tienden a variar de pobre a moderada (visible en las tobas Potrerillos, Limbo I, Sandillal, Limbo II-depósito Superior y Poza Salada) y el soldamiento de valores altos a bajos (caso de las tobas Limbo I, Mata de Caña, Santa Rosa y Río Colorado, y la litofacies Monte del Barco) de la base al techo de los depósitos piroclásticos. Ambas variaciones son producto de la deformación de los clastos a consecuencia de la carga y la interacción mecánica entre el sustrato y los clastos en la base del depósito durante su emplazamiento y enfriamiento.

Existe una variación en los espesores visualizados en los piezómetros estudiados, siendo más variables en los depósitos más antiguos y más uniformes en los depósitos más recientes. Esto es producto de que los depósitos más antiguos rellenaron la paleotopografía existente, lo que dio lugar a que los depósitos más recientes se emplazaran sobre una topografía más plana.

Se concluye que las litofacies descritas representan la capa 2b propuesta por Sparks et al. (1973) para la mayoría de las unidades. La presencia de una capa 2b sugiere una fase fluida homogénea durante el emplazamiento de un flujo piroclástico (Sparks et al., 1973). Esta fase es la responsable de que los clastos de pómez y otros componentes poco densos sean boyantes durante el transporte. Mientras que, los clastos más densos se ubiquen hacia la base del depósito. Por lo tanto, se genera gradación tipo *coarse tail*. El proceso anteriormente descrito se evidencia con litofacies ricas en pómez, ricas en pómez y

escoria o ricas en escoria en la parte superior y la presencia de litofacies masivas cargadas en líticos hacia la base de los depósitos piroclásticos descritos.

Las unidades que no corresponden con la capa 2b de Sparks et al. (1973) son: la Toba Alto Mirador y la litofacies base del depósito Superior de la Toba Río Colorado. La Toba Alto Mirador es una capa 1, lo que corresponde con un depósito de una oleada piroclástica, producto de una fase peleana dentro de una erupción de mayor tamaño. Este tipo de depósitos son precursores al emplazamiento de flujos piroclásticos y por ende a erupciones de mayor tamaño. La litofacies de la base del depósito Superior de la Toba Río Colorado se interpretó como una capa 2a, lo que implica la existencia de al menos dos eventos piroclásticos en la Toba Río Colorado.

Barrantes (2018), identifica las capas 1 (depósito de oleada piroclástica), 2a, 2b (depósito de flujo piroclástico) y 3 (depósito de caída) de una ignimbrita en la Toba Rama de Nance, lo que implica que este depósito proviene de un flujo producto de una erupción pliniana con una fase peleana final bien desarrollada, es decir una erupción explosiva continua después del emplazamiento del flujo piroclástico.

La presencia de clastos de escoria es importante dentro de la historia eruptiva de la Formación Bagaces. La escoria es producto de magmas con menor viscosidad que aquellos formadores de pómez, lo que permite a su vez una diferenciación de acidez entre las unidades. Es posible identificar cuatro etapas donde diversas unidades presentan escoria (presencia de magmas más básicos) que son:

- Tobas Potrerillos y Limbo I.
- Toba Pan de Azúcar.
- Toba Poza Salada.
- Tobas La Casona, Río Colorado, Cañas y Montenegro.

A su vez, se identificaron tres episodios en los cuales los depósitos son provenientes de magmas más ácidos:

- Toba Alto Mirador.
- Tobas Sandillal, Rama de Nance, Limbo II y Mata de Caña.

- Tobas Santa Rosa, Monte del Barco y Cuajiniquil.

Estos episodios se dan de manera intermitente, lo que representa una actividad volcánica cíclica en Formación Bagaces entre magmas ligeramente más ácidos o básicos.

Sumado a lo anterior, se reconoció que las unidades con clastos de escoria presentan altos porcentajes de piroxeno; por lo que el análisis petrológico de ambos tipos de clastos podría ser un buen complemento para poder entender la ciclicidad de las etapas ácidas y básicas de la Formación Bagaces.

Estudios a detalle en el ámbito geoquímico son necesarios para complementar la propuesta estratigráfica empleada en este estudio, así como los estudios de proveniencia pueden ser otro elemento de investigación futura.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Karla Vásquez y Amalia Gutiérrez por sus aportes en la elaboración del presente trabajo. A Fernanda Fonseca, Sebastián Carmona y Erick Rodríguez por el apoyo en el trabajo de campo. A Giovanni Peraldo y Luis Obando por sus valiosos comentarios para el enriquecimiento de la investigación. El Área de Conservación Guanacaste fue de gran ayuda para la realización de este proyecto, principalmente María Marta Chavarría, Roger Blanco y Alejandro Masís. Este trabajo es una contribución al proyecto 830-B0-242 de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica titulado: Fortalecimiento de la Investigación en Estratigrafía y Tectónica y del proyecto ED-2700 de la Vicerrectoría de Acción Social, con el título: Elaboración del mapa geológico de una parte de las penínsulas de Santa Elena y Nicoya.

## REFERENCIAS

Aguilar, T., y Alvarado, G. E. (2004). Tafonomía y sedimentología de la paleobiota estuarina en los Cerros Barbudal (Costa Rica) sepultada por vulcanismo neógeno.

- Revista Geológica de América Central, (30), 111-116.
- Aiazzi, D., Fiorletta, M., Civelli, G., Chiesa, S., y Alvarado, G. E. (2004). Geología de la hoja Cañas. Revista Geológica de América Central, (30), 215-223.
- Alvarado, G. E. (2009). Geología de la hoja Fortuna, Alajuela, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, (41), 117-122.
- Alvarado, G. E., y Gans, P. B. (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. Revista Geológica de América Central, (46), 7-122.
- Alvarado, G.E. y Denyer, P. (2019). Estratigrafía volcánica. En: Denyer (Editor). Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica. San José (Costa Rica). Centro de Investigación en Ciencias Geológicas de la UCR.
- Andjić, G., Baumgartner-Mora, C., y Baumgartner, P. O. (2016). An upper Paleogene shallowing-upward sequence in the southern Sandino Forearc Basin (NW Costa Rica): response to tectonic uplift. *Facies*, 62(2), 9.
- Astorga, A. (1987). El Cretácico Superior y el Paleógeno de la vertiente pacífica de Nicaragua meridional y Costa Rica septentrional: origen, evolución y dinámica de las cuencas profundas relacionadas al margen convergente de Centroamérica. (Unpublished licenciatura thesis), Universidad de Costa Rica, San José.
- Bandini, A. N., Flores, K., Baumgartner, P. O., Jackett, S. J., y Denyer, P. (2008). Late Cretaceous and Paleogene radiolaria from the Nicoya Peninsula, Costa Rica: a tectonostratigraphic application. *Stratigraphy*, 5(1), 3-21.
- Barahona, M., Bonilla, E., Cortés, R., Coto, L., Guzmán, G., Herrera, P.,... y Zamora, N. (2001). Geología-vulcanología del Campo Geotérmico Borinquen-Las Pailas. (Campaña Geológica). Universidad de Costa Rica, San José.
- Barrantes, G. (2018). Modelo volcanosedimentario e historia geológica del sector noreste de Lomas Barbudal (Guanacaste, Costa Rica). (Unpublished licenciatura thesis). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Baumgartner, P., Mora, C., Butterlin, J., Sigal, J., Glacon, G., Azéma, J., y Bourgois, J. (1984). Sedimentación y paleogeografía del Cretácico y Cenozoico del litoral pacífico de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, (01), 57-136.
- Baumgartner-Mora, C., Baumgartner, P. O., y Tschudin, P. (2008). Late Oligocene larger foraminifera from Nosara, Nicoya Peninsula (Costa Rica) and Windward, Carriacou (Lesser Antilles), calibrated by  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotope stratigraphy. Revista Geológica de América Central, (38), 33-52.
- Bohnenberger, O. (1968). Un reconocimiento fotogeológico en Guanacaste. Ministerio de Agricultura y Ganadería y Servicio Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- Branney, M. J., y Kokelaar, B. P. (2002). Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geological Society Memoir*. (27), 1-152.
- Calvo, C. (1987). Las calizas neríticas de la vertiente pacífica del norte de Costa Rica y sur de Nicaragua: épocas y sistemas asociados con la apertura y evolución del margen convergente de América Central meridional. (Unpublished licenciatura thesis). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Cas, R. A. F., y Wright, J. V. (1988). Three types of pyroclastic deposits and their eruption: an introduction. In *Volcanic Successions Modern and Ancient* (pp. 92-126). Springer, Dordrecht.
- Chiesa, S., Alvarado, G. E., Pecchio, M., Corella, M., y Zanchi, A. (1994). Contribution to petrological and stratigraphical understanding of the Cordillera de Guanacaste lava flows, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, (17), 19-43.
- Chiesa, S., Bettoni, M., y Confortini, F. (2004). Área de Conservación Guanacaste, Fuente

- de vida y desarrollo. Área de Conservación Guanacaste: Rothschildia. [http://www.ac-guanacaste.ac.cr/rothschildia/v3n1/textos/geol\\_guana.html](http://www.ac-guanacaste.ac.cr/rothschildia/v3n1/textos/geol_guana.html)
- Civelli, G., Locati, U., Bigioggero, B., Alvarado, G. E., y Mora, O. (2005). Geología de la hoja Tierras Morenas. *Revista Geológica de América Central*, (33), 99-110.
- David, A. (2005). The Bagaces Formation in the Guanacaste Province, Costa Rica: refined stratigraphy and petrology. (Doctoral dissertation). Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Deering, C. D., Vogel, T. A., Patino, L. C., y Alvarado, G. E. (2007). Origin of distinct silicic magma types from the Guachipelín Caldera, NW Costa Rica: Evidence for magma mixing and protracted subvolcanic residence. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165(3), 103-126.
- Dengo, G. (1962). Estudio geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica. San José, Costa Rica: Instituto Geográfico de Costa Rica.
- Denyer, P., y Gazel, E. (2009). The Costa Rican Jurassic to Miocene oceanic complexes: Origin, tectonics and relations. *Journal of South American Earth Sciences*, 28(4), 429-442.
- Denyer, P., Aguilar, T., y Montero, W. (2014). Cartografía geológica de la península de Nicoya, Costa Rica: estratigrafía y tectónica. San José, Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica.
- Dóndoli, C. (1950). Liberia y sus alrededores. *Suelo Tico (Costa Rica)*, 4(18-19), 65-69.
- Fisher, R. V. (1966). Rocks composed of volcanic fragments and their classification. *Earth-Science Reviews*, 1(4), 287-298.
- Flores, K. (2003). Propuesta tectonoestratigráfica de la región septentrional del golfo de Nicoya, Costa Rica. (Tesis de Licenciatura). Univ. De Costa Rica, San José.
- Funaioli, G., y Rossi, L. (1991). Il complesso vulcanico del Rincon de La Vieja (Costa Rica): evoluzione chimica e petrografica: tesi di laurea (Doctoral dissertation).
- Gillot, P. Y., Chiesa, S., y Alvarado, G. E. (1994). Chronostratigraphy of upper Miocene-Quaternary volcanism in northern Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (17), 45-53.
- Kempton, K. (1997). Geologic evolution of the Rincón de la Vieja volcanic complex, northwestern Costa Rica. (Doctoral dissertation). Univ. Texas at Austin, Texas.
- Mansor, S. (2005). The Post-Carboniferous units of the Bagaces Formation: The Meseta de Santa Rosa (National Park Santa Rosa, Costa Rica)[Kartierung]. (Doctoral dissertation). Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Marquardt, M. (2005). Refined Stratigraphy of the Bagaces Formation, Santa Rosa National Park/Costa Rica [Kartierung]. (Doctoral dissertation). Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Naciones Unidas. (1975). Investigaciones de aguas subterráneas en zonas seleccionadas de Costa Rica. New York, USA.
- National Institutes of Health (2016), ImageJ (1.6.0) [Software] . Recuperado de: <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., y Siever, R. (1987). Introduction and Source Materials. In *Sand and Sandstone* (pp. 1-21). Springer, New York, NY.
- Pizarro, D. (1993). Los pozos profundos perforados en Costa Rica: Aspectos litológicos y bioestratigráficos. *Revista Geológica de América Central*, (15), 81-85.
- Quane, S. L., y Russell, J. K. (2005). Ranking welding intensity in pyroclastic deposits. *Bulletin of Volcanology*, 67(2), 129-143.
- Rivier, F. (1983). Síntesis geológica y mapa geológico del área del Bajo Tempisque, Guanacaste, Costa Rica. Inf. Sem. IGN, 1, 7-30.
- Schindlbeck, J. C., Kutterolf, S., Freundt, A., Alvarado, G. E., Wang, K. L., Straub, S. M., ... & Woodhead, J. D. (2016). Late Cenozoic tephrostratigraphy offshore the southern Central American Volcanic Arc: 1. Tephra ages and provenance. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(11), 4641-4668.

- Schmidt-Effing, R. (1974). El primer hallazgo de amonites en América Central Meridional y notas sobre las facies Cretácicas en dicha región. San José, Costa Rica: Instituto Geográfico de Costa Rica.
- Semm, W. (2005). Pliocene ignimbrites (Formación Bagaces) around Cañas, Guanacaste, Costa Rica [Kartierung]. (Doctoral dissertation). Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Smith, R. L. (1960). Ash flows. *Geological Society of America Bulletin*, 71(6), 795-841.
- Solano, J. P. (2018). Estratigrafía y petrografía del Plio-Pleistoceno del noroeste de Costa Rica: Formación Bagaces y Lavas Pelón de la Bajura. (Unpublished licenciatura thesis). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Sparks, R. S. J., Self, S., y Walker, G. P. (1973). Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1(3), 115-118.
- Sprechmann, P., Astorga, A., Fernández, A., y Calvo, C. (1993). Cuadro sinóptico de correlación estratigráfica de las cuencas sedimentarias de Costa Rica. In P. y resúmenes de Ponencias (Ed.), IV Congreso Geológico Nacional (pp. 7-16). San José.
- Sprechmann, P., Astorga, A., Fernández, A., y Calvo, C. (1994). Cuadro sinóptico de correlación estratigráfica de las cuencas sedimentarias de Costa Rica. *Rev. Profil*, 7, 427-431.
- Streck, M. J., y Grunder, A. L. (1995). Crystallization and welding variations in a widespread ignimbrite sheet; the Rattlesnake Tuff, eastern Oregon, USA. *Bulletin of Volcanology*, 57(3), 151-169.
- Szymanski, D. W. (2007). Magmatic Evolution of Ignimbrites in the Bagaces Formation, Guanacaste Province, Costa Rica. (Doctoral dissertation). Michigan State University, Michigan.
- Tournon, J. (1984). Magmatismes du mesozoique à l'actuel en Amérique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andesites. (Doctoral dissertation). Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Ziegler, M. (2005). The ignimbrites of the Bagaces Formation, Santa Rosa National Park, Costa Rica [Kartierung]. (Doctoral dissertation). Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

