

GEOLOGÍA DE LA HOJA PARAÍSO (1:10 000), COSTA RICA

GEOLOGY OF PARAÍSO QUADRANGLE (1:10 000), COSTA RICA

Dennis Sojo

Universidad de Zaragoza, apartado 50009, Pedro Cerbuna, Zaragoza, España
Geotest S.A., apartado 1291-2050, San Pedro, San José, Costa Rica
Centro de Investigación en Ciencias Geológicas, Apdo. 214-2060,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
denisojo@hotmail.com

(Recibido: 22/02/2018; aceptado: 15/05/2018)

ABSTRACT: This paper presents the data derived from the geological mapping of the Paraíso sheet (3445-IV-23), 1:10.000 scale, located within the Central Valley of Costa Rica, together with the most relevant structural and hydrogeological aspects. In general, the existence of a rocky basement associated with the Pacacua Formation of the Upper Miocene, discordantly overlain by materials from the Irazú paleovolcano, related to the Paraíso Formation of the Middle Pleistocene and to the Reventado Formation of the Upper Pleistocene was determined. Due to the climatic conditions and to the composition of the volcanic materials the unit El Rincón Laterite Bed has been developed, which appears in the greater part of the sheet. The above materials are overlaid discordantly by the Upper Pleistocene Alluvial Deposits and by the Lacustrine Deposits, whereas the Current Alluvial Deposits overlap discordantly to the previous materials due to changes in the base level of the rivers produced by the active tectonics in the region. According to morphological observations, a structural model with an axis of N-S orientation stresses, consisting of E-W orientation inverse faults, with shear faults associated with NE-SW and NW-SE orientation is proposed. The hydrogeological model is formed by two aquifers associated with lava flows, with intermediate capacity and affected by the effects of tectonic activity in the sector E of the quadrangle.

Keywords: Paraíso, Pacacua, Irazú, Reventado, Cartago, active tectonic, aluvial, facies, Istarú.

RESUMEN: Este trabajo presenta los datos derivados del cartografiado geológico de la hoja Paraíso (3445-IV-23), escala 1:10 000, ubicada dentro del Valle Central de Costa Rica, junto con los aspectos estructurales e hidrogeológicos de mayor relevancia. En general se determinó la existencia de un basamento rocoso asociado a la Formación Pacacua del Mioceno Superior, sobreyacido discordantemente por materiales provenientes del paleovolcán Irazú, relacionados a la Formación Paraíso del Pleistoceno Medio y a la Formación Reventado del Pleistoceno Superior. Debido a las condiciones climáticas y a la composición de los materiales volcánicos se ha desarrollado la unidad Capa de Laterita el Rincón, la cual aflora en la mayor parte de la hoja. Estos materiales son sobreyacidos discordantemente por los Depósitos Aluviales del Pleistoceno Superior y por los Depósitos Lacustres, mientras que los Depósitos Aluviales Actuales sobreyacen discordantemente a los materiales anteriores debido a cambios en el nivel base de los ríos producto de la tectónica activa en la región. Según observaciones morfológicas se plantea un modelo estructural con un eje de esfuerzos de orientación N-S, compuesto por fallas inversas de orientación E-W, con fallas de desgarre asociadas con orientación NE-SW y NW-SE. El modelo hidrogeológico está conformado por dos acuíferos asociados a coladas de lava, con capacidad intermedia y afectado por los efectos de la actividad tectónica en el sector E de la hoja.

Palabras clave: Paraíso, Pacacua, Irazú, Reventado, Cartago, tectónica activa, aluvial, facies, Istarú.

INTRODUCCIÓN

Se presenta por primera vez un mapa geológico detallado, escala 1:10.000, correspondiente a la hoja Paraíso (3445-IV-23) del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (IGNCR) con su correspondiente texto explicativo con detalles geológicos, tectónicos e hidrogeológicos (Sojo, 2018). Este trabajo aporta una base científica y técnica para ulteriores investigaciones en la zona, así como facilitar una base cartográfica geológica para su correspondiente aplicación en la planificación territorial de las áreas de los cantones de Paraíso, Cartago y Oreamuno que correspondan con la extensión geográfica de la hoja.

Marco tectónico regional

Costa Rica forma parte del Istmo Centroamericano (placa Caribe (CA)), frente a su costa pacífica se encuentra la zona de subducción donde la placa de Cocos (CO) se desliza bajo la placa Caribe con velocidad cercana a 90 mm por año (DeMets, 2001). La región presenta un alto grado de actividad debido a la interacción de los centros de expansión del Pacífico Este, que limitan la placa Pacífica (PA) con la de Cocos el centro de expansión de Nazca, donde limitan la placa de Cocos y Nazca. Este último centro de expansión ha coincidido con el punto caliente de las

Islas Galápagos (IG), generando varias cordilleras submarinas como la Cordillera de Cocos (CC) que, con su interacción con la placa de Caribe mediante la subducción han propiciado que se generen estructuras como la Zona de Fractura de Panamá (ZFP), la Microplaca de Panamá (MPP) y varias condiciones geológicas particulares en Costa Rica, donde la presencia de un arco volcánico predominantemente andesítico y velocidades de onda-P sugieren la evolución de una Corteza oceánica a continental (Gazel et al., 2015).

Montero (2001) determina que hacia el este de Costa Rica y norte de Panamá se encuentran una serie de estructuras compresivas denominadas Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), mientras que hacia el centro de Costa Rica (donde se encuentra la región de Paraíso) se observan una serie de estructuras de desgarre, a las que denomina Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR).

Marco geológico regional

Los aspectos geológicos regionales han sido definidos para el sector central-este de Costa Rica por varios autores, que en general señalan la coexistencia de rocas sedimentarias asociadas a la cuenca de Candelaria, rocas asociadas a volcanismo antiguo y actual, y sedimentos continentales de edad reciente (Figura 2). Los

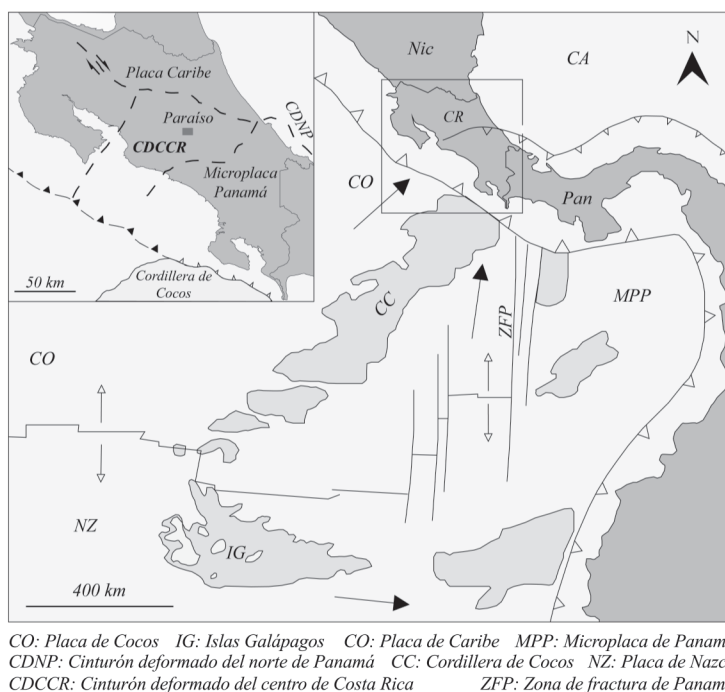


Fig. 1: Ubicación tectónica global de Costa Rica. Los tonos marrones corresponden a las tierras emergidas y los azules corresponden al fondo oceánico, donde destacan las cordilleras submarinas asociadas a las islas Galápagos con color azul oscuro. Se muestra el contexto regional de la interacción entre las placas del Pacífico, Nazca, Cocos, suramericana y Caribe. Modificado de Gazel et al. (2009) y Morel (2015) mientras que el recuadro muestra el detalle de las estructuras tectónicas en Costa Rica.

primeros en correlacionar dichos datos fueron Dóndoli y Chávez (1968), distinguiendo las rocas de la cuenca de Candelaria y las rocas volcánicas recientes; posteriormente, Denyer y Alvarado (2007) determinan que en la región coexisten además rocas volcánicas del Mioceno Superior.

Gazel et al. (2011) señalan que las rocas volcánicas aflorantes al este de la región (Fig. 2) forman parte de un arco volcánico de afinidad toleítica, situado temporalmente en el Mioceno Superior, mientras que las rocas volcánicas al norte, situadas temporalmente en el Pleistoceno Medio-Holoceno (Alvarado y Gans, 2012) presentan afinidad calco-alcalina. Por su parte, Sojo et al. (2017) aporta una serie de datos geoquímicos de los materiales ígneos aflorantes en la región, con los que respalda lo señalado por los autores anteriores y además determina que las rocas aflorantes al oeste son adakititas, las cuales corresponden a un ciclo de volcanismo adakítico

situado temporalmente en el Plioceno-Pleistoceno Inferior. Según lo anterior, se tiene que las unidades geológicas ígneas presentes en la región de estudio han evolucionado desde magmas toleíticos (arcos de islas normales) a magmas con afinidad adakítica y/o calco-alcalina, los cuales sobreyacen discordantemente a las rocas sedimentarias de la cuenca de Candelaria. Dichas rocas sedimentarias están asociadas a la sedimentación nerítica de una cuenca de intra-arco, desarrollada durante todo el Mioceno y deformada posiblemente durante el Plioceno, por lo que actualmente es común el desarrollo de morfologías como homoclinales y pliegues.

METODOLOGÍA

El estudio de la geología se basó en la toma de datos en el campo (por medio de una campaña

de campo realizada durante el periodo de 2016-2017), análisis petrográfico de 21 muestras de roca, revisión bibliográfica y análisis de información de 52 sondeos de pozos registrados en la base de datos del SENARA (2017) seleccionados según la calidad de sus datos de ubicación geográfica, descripciones litológicas y de parámetros hidrogeológicos. Los análisis geomorfológicos y estructurales se realizaron con base en un modelo digital de elevación del terreno realizado a partir de los datos topográficos de escala 1:5 000 del proyecto BID-CATASTRO (2005) y junto con

12 fotografías aéreas del año 1996 del IGNCR (Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica), a escala 1:40 000, sirvió para analizar la geomorfología del terreno y para priorizar lugares a visitar.

La actividad tectónica reciente fue analizada a partir de los datos geológicos y visitas de diferentes lugares para análisis morfológico y estructural.

También se ha elaborado un mapa de contornos estructurales del “techo” de la Formación Paraíso, contando en primera instancia con datos de campo (afloramiento de los materiales de la

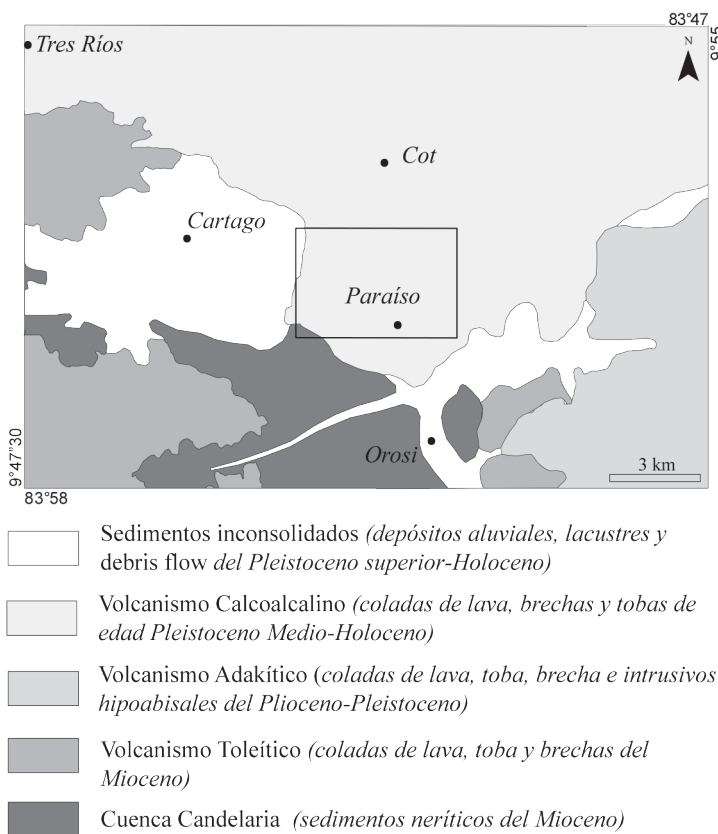


Fig. 2: Esquema geológico regional.

Formación Paraíso) y datos derivados de los sondeos de pozos registrados por SENARA (2017). En los lugares donde hubo una falta de información se realizaron perfiles de sismica de refracción mediante un equipo Geometrics de 12 canales (ubicación detallada en el mapa geológico). La interpolación consistió en la triangulación manual de los datos y el Cuadro 1 se muestra el tipo de dato, ubicación y profundidad de estos.

La hidrogeología del sitio fue definida mediante información derivada de las observaciones de campo, y de los registros de perforación de los 52 pozos seleccionados, los cuales aportaron información sobre litología y algunos parámetros hidrogeológicos de cada unidad.

GEOLOGÍA

Antecedentes de estudios geológicos en la hoja Paraíso

Las primeras descripciones formales de los materiales aflorantes en las cercanías del área de estudio fueron realizadas por Dengo (1962), quien indica que la región de Cartago se conforma por materiales volcánicos de edad reciente (coladas de lava) provenientes del flanco sur del volcán Irazú. Posteriormente, Dóndoli y Chávez (1968) definen la Formación Paraíso, compuesta por una colada de lava con espesor de varias decenas de metros e indican que aflora en las ciudades de Cartago, Paraíso, Juan Viñas y Turrialba. Por su parte, Castillo (1969) atribuye la edad de la Formación Paraíso al Pleistoceno, e indica que se encuentran superpuestos a las rocas sedimentarias de la Cuenca de Candelaria.

Krushensky (1972) realiza la cartografía geológica de la hoja Istarú (1:50 000), e indica que en el sector de Paraíso se encuentra constituido por el Miembro Capa de Ceniza Roja (¿tefras?), excluyendo del mapa la unidad Paraíso.

Recientemente, Alvarado et al. (2006) aporta varias dataciones radiométricas de las unidades asociadas al volcán Irazú, y determina que la Unidad Paraíso (Formación Paraíso de Dóndoli y Chávez, 1968) presenta una edad de 594-569 ka.

Sojo et al. (2017) realizan la cartografía geológica de la Formación Paraíso en la hoja Tapantí (1:50 000), al sur de la ciudad de Paraíso, y determina que las rocas de la Formación Paraíso se encuentran deformadas y ligeramente basculadas hacia el noreste.

Finalmente, Montero (2001), Montero et al. (2013) y Montero et al. (2016) estudian algunas de las estructuras que afectan a la región y determinan que están asociadas al Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica.

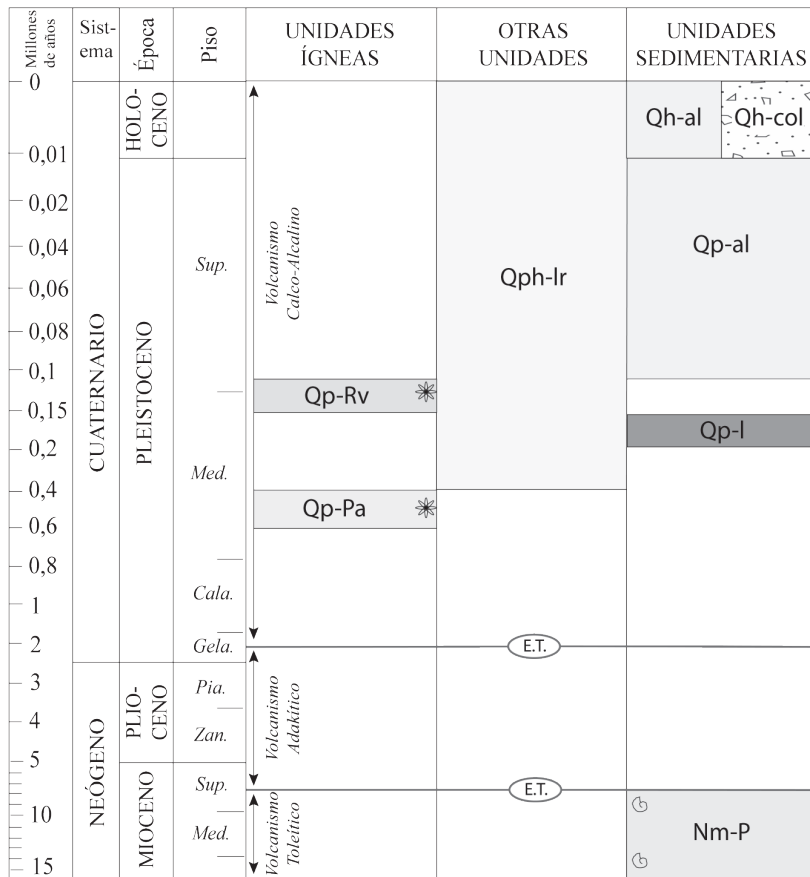
Descripción de las unidades geológicas

La Figura 3 muestra un esquema cronoestratigráfico sintético para el área de estudio en el que las unidades geológicas mencionadas se encuentran cartografiadas en el mapa geológico y son descritas a detalle. Dicha descripción se hace en orden cronoestratigráfico, de acuerdo con las normas estratigráficas oficiales de la *International Union of Geological Sciences* (Salvador, 1994). Por lo tanto, de cada unidad se exponen sus características fundamentales como: estratotipo, descripción, aspectos regionales, edad, correlación con otras unidades y otras áreas, génesis y antecedentes.

Formación Pacacua

Estratotipo

El estratotipo de esta unidad fue definido por Castillo (1969) y se encuentra al sur del cerro Pacacua cerca de la localidad de Paseo Colón, en



* Ⓞ Datación radiométrica y datación paleontológica (E.T.) Evento tectónico

Unidades sedimentarias

- Qh-al** Depósitos Aluviales recientes
Bloques, grava y arena
- Qh-col** Coluvios
Bloques y arcilla
- Qp-al** Depósitos Aluviales del Pleistoceno
Bloques, grava, arena y arcilla
- Qp-l** Depósitos Lacustres
Arcilla y limo
- Nm-P** Formación Pacacua
Arenisca, brecha y lutita

Unidades ígneas

- Qp-Rv** Formación Reventado
Andesita y brecha
- Qp-Pa** Formación Paraíso
Andesita y brecha

Otras unidades

- Qph-Ir** Capa de Laterita El Rincón
Arcilla rojiza

Fig. 3. Esquema cronoestratigráfico de las unidades geológicas de la hoja Paraíso.

la ciudad de San José. En la hoja Paraíso aflora en la esquina suroeste, cerca de la localidad de Barro Morado y a lo largo del cauce del río Agua Caliente.

Descripción

Castillo (1969) la define formalmente como Formación Pacacua, y señala que consiste principalmente en intercalaciones de areniscas y brechas. En las cercanías del área de estudio, Krushensky (1972), Berrangé y Wittaker (1977), Denyer y Arias (1991) y Sojo et al. (2017) realizan descripciones detalladas de estos materiales determinando que se trata de alternancias de lutitas, areniscas y brechas, con espesor variable, tonalidades pardas a verde, presencia de clastos volcánicos, cristales idiomórficos de plagioclasa, fragmentos de moluscos, y presencia de coladas de lava e intrusivos hipoabisales.

Esta formación ha sido identificada en la hoja Paraíso, donde se observó una secuencia estratigráfica de tonalidad gris a morada, con estratos decimétricos compuestos por alternancias de lutitas, areniscas y brechas, con fragmentos volcánicos angulosos de hasta 2 cm (Fig. 4). Se observó que estos materiales se encuentran deformados, con inclinación general hacia el NE.

En la región central de Costa Rica se estima un espesor máximo de 1300 m (Denyer y Arias, 1991), mientras que, en el área de estudio, se logró estimar un espesor mínimo cercano a los 200 m según lo observado en las laderas del cauce del río Agua Caliente.

Edad

Mioceno Inferior a Mioceno Superior, a partir de sus relaciones de campo y dataciones relativas (Denyer y Arias, 1991).



Fig. 4. Afloramiento de la Formación Pacacua en la localidad de Barro Morado (511480-1087175), donde se observa una estratificación decimétrica y alternancia de lutitas y areniscas.

Paleontología-icnología

Sojo et al. (2017) determina la presencia de trazas fósiles de tipo *zoophycus*, fragmentos de moluscos y abundancia de materia orgánica.

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Fischer y Franco (1979), Alvarado (1982) y Rivier (1982) consideran que su contacto con el resto de formaciones de la cuenca de Candelaria es lateral, mientras que su contacto con las rocas volcánicas es discordante, esto ya había sido señalado por Soto y Alvarado (2012), quienes reportan la presencia de peperitas en el contacto de estas formaciones.

En la hoja Paraíso se presenta como la unidad más antigua, y se encuentra en contacto con la Formación Paraíso por medio de una discordancia angular, evidenciando ausencia de materiales desde en Mioceno Superior hasta el Pleistoceno Medio.

Génesis

Alvarado (1982) interpreta que el ambiente de depósito de esta formación es sublitoral, somero, y la sedimentación se dio en un delta o *fan-delta* y Sojo et al. (2017) interpreta que la sedimentación se dio simultáneamente a la actividad del arco volcánico toleítico

Formación Paraíso

Estratotipo

Dóndoli y Torres (1954) describen por primera vez la litología asociada con esta formación, definiendo la serie que aflora en el camino que comunica la ciudad de Paraíso con el poblado de Orosí, mientras que Dóndoli y Chavez (1968) son los primeros en denominarla Formación Paraíso, aflorante en las cercanías de las ciudades de Paraíso, Turrialba y Cartago, sin embargo, no definen un estratotipo formal.

Según la definición realizada en el presente trabajo se define como estratotipo el afloramiento ubicado en la catarata Los Novios (517195-1087300, a 500 m E de la esquina SE de la hoja Paraíso) donde se aprecia la sección completa de esta unidad.

Descripción

Es descrita como una colada de lava andesítica cubierta por tobas y depósitos lacustres por Dóndoli y Torres (1954). Otros autores la definen como una colada de lava andesítica a basáltica con estructuras columnares (Umaña, 1966; Escalante, 1966 y Krushensky, 1972), mientras que Berrangé y Wittaker (1977) indica que se trata de al menos dos flujos o coladas de lava que, debido a su contenido mineralógico (presencia de titanogaugita y olivino), se clasifican como basaltos andesíticos.

Krushensky (1972) considera esta formación como Miembro Paraíso dentro de la que denomina

Formación Reventado, del Grupo Irazú. Sin embargo, Sojo et al. (2017) señala que la nomenclatura correcta debe de ser la de Formación Paraíso debido a que: a) Dóndoli y Chavez (1968) son los primeros en describir formalmente estos materiales, definiéndolos como Formación Paraíso, y b) según los datos geocronológicos aportados por Alvarado et al. (2006), existe una diferencia de edad de alrededor de 350 ka entre los materiales de lo que Krushensky (1972) agrupó como Miembro Paraíso y el Miembro Superior de la Formación Reventado.

En la hoja Paraíso se presenta como una colada de lava con brechas subordinadas, con espesor mínimo de 100 m, donde sobresale la presencia de fenocristales de plagioclasa como rasgo principal (Fig. 5 B). En el afloramiento de la localidad tipo se observa el desarrollo de la colada de lava, donde los basaltos de la parte central de la misma presentan disyunción columnar y espesor cercano a los 100 m (Fig.5 A). Hacia el muro y el techo de dicho flujo basáltico se presentan brechas de tonalidades oscuras, compuestas por clastos basálticos angulosos de hasta 30 cm de diámetro, envueltos en una matriz arenosa de grano fino a medio.

Petrográficamente se clasifica como basaltos andesíticos, con fenocristales de plagioclasa (25%), titanogaugita (15%) y olivino (7 %) (Fig. 6). La matriz está compuesta por cristallitos de plagioclasa, vidrio y olivino. Uno de los rasgos petrográficos más sobresalientes es la resorción que presentan los fenocristales de plagioclasa, la cual sugiere la interacción de dos reservorios magmáticos.

Es importante mencionar que algunos registros litológicos de pozos describen dentro de los materiales de la Formación Paraíso espesores de “lahares” lo que se reinterpreta en este trabajo como la cobertura de alteración de las coladas de lava. Dichos materiales son fácilmente confundibles, especialmente si lo que se describe es la “grava” recuperada del proceso de perforación. De igual manera no se consideraron los pozos que describen litologías como ignimbrita, pues este tipo de roca no fue observado en el campo y también



Fig. 5: A. Afloramiento en la localidad tipo de la Formación (Catarata Los Novios, 3 km al sureste de la ciudad de Paraíso, coordenada 515590-1086800). B. Aspecto macroscópico de una muestra de mano de la Formación Paraíso.

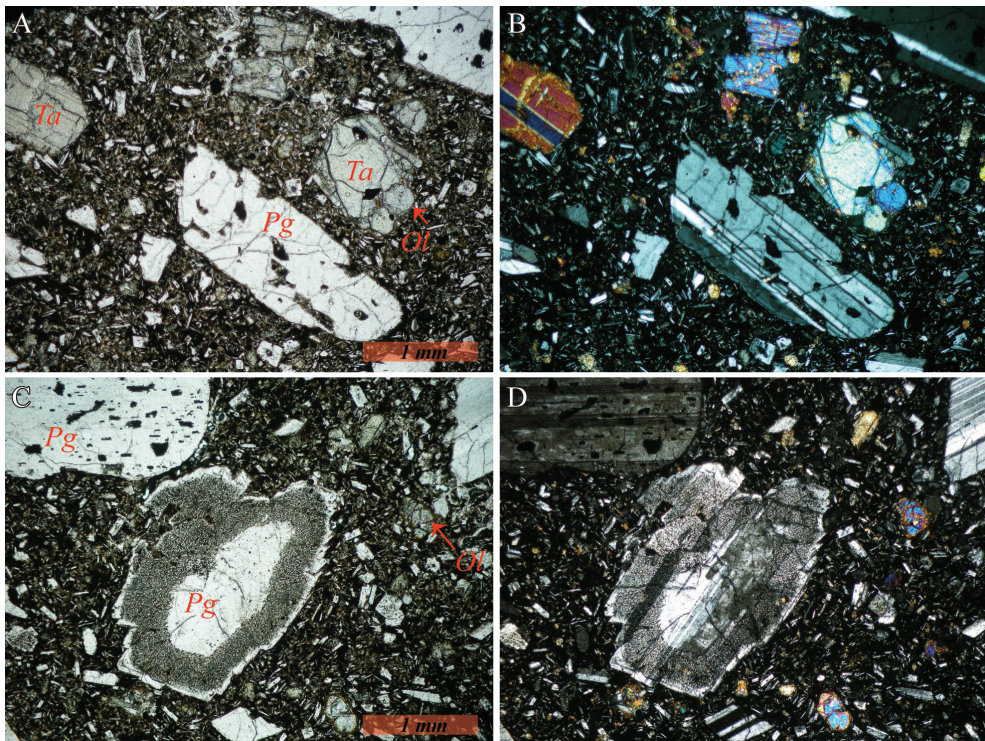


Fig. 6: Láminas delgadas de los basaltos andesíticos de la Formación Paraíso. A-B. Lámina delgada donde se muestran los fenocristales de olivino (Ol), plagioclasa (Pg) y titanita (Ta). C-D. Detalle donde se muestra el borde de resorción de uno de los cristales de plagioclasa.

resulta plausible confundir materiales lávicos con materiales ignimbríticos a partir de la recuperación de los granos de roca del proceso de perforación.

Edad

Alvarado et al. (2006) realizan una datación radiométrica Ar/Ar de esta unidad, que revela una edad de 590 ka (Pleistoceno Medio).

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Sobreyace por medio de una discordancia angular a la Formación Pacacua. Su contacto superior se da de manera transicional con la unidad Capa de Laterita El Rincón.

Génesis

Dóndoli y Chavez (1968) la asocian con los primeros episodios volcánicos del Cuaternario en la región. Krushensky (1972) la asocia a la construcción del estratovolcán compuesto Irazú. Finalmente, Alvarado y Gans (2012) incorporan una serie de datos geocronológicos que les permiten determinar los estadios evolutivos de dicho volcán; en este caso, los materiales de la Formación Paraíso con un rango de edad entre 594 a 450 ka son asociados al *Paleovolcán Irazú*.

Capa de Laterita El Rincón

Estratotipo

Se define como estratotipo el afloramiento en el poblado de El Rincón, al sureste de la hoja Paraíso (515490-1087860), donde aflora una sección que muestra las principales características de la unidad y sus relaciones estratigráficas.

Descripción

Las primeras descripciones formales de estos materiales se realizan por parte de Krushensky (1972), quien los asocia con depósitos de cenizas, denominándolos Miembro Capa de Ceniza de la Formación Reventado, en el Grupo Istarú. No obstante, autores como Berrangé y Wittaker (1977) y Sojo et al. (2017) señalan que dichos materiales más bien corresponden con un espesor considerable de desarrollo laterítico debido a la alteración de las rocas volcánicas subyacentes.

En la hoja Paraíso es la unidad de mayor extensión, ocupando más del 80 % de la superficie estudiada. Se presenta como una capa de laterita constituida por materiales de tonalidades rojizas, con la parte superior compuesta predominantemente por arcillas (Figura 7 A), mientras que hacia el muro se observa la presencia de bloques relictos de composición basáltica envueltos en una matriz de arcilla similar a la arcilla encontrada en el techo (Figura 7 B).

Debido a lo indicado por Berrangé y Wittaker (1977) y Sojo et al. (2017), y lo observado en la hoja Paraíso, se propone la nomenclatura de Capa de Laterita El Rincón, término que engloba la ubicación de la localidad tipo y material.

Según las observaciones de campo, los registros litológicos de los sondeos y la información geofísica (sísmica de refracción, ver ubicación de perfiles en el mapa geológico), se estima que esta unidad presenta espesor variable, llegando a alcanzar los 15 m en algunos lugares.

Edad

Debido a que se trata de un material producto de la alteración de materiales volcánicos con edad máxima de 590 Ka se infiere una edad desde ese periodo hasta la actualidad, es decir, Pleistoceno medio a Holoceno.

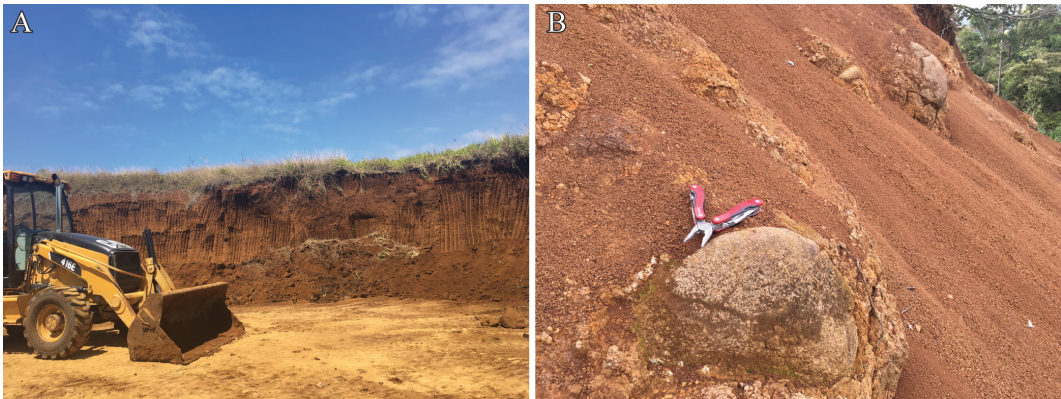


Fig. 7. Afloramientos de la unidad Capa de Laterita El Rincón. A. Parte superior del perfil laterítico donde se observa la predominancia de materiales finos. B. Parte inferior donde se observa la presencia de bloques relictos en las cercanías del Liceo de Paraíso (514480-1087230).



Fig. 8: A. Afloramiento de la Formación Paraíso donde se observa la parte inferior e intermedia de la colada de lava en la localidad de Cot. B y C. Petrografía de una andesita basáltica de la colada de lava donde se observan cristales de Plagioclasa (Pg), Augita (Au) e Iddingsita (Id).

Correlación con otras unidades

Sobreyace por medio de un contacto transicional a la Formación Paraíso, se interdigita con las coladas de lava de la Formación Reventado, por lo que el contacto transicional entre la laterita y las coladas de lava de la Formación Reventado es también comúnmente observado. Es sobreyacida discordantemente por los depósitos recientes de material aluvial.

Génesis

Berrangé y Wittaker (1977) y Sojo et al. (2017) la asocian a la alteración de las rocas de la Formación Paraíso. En el presente trabajo se indica que también está asociada a la alteración de las rocas de la Formación Reventado.

Formación Reventado

Estratotipo

Krushensky (1972) indica que la localidad tipo se encuentra en el cañón del río Reventado, entre la altura de 1660 m.s.n.m. y 2070 m.s.n.m., donde se observa el contacto inferior con materiales arcillosos. Aflora al noroeste de la hoja Paraíso, en las cercanías de los poblados de Páez y Molina y en el camino que comunica a estos poblados con Paraíso, específicamente en torno a las coordenadas 514050-1189670.

Descripción

Krushensky (1972) la asocia con el Miembro Superior de la Formación Reventado, en el Grupo Irazú, mientras que Alvarado et al. (2006) la asocian únicamente con la Unidad Reventado. En este trabajo se utilizará el término propuesto por Alvarado et al. (2006) ya que se ha demostrado que es una formación geológica diferenciable respecto a su edad, extensión geográfica y composición.

Alvarado et al. (2006) señalan se trata de coladas de lava compuestas por andesitas basálticas y andesitas con hornblenda y que dichas coladas de lava se intercalan con epiclastos. En la hoja Paraíso los afloramientos de estos materiales son escasos, presentándose como andesitas alteradas, cerca del techo de la unidad, donde es sobreyacida por la Capa de Laterita el Rincón. Se visitó un afloramiento en el río Páez ubicado 2.5 km al norte de la hoja Paraíso, en la localidad de Cot, en el cual se observa una colada de lava compuesta por un espesor de 10 m de andesita masiva de color gris, correspondiente a la parte intermedia de la colada, el cual sobreyace a una brecha lávica correspondiente a la parte inferior (Fig. 8 A). Se analizó petrográficamente dicha colada de lava (Fig. 8 B y C) y se determinó que está compuesta por fenocristales de plagioclasa, augita, olivino alterado a Iddingsita y magnetita, con matriz traquítica, compuesta principalmente por cristales de plagioclasa seriados, opacos y vidrio.

En la hoja Paraíso se presenta como una colada de lava que tiene su frente terminal en el sector Páez y Molina, donde aflora como andesita alterada. En dichos sitios es normal la ocurrencia de manantiales, debido a sus características hidrogeológicas (este tema será tratado en el apartado de Estudio Hidrogeológico). Por tanto, la determinación cartográfica de la extensión de esta formación se basó en su morfología y en los datos suministrados por los registros litológicos de los pozos IS-325, IS-429 e IS-226, donde se describen la totalidad de los materiales de la colada de lava y su contacto con la unidad Capa de Laterita el Rincón.

Edad

Alvarado et al. (2006) determinan por medio de una datación Ar/Ar que presenta una edad de 136 ka.

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Sobreyace discordantemente a la unidad Capa de Laterita El Rincón, mientras que hacia el

techo grada hacia materiales de la propia laterita, por lo que se interpreta una relación geométrica de interdigitación con la unidad Capa de Laterita el Rincón.

Génesis

Alvarado y Gans (2012) mencionan que se trata de materiales asociados a la construcción de lo que determinan como *Paleovolcán Irazú*.

Depósitos Lacustres

Se define en este trabajo como unidad informal, aflorante en el poblado de Alto Birrisito, alrededor de la coordenada 515770-1088410.

Descripción

Corresponde con al menos 4 capas de materiales finos (arcillas y limos) distinguibles por su geometría, espesor y tonalidad, que varía entre amarillenta, parda y grisácea (Figura 9). Se presenta de manera aislada cerca de uno de los escarpes de las fallas inversas (la geología estructural detalla su relación con el fallamiento) en un área de apenas 300 m², con un espesor total de aproximadamente 6 m.

En general se observa que sobreyace a la Capa de Laterita El Rincón por medio de un contacto plano. La primera capa y la tercera están compuestas por arcillas bentoníticas, asociadas a periodos con mayor actividad volcánica de emanación de cenizas. La segunda capa está conformada por arcillas de tipo “bola” o “ball

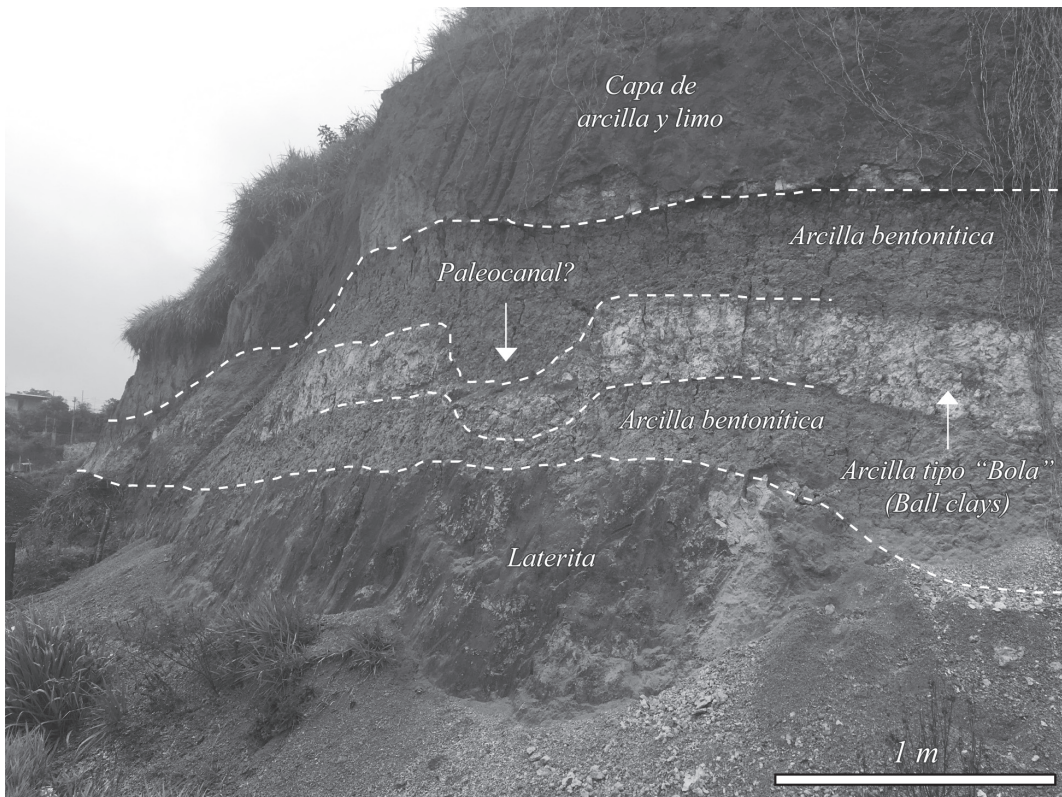


Fig. 9: Afloramiento de la unidad Depósitos Lacustres en la localidad de Alto Birrisito (515770-1088410).

clays”; presentan tonalidades amarillentas debido al aporte de posible caolinita; se observa además una estructura donde la continuidad de la capa se interrumpe, asociada probablemente a un paleo-canal. Finalmente, la cuarta capa está compuesta por arcillas ferruginosas y limos y presenta espesor mayor al de las capas subyacentes. Se considera que está asociada a un incremento en la sedimentación de material detrítico inducido por una mayor actividad lluviosa, y representa el último estadio de la sedimentación en la microcuenca.

Actualmente se encuentran alrededor de 12 laguitos o lagunas en la en la hoja Paraíso, especialmente en las cercanías de las trazas de falla, lo que sugiere una relación en la formación de los Depósitos Lacustres.

Edad

Según las observaciones de campo, la sedimentación se inició después del desarrollo de la Capa de Laterita El Rincón y terminó antes de la aparición de los Depósitos Aluviales del Pleistoceno en la localidad de Alto Birrisito, ya que la aparición de estos últimos depósitos se dio después del levantamiento tectónico de los materiales lacustres, por lo que se le asigna un rango de edad de Pleistoceno Medio.

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Sobreyace discordantemente a la unidad Capa de Laterita El Rincón, y debido a los procesos de deformación tectónica en el sector no se observan materiales por encima de esta unidad.

Génesis

Se interpreta que estos materiales fueron depositados en una cuenca pequeña (un área menor de 60 000 m² según el mapa geológico), de forma elongada, con orientación E-W, paralela al escarpe de la falla inversa en Alto Birrisito. Debido a las características de los sedimentos se estima que el ambiente fue de baja energía, en condiciones climáticas estables, con fuerte influencia de la actividad volcánica debida a periodos de emanación de cenizas en volcanes aledaños.

Depósitos Aluviales del Pleistoceno

Corresponde con una serie de depósitos de tipo aluvial, expuestos en distintos puntos del área estudiada. Existen buenos afloramientos en el sector de Molina, en el río Tatiscú y en el poblado de Alto Birrisito, en la coordenada 515770-1088410 (Figura 10).



Fig. 10: Afloramientos de los Depósitos Aluviales del Pleistoceno. A. Afloramiento en el cauce del río Páez (514150-1089700) donde se observa el cambio de facies Sh a Gmm. B. Afloramiento en el cauce del río Tatiscú (511455-1090450) donde se observa el cambio de facies de los Depósitos Aluviales del Pleistoceno y el contacto con los Depósitos Aluviales Actuales.

Descripción

En la hoja Paraíso se presenta como un paquete de al menos 10 m de espesor, compuesto por material detrítico proveniente de las partes altas del flanco sur del volcán Irazú. En el campo se lograron distinguir dos tipos de facies: Sh y Gmm (Figura 10 A y B), que contrastan significativamente en su granulometría y grado de selección.

Las facies Sh se observan únicamente en algunos afloramientos, donde el paquete de sedimentos lo suficientemente expuesto. Están compuestas por arenas de grano fino a medio, con cantos esporádicos, laminación horizontal y tonalidad parda. La parte superior de las facies Sh no presenta bioturbación. Sobre estos materiales se presentan las facies Gmm, formadas por cantos angulosos poco seleccionados, soportados por matriz arcillosa, sin laminación ni estructuras sedimentarias evidentes.

Edad

Se infiere que se comenzaron a depositar posteriormente al evento volcánico que originó a la Formación Reventado, en el Pleistoceno Superior, mientras que son sobreyacidos discordantemente por materiales del Holoceno, por lo que se les asigna una edad de Pleistoceno Superior.

Relaciones estratigráficas y contactos geológicos

Su contacto inferior no ha sido observado; sin embargo, se infiere que sobreyace discordantemente a las formaciones Paraíso, Reventado, Capa de Laterita El Rincón y Depósitos Lacustres, mientras que es cubierta discordantemente por los Depósitos Aluviales Actuales, tal y como se muestra en la Figura 10 B.

Cuadro 1

Datos utilizados para la determinación de la superficie estructural basada en el techo de la Formación Paraíso

Tipo de dato	Altura m.s.n.m.)	Techo Fm Paraíso	X	Y	Tipo de dato	Altura (m.s.n.m.)	Techo Fm Paraíso	X	Y
Afloramiento	1502	1502	514794	1090697	Afloramiento	1271	1271	515303	1087495
Afloramiento	1470	1470	513490	1090831	Afloramiento	1269	1269	515377	1087567
Afloramiento	1468	1468	513499	1090752	Afloramiento	1260	1260	515713	1087502
Afloramiento	1461	1461	513263	1090791	Afloramiento	1251	1251	516053	1087551
Afloramiento	1454	1454	514779	1090566	Afloramiento	1251	1251	516168	1087549
Afloramiento	1431	1431	516449	1090287	Afloramiento	1242	1242	516319	1087585
Afloramiento	1417	1417	513632	1090340	Afloramiento	1234	1234	516569	1087765
Afloramiento	1389	1389	512030	1089630	Perfil sísmico	1352	1344	514521	1089685
Afloramiento	1389	1389	513993	1089864	Perfil sísmico	1333	1325	514496	1088706
Afloramiento	1385	1385	516361	1090011	Perfil sísmico	1370	1360	511497	1089339
Afloramiento	1381	1381	513921	1090055	Perfil sísmico	1341	1331	514513	1089127
Afloramiento	1373	1373	512002	1089455	Sondeo pozo	1359	1344	511897	1088590
Afloramiento	1364	1364	511842	1089336	Sondeo pozo	1350	1333	515399	1089606
Afloramiento	1415	1360	513148	1089806	Sondeo pozo	1363	1343	513347	1088548
Afloramiento	1313	1313	515489	1088619	Sondeo pozo	1410	1385	512548	1089899

Cuadro 1 (continuación)

Datos utilizados para la determinación de la superficie estructural basada en el techo de la Formación Paraíso

Tipo de dato	Altura m.s.n.m.)	Techo Fm Paraíso	X	Y	Tipo de dato	Altura (m.s.n.m.)	Techo Fm Paraíso	X	Y
Afloramiento	1310	1310	515354	1088674	Sondeo pozo	1360	1330	512146	1087950
Afloramiento	1310	1310	515410	1088686	Sondeo pozo	1360	1330	513447	1088648
Afloramiento	1309	1309	515439	1088640	Sondeo pozo	1359	1329	512896	1088299
Afloramiento	1308	1308	515513	1088621	Sondeo pozo	1367	1327	513447	1088798
Afloramiento	1308	1308	516025	1088667	Sondeo pozo	1458	1426	512569	1090689
Afloramiento	1306	1306	516597	1089047	Sondeo pozo	1370	1337	512297	1088550
Afloramiento	1305	1305	516607	1088963	Sondeo pozo	1453	1416	512949	1090699
Afloramiento	1298	1298	516672	1088914	Sondeo pozo	1443	1363	512798	1089649
Afloramiento	1298	1298	515414	1088595	Sondeo pozo	1370	1330	512447	1088549
Afloramiento	1290	1290	516607	1088669	Sondeo pozo	1361	1318	511767	1089162
Afloramiento	1290	1290	516672	1088736	Sondeo pozo	1370	1321	512447	1088649
Afloramiento	1285	1285	516590	1088568	Sondeo pozo	1367	1317	512147	1088800
Afloramiento	1285	1285	516521	1088324	Sondeo pozo	1360	1310	513386	1088248
Afloramiento	1279	1279	515590	1088072	Sondeo pozo	1391	1340	512987	1089535
Afloramiento	1286	1276	515569	1087967	Sondeo pozo	1360	1300	516651	1089284

Génesis

Las facies descritas sugieren un estadio inicial de condiciones constantes de alto régimen de flujo, unidireccional, que cambia drásticamente a condiciones de muy alta energía reflejadas en flujos cohesivos de tipo *debris flow*. Lo anterior puede estar asociado a aumentos en la tasa de actividad volcánica, recurrencia de eventos climáticos extraordinarios y aumento de la inestabilidad de las laderas debido a actividad sísmica.

Depósitos Aluviales Actuales

Generalidades

Se observa en la mayoría de los lechos de ríos, representados principalmente por clasos subredondeados, poco seleccionados y con matriz arenosa de baja cohesión. Se encuentran

coronando la secuencia geológica y se asigna la edad de Holoceno debido a sus relaciones estratigráficas y con los cauces fluviales. Según lo observado en todos los afloramientos, los ríos donde afloran estos materiales han disectado las unidades inferiores, incluyendo los Depósitos Aluviales del Pleistoceno (Fig. 10 B). Dicha incisión estaría asociada a cambios en el nivel base de dichos cuerpos de agua (fuera de la hoja Paraíso), o bien al levantamiento del basamento rocoso local debido a la acción de las fallas.

Coluvio

Generalidades

Corresponde con afloramientos aislados en las localidades de Barro Morado, Páez y Alto Birrisito. Se presentan en general como materiales inestables compuestos principalmente por

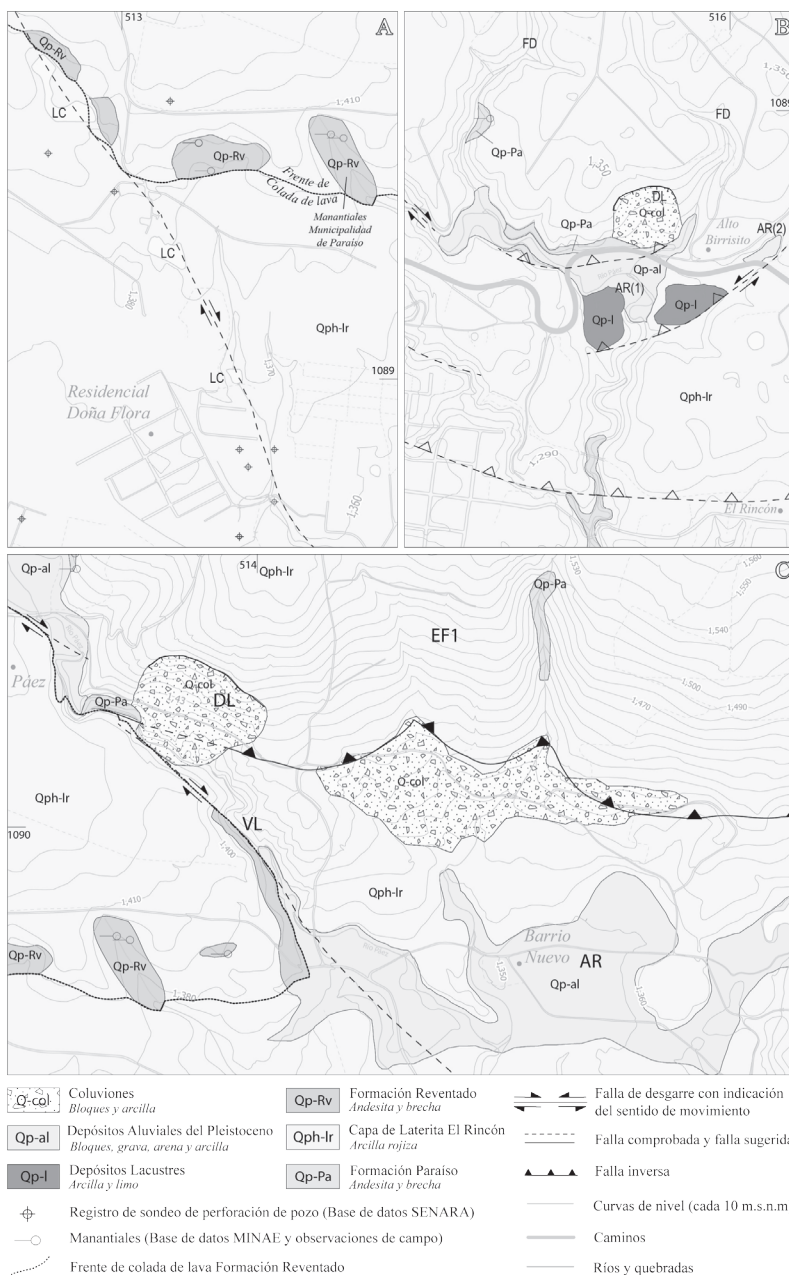


Fig. 11: Selección de los elementos morfotectónicos presentes en el área de estudio. A. Detalle del frente terminal de la colada de lava asociada a la Formación Reventado y falla de desplazamiento de rumbo, donde se observan varias lagunas (LC) alineadas en las cercanías del Residencial Doña Flora. B. Detalle de la estructura de falla inversa en la localidad de Alto Birrisito, sobresaliendo cursos fluviales desviados (FD), aluvión represado (AR) y un deslizamiento (DL) junto al escarpe de la falla. C. Detalle de la falla inversa y la falla de desgarre dextral que discurren junto a las localidades de Páez y Barrio Nuevo, con valles lineales (VL), aluvión represado (AR) y deslizamientos (DL) junto al escarpe de la falla.

arcillas y bloques esporádicos. Se asocian al fallamiento debido a que los afloramientos se encuentran en los escarpes de las fallas con mayor desplazamiento vertical aparente.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En este capítulo se caracterizaron las principales formas de relieve y estructuras tectónicas presentes en el área de estudio, relacionando los procesos de geodinámicos ocurridos desde finales del Neógeno y hasta el presente.

Antecedentes de estudios estructurales en la hoja Paraíso

Las investigaciones sobre temas asociados a la tectónica y geomorfología en el área de estudio corresponden a trabajos de escala regional, los cuales caracterizan de forma general las estructuras y macroestructuras, dejando de lado ciertos detalles que se consideran en el presente trabajo.

De dichas investigaciones sobresale la realizada por Montero y Morales (1990), quienes determinan la dirección de los esfuerzos neotectónicos en Costa Rica, señalando que en la región donde se encuentra la hoja Paraíso el eje máximo compresivo presenta dirección aproximada de N005°E. Posteriormente, Montero (2001) define que la región central de Costa Rica corresponde con una macroestructura compuesta principalmente por un sistema de fallas sinestrales de orientación NE y fallas dextral-inversas con orientación NW, la cual denomina como Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. Dicho autor indica que al sureste de la ciudad de Paraíso se presenta el sistema de falla sinistral Navarro y al suroeste de la ciudad se presenta el sistema de falla dextral Agua Caliente, ambas con sismicidad asociada; por ejemplo, al sistema de falla Navarro se la asocia el terremoto de Paraíso de 1951 (Ms 5.4).

Finalmente, Montero et al. (2013) y Montero et al. (2016) definen que en la región este del Valle Central de Costa Rica (región estudiada) se observan, además de las fallas de desplazamiento de rumbo, fallas inversas con orientación E-W, e

indican que al menos dos de las trazas de falla inversa se encuentran al norte de la hoja Paraíso.

Descripción morfológica

En el área de estudio las formas principales del relieve están asociadas a la actividad volcánica y a la actividad tectónica. Dadas las condiciones meteóricas del área de estudio (y el consecuente alcance de los datos estructurales obtenidos en afloramientos) la información morfológica toma gran relevancia en este trabajo, ya que ha sido una herramienta fundamental a la hora de definir el modelo estructural.

Morfologías asociadas a la actividad volcánica

Estos modelados afectan sobre todo a los materiales de la Formación Reventado y su elemento principal es el escarpe de frente terminal de la colada de lava que se generó durante dicho periodo eruptivo (señalado en el mapa geológico y en la Figura 11 A). El relieve ha sido posteriormente suavizado, y presenta una red de drenaje subparalela a contorneada, evidenciando poco desarrollo de la misma.

Morfologías asociadas a la actividad tectónica

Son las morfologías dominantes en el área de estudio, se asocian a estructuras como fallas de desgarre y fallas inversas, sobresaliendo las lagunas distribuidas en toda el área de estudio, algunas de las cuales se encuentran alineadas con las trazas de las fallas denotando su componente de desgarre (*sag ponds*). Otras morfologías sobresalientes son los valles lineales, cursos fluviales desplazados, deslizamientos en los escarpes de falla y depósitos aluviales represados (depósitos de aluvión que han sido aislados debido a los efectos de la tectónica sobre el sistema de drenaje) en las localidades de Alto Birrisito y Barrio Nuevo debido la evolución del sistema de drenaje respecto a la actividad tectónica. El patrón de drenaje en estas zonas es de tipo combinado, entre rectangular y multicubeta; el relieve es ondulado y la pendiente aumenta hacia los cauces de los ríos. Los

rasgos anteriores reflejan la impronta estructural en una cuenca hidrográfica relativamente joven con actividad tectónica reciente.

En la Figura 11 se seleccionan los aspectos morfológicos y estructurales más sobresalientes de la hoja Paraíso: frente terminal de la colada de lava asociada a la Formación Reventado, fallas de desplazamiento de rumbo con lagunas alineadas (LC), aluviones aislados (AR) y deslizamientos (DL) junto a los escarpes de falla. El escarpe de la falla inversa de Alto Birrisito (Fig. 11B) presenta más de 60 m de altura, y el de la falla inversa de Páez (Fig. 11C), más de 150 m.

Descripción de estructuras

En el mapa geológico, las trazas de fallas en las que se realizaron medidas de orientación de

planos y estrías de falla, así como correspondencia con fallas previamente descritas, son consideradas corroboradas, mientras que las que no cuentan con todos estos elementos son demarcadas como “supuestas” y su trazo es sujeto de futuras corroboraciones. El modelo tectónico está constituido por una serie de fallas (con rumbo E-W y componente inversa, junto con estructuras asociadas de movimiento oblicuo y orientación NE y NW y una serie de pliegues antifformes y sinformes (Fig. 12).

Estructuras con orientación E-W

Se trata de fallas de componente inversa, con trazas sinuosas, longitudes menores de 2.5 km y con saltos verticales máximos en torno a un centenar de metros. Se presentan mayoritariamente en el sector este del área de estudio, donde el relieve se

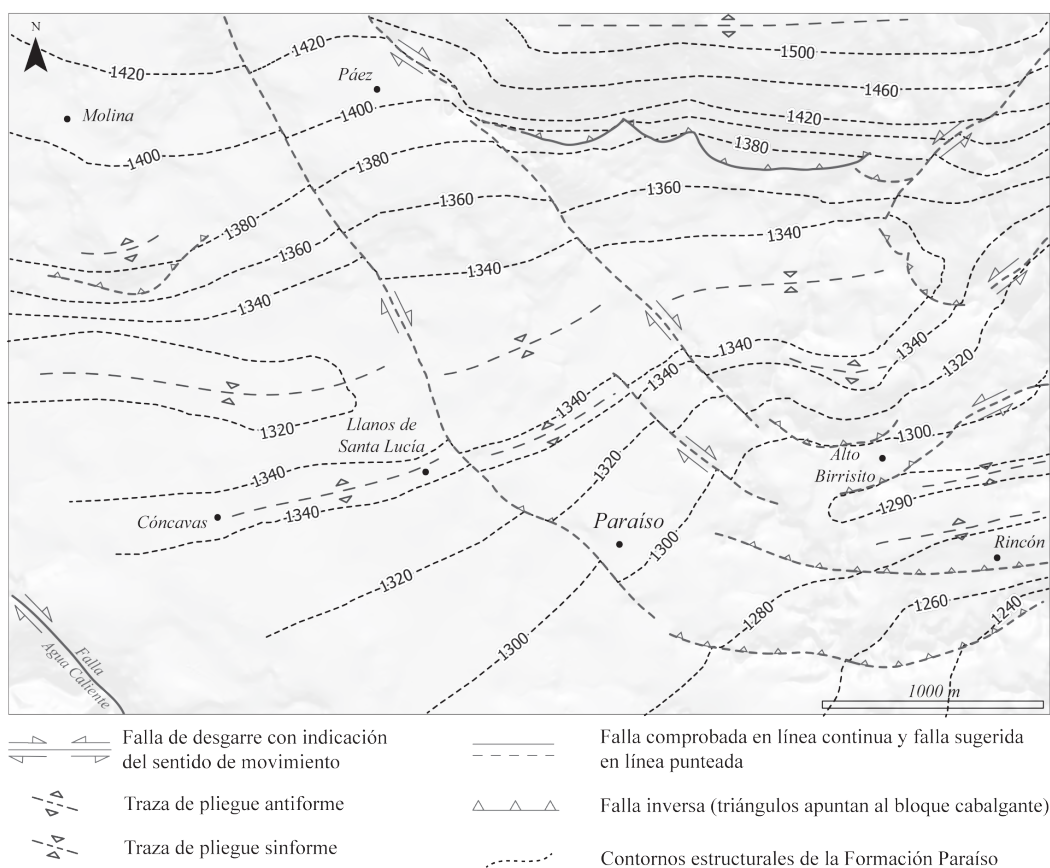


Fig. 12. Mapa estructural de la hoja Paraíso, incluidos los contornos estructurales para el “techo” de la Formación Paraíso.

caracteriza por una serie de valles y divisorias paralelos entre sí, con orientación E-W (que se asocian a cabalgamientos o trazas de falla inversa), perpendiculares a valles con orientación N-S (río principal), marcando una red de drenaje rectangular.

Montero et al. (2013) señalan la presencia de una de estas estructuras e indican algunas de las evidencias morfológicas de la misma, mientras que en este trabajo se determinó que presentan algunas morfológicas asociadas como cursos fluviales desviados, deslizamientos y aluvión represado, así como evidencias hidrogeológicas como efluencia de manantiales. El mapa de contornos estructurales sugiere la presencia de pliegues antiforales y sinforales paralelos a las trazas de dichas fallas.

Estructuras con orientación NE y NW

Se interpretan como fallas de desplazamiento de rumbo sinistral (las de dirección NE-SW) y dextral (las de dirección NW-SE), posiblemente conectadas con las fallas inversas ubicadas al este de la hoja. Presentan longitudes menores de 4 km, trazas rectilíneas, evidenciadas por morfológicas como lagunas alineadas, valles lineales, deslizamientos y aluvión represado.

Pliegues

Junto a las trazas de las fallas inversas se observan morfológicas abultadas que sugieren la presencia de pliegues. Estos pliegues se caracterizan por presentar poca longitud y terminar abruptamente junto con las trazas de las fallas. Fundamentalmente se trataría de anticlinales de bloque superior asociados a las fallas inversas sugeridas en el mapa.

HIDROGEOLOGÍA

En este capítulo se caracterizan los rasgos hidrogeológicos generales de las unidades geológicas cartografiadas, como parte de un modelo hidrogeológico inicial para la hoja Paraíso.

Antecedentes de estudios hidrogeológicos en la hoja Paraíso

El recurso hídrico subterráneo ha sido explotado en la hoja Paraíso desde la segunda mitad del siglo XX mediante la perforación de pozos que no superan los 200 m de profundidad y la captación de manantiales al norte de la hoja. Sin embargo, no existen trabajos que caractericen las unidades hidrogeológicas presentes en el subsuelo de la región.

Descripción de elementos hidrogeológicos

Los materiales encontrados dentro de la hoja Paraíso pueden ser clasificados por medio de cuatro unidades hidrogeológicas según sus propiedades hidrogeológicas, extensión lateral, relaciones estratigráficas y espesor. De esta manera, se consideran las rocas asociadas a la Formación Pacacua como el Acuitardo Pacacua, las formaciones Paraíso y Reventado como Acuífero Paraíso y Acuífero Reventado, los materiales de la Capa de Laterita El Rincón como el Acuitardo de Laterita, mientras que el resto de unidades se califican como unidades de bajo potencial acuífero debido a su pequeña extensión geográfica y poco espesor.

Acuitardo Pacacua

Corresponde al basamento rocoso, compuesto por intercalaciones de lutita, arenisca y brecha, con muy baja permeabilidad y transmisividad, espesor y extensión desconocidos, y aflorante únicamente en la esquina suroeste de la hoja, donde no se observaron ni se reportan manantiales desarrollados en esta unidad. Según sus relaciones estratigráficas con el Acuífero Paraíso y sus características hidrodinámicas se le considera como un acuitardo o acucierre.

Acuífero Paraíso

Es la unidad hidrogeológica captada por la mayoría de pozos en la hoja. Según las observaciones

de campo y las descripciones litológicas de los sondeos de pozos, se compone por coladas de lava fracturadas y brechas, lo que le le proporciona doble porosidad. Presenta transmisividades del orden de los 500 m²/día según los datos de la prueba de bombeo del pozo IS-69, espesor mínimo de 300 m según los perfiles del mapa geológico, nivel de saturación normalmente encontrado a más de 20 m bajo el nivel del suelo (excepto en las cercanías de las zonas de falla), y con dirección del flujo subterráneo hacia el sur. Este acuífero está cubierto por el Acuitardo de Laterita (de espesor variable, lo que se detallará más adelante), lo que implica que sea un acuífero con una cobertura que le provee aislamiento respecto a las actividades que se generen en superficie, reduciendo el riesgo y la vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico.

Presenta condiciones de descarga en las cercanías de las zonas de falla inversa y pliegues, lo cual es interpretado como un efecto de los cambios en las propiedades hidrogeológicas y en las características geométricas del acuífero debido a la deformación experimentada por la roca.

Acuífero Reventado

Corresponde a las coladas de lava y brechas ubicadas al noroeste de la hoja, presenta doble permeabilidad, y se infiere que tiene valores de transmisividad similares a los del Acuífero Paraíso; su espesor está cercano a los 20 m según el perfil geológico E-F del mapa geológico. Se encuentra interdigitado con el Acuitardo de Laterita, lo que le brinda un buen aislamiento respecto a las actividades que se realicen en superficie excepto en los frentes terminales, donde afloran las coladas de lava y se presentan condiciones de descarga manifestada por medio de los manantiales que son aprovechados por la Municipalidad de Paraíso para brindar el servicio de agua potable.

Acuitardo de Laterita

Se encuentra distribuido en toda el área de estudio, compuesto principalmente de arcillas

residuales producto de la alteración de las rocas volcánicas; presenta un espesor cercano a los 15-20 m y baja permeabilidad. Cubre a las unidades acuíferas y se considera como una cobertura efectiva que proporciona a los acuíferos un bajo grado de riesgo y vulnerabilidad a la contaminación acuífera.

Unidades de bajo potencial acuífero

Corresponden a los depósitos aluviales, coluviones y depósitos lacustres que, debido a su poca extensión y poco espesor, no presentan características hidrodinámicas de relevancia.

DISCUSIÓN

En este trabajo se lograron describir y clasificar los distintos materiales dentro del subsuelo de la hoja Paraíso, determinando que en general se trata de materiales de origen volcánico, junto a distintos tipos de sedimentos no consolidados asociados a los procesos de la tectónica, erosión y meteorización. No obstante, existen algunos detalles no aclarados que requerirán en el futuro investigaciones específicas, como es el caso de los cambios de facies registrados en los Depósitos Aluviales del Pleistoceno Medio y la relación entre el ritmo de avance del frente de meteorización de la Capa de Laterita El Rincón respecto al levantamiento tectónico y a los procesos erosivos.

Síntesis y evolución geológica

El basamento rocoso corresponde a las rocas sedimentarias (con clastos ígneos de afinidad toleítica) de la Formación Pacacua, del Mioceno, que se encuentra cubierta mediante una discordancia angular por las rocas volcánicas de la Formación Paraíso, del Pleistoceno Medio, evidenciando un alto grado de actividad tectónica y la ausencia de sedimentación durante el Plioceno y Pleistoceno Inferior. La Formación Paraíso marca el inicio de la actividad ígnea calcoalcalina y

los primeros episodios efusivos del volcán Irazú. Posteriormente la actividad ígnea efusiva cesa e inicia el proceso de laterización de las rocas volcánicas, evidenciado por la Capa de Laterita El Rincón. Simultáneo a lo anterior, los procesos de deformación continúan, generando la aparición de depósitos lacustres debido al colapso del sistema de drenaje. A finales del Pleistoceno Medio la actividad volcánica se reanuda, generando las coladas de lava de la Formación Reventado, acelerando los procesos de erosión y generando las facies *Gmm* de los Depósitos Aluviales (Pleistoceno Medio-Superior). Finalmente, el Holoceno se ve marcado por un descenso del nivel base de los ríos, haciendo que estos incidan sobre sus cauces y definiendo la red hídrica actual.

Se plantea un modelo estructural compuesto por una serie de fallas inversas de orientación E-W con fallas de desplazamiento de rumbo asociadas. En relación con las mismas aparecen también pliegues suaves de orientación E-W. Dicho modelo es compatible con un eje de compresión con orientación aproximada N-S y debido a estas estructuras los materiales que ocupan el lugar desde el Pleistoceno Medio han sido deformados hasta llegar a presentar varios tipos de expresiones morfológicas: escarpes, cursos fluviales rectilíneos, *sag ponds*, ríos desviados, deslizamientos, etc. y se tiene que debido a la edad de los materiales deformados todas las fallas o trazas de falla deben de ser consideradas como neotectónicas.

Sin embargo, algunas de las trazas de fallas de este modelo (fallas sugeridas) carece de medidas de planos de falla o de la orientación de estrías, debido a esta razón serán necesarios trabajos enfocados en corroborar el modelo por medio de la aplicación de técnicas como la excavación de trincheras y su consecuente interpretación, o bien mediante la instalación de una red geodésica para así determinar el grado de actividad de las estructuras y su potencial sísmico, para así poder aplicar la información cartográfica de fallas comprobadas al ordenamiento territorial.

Se interpreta un sistema hidrogeológico compuesto por la intercalación de dos acuíferos y dos acuitardos. El acuífero más profundo presenta potencial intermedio, grado de aislamiento favorable ante potenciales contaminantes y, según se

infiere del modelo geológico elaborado en el presente trabajo, contiene zonas donde la actividad tectónica influye en el equilibrio de este. El acuífero más cercano a la superficie presenta menor potencial acuífero, con condiciones de efluencia en el frente terminal de las coladas de lava.

CONCLUSIONES

Se establece el modelo geológico para el área de estudio, compuesto por materiales con edades de Mioceno Superior a Holoceno. Se ha determinado que existen al menos cuatro discordancias: la primera representada por el contacto entre los materiales sedimentarios basculados del Mioceno Superior y las coladas de lava del Pleistoceno Medio; posteriormente se genera otra discordancia que pone en contacto los materiales lateríticos producto de la meteorización con las coladas de lava y aluvión del Pleistoceno Superior, y finalmente hay otra discordancia donde el nivel de base de los ríos cambió, haciendo que los mismos incidan sobre sus cauces.

El modelo estructural sugiere que la deformación corresponde principalmente con una compresión de orientación aproximada N-S, caracterizado por la presencia de estructuras contractivas, con evidencias de actividad reciente o neotectónica, y que en general produce un levantamiento y acortamiento durante los últimos 250 ka, lo que sugiere que se trata de una zona de comportamiento transpresivo.

Los resultados indican que el modelo hidrogeológico está compuesto por dos acuíferos asociados a las coladas de lava, con capacidad hídrica intermedia, buenas condiciones hidrodinámicas y cubiertos por un espesor considerable de arcilla. Además, se determinó que existen sectores donde las condiciones de flujo subterráneo del acuífero Paraíso son afectadas por las estructuras de falla inversa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó por el autor como parte del Proyecto de Fin de Máster en la Universidad de Zaragoza, bajo la dirección del profesor José

Luis Simón, a quien agradezco profundamente. Durante todo el proceso se contó con el invaluable apoyo y el soporte económico de la empresa GEOTEST SA, por medio de los colegas Roberto y Bruno Protti, con quienes además pude discutir ampliamente sobre distintos puntos de esta investigación. Este trabajo es parte del proyecto # 230-B0-242. Agradezco también a mis compañeros de curso, con quienes sostuve varias discusiones sobre distintos temas de este trabajo y al profesor Percy Denyer de la Universidad de Costa Rica por su colaboración en revisar el mapa geológico y por tantas discusiones que hemos sostenido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, G., Carr, M., Turrin, B., Swisher, C., Schmincke, H. y Hudnut, K. (2006). Recent volcanic history of Irazú volcano, Costa Rica: Alternation and mixing of two intracrustal chambers. En Rose, W., Bluth, G., Carr, M., Ewert, J., Patino, L., y Vallance, J. (ed.), *Natural Hazards in Central America* (pp. 259-276). Geol. Soc. Am. 412.
- Alvarado, G. y Gans, P. (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. *Revista geológica de América Central*, 46, 7-122.
- Alvarado, C.M. (1982). *Estudios sedimentológicos en la Formación Pacacua (Mioceno, CR)*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Berrangé, J. y Wittaker, J. E. (1977). *Reconnaissance Geology of the Tapanti Quadrangle, Talamanca Cordillera, Costa Rica*. Londres: Institute Geol. Sciences, Overseas Division.
- Bull, W. y McFadden, L. D. (1977). Tectonic Geomorphology north and south of the Garlock fault California. En D. O. Doehring (ed.), *Geomorphology in arid regions* (pp. 115-138). Londres: Allen y Unwin.
- Burbank, D. y Anderson, R. S. (2001). *Tectonic Geomorphology*. Oxford: Blackwell.
- Castillo, R., (1969). Geología de los mapas básicos de Abra y parte de río Grande, Costa Rica. *Informes técnicos y notas geológicas*, 33, 1-40.
- Defant, M., Richerson, P., Deboer, J., Stewart, R., Maury, R., Bellon, H., Drummond, M., Feigenson, M. y Jackson, T., (1991). Dacite genesis via both slab melting and differentiation; petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama. *Petrol.*, 1989: 1101-1142.
- Dengo, G., (1962). Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. En *Petrologic Studies* (pp. 133-16). Buddintong: Geol. Soc. America.
- Denyer, P., Arias, O. (1991). Estratigrafía de la región central de Costa Rica. *Revista Geológica de America. Central*, 12, 1-59.
- Denyer, P., Alvarado, G., (2007). *Mapa Geológico de Costa Rica. Escala 1:400 000*. San José: Librería Francesa.
- Dóndoli, C., Chaves, R. (1968). *Mapa adjunto al estudio geológico del Valle Central.- Escala 1: 150 000*. San José: IGN.
- Dóndoli B., Torres A. (1954). *Estudio geo-agronómico de la región oriental de la Meseta Central*. San José: Ministerio de Agr. Ind.
- Escalante, G., (1966). *Geología de la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica*. Inst Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, Publ. Geol. ICAITI: 59-70.
- Fischer, R., Franco, A., J.C. (1979). La Formación Coris (Mioceno, Valle Central, CR). *Inf. Sem. IGN. Jun*, San José, CR, 15-71.
- Gazel, E., Hayes, J., Hoernle, K., Kelemen, P., Everson, E., Holbrook, S., Hauff, F., Bogaard, P., Vance, E., Chu, S., Calvert,

- A., Carr, M. y Yogodzinski, G. (2015). Continental crust generated in oceanic arcs. *Nature*, 8, 321-328.
- Gazel, E., Hoernle, K., Carr, M., Herzerg, G., Saginor, I., Vandenbogaard, P., Hauff, Feigenson, M. y Swisher III, C. (2011). Plume subduction interaction in southern Central America: Mantle upwelling and slab melting. *Lithos*, 121, 117-134.
- Irvine, T. y Baragar, A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Krushensky, R. (1972). Geology of Istarú quadrangle, Costa Rica. *U.S. Geol. Surv., Bull.*, 1358, 46 p.
- Montero, W., Linkimer, L. y Rojas, W. (2016). El sistema de falla Navarro: desplazamientos izquierdos a lo largo del cinturón deformado del centro de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 55, 71-100.
- Montero, W. y Morales, L. (1990). Deformación y esfuerzos neotectónicos en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 11, 69-87.
- Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la Microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24, 29-56.
- Montero, W., Rojas, W. y Linkimer, L. (2013). Neotectónica de las fallas Ochomogo y Capellades y su relación con el sistema de falla Aguacaliente, falda Sur Macizo Irazú-Turrialba, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 48, 119-139.
- Rivier, F. (1979). Geología del área norte de los cerros de Escazú, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Inf. Sem. IGN*, 1, 99-138.
- Salvador, A. (1994). *International Stratigraphic Guide*. Boulder, Colorado: The International Union of Geological Sciences.
- Sojo, D. (2015). *Modelo geológico del cuadrante Tapantí, Costa Rica* (Tesis de licenciatura inédita). Universidad de Costa Rica, San José.
- Soto, D. y Alvarado G. E. (2012). *Peperitas en Costa Rica*. *Revista Geológica de América Central*, 47, 55-68.
- Umaña, J. (1966). Geología del sitio de presa del proyecto Cachí, Costa Rica. *Publ. Geol. ICAITI*, 1, 27-41.

