

# EL SISTEMA DE FALLA ATIRRO-RÍO SUCIO Y LA CUENCA DE TRACCIÓN DE TURRIALBA-IRAZÚ: INDENTACIÓN TECTÓNICA RELACIONADA CON LA COLISIÓN DEL LEVANTAMIENTO DEL COCO

Walter Montero

Escuela Centroamericana de Geología, Red Sismológica Nacional (ICE-UCR),  
Apdo 2-14, 2060 Universidad de Costa Rica, San José  
E-mail: wmontero@geologia.ucr.ac.cr

(Recibido 23/1/03; Aceptado 8/8/03)

**ABSTRACT:** The Atirro-Río Sucio fault system is defined as a series of northwestern dextral slip neotectonic faults, including the Atirro, Turrialba, Tucurrique, Lara, and Río Sucio faults. Rivers and creeks are dextrally displaced by the different faults between few meters and 3,5 km. Left steps along the Atirro and between the Atirro and Tucurrique faults produced the transpressive zones of the Omega, Rincón de la Esperanza, and Mirador ridges. A vertical displacement component along the northeastern block of the Tucurrique fault intermittently damped the Pejibaye, Gato, and Tepemechín rivers, forming the Pejibaye alluvial valley. A right step between the Atirro-Tucurrique faults and the Río Sucio fault produced the pull-apart of Turrialba-Irazú. The Azul, Chiz, and Campano normal faults define the pull-apart in its southeastern side, and control the development of Quaternary basins with thick alluvial and laharic deposits, transported by the Reventazón, Turrialba, Aquiares, Tuis, Pejibaye, and Atirro rivers.

The Quaternary Irazú volcano grew inside the central and northwestern side of the pull-apart. The tensional regime allowed an intense and volumetric magmatism due to an easier connection to the asthenospheric mantle. The location of its craters and parasitic cones, as well as the craters of the Turrialba volcano and its monogenetic cones has been structurally controlled by normal faults and tensional fractures related to the tensional stresses that produced the pull-apart. The thick volcanic products have obscured the geomorphic expression of the pull-apart in this sector.

Historical and recent seismicity along the fault system includes the occurrence of swarms and few earthquakes with magnitudes  $\geq 5,0$ , as was the Patillos earthquake of December 30, 1952 (Ms 5,7). The Atirro-Río Sucio fault system is related to the tectonic indentation produced by the collision of the Cocos ridge with the southeast of Costa Rica, a tectonic event occurring since 5 m.a.b.p.

**RESUMEN:** El sistema de falla Atirro-Río Sucio consiste de una serie de fallas neotectónicas de rumbo NW, predominantemente dextrales, entre las cuales destacan las fallas Atirro, Turrialba, Tucurrique, Lara y Río Sucio. Ríos y quebradas han sido desplazadas dextralmente por las diversas fallas, entre unos pocos metros y 3,5 km. Relevos izquierdos a lo largo de la falla Atirro y entre esta y la Tucurrique han originado las zonas transpresivas de las filas Omega, Rincón de la Esperanza y del Cerro Mirador. Una componente de levantamiento del lado noreste de la falla Tucurrique provocó represamientos intermitentes del drenaje de los ríos Pejibaye, Gato y Tepemechín permitiendo el desarrollo de la cuenca aluvial de Pejibaye. Un salto derecho entre las fallas Atirro-Tucurrique y la falla Río Sucio ha originado transtensión y el desarrollo de la cuenca de tracción (*pull-apart*) de

Turrialba-Irazú. En el sector sureste del *pull-apart* se han formado cuencas limitadas por las fallas normales Azul, Chiz y Campano, donde se han acumulado potentes depósitos cuaternarios aluviales y laháricos, transportados por los ríos Reventazón, Turrialba, Aquiares, Tuis, Pejibaye y Atirro.

El volcán Irazú se instaló durante el Cuaternario dentro del sector centro-occidental del *pull-apart*. El ambiente tensional ha favorecido un más fácil acceso de los magmas provenientes del manto y el desarrollo de una volumétrica y compleja estructura volcánica. La ubicación de los cráteres de los volcanes Irazú y Turrialba y de los conos monogenéticos que se ubican en el macizo volcánico han sido controlados estructuralmente por fallas normales o fracturas tensionales relacionadas con el desarrollo del *pull-apart*. Los potentes depósitos volcánicos asociados con la anterior actividad, ha oscurecido la expresión geomórfica del *pull-apart* en el sector centro-occidental.

La sismicidad histórica y reciente en el sistema de falla muestra la ocurrencia de varios enjambres y algunos temblores de  $M \geq 5.0$ , siendo el principal el terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 ( $M_s$  5,7). El sistema de falla se asocia con la indentación tectónica causada por la colisión del levantamiento del Coco con el sureste de Costa Rica, evento que se inició hace unos 5 Ma.

## INTRODUCCIÓN

Fallas de desplazamiento de rumbo ocurren en diferentes contextos tectónicos, como son límites entre placas (caso de la falla San Andrés, en California, USA), en zonas de convergencia oblicua entre placas (caso de la falla Atacama en Chile) o relacionadas con procesos de colisión (como la falla Altun Tagh en China). En el arco interno de Costa Rica, en la zona de transición entre las cordilleras volcánica Central y de Talamanca, existe una tectónica controlada por la indentación provocada por el levantamiento oceánico del Coco y por lo tanto con un proceso tipo colisión (Kolarsky et al., 1995; Montero, 1994; Suárez et al., 1995). Hay numerosas fallas inversas de rumbo WNW, fallas de desplazamiento siniestral de rumbo ENE a NE y dextrales de rumbo NE. Entre estas últimas destaca el sistema de falla dextral de Atirro-Río Sucio, un sistema de falla que ha sido poco estudiado en la literatura geológica costarricense.

En este trabajo se presentan los resultados de una investigación realizada, analizando imágenes de sensores remotos, junto con observaciones de campo y con datos sismológicos, los cuales en conjunto, permiten caracterizar este sistema de fallas neotectónico, de dirección NW y movimiento dextral, con el cual se asocian relevos distensivos y compresivos, con desplazamientos entre unos pocos metros y varios kilómetros. Dentro las principales zonas distensivas está un *pull-apart* dentro del cual se instaló la zona volcánicamente activa del Irazú-Turrialba. Los anteriores aspectos serán examinados en los próximos apartados.

## MARCO TECTÓNICO

La sismicidad y neotectónica de Costa Rica se relaciona con el proceso de subducción de la placa del Coco, a lo largo de su margen pacífico (Fig. 1). La geometría del frente convergente cambia en diferentes sectores del país. En el noroeste, la subducción alcanza hasta 200 km de profundidad, disminuye a 100 km de profundidad bajo el centro del país, mientras que hacia el sureste, el ángulo de subducción es menor, alcanzando la sismicidad una profundidad máxima de 70 km bajo la cordillera de Talamanca (Protti et al., 1995). Esta variación en la profundidad de la sismicidad es atribuida a la subducción de litosfera marina de la placa del Coco, cada vez más joven y por tanto más boyante del noroeste al sureste del país (Protti et al., 1995). Además, frente a la península de Osa, ocurre la colisión del levantamiento oceánico del Coco, una cordillera submarina de rumbo noreste, la cual ha originado desde hace unos 5 M.a., una indentación tectónica que afecta desde el pacífico sur hasta el sector caribe de Costa Rica (Kolarsky et al., 1995; Collins et al., 1995; Montero, 1994a; Suárez et al., 1995). Como resultado, el indentador ha originado el sistema de fallas del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR) y una sismicidad superficial a través de la región central del país, que constituye el límite oeste entre la microplaca de Panamá y la placa Caribe (Marshall et al., 2000; Montero, 2001).

En el CDCCR existen fallas inversas de rumbo EW a WNW, de desplazamiento siniestral de rumbo NE a ENE y fallas dextrales de rumbo NW (Montero, 2001; ver Fig. 2). Al este, el CDCCR se continúa con el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), el cual bordea el sector noreste de la cordillera de Talamanca y sigue por el caribe de Panamá. En la zona de transición entre el CDCCR y el CDNP se localiza el sistema de falla Atirro-Río Sucio, entre el flanco noreste de la cordillera de Talamanca y el extremo oriental de la cordillera volcánica Central (Figs. 1 y 2).

La geología de la cordillera de Talamanca atestigua la presencia de antiguos arcos volcánicos, el más antiguo es del Paleoceno-Eoceno, luego hubo otro en el Oligoceno medio. Un evento magmático mayor ocurrió entre el Mioceno Medio y Superior, cuando se emplazaron los mayores plutones. Se han identificado también productos volcánicos del Plioceno-Pleistoceno (de Boer et al., 1995). Estas intrusiones y productos volcánicos se inyectaron entre sedimentos de diferentes ambientes o se depositaron sobre estos en diferentes sectores de la cordillera (Fig. 1).

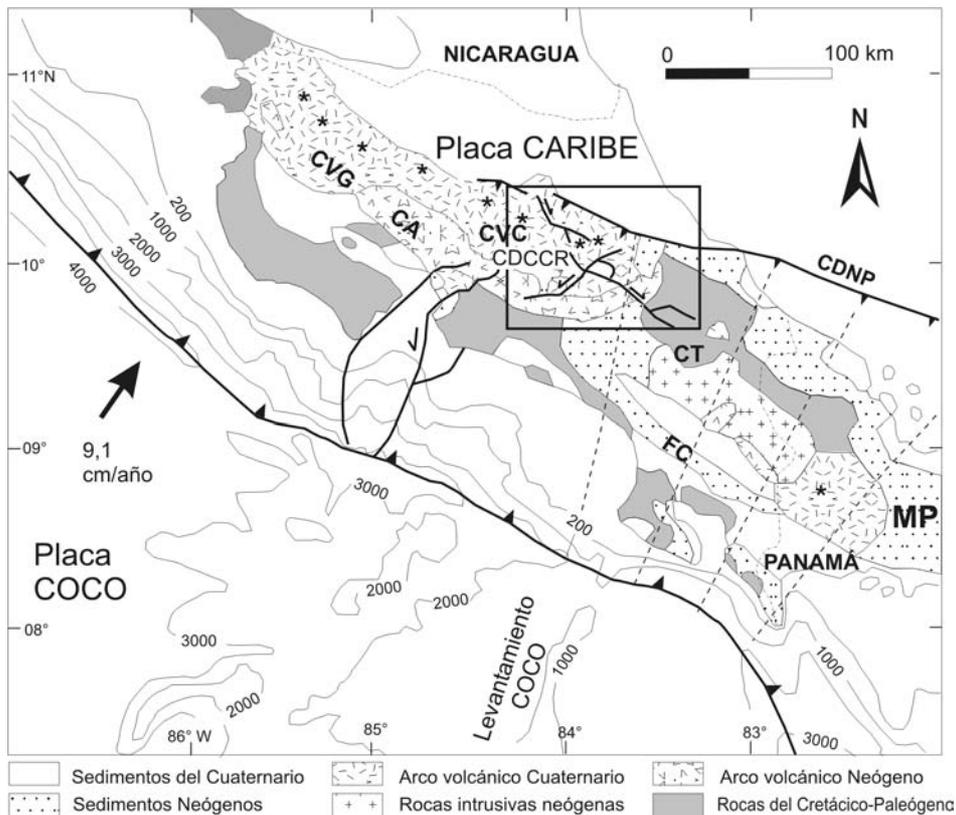


Fig. 1: Contexto geológico y tectónico de Costa Rica. Se muestra las diferentes placas que interactúan y los límites entre estas, incluyendo la fosa Mesoamericana del lado pacífico y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) del lado caribe, los cuales se muestran con la línea con triángulos rellenos. Las fallas que se muestran esquemáticamente a través del centro del país (incluyendo el sistema de falla Atirro-Río Sucio de rumbo NW) forman parte del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), que es el límite oeste de la microplaca de Panamá (MP). El rectángulo identifica el área de la figura 2. Las líneas a trazos en forma de abanico muestran las trayectorias de esfuerzos compresivos horizontales máximos originados por la colisión del levantamiento del Coco, con el sur de Costa Rica. CVG, CA, CVC y CT son las cordilleras volcánica del Guanacaste, del Aguacate, volcánica Central y de Talamanca respectivamente. FC es la fila Costeña. Las estrellas son los volcanes cuaternarios.

La cordillera volcánica Central se formó entre el Pleistoceno Superior y el Holoceno, luego de que se formaron calderas explosivas en el flanco caribe de la cordillera del Aguacate y se erupcionaron las ignimbritas datadas en 340 ka, que cubren sectores importantes del valle Central (Marshall, 2000). Este última depresión quedó atrapada entre la cordillera volcánica

Central y el arco volcánico del Terciario Superior-Pleistoceno Superior.

El sistema de falla Atirro-Río Sucio de rumbo NW, de unos 100 km de longitud, desplaza depósitos sedimentarios, volcánicos e intrusiones terciarias de la cordillera de Talamanca, así como depósitos volcánicos de la cordillera volcánica Central y sedimentos cuaternarios (Fig. 1).

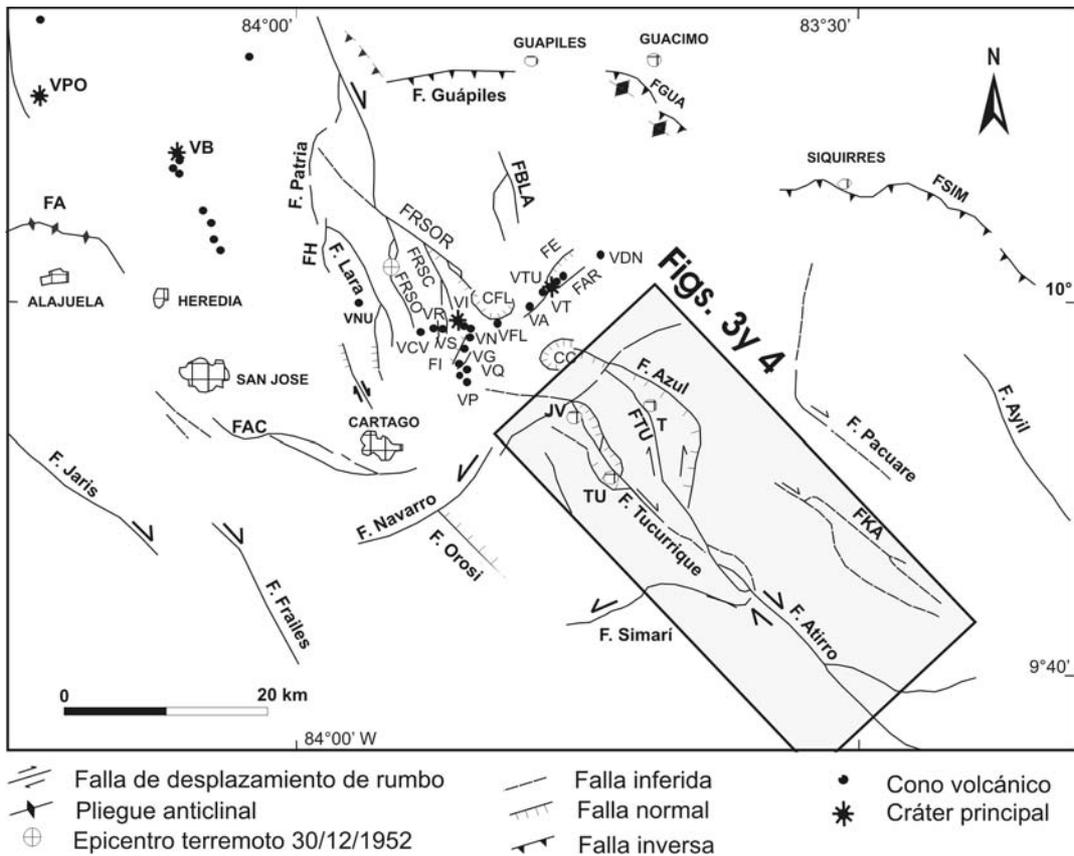


Fig. 2: Sistema de fallas neotectónicas del sector central-este del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica incluyendo el sistema de fallas Atirro-Río Sucio, la cuenca de tracción de Turrialba-Irazú y las estructuras volcánicas. VPO, VB, VNU, VCV, VR, VS, VI, VP, VQ, VG, VN, VFL, VA, VT, VTU y VDN identifica a los volcanes Poás, Barva, Nubes, Cabeza de Vaca, Retes, Sapper, Irazú, Pasquí, Los Quemados, Gurdían, Noche Buena, Finca Liebres, El Armado, Tiendilla, Turrialba y Dos Novillos respectivamente. CFL y CC son respectivamente las calderas Finca Liebres y Coliblanco. FA, FH, FAC, FRSO, FRSC, FRSOR, FI, FBLA, FAR, FE, FTU, FGUA, FSIM, FKA son las fallas Alajuela, Hondura, Agua Caliente, Río Sucio Occidental, Río Sucio Central, Río Sucio Oriental, Irazú, Blanquito, Ariete, Elia, Turrialba, Guácimo, Siquirres-Matina y Kabébete respectivamente. JV, TU y T son los poblados de Juan Viñas, Tucurrique y Turrialba respectivamente. El rectángulo inclinado muestra la ubicación de las figuras 3 y 4.

## ESTUDIOS PREVIOS

Dóndoli & Torres (1954) fueron los primeros en identificar fallamiento en la zona de Turrialba incluyendo la existencia de la falla Azul del lado oeste del afloramiento de la Formación Las Animas. Textualmente indican: "La interrupción de la serie de Las Animas en una forma tan abrupta hacia Turrialba y su desaparición más arriba se debe con seguridad a una gran falla normal, con desplazamiento vertical del lado oeste....la falla de Azul, más o menos paralela a la de Orosi y con un salto de unos centenares de metros...". Como se verá se coincide con Dóndoli & Torres (1954) con que la falla Azul es de desplazamiento normal. Estos autores también destacan la cuenca de Turrialba y su considerable relleno de depósitos cuaternarios, lo cual se asocia en este trabajo con una cuenca de tracción o *pull-apart*.

Posteriormente, Weyl (1957) reconoce tres niveles anómalos de terrazas en el curso medio del río Reventazón, que los relaciona con un fuerte levantamiento, que en este trabajo se asocian con represamientos de drenaje ocasionados por la falla Chiz. Dóndoli et al. (1968) muestran en su mapa geológico, dos fallas de rumbo NW, una al este de Turrialba que debe ser la falla Azul y otra que se ubica al oeste de la anterior población, que podría ser la falla Chiz. Berrangé (1977) realiza una interpretación fotogeológica de la hoja Pejibaye, mostrando el trazo de la falla Atirro (denominada Sirú-Atirro) bastante similar al del presente trabajo. Sugiere que la falla baja en su lado noreste y que tiene una componente dextral. Asimismo indica que es la falla más prominente de la hoja topográfica Pejibaye y es una ruptura cortical de fundamental importancia.

El mapa geológico de Costa Rica (Sandoval et al., 1982) muestra la falla Atirro cortando depósitos sedimentarios del Paleoceno-Eoceno, a lo largo del valle superior del río Atirro y a lo largo de la quebrada Sirú. Plegamientos de rumbo noroeste se muestran a ambos lados de la falla. Sáenz (1985) no incluye la falla Atirro en su mapa geológico de la hoja Tucurrique, mientras que Fernández (1987) la muestra al lado sur del cerro

Atirro y extendiéndose hasta el río Pejibaye. Este trabajo interpreta que el lado oeste se levanta con respecto al lado este, lo cual, como veremos, concuerda con la interpretación de este trabajo. Una interpretación similar se encuentra en Siercke (1986), Vargas (1986) y Quesada (1986), quienes muestran la falla Atirro, con un trazo discontinuo a lo largo del valle del río Atirro, hasta alcanzar el cerro Atirro.

Más recientemente, en el mapa geológico de Costa Rica de Fernández et al. (1997), se muestra la falla Atirro a lo largo del valle de este río, hasta alcanzar el río Pejibaye. También, se identifican anticlinales subparalelos a la falla afectando formaciones sedimentarias del Paleoceno-Eoceno.

A raíz de los sismos de Pejibaye de julio de 1993, Montero et al. (1993) sugieren que la falla Atirro es neotectónica y de movimiento dextral. Identificaron dos sectores en la falla: el sector sureste se muestra con una traza simple hasta el cerro Mirador, el cual interpretan como un lomo de presión. Al noroeste del anterior cerro, la falla se subdivide en dos trazas, siendo la oeste la falla Tucurrique, la cual pasa ligeramente al este del poblado de Tucurrique y la traza este, denominada falla Turrialba, pasa ligeramente al oeste de la ciudad de Turrialba y se menciona que ha originado un desvío dextral en el río Reventazón.

Montero (1994a) considera que la falla Atirro forma parte del sistema de falla neotectónico dextral de Costa Rica y explica su origen por esfuerzos compresivos horizontales máximos de rumbo norte, relacionados con la indentación tectónica provocada por el levantamiento del Coco en el sureste de Costa Rica. Montero et al. (1998) incluyen la falla Atirro y sus ramales Turrialba y Tucurrique dentro del sistema de fallas neotectónicas de Costa Rica. Alvarado et al. (1998) reconocen el sistema de falla Atirro-Tucurrique y aportan nuevas evidencias morfológicas y geológicas que sugieren actividad en el Cuaternario Superior. Marshall et al. (2000) y Montero (2001) ubican esta falla dentro del CDCCR. Bergoing (1998) señala "que el sector de confluencias múltiples de Atirro es una vasta depresión de origen tectónico. Esto está confirmado por el

gran número de fallas que se entrecruzan en este sector y particularmente el importante alineamiento de la falla de Turrialba.... El Reventazón llega en esta vasta depresión colmatada, que puede corresponder a un pequeño graben...". Asimismo, refiere los tres niveles de terrazas a orillas del río Reventazón que se ubican por debajo de las mesas volcánicas de Juan Viñas y Alto de las Mesas, siendo el nivel T2 la terraza donde se ubica Tucurrique y que fue originalmente descrita por Weyl (1957).

Con respecto al sistema de fallamiento del macizo volcánico del Irazú-Turrialba, existen varios estudios previos que muestran diversos rasgos estructurales, la mayoría de los cuales se realizaron sobre su flanco sur. Destacan los trabajos de Krushensky (1972), Krushensky et al. (1976), Bergoing (1979), Bergoing & Malavassi (1980), Bergoing et al. (1980), Soto (1988), Woodward-Clyde (1993), Alvarado (1993), Montero (1994b), Montero & Alvarado (1995) y Fernández et al. (1998). En el trabajo de Montero & Alvarado (1995) se identifican varias fallas del lado norte del macizo, incluyendo las fallas Río Sucio, Blanco, Blanquito y Lara, con rumbos NW. Con respecto a la falla Río Sucio, esta se infiere como dextral debido a unas estructuras trantensionales asociadas. En el macizo del Turrialba destaca el trabajo de Soto (1988), quien identificó las fallas Ariete-Río Guácimo y Elia, las cuales limitan el graben donde se ubican los cráteres del Turrialba.

Como se observa, existen numerosos estudios que indican la existencia del sistema de fallamiento Atirro en la zona de Turrialba y Río Sucio en el flanco noroccidental del Irazú. Sin embargo, la descripción y conexión entre ambos sistemas no se encuentra en ninguno de los estudios anteriores, por lo que en esta investigación se estudian sus características geomórficas, sísmológicas y estructurales, incluyendo los posibles desplazamientos de unidades geológicas y geomórficas. Asimismo, se interpreta la conexión del sistema de falla Atirro con el sistema de falla Río Sucio mediante el *pull-apart* de Turrialba-Irazú y se explica el origen del sistema de fallas de acuerdo con el campo de esfuerzos actualmente imperante en este sector de Costa Rica.

## CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMÓRFICAS DEL SISTEMA DE FALLA ATIRRO

El patrón de drenaje que incluye los ríos principales y secundarios de la zona de estudio y el sistema de falla Atirro, se muestran en la figura 3. Los principales ríos que drenan la zona son el Reventazón del cual son afluentes el río Turrialba, Pejibaye, Atirro y Tuis, entre otros; el río Pacuare y el río Chirripó. Como primer aspecto que sobresale en esa figura, es la mayor permeabilidad de las formaciones cuaternarias volcánicas o sedimentarias (aluvionales) del sector noroeste, las cuales muestran una menor densidad de drenaje, en contraposición con las formaciones terciarias sedimentarias, volcánicas e intrusivas con una mayor densidad de drenaje.

El segundo aspecto que resalta es el fuerte control estructural sobre el patrón de drenaje, que origina el sistema de fallas Atirro. Los principales valles lineales de la zona están relacionados con el sistema de falla de Atirro, con la excepción del valle del río Chirripó y algunos otros menos importantes que se relacionan con otras posibles fallas. El sistema de falla Atirro origina el alineamiento parcial de los ríos Aquiares, Turrialba, Chiz, Reventazón, Vueltas, Atirro y Pacuare y de las quebradas Rancho, Mirador, Sirú, Tanarí y Scurí, entre otras. Asimismo, la figura 3 muestra varios de los desvíos derechos que origina el sistema de falla Atirro en ríos y quebradas.

La interpretación de las diversas fallas que constituyen el sistema de falla Atirro y su contexto geológico se muestra en la figura 4. Cinco trazas de falla principales han sido reconocidas con base en observaciones geomórficas y geológicas. Estas son las fallas Atirro, Turrialba, Tucurrique, Campano y Azul. Además, existen otras trazas de fallas menores en diferentes sectores del sistema de falla, incluyendo las fallas Oriente y Chiz. Asimismo, la falla Navarro corta y desplaza en sentido siniestral las fallas Atirro, Azul y Turrialba. Los desplazamientos siniestrales sugeridos por la geomorfología son de alrededor de 500 m, considerando el escarpe desplazado de la falla Azul y de unos 200 m para la

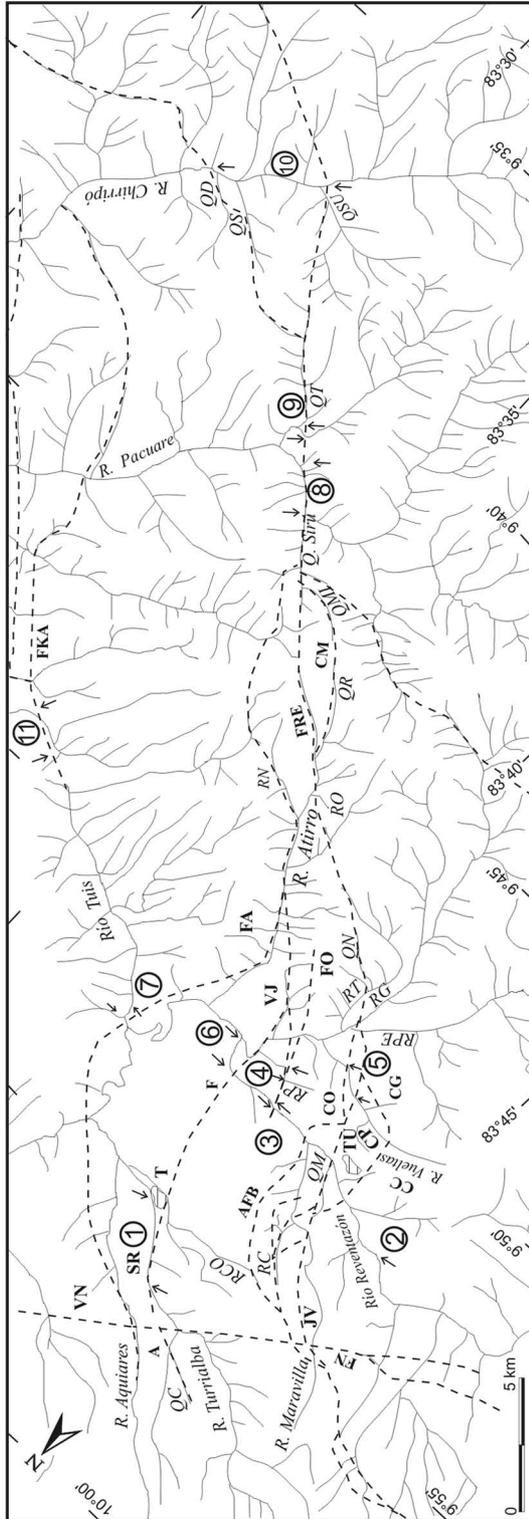


Fig. 3: Relación entre el sistema de fallas Atirro y el sistema de drenaje. Se numeran los diversos desvíos dextrales discutidos en el texto, la magnitud de los cuales se define entre las flechas. Se identifican otras localidades geográficas, además de las indicadas en la figura 2. VN y A son los poblados de Verbena Norte y Aquiares. RO y RN son respectivamente los ríos Oro y Nubes. QC, QR, QMI, QT, QS, QD y QSU son respectivamente las quebradas Ceciliana, Rancho, Mirador, Tanari, Sucuri, Dikori y Sueo. CM es el cerro Mirador. FRE es la fila Rincón de la Esperanza. SR y F son los poblados de Santa Rosa y Florencia. RCO, RC, RP, RPE, RT y RG son respectivamente los ríos Colorado, Chiz, Pejibayito, Pejibaye, Tepemechin y Gato. QM y QN son las quebradas Marañón y Noneco. CC, CP, CO y CG son respectivamente los cerros Campano, Pisirí, Oso y Gavilucho. VJ es el valle aluvial de Juray. FO y FA son las filas Omega y Atirro. AFB es el Alto Florencia-Alto Bremen.

falla Turrialba, cerca del poblado de Aquiares. Considerando que ambos sistemas de falla están activos, las zonas de desplazamiento izquierdo que tienen las fallas del sistema Atirro al cruzar la falla Navarro pueden comportarse como zonas de relevos compresivos.

A continuación se describen las fallas principales que forman parte del sistema de falla Atirro.

### La falla Atirro

Es la falla principal del sistema (Figs. 3 y 4). Al noroeste se inicia, en el lado sur del cerro Atirro, donde se une con la falla Turrialba. Luego se continúa a lo largo del valle de falla del río Atirro, un valle labrado a lo largo de una zona de falla. La traza actualmente activa se localiza sobre la margen izquierda del río. A lo largo del valle de falla se pueden observar facetas triangulares de varias generaciones, niveles de terrazas erosivas y aluvionales levantadas, especialmente sobre la margen derecha. En la margen izquierda, se observan quebradas intermitentes desplazadas o adaptadas, lomos de obturación, bermas de falla, terrazas levantadas, entre otros.

En la confluencia del río Atirro con el río Nubes, la traza de la falla Atirro se subdivide en dos trazas dando origen al lomo de falla de la fila

Rincón de la Esperanza (Figs. 3, 4 y 5a). Una traza remonta el río Atirro y la otra el río Nubes. Este lomo asimétrico tiene el flanco suroeste más empinado y escarpado que el noreste.

Un kilómetro al sureste de la confluencia de los ríos Atirro y Nubes, siguiendo el valle del río Atirro, las fallas Atirro y Tucurrique se bifurcan, ubicándose esta última del lado oeste de la fila Omega. Por su lado, la falla Atirro se continúa hacia el sureste hasta la confluencia del río Atirro con la quebrada Rancho. Aquí se inicia el extremo noroeste del lomo de falla del cerro Mirador, el cual es asimétrico con el flanco suroeste más empinado que el noreste (Fig. 5). El mismo se relaciona con un salto izquierdo de la traza de la falla. El conjunto fila Rincón de la Esperanza-cerro Mirador constituyó un lomo de falla que fue posteriormente cortado por la traza que pasa actualmente del lado este del cerro Mirador. Esta traza parece desplazar en sentido dextral el lomo de falla Rincón de la Esperanza, al sureste del cerro Mirador (Figs. 4 y 5a).

Al sureste del cerro Mirador, la falla Atirro tiene una traza prominente y sigue los valles

de falla de las quebradas Sirú y Tanarí por unos 9 km (Fig. 6), donde se interpretan desvíos derechos. Considerando el rumbo similar (aprox. E-W) del curso del río Pacuare aguas arriba y aguas abajo de donde este se alinea con la falla Atirro, se interpreta que el río Pacuare ha sido desplazado 1,75 km en sentido dextral (Fig. 6). Una interpretación similar se sugiere en Alvarado et al. (1998). También el río Chuguarí, con un curso NNE antes y después de la falla, ha sido desplazado 0,4 km en sentido dextral (Fig. 6c). En este último caso, una estribación de la fila Cariblanco, ubicada del lado noreste de la falla podría actuar como un lomo de obturación para el sector aguas arriba del río Chuguarí. Los cursos de ambos ríos estarían siendo alargados por los movimientos recurrentes de la falla. Al sureste de la quebrada Tanarí, la falla se divide en dos trazas que siguen valles lineales y entre estas se forma la zona transpresiva de Matama. Entre ambas trazas el río Grande de Chirripó muestra un desvío a la derecha acumulado de unos 1,35 km, esto ocurre entre las confluencias de las quebradas Sueo y Dicori con el río Grande de Chirripó (Fig. 3).

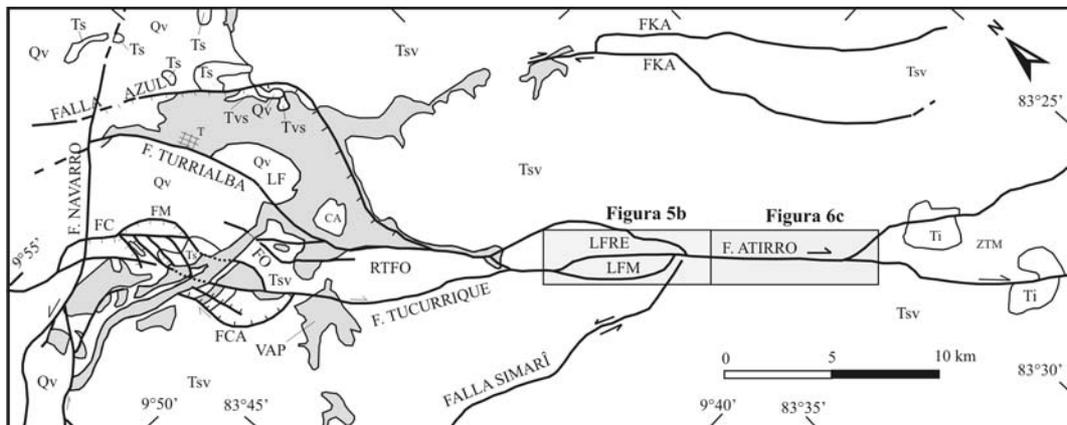


Fig. 4: Sistema de falla Atirro. Incluye las fallas Atirro, Tucurrique, Turrialba, Azul, Chiz (FC), Murcia (FM), Campano (FCA) y Oriente (FO). Las zonas de cuenca con depositación aluvial y de abanicos laháricos cuaternarios asociadas al sector sureste de la cuenca de tracción Turrialba-Irazú se muestran en gris incluyendo el valle aluvial de Pejibaye (VAP). CA es el cerro Atirro y LF es el lomo Florencia. Las zonas de relevo transpresivo de la fila Omega (RTFO), los lomos de falla de la fila Rincón de la Esperanza (LFRE) y del cerro Mirador (LFM) y la zona transpresiva de Matama (ZTM) son zonas de compresión asociadas con relevos izquierdos. Se observan las ventanas erosivas donde afloran sedimentos terciarios (Ts) y los intrusivos miocénicos (Ti) desplazados dextralmente. Tsv son rocas terciarias sedimentario-volcánicas. Qv son depósitos volcánicos cuaternarios. Los rectángulos ubican las figuras 5b y 6c. Otras fallas se definen en la figura 2.

De hecho, donde el río Chirripó cruza la zona transpresiva tiene un curso irregular, mientras que el curso es bastante lineal aguas arriba y aguas abajo del mismo. La depositación fluvial aumenta dentro de la zona transpresiva, incluyendo varios niveles de terrazas elevadas que aún se observan unos pocos kilómetros aguas abajo de la zona transpresiva. Lo anterior se explica por la perturbación del perfil de equilibrio del río, relacionada con el levantamiento tectónico que ocurre dentro de la zona de transpresión y la consiguiente sedimentación fluvial.

La falla pierde prominencia geomórfica al sureste del río Grande de Chirripó, dentro de la fila de Matama, aunque de acuerdo con el mapa geológico de Sandoval et al. (1982), la falla

desplaza en sentido lateral derecho un contacto entre el sedimentario del Paleoceno-Eoceno y un intrusivo de probable edad Miocénica (Fig. 4). Esto ocurre sobre el flanco norte de la fila Norte que se ubica al norte del cerro Chirripó Grande. Los desplazamientos en la falla deben atenuarse dentro de la zona transpresiva de la fila de Matama.

### La falla Tucurrique

Este segmento de falla es un relevo izquierdo de la falla Atirro (Fig. 4). Su expresión geomórfica y la juventud de los depósitos aluviales que son desplazados por la falla indican que está activa. En el extremo noroeste, la falla

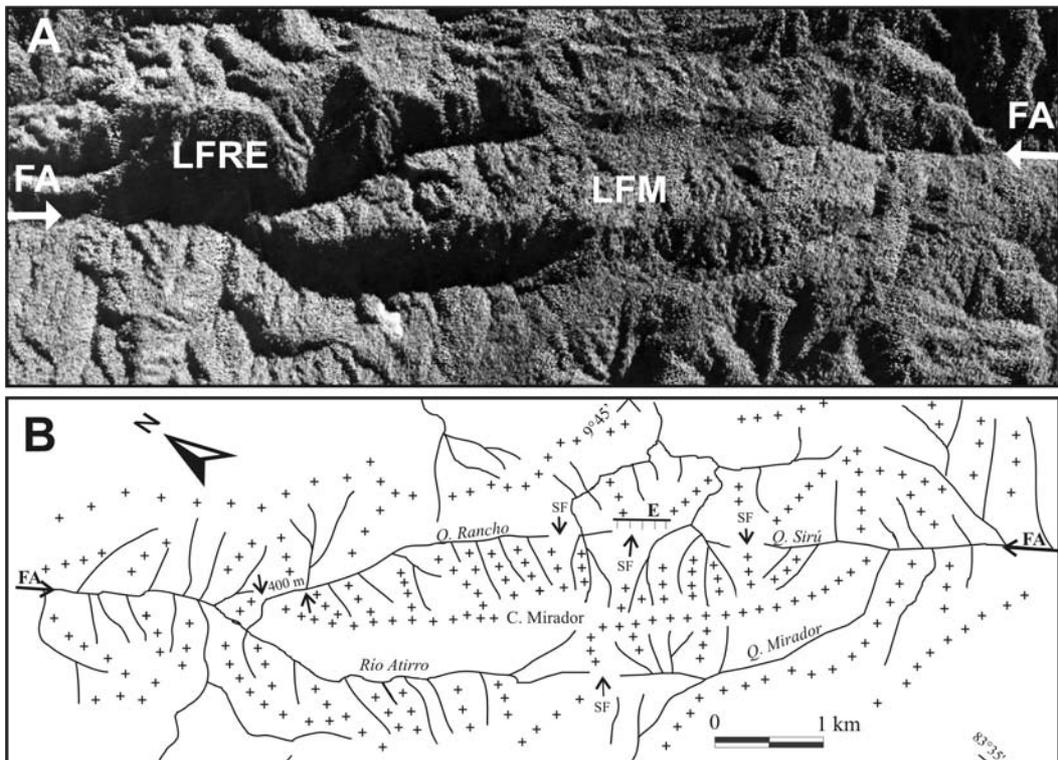


Fig. 5a: Fotografía aérea del Instituto Geográfico Nacional muestra los lomos de falla de la fila Rincón de la Esperanza (LFRE) y el del cerro Mirador (LFM). En 5b se detalla el lomo de falla del cerro Mirador relacionado a un relevo izquierdo de la falla Atirro (FA). El lomo es asimétrico siendo más escarpado del lado suroeste. E indica escarpe y SF silla de falla. Asimismo, se muestra el desplazamiento dextral de 0,4 km de un afluente de la quebrada Rancho.

Tucurrique se inicia al este del cerro Pasquí y de otros volcanes monogenéticos, donde se une con la falla Irazú (Fig. 2). Pasa al norte de Pacayas, a lo largo de una traza de rumbo entre WNW y EW y luego al pie de un escarpe facetado al oeste, del lado este de Juan Viñas, asentada sobre una

morfología desplazada por la falla. Más al sureste, se alinea con la quebrada Marañón, desplazando en sentido dextral la ribera norte del río Reventazón.

Del lado norte del río Reventazón se pueden identificar varias trazas de fallas (Figs. 3 y 4). Una de estas es la falla Chiz, cuya traza sigue

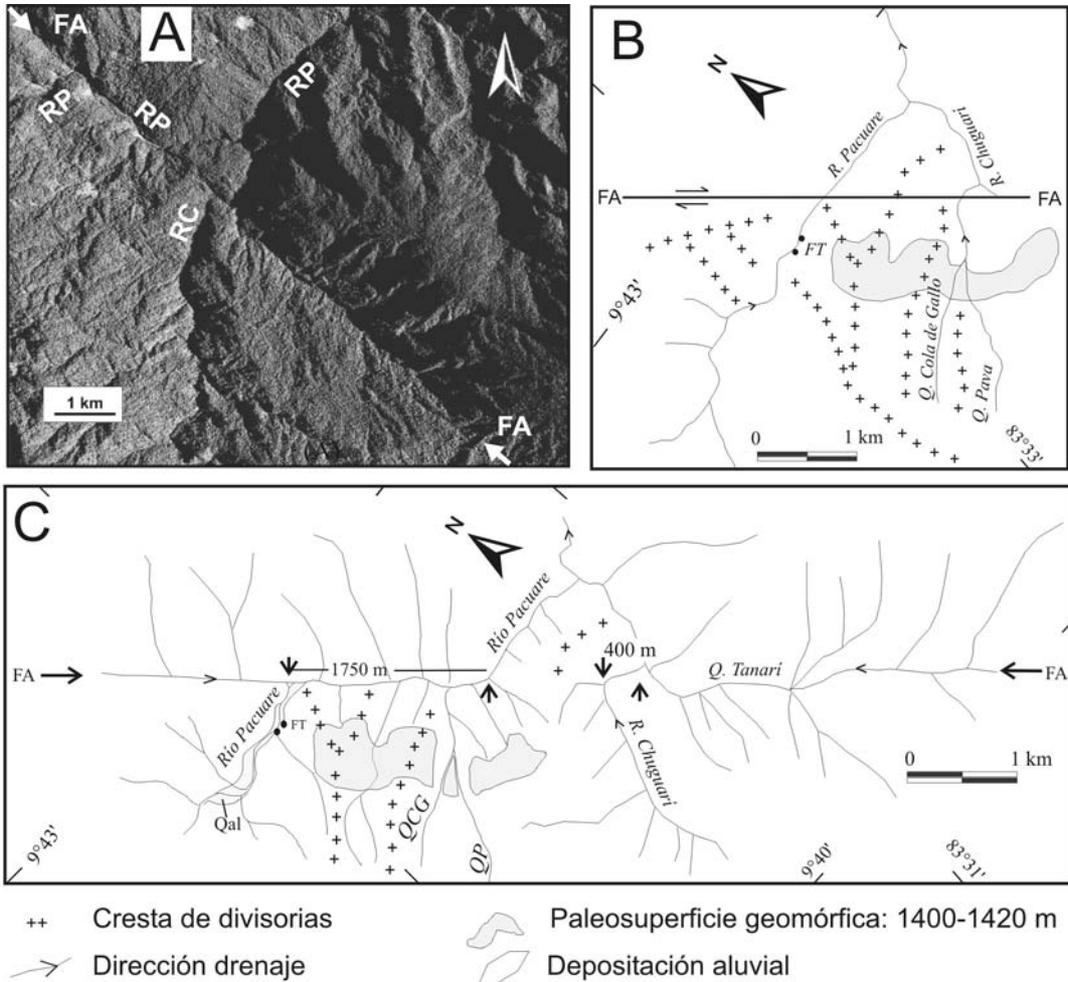


Fig. 6a: Fotografía aérea del Instituto Geográfico Nacional muestra la traza de la falla Atirro en su sector sureste identificada por sus valles lineales. Además se muestra los desvíos derechos del río Pacuare (RP) y del río Chiguari (RC). b: Restauración del desplazamiento dextral del río Pacuare. Obsérvese como tenía un rumbo EW antes de ser desplazado por la falla. El río Chiguari era un afluente de la actual quebrada Tanarí y la quebrada Cola de Gallo tenía un desvío dextral (si existía). Asimismo, se muestra la continuidad de la divisoria entre los ríos Chiguari y el Pacuare. c: Muestra la situación actual con el alargamiento del cauce de los ríos Pacuare (1750 m) y Chiguari (400 m). La deposición de terrazas aluviales aguas arriba del río Pacuare se asocian con represamientos de drenaje temporales luego de desplazamientos cosísmicos. FT es una fuente termal asociada con la falla.

el valle lineal del curso superior del río Chiz. Otra traza es la falla Murcia, ubicada al este de la falla Chiz, que tiene forma de semiluna y un contraes-carpe que mira al W, indicando una falla con alta componente de desplazamiento normal. En el curso superior del río Colorado, de un rumbo NW y paralelo a la falla Murcia, existe un pequeño valle aluvial relacionado con los represamientos de drenaje en el curso superior del río Colorado, debidos a los movimientos de levantamiento del lado este de la falla. Más al sur, la falla Murcia se une con la Chiz y se alinea con el curso inferior del río Chiz. Otras trazas de falla de longitud menor existen entre Juan Viñas y la falla Chiz. Varias de estas trazas tienen escarpes facetados al oeste, indicando una componente normal. Al cruzar el río Reventazón, la falla Chiz origina un desvío dextral del valle y sobre la ribera sur de este río, la traza de falla pasa al pie de la fila de cerros del Oso, donde se da el contacto entre las rocas terciarias aflorantes en los cerros y los depósitos laháricos y de terrazas del Cuaternario tardío, sobre los cuales se asienta Tucurrique.

El levantamiento del bloque este de las fallas Chiz y Murcia han originado un prominente escarpe, que alcanza una altura máxima de 500 m, cuya cresta es la fila Alto Florencia-Alto Bremen. En este escarpe afloran ventanas erosionales de formaciones sedimentarias terciarias dentro de una unidad lávica cuaternaria, tal como se muestra en los mapas geológicos de Fernández (1987) y de Mora et al. (1990). La geomorfología del bloque levantado indica que el mismo está siendo basculado al noreste. Esto se deduce porque la pendiente al noreste desde el Alto de Florencia-Alto Bremen es menor y uniforme y porque la red de drenaje es asimétrica, siendo los cursos de los ríos bastante más largos hacia el noreste, hacia Turrialba que del lado sureste del escarpe.

El conjunto de trazas anteriores se consideran asociadas con la traza de falla principal de la falla Tucurrique. Como se observa de las descripciones anteriores, la trazas asociadas tienen una alta componente de desplazamiento normal y se considera que esta tracción se relaciona con el cambio de rumbo que tiene la falla Tucurrique, de N 65° W al norte de Juan Viñas, a N 30° W al

este de este poblado. El levantamiento del bloque noreste provocó el desarrollo de la cuenca del lado oeste de la falla, donde el río Reventazón ha depositado terrazas y lahares, favoreciendo el desarrollo de poblados como Tucurrique. Esto explica el origen de los tres niveles de terrazas identificados originalmente por Weyl (1957) y descritos por Bergoing (1998).

Con respecto al posible desplazamiento dextral de la falla Tucurrique al cruzar el río Reventazón, se considera que es de unos 250 m, desde que el río empezó a cortar los depósitos laháricos sobre los que se asienta Tucurrique. El río es relativamente más ancho en el sector aguas arriba de las trazas de las fallas Chiz y Tucurrique (sector denominado La Isla). Si el pie del talud norte del cerro Pisirí, que se conjetura era continuo con el del cerro Oso, se tiene además el borde externo de la cuenca sobre la que se asienta Tucurrique, se calcula un desplazamiento de 1,2 km. Los desplazamientos acumulados del río Reventazón entre Bajo Congo (aguas arriba de Tucurrique) hasta donde fluye al oeste del cerro Atirro proporcionan un desvío derecho de 2,3 km, pero este valor resulta de los desplazamientos acumulados en varias fallas (principalmente Tucurrique, Chiz, Oriente y Turrialba).

Al sur de donde cruza el río Reventazón, la falla Tucurrique se identifica por un escarpe que mira al oeste, de unos 20 m de altura, que se ubica al este del poblado de Tucurrique. En el escarpe aflora un flujo lahárico. Inmediatamente al sureste, geomórficamente se expresa por un valle de falla y luego entra en una zona montañosa estrecha, donde presenta desvíos dextrales de quebradas, quebradas descabezadas, aluviones represados, quebradas adaptadas y trincheras de falla. Los aluviones represados o desplazados son bastante recientes. Al sureste, entra en el valle de falla de rumbo NW, del río Vueltas. La traza activa se ubica en las estribaciones montañosas del lado este del valle del río Vueltas. Según mi interpretación, el río Vueltas tiene un desvío dextral de 1,0 km a lo largo del valle de falla, que tiene unos 2 km de largo (Fig. 3). Evidencia de este desvío dextral es que el río Vueltas tiene un rumbo ENE antes y después de salir del valle de falla.

Asimismo, concuerda con esta interpretación, la observación de aluviones con clastos de tamaño métrico que afloran a ambos lados de un afluente que alcanza el río Vueltas por el NW del valle de falla. Es claro que este afluente no tiene la capacidad hidráulica para depositar los aluviones gruesos aflorantes. Estos fueron depositados por el río Vueltas pero la falla Tucurrique los ha ido desplazando al noroeste hasta ubicarlos fuera de la zona de depositación aluvial del río Vueltas.

Bergoing (1981) plantea que el nivel de terraza (T2), donde se asienta el poblado de Tucurrique, debió relacionarse con un posible estacionamiento lacustre que pudo provocar un paleodrenaje del Reventazón al río Pejibaye. Las observaciones de campo, no ubicaron afloramientos de depósitos lacustres donde se asienta Tucurrique o alrededores y más bien se observó depósitos laháricos, los cuales se pueden relacionar con flujos provenientes de la actividad volcánica, que fueron encausados por el paleocañón del río Reventazón. Estos flujos se depositaron en la zona de cuenca que se asocia con la falla Chiz, la cual tiene una alta componente de desplazamiento normal, con movimiento de levantamiento en el bloque de aguas abajo. Aunque no parece que existan los depósitos lacustres propuestos por Bergoing (1981), si existe un nivel de terraza que se puede asociar con los depósitos laháricos. Se considera que más bien su depositación pudo obstruir el paleocauce del Reventazón hacia el sureste. Sin embargo, para sustentar la hipótesis de un paleodrenaje del Reventazón por el curso del río Pejibaye como lo plantea Bergoing (1981), se debería de contar tanto con evidencia geológica, como serían los depósitos aluvionales asociados, así como con evidencia geomórfica, como sería la presencia de un paleocauce. Ambas evidencias no se comprueban con los estudios realizados. Incluso, existe un paso de montaña bastante alto entre el valle del río Vueltas y el del Pejibaye, el cual sería un obstáculo topográfico insalvable, que habría impedido la antigua conexión entre ambos cursos fluviales. Una alternativa más plausible es que el río Reventazón fluyera por el valle del río Vueltas hasta su salida al río Pejibaye. Esto pudo ocurrir hasta que se depositaron los flujos laháricos donde se asienta Tucurrique y al depositarse este, el Reventazón

rapidamente cortó los lahares y luego seguir aproximadamente el curso que actualmente tiene.

Al noreste del poblado de Pejibaye, la falla Tucurrique atraviesa el límite noreste del valle aluvial de Pejibaye, donde se da la confluencia múltiple de los ríos Gato, Pejibaye y Tepemachin (Fig. 4). En este valle con un ancho de hasta 2 km y un área de un 5 km<sup>2</sup>, afloran aluviones torrenciales. Este valle es anómalo, considerando su ubicación dentro de una zona montañosa, donde los ríos normalmente transportan las gravas y solo son de esperar terrazas estrechas y longitudinales a los ríos. Este valle aluvial se explica porque la falla Tucurrique tiene una componente de levantamiento del lado noreste. Durante los diversos paleoeventos de desplazamiento en la falla, ocurrieron represamientos temporales de los ríos que drenan esta cuenca. Aguas abajo de la falla, el río Pejibaye tiene un valle encañonado antecedente, mientras que aguas arriba ha ocurrido un aumento en la amplitud de los valles de los ríos. Evidencia de lo anterior es la presencia de varios niveles de terrazas levantados aguas abajo de la falla, en dos sectores: 1.- Ligeramente aguas arriba de la confluencia de los ríos Pejibaye y Gato y 2.- A lo largo del cañón del río Pejibaye, ligeramente aguas abajo de la confluencia anterior. En este último sector, los aluviones se muestran basculados aguas arriba, indicando inversiones en el gradiente normal del río.

La componente de levantamiento de la falla Tucurrique se asocia con la zona transpresiva de la fila Omega, relacionada con el relevo izquierdo con la falla Atirro (Fig. 4)). La fila Omega tiene una morfología tipo lomo de presión, concordando con la interpretación aquí planteada. En su zona cuspidal se infieren fallas cortas con escarpes de rumbo NE, de posible desplazamiento normal y asociadas con la relajación externa en el lomo de presión.

Al sureste del valle aluvial de Pejibaye, la falla Tucurrique pierde expresión pudiendo recostarse sobre el sector suroeste de la fila Omega, siguiendo el valle de la quebrada Noneco. Asimismo, parece originar desvíos dextrales y adaptaciones de drenaje en el río Oro y en un afluente de este. En este sector, la traza se expresa mediante valles lineales, escarpes y sillas de falla.

## La falla Oriente

En la zona del relevo transpresivo entre las fallas Atirro y Tucurrique, se localiza la falla Oriente de unos 7 km de largo y de rumbo NW (Fig. 4). Esta se extiende entre el flanco sur de Alto Florencia, sobre la ribera izquierda del río Reventazón y el flanco noroeste de la fila Omega. La falla origina desvíos dextrales de unos 600 m del valle del río Reventazón y de unos 400 m en el valle del río Pejibayito (3 y 4 en Fig. 3).

## LA CUENCA DE TRACCIÓN DE TURRIALBA-IRAZÚ

El sistema de falla Atirro-Tucurrique tiene un salto a la derecha y se continúa con la falla río Sucio del lado noroeste del volcán Irazú, originando así la cuenca de tracción o *pull-apart* de Turrialba-Irazú (Fig. 2). Las fallas normales que limitan el *pull-apart* son por el lado este y sureste la falla de Azul y por el lado suroeste la falla Campano; al lado norte, la falla Río Sucio Oriental y al oeste, la Patria. El lado sur y suroeste de la cuenca de tracción esta cubierta por los potentes depósitos volcánicos del Irazú.

En el sector sureste del *pull-apart* ha ocurrido una importante depositación durante el Cuaternario (Fig. 4). Gran parte de la depositación corresponde con aluviones de diferentes granulometrías, de tipo terrazas o de valle aluvial. Estas fueron depositados por los ríos Atirro, Reventazón, Pejibaye, Turrialba, Aquiares y Tuis, entre los principales. Los ríos Turrialba y Aquiares, también depositaron potentes lahares. Finalmente, abanicos aluviales asociados a quebradas y ríos menores también se han depositado dentro del *pull-apart*.

El espesor de los depósitos cuaternarios es desconocido. Sin embargo, debe ser de algunos cientos de metros en las zonas de los depocentros, los que se pueden ubicar aguas abajo de la confluencia del Reventazón con el río Atirro y con el río Tuis y cerca de la confluencia del río Turrialba con el río Aquiares.

Dentro del *pull-apart* se encuentra un complejo sistema de fallas. La principal es la falla

Turrialba, que corta transversalmente la estructura de tracción. McKay & Dooley (1995) denominan a este tipo de fallas *cross-basin fault* o falla transversal a la cuenca. A continuación se describe en forma detallada las diversas fallas que limitan el *pull-apart* y las que se ubican dentro de este.

## La falla Azul

Se mantiene el nombre de falla Azul, propuesto originalmente por Dóndoli & Torres (1954), para la falla de rumbo variable entre NW y NNE, que se expresa por un escarpe cuya morfología varía entre facetado y discontinuo y poco disectado y bastante continuo, que mira al oeste en sus diferentes sectores (Fig. 4). El escarpe indica que la falla Azul tiene una fuerte componente de desplazamiento normal, el cual se estima tiene un valor cercano a 1000 m en su componente vertical, como se explicará más adelante.

La falla tiene varios cambios de rumbo. Así, donde el río Atirro sale de su valle estrecho y entra en el valle aluvial de Juray, que se encuentra alrededor del cerro Atirro, la falla Azul tiene un rumbo NE y corresponde con el límite noroeste de la fila Atirro. El escarpe facetado al W tiene una diferencia de altura entre el plano aluvial del río Atirro y la fila montañosa de Atirro, de unos 500 m. Sin embargo, el escarpe se muestra en este sector medianamente disectado presentando varios entrantes en el frente montañoso. Además, el escarpe muestra facetas triangulares de varias generaciones. La falla mantiene el rumbo NE hasta ligeramente al norte de donde la falla cruza el río Tuis. A partir de acá, la falla Azul tiene un rumbo NW y se ubica al noreste y norte de Turrialba. Además, el escarpe mantiene una altura de unos 500 m. Al noroeste de Turrialba se alinea por un par de kilómetros con el curso inferior del río Aquiares. Ligeramente al este del poblado de Aquiares, la falla es intersectada por la falla Navarro. Se estima que la falla Navarro origina un desvío siniestral del orden de 500 m del escarpe de la falla Azul en este sector.

El fuerte levantamiento del lado noreste de la falla al norte de Turrialba explica el afloramiento de rocas sedimentarias de una plataforma

carbonatada de edad entre Eoceno tardío y Oligoceno temprano de la formación Las Animas y Punta Pelada (Fig. 4), tal como originalmente lo interpretó Dóndoli & Torres (1954). Estas unidades sedimentarias afloran como ventanas erosivas entre las rocas volcánicas cuaternarias relacionadas con el paleovolcán Turrialba.

Del lado suroeste y oeste de la falla existe un valle amplio cubierto por abanicos laháricos y depósitos aluviales, el cual es drenado por diversos ríos destacando el Reventazón, Atirro, Turrialba, Aquiares y Azul, donde se ubican diversas poblaciones como son Turrialba y Santa Rosa (Fig. 4).

#### *Desplazamiento acumulado de la falla Azul*

Una estimación del desplazamiento normal de la falla Azul puede ser realizado considerando que el bloque de Alto Florencia-Alto Bremen originalmente tenía continuidad geomórfica con la fila de Verbena, como lo confirma el hecho de que ambas filas tienen una altura similar en su zona axial y la geología es igualmente similar (depósitos volcánicos del Cuaternario recubriendo depósitos sedimentarios del Terciario). Los desplazamientos de falla normal (combinados con una componente de desplazamiento dextral) a lo largo de la falla Azul rompieron la continuidad geomórfica, provocando el basculamiento al noreste de la fila Alto Florencia-Alto Bremen a lo largo de una falla de una inclinación de unos 60°. En ese proceso, el sector que se fue deprimiendo se comenzó a rellenar de los sedimentos acarreados por el río Turrialba, sepultando cada vez más el borde noreste de la fila, hasta alcanzarse la configuración geográfica actual. Una estimación grosera nos proyecta ese bloque unos 500 m por debajo de los depósitos aflorantes aluvio-laháricos, hasta alcanzarse la falla, lo que ocurre a una altura estimada de unos 200 m sobre el nivel del mar. Como la parte alta del escarpe en la fila de Verbena está a 1200 m, la componente vertical es del orden de 1 km. En una falla de unos 60° de inclinación, el desplazamiento normal sería de unos 1150 m.

Con respecto a la componente dextral, donde la falla Azul atraviesa el valle del río Tuis, se sugiere un desplazamiento derecho de unos

500 m del río Tuis, indicando que la falla además de mostrar una fuerte componente de desplazamiento normal, presenta también una componente de desplazamiento dextral. Lo anterior nos sugiere un desplazamiento máximo del orden de unos 500 m tomando como medida el desplazamiento del río Tuis, un río que drenaba la zona antes del desarrollo del *pull-apart*.

#### **La falla Turrialba**

Se usa el nombre original propuesto por Montero et al. (1993) para la falla que corta transversalmente el *pull-apart* de Turrialba-Irazú. Al noroeste, la falla Turrialba, se inicia en la falda sureste del volcán Turrialba, alineándose con la quebrada Ceciliana. Cerca de Aquiares, la interseca la falla Navarro, la cual la desvía en sentido sinistral unos 200 m. Cerca de Turrialba, pasa al pie de la fila montañosa basculada al NE que baja de Alto Bremen-Alto Florencia, donde origina un desvío dextral del río Turrialba de unos 3,5 km (Fig. 3). Esto es evidenciado por el rumbo E-W del río Turrialba, aguas arriba y aguas abajo del sector donde se alinea con la falla Turrialba. También, provoca varios desvíos dextrales en ríos y quebradas que drenan la superficie geomórfica que baja de Alto Bremen-Alto Florencia hacia el noreste. Entre estos destacan los del río Colorado, la quebrada Poró y otras sin nombre que se ubican entre las poblaciones de Turrialba y Florencia. En este último sector también hay quebradas adaptadas.

Al sur, la falla origina un desplazamiento dextral de unos 1,5 km del río Reventazón (Fig. 3). Donde confluyen los ríos Reventazón y Pejibaye, del lado noroeste del cerro Atirro, se conservan terrazas aluviales basculadas al suroeste, inclinadas anómalamente aguas arriba.

Entre el cerro Atirro y la fila Omega, la falla se continúa con la falla Atirro en el valle aluvial de Juray, actualmente abandonado y que tiene más de 1 km en su parte más ancha (Figs. 3 y 4). Este valle debió haber sido formado por uno o varios ríos caudalosos. Sin embargo, el mismo es actualmente drenado por la quebrada Juray, con muy bajo caudal. La principal hipótesis que

explica el origen de este valle aluvial es que el río Reventazón luego de confluir con el Pejibaye, drenó este valle abandonado hasta un pasado reciente y tenía una confluencia con el río Atirro, donde este último río sale de su valle estrecho.

A partir de este punto, el río Reventazón drenaba al NE por el valle actual del río Atirro, del lado E del cerro Atirro (Fig. 7a). En ese tiempo, la loma Florencia y el cerro Atirro eran la continuación al noreste de la fila Alto Florencia-Alto Bremen y

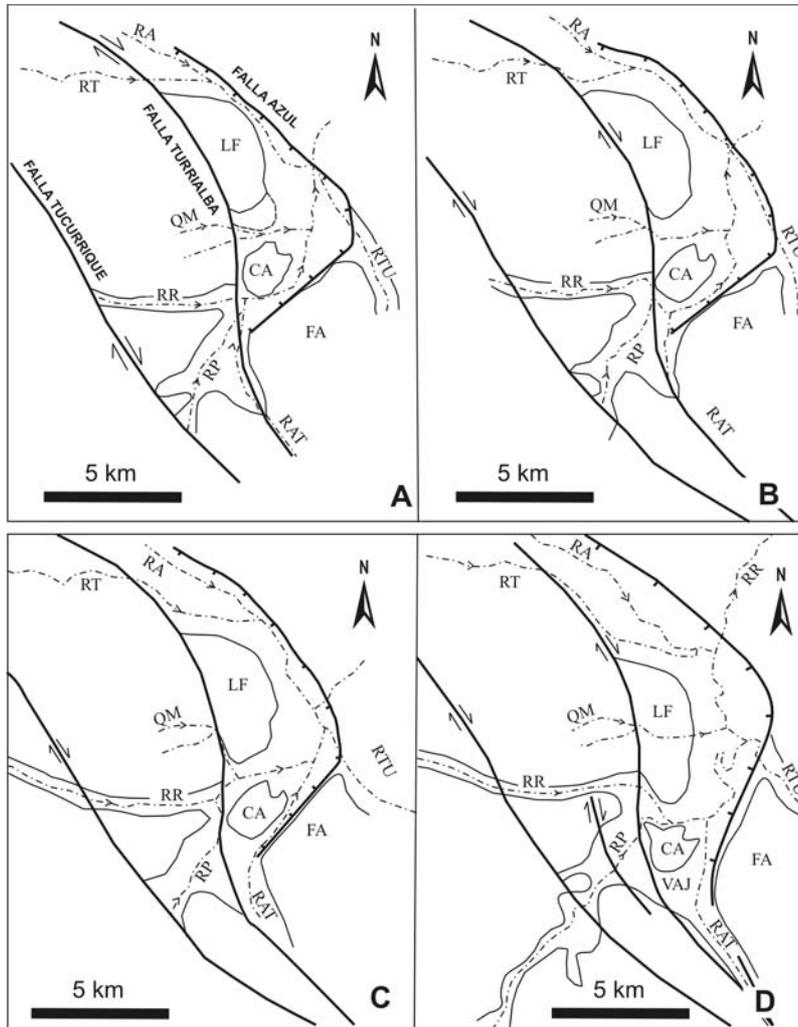


Fig. 7: Modelo para explicar los desplazamientos dextrales del río Turrialba (RT), de la loma Florencia (LF), del cerro Atirro (CA) y la formación del valle aluvial de Juray (VAJ), hoy abandonado. Asimismo, se muestra el desarrollo del pull-apart de Turrialba-Irazú, conforme se daban los desplazamientos de componente normal en la falla Azul y Chiz. Se muestran los ríos Aquiras (RA), Tuis (RTU), Reventazón (RR), Pejibaye (RP) y Atirro (RAT), así como la quebrada Molina (QM). En 7a se muestra la situación inicial donde el río Turrialba se continuaba al E y la loma Florencia era la ribera derecha de ese río. Asimismo, el río Reventazón luego de unirse con los ríos Pejibaye y Atirro fluía del lado este del cerro Atirro. En 7b ya se han iniciado los desplazamientos dextrales en la falla Turrialba y se está abriendo la cuenca de tracción. En 7c se da la captura del valle inferior de la quebrada Molina por parte del río Reventazón, luego de 2 km de desplazamiento dextral. En ese momento se abandona el valle aluvial de Juray. 7d muestra la situación actual donde se han acumulado 1,5 km de desplazamiento dextral del río Reventazón.

el río Turrialba se continuaba con un rumbo al E al cruzar la falla, hasta confluir con el río Aquiares. Ambos ríos tenían valles más angostos que los actuales. De igual manera, la quebrada Molina tenía un valle localizado entre el cerro Atirro y la loma Florencia. Conforme ocurrieron los movimientos dextrales de la falla Turrialba, se fue corriendo la fila Atirro y el cerro Atirro hacia el sureste aumentando el desplazamiento dextral del río Reventazón y del Pejibaye (Fig. 7b y c). De esta manera se fue construyendo el valle aluvial de Juray, el cual era drenado por el río Reventazón, luego de su confluencia con el Pejibaye y hasta su confluencia con el río Atirro. Al alcanzarse un desplazamiento dextral de unos 2 km, el río Reventazón capturó el sector del valle aguas abajo de la quebrada Molina, ubicado entre el cerro Atirro y la loma Florencia, por lo cual el río Reventazón cambió de curso abandonando el valle de Juray. Desde entonces, el río Reventazón ha sido desviado unos 1,5 km por el desplazamiento de la loma Florencia, hasta alcanzarse 3,5 km de desplazamiento dextral en la falla Turrialba (Fig. 7d). Debe recordarse que simultáneamente tenía actividad la falla Azul, la cual fue permitiendo que se abriera el valle drenado por los ríos Turrialba y Aquiares, favorecido por la rotación al noreste del bloque de falla de Alto Florencia-Alto Bremen. Asimismo, se fue ampliando el valle del río Atirro, desde donde sale de su valle estrecho. Igualmente, los movimientos de falla normal de la falla Chiz favorecieron el basculamiento de la fila Alto Florencia-Alto Bremen.

La traza actual de la falla Turrialba en el valle aluvial de Juray no tiene una expresión geomorfológica prominente. Sin embargo, fallas y deformaciones menores fueron observadas en los depósitos del valle a lo largo de la traza. Alvarado et al. (1998) reportan fallas y un pliegue recientes en esta zona, aunque ellos los asocian con la falla Chiz. Asimismo, existen unas terrazas abandonadas ubicadas del lado oeste del cerro Atirro, a una elevación de 10 a 30 m sobre el nivel actual del drenaje, que han sido desplazadas por la falla Turrialba.

La falla Turrialba tiene un cambio de rumbo con respecto a la falla Atirro y corta transversalmente el *pull-apart* originado por el relevo derecho entre las fallas Atirro-Tucurrique y la falla río Sucio. De acuerdo con el modelo de desarrollo del *pull-apart* propuesto por McClay & Dooley (1995), la falla Turrialba sería una falla del tipo *cross-basin* y sería más joven que las anteriores fallas.

### La falla Campano

Se denomina falla Campano a la falla que se ubica del lado oeste y sur de Tucurrique, sobre el sector este de los cerros Campano y Gavilucho. Geomórficamente se expresa por un escarpe de prominencia moderada a fuerte, con facetas triangulares que miran al este, que origina diferencias de altura hasta de 300 m. El escarpe va cambiando de un rumbo N-S al este del cerro Campano a un rumbo NW y luego al W sobre el flanco noreste del cerro Gavilucho, antes de unirse al este con la falla Tucurrique. Asimismo, al oeste de Tucurrique, la falla Campano parece originar un desvío dextral de la fila montañosa del cerro Campano. Lo anterior sugiere que esta falla combina desplazamientos dextrales con normales, aunque esta última componente de desplazamiento debe ser mayor, considerando que esta falla limita uno de los bordes de la cuenca de tracción de Turrialba-Irazú. Esta falla junto con la Chiz ha favorecido el desarrollo de la cuenca donde se ubica Tucurrique.

### EL SISTEMA DE FALLA RÍO SUCIO Y SU RELACIÓN CON EL SISTEMA DE FALLA ATIRRO Y EL PULL-APART DE TURRIALBA-IRAZÚ

Previamente se describió el sistema de falla Atirro y el *pull-apart* de Turrialba-Irazú hasta la falda sureste del volcán Turrialba. Sin embargo, la aparente interrupción de ambas estructuras no significa que estas no se continúen dentro del macizo volcánico del Irazú-Turrialba. De hecho,

considerando investigaciones previas (Montero & Alvarado, 1995; Fernández et al., 1998) y con los nuevos aportes que se realizan en este trabajo, se puede demostrar que el sistema de falla Atirro se continúa al noroeste con la falla Río Sucio (Montero & Alvarado, 1995) y que el volcán Irazú, ha crecido dentro del *pull-apart*. Asimismo, el sistema de fallamiento que se observa dentro de la zona central del macizo Irazú-Turrialba se relaciona con los esfuerzos tensionales que operan dentro del *pull-apart*.

En el volcán Turrialba existe un sistema de fracturas tensionales de rumbo NE, que incluye la falla Ariete-Río Guácimo, que posee un escarpe bien definido de unos 25 m de alto y la falla Elia (Fig. 2). Entre ambas se encuentran dos estratovolcanes (volcanes Finca Liebres y Dos Novillos), dos conos piroclásticos y el volcán Turrialba donde se presentan cuatro cráteres (Soto, 1988). En el flanco norte del macizo del Irazú se distingue la falla Blanquito (Montero & Alvarado, 1995), con al menos 9 km de longitud y un rumbo NNW, evidenciada por valles lineales escarpados y sillas de falla, entre otras características geomórficas. Asociada con esta se encuentra la falla Alto Grande.

La falla Río Sucio, originalmente descrita en Montero & Alvarado (1995), sería la continuación del sistema de falla Atirro dentro del macizo del Irazú. Presenta tres ramales principales, el oriental tiene un rumbo NW y posee una longitud mínima de 14 km (Fig. 2) y se expresa por valles lineales, sillas de falla y escarpes facetados al SW con alturas entre 200 m hasta un máximo de 400 m al pie del cerro Alto Grande. Incluye una estructura transtensiva incipiente en su extremo sureste, cerca del cerro Alto Grande, sugiriendo una componente dextral en este ramal. El ramal central se inicia en el sector norte del volcán Irazú y se une con el ramal oriental ligeramente al noroeste de la unión de los ríos Sucio y Vueltas. Se caracteriza por sus valles lineales y escarpes que miran al suroeste. El brazo occidental tiene rumbo variable, siendo NW en su extremo sureste, donde se alinea con el río Blanco y la quebrada Golondrina. Luego al sur de Tierras Morenas, presenta una estructura de tipo cuenca

de tracción, a partir de la cual la falla varía su rumbo hacia el N. La geometría de la cuenca de tracción sugiere una componente dextral en este ramal. Se une al brazo oriental en el cañón del río Sucio. A partir de acá, la falla Río Sucio se continúa con un rumbo al NNW, atravesando los ríos Sucio, Patria, General y Puerto Viejo.

En un radio de 5 km del volcán Irazú, sobresalen otras fallas de trazo rectilíneo a curvilíneo. Entre las rectilíneas, está la falla Irazú con un rumbo NE, evidenciada por un claro escarpe que mira al NW, indicando una falla de componente normal donde el bloque W baja. Pasa al pie de una serie de volcanes monogenéticos, como son el cerro Nochebuena y el Gurdíán. En el extremo noreste pasa del lado este del cráter del Diego de La Haya. Al sureste de esta falla, se presenta otra falla de un rumbo similar, aunque tiene un trazo más curvilíneo, con un escarpe que mira igualmente al NW y que pasa entre los volcanes monogenéticos del cerro Pasquí y de Los Quemados. Al oeste del volcán Irazú se observan otras fallas de trazo curvilíneo con un rumbo cercano al N. Una de estas pasa por el cerro Sapper y la otra por el cerro Retes. Ambas tienen escarpes facetados al oeste, valles lineales y sillas de falla. Parecen relacionarse con la traza central de la falla Río Sucio.

La falla Lara tiene rumbo entre N y NW y una longitud mínima de 11 km (Fig. 2). Se localiza al oeste del volcán Irazú, siguiendo localmente los valles de afluentes del río Blanco y del río Cascajal, al NW se continúa con la falla Patria. La falla se evidencia por valles lineales, valles de falla, escarpes de falla, sillas de falla, estructuras incipientes del tipo cuenca de tracción y estribaciones desplazadas que sugieren una componente dextral en la falla. Escarpes locales sugieren una componente de levantamiento en el lado oriental de la falla.

Las fallas de rumbo N del río Hondura (8 km de longitud) con una componente lateral derecha (observable en rasgos morfológicos) y la del río Patria (18 km de longitud mínima) con componentes vertical y dextral limitan el sistema de falla Río Sucio al oeste, en el Bajo de la Hondura.

Con respecto a la relación entre el sistema de falla Atirro y Río Sucio, se observa que las

fallas Azul y Río Sucio en su ramal oriental, son claramente una continuidad de la otra (Fig. 2). Asimismo, a lo largo de esta gran falla con importante componente normal, se alinean dos grandes paleocalderas, una de las cuales tiene en su borde noroeste al cerro Alto Grande y la otra es la de Coliblanco. Ambas estructuras de colapso debieron ser controladas estructuralmente por la falla Azul-Río Sucio (brazo oriental). Los brazos central y occidental de la falla Río Sucio son fallas transversales al *pull-apart* y se continúan con la falla Tucurrique mediante un sistema de fallas cortas y curvilineas que se ubican del lado oeste del volcán Irazú, incluyendo entre estas a la falla Irazú.

Es de observar que el macizo del Irazú incluye otras estructuras volcánicas como son el volcán Las Nubes, los antiguos centros volcánicos Cabeza de Vaca, Retes y Sapper y en el volcán activo del Irazú se encuentran los cráteres inactivos del Diego de La Haya y los ubicados al este del último. Es posible que estas estructuras volcánicas se emplazaran en zonas de fracturas tensionales relacionadas con la tracción imperante dentro de la cuenca de tracción. Así, el volcán Las Nubes se puede asociar con la falla Lara y los volcanes monogenéticos de los cerros Nochebuena-Gurdián se formaron a lo largo de la traza de falla normal Irazú y los de Pasquí y Los Quemados son controlados por la falla Pastora.

### ACTIVIDAD SÍSMICA DEL SISTEMA DE FALLA ATIRRO-RÍO SUCIO

Una revisión de la sismicidad histórica y reciente señala que el sistema de falla Atirro-Río Sucio ha tenido un nivel de actividad bajo al nivel de sismos dañinos. A continuación se repasa la actividad sísmica en los diferentes sectores del sistema de falla.

#### Actividad sísmica asociada con el sistema de falla Atirro

En la información histórica entre el siglo XVI y el siglo pasado, no es posible identificar un terremoto destructivo que se pueda asociar

con alguna falla del sistema Atirro, que haya afectado la principal población de la zona, Turrialba, así como Tucurrique, un antiguo poblado indígena (ver González, 1994; Peraldo & Montero, 1994; Miyamuya, 1980).

A partir de 1974, cuando se iniciaron localizaciones de temblores con estaciones costarricenses, se han detectado algunos enjambres de temblores, que se pueden asociar con este sistema de falla, aunque también es posible asociarlos con la falla Navarro. En 1978, ocurrió un enjambre de temblores al norte de Turrialba, en la zona de Santa Rosa y Aquiares, que pudo asociarse con las fallas Azul, Turrialba o Navarro. Otro enjambre ocurrió en enero del 2001 en la misma zona.

La sismicidad registrada por la RSN (ICE-UCR) entre 1982 y 1999 muestra una importante sismicidad al suroeste del sistema de falla Atirro, la cual se relaciona con el terremoto de Buena Vista del 3 de julio de 1983 (Ms 6,3) y su secuencia de réplicas (Boschini et al., 1988) (Fig. 8a) y con los temblores de Pejibaye de julio de 1993 (Montero et al., 1993; Fernández & Pacheco, 1998). Por otro lado, Fernández & Pacheco (1998) observan una baja sismicidad en los alrededores de la ciudad de Turrialba. Un sismo importante ocurrido en la falla Atirro fue el del 19 de noviembre de 1987 (Md 4,9), que tuvo un mecanismo focal inverso, consistente con su ubicación en el lomo de presión del cerro Mirador (Montero, 2001).

El terremoto de Limón de 1991 (Mw 7,7) fue el sismo más importante ocurrido sobre el borde caribe de Costa Rica durante el siglo XX. Este sismo se relacionó con una falla inversa buzante al suroeste, localizada en el extremo noroeste del Cinturón Deformado del Norte de Panamá. Este evento disparó actividad sísmica en una serie de fallas localizadas dentro de la cordillera de Talamanca. Barquero & Rojas (1994) analizaron la sismicidad inducida en la zona de Tucurrique y Turrialba obteniendo mecanismos focales para dos temblores ocurridos en el sistema de falla Atirro (Fig. 8b). Un sismo tiene mecanismo transcurrente con una componente inversa, donde el plano nodal NNW de tipo dextral se puede asociar con la falla Turrialba y el otro

relacionable con la falla Tucurrique, es inverso-transcurrente. Esta sismicidad indica que una parte de la misma se localizó en el sistema de falla Atirro. Otros sismos ocurrieron al este y sur de la falla Atirro.

Varios análisis de réplicas del terremoto de Limón han sido realizados. En la Fig. 8b se muestran las réplicas principales reportadas por Montero et al. (1994). Se observa un epicentro en la

zona del cerro Mirador y cuatro eventos ubicados al suroeste del extremo sureste de la falla Atirro. En la misma figura 8c se muestran las réplicas localizadas por Ponce et al. (1994), las cuales no parecen haber ocurrido en el sistema de falla Atirro. En la figura 8d se muestran las réplicas reportadas por Fan et al. (1993), las cuales no ocurrieron en el sistema de falla Atirro. Finalmente, algunas de las réplicas incluídas en

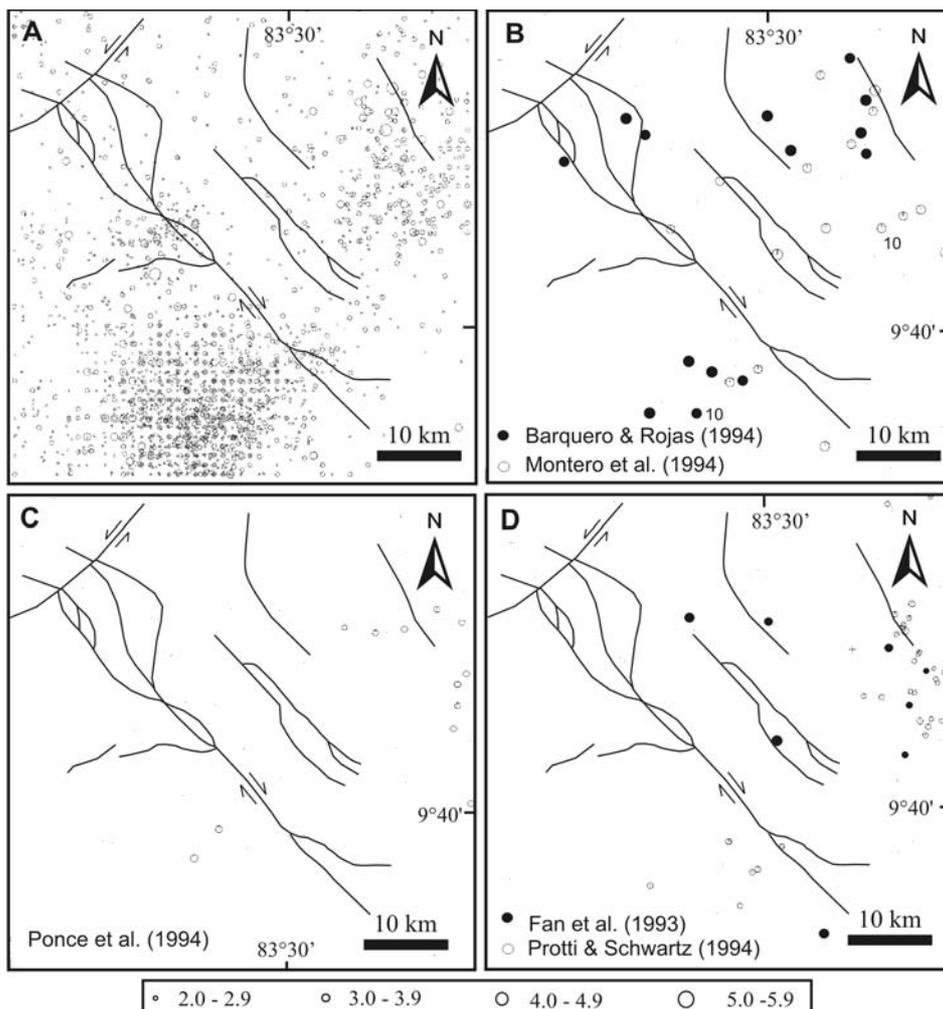


Fig. 8: A) Temblores localizados por la Red Sismológica Nacional (RSN, ICE-UCR) entre 1982 y 1999 muestran el sistema de falla Atirro con baja sismicidad. B) Se muestran las réplicas del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (Mw 7.7) localizadas por Barquero & Rojas (1994) y por Montero et al. (1994). En C) se muestran las localizadas por Ponce et al. (1994) y en D) por Fan et al. (1993) y por Protti & Schwartz (1994).

Protti & Schwartz (1994), pudieron haber ocurrido en el extremo sur de la falla (Fig. 8d). En conclusión, el terremoto de Limón disparó muy poca sismicidad en el sistema de falla Atirro, aunque sí disparó sismicidad en las fallas Kabébeta, Pacuare y Ayil.

Luego del terremoto de Limón de 1991, ocurrieron los temblores de Pejibaye del 10 y 13 de julio de 1993 (Ms 5,6 y 5,2 respectivamente), los cuales fueron relacionados con el sistema de falla Simarí por Montero (2001). Esta sismicidad se ubica ligeramente al norte de la falla Simarí y es limitada al este por el lomo de presión del cerro Mirador (Fig. 8a).

#### **Sismicidad asociada con los sistemas de falla Río Sucio y del macizo Irazú-Turrialba**

Dentro del *pull-apart* de Turrialba-Irazú, es posible identificar algunos sismos y enjambres durante el siglo pasado. Schaufelberger & Jiménez (1933) reportan un sismo el 22 de marzo de 1933, con un área macrosísmica que alcanzó una intensidad entre V y VI grados en Santa Cruz de Turrialba y en Cartago. Luego, de un sismo similar ocurrido el 30 de mayo se inició la actividad de cenizas del volcán Irazú de ese año, por lo que esta actividad sísmica fue premonitora de la erupción.

El terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 (Ms 5,7) fue relacionado por Montero y Alvarado (1995) con el ramal occidental de la falla Río Sucio, aunque considerando que la falla Lara se ubica dentro de la zona macrosísmica es posible también que se asocie con esta. El temblor alcanzó intensidad VIII en la escala Mercalli Modificada y originó numerosos y considerables deslizamientos en las zonas con intensidades entre VII y VIII grados, uno de los cuales originó varias muertes. Este terremoto se relaciona indudablemente con el sistema de falla Río Sucio (Fig. 2).

Entre 1982 y el 2000 se han detectado varios enjambres de temblores en esta zona. Estos fueron discutidos por Güendel (1985), Barquero & Alvarado (1989), Montero & Alvarado (1995), Barquero et al. (1995) y Fernández et al. (1998).

Estos se asociaron con las fallas Irazú, Ariete, Pastora y otras fallas menores que se ubican en un radio de 5 km del cráter del volcán Irazú. Los mecanismos focales obtenidos muestran varios tipos de soluciones, aunque predominan los de desplazamiento de rumbo con componentes inversas y normales y los normales puros (Montero & Alvarado, 1995; Fernández et al., 1998). Entre el Irazú y el Turrialba, los mecanismos muestran que las fallas con un rumbo hacia el norte tienen una fuerte componente dextral, mientras que sobre el flanco noroeste del Irazú, los planos nodales de rumbo hacia entre NW y NNW tienden a ser dextrales (Montero & Alvarado, 1995). En ambos casos existe una buena correspondencia con el sistema de fallamiento.

#### **MODELO NEOTECTÓNICO, EDAD DEL FALLAMIENTO Y TASA DE DESLIZAMIENTO**

Montero & Morales (1990), Montero (1994a), Kolarsky et al. (1995) y López (1999) propusieron que el levantamiento del Coco al colisionar con el sureste de Costa Rica, enfrente de las penínsulas de Osa y de Burica, genera un campo de esfuerzos compresivos horizontales máximos (ECHM) que alcanza a afectar hasta el borde caribe costarricense (Fig. 1). El ECHM tiene un rumbo aproximado NS en la zona entre el sector oriental de la cordillera volcánica Central y el sector noreste de la cordillera de Talamanca. Fallas de rumbo de tipo dextral de dirección NW serían generadas por un ECHM de rumbo NS. Por lo tanto, el sistema de falla Atirro-Río Sucio y el *pull-apart* de Turrialba-Irazú resulta del ECHM generado por el indentador (el levantamiento del Coco) al colisionar con el sureste de Costa Rica. Sin embargo, dentro del macizo del Irazú-Turrialba, los esfuerzos relacionados con los procesos volcánicos modificarían los esfuerzos tectónicos regionales (van Wyk de Vries & Merle, 1998), lo cual explicaría el cambio de rumbo de algunas fallas. Por ejemplo, la falla Tucurrique cambia su rumbo de NW a casi EW al entrar en el macizo volcánico.

Las fallas Atirro, Turrialba y Tucurrique muestran desplazamientos deducidos de ríos y quebradas desplazadas que oscilan entre unos metros y 3,5 km. Este sistema de fallamiento inició su actividad luego que el levantamiento del Coco alcanzó la fosa Mesoamericana hace unos 5 Ma y es contemporáneo con el momento en el cual la colisión e indentación tectónica alcanzó el sector central y caribe de Costa Rica. Asimismo, se hipotiza que el sistema de fallamiento se desarrolló después de que el sistema de drenaje principal de la cordillera de Talamanca que incluye ríos como el Reventazón, Chirripó y Pacuare habían sido establecidos. Esto puede ubicarse al inicio del Cuaternario hace unos 2 Ma. De acuerdo con Marshall (2000), la cordillera volcánica Central se emplazó en su actual ubicación hace unos 300 000 años. Si la falla Turrialba ha desplazado dextralmente unos 3,5 km los depósitos de lavas de la loma Florencia, relacionados con las primera etapa de ese vulcanismo, se especula que la tasa de deslizamiento del sistema debe ser alrededor de 1 cm/año.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado la conexión tectónica entre los sistemas de falla dextrales Atirro y Río Sucio, mediante un relevo derecho que ha originado el *pull-apart* de Turrialba-Irazú. El sistema de fallas Atirro y el sector centro-oriental del *pull-apart* se expresan claramente en la morfología y una serie de evidencias demuestran que es un sistema de falla activo. Asimismo, el sistema de fallas Río Sucio ha tenido actividad sísmica histórica, originando el terremoto destructivo de Patillos del 30 de diciembre de 1952 (Ms 5,7).

El *pull-apart* de Turrialba-Irazú tiene una expresión morfológica de cuenca en su sector oriental, donde potentes depósitos aluviales y laháricos rellenan la depresión tectónica. Las fallas Azul y Campano definen los bordes noreste y sureste del *pull-apart*. Hacia el centro y noroeste del *pull-apart* ha crecido la estructura volcánica del macizo Irazú-Turrialba, oscureciendo la expresión morfológica de la estructura deprimida

asociada al *pull-apart*. Sin embargo, es posible aún observar una zona relativamente deprimida al pie del escarpe de la traza oriental de la falla Río Sucio. El sistema de falla transversal al *pull-apart* (*cross basin fault*) incluye la falla Turrialba y los ramales central y occidental de la falla Río Sucio y la falla Lara. Las fallas Patria y Honduras parecen corresponder con las fallas que limitan la cuenca de tracción por el oeste.

Relevos izquierdos a lo largo de la falla Atirro y entre esta y la Tucurrique han originado la zona transpresiva de Matama y los lomos de presión del cerro Mirador, Rincón de la Esperanza y el de la fila Omega. Debido al levantamiento del bloque norte de la falla Tucurrique, se ha formado la cuenca aluvial de Pejibaye, el cual es resultado de represamientos intermitentes del drenaje.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó dentro de los proyectos de investigación No 805-99-257 y 113-90-071, ambos financiados por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Se agradece a Lepolt Linkimer por su apoyo en el campo y en la revisión de una primera versión del manuscrito. Igualmente, se agradece al compañero Percy Denyer sus comentarios al manuscrito y a las figuras, lo cual ayudó a mejorarlo. Visitas de campo también fueron realizadas con Mario Fernández y los estudiantes de los cursos de Neotectónica, a quienes se agradece su colaboración. A Sergio Rojas se agradece su ayuda y paciencia para la elaboración de las figuras.

## REFERENCIAS

- ALVARADO, G. E., 1993: Volcanology and petrology of Irazu Volcano, Costa Rica. - 261 págs, Univ. Kiel, Alemania [Tesis Ph.D].
- BARQUERO, R. & ALVARADO, G. E., 1989: Los enjambres de temblores en el arco volcánico de Costa Rica. - Bol. Obs. Vulc. Arenal, 2(4):18-39.

- BARQUERO, R., LESAGE, Ph. METAXIAN, J. P., CREUSOT, A. & FERNANDEZ, M., 1995: La crisis sísmica en el volcán Irazú en 1991 (Costa Rica). - *Rev. Geol. Amér. Central*, 18: 5-18.
- BARQUERO, R. & ROJAS, W., 1994: Sismicidad inducida por el terremoto de Limón. - *Rev. Geol. Amer. Central*, Vol. Esp. Terremoto de Limón 22 de abril de 1991: 111-120.
- BERGOING, J.P., 1979: Geomorfología del sector volcánico Las Nubes-Cabeza de Vaca. - *Inf. Sem. IG.N.* 1979 (1): 139-146.
- BERGOING, J.P., 1991: Geomorfología del área de confluencia de los ríos Reventazón y Pejibaye, Costa Rica. - *Rev. Geogr. IPGH*, 93.
- BERGOING, J.P., 1998: Geomorfología de Costa Rica. - 409 págs. *Inst. Geogr. Nac. San José*.
- BERGOING, J.P. & MALAVASSI, E., 1980: Mapa geomorfológico preliminar Valle Central Oriental, Costa Rica. - Escala 1:100 000, *IGN*, San José.
- BERGOING, J.P., MALAVASSI, E. & JIMENEZ, R., 1980: Síntesis geológica del Valle Central de Costa Rica. - Escala 1:100 000. 2 hojas, *IGN*, San José.
- BERRANGÉ, J. P., 1977: Reconnaissance geology of the Tapantí Quadrangle, Talamanca Cordillera, Costa Rica (including notes on photogeological maps of the Pejibaye, Vueltas, Savagre and San Isidro Quadrangles. - 77 págs. + 7 mapas. *Inst. Geol. Sci. Overseas Division*. Londres, Inglaterra.
- BOSCHINI, I., ALVARADO, G. & ROJAS, W., 1988: El terremoto de Buenavista de Pérez Zeledón (Julio 3, 1983): Evidencia de una fuente sismogénica intraplaca desconocida en Costa Rica. - *Rev. Geol. Amer. Central*, 8: 111-121.
- COLLINS, L. S., COATES, A. G., JACKSON, J. B. C. & OBANDO, J., 1995: Timing and rates of emergence of the Limon and Bocas del Toro Basins: Caribbean effects of Cocos Ridge subduction. - En: MANN, P. (ed.): *Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America*. - *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* 295: 263-290.
- DE BOER, J., DRUMMOND, M., BORDELON, M., DEFANT, M., BELLON, H. & MAURY, R., 1995: Cenozoic magmatic phases of the Costa Rican island arc (Cordillera de Talamanca). - En: MANN, P. (ed.): *Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America*. - *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* 295: 35-55.
- DÓNDOLI, C., DENGÓ, G. & MALAVASSI, E., 1968: Mapa geológico de Costa Rica. - Escala 1: 700 000, *DGMP-MEIC*, San José.
- DÓNDOLI, C. & TORRES, A., 1954: Estudio geoagronómico de la región oriental de la Meseta Central. - 180 págs. *Min. Agric. Ind.* San José.
- FAN, G., BECK, S. & WALLACE, T., 1993: The seismic source parameters of the 1991 Costa Rica aftershock sequence: Evidence for a transcurrent plate boundary. - *J. Geophys. Res.*, 98: 15759-15778.
- FERNANDEZ, J. A., 1987: Geología de la hoja topográfica Tucurrique. - 205 págs. *Univ. Costa Rica*, San José [Tesis Lic.].
- FERNÁNDEZ, J. A., AGUILAR, A., ARRIETA, T., ASTORGA, A., BARBOZA, G., BARRIENTOS, J., BARBOZA, X., BORTAZZI, G., BUSTOS, I., CALVO, C., CAMPOS, L., ESCALANTE, G., LAURITO, C., OBANDO, J., PIZARRO, D., ROJAS, J. F., TEJERA, R., VALERIN, E.

- & VALERIO, A., 1997: Mapa geológico de Costa Rica. - Escala 1: 750 000. Min. Amb. Energía, Ref. Cost. Petr.
- FERNÁNDEZ, M. & PACHECO, J., 1998: Sismotectónica de la región central de Costa Rica. - *Rev. Geol. Amér. Central*, 21: 5-23.
- FERNÁNDEZ, M., MORA, M. & BARQUERO, R., 1998: Los procesos sísmicos en el volcán Irazú. - *Rev. Geol. Amér. Central*, 21: 47-59.
- GONZÁLEZ, C., 1994: Temblores, Terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica, 1608-1910 [2ª ed.]. - 239 págs. Ed. Tecnol. Costa Rica, Cartago.
- GÜENDEL, F., 1985: Enjambres sísmicos en el volcán Irazú. - *Cat. Temblores 1984. OV-SICORI*, Heredia: 100 -104.
- KOLARSKY, R., MANN, P. & MONTERO, W., 1995: Forearc deformation related to the subduction of the Cocos ridge, southeastern Costa Rica. - En: MANN, P. (ed.): *Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America*. - *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* 295: 235-262.
- KRUSHENSKY, R. D., 1972: *Geology of the Istarú Quadrangle, Costa Rica*. - *U.S. Geol. Surv.* 1358: 1-46.
- KRUSHENSKY, R. D., MALAVASSI, E. & CASTILLO, R., 1976: *Reconnaissance geologic map and cross sections of central Costa Rica*. Escala 1:100 000. - *U.S. Geol. Surv. Misc. Invest. Series. Map I-899*.
- LÓPEZ, A., 1999: Neo-and paleostress partitioning in the SW corner of the Caribbean plate and its fault reactivation potential. - 294 págs. Univ. Tubingen, Alemania [Tesis Ph.D].
- MCCLAY, K. & DOOLEY, T., 1995: Analogue models of pull-apart-basins. - *Geology*, 8: 711-714.
- MARSHALL, J., 2000: Active tectonics and Quaternary landscape evolution across the western Panama block, Costa Rica, Central America. - 304 págs. Univ. Pennsylvania, Estados Unidos [Ph.D].
- MARSHALL, J., FISHER, D. & GARDNER, T. W., 2000: Central Costa Rica deformed belt: Kinematics of diffuse faulting across the western Panama block. - *Tectonics*, 19: 468-492.
- MIYAMURA, S., 1980: *Sismicidad de Costa Rica*. - 190 págs. Ed. Univ. Costa Rica, San José.
- MONTERO, W., 1994a: Neotectonics and related stress distribution in a subduction-collisional zone: Costa Rica. - En: SEYFRIED, H. & HELLMANN, W. (eds.). *Geology of an evolving island arc. The istmus of Southern Nicaragua, Costa Rica and Western Panamá*. - *Profil*, 7: 125-141.
- MONTERO, W., 1994b: Sismicidad y neotectónica. - En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (eds): *Atlas geológico Gran Área Metropolitana*. - Ed. Tecnol. Costa Rica, Cartago: 147-160.
- MONTERO, W., 2001: El cinturón deformado del centro de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá. - *Rev. Geol. Amer. Central*, 24: 29-56.
- MONTERO, W. & ALVARADO, G., 1995: El terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 ( $M_s=5,9$ ) y el contexto neotectónico de la región del volcán Irazú, Costa Rica. - *Rev. Geol. Amer. Central*, 18: 25-42.
- MONTERO, W., BARQUERO, R., PERALDO, G., CLIMENT, A., MORA, S.,

- CERVANTES, F. & PERAZZO, E., 1993: El terremoto de Pejibaye de Turrialba del 10 de julio de 1993: Aspectos sismológicos, neotectónicos y geotécnicos. - En: BARQUERO, R., PERALDO, G. (eds): Inf. Inst. Cost. Electr. DIC- DG: 1-33.
- MONTERO, W., DENYER, P., BARQUERO, R., ALVARADO, G. E., COWAN, H., MACHETTE, M. N., HALLER, K. M. & DART, R. L., 1998: Map and database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. - U. S. Geol. Surv. Open-File Rep. 98-481: 63 págs. + mapa Escala 1: 500 000.
- MONTERO, W. & MORALES, L. D., 1990: Deformación y esfuerzos neotectónicos en Costa Rica. - Rev. Geol. Amer. Central, 11: 69-87.
- MONTERO, W., PARDO, M., PONCE, L., ROJAS, W. & FERNÁNDEZ, M., 1994: Evento principal y réplicas importantes del terremoto de Limón. - Rev. Geol. Amer. Central. Vol. Esp. Terremoto de Limón 22 de abril de 1991: 93-102.
- MORA, R., CERDAS, A., MOLINA, F. & VEGA, E., 1990: Caracterización geológica del deslizamiento Chiz (Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica): Amenaza y prevención. - Rev. Geol. Amer. Central, 11: 59-68.
- PERALDO, G. & MONTERO, W., 1994: Terremotos coloniales de Costa Rica. - 162 págs. - Ed. Tecnol. Costa Rica, Cartago.
- PONCE, L., PARDO, M., DOMINGUEZ, J., MONTERO, W., ROJAS, W., BOSCHINI, I., SUAREZ, G. & CAMACHO, E., 1994: Estudio de réplicas del terremoto de Limón usando datos locales: Resultados e implicaciones tectónicas. - Rev. Geol. Am. Central Vol. Esp. Terremoto de Limón del 22 de abril de 1991: 103-110.
- PROTTI, M., GÜENDEL, F. & MCNALLY, K., 1995: Correlation between the age of the subducting Cocos plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua-Costa Rica. En: MANN, P. (ed.): Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America. - Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 295: 309-326.
- PROTTI, M. & SCHWARTZ, S., 1994: Mechanics of back arc deformation in Costa Rica: Evidence from aftershock study of the April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica, earthquake (Mw= 7.7). - Tectonics, 13: 1093-1107.
- QUESADA, J. D., 1986: Estudio geológico de los alrededores de La Esperanza, Pejibaye de Jiménez, Cartago, Costa Rica. - 36 págs. Univ. Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- SAÉNZ, L. F., 1985: Estudio geofísico para la factibilidad del proyecto hidroeléctrico Angostura. - 67 págs. Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- SANDOVAL, L. F., SAÉNZ, R., ACUÑA, J., CASTRO, J. F., GÓMEZ, M., LÓPEZ, A., MEDEROS, B., MONGE, A., VARGAS, J., FERNÁNDEZ, T., ULATE, R. & RAMÍREZ, C., 1982: Mapa geológico de Costa Rica. - Escala 1:200 000 (9 hojas), IGN.
- SCHAUFELBERGER, P. & JIMENEZ, S., 1933: Algunas nociones sobre terremotos y temblores en Costa Rica. - 31 págs. Apuntes Geología 7, Imprenta La Tribuna, San José.
- SIERCKE, H., 1986: Geología de la fila Omega y alrededores, cantón de Jiménez, provincia de Cartago, Costa Rica. - 54 págs. Univ. Costa Rica [Inf. Campaña Geol.].
- SOTO, G., 1988: Estructuras volcano-tectónicas del volcán Turrialba, Costa Rica, América

- Central. - V Congr. Geol. Chileno Actas III (I): 163-175.
- SÚAREZ, G., PARDO, M., DOMÍNGUEZ, J., PONCE, L., MONTERO, W., BOSCHINI, I. & ROJAS, W., 1995: The Limón, Costa Rica earthquake of 22 April, 1991 (Mw=7.7): Evidence of back-arc thrusting and collisional tectonics in a subduction environment. - *Tectonics*, 14: 518-530.
- VAN WYK DE VRIES, B. & MERLE, O., 1998: Extension induced by volcanic loading in regional strike-slip zones. - *Geology*, 26: 983-986.
- VARGAS, J., 1986: Estudio geológico entre Máquina Vieja y quebrada Armado, provincia de Cartago, Costa Rica. - 29 págs. Univ. Costa Rica [Inf. Campaña Geol.].
- WOODWARD-CLYDE, 1993: A preliminary evaluation of earthquake and volcanic hazards significant to the major population centers of the Valle Central, Costa Rica. - 89 págs. + 6 mapas escala 1: 50 000. Rep. Final.