

3.0 RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES

Interpretaciones de los imágenes de radar y fotografías, reconocimiento del campo, investigaciones sobre geomorfología tectónica y geología Cuaternaria, e investigaciones de trincheras fueron realizados con el intento de identificar y caracterizar fallas importantes con respecto a la conducción del Acueducto Orosi. Importante fue obtener información sobre la ubicación de trazas principales de las fallas que cruzan el acueducto, para estimar sus magnitudes y desplazamientos esperados. La sección 3.1 describe los lineamientos más importantes a lo largo del acueducto. La sección 3.2 describe la geología Cuaternaria y la geomorfología tectónica realizada en este estudio. La sección 3.3 describe las fallas principales, los resultados de las investigaciones de las trincheras, y el análisis de la sismicidad histórica y reciente relacionada a las fallas principales.

3.1 INTERPRETACION DE IMAGENES DE RADAR Y FOTOGRAFIAS AEREAS

La interpretación de los imágenes de radar y fotografías aéreas fue realizado para identificar lineamientos estructural es que podrían presentar una amenaza sísmica para el Acueducto Orosi. La identificación de lineamientos no se realiza únicamente para una mejor caracterización de las fuentes sísmicas sino también para facilitar la selección los mejores sitios para excavar trincheras para obtener información paleosísmica. También, a partir del análisis de las fotografías aéreas se inicio en el mapeo de la distribución de las unidades geológicas más jóvenes para evaluar la actividad de fallas que cruzan el acueducto. Una breve discusión de los lineamientos principales que son relevantes para el acueducto se realiza a continuación; la descripción detallada se encuentra en el Apéndice B.

Los lineamientos fueron identificados a partir de fotografías aéreas de diversas escalas y de imágenes de radar. Las imágenes de radar son propicias para identificar elementos lineales y dependiendo del contraste de sombras en algunos casos permiten identificar escarpes y otros elementos morfológicos sugestivos de ser fallas activas. Por su escala, son generalmente muy propicias para observar la estructura regional. Con las fotografías aéreas se puedan identificar diversos elementos morfológicos que son utilizados para sugerir la presencia de fallas activas, especialmente en las observaciones de detalle de los lineamientos. Generalmente, las evidencias están expresadas en formas lineales e identificadas por cambios en el tono, alineaciones de vegetación, pendientes, o otras formas geomorfológicas que muestra afectos

tectónicos como cambios en la orientación y pendiente de los ríos, alineaciones topográficas y cambios en la geología estructural. Siempre en todo caso es necesario el trabajo de reconocimiento y de detalle de campo, para poder definir con mayor certeza el origen de un determinado lineamiento identificado con los sensores remotos.

En la descripción de los lineamientos se utilizan términos específicos para referirse a la calidad de un lineamiento. Se utiliza el término de expresión prominente para aquellos que presentan una serie de elementos lineales que se pueden continuar claramente a través de la extensión de un lineamiento específico, entre estos podemos mencionar escarpes, y cambios fuertes de pendiente. Generalmente también se reconocen por la presencia de varios elementos geomorfológicos distintos asociados, señalando la presencia del lineamiento. Aquellos que son de expresión moderada, se refieren a los que tienen elementos lineales que se pueden continuar pero tienen una naturaleza discontinua y cambios de pendiente muy suaves o no muy marcados. Finalmente los lineamientos con expresiones débiles son aquellos que tienen un trazo débil, con poca definición tonal y morfológica, y discontinuo. De los lineamientos identificados en este estudio (Fig. 5) los más importantes para el acueducto son aquellos que están muy cerca, cruzan, o tiene un trayecto que podría cruzar el tramo. Ellos son los lineamientos Coris, Agua Caliente (Guarco), río Navarro, Orosi, y Cedral.

3.1.1 Lineamiento Coris

Este lineamiento tiene un rumbo oeste-noroeste y se extiende en forma arqueada por aproximadamente 9 km desde su extremo oeste que se ubica cerca del poblado de Coris, hasta el extremo sureste que se localiza cerca de San Francisco de Cartago. Al noroeste se continua con los lineamientos Quebradas y Curridabat. Tiene una expresión débil a moderada. Se caracteriza por originar quiebre en la pendiente del terreno, silla de falla, y contrastes de vegetación en las áreas planas. Este lineamiento se interpreta es una falla, dado que se encontró en una trinchera exploratoria donde se ha interpretado que presenta una estructura en flor positiva (Montero y otros, 1991b). Hacia el este se une con el lineamiento Agua Caliente (Guarco). A partir de esta unión ambas fallas se continúan hacia el este con el lineamiento Paraíso.

3.1.2 Lineamiento Agua Caliente (Guarco)

Este lineamiento se le ha denominado también Guarco y Valle de Coris (Montero et al., 1991b). Muestra una expresión morfológica prominente. Tiene una forma sinuosa, un rumbo oeste-noroeste y su extensión total es de 16 km. Es caracterizado por una serie de espolones truncados alineados, presenta fuentes termales alineadas en el Valle de Coris y en Hervidero. Muestra un valle lineal en parte de su traza. En una trinchera exploratoria se comprobó que es una falla neotectónica porque desplaza depósitos Holocénicos de tipo lacustre. Se muestra bastante segmentada en el extremo oeste. Hacia el este se une con la falla Coris continuándose con el lineamiento Paraíso.

3.1.3 Lineamiento Río Navarro

Tiene un rumbo oscilante este-noreste. Se considera como una falla por su expresión morfológica y por sus características estructurales. A partir de la confluencia con el río Navarrito, la falla Navarro se muestra lineal y se divide en dos brazos. Cerca de la confluencia con el río Grande del Orosi, la traza norte se subdivide en una serie de lineamientos de forma arqueada con un rumbo noreste que se pueden continuar con el lineamiento Maravilla. La traza sur de la falla Navarro se localiza sobre la margen derecha del río Grande del Orosi y se continua por el valle del río Naranjo donde se localiza la población de Cachí. Los brazos norte y sur parecen formar una estructura tipo cuenca de tracción, con el ápice oeste cerca de la confluencia de los ríos Navarro y Grande del Orosi. Presenta una longitud total de 22 km a lo largo de la traza norte hasta que se une posiblemente con el lineamiento Maravilla. A lo largo de la traza sur, se puede continuar desde cerca del poblado La Estrella hasta cerca del poblado de Tucurrique, por una distancia de 26 km. Se caracteriza por mostrar un valle profundo lineal con facetas triangulares en la parte media y baja del río Navarro, posible lomo de obturación, espolón truncado y quiebres en pendiente. En la zona media del río Navarro, la falla corta secuencias sedimentarias del Terciario. En la parte alta del río Navarro, la falla se muestra segmentada y el valle deja de ser lineal en correspondencia con un cambio geológico. En esta zona la falla corta unidades litológicas lávicas (Aguilar, 1984), por lo que la forma segmentada de la falla puede relacionarse a la geología. En este sector la falla se divide en varias ramas siendo la rama norte la de expresión más fuerte. En su extremo oeste termina en una cuenca de tracción (pull apart basin) que denominamos Estrella. Un enjambre sísmico ocurrió en esta estructura en 1980

con temblores de magnitudes máximas $< 4,0$ (Aguilar, 1984). La máxima diferencia de altura con el terreno montañoso aledaño es del orden de los 50 m.

3.1.4 Lineamiento Orosi

Este tiene un rumbo noroeste y una longitud de 11 km. Presenta una expresión morfológica prominente, por lo que se sugiere que es una falla reciente. Se caracteriza por presentar facetas triangulares alineadas que muestran varias generaciones de desarrollo del escarpe. Al pie del escarpe de falla disectado lineal se observan abanicos coluvio-aluvionales coalescentes. Este lineamiento pertenece a un sistema de lineamientos paralelos a subparalelos que se localizan hacia el noreste y al suroeste de este, pero que tienen longitudes menores (por ejemplo, los lineamientos Empalme, Río Patarrá, Río Oro y Duán). Aunque tiene una morfología prominente y sugestiva de una falla reciente, el lineamiento termina contra el lineamiento del río Navarro. El lineamiento río Navarro parece cortar al lineamiento Orosi.

3.1.5 Lineamiento Cedral

Tiene un rumbo este-oeste y una longitud aproximada de 7 km. Su expresión es moderada a prominente. Presenta un cambio de rumbo en el extremo noroeste. Presenta una serie de escarpes alineados, al pie de los cuales se encuentran morfologías de pendiente suavizadas, las cuales se localizan entre las cotas de 1700 a 1500 m. Un depósito coluvio-aluvional al pie del escarpe entre los ríos Patarrá y Sombrero sugiere una ligera componente sinistral en la falla. El lineamiento pierde su expresión antes del tramo de la conducción.

3.2 GEOLOGIA CUATERNARIA Y GEOMORFOLOGIA TECTONICA

La geología cuaternaria fue mapeada por fotografías aéreas e inspección de campo a lo largo de la conducción del acueducto con motivo de identificar las unidades más jóvenes que podrían ser desplazadas por fallas activas. En las áreas más importantes, donde existe la posibilidad de una traza de una falla cortando depósitos, visitamos el sitio para inspeccionar los afloramientos.

Pese a la ausencia de evidencias directas de desplazamiento tectónico, aún es posible obtener información sobre la deformación asociada a movimientos de fallas activas. En la región del estudio, la información más útil consiste de juegos de terrazas que cruzan las fallas activas y superficies geomórficas, como superficies de erosión o construcción. Desafortunadamente,

pocas superficies geomórficas en las áreas de interés presentan características diagnósticas para evaluar sus señales neotectónicas debido a sus orígenes volcánicos.

Las capas de suelos pueden servir tanto como capas guías como para la estimación de la edad de las superficies porque los suelos desarrollados encima de estos depósitos tienen características físicas que cambian con el tiempo haciendo posible distinguir capas de diferentes edades (e.g., Harden, 1982; Harden y Taylor, 1983; Birkeland, 1984, 1990; McFadden, 1990). Los estudios de tectónica y geomorfología realizados en Costa Rica dan una estimación de la tasa de desarrollo de suelos en un ambiente tropical (Kesel y Spicer, 1985; Builard et al., 1988; Drake, 1989). Debido a la ausencia de materiales datables, el desarrollo de suelos es la única oportunidad de estimar la edad de un depósito, terraza, o superficie. De esta manera podemos estimar las edades de unidades Cuaternarias, como terrazas aluviales y evaluar si una superficie está deformada por fallamiento y estimar cuando ocurrió.

3.2.1 Embalse El Llano a Río Navarro

Mucho del corredor de la conducción, no expresa una morfología que llama la atención respecto a deformaciones tectónicas. A la altura del acueducto hay ausencia de depósitos Cuaternarios que permitan evaluar la deformación reciente. También, esta zona está complicada por la presencia de deslizamientos y escombros de la construcción del acueducto.

Un lineamiento que representa una preocupación es el lineamiento Cedral. Presenta una serie de escarpes alineados, al pie de los cuales se encuentran morfologías de pendiente suavizadas entre 1.500 y 1.700 m. También, un depósito coluvio-aluvional al pie del escarpe entre los ríos Patarrá y Sombrero sugiere una ligera componente de movimiento sinistral. El lineamiento pierde su expresión morfológica aproximadamente un kilómetro antes de intersectar el acueducto. La proyección del lineamiento en la zona del acueducto cruzaría entre los ríos Granados y Juco, pero no muestra evidencia de ser una falla activa.

3.2.2 Área del Río Navarro

Las terrazas del río Navarro ofrecen una oportunidad de capturar deformación reciente asociada a la falla Navarro. Aunque el río Navarro y su valle corren paralelo con la falla Navarro y la falla es tipo de rumbo, si la falla es suficiente activa, deber mostrar físicamente

evidencias de desplazamiento en una dirección lateral y vertical. Las terrazas están suficiente continuas para intersectar la traza de la Falla y deben servir para definir la deformación. Con una investigación cuidadosa de las alturas, tipo de sedimentos, y el desarrollo de suelos es posible establecer una secuencia de terrazas con edades relativas. Dataciones de muestras obtenidas de aluvión de una terraza ubicada a unos pocos km de la confluencia de los ríos Navarro y Grande del Orosi, indican un edad de unos 12.320 ± 70 años antes del presente y 12.300 ± 70 años antes del presente para los depósitos que están unos 9 m arriba del río actual cerca el Rancho San Antonio, antes de la entrada del parque Charrarra (ver Fotografías 1 y 2). Los suelos desarrollados encima de estos depósitos tienen un horizonte B de 1,70 m espesor pero poco desarrollado con respecto a la estructura y acumulación de arcilla secundaria y color (8.75 YR). La mayoría de las terrazas del río Navarro tienen suelos menos desarrollados que los suelos de Rancho San Antonio indicando que las terrazas tienen menos que 12.000 años. En comparación con otros suelos datados en Costa Rica (Tabla 1), la mayoría de las terrazas del río Navarro tienen un edad entre unos 500 años hasta unos 8.000 años. Hay unos pequeñas remanentes de terrazas elevados y mostrando un desarrollo de suelo que indica una edad cercana 20.000 años. Los depósitos de las terrazas y el canal actual del río Navarro están compuestos predominante de rocas volcánicas y volcanoclásticas (ver Fotografía 3). Medidas del diámetro intermedio de clastos de las terrazas y el canal (60 clastos en cada muestra) indican que la terraza de 5 m arriba del río tiene una composición de 80 a 90% de clastos de 1 a 55 cm, y 10 a 20% de matriz ($<0,5$ mm). El diámetro promedio es entre 15 a 18 cm con una media de 10 cm. El material transportado por el río, medido en la orilla del caudal, consiste de >90 % clastos, rango de 1 a 220 cm con un diámetro promedio de 38 cm, y una media entre 10 y 20 cm.

La Figura 6 es un perfil del río Navarro y de los perfiles de terrazas. Los perfiles de las terrazas fueron construidos para medir los perfiles en el campo y proyectar sus alturas en el mismo perfil del río. Las terrazas no muestran cambios muy obvios en sus alturas arriba el río indicando poca influencia de deformación tectónica. En la parte cercana a la confluencia con el río Grande del Orosi, hay más terrazas y las alturas parecen aumentar. En las fotografías aéreas y inspección del campo, no hay obvios desplazamientos laterales ni verticales que interrumpen las terrazas (ver Fotografías 4 y 5). Hay pequeñas ondulaciones en las terrazas aguas abajo del Puente Negro que son paralelos a la traza de la falla Navarro, pero también son paralelos al río y pueden representar paleocanales de inundaciones. La

terrazza, donde esta situada las ruinas de la Iglesia Ujarráz, debe ser intersectada por la traza de la falla Navarro, pero no muestra evidencia obvia de desplazamientos tectónicos.

Basado en las evidencias de la interpretación de las fotografías aéreas, imágenes de radar e investigaciones de campo, la traza de la falla Navarro por lo menos se divide en dos cerca del sitio del sifón. La traza del lado norte cruza la conducción en una silla a una elevación de aproximadamente 1.100 m (aproximadamente estación 7+00 km)(ver Fotografía 6). Hay evidencia de otra rama de la falla que cruza cerca 7+330 km (Fotografía 7). En este sitio hay numerosas fallas con desplazamientos de menos de 15 cm. Un suelo con un horizonte B con un espesor de 2.5 m, con estructura bien desarrollada, con alta acumulación de arcilla, y color de 2.5 YR indica una edad de más que 100.000 años. Por su ubicación y por el estado de desarrollo, no es posible decir con certidumbre si las fallas alcanzan la superficie, pero no hay evidencia obvia en la superficie de desplazamientos que señalen una ruptura muy reciente.

Del lado sur del valle parece existir una traza que pasa por la orilla, posiblemente en el flanco de la montaña. No hay evidencia muy obvia en el campo para definir una traza activa en el lado sur, pero en los imágenes de radar un lineamiento es reconocido. Aunque no se encuentra evidencia por ruptura superficial en el valle cercano al sitio del sifón, no quiere decir que no exista la falla en el valle. Es común en sistemas de fallas del rumbo el tener ramas divergiendo de la traza principal a profundidad. En nuestra opinión la traza más activa de la falla Navarro esta ubicada en el lado norte del valle sobre el sector de su pendiente. Si existe una traza en el valle, no ha mostrado evidencia de movimiento obvio en los últimos 5.000 a 10.000 años.

3.2.3 Tramo del Valle de Cartago a Tres Ríos

Hay poca evidencia de actividad tectónica entre las poblaciones de Río Claro (noroeste de San Chirí cerca kilómetro 7+330 km) y Tres Ríos. Hay drenajes ciegos, ligeros lineamientos de anomalías topográficas, fuentes termales, depresiones ciegas, y pantanos y lagunitas elongados que atestiguan a la actividad tectónica de las fallas Agua Caliente y Coris. Sin embargo, la evidencia no es siempre ni claramente asociada con actividad tectónica. Por ejemplo, en la area sur de la ciudad de Cartago, hay depósitos volcanoclásticos muy inhomogéneos que presentan muchas anomalías topográficas como pequeños montañas

alineados, escarpes al frente de flujos de debris y alineaciones de drenajes que pueden ser debidos a contrastes en la resistencia entre los diversos depósitos.

El lado norte del valle Coris donde está ubicado el acueducto, hay coluviones bajando de las cuestas y enterrando los flancos del valle. Si la falla Coris es muy activa, no muestra evidencia de ser muy reciente o con una recurrencia suficiente para superar la tasa de erosión y depositación. El valle de la Quebrada Barahona es angosta y conserva una pequeña secuencia de terrazas Pleistocenas. Deslizamientos son más predominantes en el valle. El valle del Río Tiribi después de la salida del túnel por La Carpintera es angosto y tiene una secuencia de terrazas cortadas en aluviones y coluviones que originan un relleno muy inhomogéneo con respecto al tamaño y tipo de cantos en los depósitos.

3.3 IDENTIFICACION Y EVALUACION DE LAS FALLAS PRINCIPALES

Las fallas más importante y con mayor potencial de ruptura fueron identificadas a partir del análisis de las imágenes y fotos y caracterizadas por su geometría (longitud, buzamiento, y desplazamiento) por varias métodos en la oficina y en el campo. El presente estudio resultó en la mejor definición y entendimiento de las fallas de interés con respecto al anteriormente disponible. Las fallas Navarro, Coris, y Agua Caliente son la más prominentes y significativas a lo largo de la ruta del acueducto. Estas fallas son importantes por su cercanía del acueducto y porque cruza este las fallas.

Las fallas identificadas con potencial de tener un desplazamiento significativo fueron evaluadas considerando la reciente de sus movimientos, la estimación de los desplazamientos, la tasa estimada de movimientos y recurrencia estimada para determinar la probabilidad de que un movimiento de la falla pueda superar el diseño del acueducto. Con base en el análisis de las imágenes de radar y de las fotografías aéreas y del trabajo de campo, la actividad reciente y los desplazamientos y la deformación asociada de la superficie así como las edades de depósitos Cuaternarios cortado y no cortados por las fallas, fue investigado y estimado.

Donde exista evidencia de actividad tectónica del Cuaternario Tardío y no hayan depósitos adecuados para datar el movimiento más reciente, se utilizan tasas de movimiento de largo plazo para evaluar la amenaza. Se pueden obtener tasas de movimiento de largo plazo donde hay superficies de erosión o superficies geomórficas (por ejemplo paisaje volcánico)

desplazadas por una falla. Se puede utilizar la edad de la superficie y el desplazamiento de la superficie para estimar la tasa de movimiento que ha ocurrido en las fallas que desplazan la superficie. En las discusiones que siguen, estimaciones de la tasa de movimiento son basados en el levantamiento de largo plazo o en datos del campo. Típicamente, se da un rango de tasas para representar la incertidumbre existente. Donde fue posible, un valor preferido es indicado y se compara con la tasa de largo plazo, con tasas calculadas de datos del campo, y de criterios como morfología de escarpes, altura de escarpes, expresión geomórfica de la traza, marco tectónico regional y distribución de la deformación regional y comparación con otras regiones.

Presentamos los criterios que se siguieron en la selección de los lineamientos que por sus características representan fallas que son importantes para el Acueducto de Orosi. En la sección 3.1 y en el Apéndice B se describen los lineamientos que se han determinado con base en evidencias geomorfológicas en la región aledaña al Acueducto de Orosi. Entre estos discriminamos los más relevantes para este estudio con base en los siguientes criterios:

- Se escogen los lineamientos para los cuales existe criterio geológico que sugiera fuertemente que corresponden con fallas neotectónicas (activas en los últimos 10000 años). Se consideran especialmente las que presentan una expresión morfológica fuerte.
- Se seleccionan las que cruzan el Acueducto de Orosi. Estas presentarían una amenaza por ruptura de falla dentro de la zona de deformación que se define en la zona del cruce de la falla con el acueducto.
- Las fallas que se definen con base en criterio neotectónico se describinan de acuerdo a su longitud. Se consideran aquellas fallas que tienen longitudes mayores a 6 km, dado que de acuerdo a las relaciones empíricas estas pueden generar sismos de magnitud mayores o iguales a M 5,9, los que podrían resultar en rupturas superficiales y provocar aceleraciones significativas y dañinas para las obras civiles del Acueducto Orosi.

Considerando los anteriores criterios en la Figura 7 se muestran las fallas seleccionadas como más relevantes al proyecto. Estas son las fallas Agua Caliente, Coris y Navarro. A continuación describimos los aspectos más relevantes de estas fallas considerando los fines del estudio.

3.3.1 La Falla Navarro

A continuación definimos los principales criterios que permiten definir la falla Navarro como una falla activa que presenta una amenaza para el Proyecto Orosi. Estos criterios son principalmente criterios geológicos y geomorfológicos y fueron importantes en la selección de los sitios de la trinchera.

3.3.1.1 Criterios Geomorfológicos y Geológicos. En el tema de descripción de lineamientos se describió las características geomorfológicas que en términos generales presenta el lineamiento Navarro. Estas son propias de una falla básicamente porque:

- La expresión geomorfológica que presenta el lineamiento Navarro en su terminación oeste representa una forma estructural denominada cuenca de tracción o pull apart basin que denominamos Estrella. Esta es una estructura tectónica que se asocia con fallas de desplazamiento de rumbo, en este caso de tipo sinistral. Es una geoforma bien conservada razón por la cual debe de tener una edad probable Cuaternario Tardío. Desde el punto de vista de su desarrollo geomorfológico esta estructura sin embargo presenta un desarrollo incipiente porque el piso incorpora zonas montañosas que tienen una elevada altitud, aunque ligeramente menores que las zonas externas que la limitan. Esto significaría que la componente de desplazamiento normal en las fallas de los bordes que limitan la estructura tienen desplazamientos acumulados del orden de unas decenas de metros a un máximo de una o dos centenas de metros.
- Un estudio de campo realizado con el objetivo de definir el tipo de fallas que limitarían el pull-apart, confirmó la presencia de fallas de desplazamiento normal y de desplazamiento de rumbo en las zonas aledañas a los cortes sobre la carretera interamericana de los lineamientos reconocidos en las fotografías aéreas. En el lineamiento del lado norte el movimiento de falla observado fue predominantemente de

desplazamiento de rumbo y en las del lado sur con una componente de separación normal. Las litologías cortadas fueron depósitos volcánicos del Grupo Aguacate.

- En el extremo oeste del valle del Navarro, se presenta un contacto por falla entre dos unidades litológicas de diversas edades. Se da un contacto de la formación Coris en el lado sur con la formación Peñas Negras en el lado norte de la falla. En esta misma zona, las evidencias de la traza norte de la falla serían además del trazo lineal, facetas triangulares alineadas, cambios de pendiente en la topografía y la existencia de depósitos de travertino que representarían antiguas fuentes termales que estuvieron localizadas paralelamente a la traza de la falla.
- Nuevamente al entrar la falla Navarro en el valle del río Grande Orosi esta muestra una morfología típica de una cuenca de tracción. La traza norte de la falla cambia su rumbo de este-noreste a un noreste. La traza sur se ubicaría del lado sur del valle. La traza norte presenta desplazamientos neotectónicos tal como se evidenció en una trinchera exploratoria realizada en este trabajo y que se describe adelante.
- Desde el punto del marco tectónico regional, fallas de rumbo similar a la falla Navarro son de esperar en el límite norte de la microplaca Panamá con la placa Caribe. De acuerdo al campo de esfuerzos neotectónico obtenido por Montero y Morales (1990) fallas de rumbo este-noreste tendrían un desplazamiento predominantemente sinistral tal como ha sido deducido de datos independientes mencionados previamente.

3.3.1.2 Resultados de los estudios de las trincheras. La selección de una trinchera requiere un análisis muy cuidadoso de las fotografías aéreas, buscando seleccionar zonas donde se tiene una buena certeza de que la traza de la falla corta depósitos recientes. En el caso de la falla Navarro, la traza sobre el río Navarro se localiza especialmente sobre los bordes montañosos y además los depósitos aluvionales muy gruesos del río provocaban que fuera poco viable encontrar sitios adecuados para trincheras. Por el contrario la traza norte al entrar en las colinas donde se localiza Paraíso ha originado pequeñas depresiones y trazas de falla las que si eran propicias para realizar sitios de trincheras. Inicialmente se seleccionaron dos sitios los cuales fueron abiertos y levantados en detalle, (escala 1:100). A continuación

describimos la trinchera TGM que fue la única de las dos que presentó evidencias de fallamiento neotectónico (Figs. 8, 9, 10, y 11; Fotografías 8, 9 y 10).

La trinchera TGM, tenía como objetivo interceptar la traza norte de la falla Navarro que en las colinas al sur de Paraíso se bifurca en dos ramas (ver Fig. 7). La ubicación de la trinchera fue perpendicular a la traza más norte de esta falla, el largo programado fue de 50 m y 3,5 m de profundidad.

La trinchera cortó perpendicular a la falla, observándose que la zona de deformación tectónica alcanzó los 50 m, la longitud de la misma. Sin embargo, la deformación se extiende todavía más lateralmente, especialmente hacia el lado norte, porque fallas menores en este extremo todavía se mostraban en forma frecuentes en las diversas caras presentes. La inestabilidad de las paredes de la trinchera fue evidente y en algunos sitios fue un problema que causa que la información geológica no pudiera ser levantada (ver Figura 10, Plano N°. 2, cara oeste, 33-35 m)

Litología. La litología observada se compone de tobas de ceniza, depósitos probablemente fluviolacustres y lentes aluvionales gruesos con bloques volcánicos sin meteorizar. Tanto las tobas como los depósitos fluviolacustres mostraban una fuerte alteración meteórica a arcillas muy plásticas con colores que van desde café muy oscuras, negras a gris blanquecinas. El fluviolacustre se compone de una arena fina a muy fina gris clara, compuesta de plagioclasas y fragmentos de roca relativamente meteorizados.

Los suelos son café a negro, bien desarrollados, con plasticidad alta a moderada, impregnaciones arcillosas y manchas de hematita. Localmente son suelos orgánicos, con un espesor de 25 cm (de 44 a 74 cm desde la superficie), poco plástico y textura arenosa. Hacia la base de la trinchera aparece la roca alterada amarillenta con múltiples manchas de hematita y oscuras de manganeso.

Los horizontes guías (de correlación lateral), se componen de una arcilla gris, gris clara a rojiza, con un espesor máximo observado de 4 cm. El segundo horizonte guía es una arena fina a muy fina, con plagioclasas y fragmentos de roca, gris clara, cuyo espesor oscilaba entre 1 a 3 cm. Estos horizontes guías fueron muy continuos a lo largo de los 50 m, lográndose

medir exactamente los desplazamientos verticales (separaciones de inclinación [si]) de estos estratos, cuando se encontraban deformados por fallas (las separaciones se localizan en cada plano).

El buzamiento de las capas es muy suave, 5 grados hacia el 125°. Son varios horizontes relativamente persistentes e intercalados. Dado el alto grado de deformación tectónica, muchos de estos horizontes lateralmente desaparecen. Cabe aclarar que en los Planos N° 1 y N° 2 (Figs. 8, 10, y 11), así como en los detalles (Fig. 9), solo se muestran los horizontes guías, dado la alta complejidad del mapeo de las paredes y la inestabilidad de las mismas.

Descripción Cara Este (Plano N° 1, Cara Este). Tramo comprendido entre 0 y 17 m, en éste tramo solo aparecen cuatro fracturas importantes (Fig. 8):

- La primera falla aparece cerca de la estación 1 m, es una falla inversa de muy bajo ángulo del orden de centímetros, no fue posible medir su desplazamiento por falta de horizontes de referencia.
- Una zona de deformación importante, aparece entre 8 a 9 m. Aquí se identificaron alrededor de 12 microfallas que desplazan sistemáticamente los horizontes guías. El desplazamiento máximo observado es de 25 cm (Fig. 8; si 3). El plano de falla más importante es vertical y prácticamente llega hasta la superficie, es una falla de desplazamiento de rumbo. Las separaciones de inclinación de la falla (si 1 y 2), son 10 y 13 cm respectivamente, estas dos separaciones indican que la falla ha tenido al menos dos eventos de reactivación.
- La tercera zona de falla, se localiza alrededor de la estación 12 m, cerca del contacto erosivo de la cuenca sedimentaria.
- La última zona de falla se localiza entre las estaciones 16 a 17 y corresponde con una falla inversa de gran ángulo.

Esta sección de la trinchera muestra un estilo tectónico compresivo, dominado por fallas inversas. Sin embargo, la falla de la estación 8 a 9 m, dada sus características puede interpretarse como una falla de desplazamiento de rumbo.

Descripción Detalle N° 1 y N° 2 (Cara Este y Oeste). Tramo comprendido entre 22 y 29 m (Fig. 9), este tramo se caracteriza por una dominancia de esfuerzos compresivos. Los horizontes guías más importantes son las arcillas grises claras y las arenas finas color gris claro. La tectónica compresiva ha deformado los estratos, de tal modo que han producido un pliegue anticlinal con un flanco empinado de rumbo S75°E. Este anticlinal muestra su charnela erosionada producto de la erosión provocada durante la depositación de los depósitos aluvionales gruesos (Fotografía 9) Los cuales se comportan lenticularmente y no muestran evidencia de alguna deformación. La separación de inclinación máxima observada es de 66 cm estaciones 28 a 29 m, entre los puntos a y b (véase Fig. 9, Detalle N° 2, cara oeste, si 9 a-b). La menor separación es de 6 cm (véase Fig. 9, Detalle N° 2, cara oeste, si 8). Esta sección de la trinchera tiene un estilo tectónico compresivo.

Descripción Cara Oeste (Plano N° 2, Cara Oeste). Tramo comprendido entre las estaciones 28 a 50 m (Figs. 10 y 11). Se observaron y describieron 15 fallas en esta sección. Los estratos guías más importantes son las arcillas gris claras a rojizas. Las deformaciones más importantes se localizan entre las estaciones 36 a 50 m, son fallas que muestran desplazamientos de tipo normales y su línea de falla es ramificada hacia la superficie. Por tanto, dadas las características tectónicas y morfológicas, estas fallas son de desplazamiento de rumbo o fallas transcurrentes. La separación de estratos máxima observada es de 30 cm (Fig. 10; si 4 de falla I, la cual llega hasta la superficie; ver Fotografía 10) y la mínima es de 1 cm (Fig. 11; si 10 de falla IV, si 11 y 12 de falla V y si 19). El estilo tectónico dominante en este tramo es de tipo transcurrente.

3.3.1.3 Análisis de la sismicidad histórica y reciente. En relación con las observaciones de temblores ocurridos históricamente (anteriores a 1900) y en este siglo debemos mencionar dos secuencias sísmicas que se pueden asociar con esta falla.

- Temblor de Orosi-Paraíso del 2 de agosto de 1951. Los datos de intensidad máxima que oscilan entre VII y VIII entre los poblados de Paraíso y Orosi sugieren fuertemente que este sismo debe de ser asociado con la falla de Navarro
- Enjambre de temblores del 3 al 9 de setiembre, 1980. Los epicentros de los temblores se localizan dentro y en los bordes de las fallas que limitan el pull apart de Estrella. Aguilar (1984) estudió esta secuencia de temblores cuyas magnitudes fueron < 4 . Esto demuestra que las fallas que se localizan dentro de esta estructura son claramente activas.

3.3.2 Las Fallas Agua Caliente y Coris

Realizamos un análisis detallado de los principales criterios que sustentan la caracterización de las fallas Agua Caliente y Coris como fallas neotectónicas.

3.3.2.1 Criterios geomorfológicos y geológicos. En la sección 3.1 de la descripción de los lineamientos se detalló las características geomorfológicas que muestran ambos lineamientos. Estas son fuertemente sugestivas de representar fallas recientes. Resalta la circunstancia de que estos lineamientos junto con el Tobosi tienen una morfología que sugiere una estructura nuevamente de tipo pull apart, deprimiendo de esta forma una zona montañosa que actualmente se muestra relativamente hundida con respecto a los terrenos montañosos aledaños. La configuración de las fallas estaría de acuerdo con una interpretación geológica donde estas fallas serían de tipo de desplazamiento dextral con una componente de desplazamiento normal. El ápice este de la estructura coincide con un sector del valle de Coris, lo cual también concuerda con la morfología de esta zona.

3.3.2.2 Resultados de los estudios de trincheras. Durante la ejecución del proyecto MIRVYS, en su última fase se realizaron varias trincheras exploratorias. Uno de los sitios seleccionados fue a largo de la traza de la falla de Agua Caliente. En la trinchera se determinó que la falla desplaza depósitos lacustres y un suelo a lo largo de una serie de fallas cuya separación era normal. En una pequeña estructura de tipo graben, un depósito lacustre con una edad media de 3665 años estaba separado por las fallas que limitaban el graben. Una de las fallas separaba unos 30 cm el contacto entre el lacustre y un suelo orgánico superior con tiestos indígenas del período Pavas de edad aproximada de 3000 a 5000 años. El suelo

superior también se encontró cortado por ambas fallas del graben. Estos datos confirman plenamente que la falla Agua Caliente es una falla activa.

3.3.2.3 Análisis de la sismicidad histórica y reciente. Como se verá en el capítulo de Amenaza Sísmica, los terremotos de Cartago de 1841 y 1910 fueron dos sismos sumamente destructivos que afectaron el valle de Cartago. El terremoto de 1841 y especialmente el del 4 de mayo de 1910 es altamente probable que se asocien o con la falla Agua caliente o con la Coris. Dóndoli y Torres (1954) y Montero y Miyamura (1981) ya habían sugerido este hecho y especialmente en este último estudio la distribución de intensidades alineadas con la traza de la falla sugieren que en alguna de estas fallas se originó este importante sismo.

4.0 EVALUACION DE LA MAGNITUD MAXIMA Y DEL DESPLAZAMIENTO

Para el Acueducto Orosi es importante saber la potencial de de ruptura de las fallas que cruzan la tubería. Es importante saber las características geométricas y la actividad de las fallas para estimar sus magnitudes y los desplazamientos esperados tanto para el análisis de la amenaza de ruptura como para el análisis de la amenaza sísmica y los movimientos fuertes esperados.

La estimación de la magnitud máxima de un temblor es un juicio profesional que toma en consideración las características de una falla, el marco tectónico regional, la comparación con otras fallas de potencial sísmico conocido, y la sismicidad regional. Actualmente, no existe un único método para estimar la magnitud máxima de una falla. Varios métodos se basan en el caracter geológico y la historia sísmica de una falla (e.g., Slemmons, 1982; Bonilla et al., 1984; Schwartz et al., 1985, Wesnousky, 1989; Wells y Coppersmith, 1994). Estos métodos se basan en relaciones empíricas entre la magnitud y los parámetros específicos de una falla, incluyendo longitud de ruptura, desplazamiento por evento y el área de ruptura (Figs. 12 y 13). Compilaciones obtenidos de estos datos a partir de un banco de temblores históricos mundial han permitido realizar regresiones lineales entre la magnitud y la longitud de ruptura, la magnitud y el desplazamiento, y la magnitud y el área de la falla, considerando varios escenarios tectónicos.

De los datos obtenidos de esta investigación, y considerando su ambiente tectónico y las características físicas de las fallas se evalúa la actividad y el potencial sísmico de las fallas. Parámetros como longitud de ruptura, área de ruptura, y desplazamiento por evento se pueden utilizar en las relaciones empíricas para estimar las magnitudes probables y sus desplazamientos asociados. Cada método tiene sus limitaciones y dependen de la calidad de los datos empíricos, la completitud y uniformidad de los datos, y de la presencia de grupos de datos no consistentes por haber sido obtenidos de diferentes ambientes tectónicos.

4.1 Parámetros de las Fallas

4.1.1 Longitud de Ruptura. Varios métodos son utilizados para estimar la longitud máxima de una falla que puede romper durante un solo evento. Wentworth et al. (1969) propusieron que el 50% de la longitud entera en una estimación conservadora máxima Slemmons (1982)

propuso relaciones empíricas para relacionar la longitud de una ruptura basado en un porcentaje de la longitud total. Recientemente, geólogos y sismólogos han reconocido la existencia de barreras que limitan la longitud de una ruptura durante un evento sísmico (Schwartz y Coppersmith, 1986; Slemmons, 1982; King y Nabelek, 1985). Donde hay suficientes datos para definir barreras de fallas y segmentos basado en la geometría y diferencias en comportamiento tectónico de una falla, el método de segmentación da una estimación de longitud máxima más confiable

Con base en la identificación de lineamientos y fallas presentada en las secciones 3.1 y 3.3, la falla Navarro muestra buena evidencia de tener una longitud máxima de 26 a 30 km. La falla termina en dos estructuras de tracción que muestran evidencia geológica, geomórfica, y sísmica que sugiere la presencia de geométricas que definen la ruptura más larga. Además, la forma de la traza no es continua y hay pequeños cambios en la orientación en el río Navarro y su valle que sugieren la posibilidad de que la falla está segmentada. Entonces, preferimos dos modelos para evaluar la magnitud basado en la longitud: una longitud máxima de 30 km y un modelo de segmentos de 12 km.

Las fallas Coris y Agua Caliente, descritas en las secciones 3.1 y 3.2, tienen límites máximas de sus longitudes. Los dos terminan al oeste del Valle Coris donde su expresión morfológica desaparece y al sur de la población de Paraíso terminan contra la falla Navarro. Las longitudes son 16 km por la falla Agua Caliente y de 10 km para la falla Coris.

4.1.2 Ancho del Plano de Falla. Las estimaciones del ancho de la falla típicamente se basan en la profundidad de la sismicidad. La sismicidad en la región es de menos de 10 km hasta casi 30 km de profundidad pero la mayoría se concentra en la zona de 10 a 20 km.

4.1.3 Area de Ruptura. Utilizando longitudes de 30 y 12 km por la falla Navarro y un ancho del plano de falla de 15 km, las áreas de ruptura serían de 450 km² y 180 km² respectivamente. Para las fallas Agua Caliente y Coris, las áreas de ruptura serían de 240 km² y 150 km² respectivamente.

4.1.4 Desplazamiento por Evento. No hay suficientes datos para estimar el desplazamiento por evento para las fallas de interés. Principalmente no hay horizontes suficientes ni

favorables en las trincheras para determinar la cantidad exacta de paleoeventos individuales para determinar el desplazamiento por evento. La mayoría de las pequeñas fallas expuestas tenían separaciones verticales menos a 15 cm. Fue poca la información obtenida respecto a la posición del sector del movimiento neto para determinar la componente horizontal. Si 15 cm representa el desplazamiento vertical verdadero y existe una relación máxima entre movimiento horizontal a vertical de 1:1, 15 cm puede representar el desplazamiento horizontal, en este caso, mínimo, porque el desplazamiento vertical también puede ser un resultado del buzamiento de las capas y la separación vertical aparente hecho por movimiento puro lateral. Preferimos estimar el desplazamiento de las relaciones empíricas entre magnitud y desplazamiento.

4.2 Estimación de la Magnitud Máxima y del Desplazamiento

Desafortunadamente, la casi ausencia de materia orgánica no permitió obtener una datación de los estratos separados por la falla. Hay un suelo bien desarrollado expuesto en la trinchera y otro menos desarrollado cerca la superficie. Por el alto nivel de meteorización de los depósitos y el suelo desarrollado en los depósitos, y podemos hacer una comparación entre estos suelos y otros descritos y datados de otras partes de Costa Rica (Kesel y Spicer, 1985; Bullard et al., 1988; Drake, 1989) y estimar que la edad del suelo predominante en la trinchera es entre 50 ka y 150 ka. La principal incertidumbre es en la edad de parte de los depósitos más jóvenes que están desplazados por las fallas. La escasez de estrías y de información sobre el desplazamiento del rumbo hace difícil estimar el desplazamiento esperado a partir de las evidencias de la trinchera sin aumentar las excavaciones y el tiempo de la investigación.

Se puede estimar el desplazamiento por cada evento que rompa la superficie utilizando curvas empíricas entre la magnitud histórica y la longitud de la ruptura superficial, y la magnitud y el desplazamiento promedio y el desplazamiento máximo de la superficie (Slemmons, 1982; Bonilla et al., 1984; Slemmons et al., 1989, Wesnousky, 1986; Wells y Coppersmith, 1994) (Figs. 12 y 13). Se utiliza la longitud de las fallas y los segmentos de fallas, obtenidos de las trazas mapeadas, para estimar la magnitud máxima esperada para un temblor suponiendo que todo el segmento rompe de una vez. Se puede estimar el desplazamiento máximo de la magnitud máxima estimada. Dado que el desplazamiento máximo típicamente ocurre solo en una parte corta de la ruptura total, el desplazamiento promedio, que es generalmente

aproximadamente la mitad del máximo (Wells y Coppersmith, 1994), es más apropiado para definir la ruptura que puede afectar el acueducto.

Las relaciones empíricas consideradas en la estimación de la magnitud máxima y del desplazamiento para las fallas Navarro, Agua Caliente, y Coris fueron:

1) Longitud de ruptura contra magnitud para fallas de rumbo a nivel mundial (L vs. M):

- $M_s = 1.404 + 1.169 \cdot \log(L)$ (Slemmons, 1982)

donde L es la longitud de ruptura superficial expresada en metros

- $M_s = 6.24 + 0.619 \cdot \log(L)$ (Bonilla et al , 1984)

donde L es la longitud de ruptura superficial expresada en kilómetros

- $M = 5.16 + 1.12 \cdot \log(SRL)$ (Wells y Coppersmith, 1994)

donde SRL es la longitud de ruptura superficial expresada en kilómetros

2) Area de ruptura contra magnitud

- $M = 4.15 + \log A$ (Wyss, 1979)

donde A es el área de ruptura estimada de la longitud de la falla y una estimación de la profundidad sismogénica expresada en km^2

- $M = 3.98 + 1.02 \cdot \log A$ (Wells y Coppersmith, 1994)

donde A fue definida previamente

3) Desplazamiento contra magnitud para fallas de rumbo a nivel mundial (D vs. M)

- $M_s = 6.974 + 0.804 \cdot \log(D)$ (Slemmons, 1982)

donde D es el desplazamiento expresado en metros

- $M_s = 7.0 + 0.782 \cdot \log(D)$ (Bonilla et al., 1984)

donde **D** es el desplazamiento expresado en metros

- $M = 6.81 + 0.78 \cdot \log(MD)$ (Wells y Coppersmith, 1994)

donde **MD** es el desplazamiento máximo expresado en metros

- $M = 7.04 + 0.89 \cdot \log(AD)$ (Wells y Coppersmith, 1994)

donde **AD** es el desplazamiento promedio expresado en metros

4) Desplazamiento contra longitud de ruptura superficial (D vs. L)

- $\log(MD) = -1.69 + 1.16 \cdot \log(SRL)$ (Wells y Coppersmith, 1994)

donde **MD** es el desplazamiento máximo, en metros, y **SRL** es la longitud de ruptura superficial, en kilómetros

- $\log(AD) = -1.70 + 1.04 \cdot \log(SRL)$ (Wells y Coppersmith, 1994)

donde **AD** es el desplazamiento promedio, en metros, y **SRL** es la longitud de ruptura superficial, en kilómetros

La Tabla 2 es un resumen de los parámetros y valores calculados a partir de cada relación. La confianza en los valores resultantes es variable y depende en la precisión de los parámetros y la confiabilidad de la relación utilizada. Generalmente las relaciones de magnitud y longitud de Wells y Coppersmith (1994) proporcionan magnitudes muy semejantes a las de Slemmons (1982). La relación entre desplazamiento y magnitud de Slemmons (1982) fue establecida a partir del máximo desplazamiento obtenidos de rupturas históricas. En general cuando una falla rompe la superficie, el máximo desplazamiento vertical y horizontal ocurren en diferentes partes de la traza. El desplazamiento promedio es calculado por medidas múltiples a lo largo de la zona de ruptura. En la mayoría de los terremotos, los desplazamientos máximos típicamente ocurren en solo una parte limitada de la zona y por eso preferimos la relación

entre magnitud y desplazamiento promedio. Pero, utilizando una cantidad limitada de medidas del desplazamiento no resulta en un desplazamiento promedio muy confiable. Preferimos las relaciones de Wells y Coppersmith (1994) por su metodología de calcular el desplazamiento promedio a partir de un mínimo de 10 medidas del desplazamiento para cada ruptura.

4.2.1 Falla Navarro. Por la falla Navarro tenemos dos modelos preferidos de fallamiento: (1) la falla entera de 30 km de longitud, y (2) un modelo de segmentos de 10 a 15 km de longitud (utilizamos 12 km en el cálculo). Por la relación entre longitud y magnitud, la magnitud máxima es de 6,4 a 6,8. Utilizando las relaciones de Wyss (1979) y Wells y Coppersmith (1994) entre magnitud y área de ruptura y una profundidad sismogénica de 10 a 15 km, que está basada en la sismicidad observada, las magnitudes son 6.1 a 6.7 y son muy similares a las estimadas de la relación entre magnitud y longitud. Los desplazamientos máximos son 0,3 m a 1,0 m y los promedios son 0,2 m y 0,5 m para los modelos segmentado y entero respectivamente, utilizando la relación de Wells y Coppersmith (1994). A nuestro juicio profesional, somos de la opinión que la falla Navarro no romperá entera de una sola vez. Si su evento característico es de romper totalmente cada vez, esperaríamos encontrar mayor evidencia geomorfológica y geológica que mostrara desplazamientos mayores y acumulados.

Hay dos maneras para aplicar los desplazamientos en una falla de rumbo. Generalmente hay una componente vertical además de la componente lateral. En un extremo todo el desplazamiento es horizontal, en este caso 0,2 a 0,5 m/evento. La otra posibilidad extrema es si las componentes horizontal y vertical son iguales (1:1). Si la componente vertical de la falla es mayor, no sería una falla de rumbo. Entonces, un desplazamiento de 1:1 (H:V) produciría el máximo desplazamiento vertical. En el caso de la falla Navarro sería entre 0,14 m vertical y horizontal hasta 0,35 m vertical y horizontal.

4.2.2 Fallas Coris y Agua Caliente. Para la falla Coris estimamos una magnitud máxima de 6,3. Utilizando las relaciones empíricas entre magnitud y área de ruptura con una área de 150 km², la magnitud es 6,2. Los desplazamientos son 0,2 m máximo y un promedio de 0,1 m. Si todo el desplazamiento es horizontal, el desplazamiento esperado es 0,1 m a 0,2 m. Basado en la evidencia en las trincheras, existe una componente vertical. La componente puede cambiar localmente si el rumbo de la falla cambia o los depósitos fallados no son muy

homogénea. En el caso de 1:1 (H:V), la falla Coris puede tener un desplazamiento de 0,07 m vertical y horizontal hasta 0,14 m vertical y horizontal (lo máximo vertical si la falla es tipo de rumbo).

La magnitud máxima para la falla Agua Caliente es estimada en 6,5. Las relaciones empíricas usando el área de ruptura (240 km²) dan una magnitud de 6,4. Los desplazamientos son 0,4 m máximo y un promedio de 0,2 m. Si todo el desplazamiento es horizontal, el desplazamiento es 0,2 m a 0,4 m. Basado en la evidencia en las trincheras, existe una componente vertical bastante fuerte. El componente puede cambiar localmente si el rumbo de la falla cambia o los depósitos fallados no son muy homogéneos. En el caso de 1:1 (H:V), la falla Agua Caliente puede tener un desplazamiento de 0,14 m vertical y horizontal hasta 0,3 m vertical y horizontal (lo máximo vertical si la falla es de rumbo).