

Reconocimiento y Análisis estructural de fallas potencialmente activas: Caso de estudio, Falla Río Cachil, Baja Verapaz, Guatemala

Structural recognition and analysis of potentially active faults: Case study, Río Cachil Fault, Baja Verapaz, Guatemala

Sergio David Morán Ical ⁽¹⁾ Luis Chiquín M. ⁽¹⁾ Luis A. Godoy ⁽¹⁾

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología. Finca Sachamach, Cobán Alta Verapaz. Guatemala ⁽¹⁾

Email: sergiomical@yahoo.com

RESUMEN

La zona de falla de Cuilco-Chixoy-Polochic (ZFP), conforma una serie de fallas de cinemática lateral izquierda, que atraviesa de E-W el territorio de Guatemala. Geomorfológicamente se ha generado una depresión tectónica, ocupada por el lago de Izabal, donde desemboca el río Polochic y separa las sierras de la Minas y la de Santa Cruz, al norte. En su extremo oeste, limita con las Tierras Altas de los Cuchumatanes y la cadena volcánica del sur, por ejemplo, el volcán Tacaná.

La ZFP, en su parte intermedia, se ha desarrollado una estructura de dominio frágil, que define una estructura dúplex de una longitud de ± 115 km y ancho ± 21 km que se considera como transpresiva, donde bloque litológicos tales como el Grupo Santa Rosa y formaciones Chochal, Todos Santos, Cobán y peridotitas son afectadas. A lo largo de ella, se han dado importantes eventos sísmicos, por ejemplo: evento del 11 octubre de 1985, cuya fuente fue localizado en Uspantán, Quiché, con una magnitud de 5,0 y profundidad de 5 km. Del registro sísmico, es evidente, la frecuente agrupación de una serie de nubes de puntos que refieren a epicentros, que si se contrastan con un mapa de rasgos estructurales (lineamientos), surge la duda de conocer cuáles son activos.

A partir del programa IGeoES y el *Proyecto Sobre La Evaluación De Las Amenazas Naturales En Escuelas Públicas*, principalmente en la escuela de la comunidad de Llano Largo, Baja Verapaz, se ha identificado una estructura que conforma el borde sur, de un alto estructural, con evidencia de actividad sísmica y creación de grietas en dirección N60-80W/75NE. Por la morfología y arreglo el sistema de grietas observadas en la pared de las viviendas, pueden asociarse a un esfuerzo por flexión, mecanismo que sugiere un levantamiento y reacomodamiento del terreno, debido a una deformación transpresiva. La actividad sísmica reciente como del año 2019, de magnitud 3,8 y profundidad 13,2 km se ha asociado a la falla del "Río Cachil" reactivada durante el sismo de 1976, donde las fracturas se dieron a lo largo de un desnivel de ± 2 m de altura de los depósitos superficiales (coluvios).

Palabras clave: Falla Cuilco-Chixoy-Polochic, sismo, grietas, transpresiva

ABSTRACT

The Cuilco-Chixoy-Polochic fault zone (ZFP) is a series of left-lateral kinematic faults, which crosses the territory of Guatemala from E-W. Geomorphologically, a tectonic depression has been generated, occupied by the Izabal Lake, where the Polochic river flows and separates the Sierra de las Minas and Santa Cruz to the north.

At its western end, it borders the Cuchumatanes Highlands and the volcanic chain to the south, for example, the Tacaná volcano.

The ZFP, in its intermediate part, has developed a fragile domain structure, which defines a duplex structure with a length of ± 115 km and width ± 21 km that is considered as transpressive, where lithological blocks such as the Santa Rosa Group and Chochal, Todos Santos, Cobán and peridotite formations are affected.

Along it, there have been important seismic events, for example: the event of October 11, 1985, whose source was located in Uspantán, Quiché, with a magnitude of 5.0 and a depth of 5 km. From the seismic record, it is evident, the frequent grouping of a series of clouds of points that refer to epicenters, that if they are contrasted with a map of structural features (lineaments), the doubt arises to know which are active.

From the IGeoES Program and the Project on The Evaluation Of Natural Hazards In Public Schools, mainly in the school of the community of Llano Largo, Baja Verapaz, a structure has been identified that forms the southern edge of a structural high, with evidence of seismic activity and creation of cracks in the direction of N60-80W/75NE. Due to the morphology and arrangement of the crack system observed in the wall of the houses, they can be associated to a bending stress, a mechanism that suggests a ground uplift and rearrangement, due to a transpressive deformation. Recent seismic activity such as in 2019, magnitude 3,8 and depth 13,2 km has been associated with the "Río Cachil" fault reactivated during the 1976 earthquake, where fractures occurred along a ± 2 m height difference of the superficial deposits (colluvium).

Key words: Cuilco-Chixoy-Polochic fault; earthquake, cracks, transpressional

Introducción

Dentro del territorio de Guatemala existen segmentos de fallas muy evidentes geomorfológicamente, tales como las fallas de Chixoy-Polochic, Ixcán, Motagua, Jocotán-Chamelecón y Jalpatagua, con actividad sísmica ligada. La base y registro sísmico provenientes de las agencias sísmicas locales, sugieren la existencia de otros segmentos de fallas secundarias con la potencial liberación repentina de energía para considerarlas como fallas activas. Esta actividad sísmica muy superficial y de forma aislada a estas estructuras mayores.

La magnitud de estos sismos, aunque ≤ 5 en la escala de Richter, pero muy someras (≤ 10 km de profundidad), pueden causar daños sustanciales a la infraestructura (viviendas, carreteras, etc) en el sitio donde se libera esta energía y/o a lo largo de la traza de falla. En muchos casos estos rasgos estructurales, sus indicadores geomorfológicos y de desplazamiento no son tan evidentes o relevantes, y por lo tanto pueden pasar desapercibidos para considerarlas como fallas activas.

Con la información digital existente y la utilización de los medios de comunicación principalmente las “redes sociales” permiten analizar, aunque de forma indirecta los procesos naturales y sus efectos en un determinado sitio, según la narrativa de los usuarios. Esta actividad de crear y compartir información, permite al interesado (investigador) sustentar y contrastar los datos de indicadores recabados en el campo, tal como se ha realizado con el caso aquí planteado.

Por lo tanto, se aborda los aspectos litológicos y estructurales, así como el reconocimiento de lineamientos local, indicadores geomorfológicos y se considera el registro sísmico, principalmente del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) especialmente para el área ubicado en la parte alta de microcuenca del río Cachil, Baja Verapaz, con la finalidad analizar la actividad sísmica e indicadores de deformación recientes a lo largo de una lineamiento estructural que se ha nombrado como “Falla Río Cachil”.

Metodología

En la etapa de planeación (antes de la visita) se han consultado diferentes fuentes de información tanto digital (modelos de elevación digital, fotografías aéreas) como mapas topográficos impresos, generando el mapa de lineamientos estructurales; con el objeto de crear un escenario geológico de la localidad. El contexto geológico regional de Llano Largo, se obtuvo a partir de los mapas geológicos realizado por la Carrera de Geología, mapas geológicos existentes a escala regional. La información geológica local fue a partir de nuestras observaciones sobre las características litológicas de las unidades, así como de sus estructuras.

Durante la visita de campo, se inspeccionaron los sitios críticos, así como la toma de datos litológicos y estructurales, indicadores de movimiento (toma de datos de grietas, dimensiones, desplazamientos, etc.), con el acompañamiento de los comunitarios de la aldea Llano Largo, del municipio de Salamá, departamento de Baja Verapaz. Las reuniones sostenidas con las autoridades locales y personal de la escuela oficial mixta (EORM) Llano Largo, permitió crear un escenario posible sobre la problemática, que en este caso fueron la ocurrencia de grietas en la infraestructura escolar y ocurrencia de “retumbos”.

La vivencia o experiencia de los comunitarios ante la actividad sísmica local y sus efectos, genero la necesidad en la verificación de información brindada, utilizando tanto la información registrada por las agencias sísmicas locales y, por otra parte, los comentarios compartidos en las redes sociales ante el evento del 25 de septiembre del 2019.

Finalmente, se realizó mediante Dron, el levantamiento topográfico, y el producto derivado del post proceso (ortofotogrametría), fueron curvas de nivel a cada 20 cm, 1 m y 5 m, lo que permitió afinar o tener con mayor detalle el relieve del terreno, muy útil para caracterización geomorfológica.

Resultados

1. Geología regional

Desde el contexto lito-estratigráfico, es importante recalcar que, hacia el norte de la comunidad de Llano Largo, encontramos la unidad ofiolítica (roca ígnea ultramáfica) nombrada como de Baja Verapaz (π , Figura 2), circunscritas a las formaciones Todos Santos (JKTs), Cobán y Campur (Ksd).

Inmediato al límite de la unidad ofiolítica, aflora en contacto tectónico, una franja angosta de caliza asignada en parte a la formación Cobán y Campur (Ksd, Figura 1). Al sur se encuentra una secuencia clástica asignada a la formación Todos Santos (JKts). Esta unidad, aunque adjudicada a la Formación Todos Santos, parecen ser más antiguas que al Jurásico (JKts). El contacto entre estos bloques litológicos es de tipo tectónico, es decir marcado por fallas inversas que buzcan al noreste, en ángulo bajos. estas tanto clásticas como calcáreas respectivamente.

Tres unidades de roca y una de depósitos superficiales sobresalen al sur, correspondientes uno al Complejo Chuacús, compuesto de esquistos-mármoles y ortogneis polideformados, y la otra, de roca ígnea. Para la roca granítica (I), podemos dividirlas en lo que es el Granito Rabinal y el otro, granito Matanzas ubicado al este (Figura 1). Para lo que se ha considerado como CPsr (Figura 1), en gran parte estas rocas metasedimentarias, son consideradas actualmente como de edad Cámbrico-Ordovícico, por la relación litoestratigráfica que tiene con el granito Rabinal que se han considerado como roca caja de esta unidad ígnea de edad Ordovícico temprano (Maldonado et al 2016).

Por otra parte, las rocas identificadas como Pzm (Figura 1), son nombradas como Complejo Chuacús que incluyen una variedad de rocas tanto de protolito ígneo como sedimentario, de edades muy variadas.

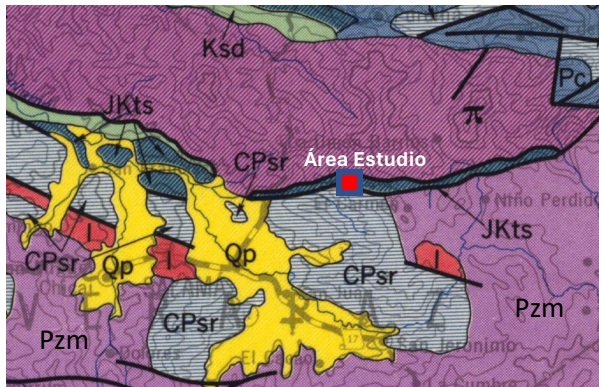


Figura 1: Contexto geológico regional. Rasgos estructurales y litológicos dentro del contexto del área de la comunidad de Llano Largo (recuadro amarillo y rojo). Simbología: CPsr (Carbonífero-Pérmico, rocas clásticas atribuidas al Grupo Santa Rosa), JKts (Jurásico-Cretácico, rocas clásticas, asignadas a la Formación Todos Santos), Ksd (Cretácico sin dividir, incluye calizas), I (cuerpos ígneos) y Qp (Cuaternario, cubierta volcánica).

El área se ubica dentro de dos sistemas de fallas de tendencia este-oeste, como la zona de falla del Motagua y de Chixoy-Polochic, ubicados tanto a sur como al norte, respectivamente (Figura 1). Varios sistemas de lineamientos fueron identificados mediante modelo de elevación digital e imágenes digitales, tales como la fotografía aérea tomada por medio del dron. patrones con tendencia NW-SE y NE-SW y algunos E-W, se encuentra subordinados al sistema de falla de Chixoy –Polochic. Muchos de estos planos de fallas, favorecer a la ocurrencia de movimiento de ladera.

2. Geología Local

a) Lito-estratigrafía.

La geología de sitio, está compuesta por la presencia de rocas ígneas, metamórficas de bajo grado y sedimentarias.

Con respecto a la roca ígnea, se refiere específicamente a materiales del manto oceánico, identificadas como peridotita, ubicada al norte de la comunidad de Llano Largo, donde presenta un relieve muy abrupto a escarpado. La peridotita es una roca ígnea plutónica de color verde a verde oscuro formada por lo general de olivino, acompañados de piroxenos y anfíboles. En zonas donde la meteorización es efectiva, desarrollan suelos amarillentos a rojizos. Muchas veces estos horizontes de suelo son de tipo laterítico.

En su mayor parte la peridotita se encuentra muy fracturada, y en parte foliada, debido a bandas de cizalla (Figura 2).

Una secuencia de rocas calcáreas, es encontrada en contacto fallado con las peridotitas (π) en su límite norte. Patrones de estratificación poseen una orientación de N60W/30NE. Estas rocas pueden clasificarse como caliza cristalina a caliza dolomítica, de estratos de 20 cm a 50 cm de espesor. Los colores van de gris claro a gris oscuro, compuesto principalmente de calcita de cristales de tamaño medio a fino (caliza cristalina).

Mayormente, esta franja angosta de caliza, se ubica al norte de los ríos Cachil y Salamá, al oeste.

Su límite sur está marcado por la ocurrencia de una falla de tendencia NW-SE, y pone en contacto con una secuencia de rocas metamórfica de bajo grado, de característica clástica (metasedimentaria).

La unidad compuesta por niveles de cuarcitas y filitas a filitas pizarrosas que afloran al sur del río

Cachil y posee planos de foliación con tendencia NW-SE, inclinadas tanto al sur como norte (Figura 2). La foliación en la unidad metamórfica, muestra patrones preferenciales de N60W/55SW.

Los depósitos superficiales recientes están constituidos por coluvios (Figura 6), costra de caliche y pómez (piroclastos volcánicos) de ≤ 2 mm de las partículas de vidrio volcánico, que se produce por la fragmentación del magma que es transportada por el viento a grandes distancias (Figura 6)



b) Geología estructural

A lo largo de la rivera o ambas laderas del valle del río Cachil, en la rivera norte, cuyo valle posee un fuerte control estructural, es decir, por discontinuidades geológicas. Se ha realizado breve análisis de los rasgos estructurales (lineamientos), denotando primeramente patrones con dirección N60-75E, N65W y por ultimo E-W.

Las fallas N65E, son de las estructuras con mayor influencia, donde las demás fracturas parecen subordinadas, guardando cierta configuración geométrica del modelo de fractura tipo Riedel. Basado en los ambientes tectónicos con influencia en la zona de estudio, principalmente denotan la ocurrencia de fallas de rumbo, que caracterizan la tectónica transcurrente (falla del Polochic), con actividad sísmica ligada.

Adicional a estos rasgos (lineamientos) cartografiados a partir de imágenes digitales, tenemos a nivel de afloramiento la ocurrencia de

discontinuidades que van de centímetros a métricas de longitud dentro de las unidades litológicas (Figura 7).

- fracturas en los depósitos superficiales.

Se llevó a cabo una visita a sitios puntuales donde los comunitarios reconocen que ocurrió el proceso de agrietamiento en el suelo. Basados en la ubicación y observaciones desde el punto de vista geológico, se procedió a la caracterización del sitio. Adicional a esto, se visitó las instalaciones (infraestructura) de la escuela. Rasgos de grietas se pueden aun observar en paredes y plataformas de concreto, ya que la etapa de remozamiento realizado a la infraestructura después de la ocurrencia de las grietas, fueron rellenadas de cemento. En dicho establecimiento se han identificado por lo menos dos sistemas con direcciones NE-SW y NNE-SEE. Las configuraciones de cada patrón de grietas, muestran arreglo en échelon, refieren cizalla de movimiento inverso, sugiriendo levantamiento del bloque noreste hacia el suroeste.

Además, se han medido estructuras extensionales como algunas grietas presentes en el suelo, como el ubicado en la coordenada E795854 / N1676584. En la propiedad de doña María Dolores Ortega y Elías Enríquez, aledaño a escuela, los planos tienen una orientación de 75/N190 y se encuentran cortando una costra de caliche (Figura 8)



Figura 3. Características del patrón de fracturamiento dentro de la costra de caliche. Fracturas con aberturas que van desde los 2, 14 y 20cm, por ejemplo, fotografía a la izquierda. Dicha grieta se encuentra rellena de suelo orgánico.

Discusión

1) Procesos geológicos

- Registro actividad sísmica regional

En este caso no enfocaremos sobre un segmento de la falla de Chixoy-Polochic, cubriendo un área que inicia desde la localidad de Cunén (al oeste), extendiéndose al este, hasta las localidades de Tukurú y la Tinta (Figura 4). En la parte central de la falla de Chixoy-Polochic, se han registrado una serie de actividad sísmica, esto supone segmentos de fallas activas donde la ubicación espacial de los epicentros da una idea sobre las trazas de fallas potenciales para estudiar indicadores de desplazamiento.

A la escala con que se tienen editado la base topográfica o geomorfológica de Guatemala, estos indicadores pasan muchas veces desapercibidos.

En todo su contexto varios rasgos estructurales que constituyen la zona de falla de Chixoy-Polochic (Figura 4), según su arreglo y cinemática, conforman una estructura dúplex en transpresión (*flor positiva*), cuyos límites

aproximados pueden considerarse desde las localidades de Cunén al oeste y Tukurú-La Tinta, en su extremo este. Su extensión tanto al sur como al norte, pueden limitarse desde las localidades de San Cristóbal Verapaz, Cachil y Chitomax (Figura 4).

Se han localizado algunos epicentros, que ayudan a visualizar sitios donde se tienen importante

liberación de energía, cercanas a traza principal. Algunos de los eventos muy someros o superficiales con magnitudes ≤ 5 en la escala de Richter, ocurrieron cercanas a Uspantán en el año 1985, de magnitud 5 Ms, y 5 km profundidad (INSIVUMEH, 2016). El otro, en el municipio de Tukurú en el año 1995, sismo de magnitud $M_w = 5,3$ y profundidad de 15 Km.

Se localizó el área y la traza de falla objeto de estudio donde se ubica la localidad de Llano Largo, cercano a las localidades de Cachil, La Unión Barrios y Niño Perdido (Figura 4)

- Evento sísmico local de 25-09-2019

Junto a la información recabada con los pobladores y personal docente de la escuela Llano Largo, se llevó a cabo una revisión sobre el evento del 25 de septiembre de 2019, utilizando tanto las redes sociales y la base sismológica del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) e Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (Ineter), así como el del Servicio Sismológico de Guatemala (UMG). Los parámetros calculados para el evento sísmico del 25 de septiembre a las 5:58 horas al noreste de Salamá, Baja Verapaz, por dichas agencias sísmicas, se listan en la tabla 1.

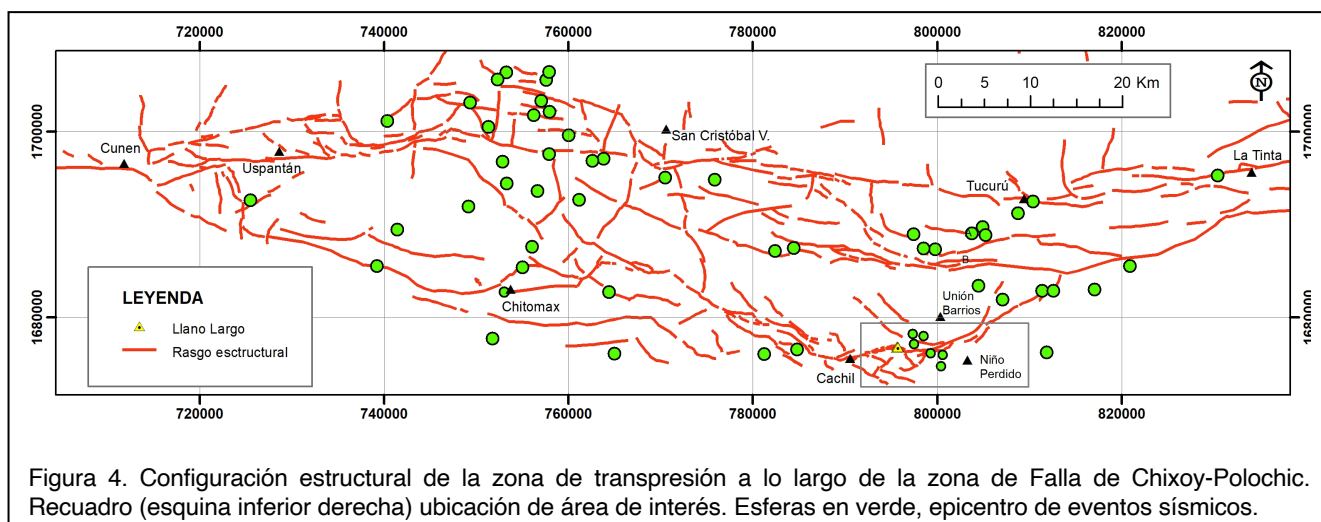


Tabla 1. Parámetros sísmicos de eventos de septiembre 2019, reportada por las agencias.

Fecha	Magnitud	Profundidad km	Institución
25 septiembre 2019	3.8	13.2	Insivumeh
	3.4	1.0	INETER
	3.43	10.8	UGM
28 septiembre 2019	3.7	13.0	Insivumeh
	2.73	11.912	UGM

Según los relatos de los comunitarios y autoridades de la escuela oficial rural mixta (EORM) Llano Largo, el 25 de septiembre el problema de las grietas inicia con la ocurrencia de “retumbos” y movimiento del terreno (sacudidas). Indican que los “retumbos” provienen del lado este o donde se ubica el cerro San Vicente (al sureste de la comunidad). La actividad sísmica, aunque en menor percepción continuo en los años 2020, 2021 y 2022.

- Evidencias de actividad tectónica Cuaternaria

a) Anomalías del drenaje superficial.

El análisis muestra que existe un punto de referencia donde puede observarse tanto un desplazamiento del río Las Flautas, así como del valle donde se asientan las comunidades de La Unión Barrios y Niño Perdido, ambos poblados pertenecientes al departamento de Baja Verapaz. Se ha calculado un desplazamiento de $\pm 0,387$ km en sentido sinistral del río Las Flautas. Esta misma anomalía parece haber afectado el río Sinanjá ubicado al este (Figura 5).

Evidencias geomorfológicas y sedimentológicas identificadas por Gilles B, y otros 2012, sugieren que estos valles eran continuos y pertenecientes antiguamente al río Cahabón, que drenaba desde las partes altas de la sierra de Chuacús, hacia el norte. En este punto se ha considerado como un significativo sitio con anomalía del drenaje y divisoria de cuencas, ya que ocurre un importante cambio en el sentido del drenaje, que actualmente es hacia el sur, para el río Las Flautas (Figura 5).

b) Falla del Río Cachil

El río Cachil y sus tributarios modelan y configuran la Montaña Quisis, que se eleva 2 348 msnm, cuya configuración está influenciada tanto por la litología como de las estructuras geológicas. Una importante estructura con dirección NE-SW a E-W divide la anterior montaña con otros altos topográficos al sur conocidos como cerros La Laguna (1500 msnm) y San Vicente (2000 msnm), esta última ubicada al sureste de la comunidad de Llano Largo. El río Cachil que discurre de este a oeste, que confluye al oeste con el río Salamá, cuyo valle de marcado control estructural con dirección E-W nombrado en este trabajo como “falla Río Cachil”, pone en contacto rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias, y de importante actividad neotectónica (Figura 5).

Se considera como evidencia de deformación reciente, lo que indica don Elías Enríquez. Durante el sismo del 4 de febrero de 1976 (hace 48 años) se creó una grieta que atravesó su propiedad. En nuestra visita se verificó la presencia de dicha falla teniendo aproximadamente un desnivel de $\pm 2,0$ m, y un levantamiento relativo hacia el sur (Figura 6). Este rasgo en escalón posee una dirección de N120 y afectan depósitos de grava y bloques donde los bloques están unidos por cemento calcáreo (caliche), continuando al oeste donde las

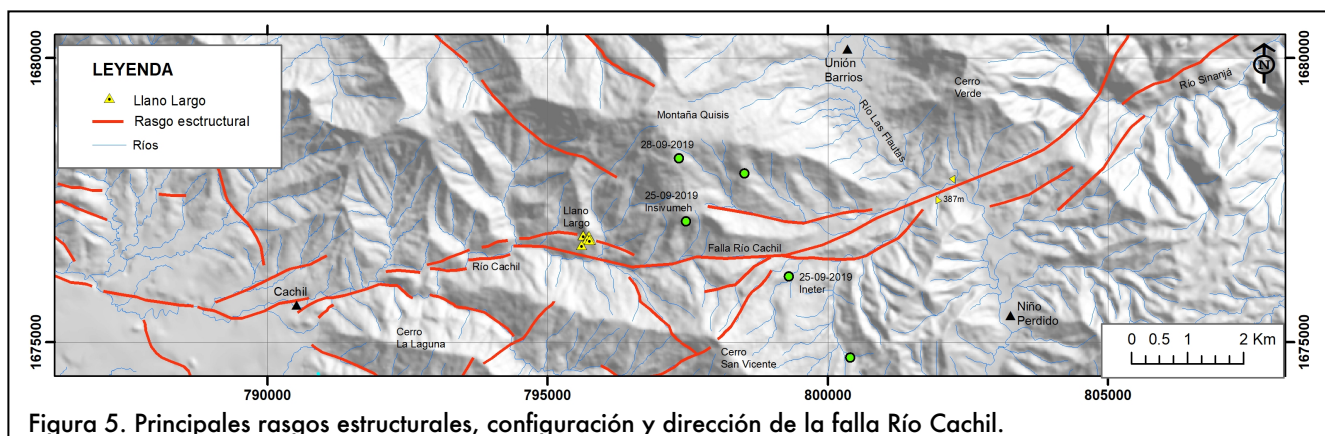


Figura 5. Principales rasgos estructurales, configuración y dirección de la falla Río Cachil.

grietas se prolongaron para el evento de septiembre de 2019 (Figura 7).



Figura 6. Escarpe o escalón de falla cortando coluvios con matriz calcárea, comunidad Llano Largo, Salamá B.V. Vista al noroeste.

c) *otros rasgos geomorfológicos.*

Nos referimos a un movimiento de ladera antiguo (Paleodeslizamiento), donde se ubica la escuela oficial rural mixta (EORM) Llano Largo y parte de la comunidad (Figura 7). Los indicadores van desde el punto de vista litológico y geomorfológico. Desde el punto de vista litológico, con la presencia de coluvios, los cuales son un tipo de depósito no

consolidado compuesto de bloques métricos de roca (peridotitas, calizas) dentro de una matriz de suelo. El depósito de mayor tamaño se ubica dentro del área que cubre la escuela, iglesia, centro de convergencia y otras viviendas de la comunidad de Llano Largo.

El arreglo litoestratigráfico interpretado, sugiere dos niveles de coluvios: un nivel inferior compuesto de bloques de caliza y peridotita dentro de una matriz de caliche muy compacta, probablemente corresponda a antiguo depósito de avalancha, y el nivel superior no consolidado, de bloques de caliza y peridotita, con matriz de lodo o suelo arcilloso. En la parte superior de estos depósitos, se encuentra un horizonte de aproximadamente 3 m de espesor de ceniza volcánica. Este horizonte de depósitos piroclásticos probablemente corresponda a la super-erupción de Los Chocoyos (LCY), ocurrido hace 75 ± 2 ka (Cisneros de León, A., y otros, 2021).

Por sus características, todos los elementos observados en puntos específicos durante la fase de Otro tipo de movimiento de ladera (ML), corresponden a caída de bloques los cuales se originan desde una altura de 1415 msnm y se encuentran hasta las cotas bajas a 1 005 msnm (riberas del río Cachil). Desde la parte geomorfológica, para su delimitación y configuración fue, en base al mapa topográfico y modelo de

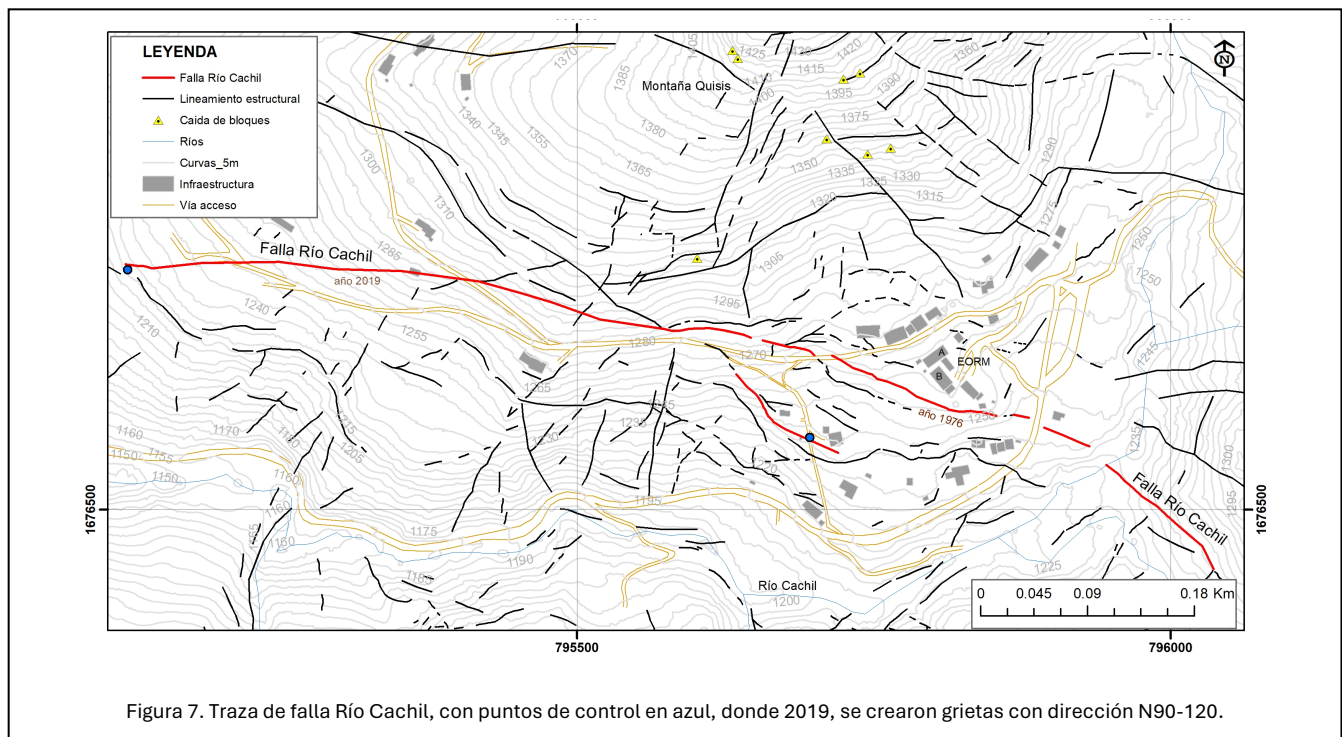


Figura 7. Traza de falla Río Cachil, con puntos de control en azul, donde 2019, se crearon grietas con dirección N90-120.

sombras obtenido del levantamiento con Dron. Varias cicatrices o escalones en media luna, sugieren que la superficie del terreno experimento en el pasado (Figura 7), procesos de erosión que han provocado sucesivos deslizamientos a partir de uno más antiguo (evidenciando reactivación).

2) Patología de la construcción

Nos referimos principalmente a la patología de tipo mecánica (grietas, deformación), que fueron documentadas dentro de la infraestructura escolar o viviendas.

- Geometría y arreglo de grietas.

Un sistema muy marcado de grietas se ha desarrollado a partir de los eventos sísmicos, además de cierto reacomodo de la superficie del terreno, ocurridos dentro de la comunidad de Llano Largo (Figura 8). Se han evaluado y caracterizado la morfología y geometría de estas estructuras aun evidentes, ya que en mayo del 2023 se terminaron los trabajos de remozamiento y cubrieron en parte estos rasgos. Se ha reconocido que estas estructuras se disponen en arreglos verticales (Figura 8a) y otras a 45° o 70° (Figura 8b) en las paredes de los módulos A y B de la escuela oficial rural mixta (EORM) Llano Largo (Figura 8).

Se observó un arreglo para un grupo en escalón (echelon), creadas por cizalla y otro grupo, dispuesto de forma vertical, originados por tensión. Los primeros arreglos parecen tener ángulos entre 70° - 60° , 45° y 30° , con respecto a la horizontal. La pared de la infraestructura, como plano de referencia, se observa que ocurren dos patrones de grietas de cizalla en sus extremos y constatamos que las verticales (tensión) frecuentemente suceden en la parte central. Por lo regular solo afectan el primer metro y medio (1,5 m) de la base de la construcción y afectan principalmente el tramo de block (Figura 8).

Por otra parte, se tienen algunos desajustes y desplazamiento del piso de concreto de las viviendas y módulos escolar. Ambos módulos según se constatan y narran las autoridades, han sufrido desniveles debido a la deformación del terreno. Uno de ellos, muestra un desnivel de 7cm, con una caída hacia el sureste (Figura 8a). Justo en el sitio de dicho desnivel es característico las grietas verticales. Parece ser que este problema sobre las grietas, viene dándose desde los años 90s, como lo muestra

la figura 8c, donde la pared presenta una grieta en échelon (Figura 14).



Figura 8. Características y disposición de patrones de grietas en paredes de los módulos A y B. 8a) Vista al noreste de pared con grietas verticales y desnivel con caída hacia el sureste. 8b) Grieta a 70° con abertura de 2cm. 8c) Panorámica módulo "A" de los años 90s, donde la infraestructura muestra grieta. (Tomado de Grifos 7.0, Mineduc).

- Modelo conceptual.

En la naturaleza tanto los materiales rocosos y pruebas mecánicas con “materiales de concreto” se agrietan de similar modo bajo ciertas condiciones. Por lo que utilizaremos el ejemplo de lo que ocurre a una viga de concreto bajo esfuerzo de flexión, para ilustrar el mecanismo para la ocurrencia de los arreglos de grietas. La flexión (Figura 9) se da cuando la fuerza que actúa sobre una superficie tiende a doblarla, pudiéndose considerar como una combinación de compresión (zona de acortamiento) y tracción (zona de alargamiento), afectando la cimentación, columnas, losa y muro o pared.

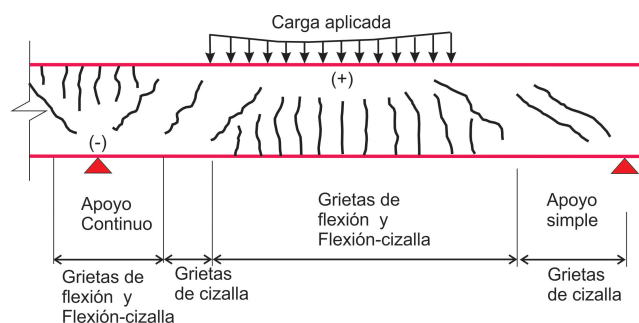


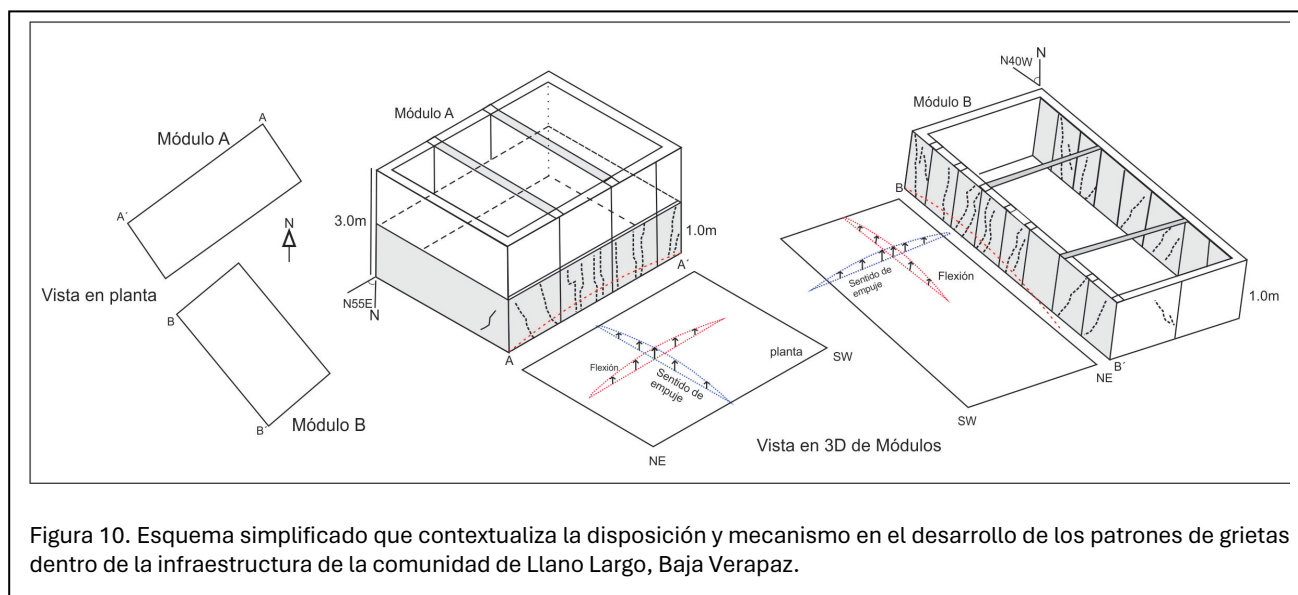
Figura 9. Flexión en viga de concreto para ejemplificar el mecanismo en la ocurrencia de grietas tanto en viviendas como en los módulos de la EORM Llano Largo. Modificado de Chul-goo Kim, et al 2014.

A partir de este proceso de deformación, se crean bajo ciertas condiciones patrones de grietas que se dispondrán en arreglos distintivos si estas deflexiones son positivas (empuje hacia abajo o hundimiento) o negativas (empuje hacia arriba o levantamiento).

Este modelo “esfuerzo por flexión” permite comparar los arreglos y distribución de las grietas observadas para el caso de la comunidad de Llano Largo. Esto sugiere un empuje del terreno hacia arriba debido a falla inversa, asociado a zonas de transpresión en zonas de fallas de rumbo como la que se interpreta para esta porción de la *falla Río Cachil*. Se ha simplificado mediante esquema en 3D la relación entre la flexión (flechas con trayectoria en rojo) y el sentido de empuje para el desarrollo y disposición del sistema de grietas encontrada en las paredes de los módulos de la escuela y sus alrededores (Figura 17). Estas grietas a nivel del área corresponden a reacomodamiento del terreno por deformación tectónica.

Es decir, debido a fallas geológicas locales que transfieren la deformación a lo largo de fallas y que los “retumbos” refieren al momento de la liberación de la energía que se traduce en ondas sísmicas.

Finalmente, evidenciamos mediante esquemas en 3D (Figura 10) que por deformación tectónica transpresiva y por esfuerzo de flexión como el mecanismo en la generación del patrón geométrico de las fracturas en las paredes, muros y columnas de observados en las construcciones. Estudios del subsuelo que incluyan técnicas geofísicas y monitoreo de la deformación del terreno son necesarios para analizar la dispersión de las fallas y tasa de deformación. La presencia de un patrón de fractura asignada al evento sísmico de 1976, sustenta más la propuesta que las grietas ocurridas dentro del sector son el producto de la actividad tectónica reciente (neotectónica) e importante zona en la generación de sismos ≤ 4 en magnitud y que el sentido de propagación de las grietas es hacia el oeste a lo largo de la *falla Río Cachil* asociado al sistema Chixoy-Polochic ubicado a $\pm 18,15$ km, al norte.



Conclusiones

Basados en los relatos de los comunitarios y autoridades de la escuela oficial rural mixta (EORM) Llano Largo y evidencias tanto geológicas como geomorfológicas, apuntan a actividad tectónica.

La actividad sísmica de magnitudes de 3,7 a 3,8 (escala de Richter) del 25 y 28 de septiembre 2019, se encuentra ligado a la “Falla Río Cachil” y por tanto reactivada en 1976, una estructura E-W donde ocurre una importante liberación de energía (*retumbos*) y deformación, que se manifiesta a nivel superficial. El sitio donde los epicentros son ubicados por las agencias sísmicas locales, se ubican al este a $\pm 3,6$ km de la comunidad de Llano Largo, con una importante “zona sismogénica” a ± 13 km de profundidad, para la falla Río Cachil.

El sentido de propagación de la fracturación parece ir hacia el oeste, dirección en la que se encuentra la comunidad de Llano Largo, por lo menos evidentes en 1976 y 2019.

Se cuantificaron por lo menos dos patrones de grietas dentro de la infraestructura escolar, proponiendo preliminarmente un levantamiento del terreno en los sectores del centro de convergencia, iglesia y escuela, que puede relacionarse a esfuerzo de flexión negativa, producto de una deformación transpresiva, basados en la disposición de las grietas en las paredes de las viviendas e infraestructura escolar.

Agradecimientos

Agradecer a la asociación Utz-Ché, por el apoyo y logística en la realización de este estudio en la comunidad de Llano Largo.

A los comunitarios: Mauro Hernández Bachan, Romeo H. Lucas y German Amperes Enríquez, por el acompañamiento en campo, y la apertura en socializar sus conocimientos al respecto del problema existente en su comunidad.

A la Ing. Silvia Trinidad, por el apoyo en la gestión y logística para nuestra visita de campo, así como para el levantamiento topográfico.

A las autoridades de la Escuela de Llano Largo: Nancy Juárez y Claudia Carolina Roja, por brindarnos una amplia información de los problemas ocurridos dentro de las instalaciones.

A don Elías Enríquez y su señora esposa María Dolores Ortega, por brindarnos información sobre los procesos naturales en su comunidad.

Al Insivumeh, a través de Lucrecia Cojolon, Unidad de Información Pública, por la información proporcionada.

Así como al INETER, a través de MSc. Amilcar Cabrera, por haber proporcionado valiosa información sobre el evento sísmico del año 2019.

Referencias

Cisneros de León, Alejandro; Julie C. Schindlbeck-Belo, Steffen Kutterolf, Martin Danisík, Axel K. Schmitt, Armin Freundt, Wendy Pérez, Janet C. Harvey, Kuo-Lung Wang y Hao-Yang Lee. A history of violence: magma incubation, timing and tephra distribution of the Los Chocoyos supereruption (Atitlán Caldera, Guatemala). *JOURNAL OF QUATERNARY SCIENCE* (2021) 36(2) 169–179. ISSN 0267-8179. DOI: 10.1002/jqs.3265.

Brocard, Gilles, Willenbring, Jane, Suski Ricci, Barbara, Audra, Ph Authemayou, Christine, Cosenza-Murales, Beatriz, Morán-Ical, Sergio, Demory, François, Rochette, Pierre, Vennemann, Torsten, Holliger, Klaus, Teyssier, Christian, 2012/05/01. 449 – 507. Rate and processes of river network rearrangement during incipient faulting: The case of the Cahabon River, Guatemala. *VL* - 312, 10.2475/05.2012.01, *American Journal of Science*.

Brocard, Gilles, Teyssier, Christian, Dunlap, Walker, Authemayou, Christine, Simon-Labric, T., Cacao-Chiquín, Eric, Gutiérrez-Orrego, Axel, Morán-Ical, Sergio. 2011/05/18. 631- 651. Reorganization of a deeply incised drainage: Role of deformation, sedimentation and groundwater flow. *VL* - 23, *DO* - 10.1111/j.1365-2117.2011.00510.x, *Basin Research*

Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852, 1981. doi:10.1029/JB086iB04p02825

Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200-201, 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002

G. Ekström, M. Nettles, A.M. Dziewoński, The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volumes 200–201,

2012, Pages 1-9, ISSN 0031-9201, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>.

Instituto Geográfico Nacional (IGN) 1970. Mapa Geológico de la República de Guatemala, escala 1: 500,000. Primera Edición. Impresión Litográfica IGN, mayo 1970.

Kim, Chul-goo & Park, Hong-Gun & Hong, Geonho & Kang, Su-Min & Suh, Jung-Il. (2014). Shear Strength of Prestressed PC-CIP Composite Beams without Vertical Shear Reinforcements. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 26. 533-543. 10.4334/JKCI.2014.26.4.533.

Maldonado, Roberto; Ortega-Gutiérrez, Fernando; Hernández-Urbe, David. Garnet–chloritoid–paragonite metapelite from the Chuacús Complex (Central Guatemala): new evidence for continental subduction in the North America–Caribbean plate boundary. p. 1169-1186, published: Mar 7, 2016 DOI: 10.1127/ejm/2016/0028-2578

Roberto Maldonado, Fernando Ortega-Gutiérrez, Guillermo A. Ortiz-Joya, Subduction of Proterozoic to Late Triassic continental basement in the Guatemala suture zone: A petrological and geochronological study of high-pressure metagranitoids from the Chuacús complex, *Lithos*, Volumes 308–309, 2018, Pages 83-103, ISSN 0024-4937, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.02.030>.

<https://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/indice%20sismo.htm>

<https://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT5/>

