

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra
Guatemalan Journal of Earth Sciences

Volumen/Volume 4

año 2017

Número/Issue 1



Revista anual de la Carrera de Geología de la Universidad de San Carlos de Guatemala

ISSN 2410-728X



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



Volumen 4

Número 1

Año 2017

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

Revista anual de la Carrera de Geología de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Sumario / Contents

- Geoquímica, petrografía y geocronología de las rocas graníticas al noroeste y sureste de la caldera de Quetzaltenango, Guatemala. *Geochemistry, petrography and geochronology of the granitic rocks to the northwest and southeast of Quetzaltenango's caldera, Guatemala.* E. R. Mérida Boogher 5
- Zona de transferencia que conecta un sistema extensional de fallas conjugadas activas segmentadas: implicación en la serie sísmica del año 2011, Santa Rosa, Guatemala. *Connecting transfer zone in a extensional system of conjugated segmented active faults: impact in the seismic series of 2011, Santa Rosa, Guatemala.* S. Morán Ical, L. Ramírez Ba 24
- Evaluación del valor natural de fondo y el umbral crítico en aguas naturales. *Assessment of background and threshold in natural waters.* R. Machorro Sagastume, D. Machorro Sánchez 39

**Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra,
*Guatemalan Journal of Earth Sciences***

vol. 4, núm. / Issue 1, año 2017

ISSN 2410-728X

Equipo Editorial / *Editorial Board:*

Osmín Jared Vásquez Hernández

Sergio David Morán Ical

César Fernando Monterroso Rey

Julio Fernando Avendaño Castro

Portada: Cadena volcánica de Guatemala

Cover: Volcanic chain of Guatemala

Fotografía/*Photo: Rocío Marisol Palacios Castellanos*

GEOQUÍMICA, PETROGRAFÍA Y GEOCRONOLOGÍA DE LAS ROCAS GRANÍTICAS AL NOROESTE Y SURESTE DE LA CALDERA DE QUETZALTENANGO, GUATEMALA

GEOCHEMISTRY, PETROGRAPHY AND GEOCHRONOLOGY OF THE GRANITIC ROCKS TO THE NORTHWEST AND SOUTHEAST OF QUETZALTENANGO'S CALDERA, GUATEMALA

Edgar Roberto Mérida Boogher

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología
Finca Sachamach, Km 210, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.
robertomboogher@gmail.com

RESUMEN

La parte occidental del bloque Chortís, en Guatemala, se compone principalmente de los productos del Arco Volcánico Centroamericano, los cuales cubren el basamento de rocas metamórficas y plutónicas. Estas rocas plutónicas han sido descritas en los alrededores de calderas como Atitlán y Quetzaltenango. En la caldera de Quetzaltenango, afloran al noroeste en Cajolá, y al sureste en Cantel y Zunil. Esta investigación presenta nuevos datos sobre la petrografía y geoquímica de estas rocas, así como de su geocronología por vez primera. Su petrología corresponde a granodioritas de andesina+cuarzo+feldespatos potásico+biotita/anfíbol+ortopiroxeno+ magnetita, las cuales subyacen a flujos riolíticos, andesíticos y depósitos piroclásticos, en contacto discordante erosivo y sin roca caja observable. La geoquímica corresponde a granitoides predominantemente magnesianos, calcalcalinos, metaluminosos a ligeramente peraluminosos, correspondientes a granitoides de Tipo I cordilleranos y caledonianos según Frost et al. (2001). Las anomalías negativas de Ta, Nb y Ti les confieren firma de arco volcánico, asociadas a una zona de subducción. La petrogenesis sugiere procesos de fusión de la corteza, diferenciación por cristalización fraccionada y la interacción con fluidos residuales. La edad, según el análisis de U/Pb en circones, de $12,69 \pm 0,14$ Ma y $22,87 \pm 0,26$ Ma para las granodioritas de Cajolá y Zunil, respectivamente, encuadra estas rocas en el Mioceno. Las edades y características petrográficas sugieren una correlación consistente con las granodioritas del complejo volcánico Tacaná, ubicado 50 km al NW del área, las cuales a su vez son parte del batolito costero de Chiapas.

Palabras clave: granodiorita, cordillerano, Mioceno, Quetzaltenango, subducción.

ABSTRACT

The western part of the Chortís Block, in Guatemala, it's mainly composed by the Central American Volcanic Arc products, which cover the metamorphic and plutonic rocks basement. These plutonic rocks have been described in the outskirts of calderas such as Atitlán and Quetzaltenango. In the Quetzaltenango's caldera, they outcrop to the northwest in Cajolá, and to the southeast in Cantel and Zunil. This research presents new data on the petrography and geochemistry of this rocks, as well from its geochronology for the first time. Their petrology corresponds to andesine+quartz+potassium feldspar+biotite/amphibole+orthopyroxene+magnetite granodiorites, which underlie the riolitic and andesitic flows, and pyroclastic deposits, in an erosive and discordant contact, with no visible host rock. The geochemistry corresponds to predominantly magnesian, calcalcaline, metaluminous to slightly peraluminous granitoides, corresponding to Type I Cordillerian and Caledonian granitoides, according to Frost et al. (2001). The negative anomalies of Ta, Nb and Ti confers them a volcanic arc signature, associated to a subduction zone. The petrogenesis suggests crustal fusion, fractioned crystallization differentiation, and residual fluids interaction processes. The ages from the zircon U/Pb analysis ages, of $12,69 \pm 0,14$ Ma and $22,87 \pm 0,26$ Ma for the Cajolá and Zunil granodiorites, respectively, place this rocks in the Miocene. The ages and petrographic characteristics suggest a consistent correlation with the granodiorites from the Tacaná volcanic complex, located 50 km to the NW from the area, which in turn are part of the Chiapas coastal batholite.

Keywords: granodiorite, cordillerian, Miocene, Quetzaltenango, subduction.

Introducción

La caldera de Quetzaltenango se encuentra al norte del Arco Volcánico Centroamericano, a su paso por el altiplano occidente de Guatemala (Figura 1A). Este arco volcánico es el resultado de la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe (Carr et al, 2003). La caldera se encuentra en el extremo occidental del Bloque Chortís, al sur de las zonas de falla del Motagua y el Polochic, y según Rose, está asentada sobre una corteza con un espesor de entre 40 km y 50 km que puede que incluya rocas Paleozoicas del basamento (Escobar et al., 2010).

La caldera de Quetzaltenango es una estructura volcánica propuesta recientemente, a pesar de que sus alrededores han sido objeto de estudio geológico desde finales del siglo XIX, principalmente los edificios volcánicos (Complejo Santa María-Santiaguito, Complejo Cerro Quemado). Esta estructura, de forma elíptica con 12 km N-S x 25 km E-O y aproximadamente 500 m de profundidad, es parte de una caldera que se extiende más allá de la depresión, hasta 10 km al norte de la misma (Foley et al., 1992). La edad de la caldera, o al menos parte de la misma, estaría en el intervalo de los 84 ka a los 126 ka de antigüedad (Duffield et al., 1993). Esta caldera sería la expresión de la actividad volcánica explosiva de la región, dentro de un campo de esfuerzo extensional, resultado de la intersección de al menos dos ejes regionales mayores, el NW-SE y el NE-SW, así como un eje adicional E-W formado bajo estos campos de esfuerzos (Lima y Palma, 2000). El primero de estos ejes es el Arco Volcánico en sí mismo (Stoiber y Carr, 1973), además de la Falla Cajolá (Gutiérrez, 1977); el segundo es la Zona de Falla de Zunil (Gutiérrez, 1977; Foley et al., 1990), y el tercero es la Falla de Olinstepeque (Gutiérrez, 1977).

La geología del área está plasmada en los mapas publicados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en 1964 y 1991 (Hojas geológicas ND15-7G y 8-G, escala 1:250.000) y en los trabajos de Johns (1975), Gutiérrez (1977), Hughes (1978), Kubota (1981), Rose (1987), Conway et al. (1992), Lima y Palma (2000) y Escobar et al. (2010), compilados en la figura 1B. Las rocas graníticas

presentes en los alrededores de la caldera de Quetzaltenango y sus márgenes son mencionadas y/o descritas por diversos autores. Williams (1960) las menciona como fragmentos líticos presentes en las partes proximales de los depósitos de caída de la erupción de 1902 del volcán Santa María, como un conjunto de líticos plutónicos, compuesto por cuarzo diorita, diorita, cuarzo monzonita, granodiorita y granito. Gutiérrez (1977) menciona que en el escarpe de la falla de Cajolá se encuentra expuesto el basamento plutónico regional elevado, así como en la zona geotérmica de Zunil, en los cauces de los ríos Pachamiyá y Chuyul, afluentes del río Samalá, así como al oeste en la base del cerro Jolom, en Cantel, Quetzaltenango. A partir de los núcleos de perforación de pozos en el campo geotérmico de Zunil, Rose (1987) identificó cuarzo monzonita de hornblenda y biotita cloritizada, observando que el contacto superior de la roca plutónica era aparentemente una superficie meteorizada, por lo que las rocas plutónicas podrían haber estado en la superficie antes de que el vulcanismo del Pleistoceno las cubriera. Kubota (1981) identificó un flujo de riolita del volcán Zunil con un rango de edad de 0,38 Ma a 0,54 Ma que yace discordantemente sobre las rocas graníticas de esta área. García (1990) realizó un análisis petrográfico a núcleos recuperados de la perforación de los pozos Z-19 y Z-20 en el campo geotérmico Zunil II, describe un basamento de granito y un sill de gabro.

En cuanto a estudios de geoquímica, Rose (1987) trabajó con muestras de fragmentos líticos provenientes de los depósitos de las erupciones del volcán Santa María y del evento de Los Chocoyos de la caldera de Atitlán, además de una muestra proveniente de la perforación de un pozo en el campo geotérmico de Zunil, mencionando sus características calcialcalinas y composiciones intermedias. García (1990) realizó el análisis de elementos mayores y elementos traza para siete muestras de los núcleos de la perforación de los pozos Z-19 y Z-20 en el campo Zunil II; las muestras Z-6 y Z-7 fueron clasificadas como gabro y granito, respectivamente. Singer et al. (2013) presentan el análisis de elementos mayores, elementos traza e isótopos de seis

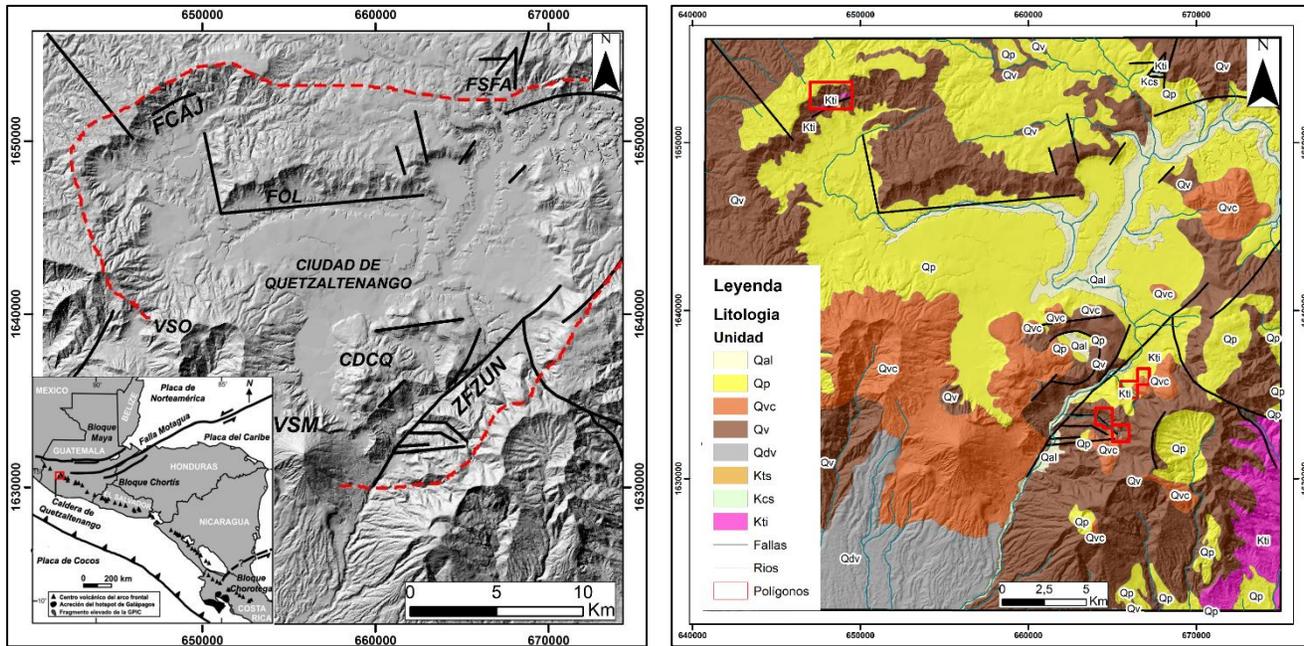


Figura 1. A) Modelo de elevación de la caldera de Quetzaltenango (contorno aproximado en línea discontinua roja) y las estructuras geológicas más relevantes (trazo de fallas en línea sólida negra). ZFZUN = Zona de Falla de Zunil, FCAJ = Falla de Cajolá, FOL = Falla de Olinstepeque, FSFA = Falla de San Francisco el Alto, VSM = Volcán Santa María, VSO = Volcán Siete Orejas, CDCQ = Complejo Dómico Cerro Quemado. Coordenadas UTM, datum WGS 84, zona 15 N. Inserto, ubicación de la caldera de Quetzaltenango en el contexto del arco volcánico centroamericano, modificado a partir de Geldmacher et al. (2008). B) Mapa geológico de la caldera de Quetzaltenango y sus alrededores, con unidades litológicas, fallas y ríos. Las unidades se encuentran ordenadas de forma descendente de la más reciente a la más antigua. Qal: Aluvión; Qp: Rocas Piroclásticas Cuaternarias; Qvc: Complejos Volcánicos y Dómicos Cuaternarios; Qv: Rocas Volcánicas Cuaternarias Indiferenciadas; Qdv: Detritus Volcánico; Kts: Capas Rojas Cretácicas a Terciarias; Kcs: Carbonatos Cretácicos; Kti: Intrusivos Graníticos Cretácicos. Las líneas rojas delimitan los polígonos trabajados durante la investigación.

muestras de diorita y granodiorita de los fragmentos líticos de la erupción de 1902 del volcán Santa María, que sugieren la presencia de una corteza de composición granítica intermedia por debajo del volcán Santa María.

Mérida (2015) describe petrográficamente las rocas graníticas presentes en el río Chuyul, Cantel. Autores como Williams (1960), Gutiérrez (1977), Hughes (1975), Conway et al. (1992) y los mapas geológicos del Instituto Geográfico Nacional asignan una edad Cretácica a Cretácica/Terciaria para las rocas graníticas, sin embargo, ninguno de los estudios disponibles sobre estas rocas presenta algún resultado de ensayos de datación. En este trabajo se presentan nuevas observaciones de campo, análisis petrográficos y geoquímicos, así como edades por el método U/Pb para las rocas graníticas que afloran en Cajolá, Cantel y Zunil, hacia el noroeste y sureste de la caldera de Quetzaltenango,

respectivamente. A partir de dichos resultados, se propone su historia geológica y se relacionan con las rocas graníticas presentes en el Complejo Volcánico Tacaná, ubicado hacia el oeste y perteneciente al batolito costero de Chiapas, México.

Metodología

Muestreo

Se recolectaron muestras provenientes de los afloramientos de rocas graníticas cartografiados en los tres polígonos mostrados en la figura 2, uno en Cajolá (hacia el noroeste de la caldera), y dos en Cantel y Zunil (hacia el sureste de la caldera). Se visitaron los afloramientos trabajados por Mérida (2015) y los encontrados en el trabajo de campo de esta investigación, en base a los mapas geológicos disponibles. En el polígono Cajolá se extrajeron cuatro muestras a lo largo de la carretera que conduce de

Cajolá hacia Sibilia. En el polígono Cantel se extrajeron cinco muestras en el curso del río Chuyul y en la quebrada de la aldea Pasac. En el polígono Zunil se obtuvo una muestra en el curso del río Pachamiyá.

Adicionalmente, se recolectó un fragmento lítico plutónico proveniente de los depósitos piroclásticos de la erupción de 1902 del volcán Santa María, en un afloramiento localizado en el río Cabello de Ángel, municipio de El Palmar, Quetzaltenango. Esto con el objeto de comparar sus características con las rocas extraídas de los tres polígonos mencionados. En total se recolectaron once muestras de rocas graníticas, lo más sanas posibles, de al menos 2 kg de peso cada una, para ser analizadas petrográfica, geoquímica y geocronológicamente.

Petrografía

Las láminas delgadas fueron preparadas manualmente con las máquinas de corte, desgastado y pulido del laboratorio de la carrera de Geología del Centro Universitario del Norte, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, CUNOR-USAC, en Cobán, Alta Verapaz. El microscopio utilizado para el análisis petrográfico fue un Meiji MT9930. A través del conteo de puntos se caracterizó la mineralogía de las muestras, obteniendo sus valores modales y distinguiendo variedades litológicas a través de diagramas de clasificación petrográfica, en este caso la clasificación y nomenclatura de rocas ígneas plutónicas QAPF sugerido por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, IUGS por sus siglas en inglés (Le Bas y Streckeisen, 1991).

Geoquímica

Se enviaron cuatro muestras (una de Cajolá, una de Zunil y dos de Cantel) hacia el laboratorio de Bureau Veritas en Vancouver, Canadá, para ser sometidas al ensayo de litogeoquímica por fusión de roca completa (paquete LF-200) para determinar las concentraciones de los elementos mayores y elementos menores. Para preparar las muestras, estas fueron trituradas, divididas y pulverizadas para obtener 250 gramos de muestra capaz de pasar por la malla 200, de 90 micrómetros de apertura. Posteriormente fueron lavadas con sílice.

Las muestras preparadas se mezclaron con un flujo de metaborato de litio, LiBO_2 , o tetraborato de litio, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Los crisoles se fundieron en un horno. La burbuja enfriada se disolvió en ácido nítrico de grado ACS y se analizó por espectrometría de masa por plasma inducido acoplado (ICP-MS por sus siglas en inglés). La pérdida durante la ignición (LOI por sus siglas en inglés) se determinó al provocar la combustión de un apartado de la muestra y medir la pérdida de peso. Una muestra más, proveniente del polígono Cajolá, fue enviada al Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias, UNAM, en el campus Juriquilla, Querétaro, México. De esta muestra se obtuvieron únicamente las concentraciones de elementos mayores. Los datos obtenidos de ambos laboratorios fueron procesados con el *software* GCD *Toolkit* 4, para el modelado en diagramas de clasificación y el cálculo de los valores en base seca, necesarios para la norma mineral CIPW.

Geocronología

Dos muestras de roca, una proveniente del río Pachamiyá en el polígono Zunil y otra proveniente del polígono Cajolá, fueron enviadas al Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias, UNAM, en el campus Juriquilla, Querétaro, México. Se analizaron a través del método de U/Pb en cristales de zircón, para establecer sus edades en base a un promedio ponderado a partir de los ratios y edades corregidas de cada cristal.

Resultados

Relaciones de campo

A partir del trabajo de campo realizado en cada uno de los polígonos, se identificaron las diferentes exposiciones de rocas graníticas (Figura 3). En el polígono Cajolá, 25 km al NW de los polígonos Cantel y Zunil, estas rocas graníticas son granodioritas que se exponen en diversos afloramientos entre los 2.700 y 3.060 msnm, a lo largo del corte de un tramo carretero de 3 km de longitud que comunica a las poblaciones de Cajolá y Sibilia. El interior fresco deja ver una roca mesocrática, de coloración grisácea a blanquecina. El grado de cristalización es holocristalino y su textura es fanerítica,



Figura 3. Afloramientos de granodiorita. A) Afloramiento de granodiorita meteorizada y poco consolidada, cortada por diques cuarzo-feldespáticos, sección media del polígono Cajolá. B) Granodiorita de la sección baja del polígono Cajolá, de grano grueso, con abundantes cristales de biotita y anfíbol. C) Salto de agua en el río Chuyul sobre granodioritas, polígono Cantel. D) Muestra de granodiorita de dicho salto de agua en el río Chuyul, polígono Cantel. E) Exposición de granodioritas en las murallas de saltos de agua en el río Pachamiyá, polígono Zunil. F) Granodiorita del afloramiento del río Pachamiyá, polígono de Zunil.

el tamaño de grano es medio a grueso (0,1 cm a 1 cm) con abundantes cristales más o menos desarrollados de feldespatos, plagioclasa, cuarzo y biotita.

La secuencia de rocas a lo largo del corte de la carretera también incluye secciones de andesita con intensa alteración hidrotermal (silicificación), así como secciones de cuarcita, en contactos ocultos o fallados. Hacia el sur, la granodiorita está atravesada por dos diques con inclinación y dirección de inclinación 80/N270 y 82/N088. Los contactos fallados visibles son entre la granodiorita poco consolidada y una de las cuarcitas, y otro es con una pequeña sección de rocas volcánicas intermedias, intensamente meteorizadas. El otro contacto visible es entre la granodiorita mencionada y depósitos piroclásticos hacia la base de la secuencia, de forma discordante y erosiva. Los afloramientos de granodiorita dentro del polígono de investigación de Cajolá totalizan una extensión de al menos 300.631 m² (0,300631 km²), lo equivalente al 7,52 % de los 4 km² que el polígono ocupa.

En el polígono Cantel, las rocas graníticas corresponden también a granodioritas que se encuentran en escasos afloramientos. Uno en los alrededores de la aldea Pasac II, y cuatro a lo largo del río Chuyul, entre los 2.330 y los 2.560 msnm. Forman los muros de algunos saltos de agua en las corrientes mencionadas, o bien, se muestran como una gruesa capa de material fragmentado y meteorizado, pudiendo contener algunos bloques decimétricos a métricos contenidos en la misma. Sedimentos y clastos de estas rocas se añaden a las litologías ígneas de los depósitos aluviales del río y el arroyo. Su grado de cristalización es holocristalino, de textura fanerítica de grano medio a grueso (0,1 cm a 2,5 cm) con cristales equigranulares. Son notorios los cristales desarrollados de biotita/anfíbol, feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo. A nivel de afloramiento se observan algunos xenolitos de composición andesítica y textura afanítica. Sobre estas rocas se encuentran discordantemente diversos depósitos piroclásticos, así como secuencias basálticas, cuyos contactos son difíciles de determinar, aunque parecen corresponder tanto a superficies de erosión

como a contactos fallados de tipo normal. Esto se evidencia por los abruptos cambios laterales entre los cuerpos de granodiorita y las otras litologías mencionadas, además de los evidentes escarpes expresados en los muros de los saltos de agua.

Los afloramientos de granodiorita dentro del polígono de investigación de Cantel totalizan una extensión de 14.082 m² (0,014082 km²), lo equivalente al 0,86 % de los 1,635 km² que el polígono ocupa.

En el polígono Zunil se ubicó otro cuerpo de granodiorita. Este cuerpo rocoso se extiende a lo largo del angosto valle fluvial del río Pachamiyá, el cual corre de SE a NO, al este de la aldea Tzanmucubal. Se expone en un par de saltos de agua de difícil acceso, así como en forma de bloques y sedimentos en los depósitos aluviales de la corriente, entre los 2.250 y los 2.320 msnm. Es una roca leucocrática, de coloración blanquecina a rosácea, de grado de cristalización holocristalino. Su textura es fanerítica y el tamaño de sus cristales es mediano a grueso, de 0,1 cm a 1,5 cm de largo. Los cristales tienden a ser equigranulares, con las biotitas, feldespato potásico y plagioclasa bien desarrollados, y el cuarzo microgranular. Este cuerpo rocoso se encuentra cubierto por flujos riolíticos y andesíticos, en contactos discordantes, difíciles de observar por la abundante vegetación que cubre el valle del río Pachamiyá. Los afloramientos de granodiorita dentro del polígono de investigación de Zunil totalizan una extensión de 2.284 m² (0,002284 km²), lo equivalente al 0,23 % de 1 km² que el polígono ocupa.

Petrografía

Se analizaron las láminas delgadas de las once muestras de rocas graníticas de los polígonos Cantel, Zunil y Cajolá, y un fragmento lítico plutónico de la erupción del año 1902 del Volcán Santa María (Figura 4).

De las rocas graníticas de los polígonos de Cantel y de Zunil se seleccionaron cinco y una muestras, respectivamente, para su análisis petrográfico. En lámina delgada analizada bajo el microscopio petrográfico, la mineralogía de las rocas de Cantel consiste de: plagioclasa,

cuarzo, feldespato potásico, biotita/anfibol, sericita, clorita, titanita y zircón. Los cristales de estos minerales forman texturas subidiomórficas inequigranulares.

Las plagioclasas componen el 50 % modal del contenido mineral. Son de tipo andesina (Ab60An40), con maclas polisintéticas. Presentan zonaciones concéntricas y oscilantes. Forman numerosos fenocristales así como agregados policristalinos o glomérulos. Su tamaño va de 1 mm hasta 5 mm. Es común observar cristales que han sido reemplazados a sericita y/o saussurita parcial o totalmente. El cuarzo representa el 25 % de la composición modal. Aparece en forma de agregados policristalinos (glomérulos), englobando a otros minerales como feldespatos, anfíboles y minerales opacos, o bien, en los espacios intersticiales entre los demás minerales. El feldespato potásico es de tipo ortoclasa y constituye un 15 % de la roca. Forma algunas perfitas con las plagioclasas. Las biotitas (5 %) y anfíboles (3 %) son los principales componentes del modal máfico. Aparecen como cristales de entre 1 mm y 5 mm de largo, formando clots de biotita y/o anfíbol. También se presentan como pequeñas inclusiones en los cristales de plagioclasas o bien en glomérulos junto a microcristales de cuarzo en el espacio intersticial de otros cristales. Pueden presentarse alterados a clorita o saussuritizados en algunas muestras. La clorita (verdosa en PPL), junto a los opacos, completa el 2 % restante. Como minerales accesorios aparecen la titanita y el zircón.

En lámina delgada analizada bajo el microscopio petrográfico, la mineralogía de la muestra correspondiente al polígono de Zunil es bastante similar a la de Cantel, con algunas variaciones en los porcentajes de abundancia de los minerales. La textura también es subidiomórfica e inequigranular. Las plagioclasas (50 %) son también de tipo andesina, Ab65An35 aproximadamente. Sus maclas son polisintéticas y también se observan zonaciones concéntricas y oscilantes. La mayoría de los cristales se muestran limpios, sin rastros de sericita, y también forman agregados policristalinos. El feldespato potásico es más abundante (25 %), de tipo ortoclasa. Sus cristales, anhedrales a

subhedrales, no presentan maclas, sólo algunas inclusiones de cuarzo. El cuarzo (20 %) se presenta con extinción ondulante, como cristales anhedrales, por lo general en agregados policristalinos, cristales que engloban a otros minerales, o bien, en los espacios intersticiales. Las biotitas (3 %) son los principales componentes del modal máfico. Anfíboles y opacos completan el 2 % restante. La biotita y el anfíbol también forman clots.

De las rocas graníticas del polígono Cajolá se seleccionaron cuatro muestras para su análisis petrográfico. En lámina delgada se aprecian plagioclasas, feldespato potásico, cuarzo, biotita/anfíbol, clorita, sericita y opacos. La textura es fanerítica, subidiomorfa inequigranular. Las

plagioclasas (50 %) son de tipo andesina, con composición Ab55An45 aproximadamente. Los cristales, de entre 1 mm y 5 mm de largo, muestran algunas maclas polisintéticas y una intensa alteración a sericita. Los fenocristales tienden a agruparse en glomérulos (agregados policristalinos). El feldespato potásico es ortoclasa (20 %), alterado a sericita en algunos casos, suele incluir a cristales de plagioclasa. El cuarzo (20 %) aparece en cristales poco desarrollados y aislados, no suelen formar glomérulos o grandes “piscinas”. Suele aparecer junto a la ortosa, desarrollando texturas cuneiformes. La biotita (5 %) y el anfíbol (3 %) aparecen en cristales subhedrales de entre 1 mm y 3 mm de largo, apenas si se observan clots, ya que tienden a aparecer como cristales

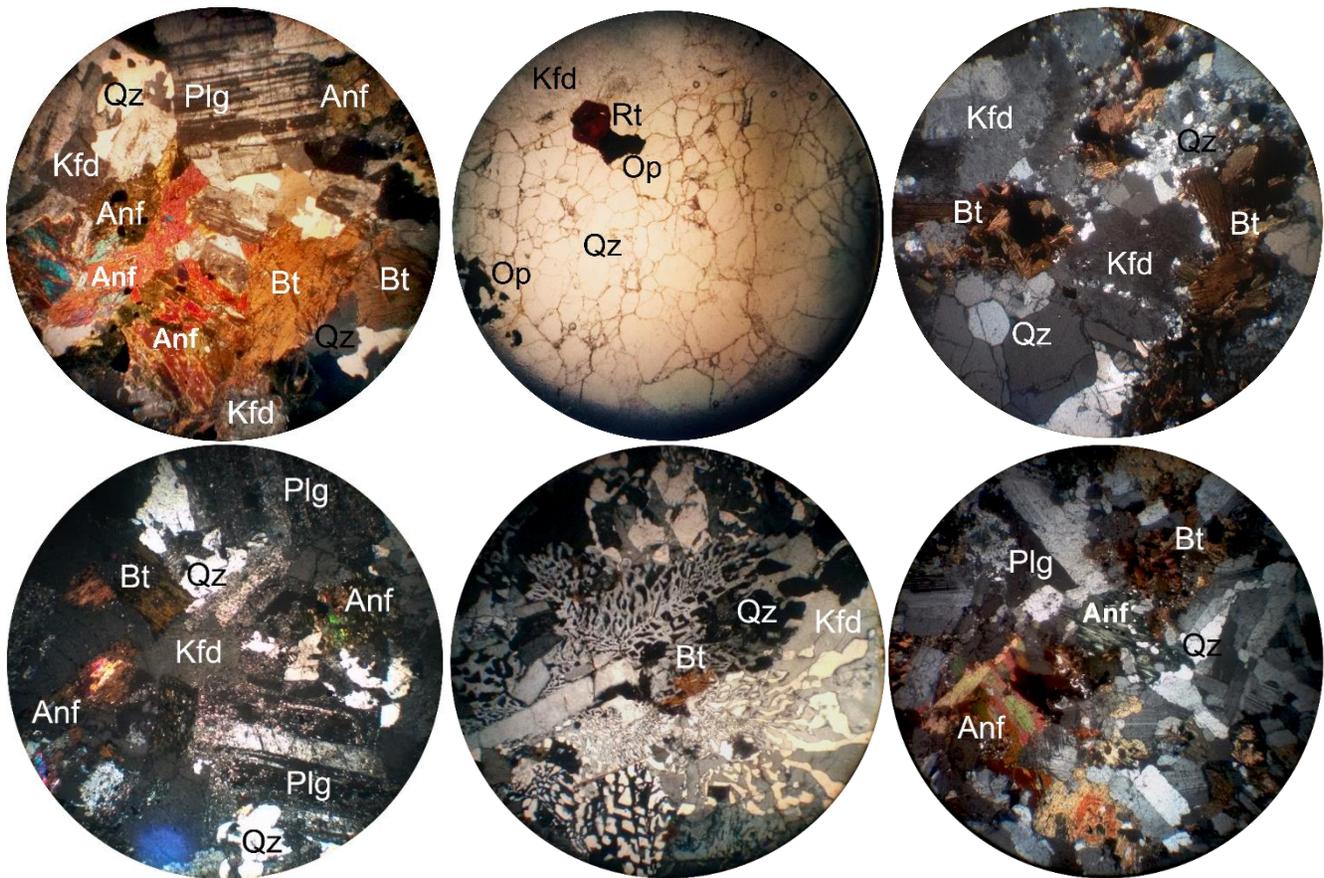


Figura 4. Microfotografías de las rocas graníticas de Cantel, Zunil y Cajolá, y los fragmentos líticos plutónicos de la erupción del año 1902 del Volcán Santa María. A) *Clot* de biotita (Bt) y anfíbol (Anf), muestra EM-6655-16357-4, vista en XPL, polígono Cantel. B) Cristal de rutilo (Rt) de color rojo y alto relieve, muestra EM-6664-16348-5, vista en PPL, polígono Cantel. C) Cristales subhedrales de biotita (Bt) y óxidos opacos intersticiales entre los cristales de Kfd y Qz, muestra EM-6664-16333-10, vista en XPL, polígono Zunil. D) Fenocristales de plagioclasa y cristales subhedrales de biotita y anfíbol, rodeados por cristales anhedrales de feldespato potásico y cuarzo, muestra EM-6480-16533-1, vista en XPL, polígono Cajolá. E) Textura granofídica formada por el intercrecimiento de cuarzo y feldespato potásico, y un cristal aislado de biotita, muestra EM-6489-16525-3, vista en XPL, polígono Cajolá. F) vistas microscópicas de la muestra EM-6583-16258-14, con cristales subhedrales a euhedrales de plagioclasa, abundante biotita y hornblenda como cristales intersticiales, al igual que el cuarzo.

individuales. Los óxidos opacos (2 %) completan el modal máfico de estas rocas.

La roca del dique también fue analizada en lámina delgada bajo el microscopio petrográfico. La composición es de aproximadamente 50 % cuarzo y 50 % de feldespato alcalino sin determinar, cuyos cristales presentan intercrecimientos angulares, formando una textura granofídica. La biotita y la plagioclasa aparecen como minerales accesorios.

Con el fin de compararla con las rocas graníticas de Cantel, Zunil y Cajolá, se analizó petrográficamente la muestra EM-6583-16258-14, correspondiente al fragmento lítico plutónico del depósito de tefra de la erupción del volcán Santa María en el año 1902. En la lámina delgada se observan plagioclasas, biotita, anfíbol, cuarzo y opacos. Su textura es hipidiomórfica inequigranular. La plagioclasa representa el 60 % de esta muestra, es de tipo andesina y composición Ab65An35 aproximadamente. Muestra cristales con maclado polisintético y de tipo albita en algunos casos, y cristales intercrecidos en agregados policristalinos. La biotita (15 %) y los anfíboles (15 %) confieren un grado de color melanocrático a la roca. Están levemente cloritizados. Sus cristales subhedrales a anhedrales aparecen tanto de forma individual como en forma de cristalitas que rellenan los espacios intersticiales entre las plagioclasas. El cuarzo, en pequeños cristales, aparece en espacios intersticiales y

compone un 2 % de la muestra. El feldespato potásico, de tipo ortosa, representa el 1 % de la composición, la cual se completa con un 2 % de opacos.

Según el diagrama ternario de clasificación QAP de rocas ígneas plutónicas de la IUGS (figura 5), los valores modales de los contenidos de cuarzo (Q), feldespato alcalino (A) y plagioclasa (P), de las rocas graníticas de Cantel, Zunil y Cajolá, permiten que nueve de estas pueden clasificarse como granodioritas, y el dique granofídico, como un granito alcalino. El fragmento lítico plutónico del depósito de tefra del Volcán Santa María, como una diorita.

Geoquímica

Se analizaron las muestras EM-6661-16352-8 y EM-6667-16364-9, pertenecientes a las granodioritas de Cantel, la muestra EM-6664-16333-10 de la granodiorita de Zunil y las muestras EM-6487-16532-2 y EM-6489-16525-3, correspondientes a la granodiorita y el dique granofídico de Cajolá. Se determinaron los valores de contenidos de elementos mayores, norma CIPW y elementos traza, los cuales se muestran en las tablas 1 y 2.

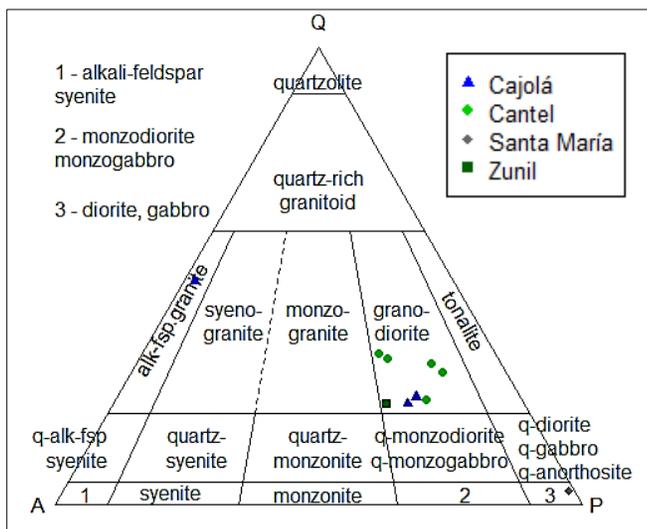


Figura 5. Clasificación modal de las rocas de Cantel, Zunil, Cajolá y Santa María.

Muestra	EM-6661-16352-8	EM-6667-16364-9	EM-6664-16333-10	EM-6487-16532-2	EM-6489-16525-3
Método	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS
Unidades	% peso	% peso	% peso	% peso	% peso
SiO ₂	71,24	68,09	71,49	64,69	76,43
Al ₂ O ₃	14,75	15,65	15,03	15,75	12,72
Fe ₂ O ₃	2,77	3,83	2,52	5,83	1,22
MgO	0,89	1,12	0,65	2,78	0,15
CaO	2,33	2,99	2,28	3,92	0,43
Na ₂ O	3,67	3,72	3,99	2,34	2,54
K ₂ O	3,78	3,97	3,58	3,62	6,26
TiO ₂	0,38	0,42	0,29	0,78	0,16
P ₂ O ₅	0,09	0,11	0,07	0,15	0,02
MnO	0,08	0,06	0,07	0,14	0,03
Cr ₂ O ₃	0,02	0,04	0,03	0,00	0,03
Total	100	100	100	100	100
NORMA CIPW					
Muestra	EM-6661-16352-8	EM-6667-16364-9	EM-6664-16333-10	EM-6487-16532-2	EM-6489-16525-3
Q	29,37	23,50	28,93	25,11	36,62
C	0,60	0,06	0,61	1,21	1,03
Or	22,34	23,46	21,16	21,39	37,00
Ab	31,05	31,48	33,76	19,8	21,49
An	10,97	14,12	10,85	18,47	2,00
Hy	2,22	2,79	1,62	6,92	0,37
Il	0,17	0,13	0,15	0,29	0,06
Hm	2,77	3,83	2,52	5,83	1,22
Ru	0,29	0,35	0,21	0,62	0,13
Ap	0,21	0,26	0,17	0,36	0,05
Total	99,99	99,98	99,98	100	99,97

Tabla 1. Composición de elementos mayores y norma CIPW.

Muestra	EM-6661-16352-8	EM-6667-16364-9	EM-6664-16333-10	EM-6489-16525-3
Método	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS	ICP/MS
Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm
Ni	<20	<20	<20	<20
Ba	728	789	662	553
Be	<1	1	2	<1
Co	3,3	9,7	2,8	1,5
Cs	5	7	6,4	6,1
Ga	15,6	16,8	14,9	11,8
Hf	3,7	4,4	3,8	3,9
Nb	8,4	6	7,2	8,6
Rb	138,4	140	144,1	208,7
Sn	2	4	3	<1
Sr	252	301,6	241	133,5
Ta	0,7	0,7	0,8	1,1
Th	13,2	11,9	11,7	28,6
U	4	2,8	3,2	10,1
V	41	56	29	10
W	0,6	1,7	0,7	1,5
Zr	127,8	145,5	132,6	101,5
Sc	5	7	4	2
Y	16,6	16,9	14,8	12,8
La	25,6	23,2	29,2	15,4
Ce	47,7	47	53,5	30,6
Pr	5,27	5,18	5,42	3,43
Nd	19,6	20	18,9	12,7
Sm	3,41	3,74	3,35	2,49
Eu	0,64	0,8	0,56	0,52
Gd	3,08	3,54	2,77	2,10
Tb	0,48	0,54	0,43	0,35
Dy	2,79	2,94	2,56	1,97
Ho	0,56	0,6	0,54	0,46
Er	1,81	1,79	1,51	1,36
Tm	0,26	0,27	0,24	0,21
Yb	1,85	1,8	1,81	1,44
Lu	0,29	0,28	0,28	0,23

Tabla 2. Composición de elementos traza.

Según la norma CIPW, se tienen pequeñas cantidades de corindón y apatito normativo, los cuales no se aprecian en la petrografía. Además, por estar construida en una base anhidra, la norma no considera a las biotitas y anfíboles presentes en estas rocas.

Las rocas contienen SiO₂ en un corto intervalo de 64,69 % a 71,49 % en peso, y que para el dique granófidio alcanza el 76,43 %. El contenido de Al₂O₃ es alto, 12,72 % a 15,75 % en peso, y los óxidos de los elementos calcoalcalinos

(Ca, Na, K) tienen valores muy similares entre sí, de entre 2 % y 4 % en peso. Los óxidos de Fe, Mg, Mn y Ti están dentro de los valores usuales para el tipo de roca (granodiorita). El dique granófidio se distingue por su pobre contenido de Ca, Mg, Fe, Ti y P.

Los datos geoquímicos de los núcleos de roca extraídos de las perforaciones en el campo geotérmico de Zunil, pertenecientes a los trabajos de Rose (1987) y García (1990), son útiles para esta investigación dada la cercanía del lugar con los polígonos de Cantel y Zunil.

De La Roche et al. (1980) proponen un diagrama de clasificación geoquímico (Figura 6), según el cual, las rocas

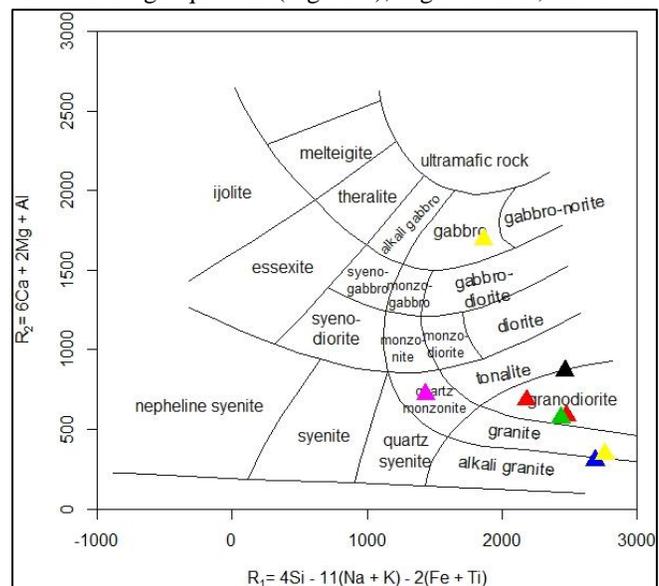


Figura 6. Diagrama R1-R2.

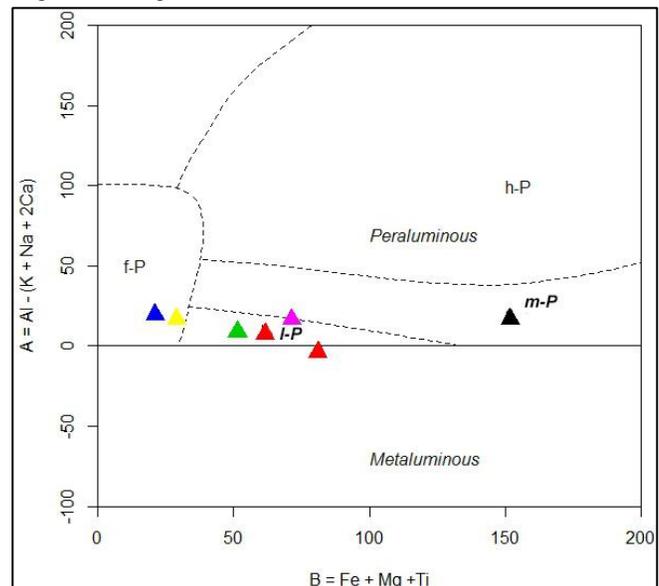


Figura 7. Diagrama B-A (modificado por Villaseca et al., 1998).

de Cajolá (en negro), Cantel (en rojo) y Zunil (en verde) son granodioritas. Mientras que el dique granófico de Cajolá (en azul) es un granito alcalino. Las muestras de García (1990) indican un gabro y un granito alcalino (en amarillo), mientras la muestra de Rose (1987) corresponde a una cuarzozononita (en rosado).

El diagrama de Debon y LaForte (1983), modificado por Villaseca et al. (1998), permite determinar el índice de saturación en alúmina (Figura 7). Las muestras de Cajolá (en negro), Cantel (en rojo) y Zunil (en verde) caen en los campos de metaluminoso a ligeramente y medianamente peraluminoso. Esto es concordante con el escaso corindón normativo y con la abundancia de plagioclasas y feldespatos potásicos, además de la presencia de biotita y anfíboles en las láminas delgadas, mientras que el dique granófico de Cajolá (en azul) y el granito de García (en amarillo) corresponden al campo peraluminoso félsico, el cual es propio de los miembros más ácidos de las series magmáticas (Villaseca et al., 1998).

De acuerdo con Frost et al. (2001), (Figura 8), los granitoides pueden caracterizarse de acuerdo a tres relaciones de sus óxidos de elementos mayores, son estos el número Fe o $Fe^* = (FeO/(FeO+MgO))$; Índice Alcalino Modificado, $MALI = (Na_2O+K_2O-CaO)$ y el Índice de Saturación en alúmina, $ASI = (Al/(Ca-1,67P+Na+K))$.

Las muestras de granodiorita de Cajolá, Cantel y Zunil son de afinidad magnesiiana, con caracteres de una serie magmática calcialcalina y de metaluminosas a ligeramente peraluminosas, con un ASI menor a 1,1, propio de un granito Tipo I (Chappell y White, 1974).

Estas rocas coinciden en características con la clasificación de granitos cordilleranos propuesta por Frost et al. (2001), ejemplificada con los batolitos de la costa oeste de Estados Unidos de Norteamérica; el dique granófico es de afinidad ferroana, de serie magmática alcalinocálcica y de Tipo I cordillerano con ASI entre 0,7 y 1,1 (Frost et al., 2001).

La muestra de cuarzozononita del pozo 2CQ6-1 del campo geotérmico Zunil I (Rose, 1987) y el granito y el gabro

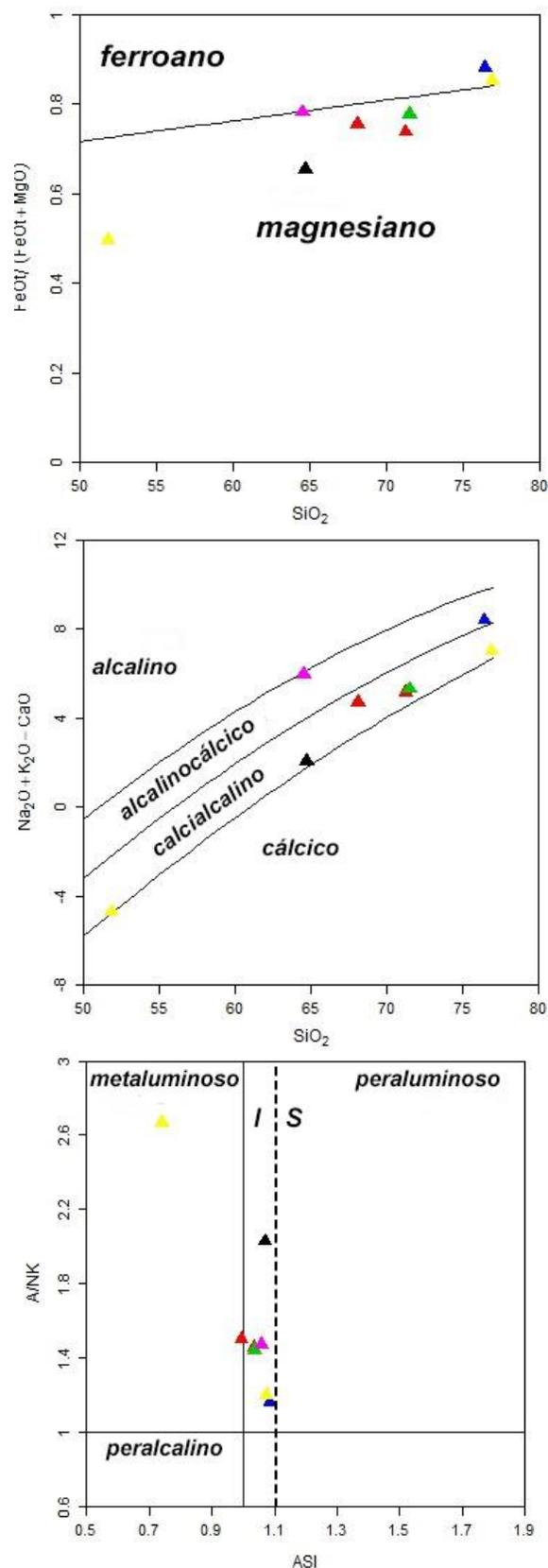


Figura 8. Clasificación de granitoides (Frost. et al., 2001)

del pozo Z20 del campo geotérmico Zunil II (García, 1990) tienen valores ASI de 0,7 a 1,1, lo que también los hace granitos Tipo I cordilleranos.

El diagrama de REE normalizado a condrito (Boynnton, 1984) permite distinguir un enriquecimiento de las tierras raras ligeras (La-Sm) respecto de las tierras raras pesadas (Eu-Lu), (Figura 9).

El Eu muestra una anomalía negativa significativa, lo que sugiere que las plagioclasas fueron removidas del fundido durante su cristalización, o bien, una fusión parcial en donde la plagioclasa queda como residuo (Toselli, 2011). La pendiente negativa hacia las tierras raras pesadas es relativamente plana.

Las concentraciones de elementos trazas compatibles e incompatibles de las muestras están normalizadas con respecto a los valores de manto primitivo y de la corteza continental, según McDonough y Sun (1995) y de Taylor y McLennan (1995), respectivamente (Figuras 10 y 11).

Se normalizan a estos valores, ya que se asumen estas dos fuentes como reservorios donde pudo originarse el magma que formó las rocas de esta investigación. A partir de estos diagramas es posible observar el comportamiento de los elementos traza y distinguir patrones.

Elementos como Nb, Ta y Ni evidencian una anomalía negativa, más marcada en el diagrama normalizado al manto primitivo. Las rocas graníticas de Cantel y Zunil muestran anomalías negativas de Ba y P. La muestra del granófono de Cajolá, en azul, se distingue por mostrarse enriquecido en Rb, Th, U y Ta.

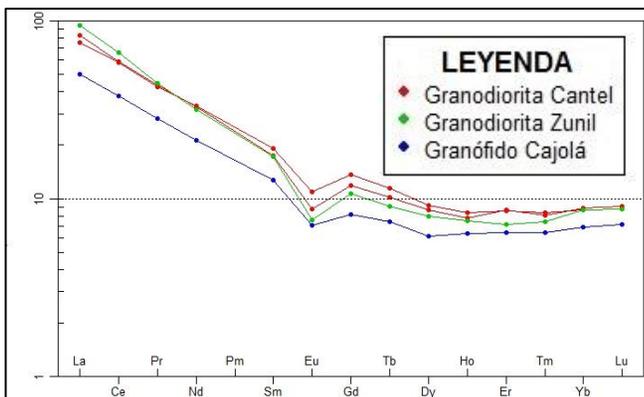


Figura 9. Diagrama de REE normalizado a condrito (Boynnton, 1984).

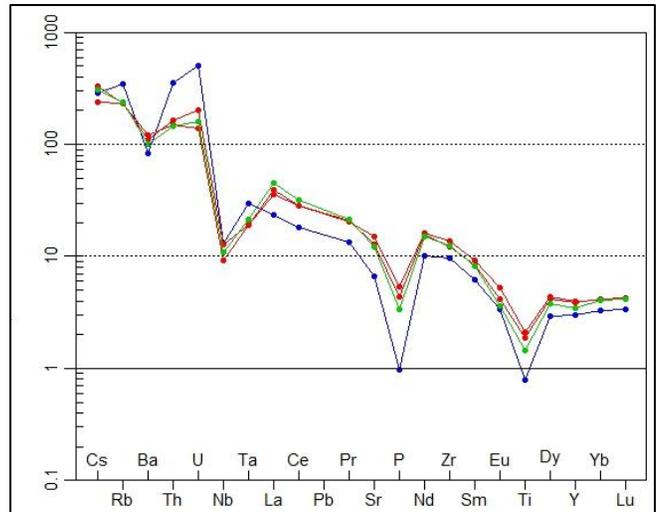


Figura 10. Diagrama de elementos traza normalizados al manto primitivo (McDonough y Sun, 1995).

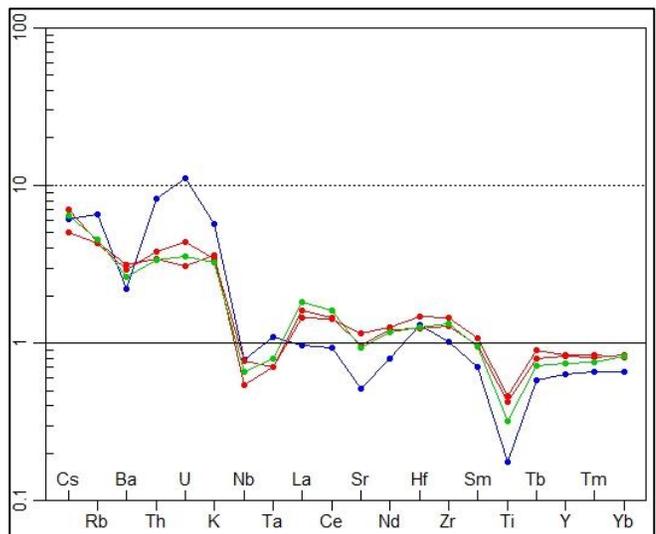


Figura 11. Diagrama de elementos traza normalizados a la corteza continental (Taylor y McLennan, 1995).

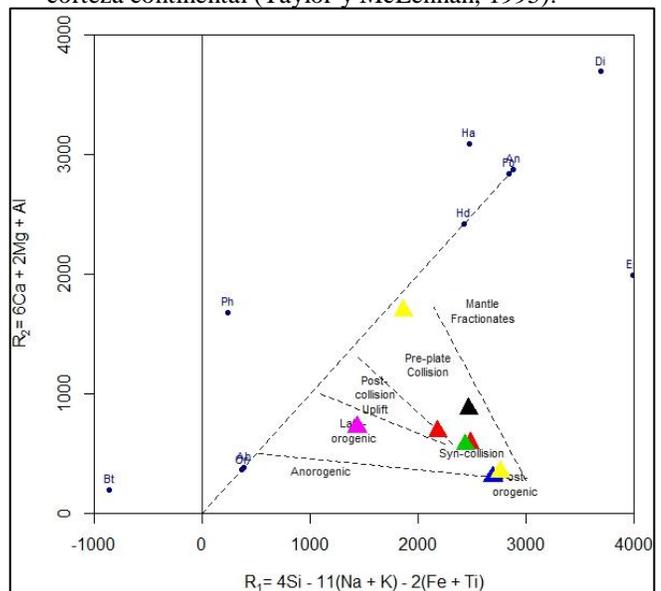


Figura 12. Diagrama R1-R2 para discriminación geotectónica (Batchelor y Bowden, 1985).

Las concentraciones de elementos mayores y elementos traza fueron utilizados para la discriminación geotectónica de las rocas graníticas y la determinación de sus ambientes, a través del diagrama multicatiónico R1–R2 de Batchelor y Bowden (1985), (Figura 12), y de los diagramas de elementos traza para discriminación geotectónica de Pearce et al., (1984), (Figura 13).

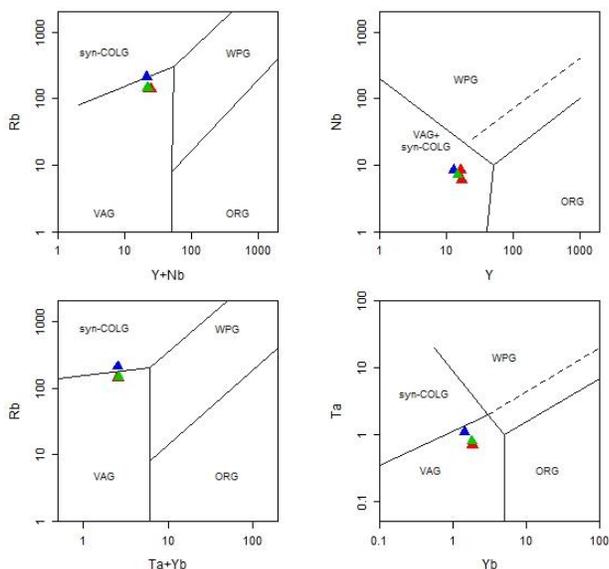


Figura 13. Diagramas para discriminación geotectónica (Pearce et al., 1984).

Según el primer diagrama, las muestras se ubican desde el campo de colisión pre-placa hasta el post-orogénico. El gabro de García (en amarillo) y la granodiorita de Cajolá (en negro) se hallan en el primer campo. Las granodioritas de Cantel y Zunil (en rojo y verde) se encuentran en el campo sin-colisional y la cuarzomonzonita de Rose (en rosa) es de orogenia tardía. El granófono de Cajolá (en azul) y el granito de García (en amarillo) son de ambiente post-orogénico. Estos reflejan los diversos estadios del emplazamiento del magma (Batchelor y Bowden, 1985).

En el segundo diagrama, las muestras son principalmente granitos de arco volcánico (VAG), con cierta tendencia hacia el campo de los granitos sin-colisionales (syn-COLG), coincidentes con una zona de subducción (Pearce et al., 1984).

Geocronología

Se analizaron dos muestras de granodiorita (EM-6664-16333-10 y EM-6487-16532-2), provenientes del río Pachamiyá, en Zunil, y de la carretera al norte de Cajolá respectivamente.

En estas rocas se analizaron un total de 65 cristales de zircón, de los cuales 61 fueron utilizados para establecer una edad en base a un promedio ponderado (Figuras 14 y 15) a partir de los ratios y edades corregidas de cada cristal. Se descartaron los datos de cuatro zircones debido a valores anómalos en la relación $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (serie del actinio).

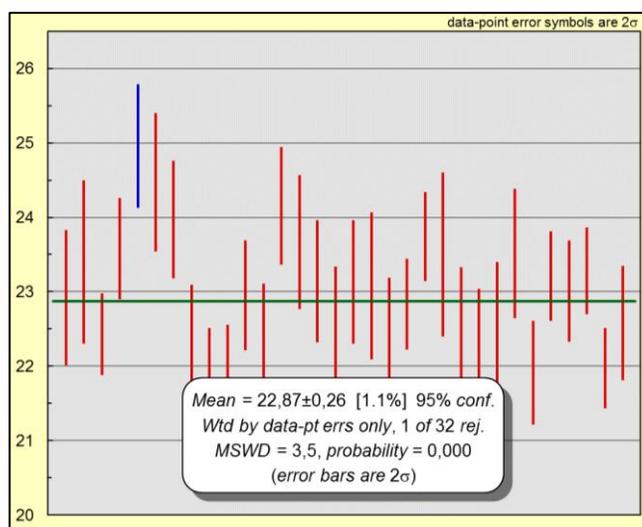


Figura 14. Edad promedio ponderada muestra EM-6664-16333-10.

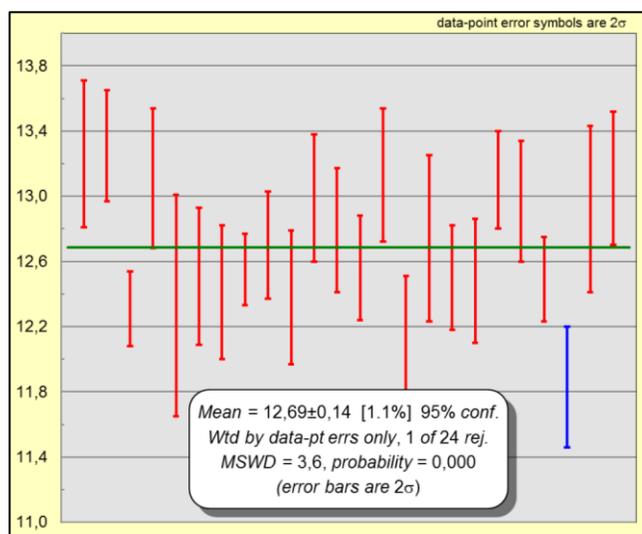


Figura 15. Edad promedio ponderada muestra EM-6487-16532-2.

Cantel, que es metaluminosa. El dique granófico de Cajolá es de carácter ferroano, de serie magmática alcalinocálcica e índice de saturación peraluminoso.

Según la clasificación de Villaseca et al. (1998), una granodiorita de Cantel, las dos granodioritas del río Chuyul y Pachamiyá y la granodiorita de Cajolá son metaluminosas, ligera y moderadamente peraluminosas respectivamente. El ligero enriquecimiento en aluminio se concentra en una fase de biotita, ya que no se observa moscovita, cordierita o granate. El dique granófico de Cajolá se encuentra dentro del campo altamente peraluminoso félsico, el cual corresponde a los términos más ácidos de una serie granítica y que más que leucogranitos anatéticos *sensu stricto*, pueden ser magmas altamente fraccionados de series graníticas ligeramente peraluminosas.

De esta cuenta, las muestras analizadas se agrupan en dos subdivisiones principales de la clasificación propuesta por Frost, son estos: los granitoides magnesianos calcialcalinos ligeramente peraluminosos y los granitoides ferroanos alcalinocálcicos peraluminosos félsicos. En el primer grupo se encuentran las granodioritas de Cajolá, Cantel y Zunil. Los granitoides magnesianos calcialcalinos metaluminosos a ligeramente peraluminosos componen los plutones en la porción principal de los batolitos cordilleranos, con rocas como la diorita, monzodiorita y granodiorita. En el segundo grupo se encuentra el dique granófico de Cajolá. Estos granitoides ferroanos alcalinocálcicos a alcalinos y peraluminosos suelen corresponder a plutones de tipo A y a granófidios asociados a diques máficos y plutones (Frost et al., 2001).

Los granitoides cordilleranos son parte de las rocas consideradas como granitoides Tipo I según Chapell y White (1974) y se exponen en las zonas de arcos magmáticos, con el nombre de granitos de arco volcánico, con las rocas calcialcalinas ubicadas en la porción de tierra adentro del batolito, las cuales se vuelven más alcalinas al alejarse aún más del mismo; los batolitos cordilleranos también incluyen granitoides ferroanos alcalinocálcicos peraluminosos (Frost et al., 2001).

La geoquímica de elementos traza de las granodioritas de Cantel, Zunil y el granófico de Cajolá, presenta una firma de arco volcánico, ya que al ser comparadas las concentraciones de REE Vs. condrito, se observa un enriquecimiento de las LREE respecto de las HREE, las cuales muestran un perfil bastante llano, además de la anomalía negativa de Eu, consistente con el fraccionamiento de la plagioclasa en las rocas calcialcalinas de arco volcánico. Además, al ser comparados los elementos compatibles e incompatibles respecto del manto primitivo y la corteza continental, se observan anomalías negativas de Ti, Zr, Hf, Nb, Ta y Th, lo cual también es típico de zonas de subducción (Milián, 2013).

Los perfiles llanos de HREE implican que la fuente del magma se encuentra en el manto superficial de lertzholita-espinela, a menos de 50 km de profundidad (Murphy, 2007). Sin embargo, estos magmas no se derivan directamente de la fusión de la loza subducida, ya que la litósfera oceánica a una profundidad de 110 km sería metamorfozada a eclogita (Figura 17), la cual posee fases estables de granate y no de espinela, lo que sugiere otros procesos para su petrogénesis, como la fusión parcial de rocas corticales (Murphy 2007).

Los granitoides magnesianos reflejan una afinidad con magmas relativamente hidratados y oxidados y se asocian con orígenes relacionados a las zonas de subducción (Murphy, 2007).

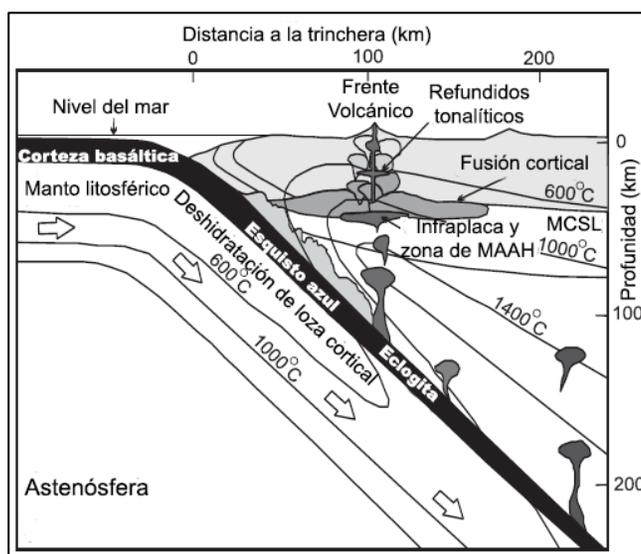


Figura 17. Formación de un arco volcánico continental.

Las granodioritas de Cantel y Zunil presentan anomalías negativas en el Ti, P, Nb, Ta y Eu, lo cual refleja un fraccionamiento de diversas cantidades de apatito (P), óxidos de hierro y titanio (Ti) y plagioclasa (Eu), de acuerdo a Du Bray et al. (2004). La cristalización fraccionada de anfíbol y/o magnetita provoca que la composición del fundido se desplace hacia composiciones más intermedias y félsicas (Murphy, 2007), lo cual parece ser la ruta petrogenética que siguieron estas rocas, derivándose de un líquido por fusión parcial del manto y evolucionados a través de la cristalización fraccionada de los minerales mencionados anteriormente.

El granófono de Cajolá (granitoide ferroano alcalinocálcico y peraluminoso félsico) se distingue por presentar anomalías positivas de elementos incompatibles como Rb, Ba, Th, U, La y Sr, lo cual es indicativo de que el magma que formó estas rocas es de un nivel cortical y es muy diferenciado (Pompa-Mera, 2009). Y es que las rocas peraluminosas en zonas de subducción suelen formarse por la diferenciación de magmas a partir de una serie calcialcalina de composición gabroica a granodiorítica (Villaseca et al., 1998). También pueden formarse por la adición de un fluido derivado de la loza que se subduce a una fuente empobrecida, a su vez responsable de las relativamente elevadas abundancias de los elementos LIL anteriormente mencionados (Mohamed y Hassanen, 1996). Así pues, estas rocas parecen haber sido producidas tanto por diferenciación de un magma de composición intermedia, o bien, por la fusión parcial de la corteza.

Según la discriminación tectónica de granitos de Pearce et al. (1984), las granodioritas de Cantel, Zunil y Cajolá, así como el dique granófono, son granitos de arco volcánico. Según Batchelor y Bowden (1985), corresponden a los campos de sin-colisión y post-orogénica, para las granodioritas y el dique granófono, respectivamente. En conjunto, las 5 muestras y sus características reflejan diferentes procesos tectonomagmáticos, desde el magmatismo de un margen de placas activo y destructivo, hasta magmatismo anatético (sin-colisional/sin-orogénico).

Sin embargo, no todas las características geoquímicas y petrográficas coinciden con los procesos propuestos por Batchelor y Bowden. Por ejemplo, las granodioritas sin-colisionales de Cajolá, Cantel y Zunil no muestran cordierita, ni una clara evidencia de ser granitoides anatéticos o de derivar directamente de la fusión de la corteza. A pesar de ello, las muestras evidencian una evolución en el ambiente tectónico en las que este basamento granítico fue emplazado, desde el proceso de subducción mismo, hasta la fase de post-orogénica.

Las edades obtenidas en circones, por medio del U/Pb, correspondientes a las granodioritas de Zunil y Cajolá, son de 22.87 ± 0.26 y 12.69 ± 0.14 Ma, ubicadas en el Mioceno. Esta edad ha sido interpretada como la edad de cristalización de la roca y, por consiguiente, del evento magmático.

Durante esta época, se produce la ruptura de la placa de Farallón (23 Ma) pasando a formar las placas de Cocos y de Nazca; una loza de la placa de Cocos se separa por debajo del norte de Centroamérica y produce el levantamiento topográfico a gran escala en esa región, además de comenzar la subducción casi ortogonal de la placa de Cocos por debajo del bloque Chortís (Mann, 2007). Previamente se dio un progresivo cese de la actividad plutónica en el sur de México, entre los 35 Ma y 28 Ma (Schaaf et al., 1995).

Salazar (2008) incluye en su trabajo una recopilación de dataciones realizadas a las rocas del Macizo de Chiapas, en donde incluye datos del trabajo de Mújica-Mondragón (1987) sobre el batolito de la costa Chiapaneca, con granodioritas de biotita y hornblenda con edades entre los 24.4 ± 1 Ma y 20 ± 1 Ma, que afloran al sur del Complejo Volcánico Tacaná (CVT). Este Complejo se ubica a 40 km al NW de la caldera de Quetzaltenango (CQ, Figura 18). García-Palomo et. al. (2004) en su trabajo sobre dicho Complejo, reportan un nuevo stock de granodiorita consistente en feldespato alcalino, plagioclasas, biotita y cuarzo, con edades de 13.3 ± 0.2 Ma y 12.2 ± 0.1 Ma. Las edades reportadas para las granodioritas de este complejo son consistentes con las obtenidas para las granodioritas de Zunil y Cajolá.

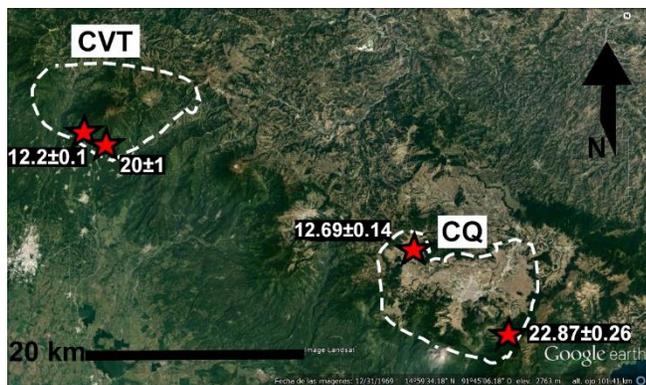


Figura 18. Ubicación del Complejo Volcánico Tacaná respecto de la caldera de Quetzaltenango.

Conclusiones

Las rocas graníticas de la caldera de Quetzaltenango se exponen hacia el noroeste en Cajolá y hacia el sureste en Cantel y Zunil en escasos afloramientos, con una superficie de 0,3 km² y por tanto, de dimensiones poco cartografiadas, muestran además contactos fallados y erosivos con las rocas volcánicas y depósitos piroclásticos que las cubren, más no con la roca caja original, la cual está ausente.

La clasificación petrográfica de estas rocas corresponde con granodioritas, compuestas por 50 % de plagioclasa tipo andesina, 25 % de feldespato alcalino tipo ortosa, 20 % de cuarzo, 3 % de biotitas, 2 % de minerales como anfíboles, clorita y opacos; dioritas, compuestas por 60 % de plagioclasa tipo andesina, 15 % de biotita, 15 % de hornblenda, 2 % de cuarzo, 1 % de feldespato potásico y 2 % de óxidos opacos; granitos alcalinos, compuestos por 49 % de feldespato potásico, 49 % de cuarzo, 1 % de plagioclasa y 1 % de biotita. Muestran texturas hipidiomórficas inequigranulares unimodales, hipidiomórficas poikiliticas y granofídicas, respectivamente.

Geoquímicamente, la litología de las muestras corresponde a granodiorita y granito alcalino, con un contenido de SiO₂ de entre el 65 % y 71 % para la primera, y un contenido de entre el 75 % y el 77 % para el segundo;

normativas en cuarzo y en ocasiones con corindón, son de naturaleza principalmente magnésiana, de serie magmática calcalcalina y de índice de saturación en alúmina ligeramente peraluminoso, correspondientes a granitoides Tipo I cordilleranos.

Son granitoides con firma de arco volcánico, según las anomalías negativas de Ta, Nb y Ti, de margen continental activo, asociadas a una zona de subducción, emplazadas durante procesos tectono-magmáticos de sin-colisión y magmatismo post-orogénico.

Los procesos petrogenéticos de los magmas que formaron estas rocas incluyen diferenciación por cristalización fraccionada para las granodioritas, y fusión de la corteza e interacción con fluidos residuales para el granito alcalino.

La edad promedio ponderada de cristalización de las granodioritas de Zunil y Cajolá, a partir de U/Pb en circones, es de $22,87 \pm 0,26$ y $12,69 \pm 0,14$ Ma, lo cual,

junto con su petrografía, permite relacionarlas con las granodioritas del Complejo Volcánico Tacaná, las cuales a su vez están relacionadas al batolito costero de Chiapas.

Agradecimientos

Al Dioritic Army, por el apoyo y las experiencias compartidas en este proyecto.

Al Dr. William Rose, Dr. Rüdiger Escobar, Dr. John Hughes, Dr. Mike Fowler y al Ing. Otto García, por su apoyo y los valiosísimos aportes a esta investigación.

Al Dr. Carlos Ortega Obregón, por la invaluable colaboración a este trabajo a través de su asesoría y el apoyo con las dataciones realizadas en el Centro de Geociencias de la UNAM.

A los ingenieros Osmín Jared Vásquez y Ricardo Milián, por haber asesorado y revisado este trabajo de investigación.

Referencias bibliográficas

- Batchelor, R. and P. Bowden. "Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters". *Chemical Geology*. 48 (marzo 1985): 43-55.
- Boynton, W.V. "Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies". En: Henderson, P. "Rare earth element geochemistry". *Elsevier Sci. Publ. Co.*, Amsterdam. (1984): 63-114.
- Carr, MJ. Et. Al. "Volcanism and geochemistry in Central America: Progress and problems". *American Geophysical Union*, 138 (2003): 153-179.
- Castro, Antonio Dorado. *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. España: Editorial Paraninfo, 2015.
- Chappell, BW and JR. White. "Two contrasting granite types". *Pacific Geology*. 8 (1974): 173-174.
- Conway, Michael et al. "Cerro Quemado, Guatemala: the volcanic history and hazards of an exogenous volcanic dome complex". *Journal of Volcanological and Geothermal Research*. 52 (octubre 1992): 303-323.
- De La Roche, H. et al. "A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major element analyses – its relationships with current nomenclature". *Chemical Geology* 29 (1980): 183–210.
- Debon, F. and Le Fort, P. "A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*. 73 (enero 1983): 135-149.
- Du Bray et al. "Geochemistry and Geochronology of Middle Tertiary Volcanic Rocks of the Central Chiricahua Mountains, Southeast Arizona". U.S. *Geological Survey Professional Paper*. 1684 (2004): 1-57.
- Duffield, W. et al. "Oblique synoptic images, produced from digital data, display strong evidence of a "new" caldera in southwestern Guatemala". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 55(3-4), 217-224.
- Escobar, R. et al. "40Ar/39Ar and paleomagnetic constraints on the evolution of Volcán de Santa María, Guatemala". *Geological Society of America Bulletin*. 122:5/6 (mayo-junio 2010): 757-771.
- Foley, D. et al. "Geology and geophysics of the Zunil geothermal system, Guatemala". *Geothermal Resources Council Transactions*. 14, Part II, (agosto 1990): 1405-1412.
- "Satellites images, digitized topography, and the recognition of the Xela Caldera, Quezaltenango Valley, Guatemala". Cincinatti, EEUU: *Geological society of America*. 24:7 (enero 1992): 217-233.
- Frost, B. R. Eet al. "A geochemical classification for granitic rocks". *Journal of Petrology*. 42 (abril 2001): 2033-2048.
- García, O. *Petrology of cores from Wells Z-19 and Z-20, Zunil geothermal field, Guatemala*. Diplomado de Tecnología Geotérmica. Universidad de Auckland. Nueva Zelanda: Instituto Geotérmico, 1990.
- García-Palomo, A. et al. "Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, Mexico-Guatemala". *Geological Society of America Special Paper "Natural Hazards in Central America"*. 2004.
- Gutiérrez, E. T. Proyecto Zunil: Estudio de factibilidad preliminar, informe geológico y vulcanológico. Guatemala: Instituto Nacional de Electrificación, 1977.
- Hughes, C. "Anatomy of a granophyre intrusion". *Lithos*. 4 (abril 1971): 403-415.
- Hughes, J. M. *Geology and petrology of Caldera Tzanjuyub, western Guatemala*. Tesis de Maestro en Artes, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, United States of America: Dartmouth College, 1978.

- Johns, G. W. *Geology of the Cerro Quemado volcanic dome complex, Guatemala*; Tesis de Maestro en Ciencias, Michigan Technological University, Houghton, Michigan, United States of America: Michigan Technological University, 1975.
- Kubota, Y. et al. "Geothermal development in Zunil geothermal field, Republic of Guatemala". *Chinetsu*. 18 (marzo 1981): 280-295.
- Lauri, L. "Petrogenesis of felsic igneous rocks associated with the Paleoproterozoic Koilismaa layered igneous complex, Finland". Disertación académica. Universidad de Helsinki, Finlandia: Facultad de Ciencias, 2004.
- Le Bas M. J. y Streckeisen, A. L. "The IUGS systematics of igneous rocks". *Journal of the Geological Society*, London. 148 (1991): 825-833.
- Lima, E. y Palma, J. "The Zunil-II geothermal field, Guatemala, Central America". Kyushu – Tohoku, Japón: *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. (mayo-junio 2000): 2133-2138.
- Lowenstern et al. "Comagmatic A-Type Granophyre and Rhyolite from the Alid Volcanic Center, Eritrea, Northeast Africa". *Journal of Petrology*. 38:12 (diciembre 1997): 1707-1721.
- Mann, P. "Overview of the tectonic history of northern Central America". *Geological Society of America Special Paper*. 428 (2007): 1-19.
- McDonough W. F. y Sun, S. "The composition of Earth". *Chemical Geology*. 120 (1995): 223-253.
- Mérida, E. R. La geología en Quetzaltenango: Análisis petrológico de las rocas del Complejo Dómico Cerro Quemado en su flanco SE y estructuras volcánicas en los alrededores de la Caldera de Almolonga, en un área de 21 km² cartografiados a escala 1:25,000. Práctica profesional supervisada, carrera de Técnico en Geología. Centro Universitario del Norte-Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2015.
- Milián, R. E. Petrografía, geoquímica y geocronología del stock ubicado en los alrededores de la aldea Matanzas, municipio de San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala. Tesis Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte- Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2013.
- Mohamed, F. H. and MA. Hassanen. "Geochemical evolution of arc-related mafic plutonism in the Umm Naggat district, Eastern Desert of Egypt". *Journal of African Earth Sciences*. 22:3 (enero 1996): 269-283.
- Múgica-Mondragón, R. Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Chiapas. Proyecto C-2009. México: *Instituto Mexicano del Petróleo* 1987. (sin publicar).
- Murphy, J. B. "Igneous Rock Associations 8. Arc Magmatism II: Geochemical and Isotopic Characteristics". *Geoscience Canada*. 34:1 (marzo 2007): 1-29.
- Pearce, J. et al. "Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks". *Journal of Petrology*. 25 (noviembre 1984): 956-983.
- Pompa-Mera, V. *Geoquímica y geocronología de los complejos intrusivos en el sur de Chiapas, México*. Tesis Maestro en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México, México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2009
- Rose, W. "Santa Maria, Guatemala: Bimodal soda-rich calc-alkalic stratovolcano". *Journal of volcanology and geothermal research*. 33 (enero 1987): 109-129.
- Salazar, J. "Geología, petrología y geoquímica del Macizo de Chiapas, área de Motozintla de Mendoza". Tesis Ingeniero Geólogo. Universidad Autónoma de

- México, México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2008.
- Schaaf, P. et al. "Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence". *Tectonics*. 14 (diciembre 1995): 1339-1350.
- Singer, B. et al. "Lying in wait: deep and shallow evolution of dacit beneath Volcán de Santa María, Guatemala". *Geological Society, London, Special Publications*. 385 (junio 2013): 209-234.
- Stoiber, R. and Carr, M. "Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America". *Bulletin Volcanologic*. 37:3 (septiembre 1973): 304-325.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. "The geochemical evolution of the continental crust". *Reviews of Geophysics*. 33:2 (mayo 1995): 241-265.
- Toselli, A. *Petrología química: Elementos mayores y menores*.
http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/08.htm (15 de agosto de 2015).
- Villaseca, C. et al. "A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*. 89 (junio 1998): 113-119.
- Williams, H. "Volcanic history of the Guatemalan highlands". *University of California Publications: Geological Sciences*. 38 (marzo 1960): 1-86.

ZONA DE TRANSFERENCIA QUE CONECTA UN SISTEMA EXTENSIONAL DE FALLAS CONJUGADAS ACTIVAS SEGMENTADAS: IMPLICACIÓN EN LA SERIE SÍSMICA DEL AÑO 2011, SANTA ROSA, GUATEMALA

CONNECTING TRANSFER ZONE IN A EXTENSIONAL SISTEM OF CONJUGATED SEGMENTED ACTIVE FAULTS: IMPACT IN THE SEISMIC SERIES OF 2011, SANTA ROSA, GUATEMALA

Sergio David Morán Ical

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología
Finca Sachamach, Km 210, Cobán A.V. Guatemala
email: moran_serio@usac.edu.gt

Luis Fernando Ramírez Ba

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología
Finca Sachamach, Km 210, Cobán A.V. Guatemala

RESUMEN

El evento de Mw 5.6 del 19 de septiembre de 2011 forma parte de la serie sísmica que afectó a los municipios de Santa María Ixhuatán, Cuilapa y Oratorio, cuya crisis sísmica inicia el 21 de julio e intensifica hasta inicios de agosto y se prolonga hasta mediados del mes de septiembre con 3 réplicas entre 4.8 a 5 Mw. El sismo principal de las 12:33 hora local, se originó a lo largo de una falla (Falla Ixhuatán) orientada N30W/66E y cabeceó E61S (normal dextral), la cual reactivó un sistema de fallas normales conjugadas norte-sur (F. Los Esclavos y La Fila), que se inician desde la localidad de Las Ánimas y se proyecta hacia la localidad de San Juan Tecuaco al sur. El premonitor y las réplicas sísmicas reflejan modelos de mecanismos focales, que refieren regímenes tectónicos tanto transtensivo como extensional que interactúan y dan origen a la sismicidad en la zona, a partir de una zona de transferencia ubicada dentro de las fallas Jalpatagua central (FJc) y Chuchuapa, ambas de movimiento dextral con cierta componente vertical de tipo normal.

Palabras clave: serie sísmica, mecanismos focales, régimen tectónico, zona de transferencia, falla de Jalpatagua.

ABSTRACT

The event of Mw 5.6 of September 19, 2011 is part of the seismic series that affected the municipality of Santa Maria Ixhuatán, Cuilapa and Oratorio, whose seismic crisis begins on July 21 and intensifies until early August and continues until mid of the month of September with 3 replicates between 4.8 to 5 Mw. The main earthquake of 12:33 local time, originated along a fault (Ixhuatán fault) oriented N30W / 66E and E61S (normal dextral), which reactivates a system of normal north-south conjugate faults (F. Los Esclavos and La Fila), which start from the town of Las Animas and is projected towards the town of San Juan Tecuaco to the south. The premonitor and the seismic replicas reflect models of focal mechanisms, which refer to tectonic regimes, both transtensive and extensional, that interact and give rise to seismicity in the zone, from a transfer zone located within the Central Jalpatagua (FJc) faults and Chuchuapa, both of dextral movement with some vertical component of normal type.

Key words: seismic series, focal mechanisms, tectonic regime, transfer zone, Jalpatagua fault.

Introducción

Además de las áreas sísmicamente activas ya conocidas, como la zona de falla del Motagua, existen varias que ameritan ser evaluadas individualmente desde el punto de vista de su historial sísmico, características estructurales, evidencia neotectónica y su potencial peligro o riesgo.

El presente trabajo se enfocó en la revisión y análisis del historial, parámetros sísmicos y algunas observaciones de estructuras en campo, en los municipios de Cuilapa, Santa María Ixhuatán, Oratorio y Chiquimulilla, enfatizando el evento sísmico del año 2011. El análisis e interpretación inicia con el estudio de imágenes digitales para identificar y ubicar la distribución de epicentros, geometría de mecanismos focales, área de afectación (daños en las viviendas) y ubicación de deslizamientos, con el objeto de identificar la fuente del terremoto y/o estructuras activas.

La serie sísmica de 2011 llama la atención porque durante el evento premonitor, el principal y las réplicas, las agencias generaron modelos de mecanismos focales distintos a los marcados por la tectónica del área y, además, ocurrió en un sector muy particular que geomorfológicamente contiene elementos y arreglos estructurales importantes, como la zona de falla de Jalpatagua (ZFJ).

Metodología

Básicamente, el trabajo se fundamentó en cuatro actividades. La primera fase consistió en el análisis de SRTM-DEM, fotografías aéreas digitales (IGN-2006) con la finalidad de confeccionar el mapa de rasgos estructurales (lineamientos). Luego se llevó a cabo la revisión de la información concerniente en la base de datos sísmicos de agencias internacionales y locales, además de las referencias históricas. Principalmente se trabajó con el catálogo de ISC (International Seismological Centre).

Por otra parte, se efectuó la revisión de la información sobre los reportes de daños documentados durante y después de evento sísmico, utilizando para la ubicación precisa de las localidades el portal de Segeplan mediante el enlace: <http://ide.segeplan.gob.gt>. Así mismo, complementa dicho

estudio la información obtenida de diferentes campañas de campo llevada a cabo dentro y alrededor del área cubierta. Para la representación gráfica de mecanismos focales y análisis de esfuerzo se ha utilizado el programa Win-Tensor, del Dr. Damien Delvaux.

Resultados

Configuración estructural Geológica

Al sur del sistema de fallas Motagua-Polochic se forma una zona amplia de deformación que se caracteriza por la presencia por una serie de grábenes y fallas normales de dirección aproximada N-S y NNO-SSE. La presencia de estos grábenes evidencia la tectónica extensiva en dirección aproximada E-O, presente en esta zona, concentrada principalmente en los grábenes de Guatemala e Ipala, al oeste, y la depresión de Honduras, al este (Vásquez, 2014).

La estructura más al sur de estos patrones N-S, y que pudieran acomodar en cierta manera el movimiento de las fallas, es la zona de falla de Jalpatagua (ZFJ).

La zona de falla de El Salvador (A. Gomez, J. A., 2009) es relevada de alguna manera por la falla de Jalpatagua, en Guatemala, que da lugar a un escarpe muy claro en la topografía. La falla de Jalpatagua ha sido descrita como una falla de desgarre diestro con relevos a escala local que forman pequeñas cuencas (Carr, 1976; Reynolds, 1987).

La falla de Jalpatagua es una estructura “tras arco”, mayormente caracterizada al este de Guatemala, con tendencia N60W, muy cercana a la frontera con El Salvador. Su continuidad al oeste no es muy clara, debido a la cubierta de depósitos vulcanoclásticos. A lo largo de donde se ha descrito, se conjugan varios sistemas de rasgos morfoestructurales complejos, tanto en geometría como en cinemática, mostrando algunos planos de fallas (N60W) al menos dos generaciones de estrías. Dichos planos evidencian inicialmente un deslizamiento con una componente vertical (normal dextral) y luego, horizontal, de tipo dextral normal.

Authemayou, C. et al. (2014), mediante el análisis del patrón de drenaje cercano a la localidad de El Jocotillo, determina el desplazamiento del vértice de un abanico

aluvial, por lo que el desplazamiento medido del abanico es $1,2 \pm 0,2$ km, sugiriendo deslizamiento lateral derecho.

Catálogos sísmicos

Fueron revisados los registros de cuatro agencias sísmicas para los eventos ocurridos el 19 de septiembre de 2011: los registros de ISC (International Seismological Centre), NEIC (National Earthquake Information Center) y CTM Harvard, y a nivel local, los reportes mensual y anual del INSIVUMEH y del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) del país hermano de El Salvador.

Los datos de ubicación de los epicentros básicamente se trabajaron con el catálogo de la ISC, ya que permite visualizar los parámetros obtenidos de las otras agencias. Los parámetros principales, como magnitud y mecanismo focal, además de los encontrados en el catálogo, fueron complementados por la información de otros organismos, como por ejemplo GFZ (German Research Centre for Geosciences), etc.

Las magnitudes calculadas y hora de origen para los eventos principales de septiembre se listan en la tabla 1.

FECHA	HORA		MAGNITUD	Catálogo ISC
	UTC	Local		
27-08-2011	11:28:09	05:28	5.0 Mw	GCMT
19-09-2011	17:59:54	11:59	5.2 Mw	GCMT
19-09-2011	18:33:55	12:33	5.6 Mw	NEIC, GCMT
19-09-2011	19:17:50	13:17	4.9 Mw	GCMT
19-09-2011	20:30:00	14:30	4.6 Mb	NEIC
20-09-2011	00:22:48	18:22	4.3 Mb	NEIC
20-09-2011	04:28:28	22:28	4.8 Mw	GCMT

Tabla 1. Magnitudes calculadas por las agencias sísmicas.

Esto quiere decir que en dos horas con cincuenta y un minutos (2:51), se dieron cuatro eventos de mediana magnitud durante el día lunes 19 de septiembre, sugiriendo un fenómeno de “triggering”.

Distribución de epicentros sísmicos

A causa del sismo de 1976, que afectó gran parte del país, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) implementa a partir de 1977 la instalación de la red sismográfica nacional, monitoreando y generando desde entonces una importante y valiosa base de datos a nivel local.

Los reportes a nivel de prensa y del Insivumeh, principalmente en el departamento de Santa Rosa, evidencian que la actividad sísmica en esa región es frecuente, de cierta temporalidad, aleatoria y muy local.

Con el objeto de realizar una revisión en el comportamiento temporal de las fases sísmicas críticas, se consulta la base de datos de las Instituciones de investigación incorporadas para la sismología (IRIS, Incorporated Research Institutions for Seismology), debido al limitado acceso que se tuvo de los registros anuales del Insivumeh. El recuento de los episodios sísmicos desde el inicio de la implementación instrumental regional y en Guatemala, para el departamento de Santa Rosa, se lista y ordena en la siguiente tabla.

Periodo	Fecha de evento principal	Localidad (es)	Magnitud máxima (Mw)
Agosto de 1979 - Marzo de 1980	09-10-1979	Suroeste de Chuchupa	5
Marzo de 1989	14-03-1989	San Juan Tecuaco	4,6
Enero - Julio de 1992	02-07-1992	La Sorpresa, norte de Moyuta	3,8
Octubre - Diciembre de 1992	14-11-1992	Santa María Ixhutatán	2,6
Enero de 1993	16-01-1993	Norte de San Juan Tecuaco	3,4
Abril - Noviembre de 1993	19-04-1993	El Pinito	4,4
Mayo de 1994	02-05-1994	El Molino	4,7
Noviembre de 1996	06-11-1996	Oeste de Sta M. Ixhutatán	4,3
Agosto de 2002	09-08-2002	Media Legua	3,6
Marzo de 2004	20-03-2004	Media Legua	3,9
Enero de 2006	21-01-2006	Las Escobas	3,8
Julio de 2011 - Enero de 2012	19-09-2011	Media Legua, Santa María Ixhutatán, Cuilapa	5,6

Tabla 2. Episodios sísmicos dentro del contexto del área de estudio.

El recuento en las crisis sísmicas muestra que hay varias, pero resaltan 3 y se han producido en los años 1979-1980, 1993 y 2011, con temporalidad de 7 a 8 meses máximo.

La distribución espacial de los epicentros ocurridos en los años 1993, 2007, 2011 y 2012 (Insivumeh, SNET) cubren un área que comprende las localidades de Santa María Ixhutatán, Media Legua, Las Ánimas (Cerro Los Esclavos), Cuilapa, Barberena, El Zarzal, esta última del municipio de Oratorio (Figura 1a). Otro conjunto de epicentros se centra hacia la localidad de San Juan Tecuaco y sector de Moyuta y

corresponden a sismos con una profundidad $\leq 16,5$ km en el caso de SNET y ≤ 45 km en el caso del Insivumeh.

Así mismo, los resultados epicentrales provenientes de las agencias NEIC, ISC, GCTM y GFZ se han geo-referenciado y plasmado en un mapa (Figura 1b), junto a los obtenidos por el Insivumeh en el 2011. La fase sísmica

de 2011 inicia el 21 de julio de 2011, con una magnitud de 2,4 a una profundidad de 11.3 km. Los registros obtenidos de SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales) de El Salvador, para este enjambre sísmico se reportan desde el 23 de julio con una magnitud de 3,7.

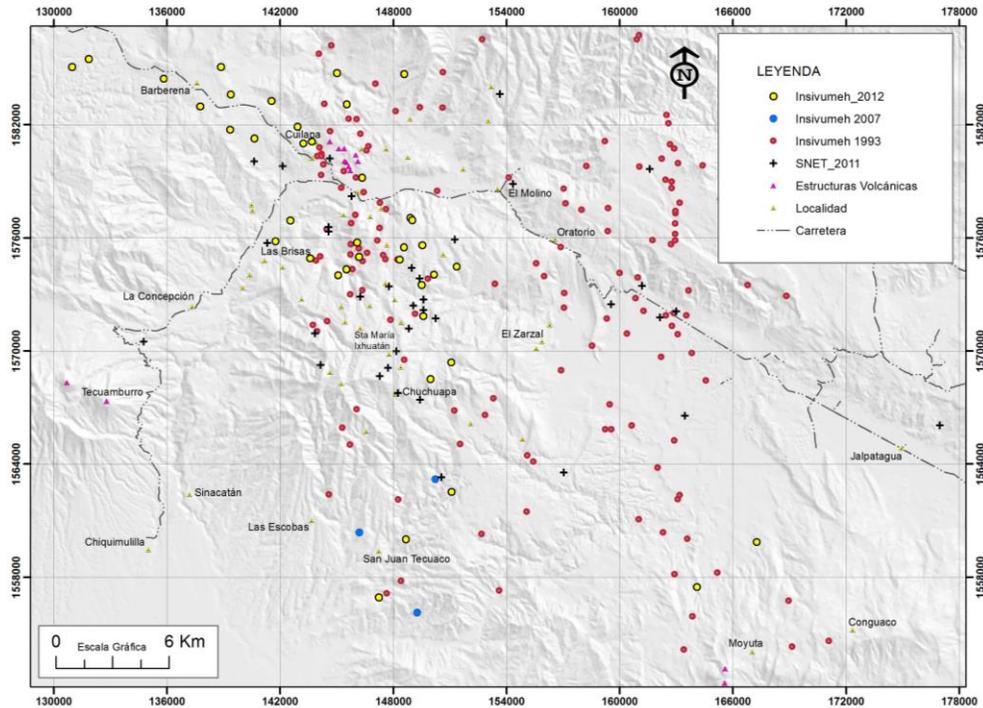


Figura 1a. Distribución espacial de los epicentros calculados por el Insivumeh y SNET, para los años 1993, 2007, 2011 y 2012.

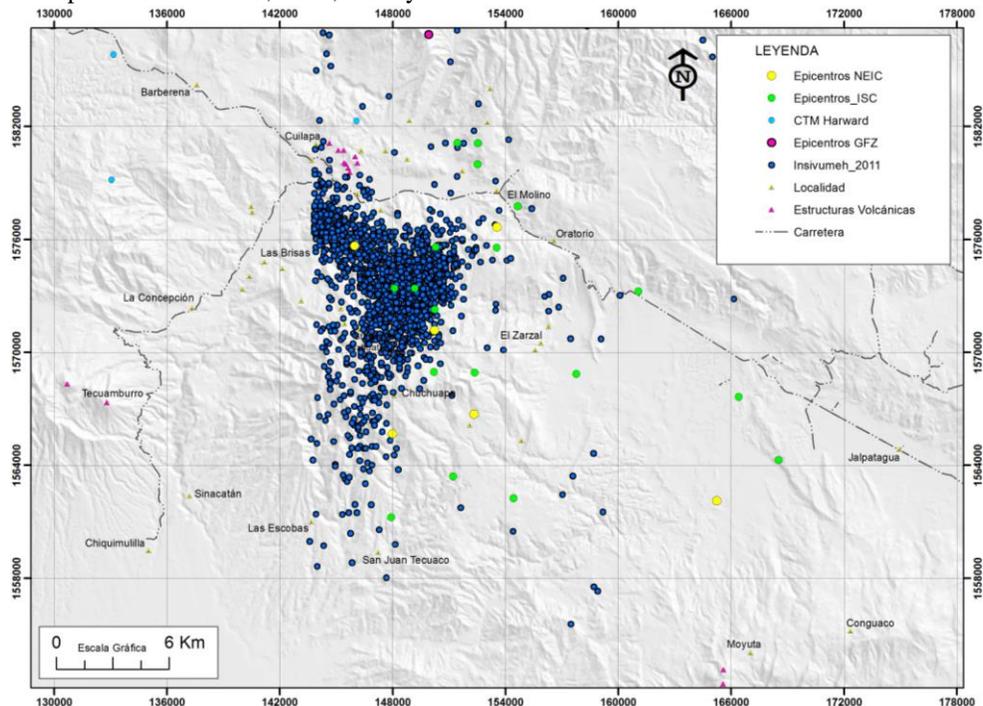


Figura 1b. Distribución epicentral de las diferentes agencias internacionales e Insivumeh 2011. Santa Rosa.

Para el día lunes 19 se reportan cuatro sismos sensibles en las siguientes horas: 11:59, 12:33, 13:17 y el último a las 14:30. El segundo evento el más sensible tuvo una magnitud (Ms) de 4,9 (Insivumeh, 2011). Para el martes 20, se sucedieron 2 sismos, siempre dentro del área de influencia.

Análisis del mapa SRTM – DEM e interpretación morfoestructural

El mapa resultante del estudio del modelo de elevación del terreno y las fotografías aéreas digitales denotan la ocurrencia de patrones estructurales predominantes al NW-SE y N-S. En menor proporción los de tendencia NE-SW y E-W.

El resultado se contrasta con los datos de epicentros sísmicos y se proponen algunas trazas de fallas activas, considerando el sector frecuentemente afectado por dichas series sísmicas.

La Falla de Jalpatagua es la estructura de mayor relevancia dentro de la zona. Configura una depresión de tendencia N60W, donde se ubica la localidad de Jalpatagua. Dicho rasgo estructural es discontinuo entre las localidades de Jalpatagua, El Jocotillo, Oratorio y Barberena, dividiendo la traza en tres segmentos de falla. En el límite de estos segmentos se han desarrollado dos zonas de inflexión, ubicadas entre las comunidades de El Jocotillo y Cuilapa (Figura 2). En los límites de las zonas de inflexión, se conservan dos segmentos (N63W) de $\pm 6,30$ y $\pm 4,40$ km de largo, ubicados entre las localidades del Oratorio y Barberena, respectivamente (Figura 2). En ambos sitios (Barberena y Oratorio) se bifurcan lineamientos paralelos con dirección S35E / N35W, identificados como falla Corralitos y El Molino (Figura 2), separados $\pm 8,75$ km.

Bajo esta geometría, informalmente se ha dividido la falla de Jalpatagua (FJ) en tres segmentos: Jalpatagua este (FJe) entre las localidades de Jalpatagua y El Jocotillo (Figura 2); FJ central (FJc) desde Barberena hasta Río La Vega, y FJ oeste (FJo) que incluye los segmentos de fallas al oeste de Amatitlán y sur de ciudad Guatemala.

Tres sectores, con rasgos estructurales N-S sobresalientes, se ubican en el volcán Cruz Quemada de 1.690 msnm, El Zarzal y Chiquimulilla (Figura 2).

Las dos trazas N-S en la localidad de Santa María Ixhuatán son nombradas, una al oeste como falla Los Esclavos y la otra al este como falla La Fila. Entre las dos fallas anteriores se ubica un segmento lineal que identificado como Ixhuatán (Figura 2).

La actividad neotectónica de fallas se establece mediante criterios tales como la correlación entre traza de falla y situación de epicentros de terremotos, o la coherencia de mecanismos focales y régimen de movimiento en la falla (Vallejos et al., 2002).

Observando la distribución de los epicentros (Insivumeh, SNET) es posible reconocer cierto patrón sísmico, considerando densidad, distribución y alineación. Estos denotan arreglo N-S y NW-SE principalmente (Figura 1a y 1b). Este resultado (distribución, arreglo y recurrencia) en cierta medida fue la base para proponer en primera instancia los rasgos morfoestructurales activos sísmicamente o con actividad neotectónica (Figura 2), los que se describen a continuación.

- Fallas Los Esclavos y La Fila

Estructuras N-S se inician desde el cerro Los Esclavos (Las Ánimas) y se prolongan hasta Las Escobas y San Juan Tecuaco. Morfológicamente representan un alto estructural cuya longitud es de $\pm 10,64$ km, con quiebres entre las comunidades de Media Legua y Laguna San José.

Ambas fallas marcan una franja intermedia de unos 2,5 km de ancho, zona donde se ubica el municipio de Santa María Ixhuatán (Figura 2).

Estas dos estructuras conforman una estructura tipo horts pudiendo corresponder al límite más al este del graben de Tecuamburro propuesta por Duffield, W. et al. (1992) y refieren a esta zona como las tierras altas de Ixhuatán.

A lo largo de la falla Los Esclavos es frecuente la presencia de facetas triangulares, las cuales sugieren buzamiento hacia el oeste, principalmente en las localidades de Las Ánimas y Pineda.

A lo largo de la falla La Fila es evidente la formación de pequeñas cadenas de colinas elongadas N-S, que forman la parte superior de la cuenca del río El Barro que drena al este, formando un importante abanico aluvial cerca a otro lineamiento N-S, que se describe más adelante (falla Ixte). La cadena de cerros alineados presenta una pequeña curvatura en su traza que resulta muy evidente geomorfológicamente.

Se le interpreta una inclinación del plano de falla hacia el este. Su límite sur se ubica justo en la comunidad de Chuchuapa, donde es interceptada por otras trazas de estructuras N60W. Su extremo norte parece acomodarse a través de estructuras NW-SE, que afectan el sector donde se ubica Cuilapa (Figura 2). En su conjunto (Los Esclavos y La Fila) parece formar una estructura tipo lomo en gancho, evidenciando una importante zona de deformación.

- Falla Ixhuatán

Se encuentra inmediatamente al norte de Santa María Ixhuatán y representa un segmento estructural particular entre las fallas La Fila y Los Esclavos (Figura 2).

Su traza posee una dirección N27W y una longitud de 5,45 km. Se proyecta a lo largo de la quebrada Honda, que forma parte del río Los Apantes que drena hacia el noroeste.

Esta traza se localiza entre los kilómetros 81 y 82 de la ruta a Santa María Ixhuatán.

En su extremo sureste, exactamente a partir de la localidad de Media Legua, su configuración denota un arreglo en echelon.

- Falla Chuchuapa

Está conformada por una serie de trazas paralelas a subparalelas con dirección N55W. Tres rasgos sobresalen a lo largo de la zona de ubicación de los poblados del Manacal, Pineda, El Irayol, quebrada Ojo de Agua y a través del río Aguacinapa (Figura 2).

Por el aspecto que muestran las laderas, es probable que el sentido de inclinación del plano de falla sea hacia el suroeste. A lo largo de dichas trazas se evidencia un relativo desplazamiento de tipo dextral de algunas estructuras, principalmente en los alrededores de la localidad de Pineda.

Los rasgos estructurales principales con dirección N55W se encuentran subparalelos a la traza de la Falla de Jalpatagua este, ubicado hacia el noreste a una distancia de $\pm 11,54$ km (Figura 2).

En su extremo sureste da paso a una depresión tectónica que se ha identificado como el graben de Moyuta, cuyo valle axial es N-S (Figura 2).

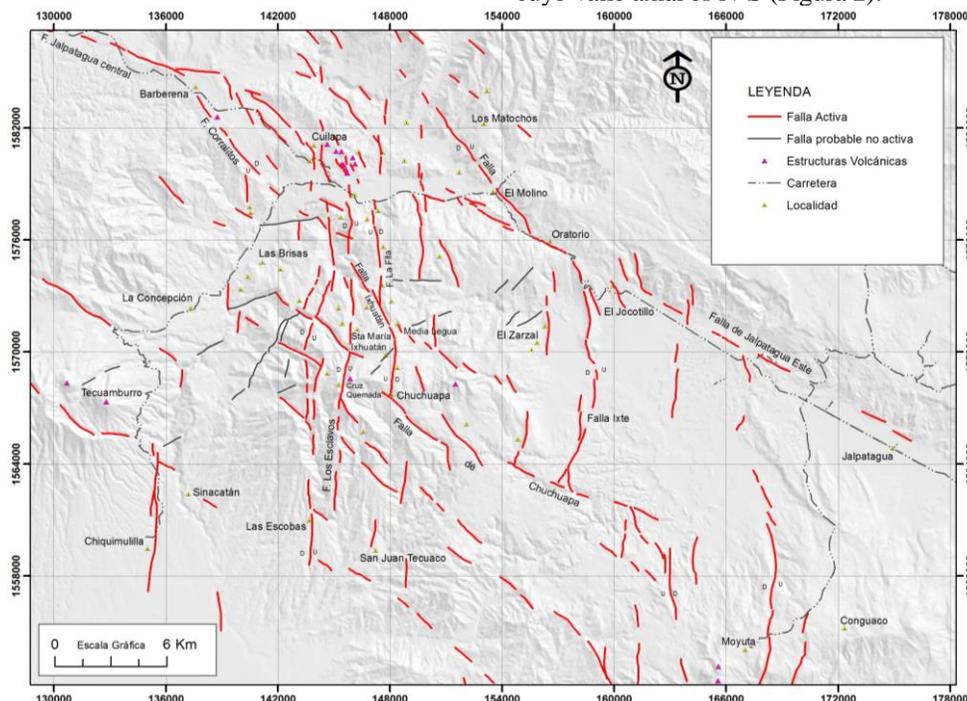


Figura 2. Mapa estructural simplificado para las principales fallas activas dentro del contexto de Santa María Ixhuatán y Cuilapa, Oratorio, departamento de Santa Rosa.

- Falla Ixte

Inicia de una traza N63W (Falla de Jalpatagua este), donde se ubica la comunidad de El Jocotillo y se proyecta hacia el sur, en donde, los cauces de los ríos El Barro, Almendro, Caparrosa e Ixte poseen un control estructural. Su configuración denota un buzamiento hacia el oeste.

Al sur dicha traza de falla es limitada por un rasgo de rumbo N50W, que ha sido nombrado Falla de Chuchuapa. Tanto en su borde este como en el oeste actualmente se produce una importante sedimentación debido a la presencia de varios abanicos aluviales. Creemos que esta falla junto a la falla La Fila crean un sistema conjugado, denotando una depresión tectónica.

- Fallas El Molino y Corralito

Inician a partir de una estructura con rumbo N63W, (Falla Jalpatagua), muy cercana al poblado del Oratorio y Barberena.

La estructura El Molino exhibe una dirección de N35W, proyectándose hacia las comunidades de El Molino, El Cielito y Los Matochos. Se ha interpretado una inclinación de la estructura con dirección SW. Otro segmento estructural paralelo fue identificado como Corralitos, ubicado al oeste de Cuilapa y donde el plano de discontinuidad inclina posiblemente hacia el NE (Figura 2).

Su configuración muestra la presencia de una depresión “graben de Cuilapa”, cuyo valle axial posee un rumbo hacia el N35W y donde parte del cauce del río Los Esclavos drena hacia el sur.

Mecanismo focal y patrón sísmico local

Los mecanismos focales son una representación gráfica que muestra zonas en compresión y tensión (eje P/T), limitadas por dos planos nodales, donde uno de ellos representa la estructura sismogénica en el campo.

Los patrones sísmicos, resultantes de los mecanismos focales obtenidos por GCMT a lo largo de la zona de falla de Jalpatagua, refieren mecanismos de tipo transcurrente de movimiento dextral. La traza de falla supuesta posee una orientación y cabeceo de N65W/82SW e02W, considerando uno de los dos planos nodales resultantes (Tabla 2).

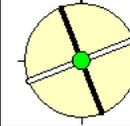
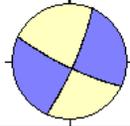
Agencia	Dirección SHmax	SHmax y Shmin(*)	Modelo dinámico local y regional
GCMT, Harvard, año 2006	N339		

Tabla 2. Resultados de SHmax y Shmin obtenidos para la zona de falla de Jalpatagua sector este. Dirección de SHmax y Shmin en líneas negras y blancas respectivamente (*).

Los mecanismos resultantes para la serie sísmica del 2011 muestran diferencias geométricas y de dirección estructural distintas a la zona de falla de Jalpatagua en toda su extensión (Figura 3, Tabla 3), que posee una dirección N63W, por lo que la sismicidad del 2011 no está ligada a dicha estructura.

Se ha procedido a proyectar estereográficamente los datos de los mecanismos focales con los parámetros encontrados en el catálogo ISC, considerando cada plano nodal, generado por dichas agencias (NEIC, GCTM, GFZ), (Tabla 3). Además de los mecanismos focales de septiembre de 2011, se ha agregado la del evento del 27 de agosto de 2011 (Tabla 3).

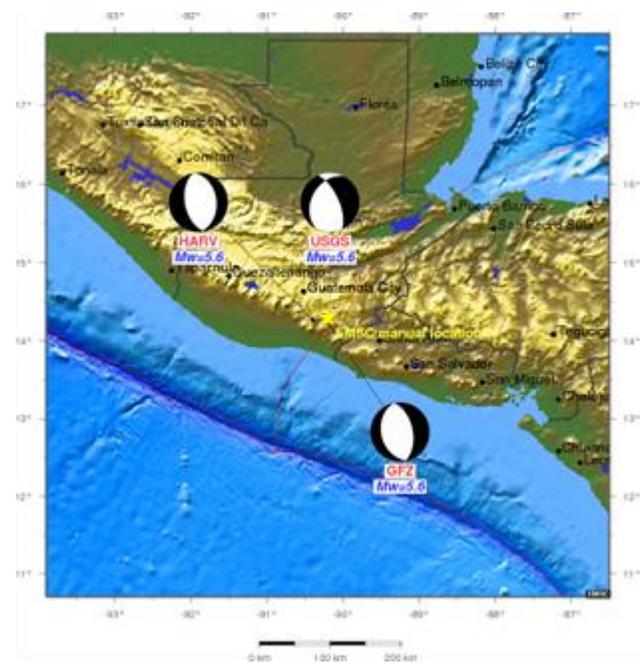


Figura 3. Mecanismos focales del evento sísmico del 19 de septiembre de 2011, región de Santa Rosa, según European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC).

Mecanismo Focal Agencia	Parámetros de plano nodal	Proyección estereográfica
GCMT	N002, 48, -072 N157, 45, -109	
NEIC	N336, 66, -119 N209, 37, -043	
GCMT	N173, 49, -089 N351, 42, -092	
GCMT	N147, 47, -103 N346, 44, -076	
GCMT	N013, 58, -044 N131, 54, -139	
GCMT	N017, 54, -050 N142, 51, -132	
GFZ	N167, 36, -92 N351, 54, -87	

Tabla 3. Mecanismos focales a partir de parámetros encontrados en el catálogo ISC y GFZ, utilizando Win-Tensor.

Evidencia macrosísmica y registro histórico

Atrae la atención, el evento sísmico del año 1870 (Galvan, 1870; en H. F. Lawrence, 1988). La sismicidad inicia el 14 de abril y se prolonga hasta el 12 de mayo, fecha en la que realiza y termina su registro. Se entiende bajo esta narración que se dieron dos movimientos importantes, uno el 3 y otro el 12 de mayo. El primero sucedió a las cuatro y media de la mañana y el otro a las tres de la tarde, evento en que se escuchó un “retumbo” previo al sismo principal que afectó la catedral de Cuilapa. Se narra que tanto la portada de la iglesia, mojinete de la capilla, los arcos de la sacristía y todo el techo se derrumbaron. Así mismo, “todas las casas de teja de los particulares se arruinaron y algunos de adobe se desplomaron”.

A este mismo evento del 12 de mayo se le agrega que los cercos de piedra se cayeron. Se añade además que los cerros Ixhuatán (Izguatán), Los Esclavos y probablemente los dos cerros en donde se ubica Cuilapa (Cuajiniquilapa) sufrieron movimiento importante. Con respecto a las vías de acceso, se reporta que en la ruta entre Laguna Verde a Sinacatán quedó imposibilitado el paso, incluso a pie. Así mismo, la ruta de Concepción a Tecuamburro quedó completamente cerrada. También se menciona que “algunos pobladores creen que el foco de los temblores se ubica en

Tecuamburro y otros en Moyuta, porque en las inmediaciones de esos volcanes se ha llevado una verdadera catástrofe, ya que ha echado por tierra los grandes árboles y las peñas” (Galván, 1870).

Por otra parte, Sapper, K., (1925) reporta 45 años después que, para el evento 1870, desde el 14 de abril hasta el 14 junio, se dio una serie de temblores en Guatemala. Agrega que, durante ese lapso de tiempo, específicamente el 12 de junio a las 15 horas, se originó un terremoto destructor en Chiquimulilla. También agrega que, desde el 18 hasta el 23 de junio, se dio una serie de temblores en Cuajiniquilapa (Cuilapa).

Esto conduce a inferir que desde el 14 de abril hasta el 23 de junio, por lo menos los sismos persistían en la zona. Llama la atención que ambos registros tengan en común el día y hora para el principal evento, pero diferente mes. Probablemente la fecha corresponda a 12 de mayo, en la cual a las 15 horas se dio el evento de mayor magnitud (probablemente ≥ 6) que afectó tanto al poblado de Chiquimulilla como a Cuilapa (Cuajiniquilapa).

El terremoto de Guatemala de 1913 ocurrió el día sábado 8 de marzo y tuvo una magnitud (Ms) de 6,4; azotó al territorio de Santa Rosa, destruyendo a la cabecera departamental, Cuilapa (Ambraseys, N. et al., 2001). Se indica, además, el desarrollo de una grieta de grandes dimensiones en el Cerro Los Esclavos. Dentro de este sector se ubica la comunidad de Las Ánimas, donde murió soterrada una persona por un deslizamiento en el año 2011.

Por otra parte, Sapper, K. (1925) reporta que en 1861 a finales de abril, se sucedieron una serie de temblores en Conguaco y Jalpatagua.

Así mismo, IRIS en 1976 y 1979, tiene reportados dos eventos de igual magnitud (de 5 Mb cada uno) y a profundidades de 53,1 y 33 km respectivamente. Al terremoto del 9 de octubre de 1979 se le ha nombrado el evento de San Juan Tecuaco (ESJT), ya que se tiene reportado que dicho terremoto destruyó muchas construcciones en ese poblado.

El registro histórico evidencia que las series sísmicas (evento principal y réplicas) han afectado frecuentemente el área de Santa María Ixhuatán, Cuilapa, Chiquimulilla y Oratorio, así mismo que las fallas Ixhuatán, Los Esclavos, La Fila y Chuchupa han estado activas sísmicamente y que el comportamiento, distribución espacial de epicentros y zona de afectación ocurren de igual forma que en la actualidad.

Esfuerzo actual de los mecanismos focales sísmicos

Se ha revisado la información que se tiene del mapa mundial de esfuerzo (World Stress Map, 2006) y de los catálogos sísmicos citados anteriormente.

La geometría y cinemática de los mecanismos focales resultantes para la zona de falla de Jalpatagua denotan que el régimen tectónico es de tipo transcurrente, específicamente de movimiento lateral derecho (dextral), según GCMT.

Los mecanismos focales (MF) relacionados a la falla de Jalpatagua y los que se obtuvieron para la serie sísmica 2011 difieren, por lo que puede deducirse que los movimientos se dieron a lo largo de otros patrones estructurales, con variaciones en la geometría y cinemática.

Las direcciones medias de SHmax y Shmin obtenidas de la inversión de esfuerzo, utilizando Win-Tensor, resultan en dirección N170 y N080, respectivamente. Mayormente la dirección del eje en tensión es E-W (Tabla 4).

Análisis de Paleoesfuerzo a partir de datos de deslizamientos de fallas geológicas

Algunos patrones de fallamiento se han identificado y orientado a lo largo de la zona cubierta. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla.

Por otra parte, se han orientado los planos de fallas con evidencia de desplazamiento de capas (Figura 4a y 4c). Mayormente dichos movimientos relativos son de tipo normal.

Así mismo, se representa estereográficamente la proyección de las fracturas (Figura 4b y 4d) y los patrones preferenciales definen dos direcciones NW- SE y N-S, con ángulos de buzamiento mayores a 60°. Las direcciones obtenidas de la cartografía de lineamientos son compatibles

con la mayoría de dichas discontinuidades medidas en los afloramientos.

Los resultados del esfuerzo horizontal máximo y mínimo son compatibles, en su mayor parte, con los mecanismos focales obtenidos para el año 2011 y conforme a los patrones de lineamientos cartografiados (Figura 2).

Agencia- Fecha	Ejes principales			SHmax	Shmin
	T	N	P		
GCMT-19-09-2011	01/N080	13/N170	77/N344	N170	N080
NEIC-19-09-2011	16/N086	26/N349	59/N205	N003	N093
GCMT-19-09-2011	04/N262	01/N352	86/N099	N172	N082
GCMT-19-09-2011	01/N246	10/N156	80/N344	N156	N066
GCMT-20-09-2011	02/N073	37/N165	53/N340	N162	N072
GCMT-27-08-2011	02/N080	31/N171	59/N347	N169	N079
GFZ 19-09-2011	09/N079	02/N169	81/N270	N169	N079

Tabla 4. Orientación de los principales ejes de deformación y dirección del esfuerzo horizontal máximo y mínimo.

Algunos patrones de fallamiento se han identificado y orientado a lo largo de la zona cubierta. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla.

Datos de falla	Clasificación de Falla	SHmax Shmin	Roca	Diagrama P/T resultante
N148/78SW e60N	ND	N003 N093	Tob y Te-Al	
N136/59E e80SE	NP	N145 N55	Tob y Te-Al	
N040/50W e14SW N035/75W e12SW	DI DI	N085 N175	Gr, Di	
N110/65W e64W N104/59W e52W	ND ND	N135 N045	----	

Tabla 5. Tipos de fallas y diagrama P/T resultantes utilizando Win-Tensor. Toba y terraza aluvial (Tob, Te-Al), Granito y diabasa (Gr, Di). P=Presión, T=Tensión.

Por otra parte, se han orientado los planos de fallas con evidencia de desplazamiento de capas (Figura 4a y 4c). Mayormente dichos movimientos relativos son de tipo normal.

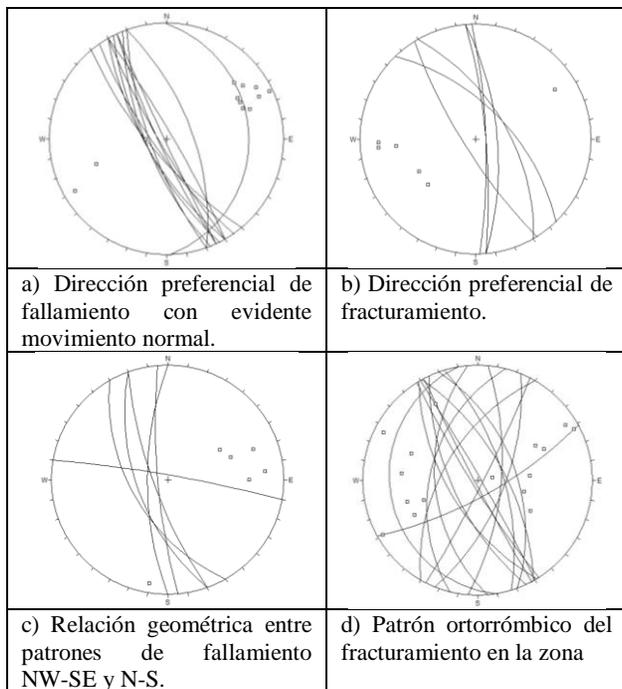


Figura 4. Patrones de fracturamiento dentro de la zona de estudio

Discusión

Se han determinado cuatro sistemas estructurales como fuentes sísmogénicas, cuyo estilo estructural parece conformar una “zona de transferencia” (ZT) de $\pm 11,5$ km de ancho, donde a lo largo de ellas se desarrolla importante deformación y desplazamiento (Figura 5). Esta zona se encuentra limitada por dos estructuras identificadas como Jalpatagua central y Chuchuapa, que buzando en el mismo sentido. Actualmente y en su historial, dicha zona representa un área sísmicamente activa con probable $M_w \geq 6,0$ (Tabla 4, Figura 5).

Las tierras altas de Ixhuatán representan un alto estructural, limitado al oeste por una familia de fallas escalonadas con dirección N-S con buzamientos $\geq 60^\circ$ al oeste nombrados falla Los Esclavos; hacia el este, por una falla de igual dirección, pero de pendiente opuesta, llamada Falla La Fila. Dicho terreno topográficamente elevado posee ± 21 km de largo y de 1,60 a 2,50 km de ancho, en cuyo centro se encuentra el volcán inactivo Cruz Quemada, de 1.690 m de altura (Figura 5).

La falla de Ixhuatán de tendencia N25W, por su geometría y cinemática, consideramos que funciona como

una falla de transferencia importante entre las fallas Los Esclavos y la Fila, hasta el punto de considerarla como la responsable de haberlas reactivado. La actividad sísmica se extendió tanto al norte, centro y al sur de la zona de transferencia (ZT). Hacia el norte, consideramos que la sísmicidad se centró a lo largo de unas pequeñas depresiones topográficas de tendencia NW-SE (Graben de Cuilapa). Los límites de esta depresión están definidos por dos estructuras, fallas El Molino y Corralitos (Figura 5). Por su configuración, esto denota la presencia de una zona en transtensión de $\pm 9,00$ km de ancho, donde se encuentran varios conos volcánicos (Figura 5).

Al sur, parece ser que la sísmicidad ocurrió a lo largo de varias estructuras sub-paralelas, sobresaliendo entre ellos la falla de Chuchuapa, sector donde se ubican los poblados de las Escobas y San Juan Tecuaco. Además, consideramos que el límite sur de las fallas los Esclavos y la Fila, se da a lo largo de estas estructuras NW SE.

El terremoto de $M_w 5,6$ provocó numerosos daños en la infraestructura y pérdida de vidas humanas y fue precedido en el mismo día por otro de $M_w 5,2$, seguido de varias réplicas siendo la mayor de $M_w 4,9$. El premonitor, que se originó a las 11:59 a.m. hora local, produjo la primera pérdida humana en la localidad de Las Ánimas, a causa de un deslizamiento que ocurrió en la ladera oeste del cerro Los Esclavos. Por lo visto, sigue siendo un referente actual e histórico en la sísmicidad del área.

Los modelos generados de mecanismos focales por GCMT, NEIC y GFZ, para el evento de $M_w 5,6$ (Tabla 6), a nuestro criterio pueden corresponder a las fallas Los Esclavos, La Fila e Ixhuatán, si consideramos el tiempo de origen y tendencia estructural local (Tabla 6, Figura 5).

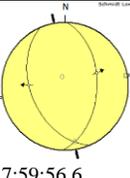
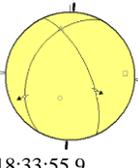
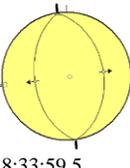
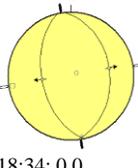
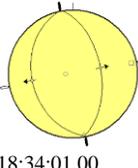
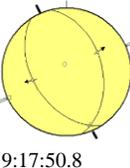
Fecha	Mag	USGS-NEIC	GCMT	GFZ
2011/09/19	Mw 5,2		 17:59:56.6	
	Mw 5,6	 18:33:55.9	 18:33:59.5	 18:34:0.0
				 18:34:01.00
	Mw 4,9		 19:17:50.8	

Tabla 6. Estereogramas mostrando las orientaciones de planos nodales y respectivos cabeceos teóricos, según base de datos del catálogo ISC y GFZ (GeoForschungsZentrum).

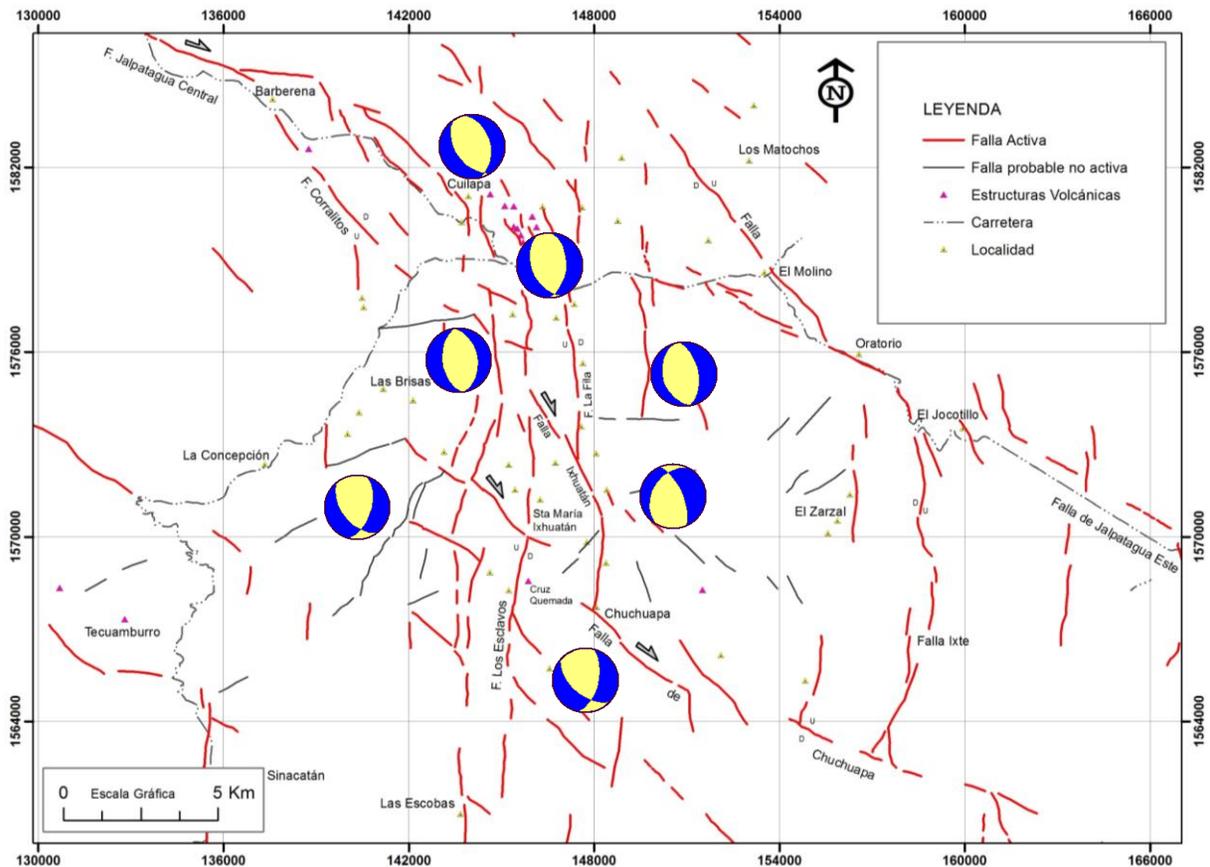


Figura 5. Mecanismos focales sísmicos y su relación con los principales rasgos estructurales.

Considerando el régimen tectónico local (zona de Jalpatagua), desplazamiento de elementos geomorfológicos, se plantea la geometría de los planos de fallas sismogénicas según la solución de mecanismos focales (Tabla 7).

La falla de Ixhuatán de tipo normal dextral, consideramos que interactúa entre dos segmentos de fallas N-S, conjugadas de tipo normal, con dirección de extensión al E-W. Estas dos estructuras paralelas conforman el alto estructural (horst), que correspondería con las tierras altas de Ixhuatán (Duffield, W. A. et al., 1992), y como parte del graben de Tecuamburo.

Nombre de la falla	Orientación y elemento de falla	Mecanismo focal
Los Esclavos	N07W/49W e89SW	
Ixhuatán	N24W/66E e61SE	
La Fila	N09W/54E e87NE	
Chuchuapa	N49W/54SW e41NW	
Graben de Cuilapa (F. El Molino)	N33W/47S e77NW	

Tabla 7. Orientación de planos de fallas sismogénicas para la región estudiada.

El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) calcula un valor de VII en la escala de Mercalli, en Cuilapa, durante el evento principal. Las zonas con mayor daño a las viviendas se ubican en los poblados de Media Legua, Cuilapa y El Zarzal. Debido a que el punto de origen, tanto del evento principal como de las réplicas, fue muy superficial, los daños a la infraestructura fueron evidentes principalmente en las viviendas de adobe (Tabla 8).

Municipio	Comunidades afectadas	Viviendas destruidas
Cuilapa	20	164
Santa María	8	153
Ixhuatán		
Oratorio	2	43
Total de viviendas destruidas		360

Tabla 8. Número de viviendas afectadas por el evento sísmico 2011. Fuente: Cárita de Guatemala, 2011.

En los últimos 32 años (1979-2011), se han registrado tres series sísmicas con duración de entre 7 y 8 meses máximo, pero según el registro, los del año 2011 han sido mayores de Mw 5,0, con una profundidad ≤ 45 km. Dichas series inician con unos sismos, luego su número se incrementa hasta alcanzar el máximo número y luego desaparece gradualmente (Figura 6a). La actividad sísmica puede durar de unos días a meses y sus efectos están comúnmente limitados a una pequeña área.

Con respecto a la profundidad de los sismos, su comportamiento general parece reflejarse durante los 7 meses que duró la sismicidad en el área; estas fueron más someras al final (≤ 15 km), por lo que la mayoría se produjo en la zona de nivel frágil (Figura 6b).

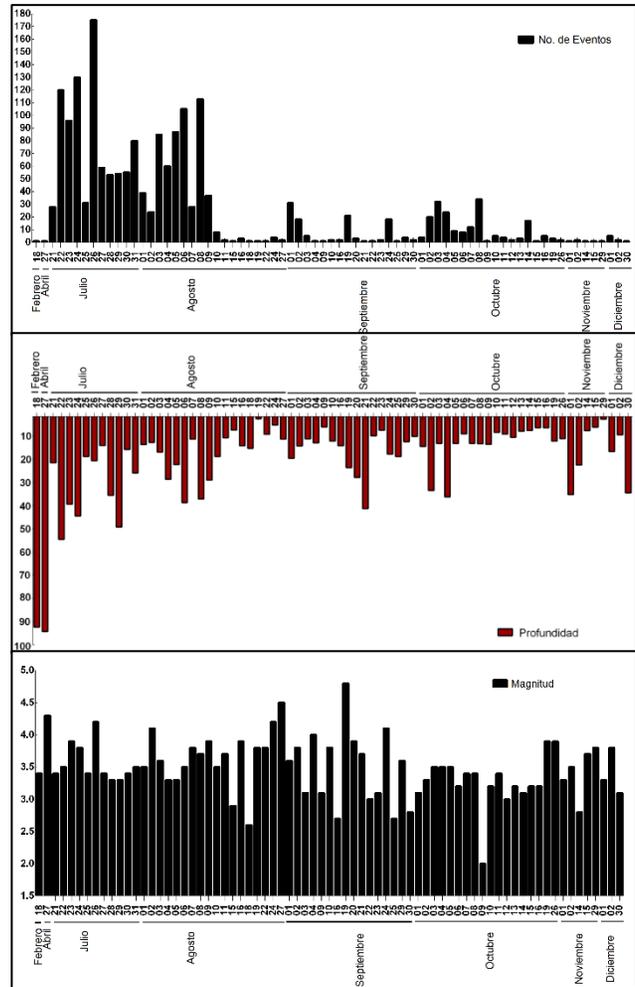


Figura 6. Comportamiento temporal de la sismicidad según base datos Insivumeh 2011. En caso de la magnitud muestra el comportamiento considerando la mayor magnitud que se dio en el día.

En cuanto a su magnitud, resulta mayor al final de la serie, aunque esto no es una regla.

Se utiliza la herramienta 3D view de IRIS, con la finalidad de visualizar la proyección y existencia de los planos de falla en el subsuelo, de la falla Ixhuatán (Figura 7a) y Los Esclavos (Figura 7b). Para el caso de la falla Los Esclavos se forma una nube de hipocentros más extensa y proyección más larga, caso contrario al de Ixhuatán.

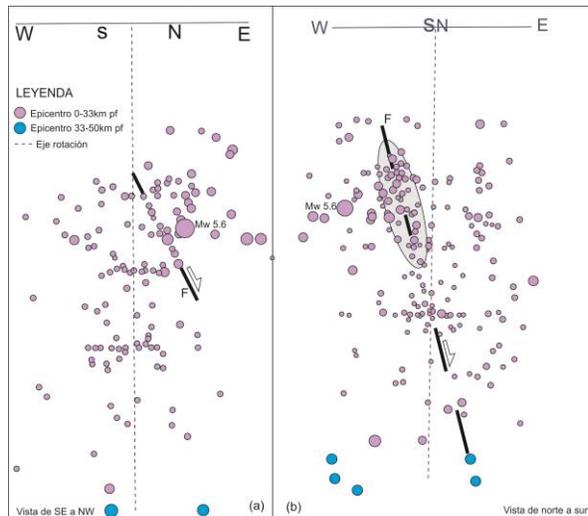


Figura 7. Perfil esquemático de la probable inclinación del fallamiento.

Conclusiones

En la historia del registro instrumental para la zona sureste de Guatemala, se tiene evidenciado por lo menos 3 crisis sísmicas, considerando su temporalidad, frecuencia, magnitud y área de afectación. Los eventos sísmicos de los años 1870 y 1930 parecen comportarse de la misma manera.

Dichas crisis se han originado en los años 1979-1980, 1993 y 2011, todos relacionados con las áreas de Santa María Ixhuatán, Cuilapa y Oratorio. La actividad sísmica, considerando los últimos 34 años, ha estado relacionada a las fallas sismogénicas que aquí se proponen. La más fuerte ocurrió en 2011 y alcanzó los 5,6 grados en la escala de Richter, causando daños a la infraestructura (viviendas) y pérdida de vidas humanas.

Desde el punto de vista de la tectónica local, la serie sísmica 2011 se sitúa en la terminación entre dos segmentos principales de fallas: Jalpatagua central y Chuchupa.

Se han identificado 5 segmentos estructurales (fallas El Molino, Ixhuatán, Los Esclavos, La Fila y Chuchupa) como fuentes sismogénicas activas cuyas longitudes varían y se interrelacionan, lo cual hace que se reactiven según se deslicen tanto bajo un régimen transtensivo como extensivo (Figura 8). Las fallas de Jalpatagua central (FJc) y Chuchupa (FC) funcionan como fallas de transferencia. Dentro del sector donde estas estructuras interactúan, geomorfológicamente se observan indicadores como lomos en gancho, divisorias desplazadas, sillas de falla (notch), abanicos desplazados, evidenciando movimiento relativo de tipo dextral.

Entre la falla FJc y la FC se forma una “zona de transferencia” con fallas activas. Según el arreglo geométrico que exhiben las dos estructuras (FJc y FC) definen un salto a la derecha. El estado de esfuerzos en la vecindad de las colas

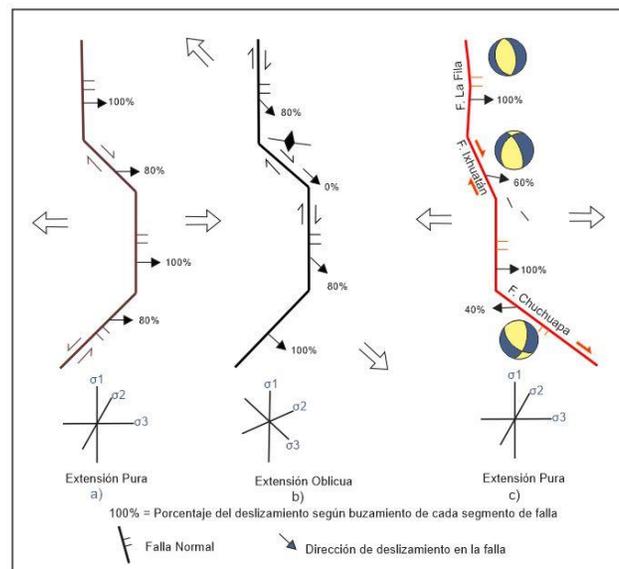


Figura 8. Cinemática resultante debido al cambio en dirección del campo de extensión. a y b) Según C.K. Morley, 1995. c) Caso en este estudio.

de estas fallas indica que están sometidas a tensión. Dentro de la zona de transferencia (ZT), se identifica un sistema conjugado N-S: fallas Los Esclavos y La Fila representan segmentos de fallas activas de $\pm 12,0$ a $20,0$ km de longitud, con movimiento normal, ambas afectadas por la falla de Ixhuatán (65°), que se considera como una falla de transferencia (Figura 5). Consideramos que la estructura Los

Esclavos buza hacia el oeste, aproximadamente 75° , y representa el borde este del graben de Tecuamburo.

Por otra parte, la estructura La Fila forma parte del borde oeste del graben del río El Barro, junto con la falla Ixte, definiendo una extensión E-W local (Figura 5).

Los resultados de los mecanismos focales reflejan que el estilo estructural de numerosas discontinuidades se encuentra en algunos casos bajo un régimen extensivo, y en otros, transtensivo (tipo mixto).

Referencias bibliográficas

Álvarez-Gómez, J. A. (2009). *Tectónica Activa y Geodinámica en el Norte de Centroamérica*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Ambraseys, N.; Adams, R. A. (2001). *The Seismicity of Central America; a descriptive catalogue 1898-1995* (en inglés). World Scientific. p. 309. ISBN 9781860942440.

Angelier, J. and Mechler, P. (1977). *Sur une method graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des diedres droits*, Bull. Soc. geol. Fr., 7, 6, 1309-1318.

Authemayou, C. et al. (2012). *Quaternary seismo-tectonic activity of the Polochic Fault, Guatemala*. Journal of Geophysical Research-Solid Earth 117, doi: 10.1029/2012jb009444.

Authemayou, C.; Brocard, G.; Teyssier, C.; Simon-Labric, T.; Gutiérrez, A.; Chiquín, E. N., and Morán, S. (2011). *The Caribbean–North America–Cocos Triple Junction and the dynamics of the Polochic–Motagua fault systems: Pull-up and zipper models*. Tectonics, 30, TC3010, doi:10.1029/2010TC002814.

Estas fallas principales interactúan permanentemente unas con otras, generando deformación local, por lo que la mayoría de epicentros se centran o se alinean alrededor de ellos, tal como ocurrió en el año 2011.

Agradecimientos

Agradecer a Jorge E. Romero Gramajo, Ricardo Milian, Luis Valiente, por facilitar algunos datos de campo. Los datos provenientes del Insivumeh fueron proporcionados por Dulce María Esther Gonzales D.

Cárta de Guatemala. (2011). *Boletín informativo 08*. Informe de Daños Causados por Desbordamiento de Ríos, Deslaves, Derrumbes y Eventos Sísmicos durante los meses de Agosto-October de 2011.

Carr, M. J. (1976). *Underthrusting and Quaternary Faulting in northern Central America*. Geological Society of America Bulletin, v. 87, p 825-829, Doc. No 60522.

Earth 117, doi: 10.1029/2012jb009444 (2012). *CMT (Centroid Moment Tensor Solutions)*. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (acceso Mayo. 17, 2017).

González, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. Madrid.

Heidbach, O.; Rajabi, M.; Reiter, K.; Ziegler, M. (2016): *World Stress Map 2016*. GFZ. Data Services. <http://doi.org/10.5880/WSM.2016.002>

Heidbach, O.; Rajabi, M.; Reiter, K.; Ziegler, M.; WSM Team. (2016). *World Stress Map Database Release 2016*. GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/WSM.2016.001>

International Seismological Centre. (2014) *On-line Bulletin*. <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seismol. Cent., Thatcham, United Kingdom.

- IRIS. (2011). *International Federation of Digital Seismograph Networks*. Incorporated Research Institutions for Seismology, United States Geological Survey
- Jarvis, A.; Reuter, H. I.; Nelson, A.; Guevara, E. (2008) *Hole-filled SRTM for the globe Version 4*. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Morley, C. K. (1995). *Developments in the structural geology of rifts over the last decade and their impact on hydrocarbon exploration*. In: Lambiase, J. J. (ed) *Hydrocarbon Habitat in Rift Basins*. The Geological Society London, Special Publications 80, pp. 1-32.
- Sapper, K. *Los volcanes de América Central*. Halle (Saale), Verlag Von Max Viemeger 1925. Periodo 1500-1924.
- Staller-Vasquez, A. (2014). *Modelización de las deformaciones corticales en El Salvador (Centroamérica) mediante la integración de datos geodésicos (GPS), geológicos y sísmológicos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Trabant, C.; Hutko, A. R.; Bahavar, M.; Karstens, R.; Ahern, T., and Aster, R. (2012). *Data Products at the IRIS DMC: Stepping Stones for Research and Other Applications*. *Seismological Research Letters*, 83(5), 846–854, doi:10.1785/0220120032.
- <http://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen/>
- <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.as>
- <phttps://maps-for-free.com/#close>
- http://mapas.snet.gob.sv/geologia/consulta_sismos.php?inicio=2010-01-01&fin=2011-12-31&xmi=1509900&xmax=650180&ymin=379804
- <http://elpais.com.sv/sismo-sentido-de-magnitud-4-8-zona-de-chiquimulilla-depto-de-santa-rosa-guatemala/>
- <http://ide.segeplan.gob.gt/geoportal/servicios.html>
- http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_topo.html
- <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/tensors.php?view=384>
- <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/mtfull.php?id=236301&year=2011;INFO>

EVALUACIÓN DEL VALOR NATURAL DE FONDO Y EL UMBRAL CRÍTICO EN AGUAS NATURALES

ASSESSMENT OF BACKGROUND AND THRESHOLD IN NATURAL WATERS

Rudy Machorro Sagastume y David Machorro Sánchez
Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales, ASGA
rudy.machorro@yahoo.com

RESUMEN

Se realiza el análisis de las diferentes metodologías existentes para la determinación del valor natural de fondo (VNF) y del umbral crítico (UC) en aguas naturales con la finalidad de discutir la discriminación entre la contaminación antropogénica y la contaminación natural (geogénica) que se puede presentar en distintos cuerpos de agua. Se revisan las definiciones de VNF (línea de base) y de UC, así como los distintos enfoques metodológicos, incluyendo el geoquímico, el estadístico y el integrado. Los resultados de la investigación se presentan en este artículo.

Independientemente del método seleccionado debe de evaluarse el contexto histórico de la zona, considerando que el componente geológico es el factor más importante que influye en las concentraciones naturales de los elementos. Debe analizarse la variabilidad natural de las concentraciones y la complejidad de los distintos procesos geoquímicos involucrados. Se sugiere que los métodos más prácticos para determinar el VNF y el UC son los diagramas de caja y las gráficas de probabilidad acumulada. Los diagramas de caja se aplican para evaluar valores representativos de VNF y UC para pH, dureza y conductividad eléctrica en un acuífero volcánico Terciario y un acuífero de calizas Cretácicas de Guatemala y se comparan los resultados con la Norma nacional de calidad de agua y los lineamientos de la OMS.

Se concluye que el VNF es representado por un rango de valores menores al tercer cuartil y que el UC puede ser estimado en base al percentil 90 y que debe de realizarse un análisis integrado, incluyendo el uso de la tierra y la hidrogeología, para cada acuífero o cuerpo de agua que sea evaluado con fines de diferenciar entre fuentes geogénicas y antropogénicas de contaminación.

Palabras clave: Valor natural, umbral crítico, calidad de agua, línea de base, acuífero.

ABSTRACT

Different methodologies for the determination of background and threshold in natural waters with the aim to discuss the discrimination between anthropogenic and natural (geogenic) contamination which can be present in different water bodies are analyzed. A review of the definitions for background and threshold is accomplished, as well as the different methodological approaches including geochemical, statistical and integrated methods. Results of the research are as follows.

Irrespective of the methodology, the historical context of the area should be evaluated under the consideration of the geological factor as the most important aspect in controlling the natural concentration of the elements. The natural variability of the concentrations and the complexity of the different geochemical processes should be considered. Box diagrams and cumulative probability diagrams are the most practical methods to determine background and threshold. Box diagrams are applied to evaluate pH, hardness and electrical conductivity in a Tertiary volcanic aquifer and a Cretaceous limestone aquifer in Guatemala comparing results with the National water quality standard and the WHO water quality lineaments.

It is concluded that the background can be estimated based on a range of values lesser than the third quartile and that the threshold can be approximated by the 90th percentile and that an integrated analysis, including land use and hydrogeology, should be undertaken for each aquifer or water body, with the aim to differentiate geogenic and anthropogenic sources of contamination.

Keywords: Background, threshold, water quality, baseline, aquifer.

“El estudio de la química natural de las aguas subterráneas no es simplemente un ejercicio científico. Si no se entiende la composición química inicial de las aguas subterráneas pueden originarse serios problemas ecológicos que lleven a una crisis humanitaria”. Vencelides et al. (2010).

Introducción

La evaluación del valor natural de fondo, VNF, (*background* en idioma inglés) en la geoquímica de aguas naturales es de suma importancia en los estudios de riesgo ambiental y en el establecimiento de niveles de contaminación, particularmente en escenarios donde es necesario diferenciar influencias naturales o geogénicas de influencias antropogénicas.

El término VNF fue usado inicialmente en geoquímica de exploración (Hawkes y Webb, 1962) para diferenciar entre la concentración de un elemento químico en una roca libre de enriquecimiento y partes de la roca que mostraban anomalías positivas. Se definió el VNF como “la abundancia normal de un elemento en material de tierra estéril” incluyendo en el concepto un rango de valores que cae dentro del intervalo

$$\mu \pm 2\sigma \quad (1)$$

donde,

μ = media

σ = desviación estándar

reconociendo de manera explícita que el VNF es un rango y no un valor único. Desde un punto de vista geoquímico, el término NVF es equivalente a la ausencia de una anomalía.

El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2004) define el VNF como “concentración de una sustancia en un ambiente particular que es indicativa de influencia mínima por fuentes antropogénicas”.

El Umbral Crítico, UC, (*threshold* en idioma inglés) es la concentración crítica por encima de la cual todos los valores se consideran anómalos. En exploración geoquímica todavía se usa el valor exacto de la media + 2 σ como el UG

para diferenciar el VNF de las concentraciones anómalas. Las concentraciones por encima del UC indican un “evento”, el cual puede ser la presencia de un depósito mineral o de contaminación. Sin embargo, en geoquímica ambiental, los valores bajos también pueden ser importantes ya sea como una deficiencia de micronutrientes, a nivel de toxicología o, en el caso de generación de aguas ácidas, de valores muy bajos de pH.

El concepto de línea de base incluye la concentración actual de un elemento o sustancia en una muestra ambiental dada, la cual se mide con el fin de detectar cambios posibles de concentraciones en el futuro. El término línea de base geoquímica, que puede considerarse sinónimo de VNF geoquímico, indica la concentración de elementos fuera de un área de influencia industrial. En lo relacionado con aguas subterráneas, el concepto de línea de base es definido por Shand et al. (2007) de la siguiente manera:

“...el rango en concentración (dentro de un sistema especificado) que especies o sustancias químicas presentan en solución lo cual se deriva por procesos naturales a partir de fuentes naturales geológicas, biológicas, o atmosféricas”.

El concepto VNF se ha convertido en uno de los más cruciales en las ciencias ambientales y se aplica no sólo a rocas, minerales y sedimentos, sino que también a aire, agua y hasta plantas (Gałuszka, 2006). Sin embargo, una investigación bibliográfica en cuanto al uso del término VNF durante 50 años revela que los científicos aún no alcanzan un consenso para una definición clara y concisa (Matschullat et al., 2000). El significado más común de VNF se refiere a un rango natural de valores para un medio determinado que no ha sido impactado por actividades antropogénicas (Gough, 1993).

Independientemente de la semántica elegida, existe consenso en que la concentración natural de un soluto determinado puede ser espacialmente muy variable, ya sea entre acuíferos distintos o dentro de un mismo cuerpo de agua, ya que depende de distintos factores, como la geología, clima, tipo de suelos y sedimentos superficiales, y tiempo de residencia del agua subterránea.

Es importante destacar que la Comunidad Europea (2006) tiene como requerimiento legal que los Estados Miembros estimen valores de UC para sustancias peligrosas tomando en cuenta los VNF de modo que se evalúe la situación de las aguas subterráneas.

Metodologías para la determinación del VNF

Los métodos para determinación del VNF pueden ser de tres tipos (Galuszka, 2006): (i) directos (geoquímicos), (ii) indirectos (estadísticos), y (iii) integrados.

El método directo (geoquímico) se basa en el análisis de muestras que se considera no han sido afectadas antropogénicamente. El aspecto vulnerable con el enfoque histórico de este método es que existe evidencia de liberación significativa de contaminantes aún en tiempos prehistóricos. A partir de núcleos de hielo en Groenlandia (Hong et al., 1994) se ha documentado niveles altos de plomo, y por fundición de cobre, en la antigua Grecia y Roma. Por lo tanto, la toma de muestras pre-industriales y sedimentos datados no garantiza que estos no han recibido un impacto antropogénico. Los impactos en la química de las aguas naturales posiblemente iniciaron hace varios miles de años con la deforestación asociada a la agricultura de subsistencia. En regiones que han sido impactadas por actividades agrícolas durante cientos o miles de años puede ser prácticamente imposible establecer el VNF para una sustancia como los nitratos en relación con un estado “prístino” (Panno et al., 2006), debido a que los impactos han tenido lugar continuamente por la urbanización, industrialización y el desarrollo agrícola. El enfoque histórico también puede ser altamente subjetivo en cuanto al muestreo, y de alto costo, aparte de que requiere intenso trabajo de laboratorio.

El enfoque contemporáneo de este método también es controversial, ya que las diferentes concentraciones en los elementos reportadas para áreas remotas pueden no estar vinculadas con alguna influencia antropogénica sino deberse a variaciones de factores naturales, como el ambiente geológico y las zonas mineralizadas. Existe evidencia de que pequeñas cantidades de elementos han sido transportadas a

escala intercontinental a regiones remotas a partir de erupciones volcánicas y polvo de tormentas de viento desérticas (Reimann y Garrett, 2005). En este tipo de contextos cabe plantearse las siguientes preguntas: *¿Es esto “contaminación”?* *¿Puede la naturaleza “contaminar” la naturaleza?*

El método indirecto (estadístico) se usa para eliminar valores atípicos que se consideran provenientes de influencias antropogénicas e incluye varias técnicas, como análisis de regresión, métodos fractales y gráficas de probabilidad. Los distintos métodos estadísticos que se utilizan para calcular el VNF son descritos detalladamente por Matschullat et al. (2000) y por Reimann et al. (2005). La debilidad principal de los métodos estadísticos es que no toman en cuenta los procesos naturales que influyen en la distribución de los elementos químicos ni la incertidumbre del muestreo y los análisis químicos.

El método integrado combina el enfoque directo y el indirecto y requiere que las muestras sean colectadas en áreas relativamente prístinas, como parques nacionales, reservas naturales y ecosistemas forestales que sugieran la inexistencia de la influencia antropogénica directa.

Enfoques propuestos para determinar el VNF (línea de base)

El método más simple para determinar la línea de base de una sustancia determinada consiste en analizar el rango de las concentraciones en aguas prístinas. La barrera principal de investigación en este caso es que las aguas prístinas solo ocurren donde el recurso está protegido ambientalmente o en áreas donde el recurso hídrico no ha sido desarrollado activamente.

Uno de los métodos directos más efectivos es el uso de datos históricos de calidad de agua, pero desafortunadamente existen muy pocas bases de datos que abarquen más de una década. La extrapolación de datos de acuíferos similares también puede ser útil, pero debe aplicarse cuidadosamente.

En casos donde la base de datos es pequeña o donde se cuenta con una distribución estadística muy irregular, la

mejor aproximación consiste en tomar el valor medio como el VNF y estimar el UC como el valor de la media que no es excedido en más del 2.5% del total del número de observaciones.

En un sentido geoquímico se considera que los valores atípicos son indicadores de procesos geoquímicos raros. En exploración geoquímica, los valores atípicos tienden a indicar mineralización. En un sentido estadístico, los valores atípicos se consideran pertenecientes a una población diferente, ya que se originan de otro proceso o fuente, es decir que pueden asociarse con una distribución de contaminación.

Para la selección del método más apropiado en el análisis de datos geoquímicos es necesario identificar y entender las siguientes propiedades básicas de los bancos de datos geoquímicos (Reimann et al., 2005):

- Los datos geoquímicos son espacialmente independientes. Mientras más cerca se encuentren dos sitios de muestreo existe una mayor probabilidad de que sus resultados analíticos sean similares. Sin embargo, las pruebas estadísticas clásicas asumen que las muestras son independientes.
- El valor analítico medido en un sitio de muestreo depende de varios procesos geoquímicos diferentes. Por ejemplo, para suelos los procesos incluyen la roca madre, topografía, vegetación, clima, hidróxidos de Fe/Mn, contenido de materia orgánica, textura, pH, mineralogía y presencia de mineralización o contaminación. La mayoría de pruebas estadísticas requieren que las muestras provengan de una misma población lo cual no es posible si distintos procesos geoquímicos afectan a diferentes muestras.
- Los datos geoquímicos, como muchos otros datos científicos, son imprecisos y contienen incertidumbre asociada al tiempo de muestreo, preparación y análisis de muestras.

El diagrama de caja y la gráfica de probabilidad acumulada se han constituido en los mejores métodos para estimar los valores VNF y el UC (Reimann et al., 2005).

Una manera de abordar los supuestos estadísticos de independencia y normalidad, que no siempre se cumplen, es utilizar el diagrama de caja para la identificación de valores extremos (Tukey, 1977). El diagrama de caja (Figura 1) constituye una gráfica que incluye la mediana, el primero y tercer cuartil y cualquier dato atípico que se presente en una muestra. El rango intercuartil (RIQ) es la diferencia entre el tercer y el primer cuartil ($Q3 - Q1$). Debe notarse que, debido a que 75% de los datos (percentil 75) son menores que el tercer cuartil y que 25% de los datos (percentil 25) son menores que el primer cuartil, *la mitad de los datos está entre el primero y el tercer cuartil*.

Los datos atípicos (anomalías en un sentido de geoquímica de exploración) son puntos inusualmente

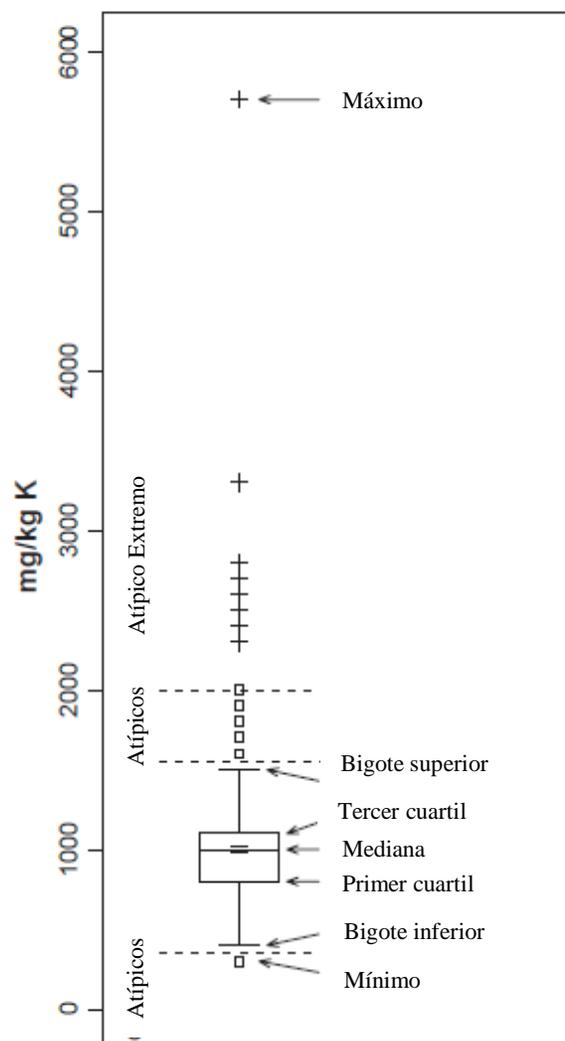


Figura 1. Diagrama de caja de Tukey para concentraciones de potasio en suelos podzol de la península de Kola (ligeramente modificado de Reimann et al., 2005).

grandes o pequeños. Cualquier punto que está a más de 1.5 RIQ por arriba del tercer cuartil o por debajo del primer cuartil, se considera un dato atípico. Los puntos que están a más de 3 RIQ del primer o del tercer cuartil se definen como un dato atípico extremo. Los datos atípicos que se extienden desde la parte superior a la parte inferior de la caja se representan con líneas verticales llamadas “bigotes” las cuales terminan en los puntos más extremos que no son atípicos. Aparte de los datos atípicos, las cuatro partes que forman el diagrama de caja, que incluye las dos partes de la caja separadas por la línea de la mediana y los dos “bigotes”, representan cada una la cuarta parte de los datos. El “bigote” superior normalmente se interpreta como la definición estadística del UC.

Resultados

Independientemente del método que sea seleccionado para evaluar el VNF se recomienda atender las siguientes reglas (Gałuszka, 2006):

- Se debe contar con el contexto histórico (industrial, residencial, comercial) del área que será evaluada.
- El marco geológico es el factor natural más importante que influye en las concentraciones elevadas de los elementos.
- La geología no cambia entre un sitio prístino y uno contaminado, pero sin el conocimiento geológico puede darse el caso de que las concentraciones elevadas de elementos en áreas mineralizadas se atribuyan a contaminación ambiental.
- Debe tomarse en cuenta la variabilidad natural en las concentraciones de los elementos y la complejidad de los procesos geoquímicos (intemperismo, transporte, precipitación de elementos).

Se considera que el método más simplificado para evaluar el VNF geoquímico consiste en construir diagramas de caja y/o elaborar gráficas de probabilidad acumulada. Para el presente caso se han elaborado diagramas de caja para las concentraciones de dureza, pH y conductividad eléctrica en un acuífero volcánico Terciario (Tv) y en un acuífero de

calizas Cretácicas (Kls) en Guatemala (Figura 2). Los diagramas de caja comparativos para dureza muestran dos contextos hidrogeológicos muy distintos con el acuífero volcánico presentando una concentración media de dureza mucho más baja que la registrada para el acuífero de calizas.

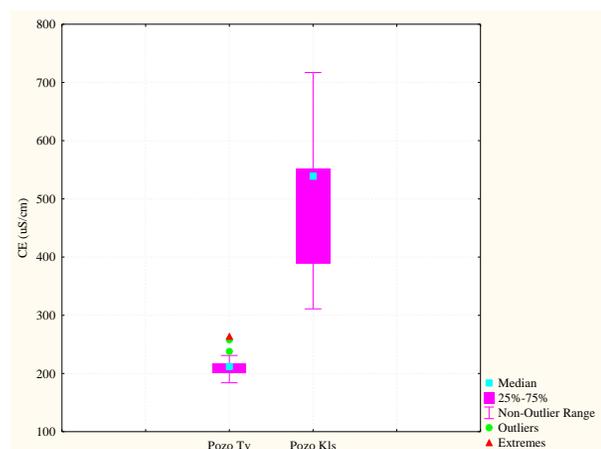
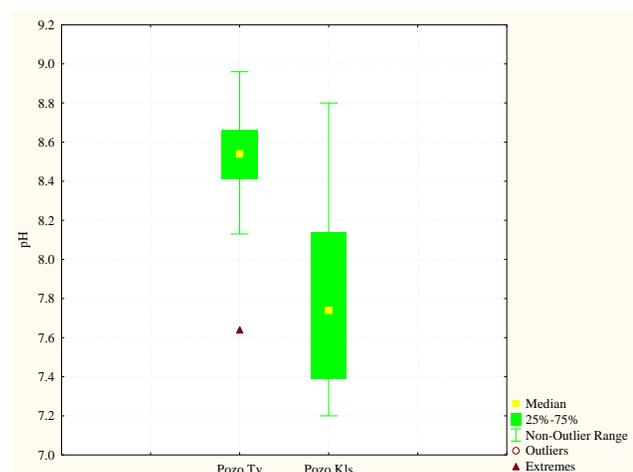
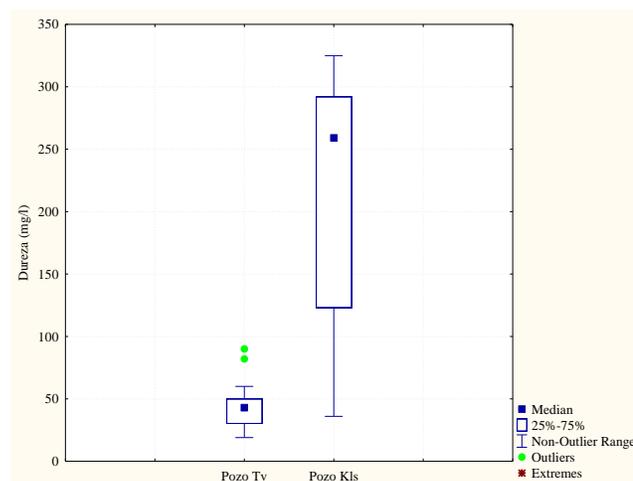


Figura 2. Diagramas de caja construidos con Statistica® para dureza, pH y conductividad eléctrica en un acuífero volcánico Terciario (Tv) y un acuífero de calizas Cretácicas (Kls) de Guatemala.

El rango de concentraciones de dureza también es muy bajo en el acuífero volcánico en comparación con el acuífero de calizas. Se registran valores atípicos de dureza en el acuífero volcánico, los cuales están ausentes en el acuífero de calizas.

Los diagramas de caja comparativos para los valores de pH revelan que el acuífero volcánico tiene un valor medio muy por encima del acuífero de calizas y con un rango de variación mucho menor. Para ambos acuíferos no se registran valores atípicos de pH.

Los diagramas de caja comparativos para los valores de conductividad eléctrica permiten discriminar claramente dos ambientes hidrogeológicos muy distintos, ya que el acuífero volcánico registra una dispersión de valores mínima en comparación con los valores de conductividad eléctrica reportados para el acuífero de calizas. Existen valores atípicos y extremos para el acuífero volcánico, los cuales están ausentes en el acuífero de calizas. El diagrama de caja para las calizas muestra que la distancia entre la mediana y el primer cuartil es mucho más grande que la existente entre la mediana y el tercer cuartil, lo cual indica un fuerte sesgo de los datos a la izquierda (Figura 3).

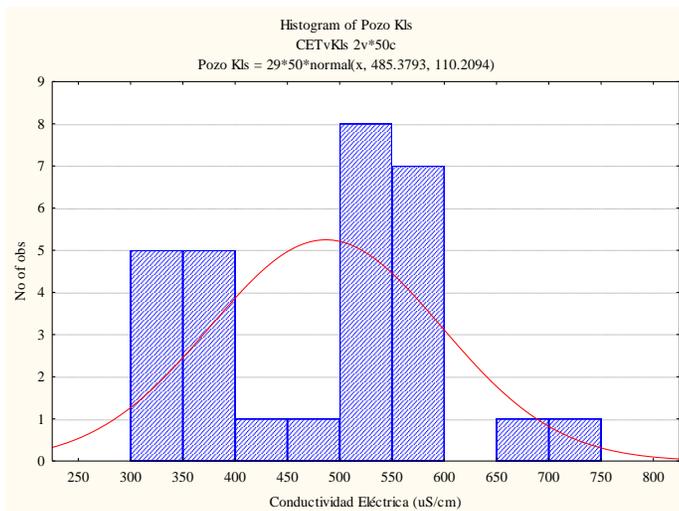


Figura 3. Histograma para los valores de conductividad eléctrica en el acuífero de calizas Cretácicas.

En el contexto de recursos hídricos se considera que el tercer cuartil (75%) corresponde al límite superior del VNF. La selección del límite inferior del VNF está en

función del parámetro de calidad de agua evaluado y del contexto hidrogeológico. Para este estudio de caso se ha seleccionado como límite inferior del VNF el primer cuartil y/o el valor mínimo del parámetro. El restante 25% superior de los resultados de la base de datos evaluada puede constituir anomalías de origen geogénico o antropogénico (Vencelides et al., 2010). El UC se establece para valores del percentil 90. El Cuadro 1 muestra el resumen estadístico y la estimación del VNF y UC para el agua del acuífero volcánico (Tv) y del acuífero de calizas (Kls) en comparación con la Norma nacional de calidad de agua (COGUANOR-NTG 29001) y los lineamientos de calidad de agua de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Puede notarse que los valores de dureza que representan el VNF y el UC del acuífero volcánico indican condiciones ambientales aceptables, mientras que para el acuífero de calizas el UC está por encima del LMA pero por debajo del LMP. En términos de pH, el acuífero volcánico presenta un rango de valores de VNF y de UC que están por encima de la Norma, mientras que para el acuífero de calizas únicamente el UC excede la Norma. En términos de conductividad eléctrica, los valores de VNF y UC para ambos acuíferos fueron ambientalmente muy aceptables.

Discusión y conclusiones

Las diferentes investigaciones científicas que se han realizado para la evaluación crítica del VNF y del UC en cuerpos de agua permiten concluir que más allá de seleccionar un método específico debe de concientizarse a las instituciones relacionadas con el manejo del agua de que la caracterización de calidad de agua debe concebirse como un procedimiento de evaluación científica y no únicamente como un ejercicio técnico o administrativo (Preziosi et al., 2010). Por lo tanto, la elaboración de la línea de base de calidad de agua debe incluir un adecuado conocimiento del marco hidrogeológico, los procesos hidroquímicos que ocurren en el cuerpo de agua, las propiedades intrínsecas del contaminante potencial, la relación del acuífero con otros cuerpos de agua y la verificación de las actividades humanas.

Cuadro 1. Estimación del VNF y del UC para acuífero volcánico Terciario (Tv) y acuífero de calizas Cretácicas (Kls).

Estándar de referencia	Dureza (mg/l)		pH		Conductividad eléctrica (µS/cm)	
	LMA 100	LMP 500	LMA 7.0-7.5	LMP 6.5-8.5	LMA 750	LMP 1500
COGUANOR-NTG 29001	500		6.5-8.5		1000-1500	
OMS	500		6.5-8.5		1000-1500	
Resumen estadístico	Tv	Kls	Tv	Kls	Tv	Kls
Mínimo	19	36	7.6	7.2	184	311
Primer cuartil	30	123	8.4	7.4	202	390
Tercer cuartil	50	292	8.66	8.14	216	551
Máximo	90	325	8.9	8.8	264	717
Mediana	43	259	8.5	7.7	212	539
Desviación estándar	15	91	0.24	0.48	16	110
VNF	50-30	292-123	8.6-7.6	8.1-7.4	216-184	551-311
UC (Percentil 90)	57	313	8.83	8.68	227	581
Condición ambiental	Aceptable	Moderada	Excede Norma	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Tv: 41 muestras.		Kls: 29 muestras.		LMA: Límite máximo aceptable		LMP: Límite máximo permisible

Por la amplia variedad de factores involucrados, el VNF puede registrar fuertes variaciones espaciales en un cuerpo de agua específico por lo que es muy difícil definir un solo valor siendo más realístico conceptualizar el VNF geogénico o antropogénico como un rango y no como un valor absoluto (Hawkes y Webb, 1962). La base de datos que contiene los resultados de calidad de agua debe clasificarse en función de los tipos de roca de los respectivos acuíferos para luego ser procesada estadísticamente. Por lo tanto, deben proponerse valores específicos de VNF para los distintos tipos de acuíferos que estén presentes. Tal y como se demostró en el acuífero de calizas y el acuífero volcánico evaluados, algunos VNF pueden estar por encima de los límites establecidos para agua potable y tienen valores muy diferentes para cada acuífero evaluado. La concentración natural (línea de base) de varios solutos puede exceder los límites regulatorios

establecidos para agua potable, lo cual no necesariamente corresponde a contaminación antropogénica sino que en varios casos puede ser atribuida a factores naturales (contaminación geogénica).

En el caso de acuíferos carbonatados Cretácicos es frecuente que la fuente de valores anómalos de dureza esté constituida por las calizas, por lo que la fuente de contaminación normalmente es geogénica. Existen varias zonas de Guatemala con acuíferos volcánicos donde la contaminación por arsénico y metales pesados, con valores de VNF y UC fuera de la Norma, puede estar relacionada a factores naturales, como alta temperatura (aguas termales) y/o aguas ácidas asociadas a la oxidación de pirita, y no a actividades antropogénicas.

Referencias bibliográficas

COGUANOR-NTG 29001. (2013). Comisión Guatemalteca de Normas. *Norma Técnica Guatemalteca. Agua para Consumo Humano*. 12 p.

European Community. (2006). *Groundwater Directive 2006/118/CE*. Directive of the European Parliament and the Council on the Protection of Groundwater Against Pollution and Deterioration, OJL372, 27/12/2006 p. 19-31.

Galuszka, A. (2006). *Different Approaches in using and understanding the term "Geochemical Background"* – Practical Implications for Environmental Studies: Polish Journal of Environmental Studies, v.16, p. 389-395.

Gough, L. (1993). *Understanding Our Fragile Environment* – Lessons from Geochemical Studies: U.S. Geological Survey Circular 1105. 34 p.

- Hawkes, H., and Webb, J. (1962). *Geochemistry in Mineral Exploration*. Harper & Row. 415 p.
- Hong, S., Candelo, J., Patterson, C., and Boutron, C. (1994). *Greenland ice evidence of hemispheric lead pollution 2-3 millennia ago by Greek and Roman civilizations*: Science, v. 265, p. 1841.
- Matschullat, J., Ottenstein, R., & Reimann, C. (2000). *Geochemical background - can we calculate it?*: Environmental Geology, v. 39, p. 990-1000. DOI: 0.1007/s002549900084.
- Organización Mundial de la Salud, OMS. (2006). *Guía para la Calidad del Agua Potable*. 408 p.
- Panno, S., Kelly, W., Martinsek, A., Hackley, K. (2006). *Estimating Background and Threshold Nitrate Concentrations Using Probability Graphs*: Ground Water, v. 44, p. 697-709.
- Preziosi, E., Giuliano, G., and Vivona, R. (2010). *Natural background levels and threshold values derivation for naturally As, V and F rich groundwater bodies: a methodological case study in Central Italy*: Environmental Earth Sciences v. 61, p. 885-897.
- Reimann, C., Filzmoser, P., and Garret, R. (2005). *Background and threshold: critical comparison of methods of determination*: Science of the Total Environment, v. 346, p. 1-16.
- Reimann, C., and Garrett, R. (2005). *Geochemical background – concept and reality*: Science of the Total Environment, v. 350, p. 12-27.
- Shand, P., Edmunds, W., Lawrence, A., Smedley, P., and Burke, S. (2007). *The natural (baseline) quality of groundwater in England and Wales*: British Geological Survey Research Report No. RR/07/06. 84 p.
- Sinclair, A. (1974). *Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs*: Journal of Geochemical Exploration, v. 3, p. 129-149.
- Tennant, C., and White, M. (1959). *Study of the distribution of some geochemical data*: Economic Geology, v. 54, p. 1281-1290.
- Tukey, J.W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley. 688 p.
- USGS. (2004). *Water basics glossary*. https://water.usgs.gov/water-basics_glossary.html. Página visitada el 21 de marzo de 2017.
- Vencelides, Z., Hrkal, Z., and Prchalová. (2010). *Determination of the natural background content of metals in ground waters of the Czech Republic*: Applied Geochemistry, v. 25, p. 755-762.

REVISTA GUATEMALTECA DE CIENCIAS DE LA TIERRA

NORMAS PARA AUTORES

La **Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra** publicará artículos originales preferentemente en español y excepcionalmente en inglés relacionados con las Ciencias de la Tierra.

TEXTO: Documento mecanografiado en procesador de textos estandarizado (ficheros tipo .doc) con extensión máxima de 20 páginas tamaño carta (incluidas referencias, figuras y tablas) con tamaño de letra de 10 pt (fuente *Times New Roman* o similar), espaciado interlineal de 1,5 y márgenes de 2 cm. El **título** del artículo se redactará con mayúsculas, con tamaño de letra de 12 pt, será breve e informativo sobre sus contenidos y, cuando sea necesario, precisará el encuadre geográfico y geocronológico. Los originales en español deberán llevar el título también en inglés y viceversa. Los **autores** aparecerán en minúsculas (con mayúscula inicial) con un tamaño de 10 pt, en el orden en que deseen ser citados. Primero el nombre seguido del apellido o apellidos. Se indicará el lugar de trabajo de cada uno de los autores, con la dirección de su centro de investigación y de correo electrónico, con un tamaño de letra de 8 pt. Se incluirá un **resumen** en español y en inglés (*abstract*), con una extensión mínima de 100 palabras y máxima de 250 palabras en cada idioma, con un tamaño de letra de 9 pt. El resumen debe ser conciso e indicativo del contenido y aportaciones del conjunto del artículo y no debe incluir ecuaciones o referencias. Seguidamente se pondrán hasta cinco **palabras clave** (*key words*) en ambos idiomas, por orden alfabético. Después del resumen, el *abstract* y las palabras clave, se desarrollará el texto a dos columnas con un espaciado entre columnas de 0.5 cm. Los diferentes **apartados del texto** se titularán con inicial mayúscula y negrita, sin numeración, con un tamaño de letra de 11 pt. Se recomienda incluir los apartados de Introducción, Metodología, Resultados, Discusión de resultados y Conclusiones. El último apartado será el de Referencias Bibliográficas, precedido, si se estima oportuno, de los Agradecimientos. No se admiten notas a pie de página ni al final del texto, por lo que cualquier comentario deberá incluirse en el cuerpo principal del manuscrito. En las referencias bibliográficas incluidas en el cuerpo del texto, se consignarán con inicial mayúscula, los apellidos que usen los autores en el trabajo correspondiente y el año de publicación, y deberá citarse además de forma completa en el apartado final de Referencias Bibliográficas. En el caso de tres o más autores se utilizará "*et al.*" (en cursiva). Para las citas de un trabajo de dos autores, sus apellidos irán relacionados con la conjunción "y". Las **referencias de los trabajos citados serán incluidas en el apartado final** de Referencias Bibliográficas, siguiendo un formato específico. A modo de ejemplo para los diferentes tipos de documentos:

Artículos de revistas: Heredia, M. y Baltuille, J.M. 1997.

Las posibilidades mineras de Cuba en el sector de las rocas ornamentales. *Boletín Geológico y Minero*, 108 (6), 47-52; **Libros:** Didier, J. 1973. *Granites and their enclaves*. Elsevier, Amsterdam, 393 pp. **Capítulos de libros:** Quesada, C. 1983. El Carbonífero de Sierra Morena. En: Martínez, C. (ed.), *Carbonífero y Pérmico de España*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 243-278. **Actas de congresos:** Delgado, F., Ovejero, G. y Jacquin, J.P. 1971. Localización estratigráfica y medio paleogeográfico de las mineralizaciones (galena y fluorita) de Sierra de Baza (Granada, España). / *Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica*, Madrid, 2, 119-128. **Informes y trabajos inéditos:** Se citará el autor o autores, año de la realización y ubicación de dicho trabajo: Baltuille, J.M. 1998. *Estudio estadístico tras la revisión de la totalidad de los artículos publicados en el Boletín Geológico y Minero durante el decenio 1989-1998*. Informe inédito. Comité de Redacción del Boletín Geológico y Minero, Centro de Documentación del IGME, Madrid, 13 págs.+19 págs. (anexos). **Páginas web:** Se citará el título de la página, el autor o autores de la misma, organismo o institución editora, fecha de acceso a la información y dirección electrónica tanto de la página como del directorio raíz, ejemplo: Kluwer Academic Publishers Information Service (KAPIS), 24/03/99, <http://www.wkap.nl>

TABLAS: Las tablas y cuadros que contengan texto o datos numéricos organizados en filas y columnas, aparecerán citados todos como tablas, y se prepararán para ocupar un ancho de una o dos columnas (80 ó 170 mm), y el alto proporcional; el máximo serán las dimensiones de la caja de una página completa, e incluso dos páginas completas. El texto o números que contengan, si es el caso, deberán leerse claramente al tamaño elegido, no siendo nunca el tamaño de los caracteres inferior a 8 pt. El formato de la tabla deberá evitar, siempre que sea posible, el uso de cuadrícula con líneas verticales y horizontales para separar filas y columnas. Se recomienda la utilización sólo de algunas líneas horizontales. Las tablas deberán enumerarse de 1 en adelante y citarse dentro del texto con esa numeración e inicial mayúscula, por ejemplo: Tabla 1. El título de la tabla debe consignarse en la parte superior de la misma con un tamaño de letra de 10 pt.

FIGURAS: Las ilustraciones originales (dibujos, mapas, esquemas, diagramas, fotografías, etc.), serán citadas el texto y numeradas correlativamente todas como figuras, y se prepararán para ocupar un ancho de una o dos columnas (80 ó 170 mm), y el alto proporcional; el máximo serán las dimensiones de la caja de una página completa, admitiéndose, solamente en caso de que sea necesario, figuras que ocupen dos páginas completas. El

texto o numeración que contengan, si es el caso, deberá leerse correctamente al tamaño elegido, no empleando caracteres de tamaño inferior a 8 pt. Por regla general se prepararán para aparecer en blanco y negro o escala de grises, aunque pueden publicarse en color siempre y cuando esté justificado por la necesidad de ilustrar un elemento de colores singulares o disponer de una paleta amplia de colores. En estos casos, los autores las enviarán en color, y el editor principal decidirá sobre el formato final de publicación. Además, se entregarán siempre aparte del texto, indicando en éste su posición; en ficheros individuales de imagen (formato TIFF o JPG), a una resolución mínima de 300 ppp para el tamaño de edición final. Las ilustraciones deberán ser originales y propiedad de los autores y, en caso de tener derechos de edición o reproducción, es responsabilidad de los autores el tramitar la autorización de su cesión para publicación en la Revista. En cualquier circunstancia, se deben citar expresamente las fuentes de las que fueron extraídas, modificadas o adaptadas dichas ilustraciones. Las figuras deberán enumerarse de 1 en adelante y citarse dentro del texto con esa numeración e inicial mayúscula, por ejemplo: Figura 1. El título de la figura

debe consignarse en la parte inferior de la misma con un tamaño de letra de 10 pt.

FÓRMULAS Y ECUACIONES: Las fórmulas y ecuaciones a incluir en el texto, deben ser insertadas mediante la utilización de un editor de ecuaciones, quedando la posición de las mismas a disposición del autor.

REMISIÓN DEL MANUSCRITO: Se enviará en formato digital (archivos informáticos) por cualquiera de los siguientes medios:

Por correo electrónico dirigido a moran_sergio@usac.edu.gt, vasquez_osmin@usac.edu.gt, siempre que el tamaño de los ficheros adjuntos no supere los 10 Mb por mensaje. Cuando los ficheros de las figuras o tablas sean de gran tamaño, se podrá utilizar el correo postal o mensajería, con los ficheros grabados en soporte digital (CD-ROM, DVD), dirigido a Carrera de Geología, a la dirección del Centro Universitario del Norte CUNOR. El autor de contacto tendrá acuse de recibo y de los pasos del proceso editorial.

REVISTA GUATEMALTECA DE CIENCIAS DE LA TIERRA

COBERTURA TEMÁTICA Y PÚBLICO

La Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra es una publicación anual, cuyo objetivo es la difusión de estudios y trabajos de investigación relacionados con las **Ciencias de la Tierra**, dirigidos a la comunidad científica nacional e internacional, y cuya cobertura temática abarca disciplinas como:

Estratigrafía, sedimentología y paleogeografía

Geología histórica y regional

Tectónica y geología estructural

Geofísica

Geomorfología

Hidrología e hidrogeología

Edafología y ciencias del suelo

Mineralogía, cristalografía, metalogenia y yacimientos minerales

Petrología endógena y sedimentaria

Geoquímica

Paleontología

Sistemas de información geocientífica y cartografía geológica

Geología ambiental, paleoclimatología y cambio global

Geología aplicada, geotecnia, ingeniería geológica y del terreno

Prospección e investigación minera y explotación de recursos minerales

Historia y epistemología de las disciplinas de las Ciencias de la Tierra

Divulgación y cultura geocientífica

Geodiversidad, patrimonio geológico y minero, y geoconservación

Riesgos geológicos

Aspectos económicos de las Ciencias de la Tierra

Otros temas afines

El contenido fundamental de la revista son artículos originales e inéditos de investigación científica y aplicada que supongan un avance en el conocimiento. Además, se incluyen reseñas de publicaciones recientes en relación con la temática de la Revista, prólogos y presentaciones en números monográficos, y cartas del equipo editorial. De forma justificada en forma y fondo se admiten escritos de comentario o respuesta a artículos publicados y cartas al Editor.

INFORMACIÓN SOBRE EL PROCESO EDITORIAL

La Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra cuenta con un registro de los manuscritos recibidos.

A cada manuscrito original remitido a la Revista se le asigna un equipo gestor por parte del equipo editor. El equipo gestor es el responsable de seguir y garantizar la transparencia de todo el proceso de revisión del artículo, empezando por la elección y comunicación con los revisores, traslado de correcciones y sugerencias a los autores, y valoración final del artículo.

Cada artículo es revisado, al menos, por dos evaluadores expertos en la materia del mismo (revisión por pares), en su mayor parte ajenos a la institución editorial. En caso de discrepancia en las valoraciones de ambos revisores, se elige un tercer revisor.

El sistema de revisión es de 'ciego simple', mediante el cual el revisor, si lo desea, puede mantener el anonimato de cara al autor. En casos excepcionales, a petición de los autores, y por causa justificada, se puede aplicar el sistema 'doble ciego', en el que tanto autores como revisores desconocen la identidad mutua. Se aceptarán por parte de los autores sugerencias de nombres de posibles revisores, sin que implique su aceptación por parte del equipo gestor; esto será de interés en caso de manifiesta relación de amistad o animadversión con otros científicos que pudieran actuar como revisores. La revista no dispone de una sección de correspondencia como tal, pero admite el debate y discusión sobre los artículos publicados, a través del envío de nuevos artículos de discusión y réplica, que seguirán igualmente las normas de la revista.

Los autores son informados sobre la fase del proceso editorial en el que se encuentra su artículo, desde la propia recepción de los originales hasta las distintas revisiones y la valoración final.

Una vez aceptado el manuscrito, pasa a ser maquetado y compuesto de acuerdo a la plantilla de la Revista. En caso de ser necesarias se realizarán ligeras correcciones de estilo y revisiones a los textos en inglés. Al autor de contacto, le serán enviadas unas únicas pruebas de imprenta para su corrección. Todos los autores de cada artículo ceden los derechos de edición del mismo a favor de la Revista.

Una vez publicado, el primer autor recibirá un ejemplar completo del fascículo de la revista y su artículo en formato PDF.

Cada fascículo de la revista, se distribuye con una tirada media de 100 ejemplares.

La presente publicación se realizó gracias al patrocinio de:
This publication was possible through the sponsorship of:

Greenrock



Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, vol. 4, núm. / Issue 1
Guatemalan Journal of Earth Sciences

Sumario / Contents

- Geoquímica, petrografía y geocronología de las rocas graníticas al noroeste y sureste de la caldera de Quetzaltenango, Guatemala. *Geochemistry, petrography and geochronology of the granitic rocks to the northwest and southeast of Quetzaltenango's caldera, Guatemala.* E. R. Mérida Boogher 5
- Zona de transferencia que conecta un sistema extensional de fallas conjugadas activas segmentadas: implicación en la serie sísmica del año 2011, Santa Rosa, Guatemala. *Connecting transfer zone in a extensional system of conjugated segmented active faults: impact in the seismic series of 2011, Santa Rosa, Guatemala.* S. Morán Ical, L. Ramírez Ba 24
- Evaluación del valor natural de fondo y el umbral crítico en aguas naturales. *Assessment of background and threshold in natural waters.* R. Machorro Sagastume, D. Machorro Sánchez 39

ISSN 2410-728X

