

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

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

Volumen /Volume 10

Año /Year 2023

Número /Issue 1



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

ISSN 2410-728X



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



Volumen 10

Número 1

Año 2023

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra

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

Sumario / Contents

Morfometría preliminar de la cuenca del río Samalá mediante sistema de información geográfica <i>Preliminary morphometry of the Samalá river basin using a geographical information system</i> Vidaurre, D., Godoy, L.	05
Importancia de la integración de métodos geofísicos en estudios hidrogeológicos antes de la perforación <i>Importance of integrating geophysical methods in hydrogeological studies before drilling</i> Arvizu, A.	13
Evaluación del caudal seguro en un pozo de agua <i>Evaluation of the safe yield in a water well</i> Machorro, R.	21
Puntos de interés geológico en la cuenca del lago de Atitlán, Sololá <i>Geosites in the basin of lake Atitlán, Sololá</i> Godoy, L.	39
Análisis geomorfológico local y su relación con las formas del terreno en el campus del Centro Universitario del Norte -CUNOR- Cobán Alta Verapaz, Guatemala <i>Geomorphological analysis and its relationship with the landforms on the campus of the Northern University Center -CUNOR- Cobán Alta Verapaz, Guatemala</i> Morán, S., Portillo, S., Quím M., López, L., Godoy, L.	51
Reconocimiento geológico de colapsos por karst en la comunidad Chinimlajom, Cobán, Alta Verapaz <i>Geological recognition of karst collapses in the Chinimlajom community, Cobán, Alta Verapaz</i> Laj, L., et al.	77
Análisis de las secuencias sísmicas como base para estudios de peligro sísmico para los años 2021 y 2023: Caso de estudio de los sitios de Conguaco y Comapa, del departamento de Jutiapa, Guatemala <i>Analysis of seismic sequences as a basis for seismic hazard studies for the years 2021 and 2023: Case study of the Conguaco and Comapa sites, in the department of Jutiapa, Guatemala.</i> Coc, B., Ligorria, I., Castro, D., Reiche, A.	89

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

Vol. 10, núm. / Issue 1, año 2023

ISSN 2410-728X

Equipo Editorial / Editorial Board:

Sergio David Morán Ical

Jaime Eduardo Requena

Rudy Antonio Machorro Sagastume

Luis Alfredo Godoy Morales

Alejandra Marisol Mendoza Martínez

Andrea María Reiche de la Cruz

Luis Alfonso Laj Hun

Hugo Leonardo Hernández Cajas

Portada: Estructuras de disyunción columnar en basaltos, Río La Paz, Quesada Jutiapa.

Cover: *Columnar disjunction structures in basalts, Río la Paz, Quesada Jutiapa.*

Fotografía: Gira de Campo -Vulcanología- 2023. Andrea Reiche.

Photo: *Fieldwork -Volcanology- 2023. Andrea Reiche.*

EDITORIAL

VOLUMEN 10: CELEBRANDO UNA DÉCADA DE COMPROMISO CIENTÍFICO

Queridos lectores y colaboradores:

Es con gran entusiasmo y gratitud que celebramos el décimo aniversario de la Revista Guatemalteca en Ciencias de la Tierra. A lo largo de esta década, hemos tenido el privilegio de ser testigos de un crecimiento constante y un compromiso inquebrantable con la promoción del conocimiento geológico en Guatemala y más allá.

Durante este tiempo, hemos tenido el honor de publicar 47 artículos científicos, contribuciones valiosas de más de 25 autores nacionales y 12 autores internacionales. Esta diversidad de perspectivas y enfoques ha enriquecido nuestra revista y ha contribuido al desarrollo y avance de la geología en nuestra región.

Los temas abordados en este volumen reflejan la diversidad y relevancia de las investigaciones en el campo de las Ciencias de la Tierra. En la tematica de hidrología e hidrogeología se presentan: *Morfometría preliminar de la cuenca del río Samalá utilizando sistemas de información geográfica (Vidaurre & Godoy, 2023)*; *Importancia de la integración de métodos geofísicos en estudios hidrogeológicos previos a la perforación de pozos*; asimismo, se aborda la *Evaluación del caudal seguro en un pozo de agua*. Ahora bien, en la tematica de Geodiversidad y Geomorfología se presentan: *Puntos de interés geológico en la cuenca del lago de Atitlán en Sololá*; *Cartografía geomorfológica del Campus del Centro Universitario del Norte - CUNOR- en Cobán, Alta Verapaz*; Y por ultimo, la tematica de Riesgos Geológicos: *Reconocimiento geológico de colapsos por karst en Chinimlajom en Cobán, Alta Verapaz*, y finalmente, *Análisis de las secuencias sísmicas como base para estudios de peligro sísmico para los años 2021 y 2023, con el caso de estudio de los sitios de Conguaco y Comapa en el departamento de Jutiapa, Guatemala*. Cada una de estas contribuciones representa un valioso aporte al conocimiento geológico en nuestro país.

Mirando hacia el futuro, nos sentimos motivados y comprometidos a seguir siendo un espacio de encuentro para la comunidad científica, un foro donde las mentes inquisitivas y apasionadas por las Ciencias de la Tierra puedan compartir sus investigaciones y descubrimientos. Invitamos a investigadores nacionales e internacionales a unirse a nosotros en los próximos volúmenes, para seguir fomentando el crecimiento y la difusión del conocimiento geológico en Guatemala.

Este décimo aniversario no solo es un momento de celebración, sino también una oportunidad para reflexionar sobre el camino recorrido y los desafíos por venir. Nos comprometemos a continuar mejorando y adaptándonos a las necesidades cambiantes de nuestra comunidad científica.

Agradecemos sinceramente a todos los autores, revisores, editores y lectores que han contribuido a hacer de la Revista Guatemalteca en Ciencias de la Tierra un pilar fundamental en la promoción de la geología en nuestro país. Esperamos con entusiasmo lo que el futuro nos depara y confiamos en que juntos continuaremos avanzando en el entendimiento y la apreciación de las Ciencias de la Tierra en Guatemala.

Atentamente,

Luis Godoy y Sergio Morán
Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra
Carrera de Geología
CUNOR USAC



MORFOMETRÍA PRELIMINAR DE LA CUENCA DEL RIO SAMALÁ MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

PRELIMINARY MORPHOMETRY OF THE SAMALÁ RIVER BASIN USING A GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM

Donald Mario Steve Vidaurre Chocooj, Luis Alfredo Godoy Morales

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, 7^a. Calle 1-11 Zona 6. Código postal 16001, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.

Email: donaldvidaurre74@gmail.com, luis.godoy@profesor.usac.edu.gt

RESUMEN

La cuenca del río Samalá es una de las más importantes del país de Guatemala, es por ello que resultó de importancia analizarla morfométricamente. El objetivo general de la presente investigación fue evaluar las características morfométricas de la cuenca del río Samalá y subcuencas que la conforman, con el fin de caracterizar el comportamiento hidrológico de la cuenca. La metodología utilizada, se basa en tres parámetros generales los cuales son: forma, relieve y drenaje, de los cuales se desglosaron 18 características, para determinarlas se utilizó un sistema de información geográfica y sus diferentes herramientas, acompañado de diferentes fórmulas matemáticas.

Los dieciocho parámetros analizados brindaron una caracterización de la dinámica hidrológica de la cuenca. Los resultados de la investigación definieron a la cuenca con un área de 1 482,18 km², una red de drenaje bien desarrollada de 2 907,15 km, longitud axial de 97,20 km. El Factor de forma 0,15 el cual indica que es una cuenca alargada, siendo de forma rectangular oblonga según su coeficiente de compacidad de 1,98. La longitud del cauce principal con 141,25 km, el cual tiene una pendiente de 0,02 m/m. Densidad de drenaje de 1,96, un orden de cauces de nivel 7 y con 832,18 horas de tiempo de concentración. Por último, una curva hipsométrica que evidencia tres etapas dentro de la cuenca las cuales son juvenil y vejez, en base a sus características posiblemente tenga un control estructural y litológico por la forma que adopto la gráfica analizada.

Palabras claves: *Samalá, morfometría, cuenca, hidrología.*

ABSTRACT

The Samalá River watershed is one of the most important in the country of Guatemala, That is why it was important to analyze it morphometrically. The general objective of this research was to evaluate the morphometric characteristics of the Samalá River basin and sub-basins that make it up, In order to characterize the hydrological behavior of the watershed. The methodology used is based on three general parameters which are: shape, relief and drainage, of which 18 characteristics, To determine them, a geographic information system and its different tools were used, accompanied by different mathematical formula.

The eighteen parameters analyzed provided a characterization of the hydrological dynamics of the watershed. The results of the research defined the basin with an area of 1 482,18 km², a well-developed drainage network of 2 907,15 km, axial length of 97,20 km. The Shape Factor 0,15 which indicates that it is an elongated basin, being oblong rectangular in shape according to its compactness coefficient of 1,98. The length of the main channel is 141,25 km, which has a slope of 0,02 m/m. Drainage density of 1,96, a level 7 channel order, and with 832,18 hours of concentration time. Finally, a hypsometric curve that shows three stages within the basin which are youth and old age, based on its characteristics, possibly has a structural and lithological control due to the form adopted by the analyzed graph.

Keywords: *Samalá, morphometric, watershed, hidrology*

Introducción

La cuenca del río Samalá se encuentra ubicada en los departamentos de Quetzaltenango, Totonicapán, Retalhuleu y Suchitepéquez, en su interior se encuentra lo que es parte del complejo volcánico Santa María y Santiaguito, es importante mencionar que la cuenca fue dividida en 08 subcuencas las cuales de la parte alta hacia la desembocadura son: Caquixá, Xequijel, Paqui, Pabacul, Samalá, Nimá, El Tambor e Ixpatz.

Una cuenca hidrográfica es un área de captación que contribuye a un cauce principal, la cual esta delimitada por los partes aguas de las montañas que contiene. Al realizar un análisis hídrico de una cuenca, una de las herramientas más útiles es la morfometría, ya que permite obtener información de la cuenca para conocer el funcionamiento hidrológico de un área.

La herramienta principal fue el uso de un sistema de información geográfica con sus diferentes herramientas, la cual posteriormente con la aplicación de fórmulas matemáticas definieron las diferentes características morfométricas para la cuenca del río Samalá.

Metodología

La metodología se dividirá en tres grupos los cuales son parámetros de forma, relieve y drenaje, cada uno contendrá diferentes factores basados en su origen y características.

Parámetros de forma: La forma de una cuenca interviene de una manera muy importante en la velocidad de escurrimiento superficial.

Perímetro (P): Se describe como la longitud del contorno de una forma.

Área (A): es la superficie que está delimitada por medio de los parteaguas de una cuenca.

Longitud axial (La): Se define como la distancia que hay entre la desembocadura de una cuenca y la parte más lejana de la misma, también es llamado como eje de la cuenca (Henaos, 1988).

Longitud del cauce principal (L): Se define como la distancia desde el punto más distante hasta la desembocadura de la cuenca tomando en cuenta todas las curvas y rectas que este mismo pueda presentar.

Longitud total del drenaje (Ln): Se define como la sumatoria de las longitudes de todos los cauces que se identifiquen dentro de una cuenca delimitada.

Ancho promedio (Ap): Se define como la relación entre la superficie de la cuenca (A) por su longitud axial (La). Para la obtención de este parámetro se utilizo la siguiente formula matemática.

$$Ap = \frac{A}{La}$$

Factor de forma, Horton, 1932. (If): Este factor mide cuan alargada (rectangular) puede ser una cuenca. Según descripciones de Horton (1932) una cuenca con un (If) bajo, es menos propensa a crecientes que una cuenca con la misma área y mayor factor de forma. Se realizará una clasificación con base al resultado teniendo que para valores menores a la unidad (< 1) será una cuenca alargada, valores igual a la unidad (=1) cuadrada, y valores mayores a la

unidad (≈ 1) una cuenca achatada. Para la obtención de este dato se utilizó la fórmula propuesta por Horton de 1932.

$$If = \frac{A}{La^2}$$

Coefficiente de sinuosidad, Llamas, 1993 (S): Se define como la relación entre la longitud axial y la longitud del cauce principal en línea curva o recta desde su inicio al final. Para la obtención de este dato se utilizó la fórmula propuesta por Llamas en 1993.

$$S = \frac{L}{La}$$

Coefficiente de compacidad, Gravelius, 1914 (Kc): Este coeficiente relaciona la longitud del perímetro de la cuenca y la longitud del perímetro de un círculo imaginario con un área igual a la de la cuenca estudiada. Para la obtención de este dato se utilizó la fórmula propuesta por Gravelius, 1914.

$$Kc = \frac{P}{[2\sqrt{(\pi * A)}]}$$

La interpretación del resultado del coeficiente de compacidad se basa en que a medida que el (Kc) tiende a ser 1 (la cuenca tiende a ser redonda), la peligrosidad de la cuenca ante las crecidas es mayor; lo contrario sería que mientras el (Kc) se acerca a un valor de 2 o mayor, ya que el tiempo de cada gota en diferentes puntos de la cuenca va a ser muy diferente y por lo consiguiente no se tendrá un aumento drástico en las ondas.

Parámetros de relieve: Estos parámetros se relacionan a la forma de la topografía de la superficie de la cuenca y sus variaciones.

Curva hipsométrica adimensional, Strahler, 1957 (CHA): La curva hipsométrica es una gráfica en donde en el eje de las ordenadas se tiene la altura relativa (m.s.n.m.) y en el eje de las abscisas el área (en %) relativa sobre la altura dada. Strahler (1957), describe que la importancia de la relación área y altura reside en que es un indicador de equilibrio dinámico en el cual puede estar una cuenca. La siguiente figura (Figura 1) muestra tres curvas hipsométricas ideales las cuales tienen características especiales como: A) Refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; B) es la característica de una cuenca en equilibrio y por último C) es muy característica de una cuenca que predomina la depositación de material.

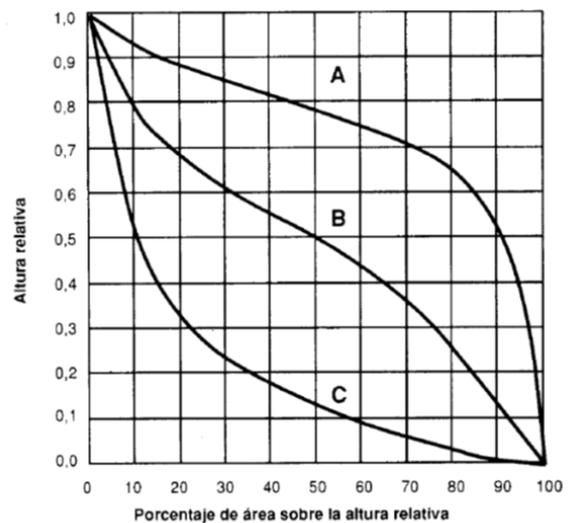


Figura 1. Etapas de una cuenca.
Nota: Reproducido de Strahler, 1957

Pendiente media de la cuenca (PM): Según Heras (1972), se entiende por pendiente media de una cuenca a la media ponderada de todas las pendientes que se pueden considerar dentro de la cuenca. Para la obtención de este parámetro se utilizó la fórmula de Llamas J., 1993.

$$PM = \frac{2H}{P}$$

Orientación de ladera: Este parámetro se define como la dirección geográfica de las laderas con respecto del norte geográfico, se obtuvo en un mapa generado por medio de un SIG.

Elevación media de la cuenca: Se define como la altura a la mitad de la cota mayor y la cota menor, generalmente estas alturas tienen como referencia el nivel del mar.

Coefficiente de masividad, Martonne, 1940 (Cm): Se refiere a la relación entre la elevación media de la cuenca y el área de la cuenca, por lo tanto, se interpreta que: el resultado mientras más alto sea numéricamente, quiere decir que es una cuenca muy montañosa y mientras más bajo sea representa una cuenca montañosa o moderadamente montañosa. Para la obtención de este parámetro se utilizó la siguiente fórmula.

$$Cm = \frac{\text{Elevación media de la cuenca}}{\text{Área de la cuenca}}$$

Parámetros de drenaje: Estos parámetros son los que tienen relación con la manera en cómo se desarrollan los cauces dentro de la cuenca.

Orden de los cauces, Strahler, 1964: El método de Strahler para determinar el orden de los cauces es el método más común, comprensible y adecuado para complementar las características morfológicas de las cuencas. Arthur Strahler (1957 – 1964) describe que el orden de los cauces es una medida numérica de la complejidad de sus derivaciones o bifurcaciones que se utiliza para definir el tamaño de un río en función de la jerarquía de sus afluentes.

Densidad de drenaje, Horton, 1945: Este parámetro permite tener un conocimiento amplio de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. Por lo tanto, mientras mayor sea la densidad del drenaje se tendrá un mayor potencial a la erosión del terreno. El cálculo de la densidad de drenaje se obtuvo por medio de la fórmula propuesta por Horton en 1945.

$$D_d = \frac{Ln}{A}$$

Pendiente media del cauce (J): Se define como la inclinación predominante que tiene el cauce principal de una cuenca. Para determinar la pendiente media en la presente investigación se utilizó la fórmula de los valores extremos, el cual consiste en determinar el desnivel entre el punto más elevado y el más bajo del cauce y posteriormente dividirlo entre la longitud del mismo cauce.

Tiempo de concentración, Kirpich, 1940: De manera técnica se describe que es el tiempo transcurrido entre el final del histograma de excesos y el final del escurrimiento directo. Para lo cual se tienen rangos de 0-41,5 minutos de tipo rápido, 41,6 – 83,2 min como de tipo moderado y 83,3 minutos en adelante sería de tipo lento. Para determinar dicho valor se utilizó la ecuación de Kirpich (1940) el cual tomo de base 7 cuencas rurales estadounidenses con canales bien definidos y pendientes pronunciadas (Chow et al. 1994).

$$T_c = 0.06626 * \left[\frac{L^2}{J} \right]$$

Resultados y discusión

La cuenca del río Samalá desemboca hacia la cuenca del océano Pacífico. Iniciando con los resultados preliminares de la investigación se tiene los parámetros básicos de forma de la cuenca del río Samalá, enlistados en la tabla 1.

Tabla 1. *Parámetros básicos de forma.*

Parámetros de forma		
1	Área (A)	1482,17 km ²
2	Perímetro (P)	271,35 km
3	Longitud del curso principal (L)	141,25 km
4	Longitud Axial (La)	97,20 km
5	Longitud total del drenaje (Ln)	2907,15 km
6	Ancho promedio (Ap)	15,24 km

Ahora se describirán los resultados de los parámetros específicos de la cuenca iniciando con el parámetro de factor de forma la cuenca del río Samalá dio un resultado de 0,15, el cual la sitúa en el rango que tiende a ser una cuenca alargada, este valor indica que la cuenca posee baja susceptibilidad a crecidas repentinas del cauce principal.

Luego, el parámetro de coeficiente de sinuosidad, donde la cuenca del río Samalá obtuvo el resultado de 1,45, que es distintivo para un cauce principal de tipo sinuoso, este tipo de canales son característicos para áreas con una pendiente intermedia. Por último, el coeficiente de compacidad, para lo cual dicha cuenca obtuvo un resultado de 1,98, que la sitúa en una cuenca con una forma rectangular oblonga, esto quiere decir que, ante precipitaciones fuertes dentro del área, la cuenca tendrá una dinámica favorable para transportar los flujos de agua hasta su desembocadura.

Luego con relación a los parámetros de relieve, se tiene la curva hipsométrica adimensional. Con base a la tabla de datos obtenida por medio de un SIG se generó la gráfica (Figura 2).

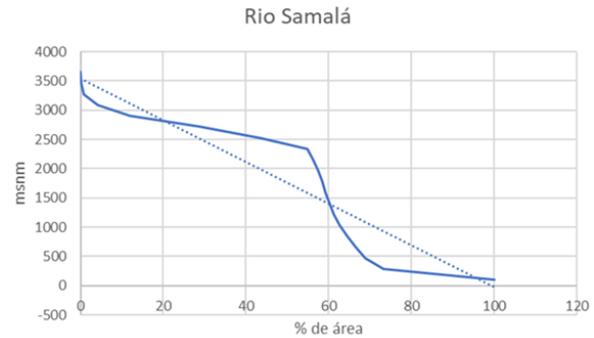


Figura 2. *Curva hipsométrica de la cuenca del río Samalá.*

La cuenca del río Samalá en general es variable y no responde a una sola etapa con relación al desarrollo de esta; con base a la gráfica (figura 2) de la curva hipsométrica, la cuenca posee dos áreas que las características evidencian que están en la etapa de vejez (Strahler, 1957) las cuales serían, la parte alta y baja de la misma, luego se tiene el área intermedia que, en base a la forma de la línea en la gráfica, es característico de una etapa juvenil (Strahler, 1957).

La cuenca en tiene una pendiente del 18,33 %, dicha pendiente es normal para una cuenca que la mayor parte de su área se encuentra en una planicie costera. Luego la orientación de laderas donde predomina en toda el área colores azules y celestes los cuales indican una orientación hacia el sur y suroeste, esta evidente predominancia se debe a que la cuenca del río Samalá desemboca hacia el sur del país en el océano Pacífico. La elevación media de la cuenca del río Samalá es de 1 870 msnm, el cual se considera como un dato alto ya que en dicha cuenca predomina la planicie costera, dicha cuenca dentro de sus límites posee parte del

complejo volcánico Santa María – Santiaguito. Por último, el coeficiente de masividad, para este caso la cuenca del río Samalá tiene un resultado de 1,26, el cual la ubica en la clase de moderadamente montañosa.

Iniciando con los parámetros relacionados al drenaje de la cuenca, se tiene el orden de los cauces, con el cual se obtuvo un resultado de orden 7 (Figura 3), en base a la metodología de Strahler 1964; debido al orden alto que tiene la cuenca, se sabe que las gotas de lluvia permanecerán menos tiempo en las laderas y se incorporaran más rápido a un cauce donde la velocidad de escurrimiento es mayor. Luego con relación a la densidad de drenaje, se tuvo un resultado de 1,96, el cual la ubica en la clase de moderada densidad de drenaje; acompañado de una pendiente media del cauce de 0,02 m/m. Por último el tiempo de concentración fue de 832,18 horas, esto la identifica como un tiempo lento en el escurrimiento del agua.

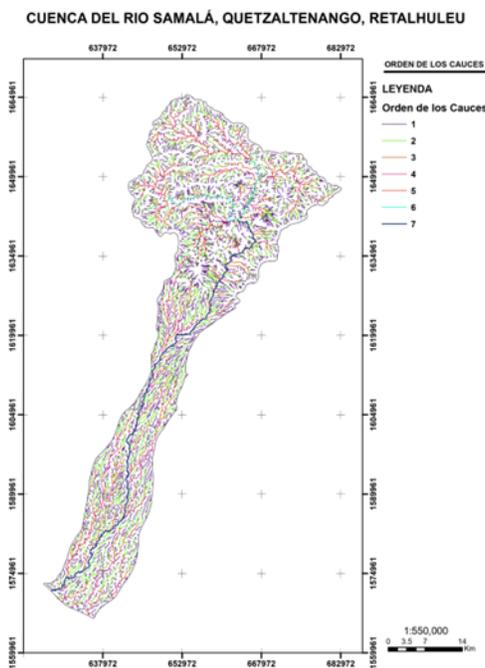


Figura 3. Orden de cauces del río Samalá

Conclusiones

Como conclusiones parciales de la investigación se obtuvo que el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Samalá, tomando en cuenta todos los parámetros obtenidos, los cuales evidenciaron la complejidad de la cuenca, también los resultados proporcionaron información sobre la dinámica de la hidrología.

Los parámetros de forma evidenciaron por medio del resultado del factor de forma que la cuenca tiene una forma alargada, esta forma disminuye la tendencia a crear inundaciones, debido a que las distancias de los parte aguas hacia los cauces principales serán distintos y los aumentos de caudales serán progresivos; con respecto al coeficiente de sinuosidad se determinó que predominaba el cause principal con una forma sinuosa, este resultado es debido a la poca pendiente que hay en la mayoría de la cuenca, por lo tanto el cauce toma formas curvas simultaneas resultando que la velocidad de flujo disminuya, y como consecuencia que el tiempo de concentración aumente; el resultado del coeficiente de compacidad etiqueta a la cuenca como de forma rectangular oblonga, debido a este resultado el nivel del cauce principal de la cuenca será afectado de manera progresiva ante fuertes precipitaciones.

Los parámetros de relieve evidenciaron por medio de la curva hipsométrica de la cuenca del río Samalá un avanzado y complejo grado de desarrollo, el cual corresponde a dos partes de baja energía con características de depositación de materiales y una parte de alta energía de arrastre y transporte de detritos; para complementar el parámetro anteriormente descrito, el coeficiente de masividad

evidencio una cuenca de tipo moderadamente montañosa, lo que indica que no habrán desniveles bruscos que beneficien en gran manera la erosión y transporte de material, lo que si sucederá es acumulación de escorrentía en las partes bajas del terreno ayudando a la depositación del material por la baja energía de transporte de detritos.

La densidad de drenaje moderada de la cuenca del río Samalá manifiesta el equilibrio dinámico del sistema fluvial acorde a las condiciones de topografía, hidrología y geomorfología de la región, con áreas de posible acumulación de escorrentía en tiempos de alta intensidad de precipitación, acompañado a esto se tiene que la red de drenaje es de orden 7, esto indica un alto desarrollo hidrológico; para complementar el análisis se tiene que la cuenca posee un tiempo de concentración lento, este resultado quiere decir que la capacidad de transportar las precipitaciones no será de la mejor manera, y por ende va desarrollar áreas de acumulación de escorrentía como lo mencionado anteriormente.

Agradecimientos

Esta investigación es realizada como parte del trabajo de graduación para optar al título de Ingeniero Geólogo, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el Centro Universitario del Norte. Con el apoyo y asesoramiento del Ing. Geól. Luis Alfredo Godoy Morales.

Referencias

- Askoa González. Departamento. Geografía, Prehistoria y Arqueología de la Universidad del País Vasco. *Análisis Morfométrico de la Cuenca y de la Rede de Drenaje del río Zadorra y sus Afluentes Aplicado a la Peligrosidad de Crecidas*. 2004. España.
- Cairoza, J. Diaz, J. Oliveros Acosta. Universidad Tecnológica de Bolívar. *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la Geomorfología de Cuencas*. Octubre del 2011.
- Cruz, B. Gaspari, F. et. al. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. *Análisis morfométrico de la Cuenca Hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México*. Abril del 2015. Jalisco, México.
- Gabriela E., Gaspari, Fernanda, et. al. *Revista Geográfica Venezolana*, vol. 55. Universidad de los Andes Venezuela. Aspectos morfométricos de la cuenca alta del Arroyo Napaleofù, provincia de Buenos Aires-Argentina. Diciembre del 2014. Mérida, Venezuela.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4.
- Horton, R. E. *Geological Society of America Bulletin*. "Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology". U.S.A. 1945.
- Horton, R. E. *Transactions American Geophysical Union*. Drainage-Basin characteristics. Washington, USA.
- Kirpich ZP. *Civil Engineerin*, New York, USA. Time of concentration of small agricultural watersheds. 1940. New York, USA. P 362.
- Llamas J. Servicio editorial de la Universidad del país vasco. *Hidrología General: Principios y Aplicaciones*. Bilbao, España. 1993. P 365.
- Strahler, A. *Bulletin of the Geological Society of America*. Hypsometric analysis of erosional topography. USA. 1952. P 1117 – 1142.

Strahler, A. Mc Graw-hill. "Quantitative geomorphology of drainage basins and Chanel networks. New York – U.S.A., 1964. P 350-361.

Wei Luo, John Harlin. Journal of the American Water Resources Association. Atheoretical travel time base don watershed hypsometry. August 2003.

IMPORTANCIA DE LA INTEGRACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS EN ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS ANTES DE LA PERFORACIÓN

IMPORTANCE OF INTEGRATING GEOPHYSICAL METHODS IN HYDROGEOLOGICAL STUDIES BEFORE DRILLING

Aideé Arvizu-Schlemper

GeodeGua, Servicios Integrales en el Estudio de las Ciencias de la Tierra, Guatemala
Maestrante de Gestión de Recursos Hidrogeológicos, Escuela de Estudios de Postgrado FIUSAC
arvizu.g@gmail.com

Resumen

Debido a los esfuerzos actuales en la gestión de recursos hídricos, es necesario optimizar la integración de estudios de exploración geofísica antes del diseño y perforación de un pozo manual o mecánico, para determinar con menos incertidumbre los sitios con mejores posibilidades de localización de agua subterránea para su explotación. Este trabajo describe la importancia de la aplicación de la exploración geofísica con base a dos estudios reales efectuados durante el año en curso, usando el método geoeléctrico en técnica de sondeo eléctrico vertical tipo Schlumberger, la cual, nos permite determinar los posibles materiales que conforman el subsuelo, su geometría y presencia de agua. Para así determinar de una forma inicial si el sitio en cuestión presenta buenas posibilidades para el desarrollo de un pozo. Los resultados mostrados corresponden a dos estudios en diferentes localidades, denominados Caso I y Caso II, cada caso muestra resultados diferentes y muy interesantes, que pueden ahorrar tiempo y recursos. El Caso I muestra de manera reiterada porque es necesario el entendimiento del subsuelo antes de invertir dinero en una perforación, ya que la geología puede cambiar de manera lateral en cuestión de metros reduciendo nuestras posibilidades de abastecimiento de agua a 0%, mientras que, el Caso II presenta condiciones geológicas que permiten una perforación exitosa casi en cualquier punto del área. Con base a este análisis, se desea hacer conciencia de la importancia de la inclusión de los métodos geofísicos antes de la elección de un nuevo punto de perforación para abastecimiento hídrico, ya que un buen modelado geofísico del problema inverso puede ahorrar tiempo y recursos y dar un apoyo extra a la gestión de recursos hidrogeológicos.

Palabras clave: *Aguas subterráneas, geofísica, hidrogeología, hidrogeofísica, sondeo eléctrico vertical.*

Abstract

Due to the current efforts in the management of water resources, it is necessary to optimize the integration of geophysical exploration studies before the design and drilling of a manual or mechanical well, in order to determine with less uncertainty the sites with the best possibilities of locating groundwater for its exploitation. This work describes the importance of the application of geophysical exploration based on two real studies carried out during the current year, using the geoelectric method in Schlumberger type vertical electric sounding technique, which allows us to determine the possible materials that make up the subsoil, its geometry and presence of water. To determine in an initial way if the site in question presents good possibilities for the development of a well. The results shown correspond to two studies in different locations called Case I and Case II, each case shows different and very interesting results, which can save time and resources. Case I repeatedly shows why it is necessary to understand the subsoil before investing money in drilling, since the geology can change laterally in a matter of meters, reducing our possibilities of water supply to 0%, while Case II presents geological conditions that allow successful drilling almost anywhere in the area. Based on this analysis, it is desired to raise awareness of the importance of including geophysical methods before choosing a new drilling point for water supply, since a good geophysical modeling of the inverse problem can save time and resources and give extra support for the management of hydrogeological resources.

Keywords: *Geophysics, groundwater, hydrogeology, hydrogeophysics, vertical electrical sounding.*

Introducción

Actualmente la gestión de recursos hidrogeológicos es un problema de prioridad en la agenda mundial. Como bien se sabe el agua es el líquido más abundante del planeta, el 96.5% pertenece a aguas saladas como océanos, bahías y mares; del porcentaje restante, menos del 1% corresponde a agua dulce usada para consumo humano: Es importante aclarar que de ese 1% de agua dulce, cerca del 99% corresponde a aguas subterráneas (Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993). Esta estimación de aguas subterráneas parece mínima, por lo cual es importante determinar la importancia de la definición de los acuíferos subterráneos mediante la integración de métodos de exploración indirectos del subsuelo como lo es la hidrogeofísica.

La ubicación de pozos de abastecimiento es una actividad desafiante debido a la complejidad de la geología, así como la elección del personal del proyecto de perforación. Debido a que el sitio puede cumplir con las características de una zona productora, pero si el encargado del diseño de pozo y el proceso de construcción no está calificado, tendremos un pozo seco o de bajo caudal.

Este artículo presenta dos casos de estudio en distintas zonas de Guatemala, con diferente geología, pero que comparten un problema en común: insuficiente disponibilidad de agua para cumplir la demanda hídrica local.

En ambos estudios se optó por una exploración del subsuelo mediante modelamiento geofísico, en metodología geoeléctrica con la técnica de sondeo eléctrico vertical arreglo tipo Schlumberger, también conocida como SEV tipo Schlumberger. Los métodos

geoeléctricos han sido descritos durante las últimas décadas como una fuente importante de información para incrementar las posibilidades de perforación de un pozo de abastecimiento exitoso, y a su vez evitar costos innecesarios de perforación en sitios que no presentan las condiciones hidrogeológicas necesarias para una explotación exitosa que se ajuste a la demanda local.

Como sabemos existen varias metodologías geofísicas que pueden apoyarnos en el estudio de las aguas subterráneas, pero los métodos geoeléctricos tienen la ventaja de que puede identificar de manera exitosa la posible granulometría del material geológico, así como la identificación si este presenta probabilidades de contener agua, su posible geometría y en algunos casos con modelados 2-D la definición de rasgos estructurales como fallamientos, cavernas, agrietamientos y otros que pueden influenciar de manera considerable el flujo de agua.

Otras ventajas de estas metodologías que las convierte en el método primario de elección por el especialista son considerar los tiempos de ejecución rápidos, bajos costos operativos y accesibilidad del proyecto. Pero de igual forma estas ventajas se han convertido en un inconveniente tecnológico-ingenieril, debido a los retos en la carencia del capital humano, ya que el personal calificado para la ejecución de estudios hidrogeofísicos es limitado o nulo en varios países; por lo que en su mayoría los estudios suelen realizarse por personal semicalificado, lo que provoca problemas a corto y largo plazo como diseños de pozos de mala calidad, mala elección del sitio de abastecimiento y/o perforaciones de bajo caudal debido a la presencia de finos. En el peor de los casos en los últimos años se ha notado la inclusión al mercado de equipos de medición geoeléctrica de muy bajo costo de menos del 10% del

costo total de un equipo de línea certificado, los cuales funcionan como una caja negra al no determinar o explicar cómo se obtienen los datos en campo, la metodología base científica para su adquisición, y/o sus fundamentos para procesamiento; lo cual impacta al mercado y los avances del campo de la hidrología de manera negativa, ya que estos equipos entregan o producen datos de poca confiabilidad.

Sin más, es importante hacer conciencia que el desarrollo de resultados positivos en la gestión de aguas subterráneas depende de la adecuada integración de datos hidrogeológicos locales y regionales, más modelados únicos para cada sitio apoyados de exploraciones geofísicas. El apoyo y complementación de datos puntuales medidos desde superficie del terreno con técnicas y metodologías de exploración geofísica es una herramienta más en el campo del desarrollo de la hidrología para el entendimiento más acertado del comportamiento de aguas subterráneas para los procesos de toma de decisiones.

Antecedentes

Como se mencionó durante la introducción el objetivo de este artículo es describir la importancia de la incorporación de los métodos geofísicos a la hidrología, para poder tener una evolución más asertiva y aceptación de la hidrogeofísica. En orden de este objetivo es necesaria la comparativa de dos estudios de exploración ejecutados durante el año 2022 dentro de Guatemala con fines hidrogeológicos, a los cuales por cuestiones de confidencialidad los denominaremos a lo largo del artículo Caso I y Caso II.

Caso I

El primer caso de estudio se localizó en el centro del país muy cerca del Parque Municipal de Sanarate Lázaron Chacón. En el sitio se ejecutaron 3 SEV localizados en una línea recta poco mayor a 1 km de separación, así como un vuelo Drone y caminamientos para determinar la geología local del lugar. El estudio se efectuó para la perforación de un nuevo pozo mecánico de abastecimiento privado, pero durante las investigaciones de campo se informó que, a menos de 1 km del sitio, otro propietario había perforado un pozo recientemente que no proporcionaba agua como los pozos vecinos. Motivo por el cual, se decidió incluir un sondeo eléctrico en el sitio, para determinar el posible modelo geológico, y obtener una posible respuesta a la carencia hídrica en ese pozo, y a su vez determinar el mejor sitio de perforación para el nuevo pozo.

Para tener un panorama más completo del área es importante mencionar que el sitio se localiza en la Provincia Fisiográfica Tierras Altas Cristalinas y a nivel más local dentro de la subprovincia Colinas Falladas y plegadas de Chuarrancho Sanarate, su forma ha sido originada por la influencia de la roca y la tectónica de la región, consistente en fallas y plegamientos relacionados en la falla del Motagua, el sitio está constituido por rocas metamórficas, como filitas, anfibolitas y esquistos verdes, y algunas rocas sedimentarias.

Acorde al aforo local, la mayoría de los pobladores cuentan con pozos privados de abastecimiento poco profundos, menores a 60 metros de profundidad.

Caso II

El segundo caso corresponde a un sitio localizado al sureste del país cerca de la frontera de Honduras, a

pocos kilómetros del Parque Chatún. En este proyecto se ejecutaron de igual forma 3 SEV para generar un modelado geofísico de los posibles materiales que conforman el subsuelo y determinar si el área presenta buenas posibilidades para el abastecimiento hídrico de una nueva comunidad. De manera similar al caso anterior durante la exploración de campo y contabilización de pozos se notó que el sitio tenía la construcción de un nuevo pozo a los 400 metros de profundidad el cual acorde a los registros presentó caudal durante las primeras 3 horas de bombeo, pero después ya no aportó agua.

El área se encuentra en la Provincia Fisiográfica Tierras Altas volcánicas y a nivel más local dentro de la subprovincia Abanico aluvial de Esquipulas, el subsuelo del sitio consiste de materiales de origen volcánicos recientes, además, dicha zona posee una litología ígnea variable, la cual por sus características poseen una permeabilidad primaria importante.

A los alrededores de los sitios de estudio se tiene la presencia de 8 pozos o más, solamente se pudo recopilar información de 3 de ellos. El primero es un pozo artesanal de 10 metros de profundidad el cual da 65 galones de agua por día. El segundo es un pozo mecánico a 260 metros de profundidad con un caudal de 135 galones por minuto. Mientras que el tercer pozo también es de tipo mecánico con una profundidad de 428 metros, con un caudal de 17 gpm, es importante resaltar que este se secó a las 3 horas durante la prueba de bombeo.

Metodología

Para ambos casos se diseñó una campaña muy similar de exploración y adquisición de datos, así como procesamiento y modelamiento, aunque es importante

señalar que la geología y topografía del área es diferente en cada caso.

Se ejecutaron 3 SEV en cada sitio, localizados en una línea recta de poco más de un kilómetro de largo, con la intención de generar un modelado 2-D del sitio. Usando la configuración tipo Schlumberger con una abertura de $AB/2$ de 0,5 a 300 m entre el centro del arreglo y cada electrodo de corriente, con un total de 26 sitios de medición, acompañados por 4 empalmes. Los datos obtenidos en campo para cada SEV generaron una curva logarítmica unidimensional de resistividad aparente para cada punto, la cual debe ser rectificadas con las curvas de Orellana y Money para cumplir el criterio de interpretabilidad, eso significa que la resistividad no tenga una tendencia a 0 o al ∞ .

De ser correcto lo anterior, los datos fueron evaluados primeramente de forma manual con las curvas de Orellana y Money, en conjunto de las curvas auxiliares de Smirnov, con la integración de la geología local, datos de sitio y otra información pertinente del área. Este análisis es recomendable en cada proyecto, ya que, al ser los datos procesados solamente por un software o proceso automatizado, se puede caer en la problemática de un procesamiento y/o interpretación errónea de los datos de campo, debido a la complejidad de que existe una sola respuesta al modelo directo, pero infinitas soluciones al modelo indirecto.

Los datos fueron procesados con software especializado y el proceso establecido para obtener el modelo unidimensional correspondiente a las capas geoelectricas detectadas con su resistividad real y espesor correspondiente.

Resultados

Tanto el caso I como el caso II, presentaron resultados totalmente diferentes. Esto se esperaba desde la planificación de cada proyecto debido a la geología y condiciones únicas de cada sitio.

El modelamiento e interpretación geoelectrica de los SEVs del caso I, mostro que la zona es heterogénea, debido a que el SEV-01 indico valores de resistividad mucho mayores en comparativa a los valores de resistividad de los SEV-02 y SEV-03, como se puede apreciar en los siguientes gráficos.

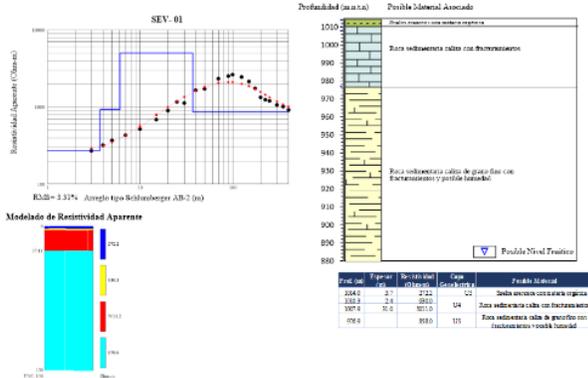


Figura 1. Curva y modelamiento SEV-01 Caso I

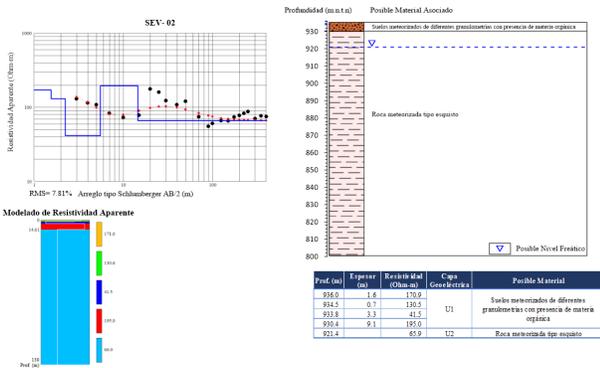


Figura 2. Curva y modelamiento SEV-02 Caso I

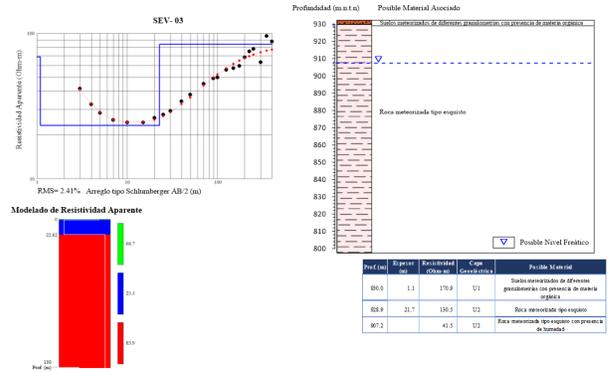


Figura 3. Curva y modelamiento SEV-02 Caso I

Con base a lo anterior el modelamiento de los datos del Caso I (figura 1-3), la geología local y una imagen área obtenida mediante un vuelo Drone, se determinó que el área de estudio se conforma por dos posibles geologías distintas, la parte norte está compuesta por un paquete superficial de características geofísicas asociadas a posibles suelos meteorizados de diferentes granulometrías con presencia de materia orgánica, de manera subyacente se presenta un paquete de posible roca sedimentaria caliza con fracturamientos y por debajo de los 30 metros de profundidad se presenta un posible paquete de roca sedimentaria caliza de grano fino con fracturamientos y posible humedad. Mientras que, en la parte sur, se presentaron materiales de génesis distinta, de manera superficial, se presentan posibles suelos meteorizados de diferentes granulometrías con presencia de materia orgánica, y de manera subyacente las propiedades de las rocas son indicativas de posibles rocas meteorizadas tipo esquisto altamente fracturada (figura 4).

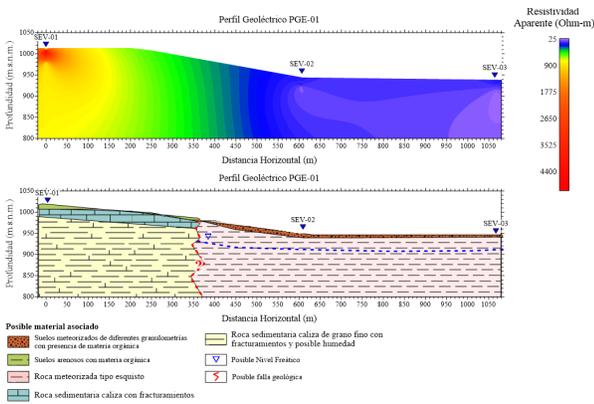


Figura 4. Modelamiento 2-D de SEVs Caso I

Mientras que el Caso II, los 3 SEVs presentaron resistividades y un comportamiento muy similar en las curvas de interpretación (figura 5-7). Lo cual se asume a que la geología del sitio es más homogénea y no presenta cambios abruptos por fallamientos, como el caso anterior.

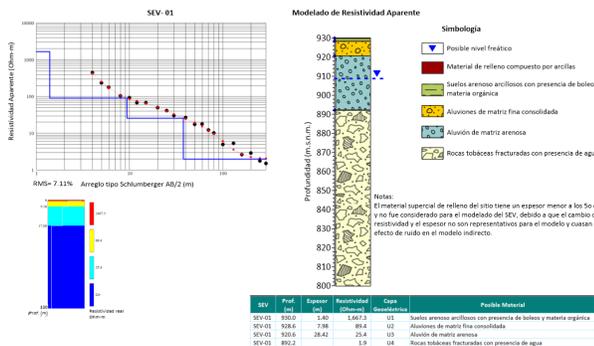


Figura 5. Curva y modelamiento SEV-01 Caso II

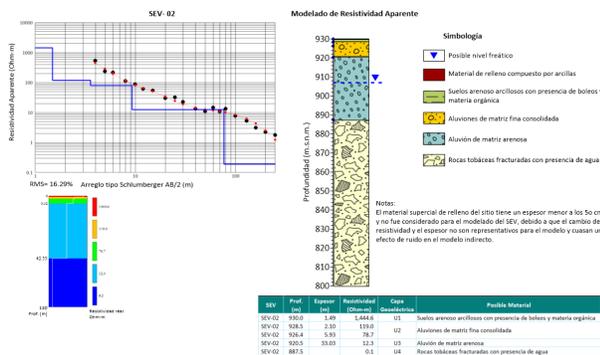


Figura 6. Curva y modelamiento SEV-02, Caso II

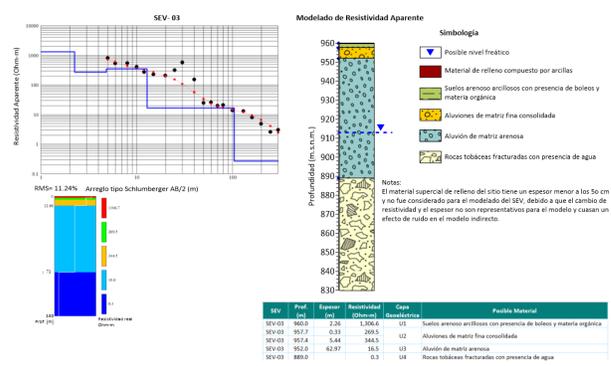


Figura 7. Curva y modelamiento SEV-03 Caso II

De acuerdo con los modelamientos de los SEVs correspondientes al Caso II, también se construyó un perfil 2-D, donde se determinó que, con base a la respuesta geofísica y la geología local, el sitio está compuesto por 5 posibles horizontes los cuales presentan una geometría muy similar entre sí. De manera superficial un relleno compuesto por material de diferente granulometría en una matriz arcillosa, el cual es de un espesor menor a los 50 cm y no fue considerado para el modelamiento geofísico, pero tiene que ser mencionado debido a que fue observado de manera directa.

De manera subyacente se presentan altas resistividades asociadas a posibles suelos arenos arcillosos con presencia de boleas y materia orgánica. Subyacente se manifestó una unidad compuesta por posibles aluviones en una matriz de finos. La siguiente unidad está conformada por un posible aluvión en matriz arenosa con resistividades bajas de 12 a 25 Ohm-m, de acuerdo con el valor geoelectrico este está asociada con la presencia de humedad. Finalmente, la última capa de exploración detectó una unidad compuesta por muy bajas resistividades menores a los 2 Ohm-m, y se asocia a posibles rocas fracturadas tobáceas con presencia de agua (figura 8).

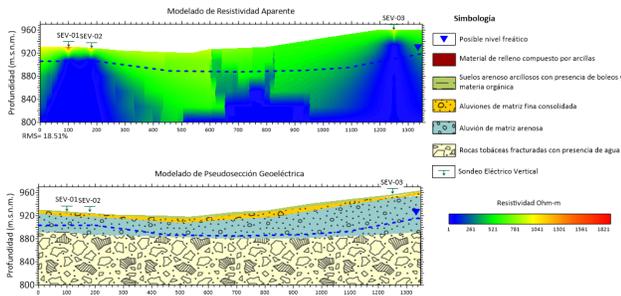


Figura 8. Modelamiento 2-D de SEVs Caso II

Discusión

Con base a la técnica empleada y los resultados de ambos Caso, podemos determinar la importancia y apoyo del modelamiento geofísico, ya que este nos permite entender de una manera más amplia el subsuelo y su posible comportamiento hidrogeológico asociado con el tipo de materiales que lo conforman. Nos muestra una ventaja clara de la integración hidrogeofísica en los modelamientos hidrogeológicos, que apoya al ahorro de tiempo, ahorro de recursos económicos en pozos fallidos.

También podemos tener una clara reflexión de lo que nos aporta un modelado geofísico, su versatilidad y la nueva información hacia el entendimiento de las aguas subterráneas. Ya que con esta metodología podemos delimitar las zonas de perforación, como en el Caso I donde se tiene un material compuesto por granulometrías finas las cuales son de baja permeabilidad, y a pesar de que presentan la presencia de agua, su característica física no permite el libre flujo del fluido debido a las fuerzas de atracción que presentan los poros con respecto al líquido, por lo que si hubiera existido un estudio geofísico durante el diseño de pozo, no se hubiera recomendado la perforación en esa zona, o se hubieran buscados alternativas como la búsqueda de acuíferos profundos.

Es necesario hacer énfasis de la necesidad de contar con capital humano con el conocimiento de las metodologías y su expertise en la adquisición, procesamiento e interpretación de datos geofísicos; para obtener resultados más certeros y con credibilidad, y de igual forma para los procesos de perforación. Pues la raíz del problema del Caso II fue que posiblemente no se tiene un buen diseño de pozo.

Conclusiones

La integración de metodologías geofísicas, con datos geológicos, datos de pozo y otra información concerniente en cada área de estudio, nos permite conocer y entender de manera más amplia las características hidrogeológicas del sitio, para la decisión del sitio de perforación más acertado.

Como determinamos el Caso I presenta un cambio abrupto en la geología del área, lo cual hace que la zona norte no presente buenas posibilidades de transmisibilidad del fluido debido a los finos que conforman la roca, por lo cual podemos concluir que, si se hubiese contado con un estudio hidrogeofísico del sitio, no se hubiera recomendado la perforación, lo cual hubiera ahorrado tiempo y recursos económicos.

La importancia del Caso II se basa en que el área en si presenta buenas posibilidades de producción, pero lo que fallo fue la durante la perforación o prueba de bombeo, ya que posiblemente no se hizo un buen diseño de construcción de pozo, al desconocerse los posibles estratos que componen el subsuelo.

Finalmente podemos indicar que es de suma importancia el apoyo de un buen modelado geofísico para establecer el mejor sitio en superficie y la profundidad del pozo, para presentar las mejores probabilidades de explotación hídrica, así como su

apoyo en el diseño de construcción, en caso de que el sitio cuente con condiciones favorables.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincera gratitud al personal técnico de GeodeGua, por su apoyo en la adquisición de datos de campo y permiso para su uso en este documento. De igual forma al M.Sc. Wener Ochoa por sus enseñanzas para la construcción de artículos científicos.

Referencias

- Abdel Zaher, M., Younis, A., Shaaban, H., & Mohamaden, M. I. (2021). Integration of geophysical methods for groundwater exploration: A case study of El Sheikh Marzouq area, Farafra Oasis, Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 47(2), 239–244.
<https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.03.001>
- Akinnigbagbe Ae, Quadri Ad, & Ilori Oluwatobiloba J. (2020). Electrical Resistivity method for groundwater/borehole development, Owo LGA, Ondo State, Nigeria. *Journal of Geology & Geophysics*, 10(6), 1–5.
<https://www.longdom.org/open-access/electrical-resistivity-method-for-groundwaterborehole-development-owo-lga-ondo-state-nigeria.pdf>
- Breusse, J. J. (1963). Modern geophysical methods for subsurface water exploration. *Geophysics*, 28(4), 633–657.
<https://doi.org/10.1190/1.1439240>
- Cuerpos de Ingenieros de los Estados Unidos de America (2000). Evaluación de Recursos de Agua de Guatemala.
- GeodeGua. (2022). Datos Crudos para Sondeos Electricos, Caserío Palo de Pique, Guatemala. (Version 1) [Dataset].
- GeodeGua. (2022). Datos Crudos para Sondeos Electricos, Esquipulas, Guatemala. (Version 1) [Dataset].
- Gleick, P. H. (1993). Water in Crisis. In *A guide to the world's freshwater resources* (Vol. 1).
- Lam Díaz, & Rosa María. (2016). La redacción de un artículo científico. *Revista Cubana De Hematología, Inmunología Y Hemoterapia*, 32(1), 57–69.
<http://scielo.sld.cu/pdf/hih/v32n1/hih06116.pdf>
- How Much Water is There on Earth? | U.S. Geological Survey. (2018, June 6).
<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/how-much-water-there-earth>
- Mapas Geológicos :: (n.d.). Geologia Cunor Usac. Retrieved November 2, 2022, from
<https://www.geologiacunorusac.com/mapas-geologicos/>
- Moorkamp, M., Lelièvre, P. G., Linde, N., & Khan, A. (2016). *Integrated Imaging of the Earth: Theory and Applications* (Geophysical Monograph Series) (1st ed.). American Geophysical Union.
- Rubin, Y., & Hubbard, S. S. (2005). *Hydrogeophysics*. Springer Publishing.
- UNESCO World Water Assessment Programme, & Programme, U. W. W. A. (2022). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos: Aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible. Van Haren Publishing.
- Vann, S., Puttiwongrak, A., Suteerasak, T., & Koedsin, W. (2020). Delineation of Seawater Intrusion Using Geo-Electrical Survey in a Coastal Aquifer of Kamala Beach, Phuket, Thailand. *Water*, 12(2), 506.
<https://doi.org/10.3390/w12020506>
- Yesus Emmanuel Medeiros Vieira, Gerlane Cavalcante Messias, Renata Albergaria de Mello Bandeira, & Orivade Soares da Silva Júnior. (2019). Geofísica em auxílio à perfuração de poços artesianos para comunidades afetadas pela seca. *Estudo de caso em terras áridas. Interciencia*, 45(3), 164–168.
<https://www.redalyc.org/jatsRepo/339/33962773007/html/index.html>
- Yu, D. (2021). Analysis on the Important Application of Geophysical Exploration Technology. *E3S Web of Conferences*, 329, 01033.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132901033>

EVALUACIÓN DEL CAUDAL SEGURO EN UN POZO DE AGUA

EVALUATION OF THE SAFE YIELD IN A WATER WELL

Rudy Machorro Sagastume

Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales - ASGA

rudy.machorro@yahoo.com

RESUMEN

La evaluación del caudal seguro que puede generar un pozo de agua es una tarea compleja que incluye varios factores tal como el diseño y construcción del pozo, elaboración de columna estratigráfica y registro geofísico, propiedades del acuífero, posible interferencia con pozos vecinos, y calidad de agua subterránea. Se describe ampliamente el marco teórico del problema incluyendo las condiciones de flujo de agua subterránea (permanente y transitorio), abatimiento, cono de depresión, y el diseño e implementación de las pruebas de bombeo y de recuperación. La metodología aplicada a un pozo de agua en Guatemala incluye el procesamiento digital de datos hidrogeológicos, así como la selección del modelo hidrogeológico conceptual y la definición del nivel máximo admisible. Se estima la transmisividad hidráulica del acuífero con el método de Hantush y el método de recuperación de Theis, así como el porcentaje de error relativo para las mediciones de abatimiento que permiten inferir de manera preliminar un régimen cuasi-permanente de flujo a un caudal de 160 gpm.

La determinación del caudal seguro de un pozo debe de incluir la investigación exhaustiva del acuífero antes de perforar y construir el pozo, distinguiendo entre acuífero confinado y no confinado, y adoptando un criterio conservador en cuanto a la estimación del caudal máximo de modo que no ocurra sobreexplotación del acuífero. Los resultados de la prueba de bombeo deben ser evaluados de manera crítica considerando no sólo la recarga del sistema si no también la descarga, así como restricciones técnicas, ambientales, legales y económicas que pudieran aplicarse. Según el escenario hidrogeológico construido puede ser necesario restringir el abatimiento en el acuífero estableciendo un ritmo de bombeo máximo permisible en el pozo con fines de evitar el agotamiento del agua subterránea.

Palabras clave: *abatimiento, caudal seguro, cono de depresión, pozo de agua, régimen de flujo.*

ABSTRACT

The evaluation of the safe yield that a water well can generate is a complex task that includes several factors such as the design and construction of the well, elaboration of the stratigraphic column and geophysical survey, properties of the aquifer, possible interference with neighboring wells, and quality of groundwater. The theoretical framework of the problem is extensively described, including groundwater flow conditions (permanent and transient), drawdown, cone of depression, and the design and implementation of pumping and recovery tests. The methodology applied to a water well in Guatemala includes the digital processing of hydrogeological data, as well as the selection of the conceptual hydrogeological model and the definition of the maximum admissible level. The hydraulic transmissivity of the aquifer is estimated with the Hantush method and the Theis recovery method, as well as the relative error percentage for drawdown measurements that allow a preliminary inference of a quasi-permanent flow regime at a flow rate of 160 gpm.

The determination of the safe flow of a well must include the exhaustive investigation of the aquifer before drilling and constructing the well, distinguishing between confined and unconfined aquifer, and adopting a conservative criterion regarding the estimation of the maximum flow so that it does not occur overexploitation of the aquifer. The results of the pumping test must be critically evaluated considering not only the recharge of the system but also the discharge, as well as technical, environmental, legal and economic restrictions that may apply. Depending on the hydrogeological scenario built, it may be necessary to restrict the drawdown in the aquifer by establishing a maximum allowable pumping rate in the well in order to avoid the depletion of groundwater.

Keywords: *safe yield, drawdown, cone of depression, water well, flow regime.*

Introducción

El término caudal seguro se ha utilizado desde hace más de cien años (Lee, 1915) para tratar de definir la cantidad de agua que puede desarrollarse a partir de un reservorio de aguas subterráneas sin que ocurra agotamiento. Otros términos que se utilizan en la literatura como sinónimo de caudal seguro son: caudal potencial sostenido, caudal sostenido permisivo, caudal sostenible, y caudal máximo de la cuenca. La definición de caudal seguro integrada con base a la experiencia de varios hidrogeólogos es la siguiente (Fetter y Kremer, 2022):

“caudal seguro es la cantidad de agua subterránea que ocurre naturalmente que puede ser extraída de un acuífero sobre una base sostenida, económica y legalmente, sin perjudicar la calidad nativa del agua subterránea o crear efectos indeseables tal como daño ambiental.”

Los daños ambientales y/o efectos indeseables que pueden ser ocasionados por la sobreexplotación de acuíferos pueden incluir (Domenico, 1972) la reducción de flujo en un río, descenso de nivel del agua en un lago, secar humedales, intrusión de agua de mala calidad, infracción de derechos de uso de agua subterránea, aumento de costos de bombeo, y hundimiento de la superficie del terreno. La meta de manejo de agua subterránea debe enfocarse en determinar el caudal óptimo que incluye estos factores ambientales, determinando el caudal máximo en régimen cuasi permanente de un acuífero incluyendo la restricción que impida la generación resultados indeseables (Elwell y Lall, 1988). La pregunta crítica que puede formularse en este contexto es la siguiente:

¿Qué caudal se puede extraer de forma segura en un pozo?

No existe una respuesta sencilla a esta pregunta lo cual se debe a que la estimación del caudal confiable en un pozo de agua depende de la interacción compleja de varios factores (Misstear y Beeson, 2000) incluyendo las características del pozo asumiendo que fue diseñado y construido correctamente, disponibilidad de columna estratigráfica con identificación de las zonas principales de flujo, propiedades del acuífero, capacidad de la bomba, la red hidráulica, efectos de interferencia proveniente de otros pozos, y calidad de agua. En algunos casos existen restricciones impuestas por licencias de extracción de agua y regulación ambiental por impactos en humedales cercanos o ríos con bajo caudal. La calidad del estimado de caudal seguro del pozo dependerá fuertemente de la calidad de la información previamente mencionada para realizar el cálculo.

La estimación del caudal sostenible es esencial para la planificación adecuada del agua subterránea y el manejo del recurso ya que el bombeo intensivo de aguas subterráneas puede ocasionar problemas locales serios que incluyen un abatimiento rápido y agotamiento del agua. La sobreexplotación del acuífero ocurre cuando el volumen total de extracción de agua es mayor que la recarga total a lo largo de varios años (Kendouci y otros, 2023). Básicamente, el acuífero corre el riesgo de ser sobreexplotado cuando el ritmo de bombeo es mayor que el ritmo de recarga natural. La sobreexplotación frecuentemente va acompañada de consecuencias negativas persistentes tal como el descenso continuo del nivel del agua, deterioro gradual

de calidad de agua, incremento del costo de extracción de agua, y daños ambientales.

Marco teórico del problema

La estimación del caudal seguro para un pozo de agua amerita revisar el contexto de flujo de aguas subterráneas. Existen básicamente dos condiciones de flujo: régimen permanente y transitorio.

El régimen permanente (estado de equilibrio) ocurre cuando la prueba de bombeo se implementa hasta alcanzar una condición de equilibrio dinámico entre la entrada y la salida de agua subterránea, alcanzando un “estado de equilibrio” del nivel del agua en el pozo, implementando un ritmo de bombeo constante en un periodo de tiempo largo (Höltling y Coldewey, 2019). En otras palabras, el cono de depresión inducido por el bombeo ha alcanzado su extensión máxima, sin continuar expandiéndose, ya que se ha alcanzado un estado de equilibrio o de régimen permanente. En términos estrictos, en la práctica casi nunca se alcanza el flujo en régimen permanente ya que las condiciones de flujo están sujetas continuamente a cambios temporales, con las fluctuaciones naturales constantes del nivel de agua subterránea, así como las diferencias temporales en el flujo de entrada y salida de agua subterránea y las tasas variables de recarga de agua subterránea.

El flujo en régimen permanente es la excepción y no la regla ya que puede tomar meses a años en alcanzar un sistema en equilibrio después de que el bombeo comienza (Heath, 1983; Vuković y Soro, 1992). Por lo tanto, en la práctica únicamente puede alcanzarse un régimen cuasi-permanente en el cual el abatimiento generado durante el bombeo puede llegar a ser bastante bajo, despreciable o insignificante,

alcanzando un periodo de tiempo en que el nivel ya prácticamente se estabiliza por lo que se pueden asumir condiciones de régimen cuasi-permanente. El régimen transitorio ocurre cuando el nivel del agua cambia con el tiempo por lo que no se alcanza un equilibrio entre la recarga y la descarga; el gradiente hidráulico cambia con el tiempo y el cono de depresión continúa expandiéndose. Existen diferentes leyes y modelos analíticos para describir los diferentes tipos de flujo de agua subterránea lo cual está fuera del alcance del presente artículo.

La base de cualquier pronóstico en cuanto a la estimación del caudal seguro de un pozo de agua es la prueba de bombeo que debe realizarse al término de la construcción del pozo por lo que a continuación se describe detalladamente este experimento.

Prueba de bombeo

El término “prueba de bombeo” es una denominación inadecuada ya que el objetivo del experimento es evaluar las propiedades hidráulicas del acuífero y no de la bomba. Por lo tanto, el término correcto debe de ser “ensayo del acuífero” o “prueba de desempeño del acuífero”. Sin embargo, sigue predominando a nivel operativo el uso del término prueba de bombeo y es el que se utiliza en este artículo. El diseño exitoso de una prueba de bombeo requiere un buen conocimiento previo del acuífero, preparación de alto alcance y considerable experiencia de campo.

Preparación de la prueba de bombeo

La preparación se realiza en dos fases distintas (Watson y Burnett, 1995).

Fase 1. 1.1. Definir el contexto geológico del sitio, particularmente la geometría del acuífero. En caso de existir afloramientos cercanos al pozo, debe elaborarse un mapa geológico a la escala adecuada. El hidrogeólogo debería de visitar el sitio durante las operaciones de perforación y construcción del pozo. 1.2. Definir el ámbito hidrológico, particularmente la presencia cuerpos de agua superficiales que pueden constituir una fuente potencial de recarga y distorsionar la forma del cono de depresión. 1.3. Inventario de pozos de agua, georeferenciado, y con registro hidrogeológico completo para cada pozo. 1.4. Diseño conceptual de la prueba de bombeo que sea compatible con las propiedades hidrogeológicas del acuífero (Figura 1).



Figura 1. Prueba de bombeo realizada en pozo de Guatemala.

1.5. Gestión de permisos necesarios para construir el pozo de agua con la autoridad competente, MARN y municipalidad. 1.5. Revisar el diseño del pozo (Tabla 1), incluyendo perforación, registro geofísico, columna estratigráfica, entubado, filtro de grava, limpieza y desarrollo.

Fase 2. 2.1. Definir duración de la prueba, normalmente 24 horas, y confiabilidad del equipo (generador y bomba). 2.2. Momento para realizar la prueba; de ser posible la prueba debe realizarse

durante la época seca, cuando existe menos posibilidad de que los resultados sean afectados por la recarga del invierno. 2.3. Bomba y motor de la bomba. Para bombeo en pequeña escala con caudal proyectado de 100 gpm se recomienda una bomba sumergible. El flujo debe regularse mediante una válvula en la línea de descarga. Si la fuente de energía es un generador eléctrico debe monitorearse su desempeño con amperímetro y voltímetro. En áreas remotas puede utilizarse un generador diésel.

Tabla 1. Diámetro de entubados, caudal máximo esperado, y diámetro de bomba, Vuković y Soro (1992).

Diámetro del casing (")	Descarga Q (l/s)	Diámetro de bomba (")
6	6	4
8	5 - 11	5
10	9 - 25	6
12	22 - 41	8
14	38 - 57	10
16	53 - 82	12
20	75 - 112	14
24	100 - 190	16

2.4. Medición de caudal, ya sea mediante el método volumétrico con bote de 5 galones y/o barril de 50 galones, o caudalímetro instalado en la línea de descarga. El caudalímetro que se utilice debió de haber sido calibrado recientemente (dentro de los últimos 6 meses) con un $\pm 5\%$ de precisión. El caudalímetro debe de instalarse a lo largo de un tramo recto de tubería y alejado válvulas o curvas en la tubería. 2.5. Medición del descenso del nivel del agua se realiza con cinta graduada en milímetros o décimos de pulgada. 2.6. Ubicación de la descarga, de modo que el agua proveniente del bombeo sea descargada en un drenaje local o en un sitio lejano del pozo donde no constituye una recarga del acuífero que está siendo evaluado.

Implementación de la prueba de bombeo

La prueba de bombeo se implementa en tres fases discretas: **Fase 1. Prueba de bombeo escalonada.** Constituye una prueba preliminar de corta duración donde el caudal se incrementa en escalones con fines de establecer la eficiencia del pozo, la respuesta pronosticada del acuífero y el funcionamiento correcto de todo el equipo de bombeo. El diseño y análisis detallado de la prueba escalonada se describe en Machorro Sagastume (2018).

Fase 2. Prueba de bombeo principal. Esta prueba aporta los datos necesarios para desarrollar las propiedades del acuífero. Las mediciones antes del inicio de la prueba incluyen el nivel estático y sincronización del reloj. El protocolo típico para la medición de la variación de niveles de agua (Figura 2) durante el bombeo -niveles dinámicos- se muestra en el Tabla 2.



Figura 2. Fotos que muestran la medición de niveles de agua subterránea.

Luego de iniciarse el bombeo también debe de observarse el caudalímetro para confirmar que la descarga de agua bombeada se encuentra dentro de lo pronosticado.

Fase 3. Prueba de recuperación del nivel del agua. Consiste en la medición de niveles inmediatamente

después que termina la prueba de bombeo aportando datos muy significativos para estimar la transmisividad del acuífero y establecer el esquema operativo del pozo. Según el contexto del pozo que está siendo evaluado, durante la prueba de bombeo debe medirse de manera simultánea la presión barométrica, el nivel del río o lago cercano al pozo, y en caso de acuíferos costeros la oscilación de mareas.

Cuadro 2. Formato para registro de los descensos del nivel del agua durante el bombeo.

Tiempo transcurrido (minutos)	Frecuencia de medición del nivel (minutos)	Profundidad del nivel del agua (pies)	Abatimiento (pies)
0 (nivel estático)		Nivel estático	0
0 a 10	Cada minuto	Niveles dinámicos	
10 a 20	Cada 2		
20 a 60	Cada 5		
60 a 180	Cada 15		
180 a 360	Cada 30		
360 al término de la prueba	Cada 60		

La duración óptima de la prueba de bombeo depende de varios factores. Si la prueba de bombeo se realiza para un proyecto de abastecimiento de agua el objetivo consiste en obtener un régimen de flujo de agua subterránea cuasi-permanente. Este régimen de flujo puede obtenerse en pocas horas o en pocos días, dependiendo del caudal bombeado, el tipo de acuífero, y la proximidad a zonas de recarga. En general, la duración mínima de la prueba de bombeo debería de ser 72 horas seguida inmediatamente de una prueba de recuperación del nivel del agua. Sin embargo, la prueba debe de durar hasta que se alcance el régimen de flujo cuasi-permanente lo cual en un acuífero no confinado puede tomar varios días. La prueba de bombeo no debe durar menos de 24 horas.

Abatimiento

El abatimiento (s) se define como la diferencia entre la presión hidráulica antes del bombeo h_o menos la presión hidráulica h en el acuífero durante el bombeo

(Figura 3). En un sentido matemático el abatimiento se expresa con la siguiente ecuación (Renard, 2006):

$$s(t) = h_o(t) - h(t) \quad (1-1)$$

De manera simplificada se denomina abatimiento al descenso del nivel del agua que se mide en un pozo durante una prueba de bombeo (Kasenow, 2011). El abatimiento se establece mediante la diferencia en los niveles dinámicos del agua y el nivel estático inicial (Cuadro 2).

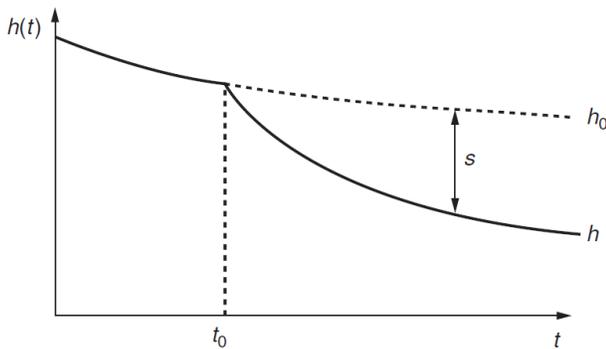


Figura 3. Definición de abatimiento (Renard, 2006).

El abatimiento tiende a aumentar con el tiempo y a disminuir alejándose del pozo de producción. Para que tenga validez científica, el abatimiento debe medirse detalladamente y registrarse con exactitud el tiempo de medición. El abatimiento se manifiesta no sólo en el acuífero si no principalmente en el mismo pozo de bombeo. A nivel local el abatimiento (s) se mide en metros y se considera que tiene diferentes componentes genéricos. El abatimiento está asociado a las pérdidas de presión hidráulica en el acuífero y en el pozo (Figura 4). La pérdida de presión hidráulica es la diferencia de presión entre dos puntos del sistema y puede ocurrir por fricción entre el agua subterránea y el sedimento poroso, o entre el agua y las paredes de

la tubería del pozo. Para que exista flujo de agua subterránea es necesario que se registren pérdidas de presión.

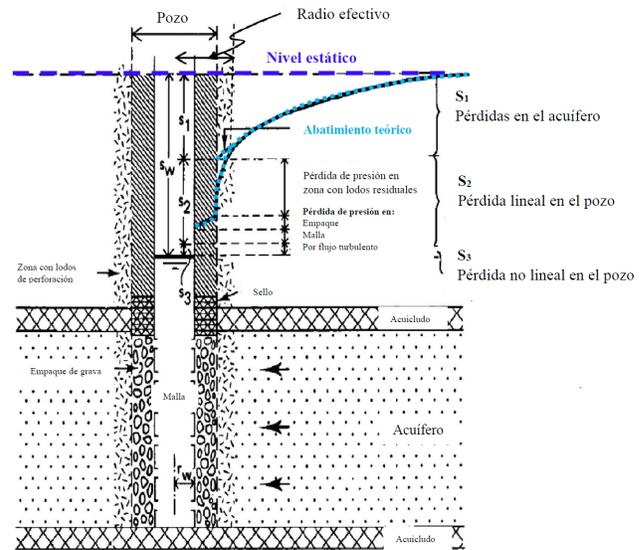


Figura 4. Diagrama que ilustra las pérdidas de presión en el acuífero y el pozo durante el bombeo (ligeramente modificado de Kruseman y de Ridder, 2000).

Las pérdidas de presión hidráulica en el acuífero (s_1) son resultado de la resistencia del medio geológico al flujo de agua subterránea. Estas pérdidas pueden aumentar en función del incremento de caudal proveniente del bombeo. Las pérdidas de presión hidráulica en el pozo (Figura 4) se dividen en pérdidas lineales (s_2) y pérdidas no lineales (s_3).

- Pérdidas hidráulicas lineales (s_2) consisten en pérdidas de presión hidráulica en la zona de transición entre el acuífero y el filtro de grava. Estas pérdidas se deben a la compactación del acuífero durante la perforación, al tapado del acuífero con el lodo de perforación lo cual reduce la permeabilidad, pérdidas asociadas al filtro de grava y pérdidas debidas a la resistencia que ofrece la rejilla en contra de la entrada de agua al pozo.

- Pérdidas hidráulicas no lineales (s_3) son las pérdidas asociadas al flujo turbulento ocasionado por el elevado gradiente hidráulico desarrollado en la vecindad del pozo e incluyen las pérdidas por fricción dentro de la rejilla del pozo y en la tubería de succión donde el flujo es turbulento, así como las pérdidas hidráulicas en la zona adyacente al pozo. En pozos de diámetro pequeño, las pérdidas no lineales son mayores que las pérdidas derivadas del flujo de agua subterránea en el acuífero.
- El efecto superficial (*skin effect*) incluye las pérdidas de presión en las inmediaciones del pozo y se asume que todas las pérdidas se concentran en una capa delgada y resistente externa (*skin*) en las paredes del pozo.

El abatimiento total, s_w , en el pozo productor (Figura 4) es igual a la diferencia de niveles de agua, entre el nivel estático (inicial) y el nivel dinámico (final), representando todas las pérdidas hidráulicas en el acuífero y en el pozo mediante la siguiente ecuación:

$$S_w = S_1 + S_2 + S_3 \quad (1-2)$$

El abatimiento que se mide durante el bombeo representa la suma de las pérdidas de presión hidráulica proveniente de varios componentes individuales tal como el acuífero, la capa externa, el empaque de grava, la malla, y finalmente el interior del pozo. Puede cuantificarse la contribución individual de cada componente a la pérdida de presión y establecer su importancia relativa (Houben, 2015b). El contribuyente más importante frecuentemente es el acuífero. La formación de la capa externa (*skin*) es el segundo contribuyente relevante, particularmente

cuando no se implementa el desarrollo adecuado del pozo después de la perforación. La pérdida de carga hidráulica asociada al empaque de grava, la tubería ranurada y la parte interna del pozo es pequeña.

En un contexto hidrogeológico mucho más amplio el abatimiento total es la suma de varios componentes de abatimiento y puede variar según la geometría del acuífero y la penetración del pozo (Tabla 3).

Tabla 3. Componentes del abatimiento, s , según las condiciones de bombeo y la geometría del acuífero (Kaseno, 2001).

Acuífero confinado, <u>con 100% de penetración en la rejilla del pozo</u>	$s = s_a + s_w$	s_a = abatimiento debido a flujo laminar de agua a través del acuífero hacia el pozo. s_w = abatimiento debido al flujo turbulento dentro del pozo de producción.
Acuífero no confinado, <u>con 100% de penetración en la rejilla del pozo</u>	$s = s_a + s_w + s_d$	s_d = abatimiento debido al drenaje por gravedad del acuífero
Acuífero confinado, penetración parcial	$s = s_a + s_w + s_{pp}$	s_{pp} = abatimiento debido a la penetración parcial
Acuífero no confinado, penetración parcial	$s = s_a + s_w + s_d + s_{pp}$	
Acuífero confinado, penetración parcial y condiciones de frontera	$s = s_a + s_w + s_{pp} + (s_b - s_r)$	El abatimiento tiende a disminuir con un límite de recarga (s_r) y a aumentar bajo la influencia de una barrera impermeable (s_b). $(s_b - s_r)$ = abatimiento debido a fronteras de barrera (s_b) menos el abatimiento debido a fronteras de recarga (s_r).
Acuífero no confinado, penetración parcial y condiciones de frontera	$s = s_a + s_w + s_d + s_{pp} + (s_b - s_r)$	

Las pérdidas de carga hidráulica estimadas en el acuífero varían de pocos metros a decenas de metros siendo función inversa de la conductividad hidráulica de la formación geológica. El acuífero se constituye en el mayor contribuyente de pérdida de carga hidráulica. Las propiedades hidráulicas del acuífero pueden tener diferentes valores en función del número de mediciones realizadas en el campo. Aunque el promedio de las mediciones pueda aportar valores representativos, las variaciones que se manifiesten deben permanecer dentro de ciertos límites de error relativo ($\pm 5\%$ o $\pm 10\%$).

Si dos mediciones sucesivas (o los valores máximo y mínimo de un lote de datos) son m_i y m_{i+1} ($m_i > m_{i+1}$) el porcentaje de error relativo, α , puede determinarse con la siguiente ecuación (Şen, 2015),

$$\alpha = \frac{|m_i - m_{i+1}|}{m_i} * 100 \quad (1-3)$$

Siempre que el valor obtenido para α sea menor que $\pm 5\%$ puede considerarse temporalmente que el sistema de flujo de agua subterránea se encuentra en régimen permanente. Si α es menor a ± 10 se consideran condiciones cuasi-permanentes y que el acuífero tiene homogeneidad regional. Es muy importante establecer el abatimiento máximo posible que puede alcanzarse durante la prueba de bombeo, así como el caudal máximo de bombeo que es compatible con las condiciones hidrogeológicas y ambientales del sitio. Antes de iniciar el bombeo debe de medirse varias veces el nivel del agua para que mediante la aplicación de la ecuación (1-3) se identifiquen y aseguren condiciones de régimen permanente.

El cono de depresión

El área de más baja presión hidráulica que se forma en un pozo sometido a bombeo se denomina cono de depresión. El agua se mueve de una zona de alta presión hidráulica externa al pozo hacia el área de baja presión dentro del pozo (Figura 5). Este proceso da por resultado un abatimiento ya sea mediante drenaje por gravedad en un acuífero no confinado o un abatimiento por reducción de presión hidráulica en un acuífero confinado. El abatimiento alcanza un máximo dentro del pozo de producción y disminuye alejándose del pozo (Figura 5). El gradiente hidráulico se expande a medida que el agua subterránea se mueve desde la zona de alta presión hacia la zona de baja presión. La

expansión del gradiente hidráulico debe terminar en un área de equilibrio donde la recarga de agua subterránea es equivalente a la descarga. La forma geométrica del gradiente es un cono y el gradiente hidráulico expansivo se denomina cono de depresión.

Los procesos hidráulicos que ocurren en el cono de depresión son descritos por Kasenow (2001). La velocidad natural del agua subterránea es alterada cuando un pozo productor empieza a funcionar. Dentro del cono de depresión se registrará una distribución de velocidades. Media vez se inicia el bombeo, la velocidad del agua subterránea aumentará, y el gradiente hidráulico será más pronunciado, a medida que el agua se acerca al pozo de producción.

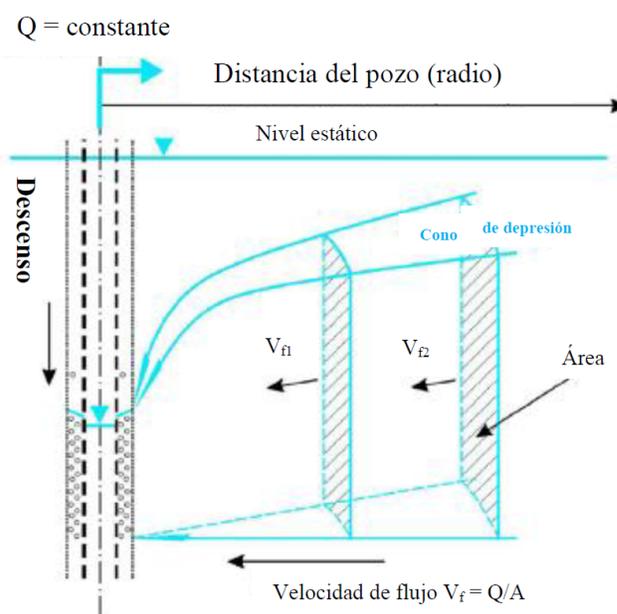


Figura 5. Diagrama que muestra los elementos del cono de depresión en un pozo de agua (Houben, 2015a).

La velocidad de entrada del agua subterránea en la tubería ranurada del pozo resulta en pérdida de presión debido a la conversión de energía potencial a energía termal asociada con la fricción. El flujo turbulento aumenta a medida que el agua entra al pozo y fluye hacia la bomba, ocasionando conversión

adicional de energía potencial a energía cinética. El flujo vertical de agua hacia la superficie también contribuye a una mayor reducción de presión en el pozo de producción. El ritmo y extensión del cono de depresión depende del ritmo de bombeo, tiempo, transmisividad del acuífero, coeficiente de almacenamiento, y localización de áreas de recarga. En el acuífero no confinado, durante el bombeo se desarrollan componentes verticales de flujo y el espesor saturado del acuífero se reduce debido al drenaje por gravedad, lo cual deriva en un complejo sistema hidrogeológico. En este caso, la expansión del cono de depresión es relativamente lenta y el radio del cono se extiende en distancias cortas. En un acuífero confinado, la descarga de agua subterránea y el abatimiento resultante se deben a la compresión de los estratos por encima del acuífero subyacente y a la expansión del agua. En este caso, la expansión del cono de depresión ocurre relativamente rápido y el radio del cono, debido a una continua pérdida de presión, se puede extender a grandes distancias del pozo de producción.

El radio de influencia (r_o) que equivale al límite externo del cono de depresión (abatimiento = 0) se obtiene a partir de pruebas de bombeo y varios pozos de observación ubicados a distintas distancias del pozo de bombeo. Si se conoce la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S) puede estimarse el radio de influencia con la ecuación de Cooper y Jacob (1946):

$$r_o = \sqrt{\frac{2.25 \cdot T \cdot t}{S}} \quad (1-4)$$

Metodología

El método más simple para estimar el caudal sostenible de un pozo consiste en evaluar el

comportamiento del abatimiento registrado durante una prueba de bombeo mediante un modelo conceptual apropiado (Van Tonder y otros, 2001). El comportamiento del acuífero se evalúa inversamente. Con este enfoque se altera el nivel del agua en el pozo y se evalúa la respuesta de los niveles en el pozo y en piezómetros vecinos. La variación registrada de niveles de agua se encaja numéricamente, o gráficamente, con lo que se conoce como el modelo conceptual del acuífero que consiste en una curva tipo. Este procedimiento se conoce en Hidrogeología como prueba hidráulica y en Matemáticas como el problema inverso.

¿Cómo seleccionar el modelo hidrogeológico conceptual?

El enfoque adecuado consiste en determinar las dimensiones físicas y geometría del acuífero en detalle. Sin embargo, esta actividad es de alto costo. Un método más sencillo conocido *como curva tipo* consiste en comparar los niveles de agua observados con la solución analítica de un modelo conceptual conocido.

El principal objetivo de la prueba de bombeo constante es determinar el caudal seguro del pozo el cual está relacionado frecuentemente con la respuesta del abatimiento durante la prueba de bombeo a un ritmo constante. El caudal seguro se define como el ritmo de descarga en un pozo que no ocasionará que el nivel del agua en el pozo descienda por debajo de un límite prescrito identificado a partir de la naturaleza y espesor del acuífero y la profundidad del pozo (Piscopo y Summa, 2006).

Por lo tanto, el aspecto crítico en el proceso de evaluación del caudal seguro es la identificación del

nivel más profundo recomendable de bombeo y la toma de datos adecuados en el pozo. En algunos casos el descenso del nivel máximo admisible (NMA) está controlado por el diseño del pozo o por características del acuífero tal como la base de un estrato confinante. El NMA debe establecerse a una profundidad que prevenga una reducción significativa en el caudal. En caso de que no se conozca cuáles son las entradas principales de agua al pozo se pueden utilizar algunas reglas generales. Para un acuífero granular uniforme el NMA del pozo puede seleccionarse de modo que se permita el drenaje máximo de un 70 % del espesor saturado del acuífero (bajo condiciones de sequía) penetrado por el pozo. Si el acuífero es cristalino fracturado heterogéneo debe adoptarse un enfoque más conservador y el NMA debe seleccionarse para permitir un máximo del 50 % del espesor saturado del acuífero penetrado por el pozo. El análisis de niveles de agua versus el caudal desplegable debe realizarse principalmente durante periodos de sequía identificando el nivel más profundo de bombeo para el pozo, el nivel por debajo del cual se pueden producir efectos indeseables tal como bombeo de arena, aumento de salinidad, y definir el nivel por debajo del cual se puede secar el pozo. En todo caso, a nivel operativo tiene que asegurarse el mantenimiento mínimo de una columna de agua de 60 pies por encima de la bomba de modo que no se desarrolle vórtice.

Para determinar la cantidad de agua que puede ser extraída anualmente de un acuífero es necesario determinar los siguientes factores (Kendouci y otros, 2023):

- Transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero.

- Geometría del acuífero, incluyendo extensión y límites.
- Características hidráulicas del techo y fondo del acuífero.
- Efectos del uso planificado de agua subterránea en las condiciones regionales de recarga y descarga del acuífero.

Resultados

La metodología presentada en este artículo se aplica para la evaluación del caudal seguro en un pozo mecánico de agua construido en Guatemala. Los resultados crudos de las pruebas hidráulicas realizadas en el pozo se incluyen en el Anexo I.

La prueba escalonada de bombeo se diseñó con un mínimo de cuatro escalones de 1 hora de duración cada escalón iniciando el primer escalón con un caudal de 85 gpm, para luego ir abriendo la válvula durante el segundo escalón a 111 gpm, el tercer escalón a 155 gpm, y finalmente el cuarto escalón a 175 gpm. La bomba sumergible se instaló a la profundidad de 640'. Las características de la bomba fueron: marca APEC de 40 hp con motor Franklin de 60 hp. La tubería de descarga fue de pvc con diámetro de 4.5". Los aforos de la prueba escalonada fueron realizados midiendo el tiempo en que tardaba en llenarse un barril de 60 galones. Los resultados de la prueba escalonada de bombeo se ilustran en la Figura 6.

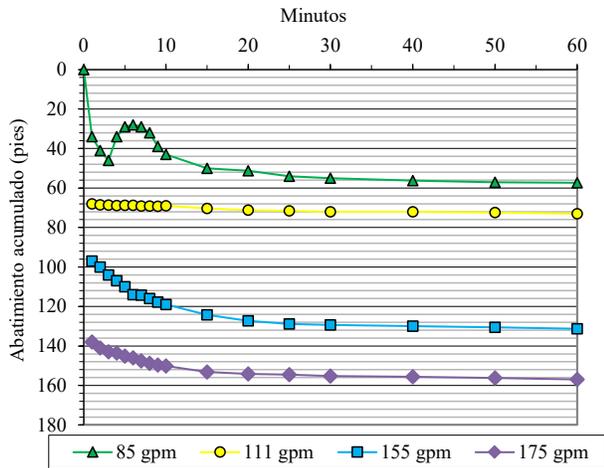


Figura 6. Resultados de la prueba de bombeo escalonada.

Los valores numéricos de cada escalón de bombeo se integraron digitalmente con los resultados que se ilustran en la Figura 7. Puede notarse que el pozo muestra un abatimiento total de 238' al final del cuarto escalón, con una columna de agua de 400' por encima de la bomba. Durante la mitad del cuarto escalón de bombeo se registró descarga de agua algo turbia lo cual sugiere restringir el caudal del pozo por debajo de 175 gpm para evitar producir agua con sedimentos.

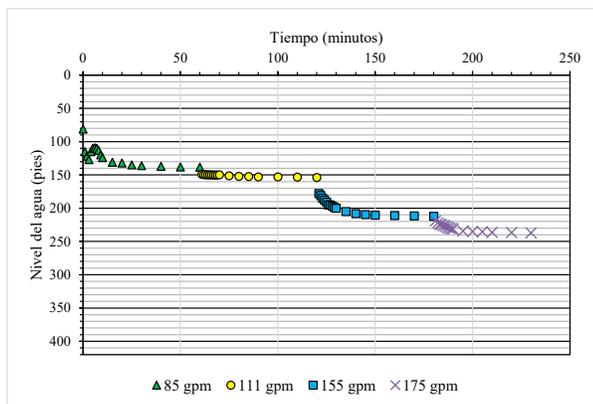


Figura 7. Diagrama que ilustra el comportamiento del nivel del agua durante los cuatro escalones de bombeo.

Para continuar con la evaluación hidráulica del acuífero se realizó una prueba de bombeo constante de 23 horas de duración con un caudal promedio inferido a partir de la prueba escalonada de 160 gpm.

Los datos de la prueba de bombeo constante se procesaron con el software *AquiferTestPro®* para evaluar la transmisividad hidráulica del acuífero usando el método de curva tipo habiendo obtenido con el método de Hantush (1956) los resultados que se muestran en la Figura 8.

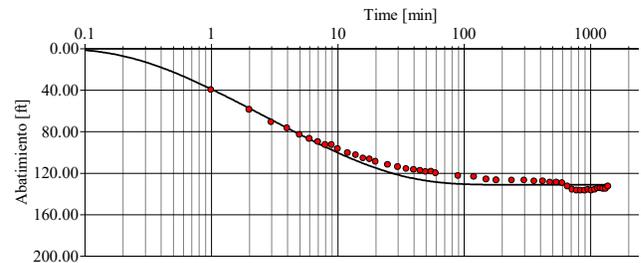


Figura 8. Gráfica semilogarítmica de tiempo-abatimiento generada con *AquiferTestPro®* aportando un valor de transmisividad hidráulica $T = 7.35 \text{ m}^2/\text{día}$ con el modelo de Hantush (1956).

Luego de terminadas las pruebas de bombeo se procedió a implementar la prueba de recuperación del nivel del agua en el pozo con los resultados que se ilustran en la Figura 9 donde puede observarse que el pozo prácticamente recupera el 99% del nivel estático en un tiempo promedio de 1 hora lo cual indica una excelente recuperación y muy buena recarga del acuífero.

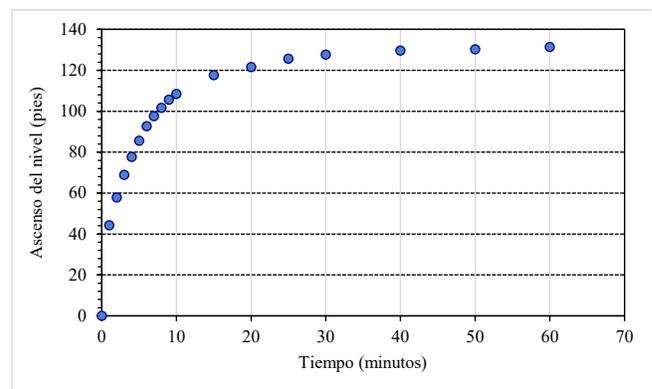


Figura 9. Diagrama que ilustra el ascenso del nivel del agua durante la prueba de recuperación.

Para estimar la transmisividad hidráulica del acuífero en base a los datos de la prueba de recuperación se utilizó el método de Theis (1935) que se desglosa en el Anexo II y se basa en la ecuación (1-5):

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s'} \quad (1-5)$$

donde,

Q = caudal (m³/día)

$\Delta s'$ = descenso residual por ciclo logarítmico completo (metros)

El valor de transmisividad hidráulica obtenido con la prueba de recuperación del nivel del agua es de 7.26 m²/día el cual como se describió con anterioridad es bastante consistente con la transmisividad estimada mediante la prueba de bombeo constante (T = 7.35 m²/día). Para interpretar este valor de transmisividad se utiliza la clasificación de Krasny (1993) la cual se muestra en el Tabla 4 sugiriendo que el acuífero de donde bombea agua este pozo es de valor local.

Tabla 4. Clasificación de Krasny para distintas magnitudes de transmisividad.

Transmisividad			Clase	Significado	Potencial de abastecimiento
m ² /día	ft ² /día	gpd/ft			
≥1,500	16,100	120,000	I	Excepcional	Un recurso natural
1,000-1,500	10,760	80,500	II	Muy alto	Importancia regional grande
100-1,000	1,076	8,050	III	Alto	Importancia regional
10-100	107.6	805	IV	Intermedio	Importancia local
1-10	10.76	80.50	V	Bajo	De valor local
0.1-1	1.076	8.05	VI	Muy bajo	Limitado a abastecimiento privado
<0.1	1.076	8.05	VII	Imperceptible	Probablemente no es un acuífero

Se estimó el porcentaje de error relativo, α , con la ecuación (1-3) para las mediciones registradas de abatimiento durante las últimas trece horas de bombeo en el pozo habiendo obtenido los resultados que se muestran en el Tabla 5. Los valores del error relativo α

calculados son menores al 5 % aceptable por lo que puede inferirse que con la prueba de bombeo se alcanzó un régimen cuasi-permanente de flujo de agua subterránea a un caudal de 160 gpm y que el acuífero manifiesta cierta homogeneidad regional. Adoptando un enfoque conservador se considera que el NMA en este pozo debe permitir un espesor saturado del acuífero del 50 %, tratando de que el nivel dinámico no descienda por debajo de 310 pies de profundidad. En caso de requerirse incrementar el bombeo debe garantizarse una columna de agua mínima de 60 pies por encima de la bomba.

Tabla 5. Estimación del porcentaje de error relativo α para el abatimiento en el pozo.

Hora	Abatimiento (metros)	α	(%)
21:00:00	40.49		
22:00:00	41.46	0.023	2.340
23:00:00	41.71	0.006	0.599
00:00:00	41.80	0.002	0.215
01:00:00	41.83	0.001	0.072
02:00:00	41.55	0.007	0.700
03:00:00	41.71	0.004	0.384
04:00:00	41.52	0.005	0.456
05:00:00	41.13	0.009	0.939
06:00:00	41.10	0.001	0.073
07:00:00	41.19	0.002	0.218
08:00:00	41.16	0.001	0.100
09:00:00	40.52	0.016	1.555

Conclusiones y recomendaciones

La determinación del caudal seguro de un pozo debe de incluir la investigación exhaustiva del acuífero antes de perforar y construir el pozo. Sin embargo, muchos pozos son dimensionados y diseñados únicamente con base a la experiencia de la compañía perforadora. El contexto geológico puede aportar un diseño más eficiente del pozo lo cual puede reducir las pérdidas de presión en la entrada y disminuir el envejecimiento del pozo, bajando costos en la

inversión inicial y operación, extendiendo la vida del pozo.

Es recomendable adoptar un criterio conservador en cuanto a la estimación del caudal máximo permisible. Se sugiere para acuíferos no confinados una depresión segura disponible de un 70% de la depresión total disponible. En el caso de un acuífero confinado debe tomarse en cuenta la depresión total disponible, que es la distancia entre el nivel estático y el extremo superior de la rejilla, pero estimando la depresión segura disponible hasta el techo del acuífero. Por lo tanto, en el caso de que un mismo pozo atraviese un sistema de acuíferos resulta mucho más complejo realizar una proyección confiable del caudal máximo permisible.

El concepto de caudal seguro debe de ser utilizado para la planificación y manejo del uso de un acuífero. En la práctica no es posible obtener un valor único para el caudal seguro de un acuífero de manera similar a como se obtiene la cantidad de lluvia media anual para un área determinada. Esto se debe a que los valores de caudal seguro se basan en varias restricciones por lo que deben de ser establecidos por un equipo de profesionales de manera similar a como se elaboran los estudios de impacto ambiental. El hidrogeólogo debe contar con el acompañamiento de economistas, ingenieros, geólogos, ecólogos, y abogados para determinar el caudal seguro de un acuífero o de una cuenca de aguas subterráneas. La evaluación multidisciplinaria aportará una serie de valores de caudal seguro en función de los distintos factores utilizados lo cual puede convertirse en una tarea muy compleja que demande el uso de modelos numéricos para el sistema de flujo de agua subterránea.

El concepto de caudal seguro debe incluir no sólo la recarga del sistema de aguas subterráneas si no también la descarga del sistema ya que al desarrollar el recurso se está capturando una porción de la descarga natural. Puede existir restricciones técnicas, ambientales, legales, y económicas que limiten cuanto de la descarga natural del sistema de aguas subterráneas puede ser utilizado.

Los resultados de una prueba de bombeo, ya sea en condiciones de flujo permanente o transitorio, para definir el caudal seguro deben de ser evaluados de manera crítica (Hölting y Coldewey, 2019). En términos estrictos, los números calculados representan valores que sólo pueden aplicarse al área bajo influencia de la prueba de bombeo. Los cálculos realizados se basan en requerimientos que rara vez se encuentran en condiciones naturales por lo que los valores obtenidos deben considerarse un indicador crudo cuya interpretación requiere experiencia hidrogeológica. Los valores de transmisividad y/o coeficiente de almacenamiento deberían establecerse con base a varias pruebas de bombeo. La duración de la prueba de bombeo debe permitir alcanzar un abatimiento cuasi-permanente del nivel del agua debiendo durar un periodo de tiempo mucho más largo en acuíferos cristalinos fracturados que en acuíferos porosos (i.e. entre 100 y 500 horas) y la recuperación subsecuente del nivel del agua debe de medirse durante un periodo de tiempo suficiente. Una prueba que dure varios días puede permitir identificar procesos como filtración por goteo, rendimiento retardado, y efectos limítrofes. Las pruebas de muy larga duración de varias semanas pueden ser necesarias para evaluar el efecto del bombeo en la calidad del agua, particularmente si el bombeo induce incursiones de agua salada.

Los cambios en el nivel dinámico deben de medirse y registrarse con precisión. Es necesario tener presente que en acuíferos confinados la producción de agua ocurre por la expansión de agua y la compresión del acuífero. Pueden manifestarse cambios en el nivel del agua, particularmente en acuíferos no confinados, que son causados por actividades o procesos no relacionados con el bombeo en el pozo (Maliva, 2016). Estos cambios externos en los niveles de agua incluyen los cambios regionales en niveles, cambios en presión barométrica, ciclos de mareas marinas, bombeo externo, recarga, y lluvia. Los niveles de agua que se miden en la prueba de bombeo deben de ser corregidos por cambios externos de modo que se realice una interpretación adecuada de los impactos del bombeo en el acuífero que está siendo evaluado. La corrección de los datos se aplica principalmente a los acuíferos no confinados ya que en este tipo de acuíferos la medición de niveles frecuentemente está afectada por cambios en la presión barométrica, la evapotranspiración local, y la recarga.

El concepto de que todos los sistemas de agua subterránea son o pueden ser sostenibles no es válido ya que frecuentemente existe un número excesivo de factores que es muy difícil cuantificar (Kalf y Woolley, 2005). En algunos casos tiene que reconocerse que el recurso de agua subterránea no es renovable y que por lo tanto su uso no puede ser sostenible. La extracción de agua y el ritmo de bombeo asociado no debe exceder la capacidad a largo plazo del acuífero, debiendo mantenerse por debajo de la recarga natural. La variabilidad de lluvia y eventos de recarga extrema pueden incluirse en el cálculo detallado de balance hídrico integrado con metodología probabilística (e.g. Monte Carlo) para determinar el comportamiento del

sistema acuífero a largo plazo bajo condiciones climáticas variables.

La meta final consiste en entender cómo funciona el sistema acuífero de modo que pueda predecirse los impactos asociados con su uso y planificar el recurso. La determinación del caudal seguro de un pozo debe realizarse dentro del marco de gestión de aguas subterráneas considerando que las extracciones de agua del pozo modifican el ciclo hidrológico natural. El desafío consiste en regular las extracciones en relación con las condiciones del acuífero y considerando los impactos ecológicos, económicos y legales que puede tener el bombeo.

La determinación de la cantidad de agua que puede extraerse anualmente del acuífero sin que ocurra sobreexplotación no debe limitarse a la implementación e interpretación de la prueba de bombeo (Kendouci y otros, 2023). Se recomienda contar con la siguiente información antes de realizar la prueba de bombeo:

- Contexto actual de la explotación del acuífero incluyendo número y localización de pozos, caudales bombeados, calidad de agua, profundidad de los pozos, nivel estático y nivel dinámico.
- Variaciones estacionales en el uso de los pozos, particularmente en el uso de agua subterránea para agricultura.
- Variaciones estacionales de niveles piezométricos y calidad de agua.
- Balance hidrogeológico considerando el volumen anual extraído de agua y extracciones futuras proyectadas comparadas con el flujo anual que fluye en el acuífero.

- Evaluar los impactos posibles que puede ocasionar el pozo nuevo en la zona, particularmente si puede afectar la operación de pozos anteriores que han funcionado relativamente estables.

Puede ser necesario restringir el abatimiento en el acuífero estableciendo un ritmo de bombeo máximo permisible en el pozo, particularmente con fines de evitar el agotamiento del agua subterránea.

En países como Chile, para otorgar derechos de aprovechamiento de agua subterránea se exige al menos una prueba de bombeo constante de 24 horas de duración. Antes de la prueba de bombeo constante debe realizarse una prueba de bombeo escalonada para determinar a qué caudal es recomendable realizar la prueba de 24 horas. Se otorga un derecho de agua subterránea sobre un pozo indicando el caudal autorizado que puede ser explotado las 24 horas del día, durante los 365 días del año, por siempre (Campillo, 2007). El nivel de exigencia en países como Canadá es mucho más alto, donde una prueba de bombeo de 24 horas de duración es insuficiente para otorgar un derecho de agua ya que el nivel dinámico frecuentemente sigue descendiendo después de 24 horas de bombeo (régimen cuasi-permanente). En Canadá se requiere determinar el caudal específico (caudal/depresión) para un periodo de bombeo de 100 días.

Cuando no se cuenta con piezómetros vecinos al pozo de bombeo, como ocurre normalmente en Guatemala, y la respuesta del acuífero al abatimiento sólo se monitorea en el pozo de bombeo resulta muy complicado poder establecer el caudal seguro del pozo. Determinar el nivel de bombeo para alcanzar condiciones de régimen cuasi-permanente durante un

periodo prolongado, un año o más, puede ser una alternativa para establecer el caudal seguro. El cálculo del caudal seguro para un pozo basándose en pruebas de bombeo en régimen cuasi-permanente es significativo a escala temporal anual estando influenciada por la recarga precedente del acuífero antes de la época seca. Por lo tanto, se recomienda calcular un valor de caudal seguro para cada año hidrogeológico.

Referencias

- Campillo, R., 2007, ¿Qué caudal se le puede extraer de forma segura a un pozo?: <https://es.scribd.com/document/71422427/Que-caudal-se-le-puede-extraer-a-un-pozo>. 5 p.
- Domenico, P., 1972, Concepts and Models in Groundwater Hydrology: McGraw Hill. 320 p.
- Elwell, B., & Lall, U., 1988, Determination of an optimal aquifer yield, with Salt Lake County applications: Journal of Hydrology, v. 104, p. 273-287.
- Fetter, C., & Kremer, D., 2022, Applied Hydrogeology: Waveland Press Inc. 625 p.
- Hantush, M., 1956, Analysis of data from pumping test in leaky aquifers: Transactions of the American Geophysical Union, v. 37, p. 702-714.
- Heath, R., 1983, Basic ground-water hydrology: United States Geological Survey. Water Supply Paper 2220. 86 p.
- Hölting, B., and Coldewey, W., 2019, Hydrogeology: Springer. 368 p.
- Houben, G. J., 2015a, Review: Hydraulics of water wells – flow laws and influence of geometry: Hydrogeology Journal, v. 23, p. 1633-1657.
- Houben, G., 2015b, Review: Hydraulics of water wells-head losses of individual components: Hydrogeology Journal, v. 23, p. 1659-1675.

Kasenow, M., 2001, Applied Ground-Water Hydrology and Well Hydraulics. 2nd Edition. Water Resources Publications, LLC. 835 p.

Kalf, F., and Woolley, D., 2005, Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems: Hydrogeology Journal, v. 13, p. 295-312.

Kendouci, M., Mebarki, S., and Kharroubi, B., 2023, Investigation of overexploitation groundwater in arid areas: case of the lower Jurassic aquifer, Bechar province Southwest of Algeria: Applied Water Science, v. 13, No. 102, 12 p.

Krasny, J., 1993, Classification of transmissivity magnitude and variation: Ground Water, v. 31 no. 2, p. 230-236.

Kruseman, G., and de Ridder, N., 2000, Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. 2nd Edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement. 372 p.

Lee, C., 1915, The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type: Transactions of the American Society of Civil Engineers, v. 78, p. 148-151.

Machorro Sagastume, R., 2018, Acuíferos: Diseño y Análisis de Pruebas de Bombeo Escalonadas: Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, V.5, p. 14-19.

Maliva, R., 2016, Aquifer Characterization Techniques: Springer. Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation Series No. 4. 632 p.

Misstear, B., and Beeson, S., 2000, Using operational data to estimate the reliable yields of water-supply wells: Hydrogeology Journal, v. 8., p. 177-187.

Renard, P., 2006, Hydraulics of Wells and Well Testing. In: Anderson, M (ed) Encyclopedia of Hydrological Sciences. Chapter 151, Volume 4. Wiley, New York. P. 2323-2340.

Piscopo, V., and Summa, G., 2006, Experiment of pumping at constant head: an alternative possibility to the sustainable yield of a well: Hydrogeology Journal, v. 15, p. 679-687.

Şen, Z., 2015, Practical and Applied Hydrogeology. Elsevier. 406 p.

Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage: Transactions of the American Geophysical Union, v. 16, p. 519-524.

Todd, D., 1980, Groundwater Hydrology: John Wiley & Sons. 652 p.

van Tonder, G., Botha, J., Chiang, W., Kunstmann, H., and Xu, Y., 2001, Estimation of the sustainable yields of boreholes in fractured rock formations: Journal of Hydrology, v. 241, p. 70-90.

Vuković, M & Soro, A., 1992, Hydraulics of Water Wells. Water Resources Publications. 354 p.

Watson, I., and Burnett, A.D., 1995, Hydrology: An Environmental Approach. CRC Lewis Publishers. 702 p.

Anexo I. Datos crudos de las pruebas hidráulicas realizadas en el pozo de agua.

REGISTRO DE PRUEBA DE BOMBEO ESCALONADA					
Localización:	Guatemala	Profundidad bomba (pies-m):	640 - 195.12		
Pozo ID:	Pozo XY	Hora Inicio:	11:30 a. m.	Profundidad pozo (pies-m):	700 - 213.4
Fecha:	25/06/2022	Inicio prueba:	29/03/2021		
Nivel Inicial del Agua (pies-m)	81.00	24.70	Final prueba:	29/03/2021	
Sick up (pies-m):	2.50	0.76	Página	1	de 1

Escalón	1		2		3		4	
	Q (gpm)	85 gpm	111 gpm	138 gpm	158 gpm	178 gpm	198 gpm	218 gpm
Tiempo pasado (min)	Nivel del Agua (ft) S ₁	Agua (m) S ₁	Nivel del Agua (ft) S ₂	Agua (m) S ₂	Nivel del Agua (ft) S ₃	Agua (m) S ₃	Nivel del Agua (ft) S ₄	Agua (m) S ₄
0	24.70	81	42.16	138.3	46.95	154	64.96341463	213.08
1	35.06	115.00	45.43	149.00	54.27	178.00	66.77	219
2	37.20	122.00	45.58	149.50	55.18	181.00	67.68	222
3	38.72	127.00	45.61	149.60	56.40	185.00	68.29	224
4	35.06	115.00	45.70	149.90	57.32	188.00	68.48	224.6
5	33.54	110.00	45.67	149.80	58.23	191.00	68.96	226.2
6	33.23	109.00	45.67	149.80	59.45	195.00	69.21	227
7	33.54	110.00	45.76	150.10	59.54	195.30	69.70	228.6
8	34.45	113.00	45.78	150.15	60.06	197.00	70.06	229.8
9	36.59	120.00	45.82	150.30	60.61	198.80	70.30	230.6
10	37.80	124.00	45.75	150.05	60.98	200.00	70.49	231.2
15	39.94	131.00	46.13	151.30	62.56	205.20	71.40	234.2
20	40.30	132.20	46.40	152.20	63.49	208.25	71.68	235.1
25	41.16	135.00	46.52	152.60	63.96	209.80	71.80	235.5
30	41.46	136.00	46.65	153.00	64.15	210.40	72.01	236.2
40	41.86	137.30	46.68	153.10	64.33	211.00	72.13	236.6
50	42.10	138.10	46.77	153.40	64.51	211.60	72.32	237.2
60	42.16	138.30	46.95	154.00	64.73	212.30	72.56	238
90								
120								

Estimación de la capacidad específica del pozo					
Escalón No.	Q (gpm)	s _a Abatimiento (pies)	Observado Δs	Incremental s _w	Capacidad Específica Q/sw (gpm/pie)
1	85	57.30		57.30	1.48
2	111	15.70		73.00	1.52
3	155	58.30		131.30	1.18
4	175	24.92		156.22	1.12

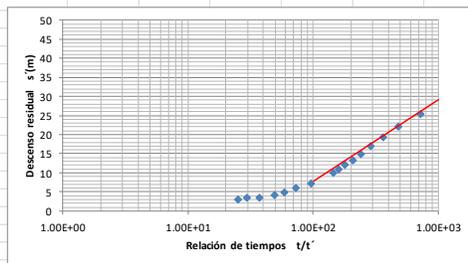
La capacidad específica es el rendimiento de un pozo por unidad de abatimiento. Mientras más alto este valor mejor es el pozo. Notar que no tiene un valor constante.

Formato para Registro de Prueba de Bombeo Constante					
Localización:	Guatemala	Profundidad bomba (pies):	640		
Pozo ID:	Pozo XY	Profundidad pozo (pies):	700		
Fecha:	26/06/2022	Inicio prueba:	26-06-2022		
Nivel Inicial del Agua (pies):	82.2	Final prueba:	27-06-2022		
Sick up (pies):	2.5	Q (gpm):	160		
Tiempo día (HH:MM:SS)	Tiempo pasado (min)	Nivel del Agua		Abatimiento	
		Metros	Pies	Metros	Pies
10:00:00	0	25.06	82.2	0	0.0
10:00:01	1	37.23	122.10	12.16	39.9
10:00:02	2	43.03	141.15	17.97	59.0
10:00:03	3	46.74	153.30	21.68	71.1
10:00:04	4	48.48	159.00	23.41	76.8
10:00:05	5	50.43	165.40	25.37	83.2
10:00:06	6	51.62	169.30	26.55	87.1
10:00:07	7	52.56	172.40	27.50	90.2
10:00:08	8	53.35	175.00	28.29	92.8
10:00:09	9	53.41	175.20	28.35	93.0
10:00:10	10	54.63	179.2	29.57	97.0
10:00:12	12	55.79	183.0	30.73	100.8
10:00:14	14	56.40	185.0	31.34	102.8
10:00:16	16	57.38	188.2	32.32	106.0
10:00:18	18	57.62	189.0	32.56	106.8
10:00:20	20	58.32	191.3	33.26	109.1
10:00:25	25	59.27	194.4	34.21	112.2
10:00:30	30	59.91	196.5	34.85	114.3
10:00:35	35	60.46	198.3	35.40	116.1
10:00:40	40	60.73	199.20	35.67	117.0
10:00:45	45	60.98	200.0	35.91	117.8
10:00:50	50	61.33	201.15	36.27	119.0
10:00:55	55	61.28	201.0	36.22	118.8
11:00:00	60	61.68	202.3	36.62	120.1
11:00:30	90	62.56	205.2	37.50	123.0
12:00:00	120	62.80	206.0	37.74	123.8
12:00:30	150	63.48	208.2	38.41	126.0
13:00:00	180	63.78	209.2	38.72	127.0
14:00:00	240	63.84	209.4	38.78	127.2
15:00:00	300	63.87	209.5	38.81	127.3
16:00:00	360	64.12	210.3	39.05	128.1
17:00:00	420	64.09	210.2	39.02	128.0
18:00:00	480	64.45	211.4	39.39	129.2
19:00:00	540	64.48	211.5	39.42	129.3
20:00:00	600	64.63	212.0	39.57	129.8
21:00:00	660	65.55	215.0	40.49	132.8
22:00:00	720	66.52	218.2	41.46	136.0
23:00:00	780	66.77	219.0	41.71	136.8
00:00:00	840	66.86	219.3	41.80	137.1
01:00:00	900	66.89	219.4	41.83	137.2
02:00:00	960	66.62	218.5	41.55	136.3
03:00:00	1020	66.77	219.0	41.71	136.8
04:00:00	1080	66.59	218.4	41.52	136.2
05:00:00	1140	66.19	217.1	41.13	134.9
06:00:00	1200	66.16	217.0	41.10	134.8
07:00:00	1260	66.25	217.3	41.19	135.1
08:00:00	1320	66.22	217.2	41.16	135.0
09:00:00	1380	65.58	215.1	40.52	132.9
10:00:00	1440				

Anexo II. Estimación de la transmisividad del acuífero mediante la prueba de recuperación del nivel del agua – método Theis (1935).

Prueba de Recuperación del Nivel del Agua realizada el 27 de junio de 2022						
Profundidad del Pozo: 700'						
NIVEL ESTÁTICO (-m)	81'	Inicio PB				
NIVEL DINÁMICO (-)	219'	Final PB	160 gpm	Tiempo total de bombeo (min):	1380 minutos	
BOMBA INSTALADA A 520'		POTENCIA DE LA BOMBA: 40 H.P.				
Prueba de Recuperación del Nivel del Agua						
Nivel estático (metros):		23.26		Ascenso del nivel		
Tiempo (min)	Nivel Medido	Pies	Metros	Descenso Residual (m)		
0	66.34	217.60	0.00	43.04	43.04	
1	52.87	173.40	44.20	13.48	29.57	
2	48.72	159.80	57.80	17.62	25.42	
3	45.34	148.70	68.90	21.01	22.04	
4	42.68	140.00	77.60	23.66	19.38	
5	40.24	132.00	85.60	26.10	16.94	
6	38.11	125.00	92.60	28.23	14.81	
7	36.59	120.00	97.60	29.76	13.29	
8	35.37	116.00	101.60	30.98	12.07	
9	34.15	112.00	105.60	32.20	10.85	
10	33.29	109.20	108.40	33.05	9.99	
15	30.49	100.00	117.60	35.85	7.19	
20	29.27	96.00	121.60	37.07	5.97	
25	28.05	92.00	125.60	38.29	4.75	
30	27.44	90.00	127.60	38.90	4.14	
40	26.83	88.00	129.60	39.51	3.53	
50	26.65	87.40	130.20	39.70	3.35	
60	26.28	86.20	131.40	40.06	2.98	

Método de Recuperación de Theis para estimar Transmisividad						Q = 872 m ³ /día
Tiempo desde que inició el bombeo t (min)	Tiempo desde que terminó el bombeo t'	Relación de tiempos t/t'	Descenso residual s (m)	log(t/t')	Valores geométricos de pendiente (por ciclo logarítmico) A s'	T = 2.30Q / 4πA s' m ² /día
1440	0		43.04		Obtenidos de la gráfica para el ciclo logarítmico	7.26
1441	1	1.441.00	29.57	3.158663981	completo	
1442	2	721.00	25.42	2.85793265	A s'	A log(t/t')
1443	3	481.00	22.04	2.682145076	22	1
1444	4	361.00	19.38	2.557507202		
1445	5	289.00	16.94	2.460897843		
1446	6	241.00	14.81	2.382017043		
1447	7	206.71	13.29	2.315370491		
1448	8	181.00	12.07	2.257678575		
1449	9	161.00	10.85	2.206825876		
1450	10	145.00	9.99	2.161368002		
1455	15	97.00	7.19	1.986771734		
1460	20	73.00	5.97	1.86332286		
1465	25	58.60	4.75	1.767897616		
1470	30	49.00	4.14	1.69019608		
1480	40	37.00	3.53	1.568201724		
1490	50	29.80	3.35	1.474216264		
1500	60	25.00	2.98	1.397940009		



A s'	63.00 metros
A log(t/t')	1.00 0

PUNTOS DE INTERÉS GEOLÓGICO EN LA CUENCA DEL LAGO DE ATITLÁN, SOLOLÁ

GEOSITES IN THE BASIN OF LAKE DE ATITLÁN, SOLOLÁ

Luis Alfredo Godoy Morales

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología
Finca Sachamach km 2010, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala

Email: luisgodoygeo@gmail.com

RESUMEN

En el contexto de la Cuenca del Lago de Atitlán en Guatemala, se encuentran numerosos geositos de interés geológico. Estos incluyen formaciones volcánicas, evidencias de procesos tectónicos y registros sedimentarios que proporcionan una ventana única hacia la historia geológica de la región. Los puntos de interés geológico (conocidos comúnmente como geositos) son áreas o lugares que poseen un valor especial en términos de su relevancia geológica, ya sea por sus características únicas, su contribución a la comprensión de procesos geológicos o su importancia en la historia de la Tierra. Estos sitios son esenciales para la educación, la investigación y la conservación del patrimonio geológico de una región determinada.

La metodología empleada para la selección, identificación y propuesta de puntos de interés geológico -PIG- dentro de la cuenca del lago de Atitlán, contempló 8 etapas de aplicación.

Se identificaron y propusieron un total de 19 sitios, los cuales, bajo los parámetros anteriormente descritos, se considera que cumplen con las características para formar parte del patrimonio geológico de la cuenca del lago del Atitlán, es necesario mencionar, que este inventario fue de tipo reconocimiento, y que es sujeto a cambios y no presentar carácter único y definitivo.

Palabras clave: *Atitlán, Geodiversidad, Puntos de interés geológico, Geología, Guatemala.*

ABSTRACT

In the context of the Lake Atitlan Basin in Guatemala, there are numerous geosites. These include volcanic formations, evidence of tectonic processes and sedimentary records that provide a unique window into the geological history of the region. Points of geological interest (commonly known as geosites) are areas or places that possess special value in terms of their geological significance, either because of their unique characteristics, their contribution to the understanding of geological processes, or their importance in the Earth's history. These sites are essential for education, research and conservation of the geological heritage of a given region.

The methodology used for the selection, identification and proposal of points of geological interest -PIG- within the Lake Atitlán basin, contemplated 8 application stages.

A total of 19 sites were identified and proposed, which, under the parameters described above, are considered to meet the characteristics to be part of the geological heritage of the Lake Atitlán basin, it is necessary to mention that this inventory was of a reconnaissance type, and is subject to change and does not present a unique and definitive character.

Keywords: *Atitlán, Geodiversity, Guatemala, Geology, Geosites, Guatemala.*

Introducción

En numerosos países del mundo, se ha subrayado la necesidad de que las políticas destinadas a conservar el patrimonio natural se enfoquen de manera notoria en el componente biótico, es decir, la flora y fauna, llegando incluso a ser consideradas de forma exclusiva. Por otro lado, es notable la escasez de menciones explícitas al entorno abiótico, como lo respaldan diversos estudios (Wimbledon et al., 2000; Eder y Patzak, 2004; Zouros, 2005; Vujicic et al., 2011). Guatemala no es la excepción, en el artículo 07 de la Ley de Áreas Protegidas, de acuerdo al decreto Número 4-89 del Congreso de la República de Guatemala, se refuerzan estas aseveraciones.

La Ley prioriza la protección de flora y fauna, alineándose con estándares internacionales. Aunque se reconoce la falta de énfasis en los elementos abióticos, se subraya que la conservación de estos está implícita en la preservación de la vegetación y fauna. No obstante, se sugiere que la legislación debería explicitar la protección de elementos geológicos y geomorfológicos en lugar de depender de interpretaciones.

En Guatemala, al igual que en el mundo, se ha observado un creciente interés en iniciativas que destacan la importancia del entorno abiótico, especialmente en lo que respecta a la geología y la geomorfología. Estas iniciativas surgen como un complemento al énfasis tradicional en la conservación del entorno biótico.

Ejemplos notables incluyen proyectos como: *Global Indicative List of Geological Sites* (GILGES, entre 1989 y 1993) y su sucesor *Geosites* promovidos por la *International Union of Geological Sciences* (IUGS)

y la Asociación Europea para la Conservación del Patrimonio Geológico (ProGEO; Gallego, 1998; Wimbledon et al., 2000); y el programa *Geoparks*, promovido por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) y la UNESCO (Eder y Patzak, 2004), entre otras.

A las iniciativas anteriores pueden sumarse varios esfuerzos de carácter internacional, promovidos por asociaciones y especialistas individuales, principalmente desde los campos de la geografía, la geomorfología y la geología, por ejemplo: Carcavilla y Palacio, 2010; García et al., 2000; González y Serrano, 2008; Miranda, 2009; CSIGA, 2008; Vujčić et al., 2011, Godoy Morales 2014.

El proyecto *Geosites*, promovido por la IUGS fue diseñado para identificar áreas geológicas (sitios) de importancia internacional. El proyecto se inició en 1996 con el fin de promover el equilibrio entre la conservación biológica (bioconservación) y la geológica (geoconservación) y sucedió al proyecto *GILGES*, “el cual contó, en 1993, fecha de su finalización, con 300 lugares” detectados (Gallego, 1998). En América Latina puede citarse el trabajo del Servicio Geológico Minero Argentino, entre cuyos objetivos está el de “*brindar información sobre los principales sitios de interés geológico del territorio nacional y, de ese modo, contribuir tanto a su conocimiento como a su preservación*” (CSIGA, 2008).

Para Guatemala, este autor, realizó como tesis de grado: *Geodiversidad en Guatemala: Evaluación y aplicación en la cuenca del Lago de Atitlán, Sololá* (2014), en donde se hace uno de los primeros estudios relacionados al tema, y se propuso el

primer inventario de geositorios o puntos de interés geológico a nivel de reconocimiento, para dicha área. El objetivo de este artículo será dar a conocer la metodología empleada y los sitios propuestos en dicha investigación.

Los puntos de interés geológico (conocidos comúnmente como "*geositorios*") son áreas o lugares que poseen un valor especial en términos de su relevancia geológica, ya sea por sus características únicas, su contribución a la comprensión de procesos geológicos o su importancia en la historia de la Tierra. Estos sitios son esenciales para la educación, la investigación y la conservación del patrimonio geológico de una región determinada.

1. Significado y valor de los puntos de interés geológicos o geositorios

Los geositorios son vitales para la preservación y difusión del conocimiento geológico. Ofrecen una oportunidad única para que científicos, estudiantes y el público en general puedan observar y estudiar formaciones y procesos geológicos en su entorno natural. Además, los geositorios desempeñan un papel crucial en la conservación del patrimonio geológico, al permitir la identificación y protección de áreas de interés.

2. Clasificación de los Geositorios

Los geositorios pueden clasificarse en diferentes categorías según su naturaleza y características geológicas. Algunas de las clasificaciones comunes incluyen:

Geositorios de Interés Paleontológico: Estos lugares contienen fósiles u otros restos biológicos que proporcionan información valiosa sobre la historia de la vida en la Tierra.

Geositorios Volcánicos y Magmáticos: Lugares donde se pueden observar manifestaciones de actividad volcánica, como cráteres, conos y flujos de lava.

Geositorios Sedimentarios: Áreas donde se encuentran rocas sedimentarias que proporcionan pistas sobre antiguos ambientes deposicionales y procesos geológicos.

Geositorios Tectónicos: Lugares donde se pueden observar estructuras y deformaciones causadas por fuerzas tectónicas, como fallas, pliegues y crestas montañosas.

3. Geoparques y Redes de Geositorios

Los geoparques son áreas designadas que albergan una variedad de geositorios significativos desde el punto de vista geológico, paleontológico, cultural y paisajístico. Estos espacios son gestionados de manera sostenible para promover la educación, el turismo geológico y la conservación. A nivel mundial, la Red Mundial de Geoparques de la UNESCO reúne estos sitios con el objetivo de promover la preservación y valorización del patrimonio geológico.

4. Importancia de los Geositorios en Investigación y Educación

Los geositorios proporcionan un laboratorio natural para la investigación geológica. Los científicos pueden estudiar las rocas y procesos *in situ*, lo que aporta una comprensión más completa y precisa de los fenómenos geológicos. Además, los geositorios son herramientas valiosas para la educación, ya que permiten a estudiantes y al público en general aprender sobre la geología de manera práctica y tangible.

5. Geositios en la Cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala

En el contexto de la Cuenca del Lago de Atitlán en Guatemala, se encuentran numerosos geositios de interés geológico. Estos incluyen formaciones volcánicas, evidencias de procesos tectónicos y registros sedimentarios que proporcionan una ventana única hacia la historia geológica de la región.

El estudio se realizó en la cuenca de Atitlán, la cual se localiza en la parte centro-oeste del departamento de Sololá. Cartográficamente, la cuenca se localiza en varias hojas topográficas, la mayor parte se ubica en la hoja Sololá 1960 II, y en menor proporción en las hojas de Santa Catarina Ixtahuacán 1960 III; San Lucas Tolimán 1959 I y Chicacao 1959 IV. Esta cuenca abarca el 44,4 % de la superficie del departamento (517,42 km²), incluye a los municipios de Sololá, San José Chacayá, Concepción, Panajachel, Santa Catarina Palopó, San Marcos La Laguna, Santa Cruz La Laguna, San Pablo La Laguna, parcialmente abarca los municipios de Santa Lucía Utatlán, San Andrés Semetabaj, San Antonio Palopó, San Lucas Tolimán, Santiago Atitlán, San Pedro La Laguna, San Juan La Laguna, Santa Clara La Laguna y Nahualá; además del lago de Atitlán (Fig. 1).

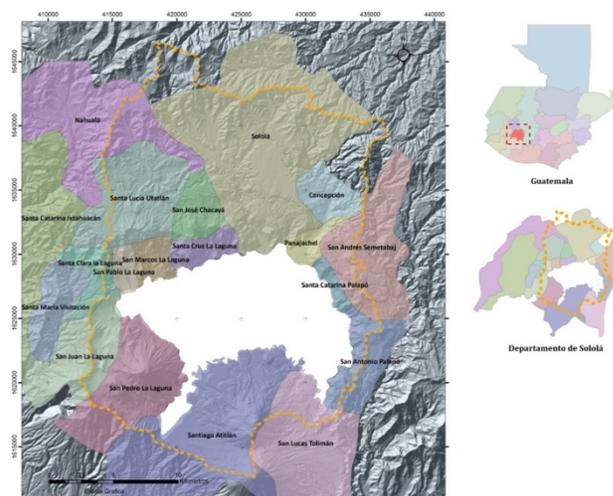


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Metodología

La metodología empleada para la selección, identificación y propuesta de puntos de interés geológico -PIG- dentro de la cuenca del lago de Atitlán, es una modificación de la propuesta de Ángela Henao y Juan Osorio (2013), la cual comprende nueve pasos, los cuales se describen a continuación:

1) Escala de trabajo: Las escalas de trabajo que se utilizaron fueron:

Escala geográfica: representa de manera común los rasgos geomorfológicos significativos, que pueden tomarse como ayuda en la limitación de zonas de estudio, seleccionar este tipo de escala es útil ya que puede encerrar diferentes suelos climáticos y hábitats diversos, lo que constituye inmejorables barreras naturales que involucren también patrimonio medio ambiental, como es el caso de los geoparques.

Escala tipológica: Esta escala van orientada a la tipología del inventario y por ende van ligados a los

tipos de elementos a inventariar y a los parámetros de selección que se deban utilizar para aplicar en la clasificación de los FIG. Esta escala se posiciona como la más grande ya que debe seguir aspectos específicos como cuerpos intrusivos, yacimientos paleontológicos, entre muchos otros.

II) Modelo de inventario: Después de la selección de la escala, se procedió a seleccionar el tipo de inventario que resulto más conveniente para el área de estudio y la cuantía del proyecto. Para esta propuesta metodológica, por acomodarse a factores como el área geográfica de estudio, tiempo, presupuesto, personal y otros, se selección el tipo de reconocimiento.

El inventario de reconocimiento se plantea como el modelo básico para dar inicio a la identificación ordenada del posible patrimonio de una región y representa además una visión general de la geodiversidad de un sitio. Su realización está basada de forma exclusiva en la recopilación bibliográfica y documental existente a la cual se aplicarán parámetros específicos de selección y clasificación con lo que se obtendrán los puntos representativos que harán parte del denominado inventario.

III) Características de elementos a inventariar: se enfoca principalmente a definir las características de los puntos de interés geológico, antes de empezar con la búsqueda de los mismos, por tanto, es relevante:

Aclarar la extensión y el tamaño de los FIG; el tipo de interés que representan; especificar cuándo haya lugar de incluir patrimonio mueble o solo el inmueble

(incluido el patrimonio minero-industrial); relación directa e indirecta con otra característica patrimonial; el tipo de ente encaminado a gestionar el sitio; y reconocimiento de la comunidad.

IV) Recopilación bibliográfica y documental: Iniciar el proceso de inventario siempre tendrá como tarea obligatoria, una recopilación bibliográfica con miras a establecer de manera concreta los avances logrados hasta el momento mismo de este trabajo. Sin embargo, hasta la actualidad no existe antecedente relacionado con el tema en Guatemala. Por lo cual esta investigación tiene el carácter de inédito en cuanto a patrimonio geológico y diversidad en el país.

V) Parámetros de selección preliminar de FIG:

Geomorfológico (G): Parámetro designado para catalogar relieves sobresalientes.

Hidrológico (H): Parámetro utilizado para seleccionar zonas con un potencial importante de aguas subterráneas y superficiales.

Paisajístico (P): Parámetro que destaca el atractivo visual o espacial, esto con miras en definir la variedad geomorfológica que exista o posea el entorno observado.

Ambiental (A): Parámetro que clasifica zonas con influencia directa en el entorno y la vida.

Tectónico (T): Parámetro que cita los lugares con mejor exposición o características propias de la dinámica terrestre.

Científico (C): Parámetro orientado a elegir los lugares más representativos en el ámbito académico o con mayor potencial para el desarrollo investigativo.

Petroológico (Pe): Parámetro que destaca lugares que poseen características genéticas de relevancia y representatividad litológica.

Mineralógico (M): Parámetro que señala lugares con riqueza mineral propia para el estudio y desarrollo científico de esta área.

Paleontológico (Pa): Parámetro que evalúa el potencial de estudio de la vida antigua que la zona de interés y su respectivo registro fósil.

Estructural (E): Parámetro que especifica zonas con diferentes puntos, que destacan en su conjunto un atributo específico del lugar (pliegues, deformaciones, otros).

Estado de conservación (EC): Parámetro que recoge las características especiales del sitio, para orientar la gestión que el mismo requiere (divulgativa-turística, turística-educativa, educativa-conservativa, otros).

Acceso al sitio (AS): Parámetro encaminado a evaluar la capacidad de uso del sitio, en el sentido educativo o turístico.

VI) Selección preliminar de PIG: matriz de suficiencia:

Evaluar el potencial de geodiversidad de una región, es un proceso de sumo cuidado y por tanto debe garantizar imparcialidad para lograr obtener puntos con potencial patrimonial acordes al objeto mismo de nuestro inventario.

Para dicha tarea, se utilizó una matriz de suficiencia que evaluó de manera ágil el potencial que posee un sitio para adquirir cualidades propias de patrimonio geológico.

Esta matriz enfrentó de manera directa las cualidades que un punto puede poseer y su respectivo interés de acuerdo a los parámetros de

selección preliminar de PIG (Tabla 1), se logró establecer el verdadero valor intrínseco del lugar sin depender directamente de valores agregados que le restarían valor a su interés particular, este último detalle constituyó el mejor elemento de selección, ya que desligó del sitio aspectos como deterioro, seguridad, entre otros, que si bien afectan el potencial de uso no disminuyen el valor y la singularidad especial de un sitio en particular.

Tabla 1
Matriz de suficiencia de patrimonio geológico

PIG	Diversidad				Edad geológica				Procesos geológicos				Marco geológico				Valor científico			TOTAL	Ac	EC					
	Único	Mejor ejemplo	Rareza	Común	N/A	Pz	Mz	Cr	Q	Endóg.	Exóg.	N/A	I. Reg.	Local	N/A	Alto	Medio	Bajo									
Geomorfológica																											
Hidrológica																											
Paisajístico																											
Ambiental																											
Tectónico																											
Científico																											
Petroológico																											
Mineralógico																											
Paleontológico																											
Estructural																											
PIG punto de interés geológico. Único=10; Mejor ejemplo=10; Rareza=10; Común=5; (Pz) Paleozoico=8; (Mz) Mesozoico=6; (Q) Cenozoico=4; (I) Cuaternario=2; Endógeno=10; Exógeno=5; N/A=0; Interés regional=5; Interés local=10; Alto=10; Medio=6; Bajo=3																							TOTAL				

Nota: adaptado de Ángela Henao, Juan Osorio. *Propuesta metodológica para la identificación y clasificación del patrimonio geológico como herramienta de conservación y valoración ambiental.* (2013).

VII) Valoración y clasificación de geositios por medio del índice de patrimonio geológico (IPG): Los valores cualitativos obtenidos en la matriz de suficiencia se cuantificaron para establecer en conjunto que PIG se incluyeron en el inventario final, por tanto, se propuso un Índice de Patrimonio Geológico que arrojó una clasificación cuantificable de las características del sitio.

Los valores obtenidos en la matriz de suficiencia para cada parámetro de selección preliminar, se remplazaron en la formula empírica y de aquí se obtuvo un valor que osciló entre cuatro intervalos y que clasificaran el PIG en relevancias: muy alta, alta, media y baja.

Los PIG que obtuvieron la relevancia media y alta, pasaron a formar parte del inventario de patrimonio geológico, los que obtuvieron la relevancia baja no se consideró patrimonio y finalmente los que obtuvieron relevancia muy alta se entiende como un patrimonio que debe considerarse en primera instancia una gestión diferente a la turística.

Índice de patrimonio geológico:

$$IPG = (((G + H + P + A + T + C + Pe + M + Pa + E) +/- 2AS) +/- 5EC)$$

Dónde: Relevancia baja (0 a 175); relevancia media (176 a 350); Relevancia alta (351 a 525); Relevancia muy alta (526 a 700).

VIII) Estudio y descripción de los PIG: La ficha descriptiva de inventario: Para un correcto entendimiento de cada uno de los PIG considerados patrimonio geológico, fue necesario manejar fichas descriptivas de las características del sitio y presentan la mayor información posible del mismo. Estas fichas pasaron a representar en papel la geodiversidad estudiada y establecida en un sitio y deben ser actualizadas con frecuencia para mantener una base de datos al día (Tabla 2).

Tabla 2
Ficha descriptiva de Puntos de Interés Geológico

FICHA DESCRIPTIVA DE PATRIMONIO GEOLÓGICO					
*Codigo N°				*Nombre	
Interés Principal				*Ubicación	
Coordenadas	X	Y	Z	Distancia Población más Cercana	
*1 Valor Intrínseco			2. Potencial de Uso		
Diversidad	Corresponde a los valores: único, mejor ejemplo y rareza.			Potencial Educativo	Corresponde a los valores: alto, medio, bajo.
Edad Geológica	Comprende los valores: Proterozoico, Mesozoico, Cenozoico y Cuaternario			Potencial Turístico	
Procesos Geológicos	Comprende los procesos: exógeno y endógeno.			Relación con el Medio Natural	Flora
Marco Geológico	Comprende los valores de interés local o interés regional.			Reconocimiento de la Comunidad	Corresponde a los valores: poco conocido, muy conocido, desconocido.
Valor Científico	Comprende los valores: alto, medio y bajo.			Tipo de Administración Responsable	comprende: privado, público y no posee.
				Acceso	Comprende: carro, caminando, bestia, inaccesible.
4. Descripción	0			3. Foto/Esquema	
5. Otro información	0				

IX) Cartografía de PIG: La elaboración del inventario tuvo como último punto de realización, la cartografía. Es un aspecto importante para establecer relaciones espaciales y estadísticas generales entre otros puntos, que además vendrán a ejercer una importancia mayor en la gestión encaminada con fines turísticos o académicos.

Esto constituye una base de datos amplia para las investigaciones o proyectos venideros y debe contemplar además un resultado explícito con mapas reales de ubicación que pueden estar montados en bases de datos de sistemas de información geográfica (SIG), de modo que puedan incorporarse a sistemas de posicionamiento global (GPS) y que puedan tener lugar a actualizaciones constantes.

Discusión de Resultados

Propuesta de sitios y resultados de evaluación de matriz de suficiencia para determinar PIG

A continuación, se presenta en un cuadro el listado de sitios propuestos y evaluados conforme la matriz de suficiencia, en donde los valores se introdujeron al algoritmo que permitió definir el índice de patrimonio geológico y clasificar la relatividad de cada sitio:

Tabla 3

Sitios propuestos y resultado del índice de patrimonio geológico (IPG)

NOMBRE	NORTE	ESTE	ALTITUD (msnm)	UBICACIÓN	ÍNDICE DE PATRIMONIO GEOLOGICO	RELATIVIDAD
Cuenca endorreica lago Atitlán	1625840	425170	1 546 a 3 524	Cuenca lago Atitlán	315	Media
Volcán San Pedro	1620751	417420	3 033	San Pedro la Laguna	297	Media
Volcán Atitlán	1612680	426066	3 524	Santiago Atitlán	297	Media
Volcán Tolimán	1616930	426040	3 132	Santiago Atitlán	287	Media
Actividad hidrotermal lago Atitlán	1626794	432038	1 584	Santa Catalina Palopó	282	Media
Cerro de Oro	1622211	427070	1 871	Santiago Atitlán	268	Media
Contacto de sed. Lacustres (regresión) y sed. Fluviales en el abanico de río Quiscab	1630430	427044	1 610	Sololá	254	Media
Abanico Aluvial río San Francisco	1629431	429161	1 560	Panajachel	252	Media
Abanico aluvial río Quiscab	1629954	426828	1 560	Sololá	252	Media
Caldera Atitlán III (ladera de bordes caldera II)	1629955	416223	1 618 a 2 700	Alrededor del lago de Atitlán	245	Media
Fragmentos líticos en flujos Piroclásticos Los Chocoyos	1637199	417063	2 421	Santa Lucía Utatlán	236	Media
Lago de Atitlán	1625840	425170	1 546	Al centro de la cuenca	234	Media
Cerro San Marcos (coladas de lavas)	1632013	417149	2 905	Santa Lucía Utatlán	231	Media
Estratificación cruzada en sed. Relleno caldera II	1623981	434107	1 965	San Antonio Palopó	225	Media

Fracturas romboidales toba María Tecún	1636607	429970	2 021	Sololá	208	Media
Granitos circulares	1623142	413235	2 446	San Juan	206	Media
Lapilli acrecional	1630261	431952	1 974	San Andrés Semetabaj	204	Media
Oleadas Piroclásticas Los Chocoyos	1636441	416243	2 484	Santa Lucía Utatlán	201	Media
Sedimentos rellenos de caldera II	1627897	418166	1 594	San Marcos	193	Media
Toba brechosa Panajachel	1630988	429962	1 774	Panajachel	191	Media
Restos fósiles vegetales (Toba María Tecún)	1638790	419256	2 440	Santa Lucía Utatlán	122	Baja
Discordancia toba María Tecún y Los Chocoyos	1638409	420088	2 492	Santa Lucía Utatlán	115	Baja

Nota: Reproducido de Godoy Morales, 2014.

En el cuadro anterior se enlistan los sitios propuestos, con las coordenadas de ubicación en datum GTM (zona 15,5); altitud, municipio de ubicación, índice de patrimonio geológico y su relatividad.

De los resultados anteriormente descritos, en función de su relatividad baja, se considera que no entran dentro del patrimonio geológico del área de estudio los sitios: Discordancia toba María Tecún y Los Chocoyos, así como también Restos fósiles vegetales (Toba María Tecún).

Propuesta de puntos de interés geológico de la cuenca del lago de Atitlán

Se identificaron y propusieron un total de 19 sitios, los cuales, bajo los parámetros anteriormente descritos, se considera que cumplen con las características para formar parte del patrimonio geológico de la cuenca del lago del Atitlán, es necesario mencionar, que este inventario es de tipo reconocimiento, y que es sujeto a cambios y no presentar carácter único y definitivo.

En el Anexo III, de Godoy Morales (2014), se presentan las fichas descriptivas de los PIG de la cuenca del lago de Atitlán, los cuales incluyen una descripción general: código, nombre, coordenadas de ubicación, municipio, interés principal.

También se incluye dentro del título de valor intrínseco, su tipo de geodiversidad, edad geológica, marco geológico, y valor científico. Además, el potencial de uso: educativo, turístico, relación con el medio natural, reconocimiento de la comunidad, administración responsable, y tipo de acceso.

Dentro de la ficha existen los apartados de descripción del sitio, otra información de interés y fotografía del sitio.

En la Fig. 2 se observa la distribución geográfica de cada PIG dentro del área de estudio.

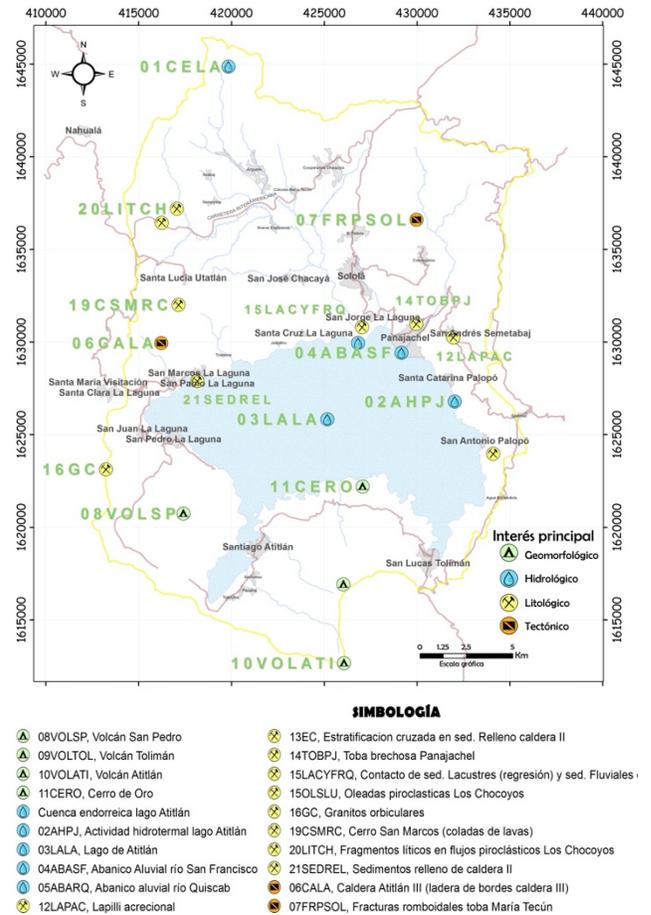


Figura 2. Puntos de interés geológicos (PIG) de la cuenca del lago de Atitlán. Nota: reproducido de Godoy Morales, 2014.

Conclusiones

Un PIG o geosito es un área y/o sitio que muestra una o varias características consideradas de importancia dentro de la historia geológica de una región natural.

Representa o muestra características geológicas que pueden ser consideradas únicas, mejores ejemplos, rarezas, entre otros, para la región, es por eso que no está directamente relacionada con zonas de geodiversidad alta, y dependerán del autor que proponga su análisis y evaluación.

Para la cuenca del lago de Atitlán se definieron un total de 19 sitios o áreas que se considera cumplen

con las características idóneas para formar parte del inventario de PIG' a nivel de reconocimiento.

Recomendaciones

Continuar con el estudio y evaluación de geositos o puntos de interés geológico, de otras áreas o cuencas hidrográficas del país, con el objetivo de tener una valoración nacional, el cual permita identificar zonas con potencial geológico que se pueda aprovechar de distintas maneras por las comunidades.

Con base al inventario presentado, se recomienda implementar y enriquecer con más información específica para cada punto de interés geológico dentro de la cuenca del lago de Atitlán, y así establecer planes de protección y de beneficio turístico para las comunidades de la región.

Iniciar el proyecto de evaluación y propuesta de sitios de interés geológico a nivel nacional, con prioridad el estudio de las principales áreas protegidas del país, o cuencas hidrográficas piloto, para luego extenderse a todo el país con el fin de obtener su protección, promoción y divulgación de acuerdo con el valor intrínseco que cada uno posea. Promoción de estudios relativos al componente natural abiótico y su relación con el componente biótico, económico, cultural y social.

Desarrollo de metodologías encaminadas a la caracterización de los geositos, geomorfositos y geoparques.

Promoción del reconocimiento acerca de la importancia del componente abiótico en la legislación ambiental guatemalteca.

Agradecimientos

a Laura Nuñez, por el apoyo, consejos y recomendaciones en campo y gabinete.

Referencias

- Asociación de Reservas Naturales Privadas-ARNP, Asociación Patronato Vivamos Mejor Consejo Nacional de Áreas Protegidas-CONAP, The Nature Conservancy – TNC, & Universidad del Valle de Guatemala – UVG. (2003). *Diagnóstico ecológico-social y plan preliminar de conservación del área de Atitlán*. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnacx392.pdf
- Cañadas, E. S., & Flaño, P. R. (2007). Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial el caso de Tiermes Caracena (Soria). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 45(2007), 79–48.
- Carcavilla, L., Durán, J. J., & López-Martínez, J. (s/f). *Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico Geodiversity: concept and relationship with geological heritage*. Igme.es. Recuperado el 22 de octubre de 2022, de https://www.igme.es/patrimonio/descargas/concepto_Geodiversidad.pdf
- Congreso de la Republica de Guatemala, (1989). Ley de áreas protegidas, Decreto 04-89.
- De Jesús Rendón Rivera, A., Arroyave, A. M. H., & Cachaya, J. G. O. (2013). Propuesta metodológica para la valoración del patrimonio geológico, como base para su gestión en el departamento de Antioquia – Colombia. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 33, 85–92.
- Godoy Morales, L. A. (2011). *Cartografía geológica en Sololá: Análisis litoestratigráfico, geomorfológico y estructural dentro de la cuenca del lago de Atitlán; norte del municipio de Santa Lucía Utatlán*. Universidad San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera Técnico en Geología.

- Godoy Morales, L. A. (2014). *Geodiversidad en Guatemala: Evaluación y aplicación en la cuenca del lago de Atitlán, Sololá*. Universidad San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología.
- Gray, M. (s/f). *Geodiversity and geoconservation: What, why, and how?* Geogewright.org. Recuperado el 22 de octubre de 2022, de <http://www.geogewright.org/223gray.pdf>
- Gray, M. (2004). *Geodiversity valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons. <https://geoduma.files.wordpress.com/2010/02/geodiversity.pdf>
- Grierson, M. (2012). *Geodiversity of the South Coast Region, New South Wales, Bachelor of Environmental Science (Honours)*. <https://ro.uow.edu.au/thsci/40>. <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1030&context=thsci>
- Henao, A., & Juan, O. (2013). *Propuesta metodológica para la identificación y clasificación del patrimonio geológico como herramienta de conservación y valoración ambiental*. Grupo de Investigación en Geología Ambiental GEA.
- Núñez, L., & Martínez, V. (2011). *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1:25 000), de la cuenca del lago de Atitlán (Guatemala)*. Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor.
- Palacio Prieto, J. L. (2013). *Geositios, geomorfositos y geoparques; importancia, situación actual y perspectivas en México*. Investigaciones Geográficas, 81, 24. <https://doi.org/10.14350/rig.32817>

ANÁLISIS GEMORFOLÓGICO LOCAL Y SU RELACIÓN CON LAS FORMAS DEL TERRENO EN EL CAMPUS DEL CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE -CUNOR-USAC, COBÁN ALTA VERAPAZ, GUATEMALA

GEMORPHOLOGICAL ANALYSIS AND ITS RELATIONSHIP WITH THE LANDFORMS ON THE CAMPUS OF THE NORTHERN UNIVERSITY CENTER CUNOR-USAC, COBÁN ALTA VERAPAZ, GUATEMALA

Sergio David Morán Ical ⁽¹⁾, **Sofía Portillo** ⁽¹⁾, **Marvin Quím** ⁽¹⁾, **Luciano López** ⁽¹⁾,
Luis Ba ⁽²⁾, **Luis Godoy** ⁽¹⁾,

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

Email: sergiomical@yahoo.com

RESUMEN

En la evolución de las formas del terreno a nivel de sitio (escala 1:750), consideramos que los procesos activos fluviales y gravitacionales, este último que incluye movimientos de masa y reptación, son los que han modelado naturalmente el relieve en el interior del campus. Esto ha dado paso a la configuración de cuatro depresiones topográficas - "nanocuecas" no-kársticas, donde pequeñas pendientes controlan la escorrentía. En cuanto a la morfología general de estas depresiones topográficas, las pendientes se clasifican en general como convexas y cóncavas. El saliente topográfico de mayor tamaño ubicado en el centro del predio, catalogado como talud convexo, es el que más cambios ha sufrido debido a la actividad antrópica por la ubicación de la infraestructura del campus universitario. Los cambios van desde la construcción de terraplenes, taludes artificiales, rampas de acceso y rellenos.

Al considerar el contexto más amplio, a nivel de la ciudad de Cobán A.V, el relieve o modelado geomorfológico resulta de varias génesis, y vemos que la historia geomorfológica incluye los relacionados al karst y al sistema fluvial. El más importante sistema morfodinámico regional que interviene o controla la preservación y continuidad de los elementos geomorfológicos es el karst. El proceso de disolución y colapso han derivado en la generación y morfología de una depresión kárstica de aproximadamente 9.4 km de longitud y de ± 2.5 km en su segmento más ancho. En el interior de dicha depresión, se ha generado una serie de elementos ligados a un sistema lagunar y fluvial debido a un ancestro del Río Cahabón. Adicional a ello, una fase de exposición y erosión continuó después de la formación de las terrazas, seguida de un evento de caída de ceniza volcánica importante según las relaciones pedostratigráficas locales, donde esta etapa, modificó el relieve kárstico y la cuenca "endorreica", tal como lo evidencia las relaciones litoestratigráficas tanto en los sedimentos de tipo lagunar como fluvial (terrazas T1-T3). Las superficies de montura y crestas convexas de pendiente bajas (0-7°), son evidencias de superficies de aplanamiento antiguos (paleo-superficies) aun preservadas dentro del campus del Cunor.

Palabras clave: *Geomorfología, Relieve, Forma del terreno, Karst y fluvial.*

ABSTRACT

In the evolution of land forms at the site level (1:750 scale), we consider that active fluvial and gravitational processes, the latter including mass movements and crawling, are those that have naturally modeled the relief within the campus. This has given way to the configuration of four topographic depressions - non-karst "nano-basins", where small slopes control runoff. Regarding the general morphology of these topographic depressions, the slopes can be generally classified as convex and concave. The largest topographic projection located in the center of the property, classified as a convex slope, is the one that has suffered the most changes due to anthropogenic activity due to the location of the university campus infrastructure. The changes range from the construction of embankments, artificial slopes, access ramps and filling.

When considering the broader context, at the level of the city of Cobán A.V, the relief or geomorphological modeling results from several genesis, and we see that the geomorphological history includes those related to the karst and the river systems. The most important regional morphodynamic system that intervenes or controls the preservation and continuity of geomorphological elements is karst. The dissolution and collapse process has resulted in the generation and morphology of a karst depression approximately 9.4 km long and ± 2.5 km in its widest segment. Inside this depression, a series of elements linked to a lagoon and river system have been generated due to an ancestor of the Cahabón River. In addition to this, a phase of exposure and erosion continued after the building of the terraces, followed by an important volcanic ash fall event according to the local pedostratigraphic relations, where this stage modified the karstic relief and the "endorheic" basin, as evidenced by the lithostratigraphic relationships in both lagoon and fluvial sediments (terraces T1-T3). The saddle surfaces and convex ridges with low slopes (0-7°) are evidence of ancient flattening surfaces (paleo-surfaces) still preserved within the Cunor campus.

Keywords: *Geomorphology, Relief, Landform, Karst and fluvial*

Introducción

La importancia que poseen los mapas geomorfológicos en la planificación urbana, motiva la necesidad de proponer e identificar dentro de área que ocupa el Centro Universitario del Norte (CUNOR-USAC) los diferentes elementos o componentes geomorfológicos naturales como antrópicos dentro de un área de $\pm 18,0163$ ha.

El mapa geomorfológico final toma en cuenta los siguientes aspectos: morfología, estabilidad de laderas, sitios sujetos a erosión, red de drenaje, elementos hidrogeológicos (p.e nacimientos de agua) y formas resultantes o relacionados a la actividad antropogénica. Así que el mapa representa las formas o modelado del terreno ya sean estos erosivas o acumulativas, creado por agentes geodinámicas, principalmente externos.

Dentro del campus universitario, se vienen desarrollado una serie de actividades desde 1976 hasta la actualidad tanto de tipo ingenieril (acomodación del terreno), como desde el punto de vista pecuario o agrícola. Estas intervenciones en la modificación de la superficie del terreno ligadas a la actividad antropogénica.

El interés y propósito de generar de información básica desde el punto de vista geomorfológico es la de prevenir y planificar, dada a la alta actividad de la población en las laderas. Este estudio, implica la identificación de los procesos activos clave que influyen en la evolución de las laderas, como por ejemplos los movimientos gravitacionales. Los agentes mayormente externos juegan un papel fundamental en la configuración de las formas del terreno.

Metodología

Para caracterizar el relieve es necesario considerar una **base topográfica**, conllevando un levantamiento topográfico de la propiedad de la universidad. La base topográfica, la cual se obtuvo a partir del proyecto denominado: Levantamiento Topográfico de la Finca del Centro Universitario del Norte (CUNOR), realizado con estación total (TRIMBLE M3), iniciando el año 2018 y culmina el 2020, año que se publicó. La nube de puntos con sus datos básicos (X, Y, Z), permitió generar una base topográfica con curvas de nivel cada 0,20 cm y por lo tanto 1 m a 5 m.

Otra herramienta fue **el mapa de pendientes**: considerada el grado de pendiente como la unidad de referencia en el análisis morfométrico, donde se utilizó una clasificación de grado de pendiente con seis categorías del cual se generó el **mapa de pendientes**.

El análisis morfológico: parte con el reconocimiento del nivel más alto de sistema o categorías de mapeo (Zinck, J. A. 2012 e ITC - International Institute for Geo-information Science and Earth Observation) hasta los específicos (a nivel de sitio). Esto nos conduce a discurrir de acuerdo a niveles de percepción decreciente, los rasgos como el *Relieve o modelado* hasta la *Forma del terreno*, como los idóneos y aplicado en este estudio.

La escala de trabajo, $\leq 1:1\ 000$, que puede considerarse como escala grande, se ha procedido a identificar como *unidad* a los elementos o componentes geomorfológicos. Con el supuesto que "el relieve puede dividirse en unidades morfológicas uniformes, limitada por discontinuidades morfológicas (Gutiérrez E, 2001), y considerando como elemento fundamental en este caso la "ladera", se procedió a reconocer sus formas básicas.

Basados en los tres modelos básicos de las formas de las laderas, se ha zonificado las *formas* de la superficie del terreno, dentro del campus universitario. por lo que la morfología, ángulo de las laderas y su génesis, son aspectos que se discuten.

Estos elementos o componentes pueden ser: una superficie (con su propia morfología) o un rasgo lineal.

Los resultados obtenidos con respecto a la zonificación del grado de pendiente, las unidades geomorfológicas y mapa de nanocuenas, son anexados a este documento, en su parte final.

Resultados

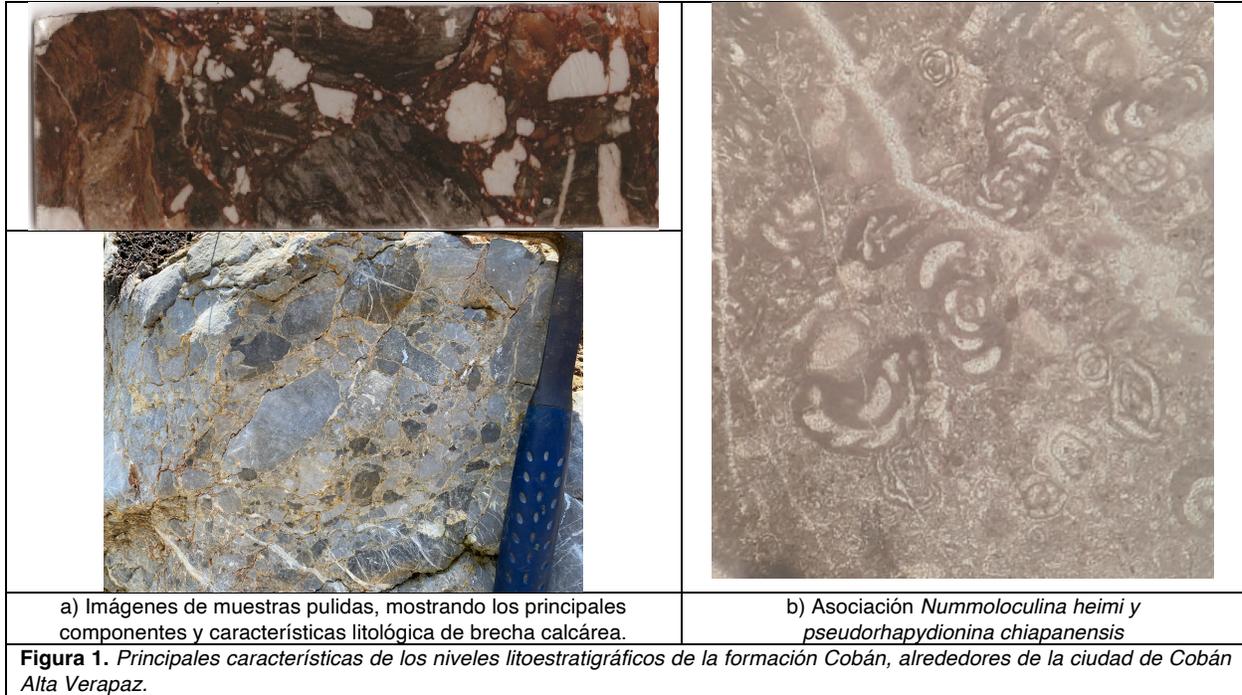
Marco Geológico Local

Las rocas calcáreas que afloran tanto al norte, dentro y al sur de la depresión topográfica, han sido asignados a la formación Cobán, que consiste de una secuencia compuesta de: 1) Brechas calcáreas y 2) calizas cristalinas e intervalos compuestos de *mudstone* a *packstone*, donde los espesores de los estratos van desde 0,30 m a 0,50 m.

Las brechas (secuencia inferior) compuestas predominantemente de fragmentos ángulos a subredondeados tanto de calizas y de calcita de pocos centímetros, cuya matriz es de arcilla y en otras partes de cemento esparítico (Figura 1a). El

Por lo menos se han identificado dos niveles o intervalos de depósitos volcánicos pertenecientes a dos eventos (Figura 2).

Los suelos cuyo material parental son depósitos



nivel superior es rico en microfósiles compuestos de foraminíferos tales como *Nummuloculina heimi* y *pseudorhapydionina chiapanensis* (Figura 1b).

Brocard G. et al., 2012, a nivel de la depresión topográfica de ciudad de Cobán, demarca la existencia de terrazas aluviales pertenecientes al río ancestral del río Cahabón. Así mismo, describe depósitos pertenecientes a una secuencia lacustre llamada Formación Jolom Naj, que sobreyacen con marcada discordancia a las calizas de la formación Cobán.

Relictos de horizontes de ceniza volcánica pueden ser identificados con grado de meteorización IV, donde sus espesores varían.

Potentes horizontes de suelos residuales ampliamente distribuidas dentro de los alrededores del área estudiada, se desarrollan tanto a partir de los niveles calcáreos, como de depósitos piroclásticos (volcánicos).

volcánicos, sus relaciones pedoestratigráficas, muestran una variedad de casos, algunos sobrepuestos directamente a calizas, otro sobre niveles de suelos derivados de caliza y por últimos, las que directamente han quedado sobre una unidad arcillosa lacustre y aluviales, tal es el caso dentro del campus.

En su mayor parte se encuentran compuestas de fragmentos de pómez, cuarzo cristalino bipiramidal, mica biotita y magnetita, susceptibles al imán (Figura 3).

Probablemente estos pueden corresponder a los depósitos de la super-erupción de Los Chocoyos ocurridos hace 75 ± 2 ka (Brocard, et al 2014, Cisneros de León, et al 2020).

Consideraciones Geomorfológicas Generales

Antes de entrar a considerar la geomorfología del sitio, es necesario contextualizarlo desde las agrupaciones de las diferentes **geofomas** propuestas, por lo que es necesario dar un vistazo

desde la región territorial de Guatemala. Para ello, nos apoyaremos en las propuestas que ya se tienen a nivel regional.



Figura 2. Dos horizontes de depósitos piroclásticos, con distintos grados de meteorización (mayor en la base), depositados sobre terrazas aluviales.



Figura 3. Fracción fina de depósitos piroclásticos de caída, conteniendo partículas de pumita, láminas de mica (biotita), cristales de anfíbol de color negro.

La jerarquía geomorfológica del relieve ha sido trabajada por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA).

El MAGA (2001) para el territorio de Guatemala definió unidades cartografiadas a escala 1:250 000, las cuales pueden tomarse dentro de tres categorías: 1) **Región Fisiográfica**, 2) **Subregión** y luego a nivel de 3) **Gran Paisaje**. Los criterios de tal división fueron: a) El proceso geológico dominante en el origen de la forma, b) La uniformidad en tipo de relieve y c) El tipo litológico.

La ubicación espacial del campus del CUNOR, y bajo esta jerarquía, le corresponde la Región Fisiográfica de las *Tierras Altas Sedimentarias*. Por lo tanto, a nivel de subregión, estaría entre los

límites de las subregiones de *Sierra de Chamá* y *zona Montañosa Cobán-Senahú*.

En su contexto local, a nivel de Gran Paisaje, su categoría correspondería a: *Cerros y lomas cársticas de Cobán – Cahabón*.

Bajo la propuesta de Bundschuh & Alvarado (2012), la parte de la *región de tierras altas sedimentarias* (MAGA 2001), estaría comprendida dentro de la *Provincia de las Tierras Altas Mayas*, que abarca la Sierra de los Cuchumatanes y Sierra de Santa Cruz.

La Sierra de los Cuchumatanes es un alto tanto topográfico como estructural, de tendencia N60W entre Chiapas y Huehuetenango, haciéndose este-oeste al centro del territorio. Siguiendo hacia Izabal al este, donde forma la Sierra de Santa Cruz. El río Chixoy, un río importante en el sistema fluvial de Guatemala, crea un cañón kárstico de 1 400 m de profundidad y desnivel de 340 m (540 msnm en Las Cureñas cuadrángulo Tiritibol hasta los 200 msnm, cuadrángulo San Antonio El Baldío-2063 III). Esta etapa de incisión interrumpe la continuidad de las montañas Cumbre La May y La Laguna (San Cristóbal Verapaz) que continúan al este, con las montañas de Xucaneb (San Juan Chamelco) y Yalijux, etc. El límite sur de esta *geoforma* (morfoestructura) es a través de la zona de Falla Cuilco-Chixoy-Polochic que atraviesa el territorio de Guatemala de este a oeste (E-W).

Contexto Geomorfológico del campus

Esta interacción entre las *formas* derivadas del karst y las generadas por la evolución de un sistema fluvial antiguo (ancestro del río Cahabón) y que continua en el presente, hacen particular el contexto geomorfológico donde se ubica el campus universitario.

Por lo tanto, para lograr entender la morfología del terreno, tomaremos como punto de partida dos aspectos: a) la influencia de los depósitos fluvio-lagunar que en un tiempo se depositó en una depresión o cuenca cuya génesis creemos que fue influenciado tanto por la tectónica y la disolución de los carbonatos y, por otra parte, b) una fase volcánica cuya etapa eruptiva cambio el relieve predominantemente kárstico y de la cuenca sedimentaria. El área fuente de estos depósitos piroclásticos de caída, se considera ubicada a una dista de ± 122 km al sur de Guatemala.

Antiguas terrazas ligadas al río Cahabón, son identificadas por Gilles B, et al 2012. Basados en esta cartografía, el campus universitario se ubica dentro de las terrazas cuya ubicación topográficamente son más elevadas. Los principales depósitos de esta terraza principalmente están compuestos de cantos de cuarzo en mayor porcentaje y líticos, tanto metamórficos (gneis, cuarcita, pizarra) como sedimentarios.

Esta fase eruptiva y relleno de la cuenca, genero una nueva superficie de terreno que fue posteriormente modelada por los agentes morfodinámicos principalmente externos y quizás internos en cierta medida, que persiste hasta la actualidad. Se citan los agentes internos, ya que en parte las arcillas poseen estructuras del dominio frágil. Aspecto que amerita su estudio.

Se interpreta a partir de los perfiles de suelo, que este relieve fluvial, fue modificado por el evento volcánico citado anteriormente.

Basado a la escala de trabajo (cartografía a gran escala 1 : 1 000 a 1 : 500) las formas del terreno “la *ladera*” surge como el elemento fundamental e idónea y base en la generación de información geomorfológica a nivel de sitio, como el caso del campus universitario. Considerando lo propuesto por Young, 1972, en Gutiérrez E. 2008, que “la mayor parte de la superficie terrestre está formada por *laderas* y pueden considerarse como una de las componentes fundamentales del relieve. Así mismo, las *laderas* son una de las formas básica, siendo muy importantes desde el punto de vista aplicado, en la planificación de todo tipo de obra de ingeniería civil, o en el estudio de los procesos de arrastre del suelo (Orozco, Miguel et al, 2004).

Relieve y modelado

Basado en la idea de Zinck, 2012, adaptado al caso o contexto del campus universitario, se puede asociar que el proceso formador dominante en parte es de tipo *erosivo* como *deposicional*, y resultado de ello es el desarrollo de colinas alargadas, a nivel de la categorización del relieve.

El relieve local, por lo tanto, clasificada como **Colinas**: relieve pequeño, de baja altura y compuestas por tres partes tales como: 1) **cima o cumbre** (+ en la figura 4), 2) **ladera o falda**, 3) **pie** (-) y por últimos 4) valle.

Estas colinas formadas por dos vertientes una opuesta a la otra principalmente, son de baja altura ya que, desde el nivel más bajo y elevado del terreno, varia de 1313 a 1361 msnm, por lo que las diferencias de alturas calculadas van desde los 26 m hasta los 48 m de altura. El número de vertientes dentro de la propiedad del CUNOR son cinco, que son parte de dos depresiones o nanocuenas, clasificación adaptada de Banderas, A. G, et al 2019.

El factor litológico tales como suelos residuales (provenientes de rocas calcáreas y depósitos piroclásticos, principalmente), horizontes de grava y arenas cuarcíferas (terrazas) y arcillas de origen lagunar, son los que condicionan el modelado local, dentro del campus.

Formas del terreno

Las *formas*, constituyen las unidades más pequeñas donde el *relieve*, es el criterio de clasificación más importante al momento de estudiar los componentes a escala a gran detalle, al considerar su génesis

La forma del terreno que se caracteriza por una conjugación entre laderas y cimas, que desde la morfometría presenta pendientes variadas dentro del campus. Zinck (2012) consideró apropiado repartir las *formas de terreno* en dos grupos: 1) las formas de terreno predominantemente controladas por la estructura geológica (geodinámica interna) y 2) las formas de terreno predominantemente controladas por los agentes morfogenéticos (geodinámica externa), los que se hacen énfasis en este documento.

Hemos adaptado la propuesta de Ruhe, 1975, Parsons, 1988 (en Gutiérrez E, 2008) y los de Andersson, Jan-Olov. 2009, siendo los que más se acopla a las formas observada dentro de la propiedad del Cunor (Figura 4).

Basados en que los agentes externos (geodinámica externa) y que la manera para clasificarla es mediante su origen o modo de formación, se han reconocido las siguientes dentro del campus universitario: a) **Formas de origen denudacional**, b) **Formas de origen fluvial**, c) **Formas de origen antropogénico** y otro agrupado como d) **Elementos lineales o puntuales**. Orden que se sigue en las siguientes líneas.

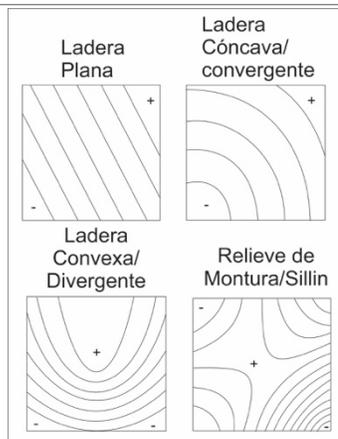


Figura 4. Mapas esquemáticos mostrando la topografía general del sitio. Ladera plana, ladera convergente, ladera divergente, cima en forma de silla de montar o relieve de montura. Adaptado y modificado de Andersson, Jan-Olov. 2009.

Denudacional (D)

Refieren a las formas que son el producto: a) de los movimientos gravitatorios, también llamados movimientos en masa o ladera (ML) y b) de la erosión pluvial e hídrica, donde los factores litológicos-estructurales, lluvia y humedad inciden.

Para el área que comprende el terreno del campus, se han identificado y ubicado espacialmente los elementos geomorfológicos que por su continuidad y ocurrencia se han agrupado como *unidades* y representados como polígonos en el mapa geomorfológico. Así mismo, nos encontramos con elementos cuya representación gráfica se realizó mediante una línea, por ejemplo, la reptación.

Las laderas pueden estar conformadas o constituidas por rocas y suelo (Gutiérrez E, 2008). En el caso de las laderas dentro del campus, esta predominantemente conformadas por suelo (arcillas).

a.1) Ladera plana (Dlp)

La base en el reconocimiento de esta *unidad* dentro de las cinco vertientes, es específicamente en la uniformidad lineal que conservan las curvas de nivel o topográficas mediante mapa topográfico y verificada dentro de un área. La pendiente predominante es moderada ($7^\circ - 14^\circ$), dentro de las cinco "vertientes" con que se configura el campus de la universidad.

Son muy pocas los sectores dentro de campus donde se lograron identificar, pero se ha delineado un sector con mayor arreglo ubicado al este. Ladera

que forma una superficie del terreno uniforme (Figura 5).



Figura 5. Ladera plana dentro del campus; al fondo, módulo H.

a.2) Ladera cóncava (Dlc)

Considerando hacia el sentido de donde se observe la curvatura de la superficie puede clasificarse como cóncava o convexa. Al respecto, en este trabajo pensamos que es necesario identificar los dos principales accidentes del terreno: *salientes* y *entrantes topográficos* para identificar estos dos tipos básicos de ladera. En este caso, el observador debe posicionarse y considerar que la concavidad de las curvas esté en el sentido de las altitudes decreciente para definir que la configuración es cóncava (Figura 4).

Esta forma de la superficie en su contexto general ha permitido definir cinco vertientes dentro del campus universitario. A nivel de su cartografía, se han reconocido por lo menos 10 sectores donde la ladera con esta configuración es evidente. Su morfología es tanto cerrada, abierta a suave (Figura 6).

Su evolución muy probablemente esté ligado a sucesivos episodios de movimientos de masa (deslizamiento). Las prácticas estudiantiles, han conllevado a la modificación de estas superficies debido a la creación de terracetas. En general presentan una pendiente moderada ($7^\circ - 14^\circ$) a moderadamente fuerte ($14^\circ - 30^\circ$), predominando la primera. Se exhiben procesos de transporte de material, y funcionan como zonas colectoras.



Figura 6. Superficie o ladera cóncava, e inmediata a una forma convexa a la izquierda. Vista al sur.

a.3) Ladera convexa (Dlx)

Tomando en cuenta los aspectos anteriores, su distinción debe basarse en que el observador debe posicionarse y considerar que la concavidad de las curvas esté en el sentido de las altitudes crecientes, para definir si la configuración es convexa.

Se han identificado por lo menos 15 laderas con esta configuración. La mayoría de sus “flancos” son cerrados. La mayor superficie de este tipo, pero muy intervenida corresponde al área donde se encuentra la mayoría de la infraestructura.

Los grados de pendiente que esta unidad presenta, va desde inclinaciones moderadamente fuerte (14° - 30°) a fuerte (30° - 60°), predominando la primera (Figura 7).

Existen dentro de los componentes de una colina, variaciones que conjugan las anteriores formas básicas de ladera, y las siguientes divisiones son un ejemplo de ello. Con la finalidad de no saturar el mapa geomorfológico resultante de tantas divisiones se han conjugado.

a.4) Ladera plana cóncava (Dlpc)

Ubicada dentro de la depresión sur, cercana a la unidad de ladera plana. Combina las dos formas básicas. Ladera con pendiente mayores a 14 grados la cual se clasifican como moderadamente fuerte (14° - 30°). Son observados dentro de este tipo de superficie indicadores de deformación en los árboles. El uso del terreno actualmente es para la actividad pecuaria.



Figura 7. Colina de ladera convexa, ubicada en la parte sur del terreno del Cunor.

a.5) Ladera plana convexa (Dlpx)

Pertencen en algunos casos, a sitios más elevados dentro del campus, encontrándose ambas tanto en el extremo sur como norte, donde cambios entre convexas a planas son abruptas o evidentes. Se han asignado con este nombre a tres sitios, cuya configuración denota los relictos de antiguas terrazas. Ubicadas a una altura de 1 340 a 1 350 msnm.

Estas formas, se encuentran conformadas geológicamente de gravas y arenas de cuarzo. Los bordes de estos son de pendiente entre 14° - 30° .

Otro grupo, dentro de esta unidad la configuración plana-convexa es suave, según lo evidencian las curvas de nivel topográficas.

a.6) Ladera convexa plana (Dlcp)

En este caso sobresale la forma convexa del terreno y seguido de la forma plana. Se ha identificado y delimitado un sector ubicado al sureste de la propiedad, dentro de la “nanocuenca” ubicada al sur.

Múltiples perturbaciones tanto naturales como antrópicas, se encuentran dentro de esta unidad (Figura 8). Algunos ligados a montículos generados por colonias de zompopos (*Atta Cephalotes*) y otras modificaciones relacionadas a zanjones.

Puede clasificarse en base a su grado de pendiente como moderadamente fuerte (14° - 30°).

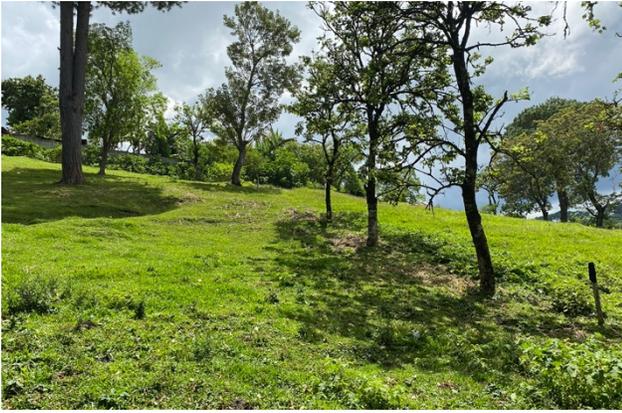


Figura 8. Aspecto del terreno de tipo convexa plana, con vista al sur dentro del campus universitario. Plana de izquierda a convexa a la derecha.

a.7) Cumbre plana a convexa (Dcx)

Pertencen a superficies muy bajas a bajas (0° a 2° de pendiente) del terreno con cierta elongación en su configuración. Ubicadas principalmente en la parte alta de las colinas. Las alturas calculadas sobre el nivel del mar (msnm) la ubican entre 1 339 a 1 357.

Se han identificado por lo menos siete de ellos, que corresponden a relectos de superficies de aplanamiento (paleosuperficie) correspondiente a antiguas terrazas aluviales (Figura 9), afectada por una fase erosiva. En su talud inmediata, se han encontrado gravas y arena de origen fluvial.



Figura 9. Cumbre plana a convexa. Al fondo se observa montículo correspondiente a nivel de terraza, sur del área.

a.8) Talud natural con escalonamiento (Dtn)

Sector que presenta pendientes $\geq 30^\circ$ del terreno, clasificándola como moderadamente fuerte a fuerte, que concierne a una ruptura de pendiente. Posee una tendencia N15°W, una longitud de 280 m, donde

la presencia de escalones es muy notoria (Figura 10). De una longitud de 280 m y ancho, que va desde 10 m (norte) hasta 29 m en su extremo sur, formando parte de la depresión este. En su configuración total, en sus extremos es convexa hacia el norte y cóncava al sur.

Tal como se ha evidenciado, esta forma del terreno podría corresponder a una capa sedimentaria correspondiente a terraza aluvial y por erosión diferencial produce este rompiente de pendiente.

La actividad pecuaria que se ejecuta dentro de los espacios destinados al respecto, provoca erosión a lo largo de los escalonamientos, que interpretamos que son el producto de la inestabilidad de la ladera (Figura 10).



Figura 10. Escalones paralelos a la superficie del terreno y mostrando inestabilidad del terreno dentro de esta unidad. Área crítica o muy susceptibles a movimiento de ladera.

Las alturas de cada escalón van desde 0,20 m a 0,40 m y ancho de 0,30 m a 0,50 m (Figura 10). Otra porción, aunque con menor extensión quedan en la

parte baja del edificio J. A lo largo de esta unidad geomorfológica, existen indicadores que pueden estar asociados a inestabilidad de la ladera, por ejemplo, el sector norte que se encuentra cercana a las instalaciones de Cafetería (Figura 10).

a.9) Planicie por acumulación (Dpa)

Se ha nombrado de esta manera a la superficie que van de 2 a 7° de pendiente del terreno ubicado en la parte baja de las “nanocuencas”. Refiere a los sectores que, por erosión laminar, aportan sedimentos a las partes bajas y cuya acumulación generan estas superficies planas al pie de las laderas (Figura 11). Por la ocurrencia y acumulación de materia orgánica (horizonte H), se ha utilizado mayormente para las prácticas de cultivos para la Carrera de Agronomía.



Figura 11. Planicie de muy baja pendiente, parte baja de la nanocuenca del lado norte del campus.

a.10) Deslizamiento Eta e Iota (Ddei)

Dos movimientos de ladera (ML) una de tipo rotacional y otra traslacional (Figura 12), fueron cartografiados y ocurrieron durante las intensas lluvias acontecidas mientras duro la Tormenta *Eta e Iota* en noviembre del año 2020. Estos ubicados dentro de la nanocuenca sur dentro del campus.

Para su caracterización, este deslizamiento rotacional se ha cartografiado mediante Dron (*DJI Mavic 2Pro*) en el cual se ha identificado la cabecera, escarpe principal, los flancos y pie de deslizamiento (Figura 12). El deslizamiento se encuentra conformado principalmente de niveles de suelo derivados de ceniza volcánica y arcillas a arenas fluviales. Es importante indicar que esta misma superficie experimentó anteriormente movimiento gravitacional, ya que se encuentra flancos antiguos de este evento pre-*Eta e Iota*

(Figura 13). Actualmente este sector afectado, experimenta movimientos pequeños y continuos, a causa de agua de escorrentía colectada por la infraestructura y con desfogue al sitio.



Figura 12. Rasgos extensionales y compresivos dentro de un ML. a) Corona y escalones en su zona de hundimiento y b) pie de deslizamiento dentro de la zona de acumulación.

Ladera opuesta al sitio de deslizamiento, es afectada por la presencia de grietas en el suelo, acompañados de movimientos verticales, formado un salto en la cresta de 1.40m muy evidente actualmente y extendiéndose a las viviendas que se ubican al oeste del límite del campus (Figura 14). Esto ocurre dentro de una ladera de configuración cóncava, sugiriendo que esta forma es el resultado de un ML y reactivado en el año 2020.

Actualmente esta superficie del terreno es ocupada por actividad agropecuaria, específicamente para pastizales.



Figura 15. Comportamiento de la precipitación acumulada de 4 estaciones. Los aumentos coinciden con los huracanes Eta e Iota (Base datos Insivumeh).

Como proceso relacionado a movimientos de terreno e incluido en este apartado es la **reptación**.

En el mapa propuesto se han identificado este proceso como elemento lineal. Se han orientado tomando en cuenta la dirección e inclinación de los árboles según la forma que presente en campo. Dicha técnica permite visualizar espacialmente la dirección y sentido de movimiento de la cubierta superficial de la ladera. La mayoría de las mediciones obtenidas se ajustan al sentido de inclinación del terreno.

La reptación puede considerarse como “movimiento superficial (unos decímetros) muy lento, prácticamente imperceptible, que afecta a suelos y materiales alterados, provocando deformaciones continuas que se manifiestan al cabo del tiempo en la inclinación o falta de alineación de árboles, vallas, muros, postes, etc. en las laderas (Vallejo G., et al, 2002).

Algunos indicadores que pueden considerarse en su reconocimiento pueden observarse en el siguiente esquema (Figura 16).

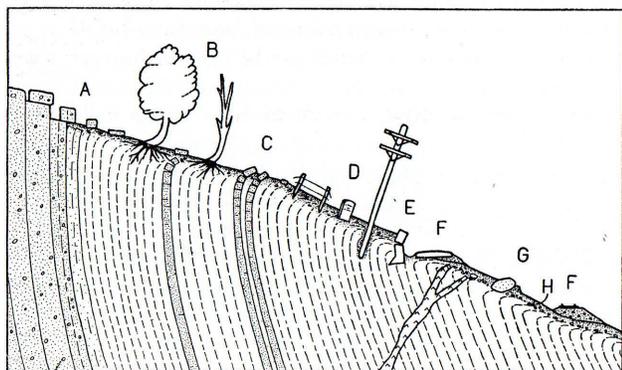


Figura 16. Evidencias comunes de reptación. a) Bloques diaclasados movidos, b) Árboles con troncos curvados, cóncavos colina abajo, c) Estratos rocosos doblados y arrastrados colina abajo, vetas meteorizadas presentes debajo del suelo en otros lugares de la ladera, d) Postes, cercas y monumentos desplazados, e) Muros de contención y zapatas quebradas y desplazadas, f) Caminos y vías de tren desplazados de su

alineación, g) Cubierta de suelo enrollada y desplazada colina abajo por bloques reptantes, h) Piedras alineadas en la base aproximada del suelo reptante. a y c representan reptación de roca; los demás rasgos mostrados se deben a reptación de suelo. Efectos similares pueden producirse por algunos tipos de deslizamientos (Sharpe, C.F.S. 1938)

Dos configuraciones pueden identificarse según el sentido en que se disponen los árboles en función de la pendiente de la superficie del terreno, ejemplos de tales casos pueden observarse en las figuras 17 y 18.



Figura 17. Inclinación de árbol, por proceso de rotación. Son varios los casos dentro del campus, donde estos elementos poseen este sentido con respecto a la pendiente. El sentido de movimiento es en contra hacia donde inclina el árbol.



Figura 18. Árbol de pino con tronco curvado, cóncavo colina abajo. El sentido y dirección de movimiento en sentido de la curvatura.

Además de estas características observadas en los árboles, otros elementos e indicadores de tal proceso son los postes de concreto (Figura 19), los cuales se ven afectados por este movimiento paulatino.



Figura 19. Otros indicadores del movimiento relativo de los materiales superficiales. Todos evidenciando empuje o movimiento (derecha) en sentido de la pendiente del terreno.

Las variables implicadas en este proceso, se puede observar en el esquema y gráficos, que muestran los ángulos de rotación y “reptación”, ángulos obtenido en campo mediante brújula de geólogo. Estos deben de interpretarse como el ángulo que resulta de la relación con la vertical (ángulo de rotación) y plano horizontal (“ángulo de reptación”) (Figura 20).

Mediante diagrama de rosa (Figura 21), se ha representado la relación del ángulo de rotación (30°) con respecto a una línea de plomada (dirección de la gravedad) y el ángulo con respecto al plano horizontal (60°)

Los ángulos ϕ y \emptyset , puede corresponder a uno de ellos al ángulo de reptación. Quedará a discreción de cada uno cual utilice.

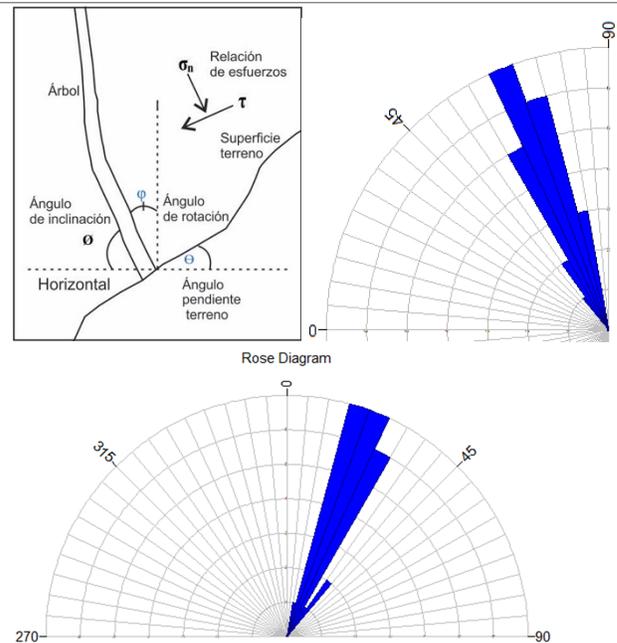


Figura 20. Esquema simplificado de reptación y ángulo obtenidos en diferentes variedades de árboles dentro del campus.

Se ha representado mediante estereograma las relaciones geométricas entre los ángulos de reptación y los probables planos de cizalla, considerando la figura 21. Se ha identificado el cono que incluye la mayoría de las normales (σ_n) a los planos que hemos considerado como “plano de cizalla- τ ”. Hacia donde buzan dichos planos se encontraría la dirección de reptación (o sea en dirección de sus polos). Con un ángulo medio de dichos planos es de 30°.

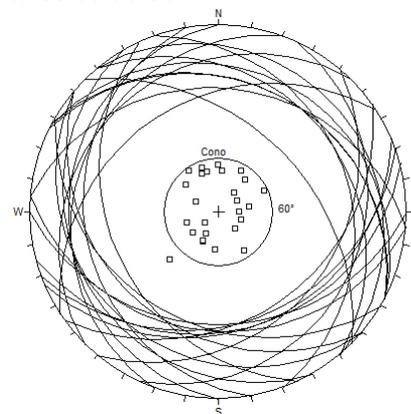


Figura 21. Proyección estereografica, utilizando el hemisferio superior para los angulos de reptación y orientación de los posibles planos de movimiento. (No. dato 28).

a.11) Movimiento de ladera antiguo (Dmla)

Basados en la configuración observada a través de las curvas topográficas e indicadores morfológicos vistos en campo, se ha de limitado un área con

evidencia de ser el resultado de movimiento de ladera. Se desconoce la edad de este evento, pero se acopla a la morfología que Morán I. S., et al, 2019 proponen para la identificación de antiguos deslizamientos. El de mayor extensión se ubica en la depresión este del campus universitario.

La dirección y sentido de deslizamiento en la que ocurrió es E-W, con sentido de movimiento al este. Por su configuración (alongada y lobular), puede considerarse como de tipo flujo de lodo.

Se ha considerado un área de antiguo movimiento de ladera el sector donde ocurre actualmente el deslizamiento rotacional (Figura 13), por la presencia de cicatriz antiguo. Por lo tanto, un área que se ha reactivado.

a.12) Sillín o superficie en montura (Sm)

En su configuración se conjugan dos formas de ladera de tipo convexa y dos cóncavas. Se han identificados por lo menos dos dentro del campus, ubicados al sur y norte (Figura 22), con la misma configuración espacial. Existen otros dos sitios con similar morfología, pero por los cambios que se introdujeron a partir de la actividad antrópica, ya no son tan evidentes, tales son los casos donde se ubica el módulo H y sector de laboratorio de química y clínica médica.



Figura 22. Sillín o superficie en montura, ubicado al sur del campus. Vista hacia el suroeste.

Fluvial (F)

b.1) Planicie de inundación

Son superficies muy cercanas a los pequeños cauces de riachuelos que en la mayor parte del año que encuentran pantanosos. En etapas de lluvias

extremas son fáciles de ser inundadas. La zona de mayor extensión se encuentra al norte, principalmente cercano al área de granja de agronomía y al sur, inmediata a la entrada al centro.

Dentro de este sitio son comunes las plantas como la “Cola caballo” (*Equisetum sculentum*). Estas plantas por lo regular crecen en donde el nivel freático es somero (Figura 23).



Figura 23. Vista al este, de la superficie de inundación, cercana a granja de agronomía.

El elemento lineal ligado a esta unidad, son los riachuelos permanentes, que ocurren principalmente dentro de la nanocuenca sur y este. Varios nacimientos de agua son observados, los cuales alimentan esto riachuelos. Esto sugiere que la mayoría del terreno o propiedad de la universidad, es una importante zona de recarga hídrica.

Antrópico (A)

Dentro del campus, existen sectores que se encuentran más intervenida como la ladera de la parte central de la propiedad de CUNOR. Esto utilizado ya sea para obra gris o espacios para parqueo y jardines. Estos trabajos de acomodación, condujo a una modificación aproximadamente del ± 90 % del relieve en dicha vertiente. Las formas resultantes de esta actividad antrópica, son las que se describen seguidamente.

c.1) Superficie de relleno (Asr)

Las superficies que hemos identificados como de relleno, cumplen con relieves o superficies que resultaron de suelos reacomodados (suelo removido). Estos por lo regular cubrieron el horizonte H del suelo in situ (Figura 24). Este material posee espesores entre 1,5 a 2 m.



Figura 24. Vista de superficie de relleno y corte donde se observa sobrepuesto material de relleno y horizonte orgánico (H) perteneciente a la superficie natural soterrada.

c.2) Montículo de relleno (Amr)

Tal como indica el nombre, pertenecen a volumen de suelo removido y de su distribución angosta, muy distintas en forma a las citadas anteriormente. Se han identificado varios sitios de poca extensión compuesto de suelos removidos producto del movimiento de suelo debido a obras de ingeniería.

c.3) Terraplén por acomodación (Ata)

Superficie del terreno que fue aplanado y acomodado debido a la necesidad de parqueos y/o emplazamiento de una infraestructura, en este caso para los distintos módulos (A hasta J).

Se han contabilizado trece, cuyo uso son tanto para aulas, laboratorios, auditorios, espacios administrativos y parqueos (Figura 25). Por otra parte, algunos fueron construidos para uso deportivo (canchas), contabilizándose dos.



Figura 25. Plataforma o terraplén por acomodación, para parqueo.

c.4) Rampa y plataforma de acceso (Arp)

Comprende todas las vías de acceso, ya sean esto planos o escalonados, que permiten el acceso a los diferentes ambientes o módulos con que está conformado el centro universitario (Figura 26).



Figura 26. Plataforma y rampa de acceso, configurado bajo la topografía del terreno.

Dentro de este grupo, incluimos las principales vías de acceso vehicular y peatonal con que se encuentra configurado el sistema de vías del campus.

c.5) Talud de corte sin protección (Atcp)

La distribución y diseño arquitectónico que se ejecutó con respecto al acomodo de la infraestructura en función de la morfología y

pendiente de la ladera oeste, fue necesario realizar una serie de cortes en el suelo.

Estas formas o superficies son susceptibles a que, a lo largo de ellos, ocurra erosión del suelo. Algunos de estos taludes se encuentran degradados y evidenciando movimiento de masa pequeños.

Los taludes que son ejemplo de esta unidad son los ubicados a lo largo de la entrada principal, sector de biblioteca y acceso a la granja de agronomía (Figura 27). Construidos principalmente sobre suelo residual y algunos niveles de arenas o gravas aluviales.



Figura 27. Talud de corte sin protección, cercana a la entrada a biblioteca y acceso a granja de agronomía.

c.6) Talud de relleno con protección (Atrp)

Corresponden a cortes realizados al momento de construir las plataformas o terraplén desde los años 1976, como proceso de acomodar el terreno. Para estabilizar estos taludes se levantaron muros de contención a lo largo de varios cortes, donde su

longitud y altura varían. Las características de estos taludes con sus respectivos muros de contención se enlistan algunos a continuación.

Tabla 1

Parámetros para algunos muros de contención.

Modulo	Longitud	Altura	Inclinación talud
Edificio H	43,40 m	3,0 m	77°
Modulo G	41,50 m	1,80 m	67°
Modulo Fa	22,90 m	1,85 m	65°
Modulo F	41,15 m	2,0 m	70°
Módulo E	40,70 m	2,90 m	69°
Módulo D	50,0 m	1,70 m	72°
Aula Magna	40,78 m	1,80 m	63°

Ligado a ellos se encuentra una pequeña superficie inclinada, originada como el resultado de la acumulación de material (relleno) proveniente de la excavación de las plataformas (Figura 28).

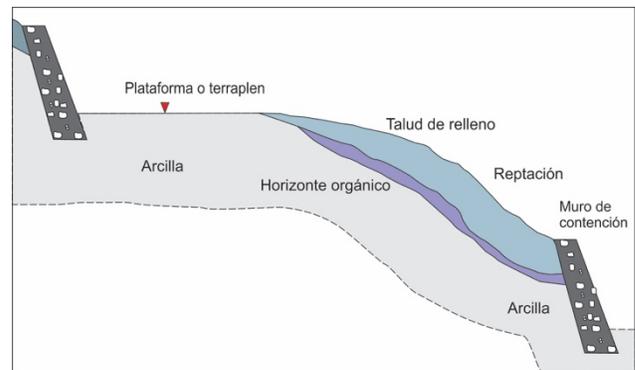


Figura 28. Esquema simplificado de perfil que considera las relaciones de relleno, plataforma y muro de contención.

La parte superior del talud, compuesto por suelo removido (relleno), evidencia en cierta manera reptación como movimientos de masa pequeños.

El diseño ingenieril y proceso de reptación a lo largo de estas estructuras lineales, pueden observarse en la figura 29a-29c.



Figura 29a). Muro de contención, módulo D.



Figura 29b) Talud de relleno con protección. Nivel de suelo de relleno, evidenciando proceso de reptación en arboles de pino, modulo G.



Figura 29c). Desplazamiento de suelo arcilloso, dentro de talud de relleno con protección. Modulo G.

Se han construido una serie de perfiles a lo largo de estos taludes cubriendo la parte de la superficie de relleno. Los ángulos para estos van desde $\pm 15^\circ$, 30°

a $\pm 40^\circ$, siendo más evidente la reptación en este último (Figura 30).

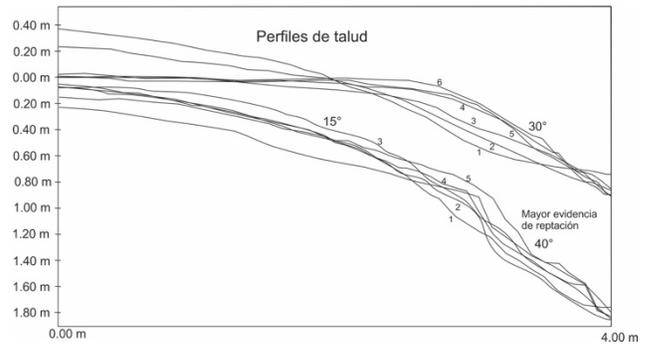


Figura 30. Morfología de talud compuesto de material de relleno, principalmente de suelo arcilloso, que acompaña la unidad Atrp.

c.7) Talud de relleno (Atr)

Cinco áreas corresponden a este tipo, y conciernen a los límites o bordes de los volúmenes de material resultantes de una fase de relleno, donde se genera una pendiente suave o abrupta en sus límites. Los más evidentes son los ubicados uno en la entrada al campus (Figura 31). Otro es el cercano a módulo de laboratorio de química y granja de Zootecnia.

La superficie inclinada a la entrada de centro, es el resultado de la acomodación de escombreras debido al relleno realizado de una antigua quebrada que bordeaba el límite oeste del terreno del centro.

Este trabajo de relleno, provoca inundación en este sector a causa en parte por la acumulación de basura en la tubería de drenaje que ha quedado soterrado.

Otros quedan como parte de la acomodación de terraplenes, como los realizados por la actividad pecuaria.



Figura 31. Talud de relleno entrada al centro universitario del norte, así mismo rampa o plataforma de acceso.

d) Elementos lineales o puntuales

Asociados a este grupo, encontramos: *los surcos por erosión*, frentes de reptación, depresión por canal y nacimientos de agua.

Los primeros provocados por el paso del ganado principalmente del lado este (Figura 32). Estos poseen una longitud de 250 m, siendo el sendero más largo con una tendencia NE-SW.

Una mayor concentración de la esorrentía a lo largo de esta zona de surcos, ha favorecido la generación de cárcavas, y la erosión cuando cambia la pendiente es alta a severa.

Estos surcos poseen una profundidad o altura que va entre 0,30 m a 0,5 m y ancho promedio de 0,40 m. Los frentes de reptación son otros elementos, observados al en las laderas cóncavas en el sector de los potreros.



Figura 32. Sistema de surcos dentro del campus, debido al paso de ganado vacuno, ovino y caprino. Sitios donde el proceso de erosión se incrementa.

Depresión por canal. Originado por la actividad humana, y es el resultado de la introducción de servicios vitales. Posee 4 m de ancho y profundidad media de 1,50 m.

Se han contabilizado dos, cuya longitud se encuentran entre 83 m a 313 m (Figura 33).



Figura 33. Zanjón construido para introducir algunos servicios vitales dentro de campus universitario.

Discusión

Las colinas que son parte del modelado de terreno, confieren por lo menos tres formas evidentes a nivel de sitio. Dicho modelo exhibe cuatro configuraciones como plana, cóncava, convexa y en su morfología de sillín o superficie de montura.

En la evolución de las formas de terreno, consideramos que los procesos activos, como los fluviales, movimientos en masa, la reptación y los antrópicos, son los que han modelado el relieve dentro del campus.

Esto ha dado paso a la configuración de cuatro pequeñas depresiones topográficas “nanocuencas” no kársticas, dando como resultado pequeñas vertientes que controlan la escorrentía dentro de campus universitario. Son dos los principales, una la más amplia ubicado al este (granja de agronomía), cuya red fluvial drena hacia el río Chió y el segundo, ubicado al suroeste (granja de zootecnia), donde el drenaje va hacia el norte, desembocando el río Cahabón. En su configuración general dichas depresiones topográficas, sus laderas están compuesta por formas convexas y cóncavas principalmente.

Ambas “nanocuencas” separadas por un alto topográfico de forma convexa, de tendencia nortesur a noroeste, al centro de la propiedad, donde se encuentra emplazada la mayoría de la infraestructura de la universidad. Sus vertientes tienen tres sentidos, uno al noreste; otra, al suroeste y la última al N25W. Su ladera noroeste de esta saliente topográfica es la que mayormente a sufrido cambios por la actividad antrópica.

Dada la configuración que tiene el perímetro de la propiedad del CUNOR, existen otras tres depresiones pequeñas e incompletas. Una al norte, la otra cercana a al módulo J, y la última al sur (ver mapa geomorfológico). Separados por morfologías de tipo sillín o superficies de montura (tres al menos)

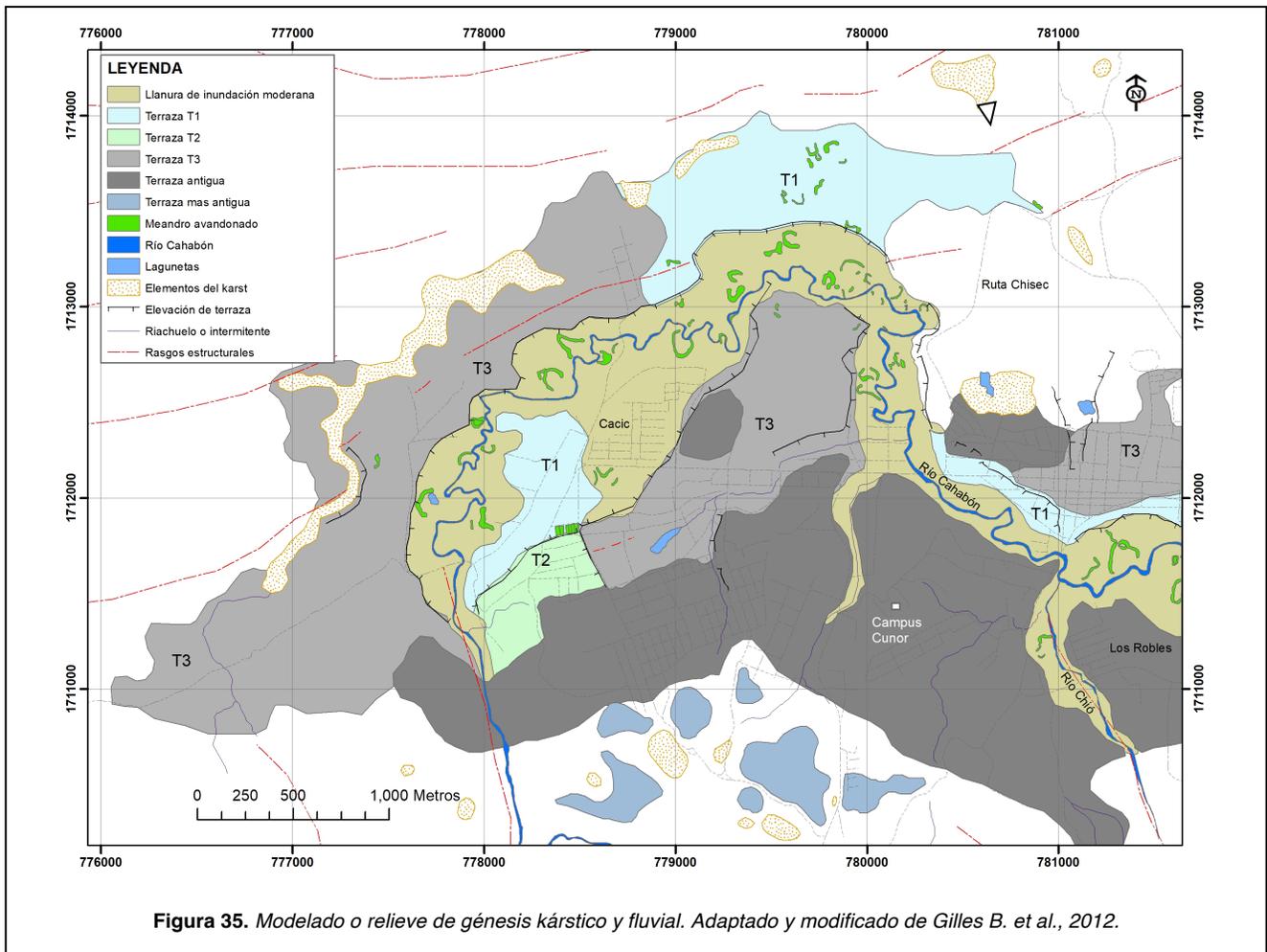
Esta superficie de montura y crestas convexas de pendiente baja, corresponden a terraza erosionadas y corresponden a relictos de superficies de aplanamiento antiguos (paleo-superficies o nivel base topográficos).

Al considerar su contexto más amplio (a nivel de relieve o modelado geomorfológico, Zink 2012), vemos que las historias de los procesos modeladores de la superficie (**geomorfología histórica**), resulta de varias génesis (Figura 35). Elementos geomorfológicos a nivel local, propuesto por Gilles B., 2012 (Figura 35), a nivel del relieve, el kárstico y fluvial sobresalen a nivel de la ciudad de Cobán (Figura 35). El más importante y que interviene o controla la preservación y continuidad de los elementos geomorfológicos es el karst, como un sistema morfodinámico regional (Figura 35).

El proceso de disolución favorecido por niveles de brechas calcáreas y la tectónica, hayan derivado en la generación y morfología de una depresión kárstica de aproximadamente 9,4 km de largo y $\pm 2,5$ km en su segmento más ancho. En este episodio, el factor litológico-estructural sigue jugando un papel importante en el desarrollo y evolución de la depresión kárstica. Este control estructural N70E, corresponden en gran medida a fallas normales con componente lateral izquierdo.

En el interior de dicha depresión kárstica, se han generado una serie de elementos ligados al *sistema lagunar y fluvial* (Río Cahabón).

La secuencia lagunar compuesta de arcillas grisáceas con niveles oscuros ricos en materia orgánica (Figura 36), pueden ser observadas dentro de la depresión kárstica, así como dentro del campus universitario. Evidencia de una fase de relleno de cuenca sedimentaria (colmatación, Fase I) se observa en las facies superiores de la secuencia Jolom Naj, en la cual ocurre lentes de arenas cuarcíferas.



Un ancestro del río Cahabón, habría originado una serie de terrazas (T1-T3) y otro grupo referidas como antiguas donde se ubica el campus (Figura 35). Más al sur (T) su extensión y continuidad está más afectada por antiguos colapsos relacionados al karst.

Dentro del contexto de sitio (campus universitario) es indiscutible la presencia de terrazas aluviales (Figura 35). Estas compuestas de gravas y arenas ricas en cuarzo, cubiertos por un potente intervalo de suelo derivado de ceniza volcánica.

Adicional a ello, una fase de exposición y erosión fue la que continuó después de las terrazas (T1-T3) y más antiguas, seguida de un evento de caída de ceniza volcánica importante (Fase II). el cual modifica el relieve kárstico y la cuenca, tal como se observan en las relaciones litoestratigráficas tanto para las secuencias lagunares como para las fluviales (Figuras 36 y 37).



Figura 36. Arcillar lagunar, rico en materia orgánica en contacto discordante con ceniza volcánica.



Figura 37. Gravitas con cantos de cuarzo y líticos de terraza (T3), en contacto con depósitos piroclásticos con alto desarrollo de arcilla blancas a rojizas.

Por lo tanto, la modificación de un antiguo relieve viene dada por una actividad volcánica que consideramos que su fuente se ubica 250km al sur, en la cadena volcánica cuaternaria de Guatemala, relacionado a emisión violenta que destruyó el edificio volcánico y originó la caldera de Atitlán, produciendo una cantidad considerable de materiales piroclásticos. La unidad H, conocida como Los Chocoyos es el más extendido y fácilmente identificable. Este evento principal y otros secundarios constituyen la fase II de modificación del relieve por la creación de relleno de valles y occlusión de las vías fluviales superficiales y subterráneas (Figura 38).

Eventos volcánicos sucesivos quizás de menor magnitud, sepultaron una superficie de terreno volcánico expuesta, donde su límite inferior está dada por un horizonte rojo en contacto con los anteriores procesos (superficie de exposición o erosión II). Posterior a ello, los procesos relacionados a condiciones climáticas (escorrentía, movimientos de masa) han modelado el relieve

desde entonces hasta la actualidad (Fase III). Incluyendo esta última etapa, una fase erosiva fluvial (río Cahabón) que ha modelado su propia superficie de inundación moderna.

Desde las formas rectilíneas del río Cahabón actual al sur, meandriforme en el interior de la cuenca, con la presencia de meandros abandonados dentro de su llanura de inundación moderna (Figura 35), son parte de la historia geomorfológica de la zona, aunque ésta puede ser más compleja de lo que se plantea.

Las terrazas y depósitos fluviales registran la dinámica y evolución del río Cahabón, así como de sus afluentes cuyo nivel de erosión muestran sus posibles grados de disección o incisión.

Conclusiones

Para lograr contextualizar la geomorfología a nivel de sitio, es necesario entender o razonar sobre los factores que se encuentran más allá de la escala de trabajo, tal el caso propuesto. La caracterización geomorfológica del sitio (campus) considera como elemento fundamental y/o unidad mínima la "ladera" y dividir las a través de sus formas (plana, cóncava, convexa). A nivel de sitio, es esencial e importante contar con una base topográfica con equidistancias de curvas de nivel a cada 0,50 m o 0,20 m para identificar la morfología del terreno y elementos lineales que ocurran sobre estas laderas. Ya sean estas levantadas con estación total o vehículo aéreo no tripulado (VANT), conocidos como Drones.

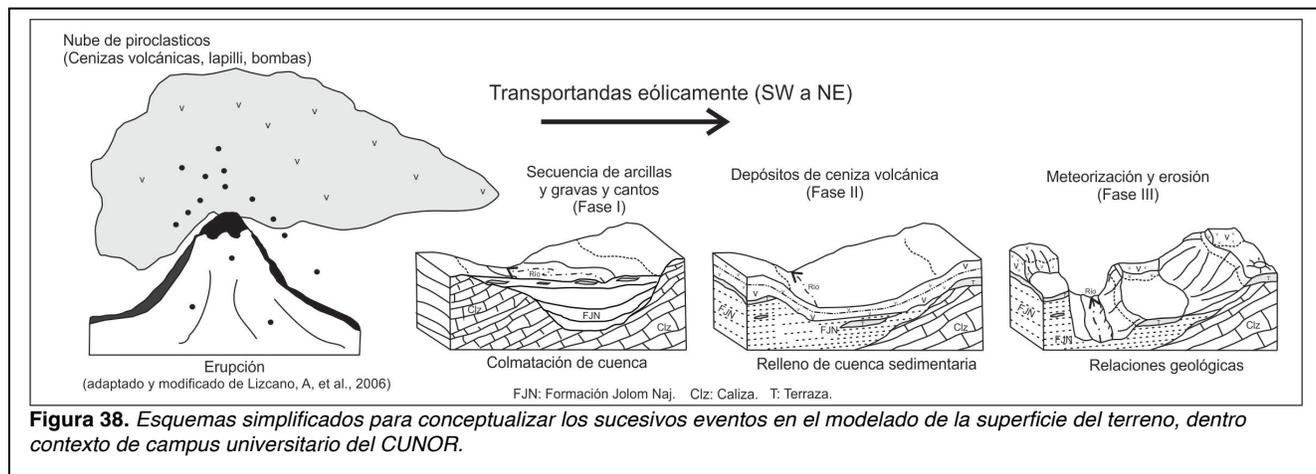


Figura 38. Esquemas simplificados para conceptualizar los sucesivos eventos en el modelado de la superficie del terreno, dentro contexto de campus universitario del CUNOR.

La importancia de un mapa geomorfológico, como este caso del campus universitario: radica en que esta herramienta es de interés en la planificación del territorio, ya que la mayoría de las actividades (antrópicas) se desarrollan sobre estas formas de superficie del terreno, y así mismo, permiten zonificar la inestabilidad del terreno importantes en la gestión del riesgo, ya que en su análisis involucra los procesos gravitatorios o de erosión e inundación.

Varios sectores son identificados como susceptibles a movimientos de ladera (ML), sobresaliendo los indicadores (cicatrices y escalones) dentro de la unidad de talud natural (Dtn).

La falta de obras físicas en el manejo de la escorrentía dentro del campus, viene a aumentar la erosión y la inestabilidad del terreno, reactivando algunos sectores que tienen alta susceptibilidad en generar movimiento de masa, como por ejemplo el área cercana a la cafetería y modulo J.

Pensamos que las cumbres convexas, refieren a superficies de aplanamiento y corresponden a antiguas terrazas fluviales, junto a horizontes de sedimentos tamaño arcilla lagunar, en cuyo modelamiento los procesos externos han influido preferentemente. Se desconoce la respuesta sísmica de estas arcillas de origen lagunar, información que podría despertar a futuro un tema de investigación.

Agradecimientos

A los estudiantes: Michelle Ochaeta, Franklin Ac Cac y Gerberth Pereira, por el apoyo de medir y obtener los parámetros de cada muro de contención.

A Edgar Pérez, por las observaciones realizadas al documento.

Referencias

Alfonso G. Banderas & Rebeca González-Villela. Evaluation of the sustainability of the Valle de Bravo reservoir, Mexico, as a water-supply source. *Water and Society* V 79-93. www.witpress.com, ISSN 1743-3541 (online) © 2019 WIT Press doi:10.2495/WS190011

Cisneros de León, A., Schindlbeck-Belo, J. C., Kutterolf, S., Danišić, M., Schmitt, A. K., Freundt, A., Pérez, W., Harvey, J. C., Wang,

K.-L., & Lee, H.-Y. (2021). A history of violence: magma incubation, timing and tephra distribution of the Los Chocoyos supereruption (Atitlán Caldera, Guatemala). *Journal of Quaternary Science*, 36(2), 169–179. <https://doi.org/10.1002/jqs.3265>

Bundschuh, J., & Alvarado, G.E. (Eds.). (2012). *Central America, Two Volume Set: Geology, Resources and Hazards* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203947043>

Brocard, Gilles, Willenbring, Jane, Salles, Tristan, Cosca, Michael, Gutiérrez-Orrego, Axel, Chiquín, Noé, Morán-Ical, Sergio, Teyssier, Christian, 2021/07/29 - 795 – 822. Tectonically and climatically driven mountain-hopping erosion in central Guatemala from detrital ¹⁰Be and river profile analysis. *VL - 9 - 10.5194/esurf-9-795-2021*. *Earth Surface Dynamics*.

Brocard, Gilles, Morán-Ical, Sergio. 2014/12/01, 55, 65. Phreatic clastic dikes and other degassing structures in Los Chocoyos Pumice. *VL - 1*. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra*.

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

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

Jan-Olov Andersson. 2009. A GIS-based landscape analysis of dissolved organic carbon in boreal headwater streams. *Karlstad*

University Studies 2009:38. ISSN 1403-8099 ISBN 978-91-7063-206-8. Faculty of Social and Life Sciences. Biology. SE-651 88 Karlstad.

J.A. Zinck Enschede, 2012. Geopedología: elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales (PDF, 4MB) ITC, 2012; 131, pages, ITC Special Lecture Notes. Series ISBN 90-6164-339-2.

Luis I. González de Vallejo, Mercedes Ferrer, Luis Ortuño, Carlos Otero. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Educación, Madrid 2002. ISBN: 84-205-3104-9. 744p.

Mateo Gutiérrez Elorza. Geomorfología. Pearson Educación, S.A. Madrid, 2008. ISBN: 978-84-8322-389-5. 920p.

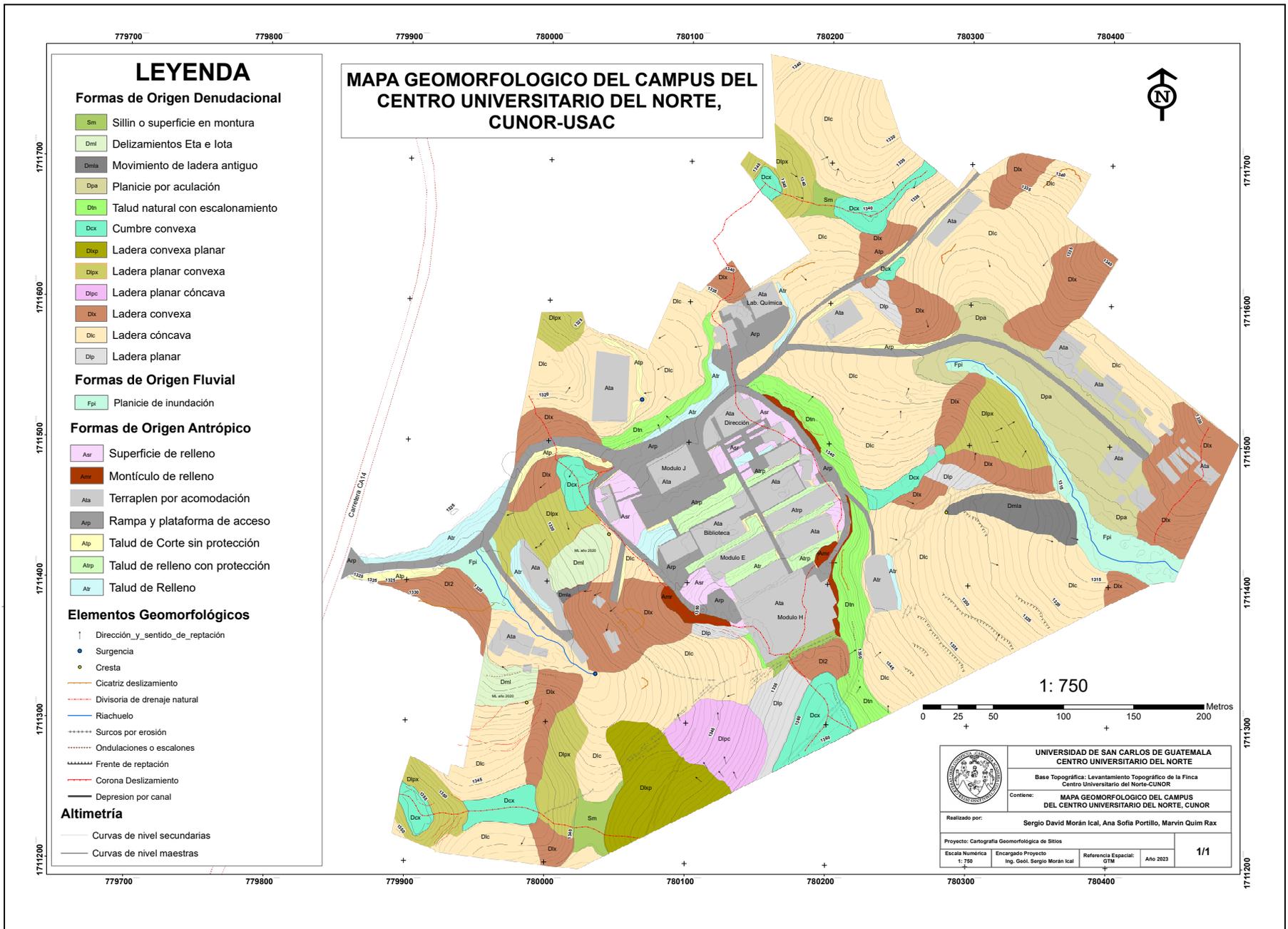
Ministerio de agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), 2011. Mapa Fisiográfico-Geomorfológico de la República de Guatemala, a escala 1: 250,000 -Memoria Técnica- Guatemala. 109p.

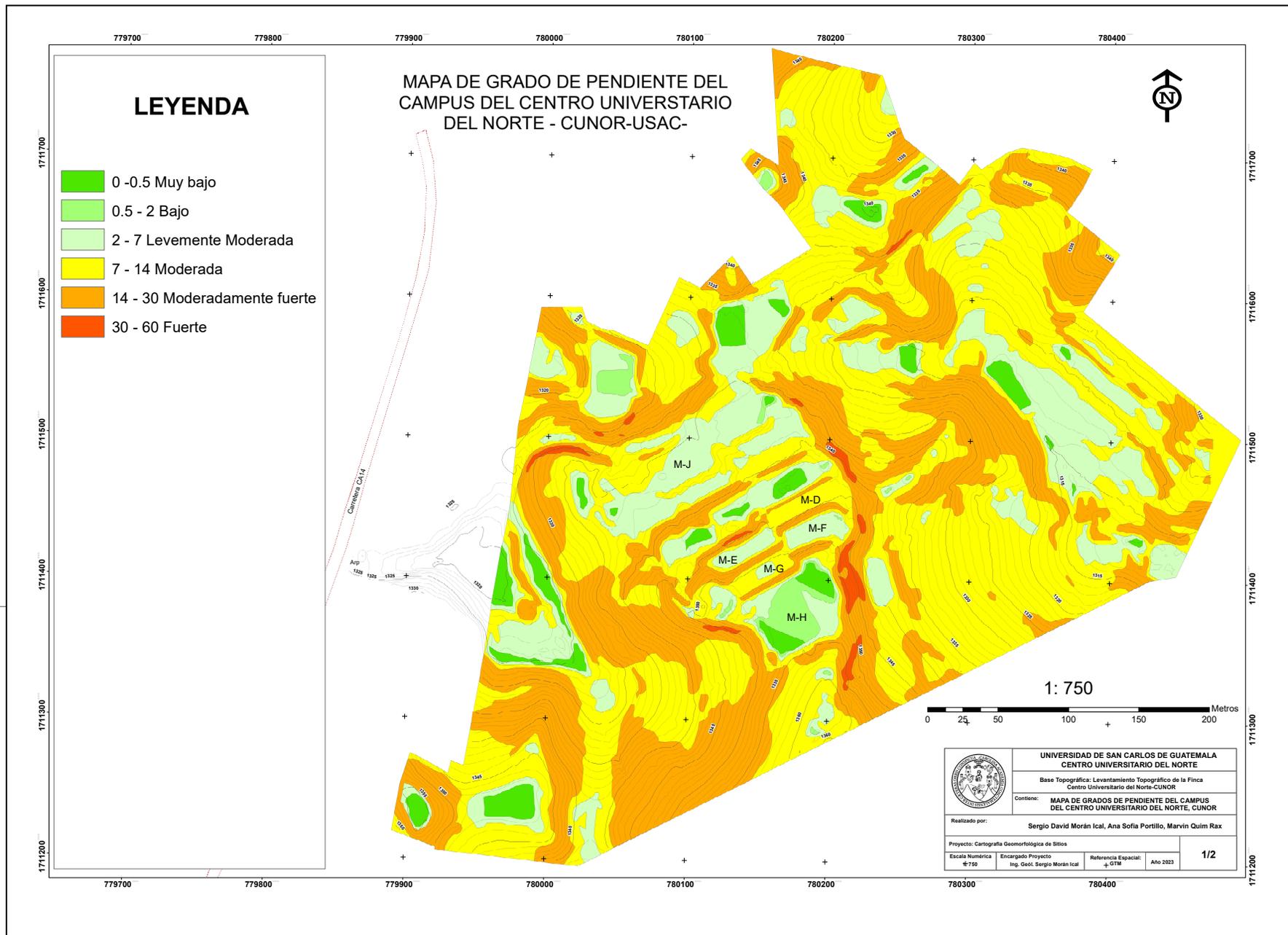
Azor Pérez, Antonio; Orozco Fernández, Miguel; Azañón Hernández, José M.; Alonso Chaves, Francisco. 2004, Geología Física, Ediciones Paraninfo S.A. 2da Ed. 2004. 312 p. SBN 10: 8497320212.

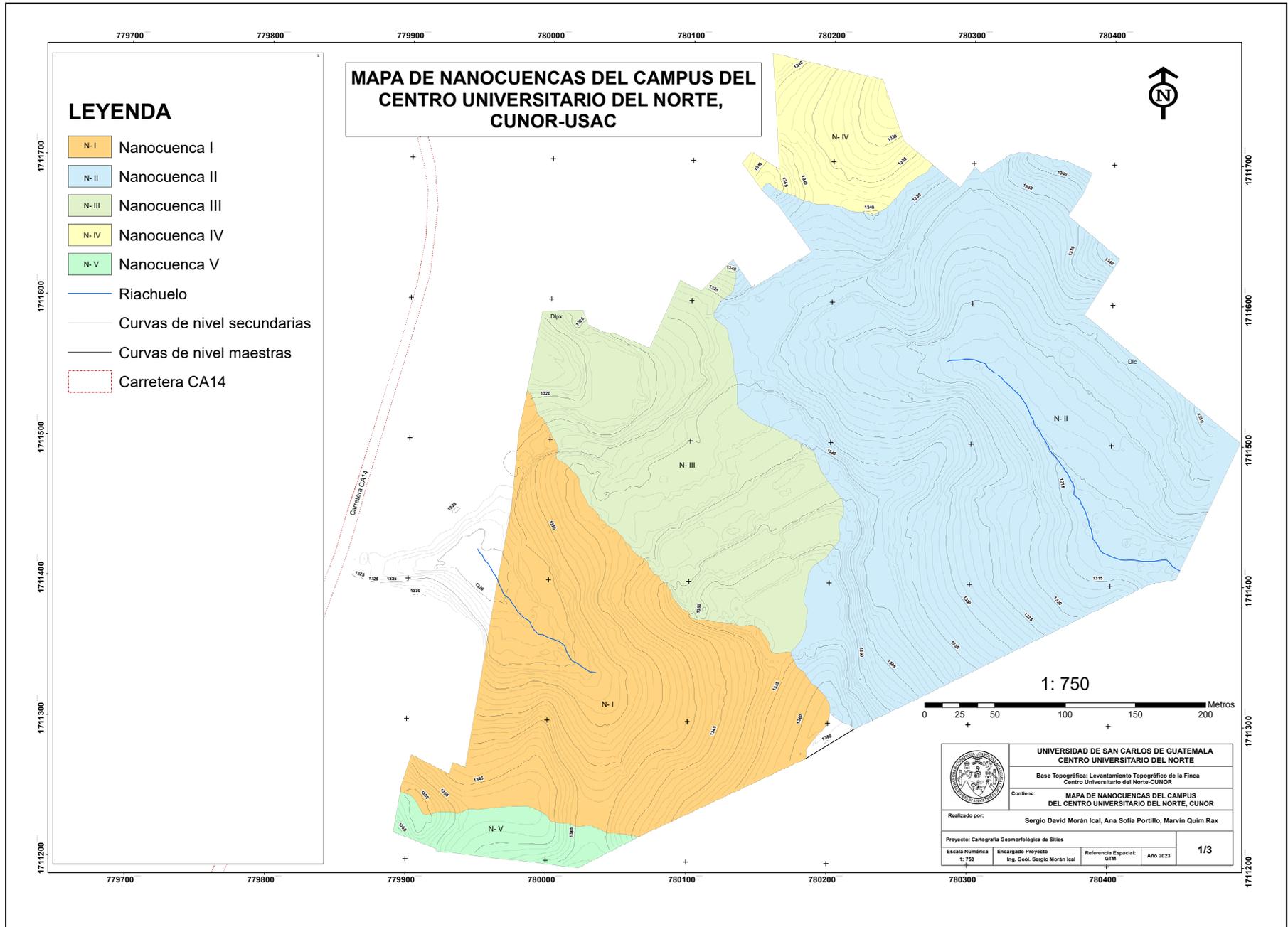
Sharpe, C.F.S. 1938. Landslides and Related Phenomena. Columbia University Press, New York, USA. 137 pp. Excerpt p. 16-48. Published by the International Association of Hydrological Sciences 2011. IAHS Benchmark Papers in Hydrology Series, no. 6 ISBN 978-1-907161-14-8.

Sergio David Morán Ical, Carlos Ventura Zavala, Hugo Leonardo Hernández Cajas, Jorge Enrique Vargas Ochoa. 2019. Patrones Topográfico en el Reconocimiento de Paleodeslizamiento en Baja Verapaz, Guatemala. Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra. Vol. 6.

Zuidam, R A Van and F Van Zuidam-Cancelado. 1978. Terrain Analysis and Classification using Aerial Photographs. ITC Textbook VII-6, 358 pp.







RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO DE COLAPSOS POR KARST EN LA COMUNIDAD CHINIMLAJOM, COBÁN ALTA VERAPAZ

GEOLOGICAL RECOGNITION OF KARST COLLAPSES IN THE CHINIMLAJOM COMMUNITY, COBÁN ALTA VERAPAZ

Luis Alfonso Laj Hun, Sergio David Morán Ical, Gembly Bac, Alida Choco, Aimé Cuc, Poliberto Cuc, Ricardo De La Cruz, Marielena Guzmán, Daniel Hernández, Jorge Hun, Yakelin Iglesias, Klug Manuel, Luciano López, Sergio Medina, Pablo Morales, Denilson Ponce, Keneth Ramirez, Yoselyn Sierra, Luis Teos, Ervin Tot, Vásquez María, Divi Yat, Pablo Yoj

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte,
Carrera de Geología, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.

Email: geoluis04@gmail.com

RESUMEN

Se ha realizado un reconocimiento geológico para evaluar los reportes de hundimientos y subsidencias ocurridos en la comunidad *Chinimlajom*, municipio de Cobán, el cual ha afectado principalmente la infraestructura del centro de convergencia comunitario, que quedó totalmente inhabitable debido al colapso de una dolina en sus cimientos. Para el presente estudio se utilizó la información existente sobre la geología local y regional, modelos de precipitación, sensores remotos y un SIG de acceso libre, además de imágenes satelitales Lansat. Dicha información se complementó y contrastó con las observaciones realizadas en campo durante la visita de reconocimiento y los registros mensuales de precipitación pluvial en la estación meteorológica Cobán para los últimos 20 años.

Se abordó la problemática presente desde del desglose de factores condicionantes y desencadenantes, estableciendo la causa-efecto de cada uno, proponiendo que los principales factores condicionantes son: litología de rocas calizas propensas a disolución, contexto geomorfológico kárstico con estructuras endokársticas y exokársticas presentes, además de laderas con pendientes verticales y presencia de suelos residuales.

arcillosos. Dichos factores constituyen amenazas naturales principalmente cuando se activan mecanismos naturales como saturación a partir de eventos de precipitación pluvial máxima, la cual es característica en septiembre, octubre y noviembre principalmente, generando inundaciones y movimientos de ladera.

Así mismo, el factor antrópico es fundamental ya que la comunidad está utilizando las dolinas como drenaje para encausar las aguas servidas y otros desechos líquidos o sólidos como basura, lo cual acelera la disolución de la roca caliza y constituye un problema de contaminación ambiental hídrica. Además, las viviendas de la comunidad se encuentran ubicadas dentro de una depresión kárstica, que no es apta para ser habitada debido a que el nivel freático tiende a subir más allá del nivel del suelo, además de la inestabilidad de las laderas y constante colapso de dolinas.

Se recomienda la implementación de fosas sépticas herméticas que permitan el tratamiento de aguas residuales, trabajos de estabilización de taludes y técnicas adecuadas para la construcción de viviendas en laderas y establecer un sistema de alerta temprana en el cual a partir del registro umbral de precipitación máxima de aproximadamente 200 mm de columna de agua, se tomen las precauciones adecuadas para evitar pérdidas, ya que se ha definido que a partir de este límite, la comunidad corre alto riesgo de inundarse.

Palabras clave: *Chinimlajom*, dolina, Eta e Iota, inundaciones, amenazas naturales, precipitación.

ABSTRACT

A geological reconnaissance has been carried out to evaluate the reports of collapse and subsidence in the *Chinimlajom* community, municipality of Cobán, which has mainly affected the infrastructure of the community convergence center, which was rendered totally uninhabitable due to the collapse of a sinkhole in its foundations. For the present study, existing information on local and regional geology, precipitation models, remote sensing and an open access GIS, as well as Lansat satellite images were used. This information was complemented and contrasted with field observations made during the reconnaissance visit and monthly rainfall records at the Cobán meteorological station for the last 20 years.

The present problem was approached from the breakdown of conditioning and triggering factors, establishing the cause-effect of each one, proposing that the main conditioning factors are: lithology of limestone rocks prone to dissolution, karst geomorphological context with endokarst and exokarst structures present, in addition to slopes with vertical inclines and the presence of residual clay soils. These factors constitute natural hazards mainly when natural mechanisms are activated, such as saturation from maximum rainfall events, which is characteristic mainly in September, October and November, generating floods and landslides.

In addition, the anthropogenic factor is fundamental because the community is using the sinkholes as drainage to channel sewage and other liquid or solid waste such as garbage, which accelerates the dissolution of the limestone rock and constitutes a problem of environmental water contamination. In addition, the community's houses are located within a karst depression, which is not suitable for habitation because the water table tends to rise above ground level, in addition to the instability of the slopes and the constant collapse of sinkholes.

It is recommended the implementation of watertight septic tanks for wastewater treatment, slope stabilization works and appropriate techniques for the construction of houses on slopes and establish an early warning system in which from the threshold record of maximum rainfall of approximately 200 mm of water column, appropriate precautions are taken to avoid losses, since it has been defined that from this limit, the community is at high risk of flooding.

Keywords: *Chinimlajom*, doline, ETA and IOTA, flooding, karst, precipitation.

Introducción

Característicamente, el nombre de la comunidad hace referencia a las condiciones geomorfológicas existentes, pudiendo traducirse *Chinimlajom* como “Guacal muy grande”, equivalente a un polje o “depresión grande”, en términos kársticos.

A través de los trabajos de reconocimiento y evaluación, se buscó identificar las amenazas naturales asociadas al contexto geológico y geomorfológico de la comunidad, establecer las causas-efectos de los factores condicionantes y desencadenantes de los asentamientos en las zonas bajas de la comunidad, y proponer alternativas factibles para la correcta gestión y mitigación de las amenazas existentes, evaluando la *zonas críticas* considerando la habitabilidad de la zona afectada por asentamientos e inundaciones.

La denudación y los deslizamientos son fenómenos naturales que se producen debido a condiciones que perturban el equilibrio del sistema natural del terreno. Se llevó a cabo un análisis de las amenazas de origen natural en la comunidad de Chinimlajom, ubicada en el municipio de Cobán, departamento de Alta Verapaz. Durante este estudio, se evaluaron los asentamientos de terreno por karst que han causado daños en la infraestructura del Centro de Convergencia Comunitario, junto con otras amenazas como inundaciones y movimientos de ladera en la comunidad.

Metodología

La metodología empleada abarcó diferentes etapas, por ejemplo, la *revisión de antecedentes* de los principales factores condicionantes y desencadenantes de deslizamientos incluyendo geología, uso del suelo y precipitación, así como la preparación de mapas a través de sistemas de información geográfica.

El contexto geológico de *Chinimlajom* se obtuvo a través del mapa geológico hoja Cobán 2162 III escala 1: 50 000 publicado por el Instituto Geográfico Nacional (1976) en contraste con las observaciones realizadas en campo durante la visita de evaluación.

La generación de curvas topográficas, pendientes y sombras se obtuvo a partir de un levantamiento fotogramétrico utilizando un drone DJI Phantom 4 Pro V2.0. El mapa de pendientes se clasificó con 7

categorías en base a sus grados de pendiente. El mapa geomorfológico se elaboró utilizando las observaciones de campo en contraste con los rasgos evidenciados en el DEM con pixeles de 2.5 cm, y el modelo de sombras. Y, el mapa de uso de suelo se obtuvo a partir de imágenes satelitales Sentinel.

El reconocimiento geológico de campo se realizó el 24 de febrero de 2023, en el que se visitó la comunidad *Chinimlajom* en compañía de miembros del COCODE local. Durante la visita se tomaron datos geológicos, estructurales, observaciones del uso de suelo, evaluación de la infraestructura del centro de convergencia, identificación de amenazas naturales, verificación de factores antrópicos importantes, condiciones hidrológicas e historial de desastres naturales como inundaciones a través de testimonios verbales comunitarios.

Resultados

- Contexto geológico

Calizas cristalinas (Kco2): La caliza es una roca sedimentaria, compuesta fundamentalmente de calcita (mineral) y se forma por medios inorgánicos como resultado de procesos bioquímicos. En el área de Chinimlajom afloran principalmente cuerpos de caliza cristalina, la cual se caracteriza por ser textura gruesa y grado de meteorización que va de I a II.

Estas rocas pertenecen a la Formación Cobán. Existen dos niveles a nivel regional para esta secuencia de rocas sedimentarias, siendo la base de la secuencia compuesta de brechas calcárea, cuyos clastos están compuestos principalmente de caliza cristalina y clastos de calcita de color blanco. La parte superior, puede encontrarse con niveles de caliza cristalina y en otras con calizas con fósiles (packstone). Dichos fósiles dan una edad de la roca principalmente del Cretácico medio a superior.

Suelos café-rojizo (TQs): Dos niveles de suelos son característicos en los alrededores de la ciudad de Cobán. Una proveniente de la meteorización de ceniza volcánica (piroclásticos), los cuales son predominantemente de color marrón amarillento (10 YR 4/6) y textura franco limoso. Donde los materiales parentales están en grado de meteorización menor (II a III), siendo muy porosas y permeables.

Los horizontes inferiores, se consideran predominantemente arcillosos de colores que van entre 10 YR 7/8, Amarillo a 2.5 YR 5/6 Amarillo rojizo. Estos horizontes provienen directamente (suelo residual) de la meteorización de rocas calcáreas (calizas mudstone a cristalinas), ampliamente distribuidas en la comunidad de Chinimlajom (Figura 1).



Figura 1. Afloramiento de roca caliza y suelo residual arcilloso de color amarillo.

- Contexto Geomorfológico y Ambiente Kárstico.

El contexto geomorfológico en donde se ubica la comunidad de Chinimlajom, puede ser clasificada como de tipo kárstico (ambiente kárstico), común dentro de Alta Verapaz y sus cercanías.

Durante la visita realizada el 24 de febrero de 2023, se identificaron distintas geofomas kársticas. Las formas (elementos) del modelado kárstico que se han reconocido presentan escala métrica a centimétrica siendo los siguientes: poljes, simas (siguanes), dolinas y lapiaces. A nivel local podemos decir que Chinimlajom se encuentra dentro de un Polje, conformada por una depresión kárstica alargada en dirección norte-sur, de laderas abruptas. La parte plana o un valle kárstico (polje), rodeada en los costados de dos cerros, nombrados técnicamente como laderas kársticas.

Por gravedad, el agua de escorrentía drena hacia las partes bajas y las dolinas de diferentes diámetros ($\leq 4m$), junto a los siguanes que se han generado por los procesos de disolución y erosión en las partes del valle, se inundan. El polje posee una longitud de $\pm 862.5m$ y ancho $\pm 300m$ y la cota más baja posee 1,275msnm ubicada al norte. Los bordes de la depresión (polje) pueden ser definidas

como lineales, vistas más hacia el oeste e irregulares al este. Siendo esta ladera el sector más activo desde el punto de vista erosivo.

En la comunidad se encontraron dos siguanes (sima kárstica) y un total de nueve dolinas, haciendo énfasis en la ubicada debajo del centro de convergencia (Figura 2), la cual ha generado daños en la infraestructura del inmueble.



Figura 2. Colapso ocurrido durante la depresión tropical Eta e Iota 2020. Afectación del centro de convergencia

La dolina más grande encontrada en la comunidad está ubicada al sur, esta se encuentra a un costado del camino principal (Figura 3). Presenta una forma de embudo; tiene un diámetro en superficie de 13 metros, una profundidad de 8.5 metros y su base de 1.5 metros, identificando marcas de inundación hasta los 2 metros de la base, por lo que se ha cartografiado como una zona susceptible a inundación (Figura 3).



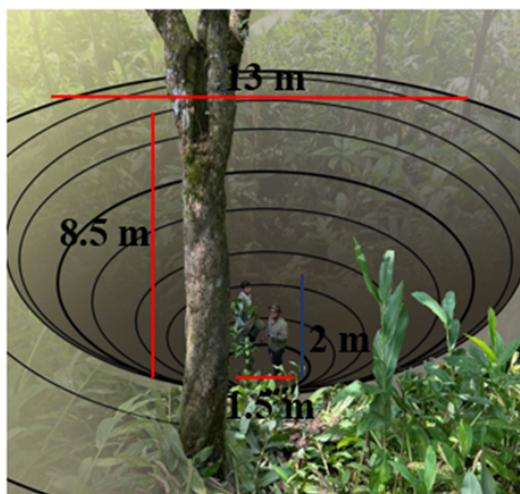


Figura 3. Dolina de mayor dimensión en el área y sus dimensiones.

Otras unidades geomorfológicas identificadas (anexos, mapa geomorfológico) por su forma particular y escala de trabajo, se clasificaron como formas de laderas (cóncava, convexa, plana), así como otros elementos tales como cima kárstica, escarpe kárstico, movimientos de ladera antiguos. Con respecto a estos últimos, son evidentes en la ladera Este de la depresión, donde se encuentra ubicada la comunidad correspondiente a un antiguo deslizamiento y su potencial reactivación podría darse al momento de alterar el ángulo de reposo de la ladera (mapa de amenaza, anexos). Las geoformas de dimensiones < al metro fueron representadas como elementos puntuales.

- Uso del suelo

El uso del suelo del área de Chinimlajom se clasificó en cuatro zonas: boscosa, agrícola, húmeda y poblada o urbana (Figura 4). Siendo la zona boscosa la predominante, las zonas húmedas se encuentran distribuidas en diferentes puntos del área. Así mismo, la zona poblada es muy amplia y suele coincidir con las zonas más húmedas.

El porcentaje forestal es significativamente predominante y juega un papel fundamental en el equilibrio del ecosistema local, ayudando a mitigar la escasez de agua del suelo, además de evitar la erosión.

- Amenazas Naturales dentro del Área Comunidad de Chinimlajom

Se realizó una evaluación del sitio y se han identificado las siguientes amenazas naturales dentro del polígono estudiado.

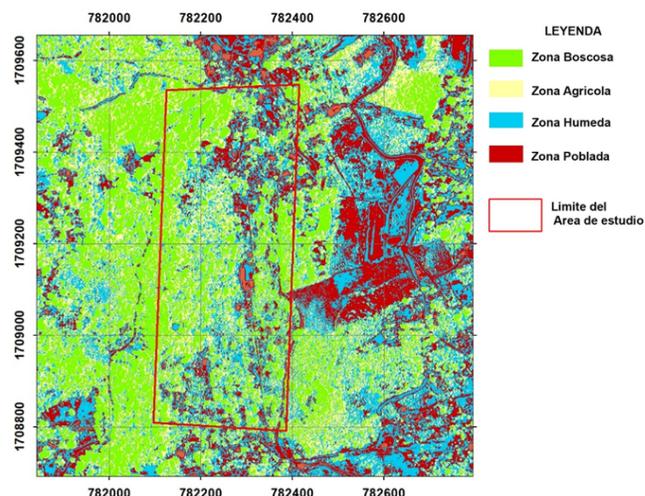


Figura 4. Mapa de uso de suelos correspondiente a la aldea Chinimlajom, en el área de Cobán, Alta Verapaz

a) Movimiento de ladera

Los principales indicadores tomados en cuenta fueron tanto de índole geomorfológica como de evidencias de campo. Desde el punto de vista geomorfológico, las configuraciones que denotan las curvas de nivel ayudaron a ligar dichas formas a lóbulos de movimientos de laderas antiguos, removiendo en parte suelo o roca. Estos sectores son potenciales a generar “deslizamientos” al momento de ser intervenidos por actividades antrópicas.

Las evidencias observadas directamente en campo (Figura 5) corresponden a la ocurrencia de reptación en árboles, presencia de cicatrices y deslizamientos evidentes (movimientos lentos de masa de suelo que se activan por gravedad). Estos por ser de pequeñas dimensiones solo se ubican los sitios de ocurrencia (mapa geomorfológico).



Figura 5. Reptación del terreno (coordenadas E 514034, N 1708118), comunidad Chinimlajom.

En el mapa geomorfológico se identificaron deslizamientos, en dirección Este-Oeste estando influenciados por las pendientes altas del terreno. Por lo tanto, se aconseja evitar la tala de árboles ubicados en pendientes de ladera abruptas y analizar la estabilidad del terreno al momento de realizar construcciones en estas áreas.

En algunos sitios dentro de la comunidad (Figura 06) los efectos son evidentes en las casas, que se encuentran construidas sobre la ladera, exponiéndolas a deslizamientos causados por la sobresaturación de suelo a causa de las precipitaciones pluviales y la infiltración (aguas residuales provenientes de las fosas sépticas ubicadas en las laderas).



Figura 6. Deslizamientos gravitacionales y su impacto en las viviendas, comunidad Chinimlajom.

b) Inundaciones

Debido a la forma del terreno (polje), las aguas pluviales y sobre todo las que se colectan por cada vivienda localizada dentro de la depresión,

aumenta el potencial de la susceptibilidad de inundación por sectores dentro del polje. Esto se acelera frecuentemente según indican los pobladores, en el caso durante las tormentas o huracanes, como por ejemplo Mitch 1998 y muy recientemente (2020) las depresiones tropicales Eta e Iota.

La comunidad de Chinimlajom al igual que otros lugares en Alta Verapaz por el ambiente kárstico que predomina, presentan una red de drenaje específica conocida como “Nido de Golondrina”. Este tipo de red de drenaje es propio de lugares kársticos y tiene la característica que no existe conexión entre los afluentes por lo que el agua se acumula en las dolinas o úvalas, provocando saturaciones e inundaciones, como se observa en el mapa de áreas críticas identificadas (anexos).

Cuando las dolinas, simas son susceptibles a cambios del nivel freático al momento de las fuertes lluvias forman lagunas permanentes o temporales. Siendo una de las amenazas por inundación a las que podría estar expuesta el área de Chinimlajom al momento de un evento de precipitación máxima. Esta evidencia quedó registrada en la casa de madera ubicada en la zona baja del área, la cual fue inundada durante las tormentas tropicales ETA e IOTA, alcanzando una altura de 2.26 metros sobre el suelo (Figura 07).



Figura 7. Casa afectada por inundación debido a la subida del nivel freático, área de Chinimlajom.

c) *Colapso o subsidencia kárstica*

Diversas son las evidencias observadas en el angosto valle kárstico donde se ubica la comunidad, ligadas a la ocurrencia de dolinas de diferentes diámetros. Este proceso de hundimiento o colapso kárstico, se produjo bajo los cimientos del centro de convergencia, provocando el agrietamiento y paulatino colapso de una parte de la infraestructura (Figura 08).

Grietas ocultas por pintura y otras recientes en las paredes, sugiere que estos han estado activos desde mucho tiempo. Durante Eta e Iota, se aceleró grandemente el cual produjo el colapso. Por otra parte, anterior a estos eventos extremos de lluvia, han ocurrido colapsos de menores dimensiones, pero siempre muy cercanos a la infraestructura del centro de convergencia comunitaria (Figura 08).



Figura 8. Colapso por karst y daño a infraestructura dentro del sitio del Centro Convergencia.

d) *Otras amenazas*

En la comunidad Chinimlajom, diversos factores como la topografía inadecuada para el asentamiento comunitario, ha empujado a los habitantes a realizar cortes artificiales en las laderas para acondicionar los sitios de vivienda induciendo inestabilidad de laderas. La falta de servicios básicos genera riesgos de contaminación a las aguas subterráneas (Figura 9).

La necesidad espacio-vivienda en los habitantes de la comunidad y una falta de planificación territorial, ha generado la construcción de fosas sépticas para canalizar las aguas servidas, algunas construidas dentro de los niveles de suelo y otros disponiéndolos directamente hacia estos elementos naturales como son las dolinas.

La cantidad de fosas sépticas existentes en la zona baja del terreno, implica un “riesgo sanitario” considerable ya que además de impacto producida por la infiltración de aguas residuales al endokarst y supone un peligro por caída dentro de ellas, ya que se encuentran al costado del camino principal transcurrido por peatones (Figura 10).

Debido a la carencia de un sistema de drenaje municipal, los pobladores tienen la necesidad de implementar sistemas de desfogues de las aguas servidas, pero en muchos de los casos lo realizan dentro de una dolina (Figura 10) y directamente utilizando un “siguán” (sima). Esto debe considerarse a corto plazo como un proyecto de suma importancia y urgente que se necesita para mejorar las condiciones ambientales y salud de los pobladores o de la comunidad.



Figura 9. Dolina activa utilizada como botadero de basura, marzo del 2023



Figura 10. Fosas sépticas cercanas del centro de convergencia de la comunidad, marzo del 2023

Las dolinas, funcionan como drenajes naturales que conectan al sistema kárstico subterráneo por donde fluyen las aguas. En este caso se observaron varias dolinas rellenas con basura, lo cual impide el drenaje adecuado de la escorrentía proveniente de las laderas provocando inundaciones, o por otra parte terminan siendo focos de contaminación. El conjunto de los factores mencionados se suma a las causas de los problemas (actividad antrópica).

Otro aspecto a considerar que el sistema kárstico, no es un sistema aislado, por lo regular interconectado con otros, y parece ser que Chinimlajom, no escapa a este caso. Por lo que es importante que la contaminación no solo está en este sitio, sino que por su interconexión la contaminación de estos elementos del karst pudiendo afectar a otras muy lejanas.

Una dolina representativa observa, utilizada para drenar el agua de escorrentía, promediando dimensiones de 1 metro de diámetro y 1,5 metros de profundidad (Figura 11). Es común encontrar que las dolinas o sitios con subsidencia se rellenen con suelo, sin embargo, esto no asegura que el terreno sea estable y en cualquier momento la dolina podría colapsar.



Figura 11. Dolina utilizada para el drenado de las aguas pluviales.

Mediante un mapa se exhibe la distribución espacial (Figura 12), de los elementos naturales como antrópicos ubicados en la zona, principalmente identificados en el valle kárstico, al fondo de la depresión topográfica.

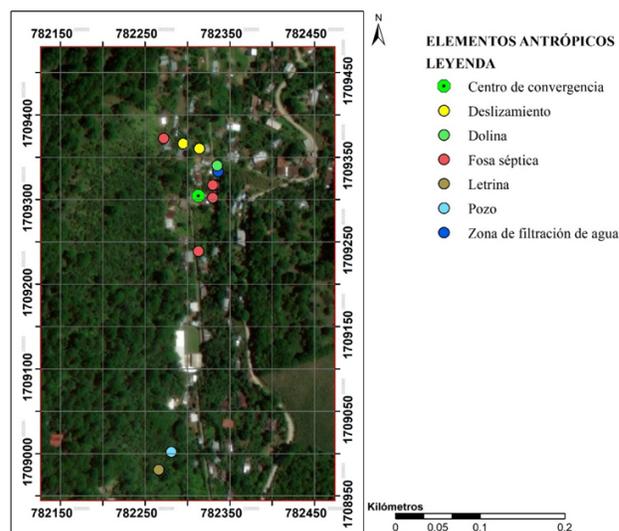


Figura 12. Mapa de distribución espacial de los elementos antrópicos del área.

Discusión

Análisis de la Amenaza

La amenaza natural por subsidencia y deslizamiento amerita una evaluación detallada de condiciones geológicas y factores externos. Dentro de los factores detonantes o desencadenantes esta la precipitación.

Se utilizaron los registros de la estación meteorológica de Cobán para analizar el comportamiento de las precipitaciones pluviales durante el periodo comprendido entre el año 2002 y el año en curso 2023.

La cantidad de precipitación acumulada cuantificada por año, para el área de Cobán, se encuentra en promedio dentro de un rango de 1 500 a 2 800 mm de columna de agua. Sin embargo, durante el año 2020, se registró una precipitación anómala de hasta 3 330 mm de columna de agua, siendo el valor máximo registrado en los últimos veinte años y coincidiendo con las tormentas tropicales ETA e IOTA (Figura 13).

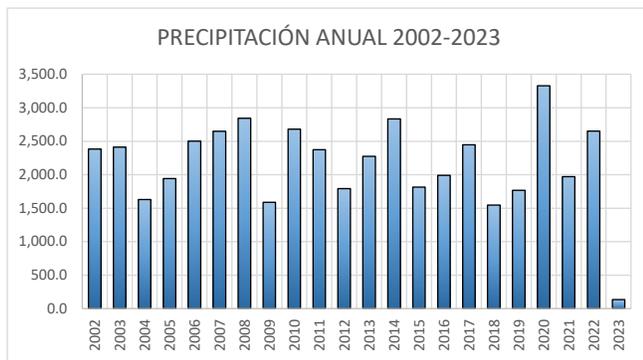


Figura 13. Registro de precipitación acumulada anual durante los últimos 20 años, estación meteorológica Cobán. Evidente contraste del año 2020, durante la ocurrencia de ETA e IOTA.

Durante el año 2020, se observa que las precipitaciones pluviales presentan un comportamiento promedio, sin superar los 450 mm de lámina de agua. Sin embargo, durante el mes de noviembre se obtuvo un registro que duplica el registro promedio mensual a 1 050mm (Figura 14) a causa de la tormenta Eta e Iota.

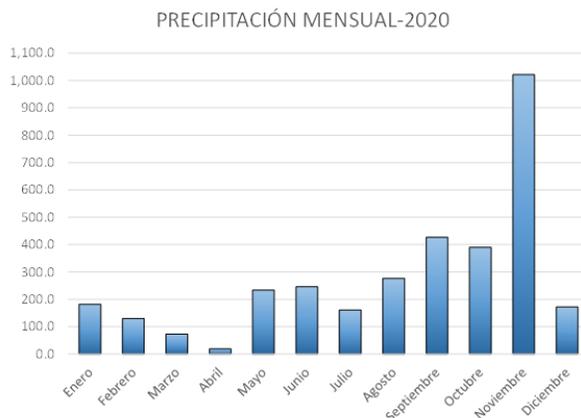


Figura 14. Registro de precipitación mensual durante el año 2020, estación meteorológica Cobán.

En 2021, la precipitación pluvial muestra un comportamiento promedio, destacándose septiembre con los registros más altos. Aunque el máximo no superó los 300 mm, es poco probable que cause saturación del suelo o aumento significativo del nivel freático. Comparando los registros del año 2022, las precipitaciones destacadas, fueron mayores, pero dentro de límites normales, sin superar los 400 mm en septiembre, típicamente el mes más lluvioso.

El diagrama de cajas (Figura 15) es otra herramienta que permite visualizar la variabilidad de la lluvia en Cobán durante los últimos veinte años, indicando en ocasiones excepcionales, una prolongación de la época lluviosa hasta noviembre. Octubre destaca como el mes con la mayor precipitación promedio, mientras que noviembre muestra eventos anómalos y una variabilidad estadística significativa.

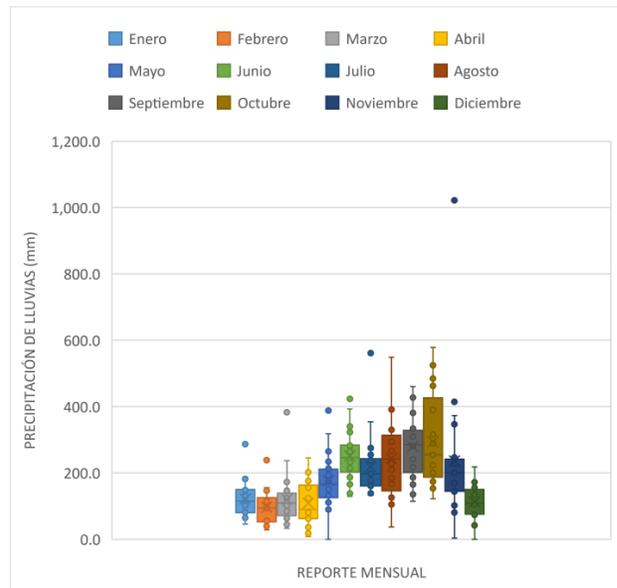


Figura 15. Diagrama de cajas de registros de precipitación mensual durante los últimos 20 años, estación meteorológica Cobán.

Los criterios estadísticos obtenidos a partir de los registros de precipitación mensual durante los últimos 20 años (Tabla 01), reflejan que octubre es el mes donde en promedio ha habido mayor precipitación, sin embargo, en noviembre existe mayor varianza en cuanto a los reportes asociados a eventos de precipitación pluvial máxima.

VARIABLE	MEDIA	MED GEOM	MEDIANA	MINIMO	MAXIMO	RANGO	VARIANZA	DESV ESTANDAR	COEF DE VAR.
ENERO	121.79	111.83	114.80	45.30	286.80	241.50	2866.20	53.54	0.48
FEBRERO	96.09	84.14	94.20	28.30	238.30	210.00	2582.46	50.82	0.60
MARZO	120.20	103.19	109.40	32.60	382.50	349.90	5864.49	76.58	0.74
ABRIL	108.47	85.66	89.90	7.90	245.40	237.50	3936.73	62.74	0.73
MAYO	176.95	173.21	166.10	0.00	388.00	388.00	6910.46	83.13	0.48
JUNIO	250.74	240.30	245.90	129.30	423.00	293.70	5583.83	74.72	0.31
JULIO	218.52	205.33	197.60	133.30	561.10	427.80	8937.01	94.54	0.46
AGOSTO	243.78	211.70	242.20	37.00	548.50	511.50	14287.76	119.53	0.56
SEPTIEMBRE	279.91	263.32	285.20	114.40	460.50	346.10	8806.11	93.84	0.36
OCTUBRE	294.00	266.24	254.80	121.90	577.90	456.00	18972.78	137.74	0.52
NOVIEMBRE	236.46	171.40	200.60	3.70	1021.50	1017.80	41389.99	203.45	1.19
DICIEMBRE	112.52	108.61	108.60	0.00	218.40	218.40	2740.03	52.35	0.48

Tabla 1. Datos estadísticos del registro de precipitación mensual durante los últimos 20 años, estación meteorológica Cobán.

Se extrapolaron los resultados de dos estaciones meteorológicas ubicadas en el municipio de Cobán (Figura 16), los registros sugieren que una acumulación diaria de precipitación cercana a 200 mm puede desencadenar inundaciones y colapsos kársticos en la parte baja del polje. Cabe resaltar que los pobladores observaron acumulación de agua y colapsos kársticos el 5 y 6 de noviembre de 2020 en los puntos mencionados. Este umbral podría ser un punto de inicio para alertas tempranas.

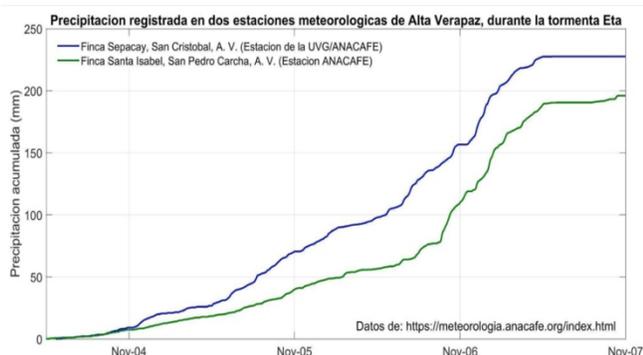


Figura 16. Curvas de precipitación acumulada durante el evento ETA. Red meteorológica de Anacafe y la Universidad del Valle de Guatemala.

Tras identificar la temporada lluviosa, en el municipio Cobán se determinó que septiembre, octubre y noviembre son los meses más frecuentes y extremos, destacando noviembre como el más amenazante para la comunidad debido a factores geológicos y geomorfológicos. La entrada de agua pluvial al sistema de drenaje contribuye a la disolución de rocas y erosión del suelo, generando cavidades. El aumento de lluvias, especialmente en áreas deforestadas sin estabilización, compromete la estabilidad de laderas, causando movimientos de tierra.

Modelado del karst

Se plantea la existencia de cavernas desconocidas en el subsuelo, controladas por estructuras N-S (Figura

17), influenciando la depresión donde se asienta la comunidad. La geometría y dimensiones del sistema endokarst son inciertas y futuros estudios podrían proporcionar más información. Se cree que el agua que se infiltra fluye siguiendo la pendiente natural de sur a norte, aunque no se ha confirmado si el flujo es constante a lo largo del año.

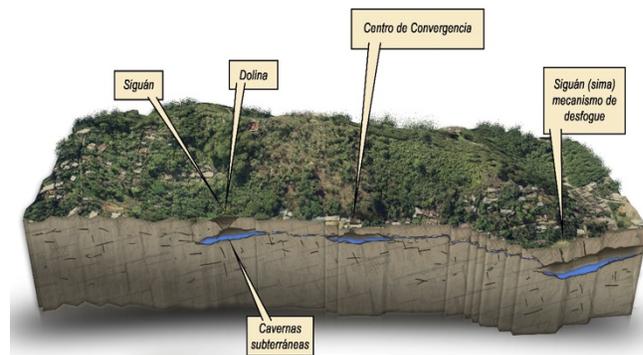


Figura 17. Modelo conceptual que propone la existencia de ductos cavernosos en el subsuelo con dirección N-S, considerando espacialmente los principales elementos kársticos, en referencia al centro de convergencia.

Durante eventos extremos de precipitación como las lluvias ETA e IOTA, se produjeron perturbaciones en el ascenso del nivel freático subterráneo. Este aumento provocó inestabilidad y erosión en las cavernas (Figura 18), induciendo colapsos o subsidencia cuando el nivel freático desciende.

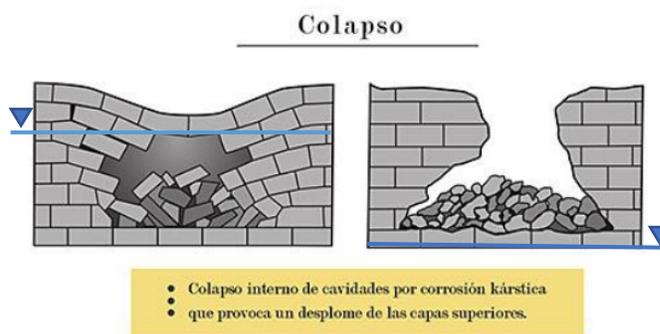


Figura 18. Dolina de colapso. a) ascenso del nivel freático por intensas lluvias, b) colapso por erosión y descenso del nivel freático. (adaptado de Palmer, 2007)

La constante disolución en el endokarst, asociado a la erosión natural durante las lluvias ocasiona que las estructuras kársticas no sean rellenadas. Contaminantes como aguas residuales y detergentes agravarían problemas ambientales, instando a aplicar medidas correctivas y un manejo ambiental integral.

Los resultados de las amenazas naturales pueden resumirse diferenciando entre dos tipos de factores: *condicionantes*, los cuales se refieren a aspectos geológicos y geomorfológicos; y *desencadenantes* o *detonantes*, los cuales son la precipitación y de naturaleza antrópica principalmente (Figura 19).

el nivel freático regional. La disposición inadecuada de agua de lluvia recolectada por las viviendas y la escorrentía natural, debe ser estudiada para evitar problemas de subsidencia e inundación. Aunque la topografía (depresión) puede presentar desafíos, se sugiere establecer una cuota topográfica de ± 1330 metros sobre el nivel del mar para futuras

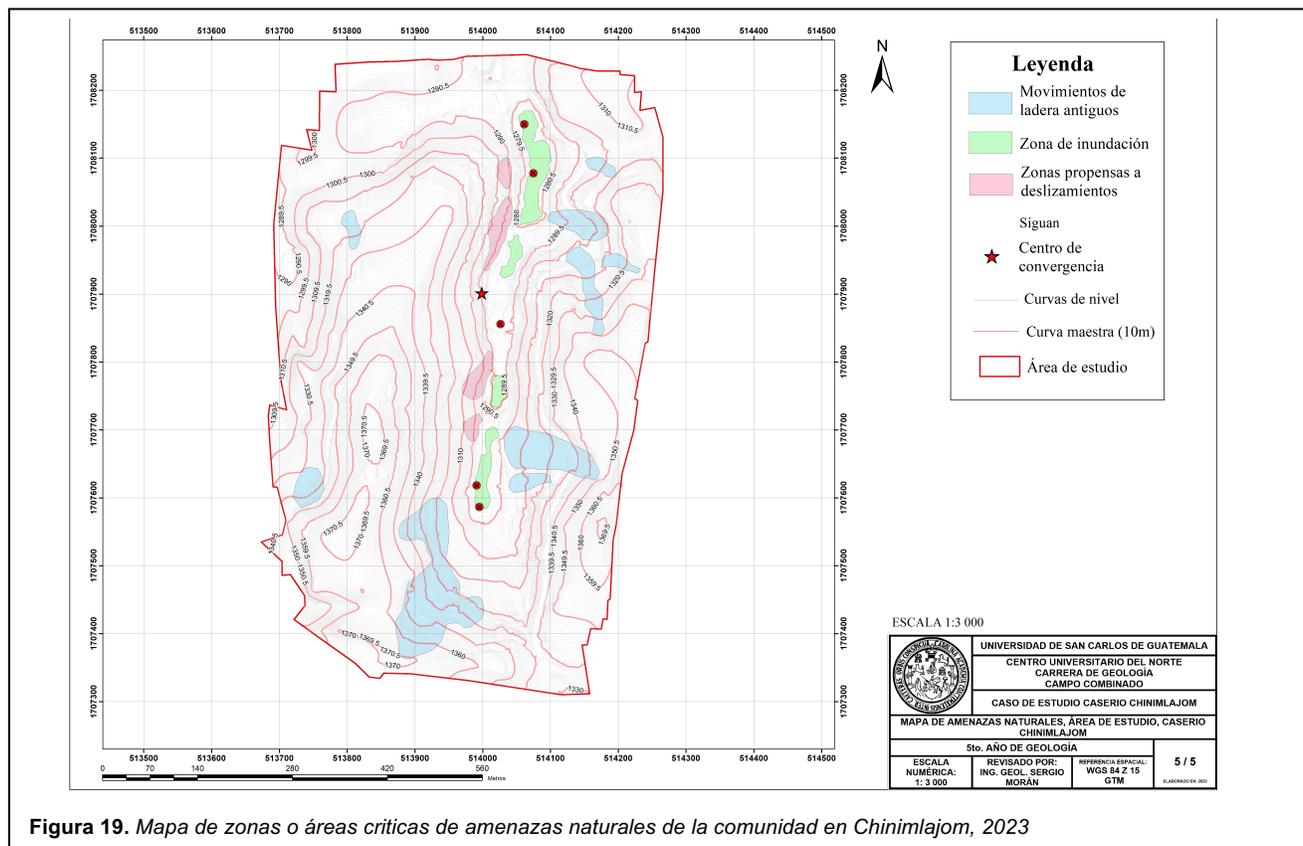


Figura 19. Mapa de zonas o áreas críticas de amenazas naturales de la comunidad en Chinimlajom, 2023

Conclusiones

El karst como proceso natural en rocas calcáreas, es común dentro del área que cubre la comunidad de Chinimlajom, generando geofomas tales como poljes, dolinas y simas (siguanes), elementos muy susceptibles a ser modificados (por relleno) o contaminados (disposición de basura). La comunidad está expuesta a diversas amenazas naturales asociadas al ambiente kárstico como inducidos por la actividad antrópica, reconociendo; movimientos de ladera (ML), Inundación y Colapsos (hundimientos) por karst.

Los fenómenos de subsidencia o colapsos en la zona se desencadenan por factores relacionados con las lluvias extremas, como las registradas por las tormentas tropicales Eta e Iota en 2020, que alteraron

construcciones. Construir por debajo de esta altura puede resultar en problemas de subsidencia, inundación y dificultades para implementar sistemas de drenaje adecuados, como los que enfrentan actualmente las viviendas más bajas.

En un ambiente kárstico, los colapsos son difíciles de corregir debido a procesos naturales de erosión y asentamiento, exacerbados por lluvias intensas. Se sugiere buscar una nueva ubicación para el centro de convergencia, lo cual evitará problemas de subsidencia y daños en la infraestructura y contaminación del agua subterránea. Se recomienda realizar estudios geofísicos para analizar la morfología y dimensiones de los sistemas subterráneos, aspectos no abordados en este estudio.

Se sugiere para las actuales y futuras viviendas, realizar trabajos de estabilidad de taludes debido a las

fuerzas pendientes del terreno, para prevenir movimientos de ladera. Una evaluación rápida de la geomorfología sugiere paleo-deslizamientos (movimientos de ladera) en la depresión donde se localiza la comunidad de Chinimlajom, indicando la necesidad de estudios de ingeniería geológica en esos sitios específicos.

Agradecimientos

Nuestra total gratitud a los comunitarios y principalmente al presidente del COCODE, Ricardo Xol Cuc y Trabajadora social Ingrid Maribel Tun Caal, que participaron y fueron el enlace para que, el acompañamiento de las visitas de campo se realizara sin ningún inconveniente.

Así mismo, el agradecimiento al Ing. Jorge Vargas de la empresa AGEO por el apoyo técnico-científico en el levantamiento topográfico de la comunidad Chinimlajom. Permitiendo visualizar e identificar otros elementos de amenaza, que sin esta herramienta se imposibilitaría estudiarlas, debido al tamaño que tienen.

Referencias

Blair, R.W., 1986, Karst Landforms and Lakes (en línea): NASA, Geomorphology from Space, Chapter 7, <http://disc.gsfc.nasa.gov/geomorphology/>

Barea-Luchena, J., 1995, Geología del Karst desde el punto de vista del espeleólogo: Boletín Espeleológico SECJA, 1, 46-52.

Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, J.A., 2011, Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico: Geomorphology 135, 308-321.

Collado Lara, Ramón. 1992. Depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades. Primera edición. Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. España, Madrid. Vol. 12. pp 9-32.

Patricia Fragoso-Servón, Francisco Bautista, Oscar Frausto y Alberto Pereira (2014). Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. Revista mexicana de ciencias geológicas (Vol. 31),

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742014000100010

<https://despuesdelastormentas.agenciaocote.com/2021/05/06/los-impactos-de-eta-y-iota-en-guatemala-y-sus-implicaciones-sobre-el-riesgo/>

781900

782200

782500

1709500

1709500

1709000

1709000

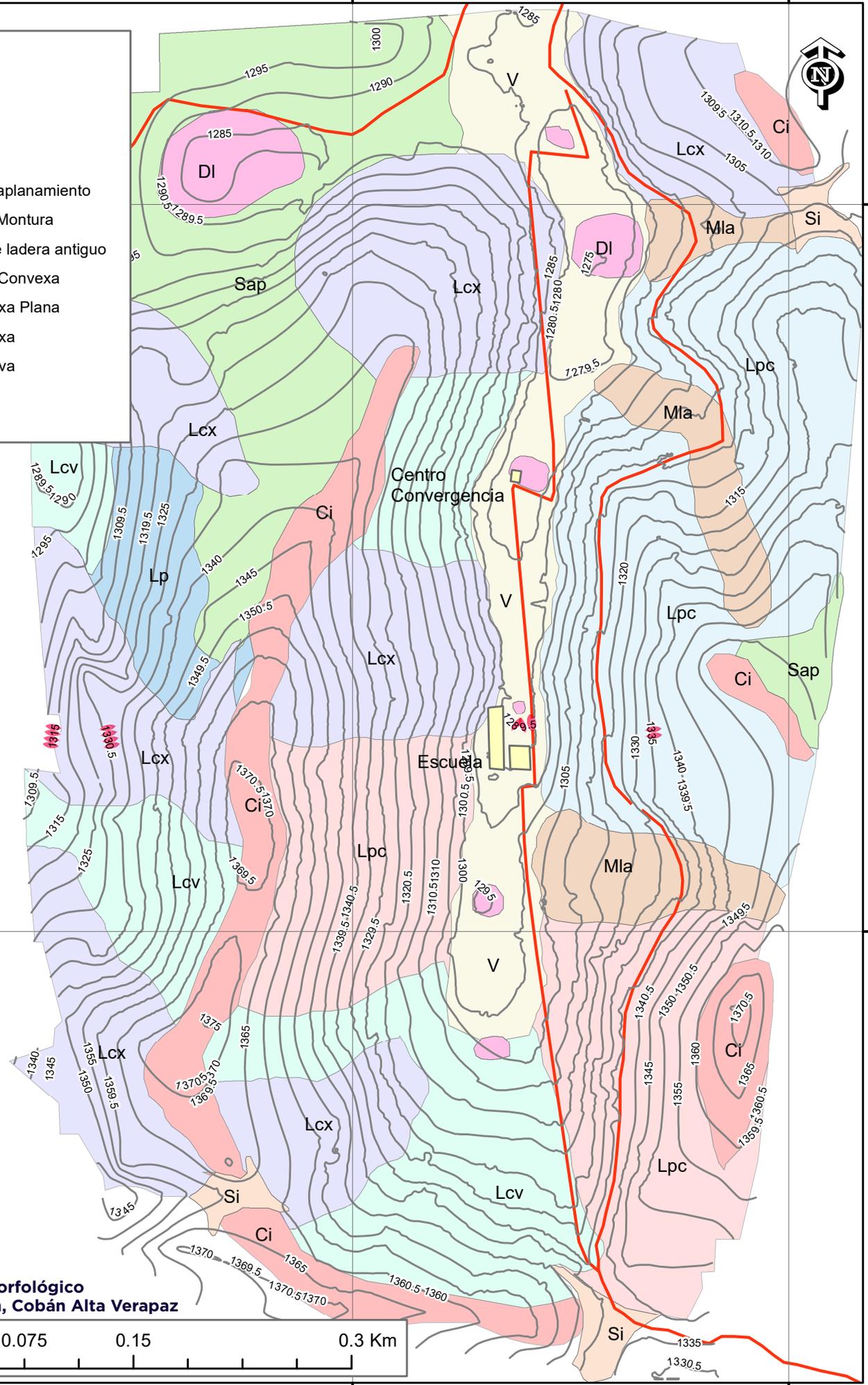
781900

782200

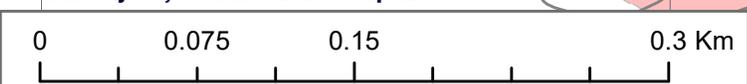
782500

LEYENDA

- Ci Cima
- DI Dolinas
- V Valle
- Sap Superficie de aplanamiento
- Sm Superficie de Montura
- Mla Movimiento de ladera antiguo
- Lpc Ladera Plana Convexa
- Lcp Ladera Convexa Plana
- Lcx Ladera Convexa
- Lcv Ladera Cóncava
- Lp Ladera Plana
- Carretera



**Mapa Geomorfológico
Chinimlajom, Cobán Alta Verapaz**



ANÁLISIS DE LAS SECUENCIAS SÍSMICAS COMO BASE PARA ESTUDIOS DE PELIGRO SÍSMICO PARA LOS AÑOS 2021 Y 2023: CASO DE ESTUDIO DE LOS SITIOS DE CONGUACO Y COMAPA, DEL DEPARTAMENTO DE JUTIAPA, GUATEMALA

ANALYSIS OF SEISMIC SEQUENCES AS A BASIS FOR SEISMIC HAZARD STUDIES FOR THE YEARS 2021 AND 2023: CASE STUDY OF THE CONGUACO AND COMAPA SITES, IN THE DEPARTMENT OF JUTIAPA, GUATEMALA

Brando Leonel Coc Chen ⁽¹⁾, **Irene Almadaly Ligorria Sierra** ⁽¹⁾, **Diego Andrés Castro Rojas**⁽²⁾, **Andrea María Reiche de la Cruz** ⁽¹⁾

Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Carrera de Geología, Finca Sachamach km 210, ruta Las Verapaces, Cobán, Alta Verapaz Guatemala ⁽¹⁾

Coordinador de la Sección de Sismología del Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos de INSIVUMEH, Ciudad Guatemala ⁽²⁾

Email: brandoleonel001@gmail.com, ireneligorria66@gmail.com

RESUMEN

A continuación, se describen los resultados obtenidos a través de la aplicación del método probabilista y la relación de Gutenberg-Richter que permite definir el parámetro “b” el cual determina a través de un valor el posible origen al que se asocia la fuente sísmica perteneciente al enjambre Conguaco 2021 y de la secuencia Comapa 2023. Guatemala se considera un país sísmicamente activo, tomando en cuenta que existe un dominio importante por varios sistemas de fallas que han sido los generadores de eventos tectónicos importantes en nuestro país. Como representación de esta sismicidad constante que se manifiesta en Guatemala específicamente en la zona sísmica denominada G4 en la cual se encuentra incluido el municipio de Conguaco y Comapa en el departamento de Jutiapa los cuales representan dos de las actividades sísmicas asociadas a la falla de Jalpatagua y sus cercanías. En el municipio de Conguaco ocurre una secuencia sísmica especial a partir del día 17 de octubre de 2021 la cual no cumple con la ley de Omori y ha sido catalogada como un enjambre sísmico, mostrando magnitudes bajas menores a 2 ML. Por otra parte, el día 15 de enero de 2023 inicia lo que con base al cumplimiento de la ley de Omori se cataloga como secuencia sísmica Comapa 2023, presentando como característica específica la ocurrencia de un sismo principal seguido de réplicas.

Palabras clave: Conguaco, Comapa, Sismo, Enjambre, Secuencia, Gutenberg-Richter, Valor b.

ABSTRACT

Next, the results obtained through the application of the probabilistic method and the Gutenberg-Richter relationship are described, which allows defining the parameter “b” which determines through a value the possible origin to which the seismic source belonging is associated. to the Conguaco 2021 swarm and the Comapa 2023 sequence. Guatemala is considered a seismically active country, taking into account that there is an important domain of several fault systems that have been the generators of important tectonic events in our country. As a representation of this constant seismicity that is manifested in Guatemala specifically in the G4 zone, which includes the municipality of Conguaco and Comapa in the department of Jutiapa, which represent two of the seismic activities associated with the Jalpatagua fault and its surroundings. In the municipality of Conguaco, seismic activity has occurred since September 18, 2021, which, particularly with non-compliance with the Omori law, is classified as a seismic swarm, showing low magnitudes of less than 2 ML. On the other hand, on January 15, 2023, what is classified as the Comapa 2023 seismic sequence begins, based on compliance with the Omori law, presenting as a specific characteristic the occurrence of a main earthquake followed by aftershocks.

Keywords: Conguaco, Comapa, Earthquake, Swarm, Sequence, Gutenberg-Richter, b value.

Introducción

La investigación es un resumen de dos estudios de investigación realizados en el departamento de Jutiapa, Guatemala, según su temporalidad y ocurrencia; Enjambre sísmico Conguaco 2021 y Secuencia sísmica Comapa 2023.

La investigación se encuentra basada en la sismicidad constante que ocurre en el Departamento de Jutiapa, específicamente en los municipios de Conguaco y Comapa, aunque cabe resaltar que este Departamento perteneciente a la Zona sísmica G4 ha sido zona de estudio contemplando la alta actividad sísmica que ocurre en sus alrededores.

El Enjambre Conguaco 2021 inició el 18 de septiembre, registrándose un total de 1213 sismos en el municipio, con magnitudes que oscilan entre 0.2-3,9 (ML) y profundidades menores a 12 km. Esta sismicidad fue reportada como sensible por varias comunidades de Conguaco, entre ellas la aldea Palo Blanco, San Pedro y El Jute.

La secuencia sísmica Comapa 2023 inició el día 15 de enero de 2023 con el sismo principal el cual fue reportado como sensible por los pobladores del municipio de Comapa, este mismo presentó la magnitud máxima registrada para esta secuencia que corresponde a magnitud local 5,2 ML. Después de la ocurrencia del primer sismo principal inicia la secuencia con 720 réplicas oscilando entre magnitudes de 1,4 a 5,2 y profundidades máximas de 13 km.

Metodología

Se ha adaptado el Método Probabilista propuesto por Cornell (1968), que se basa esencialmente en la adopción de un modelo de zonas sísmogénicas con las que se realiza una compartimentación del área de influencia, y en el ajuste de la sismicidad de cada zona a un modelo de recurrencia, sumando posteriormente la contribución de todas las fuentes sísmicas. Sumado a ello se ha calculado el valor “b” de la relación Gutenberg-Richter para estas regiones y se han estimado mecanismos focales para los

eventos reportados como sensibles a través del método de polaridades y de inversión de onda.

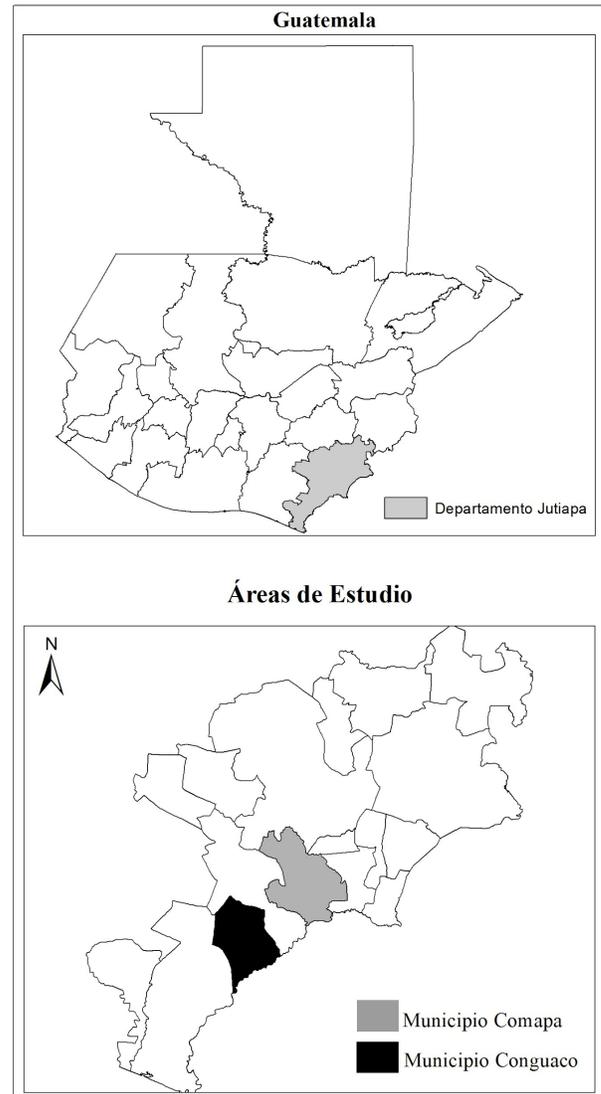


Figura 1. Localización geográfica de áreas de estudio

Resultados

Los resultados del departamento de Jutiapa que se presentan a continuación se describen en base a dos casos. Caso 1: Enjambre sísmico Conguaco 2021, Caso 2: Secuencia sísmica Comapa 2023.

Estudio de caso 1: Enjambre sísmico Conguaco 2021

Para poder realizar dicho estudio fue necesario contar con una base de datos sísmicos. Para ello, INSIVUMEH cuenta con una base de datos denominada “GUA” en la que se albergan todos los sismos registrados desde 1984 hasta la actualidad. De estos, 1343 pertenecen a nuestra región geográfica de interés. Varios de estos datos no pudieron ser utilizados directamente ya que muchos de estos presentaban grandes rangos de incertidumbre en lo que se refiere a la estimación de la localización de los eventos sísmicos, la solución propuesta a tal problema fue filtrar el catálogo por estimación de error.

Antes de filtrar los eventos y para tener un mejor control de los datos se creó una nueva base de datos denominada JCONG en la cual sólo se extrajeron aquellos eventos que fueron registrados entre el 17 de octubre y 18 de diciembre de 2021, que corresponden a la secuencia sísmica, siendo estos un total de 1213 eventos sísmicos.

Relocalización

La relocalización consistió en diferenciar fases emergentes e impulsivas, asignar “pesos” o incertezas (la escala va de 1 a 4, tanto para fases P como para S) agregar estaciones que no hubieran sido utilizadas, quitar estaciones en las que el evento sísmico no se diferenciara del ruido de fondo. Un ejemplo de ello, se muestra en la figura 2.

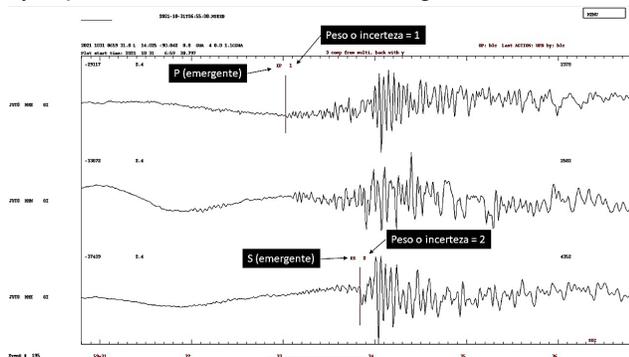


Figura 2. Fases sísmicas emergentes

Sismos sensibles

El registro de actividad sísmica en Conguaco es escasa, anterior al mes de octubre de 2021 se tenía un registro de 122 eventos con una magnitud promedio de 3,0 a 3,5, cabe mencionar que la red sísmica tal como se conoce actualmente empezó a densificarse a partir de 2019 por lo que podría haberse perdido información en años anteriores.

El día 18 de septiembre del año 2021 se da un inicio de aumento en el registro de eventos sísmicos como los primeros indicios de la actividad especial. Esta actividad aumenta el día 17 y el día 26 la población empieza a reportar movimientos en la zona. En la figura 3 se muestra la distribución espacial de los eventos sísmicos no sensibles y los que fueron percibidos por la población.

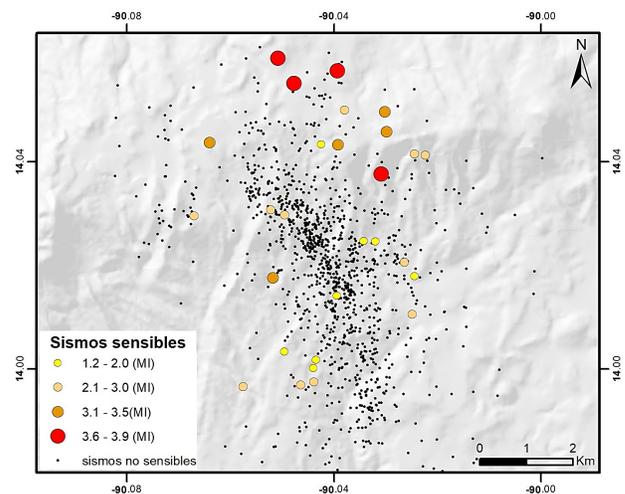


Figura 3. Sismos sensibles

Serie temporal

En la figura 4 se muestra el registro de eventos por día. Se ve un ligero aumento en la actividad el día 18 de septiembre y el día 17 de octubre esta actividad aumenta mucho más. Hay que mencionar que el día 29 se instalaron dos estaciones temporales JUT0 y JUT2 estas empezaron a transmitir a partir de las 21:50 (horario UTC), por lo que en el gráfico puede observarse un aumento en el registro de eventos, el día 30 estas estaciones no transmitieron y el día 31 nuevamente empiezan a transmitir y se agregan dos estaciones más JUT1 y JUT3 por lo que nuevamente

se ve un aumento en el registro de eventos. A partir de esta fecha estas cuatro estaciones continuaron transmitiendo y se desinstalaron el día 18 de diciembre considerando que la actividad había finalizado.

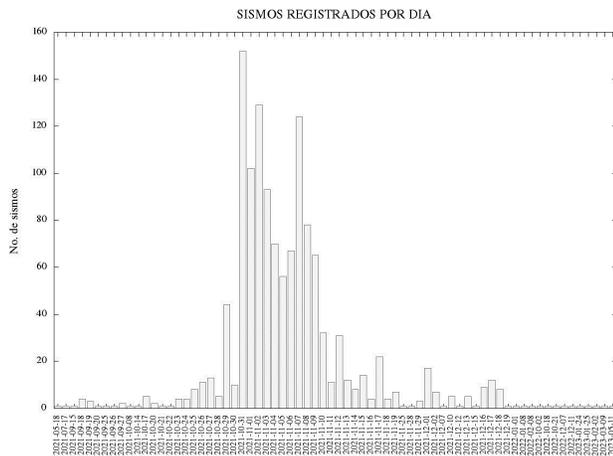


Figura 4. Serie temporal

Magnitud y profundidad

La mayor cantidad de datos registrados se encuentran dentro del rango microsísmico ($M < 2$), que como lo menciona Butcher 2019, este se encuentra por debajo del rango de magnitud típicamente objetivo de las redes nacionales, dichos sismos son muy superficiales y eso hace que sean percibidos por las personas sobre todo aquella población que se encuentre cercana al epicentro, como fue el caso de las aldeas San Pedro, Palo Blanco, El Jute, y Azulco, sin embargo son sismos de baja magnitud debido a la poca profundidad y al corto radio de los mismos.

Modelo de Gutenberg-Richter

A través del modelo de Gutenberg-Richter podemos conocer la relación o proporción que existe entre el número de sismos grandes y pequeños que se generan en una determinada zona sismogénica. Esta relación nos permite además obtener el valor “b” que se discutirá más adelante. Para tal fin se utilizó la base de datos JCONG con los sismos ya relocalizados. La magnitud que se utilizó para hacer el cálculo del modelo fue la magnitud local (ML). Otro aspecto que fue considerado es la completitud del catálogo, puesto que para estimar valores confiables

de “a y b” del modelo de Gutenberg-Richter, estos dependen críticamente de la completitud del catálogo sísmico confeccionado para la región de estudio. En este estudio se ha considerado el ajuste entre los datos y el modelo por medio de un intervalo de completitud, limitado por una magnitud mínima en la que se considera que el 90 % de los eventos sísmicos fueron registrados y una magnitud máxima que se ajuste al modelo, resuelto por mínimos cuadrados.

Para poder obtener el modelo de Gutenberg-Richter se calculó la frecuencia de eventos por magnitud, esto nos permitiría identificar nuestra magnitud mínima de completitud, luego se calculó la frecuencia acumulada que permite mostrar la pérdida de datos teóricos que se tendrían para las magnitudes inferiores a la magnitud de completitud. Luego se calculó el logaritmo de la frecuencia acumulada como lo establece el modelo donde el logaritmo del número acumulativo de sismos varía de forma lineal en función de la magnitud y de esta manera obtener una regresión lineal de los datos que mejor se ajustan. Para ello se utilizó el programa *Gnuplot* el cual hace uso del método de mínimos cuadrados para hacer el ajuste como se muestra en la figura 5.

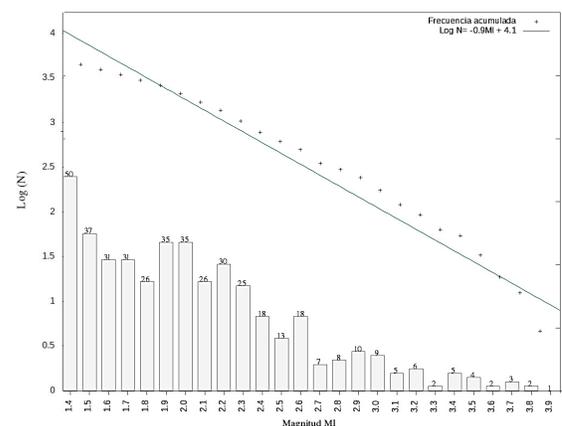


Figura 5. Modelo de Gutenberg-Richter

Al aplicar el método de mínimos cuadrados, se obtuvo la ecuación:

$$\text{Log } N = -9.0 \text{ ML} + 4.1$$

Este procedimiento se realizó utilizando todas las frecuencias de ocurrencia con magnitudes mayores a 1.4, puesto que se considera que está es nuestra

magnitud mínima de completitud. Siendo el coeficiente de correlación de ajuste de los datos, $R^2 = 0.93$.

Mecanismos focales

Se hizo el cálculo de mecanismos focales por medio del método de First Motion a través de los programas FOCME, HASH y FPFIT, estos programas devuelven una solución usando polaridades y/o amplitudes de onda de los sismos como se muestra en la figura 6.

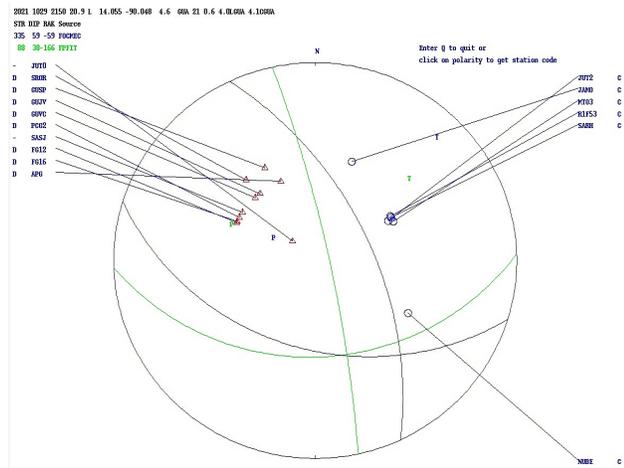
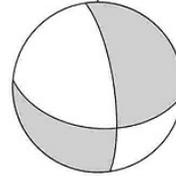


Figura 6. Solución First Motion

Otro de los métodos utilizados para el cálculo de mecanismos focales fue la Inversión de Formas de Onda a través del programa FMNEAR (*Focal Mechanism using Near source seismic records*), el cual estima: la magnitud de momento (M_w), el mecanismo de doble par (rumbo, buzamiento e inclinación) y la distribución del momento sísmico a lo largo del rumbo, lo cual proporciona una estimación de primer orden de la longitud de ruptura y directividad (Delouis, 2014). Este programa ofrece la posibilidad de evaluar el grado de unicidad de la solución y define un índice de confianza que va de 0 a 100 %. Para el caso del sismo del 2021-10-29, 21:50 (UTC), se obtuvo un resultado de buena calidad con un RMS (Root Mean Square) de 0,63 y un índice de calidad de 78 % como se muestra en la figura 7.

Magnitud de momento sísmico:
 M_w 3.93
Strike dip rake
95 50 160



Número de estaciones utilizadas: 7
Calidad de la inversión: **Tipo B**

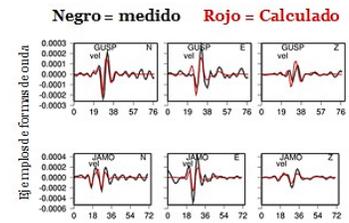


Figura 7. Solución Inversión de formas de onda

Estudio de caso 2: Secuencia sísmica Comapa 2023

Sismos sensibles

Durante el desarrollo de la secuencia sísmica Comapa Jutiapa 2023, se registraron 5 sismos sensibles reportados por la población cercana a los epicentros.

El primer sismo sensible fue el 15 de enero de 2023 a las 17:07 hora local, con una magnitud de 5,2 y profundidad 0,3 km, este evento aparte de ser sensible es el primer evento que se registra para esta secuencia y el evento de mayor magnitud registrado durante la misma.

El segundo sismo sensible fue el 15 de enero de 2023 a las 17:35 hora local, con una magnitud de 3,4 y una profundidad de 5 km, localizado en territorio de El Salvador.

El tercer sismo sensible fue el 15 de enero de 2023 a las 19:54 hora local, con una magnitud de 4.6 y una profundidad de 13,1 km, registrado en el departamento de Jutiapa.

El cuarto sismo sensible fue el 15 de enero de 2023 a las 22:47 hora local, con una magnitud de 4.7 y profundidad de 1,1 km, localizado en el Departamento de Jutiapa.

Finalmente, el último sismo sensible ocurrió el 16 de enero de 2023 a las 05:51 hora local con una magnitud de 3,8 y profundidad de 7,8 km, localizado en el Departamento de Jutiapa, (figura 8).

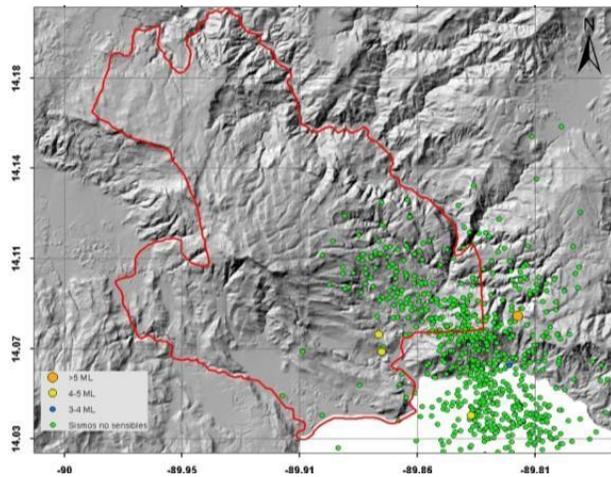


Figura 8. Mapa de sismos sensibles, secuencia Comapa

Modelo Gutenberg Richter

El modelo de Gutenberg-Richter propuesto por ambos en 1944 y 1954 corresponde a un modelo que relaciona la frecuencia de ocurrencia de los sismos con su magnitud. Este ha sido uno de los modelos más utilizados en la sismología para realizar estudios de patrones de sismicidad y leyes de recurrencia en una zona sísmica específica.

Para la aplicación de este modelo se utilizó la base de datos JREV, que contiene los sismos ya relocalizados y filtrados a través del control de calidad establecido al inicio de la investigación. La magnitud utilizada para la aplicación del modelo corresponde a la magnitud local (ML), la cual se basa en los niveles de amplitud máximos alcanzados durante el desarrollo del evento.

La utilización de esta magnitud se debe a que no es correcto utilizar una magnitud coda en estos eventos pertenecientes a enjambres y secuencias sísmicas contemplando que se generan muchos sismos en un lapso muy corto de tiempo lo cual significa una incertidumbre grande para lo que es el cálculo de magnitudes coda (MC), es por ello que al no presentar ningún tipo de saturación en los sismogramas se recurre a utilizar la magnitud local (ML).

Para realizar el cálculo y aplicación del modelo Gutenberg-Richter se realizó el cálculo de la

frecuencia de eventos por magnitud evidenciado en gráficas anteriores, posteriormente se realizó el cálculo de frecuencia acumulada que evidencia la pérdida de datos teóricos que se deberían de contemplar para las magnitudes inferiores a la magnitud de completitud.

Realizado esto se procedió al cálculo del logaritmo de la frecuencia acumulada como se indica en el modelo original, donde el logaritmo del número acumulativo de sismos presenta una variación lineal en función de la magnitud para finalmente obtener una regresión lineal de los datos que se consideran con un mejor ajuste, para ello se utilizó el programa Gnuplot el cual hace uso del método de mínimos cuadrados. A partir de la realización de la relación Gutenberg-Richter y de los valores obtenidos con las siguientes graficas para ambos escenarios en la sismicidad del departamento de Jutiapa, la ecuación que define la relación se encuentra expresada de la siguiente manera (figura 9).

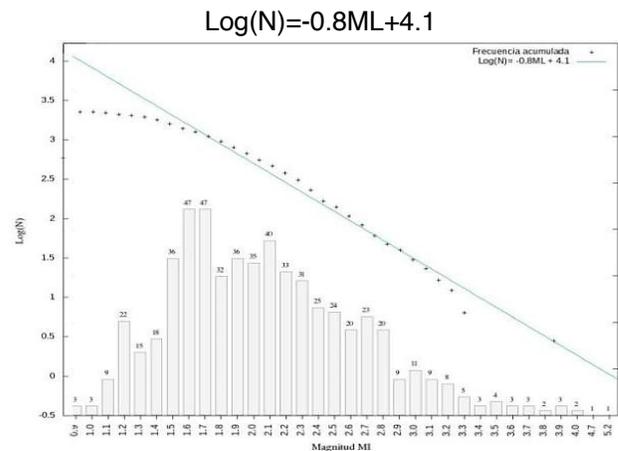


Figura 9. Gráfica de relación Gutenberg Richter

Catálogo sísmico

El catálogo sísmico corresponde al lugar de almacenamiento de los eventos sísmicos que son registrados por la red sísmica nacional (RSN) y diversas colaboraciones.

Los eventos que son almacenados en el catálogo son pasados por un control de calidad establecido en la

sección de sismología de INSIVUMEH, control que ayuda a tener eventos sísmicos con parámetros confiables y verídicos para cada una de las localizaciones que se realizan a diario.

Debido a la secuencia Comapa 2023, se realizó una revisión y comparación entre el catálogo obtenido al inicio de la secuencia y el catálogo revisado con los eventos analizados y relocalizados según el QC, esta comparación y análisis de catálogos conlleva a la realización de graficas que muestran el desarrollo de la secuencia.

Mecanismos focales

Para la investigación realizada en el municipio de Comapa se analizaron y relocalizaron todos los sismos pertenecientes a la secuencia, aplicando un estricto control de calidad en cada evento con la finalidad de tener un catálogo revisado con parámetros acordes a la sismicidad ocurrida en el área.

El sismo principal ocurrió el 15 de enero a las 17:07 hora local, con una profundidad de 0,3 km y magnitud 5,2 local con epicentro en el departamento de Jutiapa, considerado como el primer sismo sensible que destaca en esta secuencia.

A través de las estaciones que conforman la RSN, fue posible la localización manual de este sismo con sus respectivas polaridades en los arribos de la onda P para la determinación del hipocentro y posteriormente la generación del mecanismo focal que describe los planos nodales o posibles planos de falla sísmica generada en dicho evento.

La solución de mecanismo focal obtenida a través de FPFIT del software SEISAN (ver figura 39), se utilizaron 21 polaridades de fase P, emergentes e impulsivas, la solución obtenida con ambas herramientas evidencia que el evento corresponde a una falla de tipo *strike-slip* como se puede observar en la figura 31, solución amarilla. Las fallas inversas son fallas con desplazamiento vertical en donde el bloque de techo se mueve hacia arriba con respecto al bloque de muro (Tarbuck, E., Lutgens, F.). Las fallas inversas ocurren en entornos geológicos en

donde dominan de forma principal los esfuerzos compresivos (figura 10).

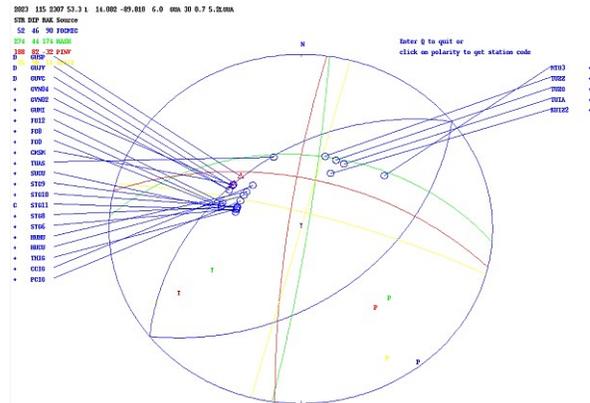


Figura 10. Solución de mecanismo Focal con FPFIT

Otro método utilizado para la realización del mecanismo focal corresponde al software FMNEAR que se basa en la inversión de forma de onda de registros sísmicos de fuente cercana y un modelo lineal de fuente finita. Los parámetros que este software determina son principalmente: la magnitud de momento Mw, el mecanismo focal de doble par (golpe, buzamiento e inclinación) y la distribución de momento sísmico a lo largo del rumbo, que proporciona una estimación de primer orden de la longitud y directividad de la ruptura.

Los resultados obtenidos con FMNEAR corresponden a un 84% de confiabilidad en su solución, RMS de 0,58 y una calidad de inversión tipo A y mostrando un mecanismo de tipo *strike-slip*. Se puede observar el ajuste entre los sismogramas obtenidos (negro) y los sismogramas sintéticos (rojo) para la estación GUSP de la RSN y para MT03 de la red del salvador (figura 11).

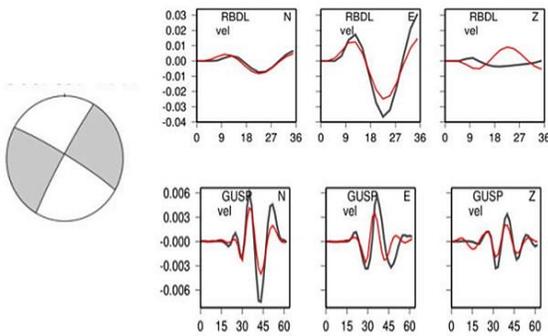


Figura 11. Solución de mecanismo focal con FMNEAR.

Contexto tectónico

Mapa de Sismicidad JREV (IL-JUT-01)

Este mapa contiene la sismicidad localizada en la base de datos JREV, que contiene 721 sismos filtrados y analizados con el QC, sin presentar ningún error en su localización.

Así mismo en este mapa se encuentra localizada la sismicidad histórica a partir del año 2012, que representa todos los eventos sísmicos a la fecha en los alrededores del área, contemplando municipios como Conguaco, Yupiltepeque, Zapotitlán, Jalpatagua y Moyuta ya que esta sismicidad evidencia la constante actividad que se presenta en el departamento de Jutiapa (figura 12).

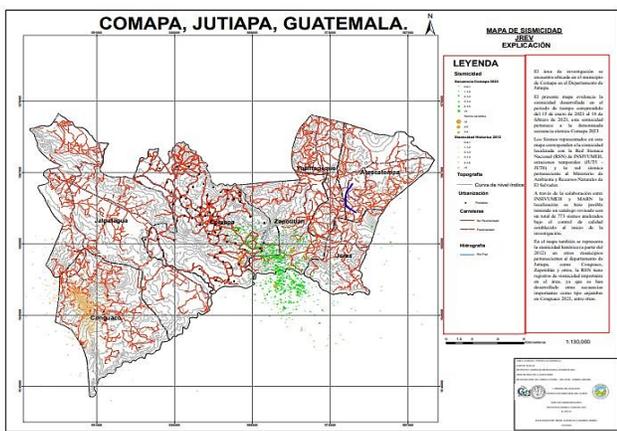


Figura 12. Mapa de sismicidad JREV, secuencia Comapa

Mapa de Sismicidad ICOM2 (IL-JUT-02)

Este mapa contiene la sismicidad localizada en la base de datos ICOM2, que contiene 129 sismos filtrados y analizados con el QC, sin presentar ningún error en su localización.

Así mismo en este mapa se encuentra localizada la sismicidad histórica a partir del año 2012, que representa todos los eventos sísmicos a la fecha en los alrededores del área, contemplando municipios como Conguaco, Yupiltepeque, Zapotitlán, Jalpatagua y Moyuta ya que esta sismicidad evidencia la constante actividad que se presenta en el departamento de Jutiapa (figura 13).

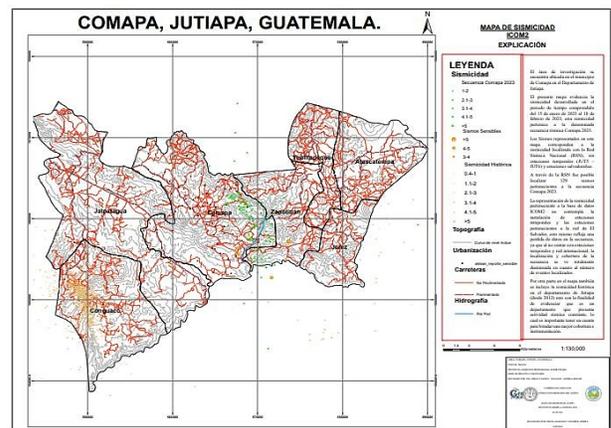


Figura 13. Mapa de sismicidad ICOM2, secuencia Comapa

Mapa de Propuesta de Red Permanente (IL-JUT03)

A través de la propuesta presentada en el mapa JUT-IA-03, se describe que la red sísmica nacional debe ser transformada a una red permanente en el Departamento de Jutiapa, contemplando que la actividad sísmica desarrollada en este Departamento se ha considerado como actividad sísmica relevante para la población Guatemalteca, siendo así la propuesta define que deben ser instaladas permanentemente las siguientes estaciones, basadas en los criterios explicados a continuación y reflejados en el mapa. Se considera que la ampliación de red permanente en el área debe realizarse para que de esta manera se brinde a la población una

mejor cobertura ante las actividades sísmicas que puedan surgir con el tiempo.

La estación JUT1 se encuentra ubicada para monitorear la sismicidad que se ha registrado en el municipio de Comapa y Zapotitlán. La estación JUT2 tiene como finalidad realizar un monitoreo permanente en las cercanías de la traza de la falla Jalpatagua. La estación JUT4 se tiene contemplada para el monitoreo de la actividad sísmica en el municipio de Conguaco y sus alrededores. La estación JUT3 estaría destinada únicamente al monitoreo del área abarcada por el volcán de Moyuta y sus alrededores (figura 14).

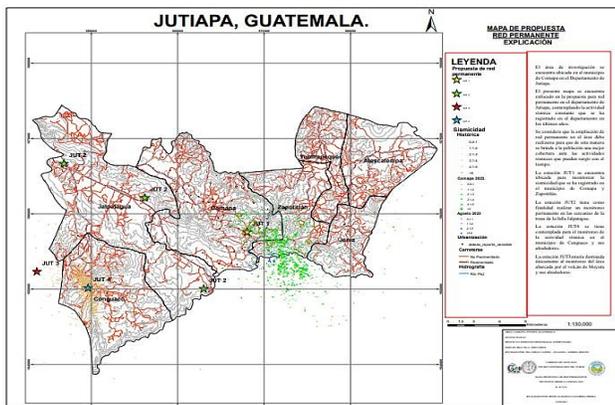


Figura 14. Mapa Propuesta de red permanente en el

Mapa de Mecanismos Focales (IL-JUT-04)

El mapa de mecanismos focales (IL-JUT-04) fue realizado con base a las soluciones obtenidas a través de SEISAN, a través de las polaridades de arribo de onda para cada sismo, considerando que se seleccionaron los sismos que tenían mejor número de arribos, así como también mayor número de polaridades.

En el mapa se puede visualizar que los mecanismos focales no se encuentran todos asociados a un mismo tipo de falla, evidenciando tres agrupaciones, la primera, *strike slip* que corresponde a la solución del sismo principal de magnitud 5,2 y otros, también se observan soluciones que indican una falla inversa y por último la solución que evidencia una falla normal, dicha diferencia entre soluciones y tipos de falla podría estar indicando que la secuencia como tal

estaría bajo la influencia de tres dominios diferentes, agrupándose así en tres posibles fuentes o rasgos tectónicos desiguales en el área (figura 15).

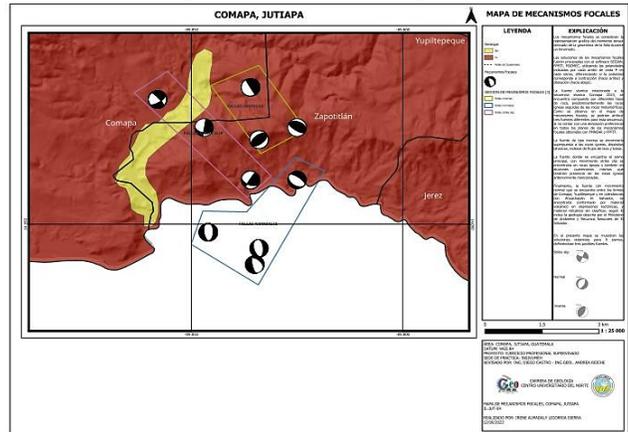


Figura 15. Mapa de mecanismos focales, Comapa 2023.

Discusión de resultados

Caso 1: Enjambre sísmico Conguaco

Uno de los puntos a considerar de importancia es la red sísmica. Para el 2021 las estaciones más cercanas al epicentro de la actividad eran Santa Rosa, Oratorio (SROR) y NUBE (Estación sísmica de El Salvador) aproximadamente a 30 km de distancia respecto a la actividad sísmica, Jutiapa, Montufar (JUMO) este no se pudo considerar en este análisis porque no estuvo transmitiendo. Al ser una actividad de magnitudes muy bajas el registrar eventos se dificulta, puesto que la señal sísmica llega a los sismómetros con mucho “ruido” lo cual dificulta la identificación de fases tanto primarias como secundarias.

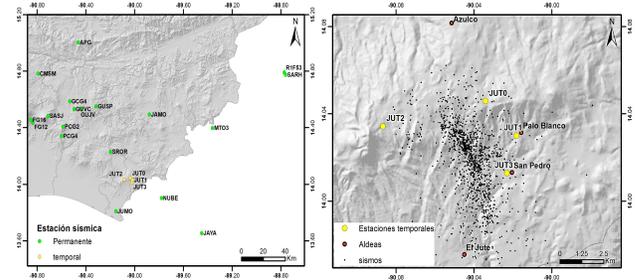


Figura 16. Red sísmica nacional, 2021

Como puede notarse en la figura 17, se hubiese perdido información valiosa si no se instalaban las estaciones temporales, dado que, si se retiran las estaciones JUT0, JUT1, JUT2 y JUT3 del conteo de sismos tan sólo se hubiera obtenido un registro de 159 sismos de los 1 213 que se lograron registrar. Otro punto a resaltar en esta gráfica es que aquellas estaciones más lejanas al epicentro (> 55 km) tuvieron un registro casi nulo de sismos. Esto se debe a que la sismicidad que se desarrolla en el municipio de Conguaco es microsísmica ($M < 2$), por lo que en estaciones lejanas esta actividad ya no se percibe.

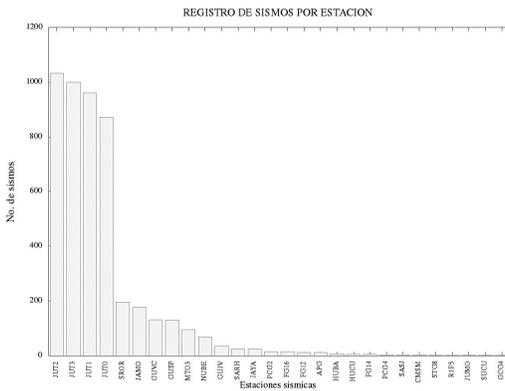


Figura 17. Registro de sismos por estación

Propuesta de instalación de estaciones

Dicho lo anterior resulta necesario que estaciones como JUT3 y JUT2 fueran estaciones permanentes. Aumentarían la sensibilidad de la RSN ante secuencias de bajas magnitudes, por lo que se propone la instalación de tres estaciones permanentes denominadas; Jutiapa, Moyuta (JUMT), Jutiapa, Comapa (JUCO) y Santa Rosa, El Irayol (SREI). La primera estación serviría directamente para monitorear la actividad geotermal del volcán de Moyuta, SREI monitorearía lo que parece ser la actividad de una falla con dirección noroeste-sureste en el municipio de Conguaco, y se complementaría con JUCO y para el monitoreo de la actividad sísmica en el departamento de Santa Rosa y la actual actividad sísmica en el departamento de Comapa. Entre estas estaciones se complementarían con SROR y se podría hacer el registro de sismos con una localización aceptable y continuar con el registro de la actividad.

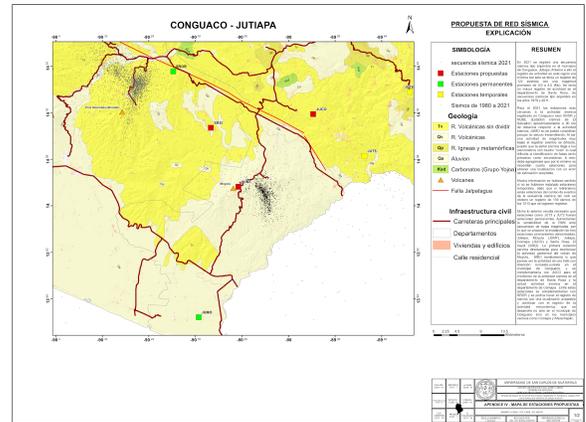


Figura 18. Propuesta de estaciones permanentes

Fuente sísmica

La secuencia sísmica se desarrolló a profundidades muy superficiales. De los 1 213 sismos registrados, 916 sismos se encuentran a una profundidad por debajo de los 2 km. El registro de sismos fue aumentando gradualmente llegando a un punto máximo y luego decreciendo (figura 19).



Figura 19. Serie temporal de la secuencia sísmica

Tomando en cuenta que la mayor frecuencia que se registró se encuentra en un rango de microsismicidad por debajo de magnitud 2 (ML), y que esta secuencia no cumple con la ley de Omori, es decir que el sismo de magnitud 3,9 no fue el sismo detonante del resto de la actividad o, dicho de otra manera, los sismos registrados no son réplicas del sismo de 3,9, puesto

que no muestran un decaimiento exponencial, sino un decaimiento variante. Esta secuencia se cataloga como una secuencia tipo enjambre.

Según Electroconsult (ELC) citado por Goff, Frasser en 1991 en esta área se perforaron dos pozos exploratorios denominados INDE1 e INDE2, estos pozos se encuentran a 7 km de distancia del epicentro de la actividad sísmica en Conguaco y a 4 km de los mecanismos focales calculados. En estos pozos de exploración se reconoció una secuencia gruesa de rocas volcánicas y lahares asociadas a depósitos piroclásticos y rocas sedimentarias del Mioceno. Estas son predominantemente andesitas y andesitas basálticas. Debajo de las rocas volcánicas, afloramientos aislados de calizas, lutitas y granodioritas del Cretácico. Estas rocas presentan una leve alteración hidrotermal pero no se encontraron entradas importantes de fluidos. El basamento está constituido de andesitas, la profundidad estimada de estas rocas es de aproximadamente 1,5 a 2 km. ELC sugiere que existe un reservorio geotérmico de 140 °C a 180 °C a profundidades muy por debajo de 1 km.

Los enjambres sísmicos pueden desarrollarse en ambientes volcánicos y en ambientes tectónicos, sin embargo, para este caso la mayoría de sismos tuvieron lugar en rangos de profundidades de 0,2 a 2 km. Considerando los estudios de ELC citados anteriormente es posible la presencia de fluidos hidrotermales a estas profundidades, sin embargo, no son la fuente principal de la generación de estos sismos. Como se mencionó con anterioridad se calcularon cuatro mecanismos focales con FMNEAR, FOCMEC, FPFIT y HASH los cuales muestran un plano nodal con una dirección aproximada de 117° dirección que coincide con la alineación de la secuencia sísmica con tendencia noroeste-sureste, en vista de planta. Por lo que se propone que esta actividad sísmica fue producto de una falla de rumbo con dirección promedio de 117°, como se muestra en la figura 20.

Tabla 1

Resultados de soluciones de mecanismos focales

Seisan (Focmec, Fpfit, Hash)				FMNEAR		
Plano	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake
2021-10-29 21:50						
1	80	38	-166	95.0	50.0	-159.8
2	335	59	-59	351.7	74.7	-41.8
2021-11-05 16:59						
1	97	66	176	115	75	-165.9
2				21.3	76.4	-15.4
2021-11-05 17:30						
1	117	56	-151	95	90	-130
2	21	68	-61	5	40	0.0
2021-10-28 08:13						
1	325	34	-67	Mala calidad en la inversión de onda		

Nota: El evento del día 28 solo fue calculado con FOCMEC.

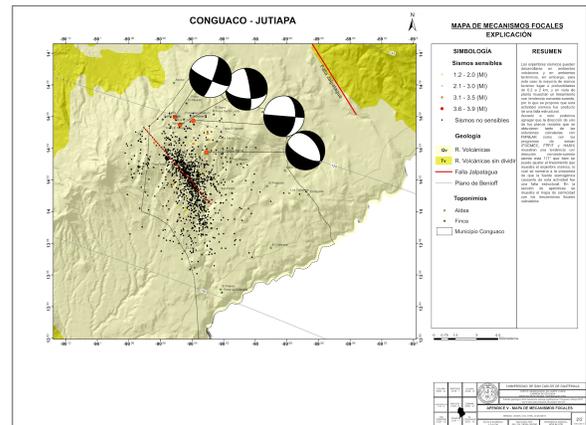


Figura 20. Mapa de mecanismos focales

Un dato más que vale la pena considerar es la pendiente o valor $b = 0,9$, valor que ha sido mencionado en otros trabajos y ha sido atribuido a secuencias sísmicas controladas por ambientes tectónicos (El-Isa, 2013).

Caso 2: Secuencia sísmica Comapa

Propuesta de Red Sísmica Permanente

A lo largo del tiempo la red sísmica nacional (RSN) ha presentado avances y un crecimiento significativo en su posición y cobertura la cual ha sido beneficiosa para el incremento de localizaciones de eventos sísmicos y la completitud del catálogo INSIVUMEH,

sin embargo, esta red se considera aún pequeña contemplando la constante actividad sísmica en el país. Jutiapa es un departamento que en los últimos años ha presentado una actividad constante, como el enjambre de Conguaco, Comapa 2023, la reciente actividad de Comapa-Yupiltepeque iniciada en agosto del 2023, Conguaco 2021 y Aguachapan El Salvador.

Para la actividad sísmica de Comapa la red sísmica nacional estaba integrada por estaciones cercanas a la actividad, como SROR, JAMO, JUAM y estaciones salvadoreñas como LOAL, RBDL, FAME, y otras, las cuales al inicio de la secuencia ayudaron en la cobertura, sin embargo al hablar de una secuencia de este tipo los sismos presentan magnitudes bajas menores a 1 y 2 lo cual contemplando las distancias a las que se encuentran cada una de las estaciones anteriormente mencionadas no es suficiente para obtener una cobertura total, recordando también que se necesita un mínimo de tres estaciones para obtener una localización con niveles de error aceptables.

La instalación de estaciones temporales (JUT5-JUT6) y el intercambio de datos con el MARN de estaciones salvadoreñas (LOAL, RBDL, FAME) fue imprescindible y totalmente beneficioso para la localización de la secuencia Comapa 2023.

Como pudo analizarse en diferentes figuras correspondientes a “Sismos por estación” que permite mostrar la sismicidad por día respecto a cada estación, con la presencia de estaciones temporales indica un total de 721 sismos, lo cual varía respecto a la gráfica que no presenta estaciones temporales ni red salvadoreña, ya que esta grafica refleja 129 sismos localizados, esto evidencia una perdida significativa de datos lo que pone en evidencia que sin la presencia de las estaciones temporales y la red salvadoreña, la localización y cobertura de la secuencia Comapa no hubiese sido posible o se hubiera localizado únicamente una mínima parte de la misma secuencia.

Se habla particularmente de una perdida aproximada al 80% en datos pertenecientes a la secuencia Comapa 2023, contemplando la inexistencia de las estaciones de red temporal y las estaciones

salvadoreñas, la perdida de datos y la cobertura prácticamente nula que se hubiera tenido si sólo se hubiera trabajado con la RSN, es muy poca, es por ello que las gráficas estudiadas ilustran el escenario de la sismicidad en ambos casos, lo cual es muy visible y necesario a tomar en cuenta para el cumplimiento de la propuesta a red permanente de la RSN.

Tomando en cuenta los resultados que evidencian la perdida de sismos sin la presencia de estaciones temporales y red salvadoreña, se evidencia la necesidad de acudir a instalaciones permanentes en el departamento de Jutiapa ya que con los antecedentes sísmicos presentados justifican indudablemente la falta de red en el área.

Comparación de catálogo (JREV-ICOM2)

La base de datos ICOM2 corresponde a una copia realizada a la base de datos JREV, pero en ICOM2 se procedió a eliminar las estaciones temporales (JUT5-JUT6) y las estaciones pertenecientes a la red salvadoreña (LOAL-RBDL-FAME), esto con la finalidad de realizar una comparación entre los catálogos generados por ambas bases de datos y así evidenciar el estado de sismicidad en cada una de ellas.

Las gráficas presentadas muestran una variación entre ambos escenarios de sismicidad, diferenciándose entre sí principalmente por el número de sismos localizados, estaciones utilizadas, ocurrencia de sismos por día, magnitudes utilizadas y otras.

Estas graficas generadas son la representación visual del estado de la sismicidad y su comportamiento a lo largo de la secuencia Comapa en ellas puede reflejarse el aumento de sismicidad registrada y localizada a través de la presencia de las estaciones temporales JUT5 y JUT6, así como también la notoria disminución en la tasa de sismicidad sin la presencia de estas estaciones, reflejándose una disminución aproximada del 80% en los datos obtenidos de esta secuencia.

Análisis de la secuencia sísmica

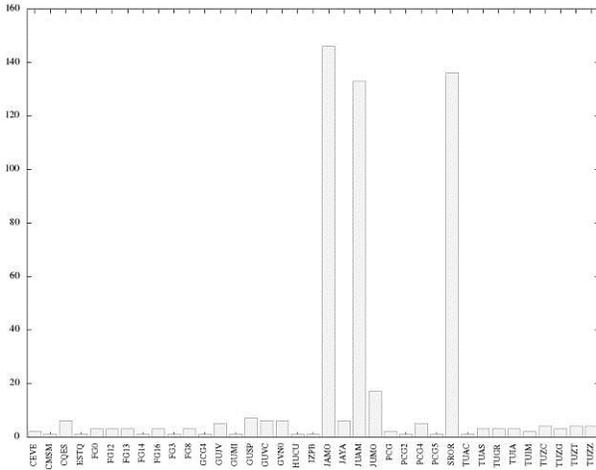


Figura 21. Distribución de sismos por estación

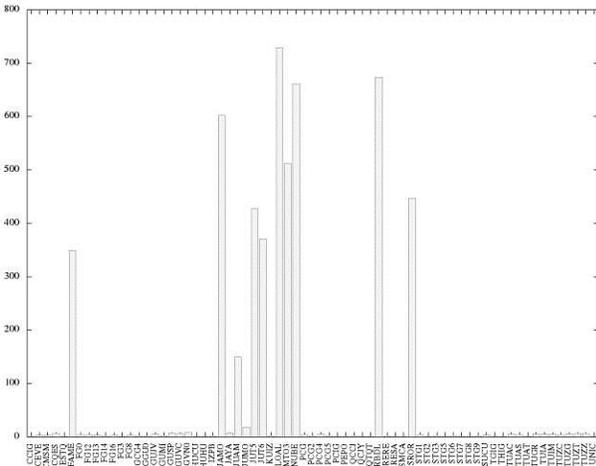


Figura 22. Distribución de sismos sin estaciones temporales

Si la secuencia se hubiera cubierto únicamente con la RSN no se podría mencionar una secuencia tan amplia como lo fue Comapa 2023, ambas entre si no tienen la misma relevancia, la primera fue representada por 129 sismos en un mismo lugar y la segunda permitió definir 721 sismos ocurrentes en una serie de espacio y tiempo, es por ello que las gráficas analizadas para la investigación tomaron en cuenta magnitud vs profundidad, sismos por día y sismos por estación, aspectos considerados de importancia para el análisis de los resultados que permitieron una interpretación de estas graficas.

A partir de los resultados presentados y de acuerdo a la comparación de catálogos, así como el análisis de la fuente de la secuencia sísmica Comapa 2023, se define de la siguiente manera:

Según la clasificación presentada, la secuencia Comapa 2023 corresponde a una secuencia de tipo I, denominada como secuencia de sismo principal-replicas, la cual se cumple en su totalidad debido a la tendencia grafica que muestra y con el cumplimiento de la ley de Bath y la ley de Omori.

Tomando en cuenta los mecanismos focales realizados con FPFIT Y FMNEAR la solución arrojada para el sismo principal de 5,2 ML, corresponde a un tipo de falla strike slip en ambos programas, la solución strike slip se asocia entre sí, aunque se requeriría un estudio más detallado y verificaciones en campo para ver si este dato coincide con algún rasgo visible, como lineamiento de falla, estructuras como diaclasas, entre otras.

Según el trabajo de zonificación realizado por Belén Benito, la zona G5 a la que pertenece el Departamento de Jutiapa, presenta una sismicidad influenciada por valores de b value en rangos de 0.8 a 1, estos serían los valores teóricos esperados para esta zona, también profundidades estimadas menores a los 15 km y representación de esfuerzos menores como lo indica la relación Gutenberg-Richter con los valores estimados de parámetros “a” y “b”.

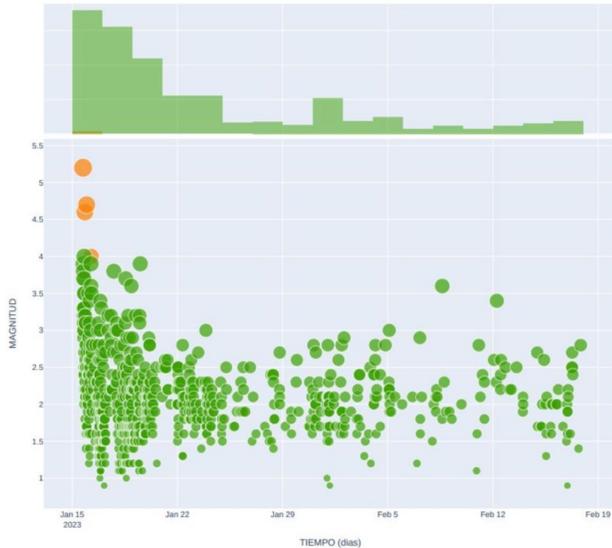


Figura 23. Secuencia sísmica Comapa

Análisis geológico de la fuente

El área de investigación se encuentra dominada en su mayoría por rocas de tipo ígneo y metamórfico, también de sedimentos volcánicos y aluviones, esta distribución puede atribuirse a la cercanía que presenta el área con la actividad volcánica en Guatemala que corresponde al volcán de Moyuta, y por parte de El Salvador en donde se encuentra cerca del complejo volcánico como Chingo, y un poco más distanciado de Santa Ana, Cerro Verde e Izalco.

De manera más específica las rocas predominantes consisten en aluviones pertenecientes al periodo cuaternario, en los cuales se han logrado diferenciar otro tipo de rocas como lahares, tobas, lava entre otros. Por parte de El Salvador se ha diferenciado una geología en esta área un poco menos específica catalogándolos únicamente como material volcánico en depresiones tectónicas, macizos volcánicos y material volcánico no clasificado.

Tectónicamente el área se encuentra influenciada por la falla de Jalpatagua que presenta un movimiento lateral derecho, esta se extiende 150 km entre El Salvador y la caldera de Amatitlán, siguiendo un rumbo N65W. Debido a la actividad de esta falla podría asociarse también el origen de algunas de las

rocas metamórficas que son mencionadas en el mapa geológico de Guatemala a escala 1:250,000.

La fuente sísmica relacionada a la secuencia sísmica Comapa 2023, se encuentra a kilómetros en superficie compuesta por diferentes tipos de roca, predominantemente las rocas ígneas seguidas de las rocas metamórficas. Como se observa en el mapa de mecanismos focales, se podrían atribuir tres fuentes diferentes para esta secuencia, al no contar con una alineación preferencial en todos los planos de los mecanismos focales obtenidos con FMNEAR y FPFIT.

La fuente de falla del movimiento de tipo inversa se encontraría a nivel superficial superpuesta por rocas ígneas, depósitos de lahar, indicios de flujos de lava y tobas.

La fuente de movimiento de falla *strike slip* donde se encuentra el sismo principal, en la superficie del terreno se encontraría compuesto por rocas ígneas y también aluviones cuaternarios mismos que tendrían presencia de las rocas ígneas anteriormente mencionadas.

Finalmente, la fuente con movimiento de falla normal que se encuentra entre los límites de Comapa, Yupiltepeque y en colindancias con Ahuachapán El Salvador, se encontraría conformado por material volcánico en depresiones tectónicas, y material volcánico sin clasificar, según lo indica la geología descrita por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.

Conclusiones

La secuencia sísmica registrada en 2021 en el municipio de Conguaco, se desarrolló principalmente por debajo de 2 km de profundidad. Que en superficie se encuentran conformado por rocas volcánicas y lahares asociadas a depósitos piroclásticos y rocas sedimentarias del Mioceno, predominantemente andesitas y andesitas basálticas.

El valor de la magnitud mínima de completitud calculado fue de 1,4 (ML), que pertenece a la mayor frecuencia de magnitudes. La pendiente o valor b

obtenido del modelo de Gutenberg-Richter fue de 0,9 con una incerteza de $\pm 0,061$ y el intercepto o valor a , es igual 4,1, con un coeficiente de correlación de ajuste de los datos de $R^2 = 0.93$.

La secuencia sísmica registrada en Conguaco 2021, se cataloga como una secuencia de tipo enjambre, esto debido a que; la mayor frecuencia que se registró se encuentra en un rango de microsismicidad por debajo de magnitud 2 (ML), también esta secuencia no cumple con la ley de Omori, es decir que el sismo de magnitud 3.9 no fue el sismo detonante del resto de la actividad y que no muestran un decaimiento exponencial, sino un decaimiento variante en el tiempo.

La tendencia en la pendiente o valor b es negativa con un valor de -0,99. Esto implica que el mecanismo de la actividad sísmica es bastante regular en el tiempo. Una pendiente menor indicaría que se han producido más sismos de magnitud grande, lo cual entre otros factores reflejaría que es un terreno menos frágil donde se acumula más energía de deformación hasta que es liberada produciendo un sismo de gran magnitud. En cambio, una pendiente mayor indica que se produce un mayor número de sismos, pero de magnitud menor, lo cual sugiere que estamos en un ambiente tectónico frágil, por lo que la energía sísmica acumulada se libera con más facilidad.

Considerando los estudios de Electroconsult, es posible la presencia de fluidos hidrotermales en el área de estudio, sin embargo, no son la fuente principal de la generación de la secuencia sísmica. Como se mencionó anteriormente fueron calculados cuatro mecanismos focales con FMNEAR, FOCMEC, FPFIT y HASH los cuales muestran un plano nodal con una dirección aproximada de 117° , dirección que coincide con la alineación de la secuencia sísmica con tendencia noroeste-sureste, en vista de planta. Por lo que se propone que esta actividad sísmica fue producto de una falla de tipo *strike-slip* con una componente normal.

Realizado el estudio geológico de la secuencia Comapa en combinación con la realización del mapa de mecanismos focales se definieron tres posibles áreas que corresponderían a fuentes diferentes para

el origen de la secuencia Comapa 2023; Fuente de falla *strike slip* dominando rocas ígneas y aluviones cuaternarios. Fuente de movimiento tipo Inversa, dominando principalmente lavas, tobas y finalmente la fuente Normal definida en rocas volcánicas en depresiones tectónicas, según la geología de El Salvador.

Según la relación Gutenberg-Richter, los valores obtenidos para “ b ” se encuentran dentro del rango esperado, proponiéndose un valor de “ b ” para esta investigación equivalente a 0,8, lo cual demuestra lo propuesto para la zona G5 a la que pertenece el departamento de Jutiapa.

El valor b , obtenido con la gráfica de relación Gutenberg-Richter evidencia una fuente de origen tectónico y la influencia de esfuerzos menores en el área de investigación, misma que presenta un decaimiento en su representación gráfica por lo cual también se define que la secuencia Comapa 2023, corresponde a una secuencia Tipo I (sismo principal-réplica).

Ante la ocurrencia de la secuencia Comapa 2023 y el enjambre Conguaco 2021 se considera que la RSN en el departamento de Jutiapa debe fortalecerse con una instalación permanente de estaciones como JUT1, JUT2, JUT3 y JUT4 que permitan brindar la cobertura necesaria ante actividades sísmicas especiales como el caso de Comapa, Conguaco, Ahuachapán y otras que puedan surgir a lo largo del tiempo.

Es necesaria la instalación de estaciones permanentes para el monitoreo de la actividad microsísmica tanto en Conguaco como en sus alrededores, por lo que se proponen tres estaciones denominadas; Jutiapa, Moyuta (JUMT), Jutiapa, Comapa (JUCO) y Santa Rosa, El Irayol (SREI).

Agradecimientos

A Dios, por nuestra vida.

Al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH- por la oportunidad de realizar el Ejercicio Profesional Supervisado dentro de sus instalaciones centrales.

Agradecemos especialmente al Ing. Diego Castro y Lic. Robin Yani por su orientación, apoyo, dedicación, conocimientos compartidos a lo largo de este proceso de investigación.

A la Universidad de TULSA, especialmente al Dr. Steve Roche por su apoyo en la divulgación de la investigación en el Departamento de Jutiapa.

A los catedráticos de la carrera de Geología por el tiempo brindado.

Referencias

- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica [AGIES]. (2017). *Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección: Normas de seguridad estructural para la república de Guatemala*. Recuperado el 16 de abril de 2023, de: <https://docplayer.es/84914052-Normas-de-seguridad-estructural-para-la-republica-de-guatemala-nse-2-demandas-estructurales-condiciones-de-sitio-y-niveles-de-proteccion.html>
- Bath, M. (1979). *Introduction to seismology*. San Diego: Birkhäuser Basel
- Benito, B. , Molina, E. , y Laín, L. (2001). *Metodología para estudio de amenaza sísmica en Guatemala: Aplicación al diseño sismorresistente mediante la adopción de un código sísmico*. Recuperado el 08 de abril de 2023, de: https://www.academia.edu/26867521/Metodolog%C3%ADa_Para_Estudio_De_Amenaza_S%C3%ADsmica_en_Guatemala_Aplicaci%C3%B3n_Al_Dise%C3%B1o_Sismorresistente
- Butcher, A. Kendall, J. , y Luckett, R. (2019). *Microseismic Magnitudes: Challenges in Determining the Correct Moment and Operating Regulatory Frameworks*. Recuperado el 18 de julio de 2023, de: https://www.researchgate.net/publication/248804316_Statistics_of_fracture_strength_and_fluid-induced_microseismicity.
- Cornell, A. (1968). *Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the seismological society of America: Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan*. Recuperado el 04 de junio de 2023, de: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjt55.\)\)/reference/referencenbspapers.aspx?referenceid=2289112](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjt55.))/reference/referencenbspapers.aspx?referenceid=2289112).
- Delouis, B. (2014). *FMNEAR: Determination of Focal Mechanism and First Estimate of Rupture Directivity Using Near-Source Records and a Linear Distribution of Point Sources*. Recuperado el 04 de junio de 2023, de: <https://pubs.GeoscienceWorld.org/ssa/bssa/article-abstract/104/3/1479/351507/FMNEAR-Determination-of-Focal-Mechanism-and-First?redirectedFrom=fulltext>.
- El-Isa, H. y Eaton, D. (2013). *Spatiotemporal variations in the b-value of earthquake magnitude-frequency distributions: Classification and causes*. Recuperado el 26 de junio de 2023, de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040195113007063>.
- Garnier, B. Tikoff, B. , Flores, O. , Jicha, B. , DeMets, C. , Cosenza-Murales, B. Hernandez, D. Marroquin, G. , Mixco, L. , y Hernandez, W. (2020). *An integrated structural and GPS study of the Jalpatagua fault, southeastern Guatemala*. Recuperado el 16 de agosto de 2022, de: https://www.researchgate.net/publication/347718568_An_integrated_structural_and_GPS_study_of_the_Jalpatagua_fault_southeastern_Guatemala.
- Goff, F. Adams, A. , Trujillo, P. , Counce, D. , Janik, C. , y Fahlquist, L. (1991). *A re-evaluation of the Moyuta geothermal system, Southern Guatemala*. Recuperado el 15 de agosto de 2022, de: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1089830/citation>



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE



RGCT

REVISTA GUATEMALTECA DE CIENCIAS DE LA TIERRA
ISSN 2410-728X

COBERTURA TEMÁTICA

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, metalogena y yacimientos minerales
- Petrología endógena y sedimentaria
- Geoquímica
- Paleontología
- Sistemas de información geocientífica y cartografía geológica
- Análisis y aplicación de imágenes satelitales en Ciencias de la Tierra
- Inteligencia artificial y modelos predictivos en geología
- 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 es de 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, 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.

NORMAS PARA AUTORES

La Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra publicará artículos originales en español o 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 Arial, *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 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. 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, 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 correo electrónico dirigido a sergiomical@yahoo.com
geologiausac@gmail.com
siggeocunor@gmail.com

El autor de contacto tendrá acuse de recibo y de los pasos del proceso editorial.



*Estamos emocionados de presentar el décimo volumen de la
Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra,
un hito que celebra una década de publicaciones científicas.*

*Queremos expresar nuestra profunda gratitud a **AGRECA**, por su generoso patrocinio,
sin el cual la impresión de este volumen no hubiera sido posible.*

*Su compromiso con la investigación y la colaboración entre la academia y la industria refleja una
visión compartida de un futuro donde la ciencia y la empresa se unen para abordar los desafíos
ambientales y geológicos que enfrentamos como sociedad.*

*Agradecemos a **AGRECA** por ser socios fundamentales en nuestra misión de difundir
el conocimiento científico y esperamos continuar explorando juntos las maravillas de
nuestro planeta en futuras ediciones.*

¡Gracias, por ser parte esencial de nuestro viaje científico!

*Atentamente,
El Equipo Editorial*

Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra -RGCT- Volumen 10

Sumario / Contents

Morfometría preliminar de la cuenca del río Samalá mediante sistema de información geográfica <i>Preliminary morphometry of the Samalá river basin using a geographical information system</i> Vidaurre, D., Godoy, L.	05
Importancia de la integración de métodos geofísicos en estudios hidrogeológicos antes de la perforación <i>Importance of integrating geophysical methods in hydrogeological studies before drilling</i> Arvizu, A.	13
Evaluación del caudal seguro en un pozo de agua <i>Evaluation of the safe yield in a water well</i> Machorro, R.	21
Puntos de interés geológico en la cuenca del lago de Atitlán, Sololá <i>Geosites in the basin of lake Atitlán, Sololá</i> Godoy, L.	39
Análisis geomorfológico local y su relación con las formas del terreno en el campus del Centro Universitario del Norte -CUNOR- Cobán Alta Verapaz, Guatemala <i>Geomorphological analysis and its relationship with the landforms on the campus of the Northern University Center -CUNOR- Cobán Alta Verapaz, Guatemala</i> Morán, S., Portillo, S., Quím M., López, L., Godoy, L.	51
Reconocimiento geológico de colapsos por karst en la comunidad Chinimlajom, Cobán, Alta Verapaz <i>Geological recognition of karst collapses in the Chinimlajom community, Cobán, Alta Verapaz</i> Laj, L., et al.	77
Análisis de las secuencias sísmicas como base para estudios de peligro sísmico para los años 2021 y 2023: Caso de estudio de los sitios de Conguaco y Comapa, del departamento de Jutiapa, Guatemala <i>Analysis of seismic sequences as a basis for seismic hazard studies for the years 2021 and 2023: Case study of the Conguaco and Comapa sites, in the department of Jutiapa, Guatemala.</i> Coc, B., Ligorria, I., Castro, D., Reiche, A.	89

ISSN 2410-728X

