

USO DE IMÁGENES LÍDAR EN EL ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD DE LA RED VIAL NACIONAL, CASO DE ESTUDIO RUTA Nº 126

Paulo Ruiz Cubillo¹, Gerardo J. Soto² y Roy Barrantes³

1: LANAMME, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, tel. 2511-4015, paulo.ruizcubillo@ucr.ac.cr

2: Terra Cognita Consultores S.A., Costa Rica, tel. 8369-3126, katomirodriguez@yahoo.com

3: LANAMME, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, tel. 2511-2507, roy.barrantes@ucr.ac.cr

Resumen

En el presente trabajo mostramos cómo con imágenes aéreas lidar y con programas de *software* amigables con el usuario se pueden generar insumos importantes para realizar una evaluación completa y detallada de la vulnerabilidad de los actuales sistemas de transporte y comunicación del país. Mostramos el caso específico de la Ruta Nacional 126 (RN 126), que fue afectada por el Terremoto de Cinchona del 8 de enero del 2009 (magnitud M_w 6,2; profundidad de 4,5 km; aceleraciones máximas de 0,67 g e intensidades máximas MMI de IX-VIII). Este evento sísmico fue generado por la falla local Ángel, localizada en el flanco este del macizo del volcán Poás. Entre los efectos más importantes que generó, están 30 muertes (29 por deslizamientos), US\$100 millones en daños en infraestructura, y la generación de aproximadamente 5000 deslizamientos en todo el edificio volcánico (RSN, 2009; Ruiz, 2012).

Una de las obras civiles que más se vio afectada directamente por el Terremoto de Cinchona y por fenómenos asociados a este, fue la RN 126, específicamente en el tramo entre el sector de Varablanca y San Miguel de Sarapiquí, donde ocurrieron agrietamientos en la vía, hundimientos, deslizamientos y colapso de puentes por flujos de lodo y detritos (Méndez et al., 2009). Los efectos secundarios del terremoto continúan dándose aún varios años después del evento y estos han seguido afectando la vía. El último caso registrado fue el colapso del puente adyacente a la Catarata de La Paz en setiembre del 2013, por un flujo torrencial.

Para el presente trabajo se revisaron detalladamente cada una de las imágenes lidar y ortofotografías que incluyeran la RN 126. Estas imágenes fueron adquiridas por el ICE y la CNE en abril del 2009 y en ellas se pueden observar detalles como árboles, bloques y otros elementos que podrían ser potenciales causas de bloqueos y obstrucciones en quebradas y ríos de la zona.

Utilizando la información lidar se aplicó el modelo de susceptibilidad al deslizamiento propuesto por Ruiz (2012), para la zona del corredor de la RN 126. El modelo de susceptibilidad aplicado toma en cuenta un catálogo de más de 5000 deslizamientos disparados por el Terremoto de Cinchona, la geología de las diferentes unidades de la zona, la pendiente de las laderas montañosas, el contenido de humedad y utiliza la atenuación de la aceleración máxima causada por un sismo específico como el disparador de los deslizamientos.

Los resultados obtenidos muestran que las zonas más susceptibles a tener deslizamientos en el área de estudio están relacionadas con las unidades geológicas más antiguas del volcán Poás, y zonas donde la pendiente es superior a los 30°. Hay varios tramos de la RN 126 que están ubicados en zonas donde se combinan estas dos características, por lo que son los tramos más propensos a deslizarse en caso de un nuevo sismo.

En los flancos del volcán Poás, después de un evento sísmico tan importante como lo fue el Terremoto de Cinchona, las microcuencas, taludes y laderas quedaron desestabilizados por los miles de deslizamientos que se generaron por el sismo. En ellas se acumulan gran cantidad de materiales sueltos que pueden generar nuevos deslizamientos y represamiento de los cauces, además en condiciones de lluvias torrenciales se pueden originar aludes torrenciales con altas concentraciones de sedimento que pueden exceder los caudales máximos normales y por lo tanto la capacidad hidráulica de la sección transversal de los puentes. Estas laderas volcánicas tardarán varias décadas en volver a un equilibrio y regenerarse con vegetación hasta que se vuelva a dar un evento sísmico y se repita de nuevo el ciclo.

Es muy probable que durante los siguientes años las microcuencas en el volcán Poás sigan presentando eventos de aludes torrenciales hasta que se logren equilibrar sus laderas. También es muy probable que en el lapso de algunas décadas la zona del Poás vuelva a experimentar un evento sísmico importante, como ha sido frecuente desde fines del siglo XVIII, al menos.

Con base en la revisión detallada de las imágenes lidar del 2009 sobre el corredor de la RN 126, el modelo de susceptibilidad al deslizamiento generado para diferentes posibles terremotos y sus efectos en el sector este del volcán Poás, además de un sobrevuelo realizado en helicóptero en setiembre del 2013 sobre la zona, concluimos que existen zonas de la RN 126 y específicamente en el sitio del puente de la Catarata de la Paz, que son muy susceptibles a tener deslizamientos, caídas de bloques y flujos de lodo que pueden afectar directamente la vía y los puentes. Por estas razones y pese a todos los trabajos realizados en los taludes entre 2009-2010, la nueva instalación de un puente tipo Bailey en la Catarata de la Paz y las diferentes acciones de remediación que se han tomado en este sector, consideramos que se ha reconstruido la vulnerabilidad de la RN 126.

Los factores anteriormente expuestos, aunados con estudios socioeconómicos, se tienen que tomar en cuenta para considerar el futuro de esta ruta, y eventualmente retomar el proyecto de la construcción de una nueva vía sobre el volcán Barva como en algún momento se propuso. Mientras tanto, se recomiendan adoptar medidas de monitoreo con cámaras de video, estaciones meteorológicas y sensores en los taludes y las zonas más susceptibles, así como cierres controlados en la estación lluviosa para evitar más tragedias.

Introducción

La palabra lidar proviene del acrónimo en inglés de *Laser Imaging Detection and Ranging*, y en español se podría expresar como “detección de imágenes por láser y distancia”. Se trata de una tecnología de sensores remotos utilizada entre otras cosas para cartografiar superficies extensas cuando es aerotransportado, o aéreas pequeñas cuando se usa en tierra. Existe desde hace varias décadas, pero ha sido en los últimos

años que, al complementarse con otras tecnologías (GPS, microprocesadores, fotografía digital de gran formato, y software más amigable), que ha evolucionado hasta el punto de poder generar modelos de elevación digital (MED) con niveles de detalle y resolución de unos cuantos centímetros y hasta milímetros.

El fundamento de la tecnología lidar -como su nombre lo expresa- está en medir distancias iluminando un objetivo con un rayo láser y posteriormente analizar la luz reflejada e información generada en ese objetivo. Cada dato o punto generado con lidar, por sí solo no tiene mucha utilidad, mas al unir los millones de puntos generados a partir de un barrido con un escáner lidar en un área específica, se pueden recrear superficies en tres dimensiones con excelente precisión y detalle.

Esta tecnología inicialmente tuvo muy pocas aplicaciones y estuvo restringida a los campos de la milicia y la meteorología. Actualmente se utiliza en campos como geología, geomorfología, ingenierías civil y forestal, arqueología, hidrología y arquitectura, entre otros. A pesar de la apertura de esta tecnología en otros campos, los costos económicos que implican su adquisición y uso, siguen siendo bastante altos y son una limitante, especialmente para países en vías de desarrollo, donde su uso práctico enfocado en proyectos para disminuir el riesgo y la vulnerabilidad podría ser clave.

Recientemente, se han dado casos donde entidades internacionales como el Banco Mundial, han facilitado la implementación de esta tecnología para ayudar a tomar decisiones que reduzcan el riesgo y vulnerabilidad en países con pocos recursos. Por ejemplo, para los planes de reconstrucción de Haití después del Terremoto de Puerto Príncipe (7,2; 12/01/2010), se utilizaron imágenes lidar para determinar las zonas más susceptibles a tener deslizamientos disparados por exceso de lluvia y movimientos sísmicos (Mora et al., 2012).

La tecnología lidar se utilizó por primera vez en territorio costarricense en los años 1984-85, cuando un grupo de arqueólogos de la Universidad de Colorado y científicos de la NASA usaron imágenes aéreas de este tipo en la zona del volcán Arenal para estudiar asentamientos precolombinos. En ese caso, también se incluyeron imágenes infrarrojas y de radar para medir distancias. La implementación de la tecnología lidar resultó vital para esa investigación arqueológica debido a su capacidad de poder penetrar la densa selva y ver la superficie del terreno, dando como resultado que se pudieran detectar numerosas anomalías lineales en la topografía, que posteriormente fueron confirmadas en el campo, como trillos y senderos que comunicaban asentamientos precolombinos. Estos asentamientos fueron construidos por los habitantes de la zona del volcán Arenal hace más de 4000 años (Sheets & Serve 1988, Sheets et. al 1991). Se puede decir que estos trillos y senderos en medio del bosque húmedo, fueron varios de los primeros sistemas de transporte y comunicación de Costa Rica.

Las experiencias más recientes con lidar aéreo en Costa Rica fueron motivadas al igual que en Haití por los efectos de un terremoto (Cinchona, M_w 6,2; 01/08/2009; Figura 1), y abrió la puerta para que instituciones como la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) continuaran haciendo estudios de este tipo en diferentes zonas del país. En el año 2010, LanammeUCR adquirió un escáner lidar terrestre

para evaluar deslizamientos, taludes y otros elementos que puedan afectar la red vial nacional. Además, se han explorado aplicaciones en el campo de la arqueología y la restauración patrimonial. En el presente trabajo, se presenta una aplicación de lidar aéreo en la zona del flanco este del volcán Poás, por donde atraviesa parte de la Ruta Nacional N° 126 (RN 126), en el tramo entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí.

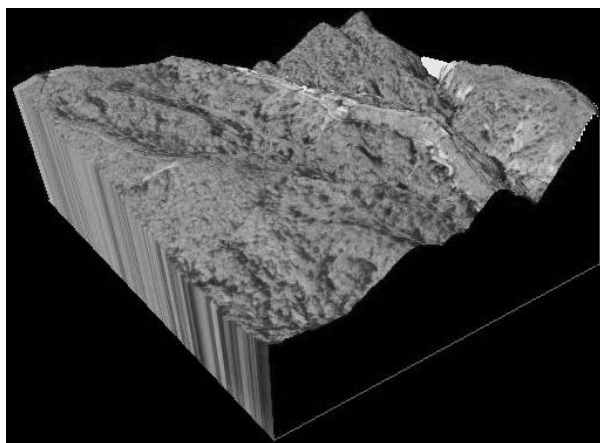


Figura 1.- Modelo de elevación digital generado con información lidar en la sección de la RN126.

Objetivo: El objetivo principal de este trabajo es mostrar cómo con imágenes lidar aéreas y terrestres se pueden generar insumos importantes para realizar una evaluación más completa y detallada de la vulnerabilidad de la Red Vial Nacional. Se muestra el caso específico, de la aplicación de este tipo de imágenes para la aplicación de un modelo de susceptibilidad al deslizamiento en la RN 126 que fue afectada por el Terremoto de Cinchona en enero del 2009.

Metodología: Para la aplicación del modelo de susceptibilidad al deslizamiento en la RN 126, se siguió la metodología planteada en Ruiz (2012).

Para el análisis del sector del puente de la Catarata La Paz, se revisó detalladamente cada una de las imágenes lidar y ortofotografías de la zona. Estas imágenes fueron adquiridas por el ICE y la CNE entre marzo y abril del 2009 y en ellas se pueden observar detalles como árboles, bloques y otros elementos que podrían ser potenciales causas de bloqueos y obstrucciones en quebradas y ríos de la zona que atraviesan la carretera. Estas observaciones, se corroboraron con un sobrevuelo en helicóptero realizado sobre la zona en setiembre del 2013.

Modelo de susceptibilidad al deslizamiento

El modelo de susceptibilidad al deslizamiento de Ruiz (2012) toma en cuenta cuatro elementos: 1) Susceptibilidad litológica (S_l), 2) Susceptibilidad por pendiente (S_p), 3) Susceptibilidad por contenido de humedad (S_h) y 4) El evento disparador de los deslizamientos (T_d), que en este caso toma el valor de la atenuación de la aceleración máxima del suelo (PGA) producida por un terremoto.

Para obtener el valor de cada uno de estos cuatro elementos, se

realizaron diferentes procedimientos.

El valor de susceptibilidad litológica (S_l), está basado en un análisis estadístico de un catálogo de más de 5000 deslizamientos disparados por el Terremoto de Cinchona y las características litológicas de las diferentes unidades geológicas definidas en la zona por Ruiz et al. (2010). El catálogo de deslizamientos fue generado mediante la utilización de las imágenes lidar (Ruiz, 2012).

El parámetro de la susceptibilidad por pendiente de las laderas montañosas (S_p) está basado en las siete clases de pendiente de Zuidam (1986) (0; 0,1-4°; 4-8°; 8-16°; 16-35°; 35-55° y >55°) a las cuales se les asignó un peso de entre 0 y 6 según la clasificación correspondiente de Mora et al. (2002).

La susceptibilidad por el contenido de humedad (S_h) se obtuvo a partir de un balance hídrico general siguiendo la metodología propuesta por Mora et al. (1992). Este se realizó con base en la información de mm de lluvia por mes, de las estaciones meteorológicas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) ubicadas alrededor de todo el volcán Poás.

Para el parámetro de disparador de deslizamientos (T_d), el modelo propuesto por Ruiz (2012) utiliza una combinación entre la fórmula de atenuación de aceleración máxima para sismos someros de Schmidt (2010) y la fórmula para transformar los valores de PGA a Intensidad Mercalli Modificada de Linkimer (2008), con la ventaja sobre otros modelos de susceptibilidad, que este se puede aplicar a diferentes sismos someros con diferentes características en ubicación, profundidad y magnitud. Al valor obtenido se le realizó una conversión para asignar un peso entre 1-7 según los valores asignados por Mora et al. (2002).

Finalmente para obtener el valor de susceptibilidad al deslizamiento (H), se multiplican todos los parámetros antes descritos mediante programas de información geográfica y se generan mapas que muestran los resultados.

$$H = (S_l) * (S_p) * (S_h) * (T_d) [1]$$

Los diferentes valores obtenidos son clasificados en cinco clases que indican la susceptibilidad del sitio evaluado a generar deslizamientos en caso de sismo. Las clases utilizadas son: muy alta, alta, moderada baja y muy baja.

Para el presente estudio se evaluó la susceptibilidad al deslizamiento del flanco este del Volcán Poás (corredor de la RN 126), con base en los datos sísmicos generados por los terremotos de Cinchona (2009), Sarchí (1912) y un hipotético evento que podría llegar ocurrir cerca de Colonia del Toro.

El Terremoto de Cinchona y otros eventos en la zona: Dentro del edificio volcánico del Poás han ocurrido al menos seis terremotos históricos en los últimos 242 años que han generado deslizamientos destructivos y que han cobrado vidas. Estos terremotos han sido asociados con el sistema de fallas locales descritas por Montero et al. (2010) (Figura 2).

Uno de estos eventos históricos, fue el Terremoto de Sarchí del 6 de junio de 1912 que tuvo una magnitud M_w 5,5. El epicentro se localizó en el sector suroeste del Volcán Poás y tuvo una profundidad de 18 km (Figura 2). Este evento fue asociado con fallas locales ubicadas en ese sector del volcán (Montero et al., 2010 y referencias allí). La zona más afectada

por los deslizamientos disparados se ubicó en las nacientes de los ríos Anonos y Sarchí. Estos deslizamientos posteriormente afectaron los pueblos de Sarchí y Grecia en forma de flujos de lodo. Para este evento se determinaron intensidades máximas de VII (Montero et al., 2010). Este evento se analizó con el modelo de susceptibilidad al deslizamiento, para apreciar los efectos en la zona de la RN 126 de un sismo ubicado al extremo occidental del cráter principal del volcán Poás, con menor magnitud y mayor profundidad.

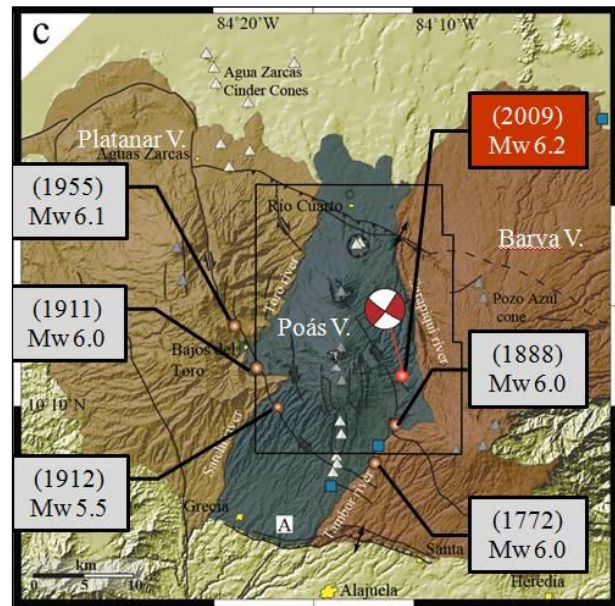


Figura 2.- Modelo de elevación digital del área del volcán Poás, con la ubicación de los terremotos históricos que han disparado deslizamientos en sus laderas (Modificado de Montero et al., 2010).

El Terremoto de Cinchona ocurrió a las 13:21 el 8 de enero del 2009 y ha sido el último de los terremotos ocurridos en el edificio del volcán Poás. El epicentro se localizó en 10°11,52' N, 84°10,70' W en el flanco este del macizo del Poás (Figura 2). Presentó una magnitud M_w 6.2, una profundidad de 4,5 km, y generó aceleraciones máximas de 0,67 g e intensidades máximas MMI de IX-VIII (Figura 3). Este evento sísmico fue generado por la falla local Ángel, de tipo dextral con rumbo NE-SW. Entre los efectos más importantes que generó este evento, se pueden mencionar 30 muertes (29 por deslizamientos) US\$ 100 millones en daños en infraestructura, y la generación de unos 5000 deslizamientos en todo el edificio volcánico (RSN, 2009; Ruiz, 2012).

Una de las principales obras civiles de la zona que se vio afectada directamente por el Terremoto de Cinchona y por fenómenos asociados fue la RN 126. Específicamente en el tramo entre el sector de Varablanca y San Miguel de Sarapiquí, donde ocurrieron agrietamientos en la vía, hundimientos, deslizamientos y colapso de puentes por flujos de lodo y detritos (Méndez et al., 2009). Esta ruta pasó varios años inhabilitada después del terremoto, debido a la alta vulnerabilidad en varios de sus tramos y la posibilidad de que se generaran flujos de detritos que afectarían los puentes. Por razones diversas de índole económica y social, entre el 2012 y 2013 la ruta se volvió a abrir de manera no oficial, y un tramo de ella, de manera oficial por la Presidenta de la República el

día 21 de marzo del 2014.

Los efectos secundarios del terremoto continúan dándose aún varios años después del evento y estos han seguido afectando la vía. El último caso registrado, fue el colapso del puente de la Catarata de La Paz en setiembre del 2013 por un flujo torrencial. En este sitio entre setiembre y octubre del 2013, se instaló un nuevo puente tipo Bailey que permitió reabrir el paso. Sin embargo como se mencionará más adelante, aún existen elementos que podrían generar deslizamientos y afectación en este nuevo puente y en los taludes de la ruta.

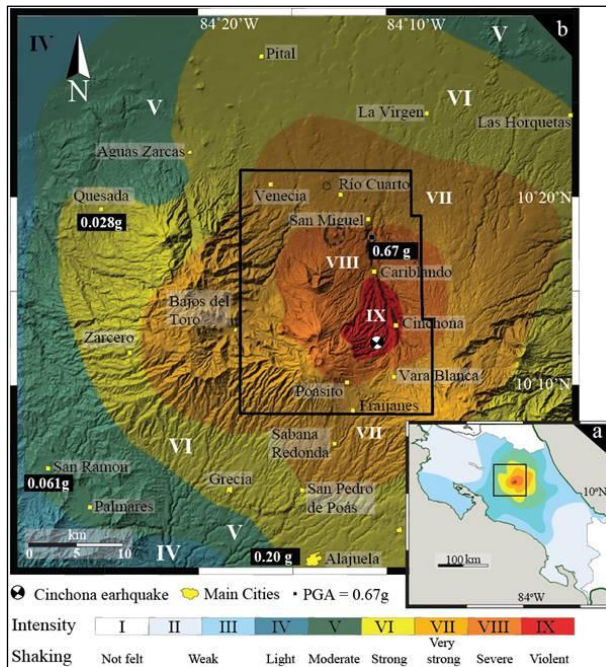


Figura 3.- Modelo de elevación digital del área del volcán Poás, con la ubicación del Terremoto de Cinchona, valores de aceleración medidos por estaciones del ICE y LIS, e isosistas de la zona (tomado de Ruiz, 2012).

Resultados

Se presentan los resultados obtenidos del análisis del modelo de susceptibilidad al deslizamiento para el sector del corredor de la RN 126, para tres casos de estudio.

Primero se explican y presentan los valores de los elementos que representan la susceptibilidad intrínseca del sitio. Nos referimos a la susceptibilidad litológica (S_l), a la de pendiente (S_p) y a la del contenido de humedad del terreno (S_h). Los tres casos de estudio corresponden a variaciones en las características del evento disparador de los deslizamientos (T_d), en este caso tres terremotos con características y ubicación distintas. Además, se presentan las observaciones realizadas sobre la zona de la Catarata de la Paz en un sobrevuelo realizado en setiembre del 2013 después del colapso del puente por un flujo torrencial.

Susceptibilidad litológica (S_l): El tramo de la RN 126 que fue evaluado en este estudio está en relación directa o indirecta con diferentes unidades geológicas que han sido

descritas anteriormente por Soto (1999); Méndez et al. (2009); Ruiz et al. (2010), y Ruiz (2012). En general, las litologías de estas unidades varían entre lavas masivas y en bloques, flujos piroclásticos y tefra de caída, intercalados. Según Ruiz et al. (2010), estas unidades se agrupan en dos fases temporales llamadas, Paleo Poás/Barva (800-200 mil años) y Neo Poás (<60 mil años). Las unidades de la zona de estudio que pertenecen a la fase temporal Paleo Poás/Barva son las unidades Río Sarapiquí, Paleo Barva y Andesitas La Paz; mientras que las unidades que son parte de la fase temporal Neo Poás son Von Frantzius, Volcán Congo, Cima Poás y Depósitos fluviales y epiclásticos recientes (Figura 4).

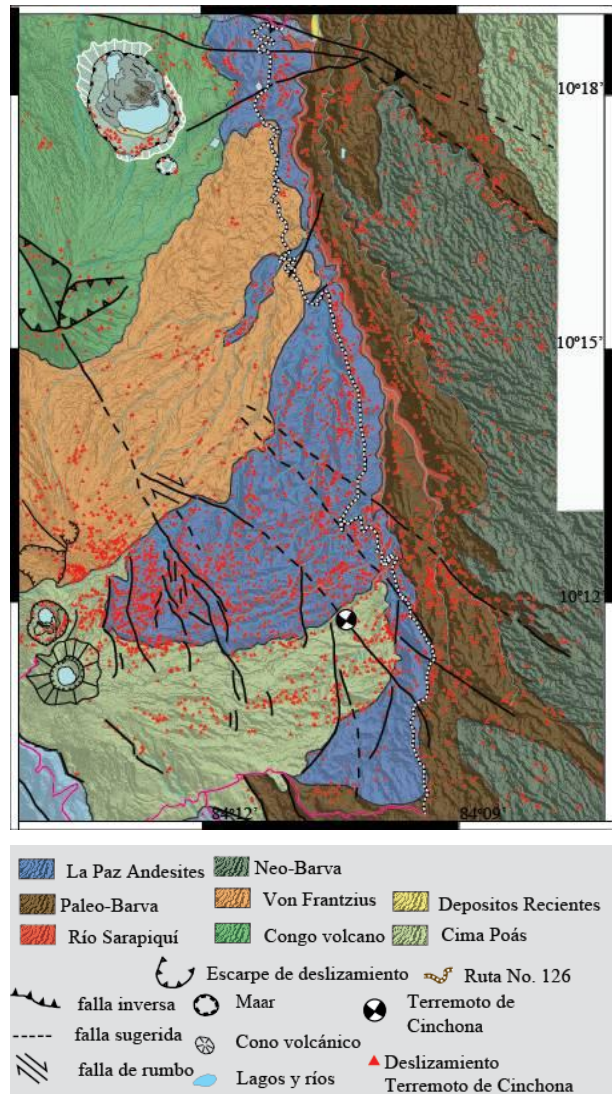


Figura 4.- Mapa geológico del sector oriental del volcán Poás montado sobre modelo de elevación digital creado con información lidar. Se muestra el tramo analizado de la RN 26 entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí (tomado de Ruiz, 2012).

Según el catálogo de deslizamientos generado por Ruiz (2012) para el Terremoto de Cinchona, las unidades litológicas que pertenecen a la fase temporal “Paleo”, presentaron mayor densidad de deslizamientos que las unidades de la fase temporal “Neo”. Del análisis litológico se determinó que esto se debió a que la unidades “Paleo”, al ser unidades más viejas,

presentan mayor grado de meteorización y mayores espesores de suelo. Por su parte, las unidades “Neo”, tienen espesores menores de suelo y aunque tuvieron menor densidad de deslizamientos, fue sobre ellas donde se originaron la mayor cantidad de eventos tipo flujos de detritos (*debris flow*).

El valor obtenido para la susceptibilidad litológica de las unidades que pertenecen a la fase temporal Paleo Poás/Barva según Ruiz (2012) es de $S_l = 2,22$, en tanto que las unidades Neo Poás presentan un valor $S_l = 1,72$. (Figura 5).

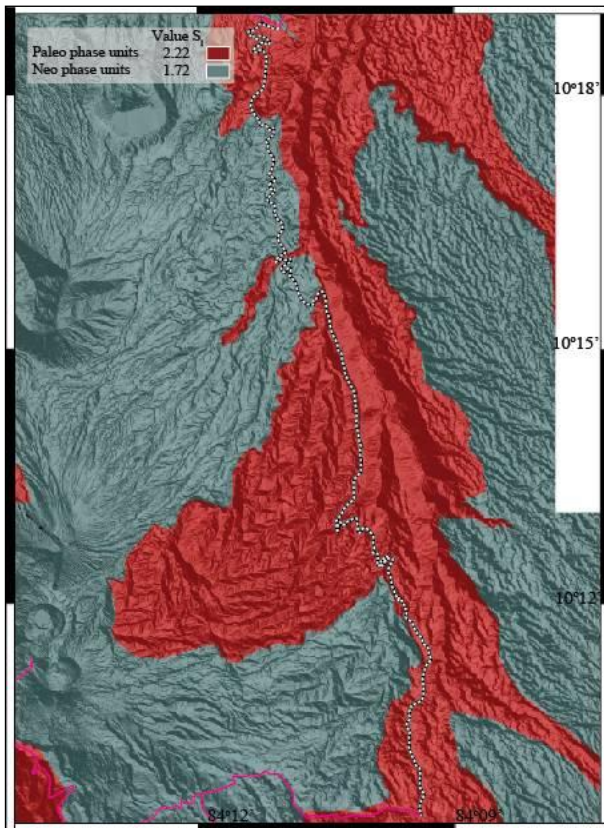


Figura 5.- Mapa de susceptibilidad litológica del sector oriental del volcán Poás. La línea punteada representa el tramo de la RN 126 entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí. Al comparar este mapa con el mapa geológico, se pueden apreciar similitudes entre los límites de las unidades “Paleo” (Andesitas La Paz y Paleo Barva) y las unidades de la fase temporal “Neo” (Unidades Von Frantzius, Volcán Congo, Cima Poás y Depósitos fluviales y epiclásticos recientes), las unidades más viejas presentan una susceptibilidad litológica mayor que las unidades más recientes (modificado de Ruiz, 2012).

Susceptibilidad por pendiente (S_p): Los resultados de este factor se obtuvieron directamente de la transformación de los valores de altitud del modelo de elevación digital generado con las imágenes lidar a pendiente. Luego estos valores fueron agrupados según los rangos sugeridos en Van Zuidam (1986). Finalmente cada valor de pendiente fue agrupado y transformado en los pesos asignados para el factor de susceptibilidad por pendiente S_p .

En la zona de estudio se encontró que las pendientes con rangos entre 16-35° y 35-55° están relacionadas con las unidades litológicas de la fase temporal “Paleo”. Mientras que las unidades de la fase temporal “Neo”, presentan valores más bajos de pendientes. La RN 126, presenta tramos donde hay

laderas y cañones asociados directa o indirectamente con la ruta y que presentan pendientes con ángulos $>55^\circ$, por lo que en estos sitios la susceptibilidad por pendiente presentan los pesos más altos de la clasificación utilizada (Figura 6).

En la cima de los Cerros Congo y Von Frantzius, existen pendientes muy altas, de modo que en estos sitios se dispararon deslizamientos durante el Terremoto de Cinchona, que se convirtieron en flujos de lodo que bajaron por las laderas y se depositaron en los sitios de pendiente baja y muy baja. También atravesaron y destruyeron varios puentes de la RN 126.

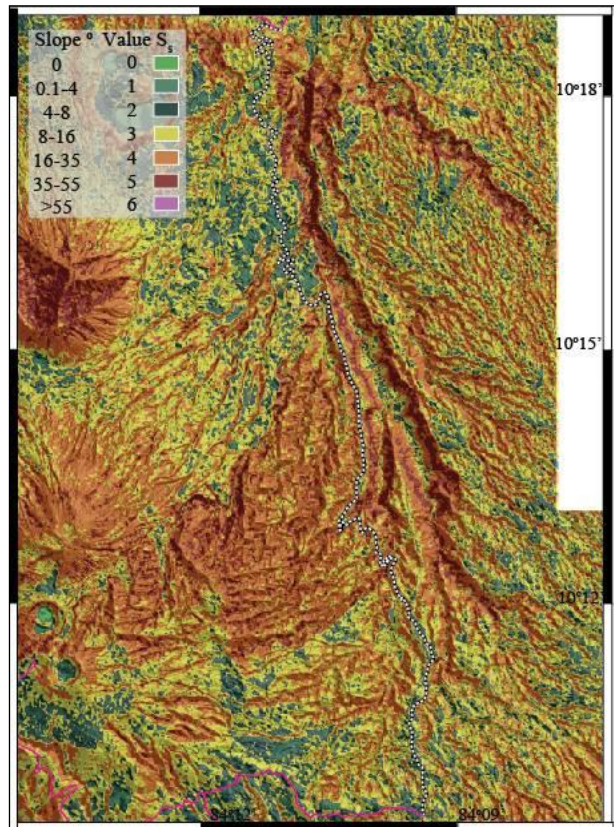


Figura 6.- Mapa de susceptibilidad por pendiente del sector oriental del volcán Poás. La línea punteada representa el tramo de la RN 126 entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí. Las zonas con las pendientes más elevadas corresponden con la cima de los Cerros Congo y Von Frantzius. En la zona donde aflora la Unidad Andesitas La Paz y en el cañón del Río Sarapiquí, hay otros valles fluviales con pendientes relativamente altas (modificado de Ruiz, 2012).

Susceptibilidad por contenido de humedad (S_h): Según los resultados de Ruiz (2012), el balance hídrico simplificado del volcán Poás, muestra que el macizo volcánico, presenta las dos clasificaciones más altas para el contenido de humedad. Un valor de ($S_h = 5$) para toda la parte norte del volcán Poás que se ve influenciada por el clima de la vertiente del Caribe, donde llueve prácticamente todo el año. Y un valor de ($S_h = 4$) para el sector de Fraijanes y el flanco sur o vertiente del Pacífico del volcán Poás, donde existen una corta estación seca entre los meses de enero y abril. Debido a que el tramo estudiado aquí de la RN 126 está ubicado entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí (vertiente norte del volcán Poás), toda el área de estudio presenta un valor de $S_h = 5$ (Figura 7).

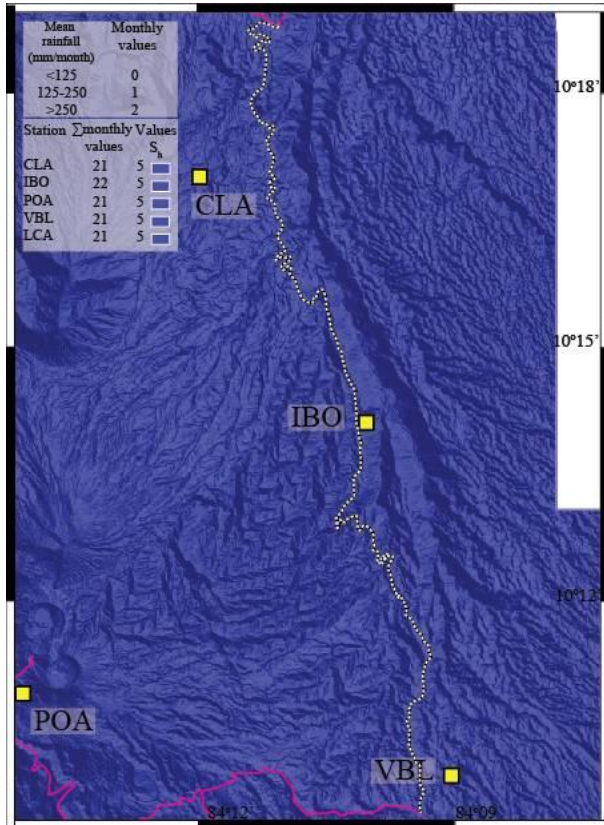


Figura 7.- Mapa de susceptibilidad por contenido de humedad del sector oriental del volcán Poás. La línea punteada representa el tramo de la RN 126 entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí. Los cuadros amarillos representan la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para obtener los datos de lluvia mensual, algunas de ellas pertenecen al ICE y otras al IMN (modificado de Ruiz, 2012).

Disparador Terremoto de Cinchona T_d : Con los datos del Terremoto de Cinchona (M_w 6.2 M_w , prof. 4,5 km y la ubicación), Ruiz (2012) obtuvo un valor máximo para la atenuación de la aceleración (aPGA) de 392,92 m/s^2 que corresponde con el epicentro del evento. El valor mínimo según la misma fórmula de atenuación fue de 92,52 m/s^2 . Estos rangos de aceleración (PGA) al ser transformados a la escala de intensidad de Mercalli varían entre VIII a VI y al transformarse en los valores de peso del evento disparador de deslizamientos (T_d) están entre 6 y 4. Estos valores se colocaron en el mapa siguiendo la misma distribución de la atenuación de la aceleración, logrando así que cada pixel del mapa tenga un valor diferente para el evento disparador y finalmente para la susceptibilidad a generar deslizamientos. Con esto se logró generar un modelo más aproximado a la realidad, ya que no está utilizando por ejemplo la intensidad máxima de la zona de estudio en los últimos 100 años, como plantean otros modelos anteriores (Figura 8).

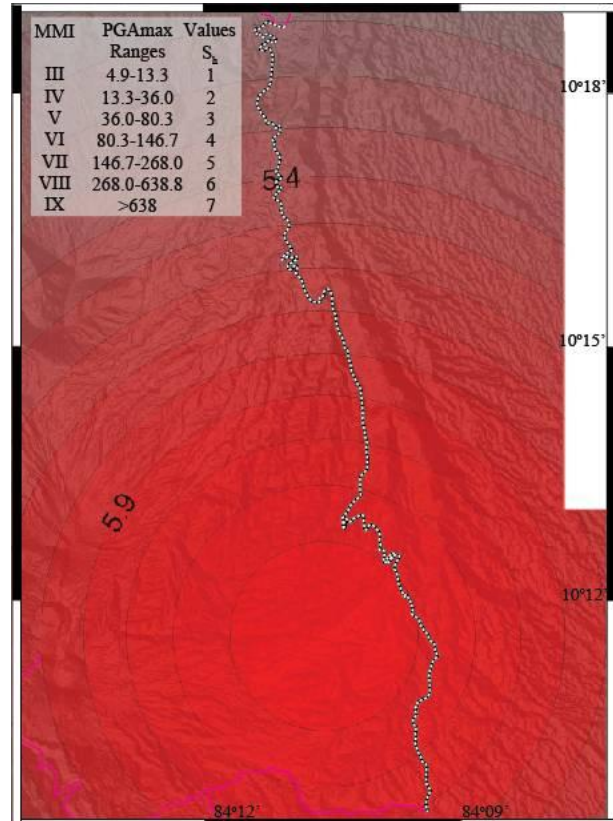


Figura 8.- Mapa de atenuación del valor de disparo de deslizamientos generado a partir de la atenuación de la aceleración máxima (aPGA) del Terremoto de Cinchona en el sector oriental del volcán Poás. La línea punteada representa el tramo de la RN 126 entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí (modificado de Ruiz, 2012).

Susceptibilidad al deslizamiento en la RN 126 para el Terremoto de Cinchona:

La susceptibilidad al deslizamiento obtenida para la zona por donde atraviesa la Ruta Nacional No. 126 muestra que no existen zonas con susceptibilidad muy baja al deslizamiento. Existen algunas zonas muy reducidas que presentan susceptibilidad baja y la gran mayoría del tramo entre Varablanca y San Miguel presenta una susceptibilidad alta y muy alta al deslizamiento. Las zonas que tienen susceptibilidad moderada y están relacionadas con unidades geológicas de la fase temporal Neo Poás, podrían verse afectadas por flujos de detritos que al bajar por los valles fluviales podrían destruir los puentes (Figura 9). Si se compara la ubicación de los deslizamientos generados por el Terremoto de Cinchona de la Figura 4, con las zonas de susceptibilidad de la Figura 9, se puede notar que existe una gran correspondencia en la densidad de deslizamientos en las zonas con susceptibilidad alta y moderada, lo cual valida el modelo empleado aquí.

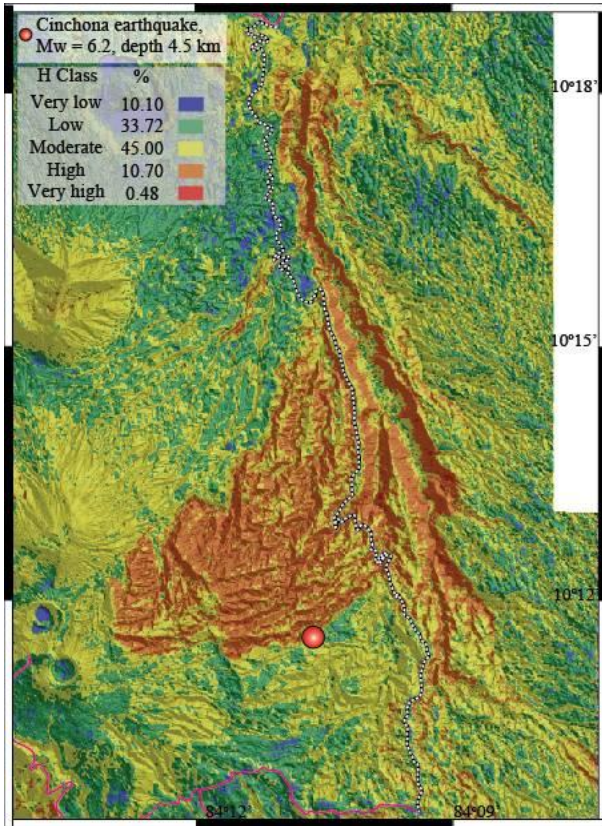


Figura 9.- Mapa de susceptibilidad al deslizamiento generado a partir del Terremoto de Cinchona en el sector oriental del volcán Poás. La línea punteada representa el tramo de la RN 126 entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí (modificado de Ruiz, 2012).

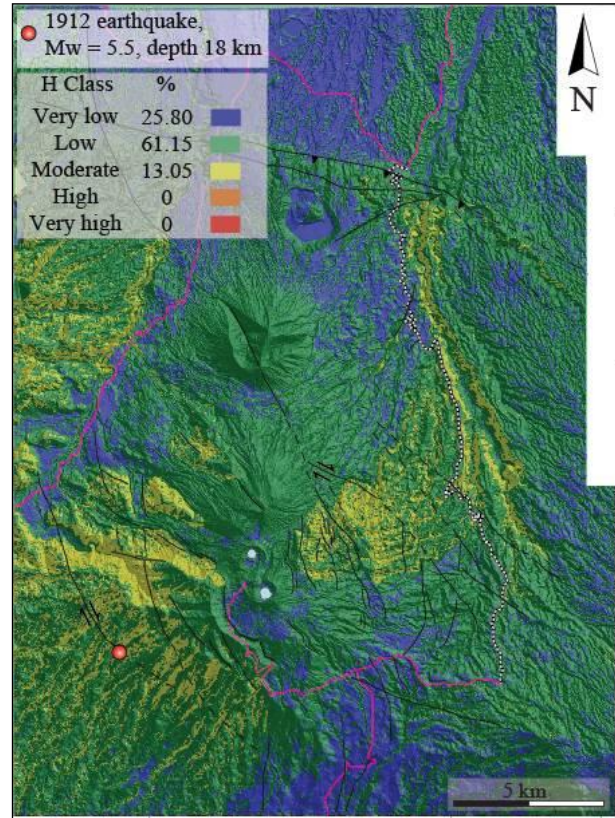


Figura 10.- Mapa de susceptibilidad al deslizamiento generado a partir del Terremoto de Sarchí y su efecto en el sector oriental del volcán Poás. La línea punteada representa el tramo de la RN 126 entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí. No se generaron zonas con susceptibilidad alta, ni muy alta. Un tramo de ~7 km de la ruta está asociado con susceptibilidad moderada, mientras que el resto está relacionado con laderas con susceptibilidad baja y muy baja (modificado de Ruiz, 2012).

Disparador Terremoto de Sarchí T_d y Susceptibilidad al deslizamiento en la RN 126: Para el estudio de este caso, se dejaron los valores de los primeros tres parámetros evaluados (S_1) * (S_p) * (S_h) constantes ya que son intrínsecos de la zona de estudio. Aquí solamente fue modificando el evento disparador (T_d) según los datos del sismo respectivo. Se obtuvo que para el Terremoto de Sarchí (M_w 5,5; prof. 18 km), con el epicentro ubicado en el sector suroeste del volcán Poás a una distancia de casi 10 km de la RN 126. Los valores máximos de la aceleración fueron menores que los generados por el Terremoto de Cinchona y que por el efecto de la atenuación y la distancia, los valores de disparo para el área que atraviesa el corredor de la RN 126 fueron menores.

Con base en el modelaje de este sismo histórico, se obtuvo que no se generaron zonas que presenten susceptibilidad alta ni muy alta al deslizamiento. Las zonas que presentan susceptibilidad moderada están relacionadas con las unidades de la fase temporal Paleo Poás y en las ladera de los cañones de los ríos Sarapiquí, La Paz y Ángel (Figura 10). La susceptibilidad al deslizamiento en las zonas donde afloran las unidades de la fase temporal Neo Poás son bajas y muy bajas. Es muy probable que de ocurrir hoy un evento sísmico con las mismas características que el Terremoto de Sarchí y en la misma zona epicentral, la RN126 no se vea severamente afectada por deslizamientos o flujos de detritos. La distancia de la carretera al epicentro, la profundidad del sismo y el efecto de amortiguamiento y dispersión de la energía reducen los valores de susceptibilidad al deslizamiento en el sector oriental del macizo.

Disparador por caso hipotético de terremoto en Colonia Toro T_d y Susceptibilidad al deslizamiento en la Ruta No. 126: Basados en las rupturas histórica de las fallas locales de la zona del volcán Poás, Montero et al. (2010) proponen que la falla Ángel podría tener una extensión hacia el noroeste desde su principal traza, que de romper podría generar un terremoto con M_w 5,5 – 6,0. Ruiz (2012) corrió un modelo de susceptibilidad al deslizamiento para este evento hipotético y le asignó una profundidad de 10 km (profundidad promedio de sismos corticales) y con la ubicación del epicentro muy cerca del pueblo Colonia del Toro.

De los resultados obtenidos para este caso de estudio y la relación con la RN 126 se puede determinar que no existen zonas que tengan una susceptibilidad muy alta al deslizamiento (Figura 11). Las zonas asociadas con susceptibilidad alta están ubicadas en las laderas de los cañones de los ríos Sarapiquí y Toro. La mayor parte del corredor de la RN 126 presenta valores moderados, bajos y muy bajos. Especialmente en las zonas que están sobre las divisorias y pasos sobre los ríos La Paz, Ángel y María Aguilar. Las zonas que presentan valores de susceptibilidad al deslizamiento moderada, están relacionadas con unidades geológicas de la fase temporal Paleo Poás/Barva, por lo que es posible que en caso de un terremoto en esas zonas, se generen deslizamientos que afecten directamente la carretera. La cima

de los volcanes Congo y Von Frantzius también presentan valores moderados de susceptibilidad al deslizamiento. De generarse deslizamientos en esos sitios, es probable que estos eventos se transformen en flujos de lodo y que puedan afectar los puentes de la RN 126, como ocurrió en el Terremoto de Cinchona.

Al comparar los resultados de este modelaje con los resultados del modelo del Terremoto de Sarchí, se podría suponer que la magnitud superior y su profundidad más somera del sismo hipotético de Colonia del Toro, generará, para este evento, un porcentaje mayor de laderas con susceptibilidad alta y moderada al deslizamiento.

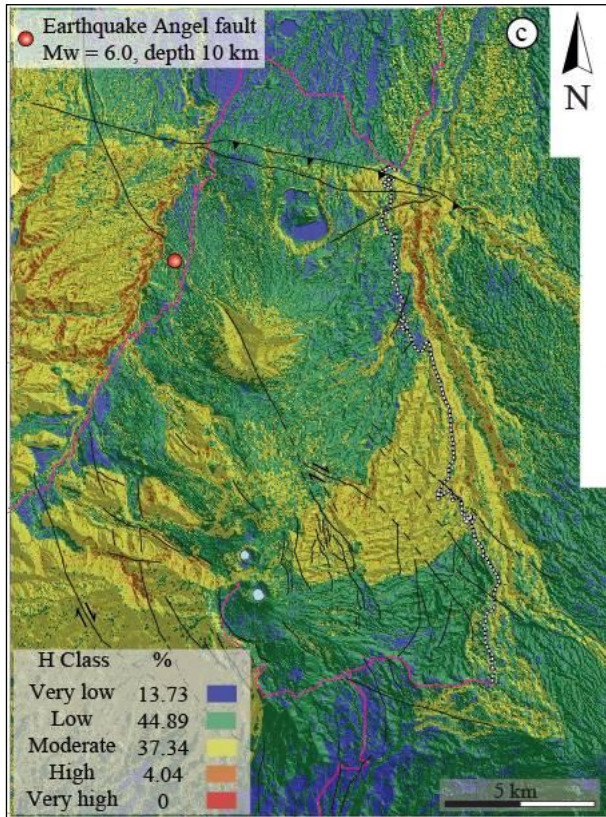


Figura 11.- Mapa de susceptibilidad al deslizamiento generado a partir de un terremoto hipotético en el sector de Colonia del Toro (M_w 6,0; 10 km de profundidad) y su efecto en el sector oriental del volcán Poás. La línea punteada representa el tramo de la RN 126 entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí. Un tramo de ~7km de la ruta está asociado con susceptibilidad moderada mientras que el resto está relacionado con laderas con susceptibilidad baja y muy baja (tomado de Ruiz, 2012).

Los puentes de la Catarata La Paz: El puente de la Catarata La Paz es parte de la RN 126, y se ubicaba en el tramo entre Varablanca y la antigua Cinchona. En este sitio se han colocado y destruido tres puentes en un lapso de 75 años.

El primer puente tuvo una vida útil de casi 65 años, pues fue construido en 1938, y consistía en una estructura de arcos de madera sobre dos bastiones de concreto, con una longitud de ~30 m y un ancho de ~4 m. Este puente contaba con un solo carril de paso y estaba en proceso de ser declarado patrimonio arquitectónico nacional y construir una estructura moderna a su lado para seguir permitiendo el paso de vehículos. En el

2002, un año antes de su caída, la estructura recibió mantenimiento por parte del CONAVI, el cual entre otras labores incluyó la colocación de una nueva capa asfáltica sobre la superficie de ruedo. Este trabajo posiblemente agregó peso a la vieja estructura que no fue reforzada y contribuyó a su caída. El viernes 17 de octubre del 2003, el paso de dos camiones pesados, uno cargado de tucas de madera y otro cargado con pollos, hicieron que el puente se partiera a la mitad y colapsara, destruyéndose completamente (Tico Times-24 de octubre del 2003; Figuras 12 y 13).



Figura 12.- Puente original de arcos de madera sobre el río La Paz Grande en la RN 126, antes de colapsar (fotografía del periódico *The Tico Times*, 2003).



Figura 13.- Puente original de madera sobre el río La Paz Grande colapsado por el paso de vehículos pesados (fotografía del periódico *The Tico Times*, 2003).

Posteriormente a la caída del puente histórico de madera, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) colocó un puente metálico tipo Bailey sobre los antiguos bastiones de la primera estructura. La colocación de este nuevo paso se suponía que iba a ser temporal mientras se licitaba y construía una estructura permanente. Sin embargo, nunca se llegó a construir un nuevo puente en este lugar y la estructura "provisional" permaneció ahí por más de 10 años. Este puente Bailey sufrió daños menores durante el Terremoto de Cinchona, pese a las altas aceleraciones que se registraron en la zona, los miles de deslizamientos en sus alrededores y los flujos de detritos que bajaron por el río La Paz, por lo que no fue necesario colocar una estructura nueva en este sitio después del evento (RSN, 2009; Figuras 14 y 15).



Figura 14.- Se observa el puente Bailey frente a la Catarata de La Paz en buen estado días después del Terremoto de Cinchona (Fotografía del periódico *Al Día*, 2009).

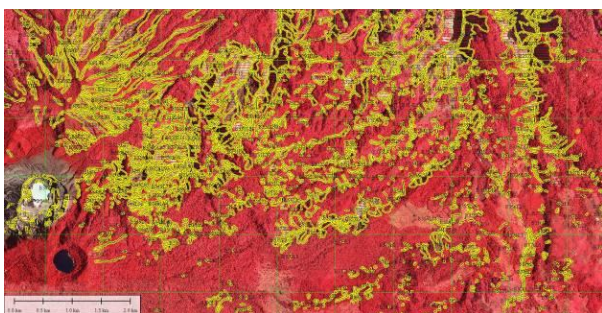


Figura 15.- Se muestra en amarillo parte del inventario de deslizamientos disparados por el Terremoto de Cinchona del 2009 en el sector oriental del volcán Poás y la microcuenca del río La Paz Grande. El levantamiento de deslizamientos se realizó mediante el uso de imágenes Lídár (modificado de Ruiz, 2012).

Pese a que el puente Bailey no se vio afectado directamente por el Terremoto de Cinchona, ni por los deslizamientos disparados por el movimiento, toda esta zona y sus microcuencas quedaron muy alteradas e inestables. En las cabeceras de las cuencas, las laderas de los ríos y quebradas, quedó acumulado material suelto (rocas, suelo, troncos, material vegetal, escombros, etc.). Este material suelto, en taludes con pendiente alta y sin vegetación, es propenso a caer por gravedad y generar represas en los cauces de los ríos, que con la combinación de lluvias intensas, producen aludes torrenciales (“cabezas de agua”) como el del 16 de setiembre del 2013, que fue el evento que finalmente destruyó el puente Bailey colocado en el 2003 (Figuras 16 y 17). Esta avenida produjo también daños en los taludes inferiores de la ruta de acceso al puente, tanto hacia Varablanca como hacia Cinchona. Días después se instaló un nuevo puente tipo Bailey, que está en funcionamiento, y es parte del diseño actual de operación de la carretera.

Con el fin de valorar las condiciones de la zona posterior a las fuertes lluvias y los aludes torrenciales que se presentaron el día 16 de setiembre del 2013 y que destruyeron el puente adyacente a la Catarata de La Paz, se realizó un sobrevuelo el 17 de setiembre, en conjunto con la CNE y la Unidad Aérea de la Fuerza Pública. Se sobrevoló y fotografiaron zonas sobre el sector oriental del volcán Poás, específicamente en la microcuenca del río La Paz Grande, para determinar con mejores criterios qué fue lo que originó la cabeza de agua que destruyó el puente de la Catarata La Paz y determinar la posibilidad de otros posibles aludes afecten la zona.



Figura 16.- Se muestra el alud torrencial del 16 de setiembre del 2013 que destruyó el puente Bailey colocado en el 2003 (tomado de *crhoy.com*, 2013).



Figura 17.- Sitio donde se encontraba colocado el puente tipo Bailey arrasado. Nótase que la caída de bloques de tamaño métrico redujo la capacidad hidráulica del cauce (tomado de *La Nación*, 2013).

Condiciones de las cuencas La Paz Grande y adyacentes: Con base en las observaciones realizadas en el sobrevuelo del 17 de setiembre del 2013 y lo observado desde el Terremoto de Cinchona, es posible realizar algunas observaciones respecto a las cuencas.

El cauce del Río La Paz Grande aguas arriba de la Catarata la Paz se observó limpio y sin represamiento por materiales, aunque las laderas y taludes de este río y otros de la zona, aún presentan una cantidad considerable de materiales sueltos que pueden contribuir con material para ulteriores aludes (Figura 18).

No se observaron nuevos deslizamientos posteriores a los originados por el terremoto del 2009, y solamente resaltan las zonas que aún no se han recuperado de los deslizamientos disparados por el Terremoto de Cinchona.

Se determinó que el alud torrencial del 16 de setiembre del 2013 se originó probablemente por el represamiento de escombros, material y suelo removido por deslizamientos disparados por el Terremoto de Cinchona y que por gravedad y escorrentía intensa ante las lluvias, bajaron al cauce del río, represándolo primero, y rompiendo la represa luego.

Se determinó que es muy probable que en los próximos años, se vuelvan a generar aludes torrenciales en esta microcuenca y otras de la zona del volcán Poás ante la ocurrencia de lluvias intensas, hasta tanto no haya una recuperación forestal natural, lo cual se especula que tomará algunos lustros.



Figura 18.- (A). Vista de cauce del río La Paz Grande aguas arriba del sitio de la Catarata de La Paz. Se observa cómo el cauce está libre de obstáculos importantes y sus taludes aún sin vegetación por los deslizamientos del Terremoto de Cinchona. (B) Se observan escombros, y material suelto que eventualmente podría represar el cauce. (C). Saltos en el cauce libre del río La Paz Grande (Fotografías de LanammeUCR).

Conclusiones y recomendaciones

En la zona del volcán Poás han ocurrido al menos seis terremotos que han disparado deslizamientos desde 1772, y aunque aritméticamente se podría justificar un periodo de recurrencia de ~50 años (entre 2 y 5 décadas en general), para aquellos más dañadores, el periodo puede ser de alrededor de un siglo. Los deslizamientos sismo-generados en esta zona, se han dado por una combinación de factores como: altas pendientes, alta humedad relativa de los suelos de la zona, y grandes espesores de suelos residuales de origen volcánico en las unidades más antiguas del macizo (unidades de la fase temporal Paleo Poás/Barva), entre otros.

En los flancos del volcán Poás, después de un evento sísmico importante, las microcuencas, taludes y laderas quedan desestabilizados por los miles de deslizamientos que se generaron por el sismo. En ellas se acumulan gran cantidad de materiales sueltos que pueden generar nuevos deslizamientos y represamiento de los cauces, además en condiciones de lluvias torrenciales se pueden originar cabezas de agua. Estas laderas volcánicas tardan varias décadas en volver a un equilibrio y regenerarse hasta que se vuelve a dar un evento sísmico y se repite de nuevo el ciclo.

Existe gran similitud entre la ubicación y densidad de los deslizamientos disparados por el Terremoto de Cinchona del 2009 (el más reciente de los seis sismos mencionados) y el mapa de susceptibilidad al deslizamiento generado a partir del modelo propuesto por Ruiz (2012), en la parte oriental del edificio volcánico del Poás. Esto explica el porqué la RN 126 fue severamente afectada por este evento.

De generarse un evento sísmico con las mismas características que las del Terremoto de Sarchí de 1912 y en la misma zona epicentral (occidente del edificio), la RN 126 no se vería severamente afectada por deslizamientos o flujos de detritos. La distancia de la carretera al epicentro, la profundidad del

sismo y el efecto de amortiguamiento y dispersión de la energía reducen los valores de susceptibilidad al deslizamiento en el sector oriental del macizo.

Los resultados de la susceptibilidad al deslizamiento obtenidos para un sismo hipotético que ocurra en el sector de Colonia del Toro, de magnitud M_w 6,0 y a una profundidad de 10 km, indican que las laderas que están en relación con la RN 126 no presentan zonas que tengan una susceptibilidad muy alta. Existen sitios con susceptibilidad alta, pero están ubicadas en las laderas del Cañón del Sarapiquí. La mayor parte del corredor de la RN 126 presenta valores moderados y bajos. Especialmente en las zonas que están sobre las divisorias y pasos sobre los ríos La Paz, Ángel y María Aguilar.

Con base en la revisión detallada de las imágenes lídár del 2009 sobre el corredor de la RN 126, el modelo de susceptibilidad al deslizamiento generado para diferentes posibles terremotos y sus efectos en el sector este del volcán Poás, además de un sobrevuelo realizado en helicóptero en setiembre del 2013 sobre la zona, concluimos que existen zonas de RN 126 y específicamente en el sitio del puente de la Catarata de la Paz, que son muy susceptibles a tener deslizamientos, caídas de bloques y flujos de lodo que pueden afectar directamente la vía y los puentes. Por estas razones y pese a todos los trabajos realizados en los taludes entre 2009-2010, la nueva instalación de un puente tipo Bailey en la Catarata de la Paz y las diferentes acciones de remediación que se han tomado en este sector, consideramos que solamente se ha reconstruido la vulnerabilidad de la RN 126.

El puente original de madera construido en 1938 adyacente a la Catarata de La Paz, había resistido el terremoto de 1955 de Bajos del Toro (M_w 6,1) y ya había sobrepasado su vida útil cuando fue destruido en el 2003 por el paso de dos camiones pesados. Es muy probable que no hubiera resistido el Terremoto de Cinchona debido a que las intensidades fueron mayores que las de 1955 y tampoco hubiera resistido la cabeza de agua de setiembre del 2013 que destruyó el puente Bailey colocado en el mismo lugar en el 2003. Este es un sitio clave en el paso de la RN 126.

Es muy probable que durante los siguientes años la microcuenca del Río La Paz Grande y otros cauces de la zona sigan presentando eventos de aludes torrenciales paralelos a lluvias intensas (como en setiembre del 2013, 4 y medio años después del Terremoto de Cinchona), hasta que se logren equilibrar sus laderas. También es muy probable que en algunas décadas la zona del Poás vuelva a experimentar un evento sísmico importante. Todos estos factores se tienen que tomar en cuenta para la construcción de nuevas estructuras viales y en general para la reapertura total de la RN 126. Nuevos aludes torrenciales no solo podrían afectar un nuevo puente colocado en el mismo sitio de la Catarata de La Paz, sino también otros puentes de la de la RN 126 y sus taludes.

Se recomienda que de reabrir la RN 126, se busquen nuevas soluciones a los problemas identificados en esta ruta y no que se vuelva a reconstruir la vulnerabilidad. Se sugiere que se instale un sistema de monitoreo y alerta a tiempo de aludes torrenciales y deslizamientos en zonas que ya han sido identificadas en los estudios previos. Para el monitoreo se podrían colocar cámaras y también se podría proporcionar radios de comunicación a los vecinos que vivan en las partes altas de las cuencas para que informen sobre posibles “cabezas de agua” que podrían afectar la ruta y poblaciones cercanas.

Los factores anteriormente expuestos, aunados con estudios

socioeconómicos, se tienen que tomar en cuenta para considerar el cierre o apertura (depende de las conclusiones de tales estudios) definitiva esta ruta, y eventualmente retomar el proyecto de la construcción de una nueva vía sobre el volcán Barva como en algún momento se propuso. Mientras tanto se recomiendan adoptar medidas de monitoreo con cámaras de video, estaciones meteorológicas y sensores en los taludes y las zonas más susceptibles, así como cierres controlados en la estación lluviosa para evitar más tragedias.

Referencias bibliográficas

Linkimer, L. (2008). "Relationship between peak ground acceleration and Modified Mercalli Intensity in Costa Rica". *Revista Geológica de América Central*, N° 38, pp. 81-94.

Méndez, J., G.J. Soto, N. Zamora, N., A. Vargas, L. Sjöbohm, E. Bonilla, D. Barahona, L. Solís, P. Kyck, P. y I. Baroñil. (2009). "Geología de los deslizamientos provocados por el Terremoto de Cinchona, Costa Rica (Mw 6.2; 8 de enero del 2009) en la Ruta 126 (Varablanca-San Miguel)". *X Congreso Nacional de Geotecnia y V Encuentro Centroamericano de Geotecnistas*, San José, Costa Rica, 19-21 de agosto del 2009, Memoria digital, 22 pp.

Mora, R., Mora S. and Vahrson, W., (1992). Microzonificación de la amenaza de deslizamientos y resultados obtenidos en el área del valle central de Costa Rica. Escala 1:286 000 Ceprenac, San José Costa Rica.

Mora, S., J. Saborío, J.P. Asté, C. Prepetit, V. Joseph, V. y M. Matera. (2012). Slope instability hazard in Haiti: Emergency assessment for a safe reconstruction. En: Eberhart et al. (eds). *Landslides and Engineered Slopes: Protecting society through Improved Understanding*.

Montero, W., G.J. Soto, G.E. Alvarado y W. Rojas. (2010). División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y de sismicidad histórica. *Revista Geológica de América Central*, N° 43: pp. 13-36.

Red Sismológica Nacional. (2009). El Terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009. http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/terremoto_cinchona.pdf

Ruiz, P. (2012). *Reconstruction of the Paleo and Neo stages of Poás and Turrialba volcanoes, Costa Rica: Competing processes of growth and destruction*. Tesis doctoral, Rutgers University, New Jersey, 172 pp.

Ruiz, P., E. Gazel, G.E. Alvarado, M.J. Carr y G.J. Soto. (2010). Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, N° 43, pp. 37-66.

Schmidt, V. (2010). *Avances para estudios del riesgo a escala regional y local: Aplicación a América Central y la bahía de Cádiz (Sur de España)*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya.

Sheets, P., and Sever T. (1888): High Tech Wizardry, *Archeology* 41 (6): 28-35

Sheets, P., Hoopes, J., Melson, W., McKee, B., Sever, T., Marilyn, M., Chenault, M. & Bradley, J., (1991). Prehistoric Footpaths in Costa Rica: Transportation and Communication in a Tropical Rainforest. En: C. Trombold (ed.): *Ancient Road Networks and Settlement Hierarchies in the New World* Cambridge University Press, Cambridge.

Soto, G.J. (1999). Geología Regional de la Hoja Poás (1: 50 000): 1 hoja. -En : Alvarado G.E., y L. A. Madrigal (eds): *Estudio Geológico de Avance a la Factibilidad del P.H. Laguna Hule*. - Instituto Costarricense de Electricidad [Inf. Interno] 30 pp., San José.

Van Zuidam, R. A., (1986). Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. 442 pp. Smits Publishers The

Hague.

Referencias hemerográficas

Crhoy.com noticias 24/7. (2013). De nuevo, la naturaleza golpea a vecinos y empresarios de la catarata de La Paz. 17 de setiembre <http://www.crhoy.com/de-nuevo-la-naturaleza-golpea-a-vecinos-y-empresarios-de-la-atarata-de-la-paz/>

La Nación. (2013). Nuevo puente Bailey será la solución en la catarata de la Paz. 17 de setiembre. http://www.nacion.com/nacional/infraestructura/Catarata_de_la_Paz_0_1366463604.html

Periódico Al Día. (2010). Cinchona descansa en paz. 10 de enero. http://www.aldia.cr/ad_ee/2010/enero/10/nacionales2218939.html

The Tico Times. (2003). Historic La Paz Waterfall Bridge Topples. Edición impresa, viernes 24 de octubre, pp.1 y 7.