



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Programa de Infraestructura del Transporte
Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional

MODELACIÓN DE LAHARES GENERADOS POR EL VOLCÁN TURRIALBA Y SU POSIBLE AFECTACIÓN A LA RED VIAL NACIONAL

LM-PI-UGERVN-11-2015

San José, Costa Rica
Octubre, 2015



Documento generado con base en el Art. 6, inciso c) de la Ley 8114 y lo señalado en el Capítulo II, Artículo 14 del Reglamento del Art. 6 de la precitada ley, publicada mediante Decreto DE-37016-MOPT.


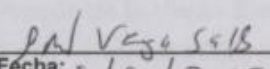
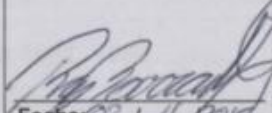
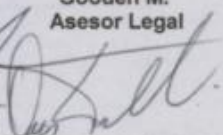
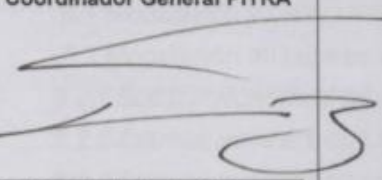
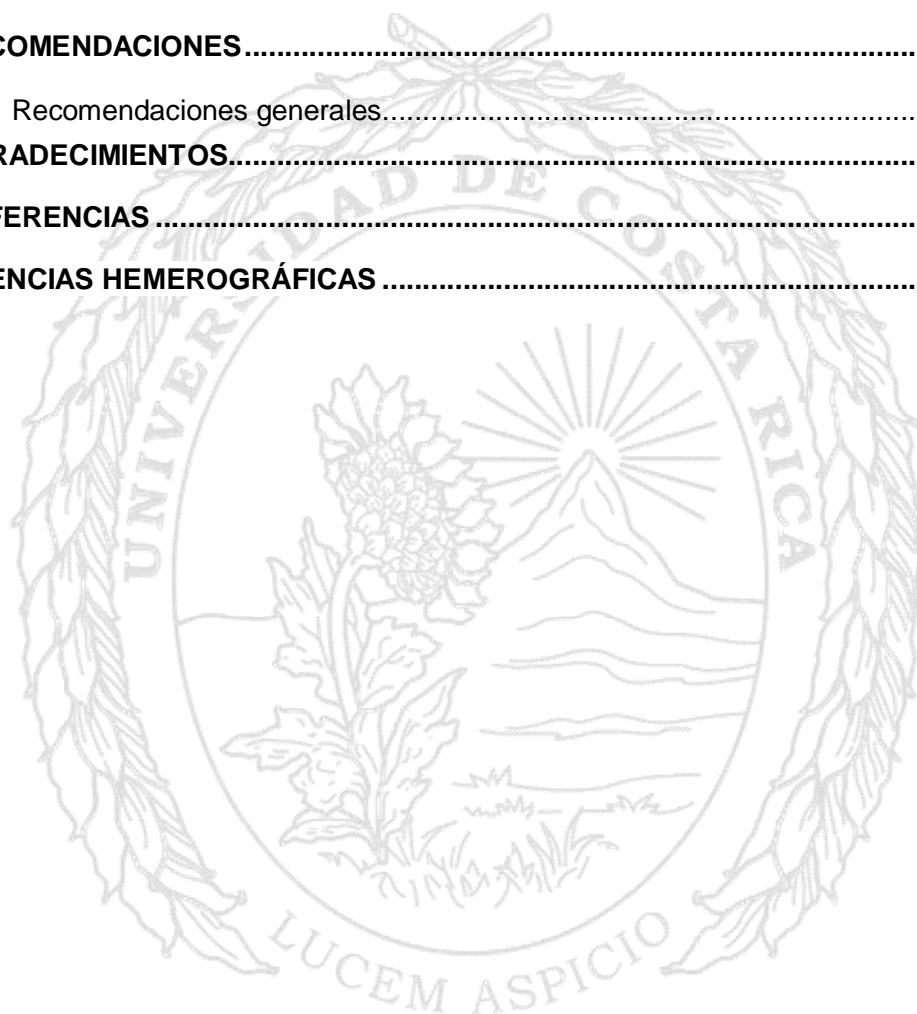
1. Informe LM-PI-UGERVN-11-2015		2. Copia No.1	
3. Título GENERACIÓN DE LAHARES GENERADOS POR EL VOLCÁN TURRIALBA Y SU POSIBLE AFECTACIÓN A LA RED VIAL NACIONAL		4. Fecha del Informe Octubre 2015	
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440			
6. Notas complementarias No aplica			
7. Resumen Existen tramos de rutas nacionales de gran importancia que bordean los flancos y zonas bajas del volcán Turrialba. Entre ellas están las rutas 32, 10, 230 y 218. La actividad del volcán Turrialba se ha incrementado paulatinamente desde el año 2007 hasta presentar erupciones freáticas con algún aporte magmático en el 2015. Anticipando un incremento aún mayor en la actividad volcánica del Turrialba combinada con una estación lluviosa fuerte y que se llegue a presentar una situación similar a la del volcán Irazú (1963 -1965), se identificaron cuáles son las zonas y puentes que podrían ser afectados por lahares, esto con el propósito de poder tomar medidas de prevención a tiempo y poder reducir la vulnerabilidad de estos sitios. La identificación de las posibles zonas que podrían ser afectadas por lahares se realizó mediante la utilización del software LAHARZ del USGS para modelar este tipo de eventos de forma rápida y oportuna. Se realizó un modelado simulando el mismo volumen de lahares que afectaron Taras en 1963-1965 distribuidos en tres eventos (2, 3 y 5 millones de m ³) y disparados desde las zonas altas de diferentes cauces alrededor del Volcán Turrialba. Por último, se realizó un análisis específico para un lahar con volumen de 2 millones de m ³ (evento con mayor posibilidad de ocurrir por tener una tamaño relativamente pequeño) en el que se incluye un rango de confiabilidad de 95% y en el que se evalúan tres posibles escenarios: 1- Conservador, 2- promedio y 3- el peor. Este trabajo representa un insumo para la Administración y podría ser utilizado por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), así como por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), con el fin de implementar medidas de mitigación en las estructuras de los puentes nuevos y la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana en las partes altas de las cuencas.			
8. Palabras clave: Lahares, volcán Turrialba, puentes, Ruta 32		9. Nivel de seguridad: Bajo	
		10. Núm. de páginas 42	
11. Preparado por:			
Geólogo Paulo Ruiz C., Ph.D. UGERVN	Geógrafo Paul Vega. MSc. UGERVN	Ing. Roy Barrantes Coordinador UGERVN	12. Revisado por: Lic. Owen Alejandro Gooden M. Asesor Legal
			
Fecha: 30/10/2015	Fecha: 30/10/2015	Fecha: 02/11/2015	Fecha: 30/10/15
13. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria S., Ph.D. Coordinador General PITRA			
			
Fecha: 30/10/15			

TABLA DE CONTENIDO

1. POTESTADES.....	6
2. INTRODUCCIÓN.....	7
3. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO.....	7
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO.....	8
5. UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	8
5.1 Topografía y rutas nacionales dentro del área de estudio.....	8
5.2 Condiciones climáticas del área de estudio	8
5.3 Geomorfología del área de estudio.....	10
5.4 Geología del área de estudio.....	14
6. METODOLOGÍA, ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	14
6.1 Funcionamiento básico de LAHARZ.....	14
6.1.1 SUPUESTOS CON LOS QUE TRABAJA LAHARZ.....	15
6.1.2 FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE LAHARZ.....	15
6.1.3 INSUMOS.....	16
7. LAHARES HISTORICOS EN COSTA RICA.....	20
7.1 Lahares del volcán Irazú - Eventos 1963-1965.....	20
7.2 Lahares del volcán Rincón de la Vieja - Eventos 1991, 1998.....	21
7.3 Lahares del volcán Poás - Eventos 2009, 2013.....	22
7.4 Lahares del volcán Turrialba - Eventos 2014.....	24
8. RESULTADOS	25
8.1 Modelación y calibración de lahares del volcán Irazú 1963-1965.....	25
8.2 Modelación de lahares alrededor del volcán Turrialba	27
8.2.1 SECTOR NOROESTE DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	27
8.2.2 SECTOR NORESTE DE LA ZONA DE ESTUDIO	28
8.2.3 SECTOR SURESTE DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	28
8.2.4 SECTOR SUROESTE DE LA ZONA DE ESTUDIO	28



8.3 Modelación de lahares de 2 millones de m ³ con 95% de confiabilidad.....	31
8.3.1 SECTOR NOROESTE DE LA ZONA DE ESTUDIO	31
8.3.2 SECTOR NORESTE DE LA ZONA DE ESTUDIO	33
8.3.3 SECTOR SURESTE DE LA ZONA DE ESTUDIO	33
8.3.4 SECTOR SUROESTE DE LA ZONA DE ESTUDIO	33
8.4 Modelación de lahares menores	37
9. CONCLUSIONES.....	39
10. RECOMENDACIONES.....	39
10.1 Recomendaciones generales.....	39
11. AGRADECIMIENTOS.....	40
12. REFERENCIAS.....	41
REFERENCIAS HEMEROGRÁFICAS	42





1. POTESTADES

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, es una dependencia de la Universidad de Costa Rica especializada en la Ingeniería Civil. La ley N°8114 en sus artículos 5 y 6, encomienda al LanammeUCR una serie de funciones en materia de evaluación, fiscalización, asesoría y capacitación, entre otras, para garantizar la máxima eficiencia de la inversión pública en la reconstrucción y conservación de la red vial costarricense.

Existen tramos de rutas nacionales de gran importancia que bordean los flancos y zonas bajas del volcán Turrialba, entre ellas están: las rutas 32, 10, 230 y 218. La actividad del volcán Turrialba se ha incrementado paulatinamente desde el año 2007 y ha presentado algunas erupciones freáticas menores con expulsión de ceniza retrabajada (sin aporte de magma) en los años 2010, 2011, 2012, 2014 y 2015. La erupción de octubre del 2014 ha sido la más importante hasta el momento y la ceniza se extendió hasta las ciudades de San José, Alajuela y Heredia. En la erupción que se dio el 12 de marzo del presente año las partículas más finas de ceniza llegaron a sitios tan alejados como Orotina. Posteriormente a esta erupción han ocurrido otras donde se demostró un aporte de magma juvenil. Según el estudio de preparación de mapas de peligros volcánicos y restricción de uso de la tierra en el volcán Turrialba (Soto, 2012), una erupción mayor que incluya un aporte de magma está dentro de los posibles escenarios en un mediano a corto plazo.

Anticipando un incremento en la actividad y que esta llegue a ser similar a la del volcán Irazú (1963 -1965), cabría la posibilidad de que se puedan generar flujos de detritos (lahares) que bajen por los principales cauces del macizo y afecten severamente la infraestructura vial. Por esta razón es muy importante identificar cuáles son las zonas que podrían ser afectadas por estos eventos para tomar medidas y reducir su vulnerabilidad. Para determinar estas zonas, se proponen utilizar software específicos y aplicaciones de sistemas de información geográfica. Los aportes científicos y técnicos derivados del presente informe se enmarcan dentro de las funciones de ley N°8114 y de los principios de investigación, acción social y transferencia de tecnología que le confieren al LanammeUCR.

2. INTRODUCCIÓN

El termino lahar, proveniente de Indonesia cuyo significado es flujo de detritos, flujo transicional o flujo hiperconcentrado proveniente de un volcán que baja por un cauce. Su origen requiere una fuente de agua, material piroclástico no consolidado, laderas con pendientes pronunciadas y un mecanismo disparador como erupciones volcánicas, lluvias torrenciales o terremotos. Pueden darse al mismo tiempo de la actividad volcánica o post-eruptivos. Requieren suelos saturados, que se puede atribuir a: colapso de lago cratérico, derretimiento de cobertura de nieve/glaciar, precipitación excesiva o represamiento de cauces. (Sigurdsson *et al.*, 1999).

Dependiendo de la pendiente del volcán y la energía potencial, los lahares pueden viajar decenas de kilómetros desde su fuente de origen hasta su depósito final y su velocidad puede variar entre 30 a 100 km/h, dependiendo del porcentaje de agua y de la densidad de los materiales. Son eventos sumamente erosivos, ya que al mismo tiempo que incorporan sedimento, cortan las laderas y escarpes de las terrazas fluviales, sin embargo, su fuerza erosiva disminuye cuando se movilizan por una roca muy resistente o gradientes bajos (Sigurdsson *et al.*, 1999).

Los lahares fluyen desde sitios con alta energía potencial a zonas de baja energía, es por ellos, que los patrones de flujo se dirigen hacia el fondo de los ríos, transportándose a lo largo del cauce, modificando el paisaje existente y ocasionando destrucción en la infraestructura civil. Más adelante en este documento se mencionaran los principales lahares históricos recientes que han ocurrido en Costa Rica y que han generado algún tipo de afectación.

3. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO

Determinar las posibles áreas de inundación generadas por lahares alrededor del volcán Turrialba mediante el conjunto de herramientas para ARCGIS llamado LAHARZ. Este conjunto de herramientas fue desarrollado y cedido gratuitamente por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en ingles). El set se puede descargar gratuitamente del sitio web (<http://pubs.usgs.gov/of/2014/1073/>), el USGS pide como requisito mencionar que los modelos fueron realizados utilizando este conjunto de herramientas. Los resultados se utilizaron para determinar los sitios puntuales de intersección de las zonas de inundación por lahares con la red vial nacional. Usualmente estas intercesiones corresponden con puentes.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO

- Realizar una validación empírica del software LAHARZ para un caso histórico en Costa Rica (Irazú 1963-1965).
- Plantear posibles escenarios con el modelo LAHARZ que muestren las zonas de amenaza por lahares del Turrialba para la zona objeto de estudio.
- Determinar cuáles puentes de las Rutas 32, 10, 230 y 218 entre otras podrían verse afectadas por el impacto directo de posibles lahares.
- Hacer una clasificación de las zonas de amenaza según los resultados obtenidos del modelado con LAHARZ.

5. UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Topografía y rutas nacionales dentro del área de estudio

La zona de estudio abarca un área aproximada de unos 2600 km², incluye las cimas de los volcanes Turrialba e Irazú con altitudes máximas cercanas a los 3400 m s.n.m. los flancos volcánicos con altitudes promedio de 1800 m s.n.m. y las zonas bajas con altitudes de 200 m s.n.m. (Figura 1). Las rutas nacionales que se ubican dentro de los edificios volcánicos del Irazú y Turrialba y son parte del análisis de zonas que podrían tener por afectación por lahares son: 10, 32, 218 y 230 (Figura 1).

5.2 Condiciones climáticas del área de estudio

La precipitación promedio anual para el sector del Caribe de los volcanes Irazú y Turrialba varía entre 2200 - 8000 mm/año. Mientras que para el sector SW, S y SE de estos volcanes, la precipitación promedio anual es de entre 1800 - 4000 mm/año (Bolaños et al. 2005). En este trabajo se utiliza el supuesto que los posibles lahares son disparados por las lluvias típicas de la estación lluviosa en ambos sectores.

El sector de la vertiente Pacífico y los sectores S y SE del volcán Turrialba presentan una estación seca bien marcada que puede extenderse hasta por 5 meses, usualmente entre Diciembre y Abril/Mayo. Mientras que el sector de la vertiente Caribe no presenta una estación seca tan

marcada (Bolaños et al. 2005). Esto se refleja en la cantidad de lluvia promedio anual así como en la erosión que presentan las laderas volcánicas hacia cada sector del edificio volcánico (Figura 1).

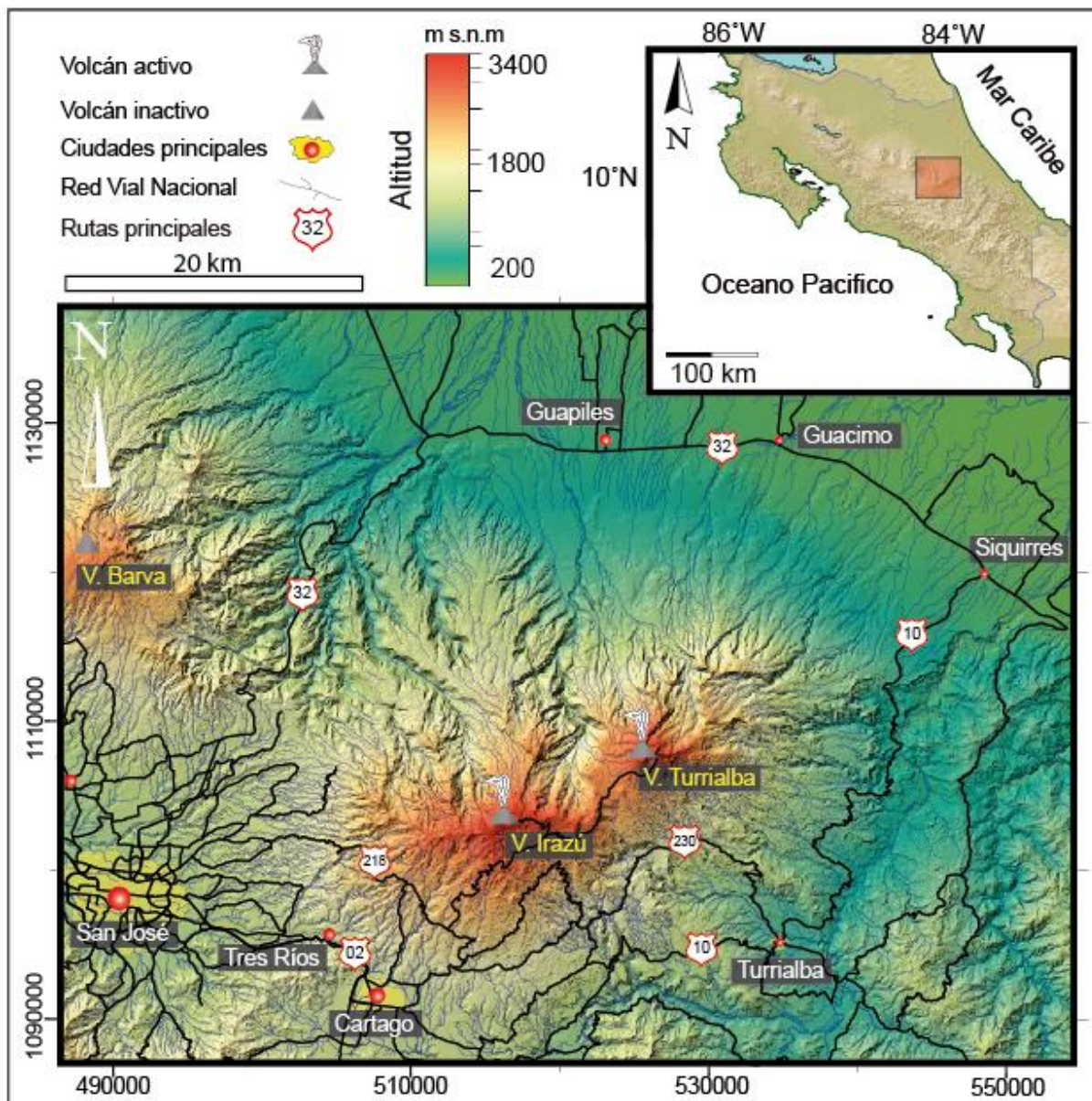


Figura 1. Ubicación del área de estudio sobre un modelo de elevación digital, generado a partir de cartografía Terra 1998 y del IGN editada y mejorada. Sistema de coordenadas (CRTM-2005). Se muestra el volcán Turrialba, actualmente activo y las principales rutas nacionales que lo rodean en sus flancos y zonas bajas.

5.3 Geomorfología del área de estudio

Geomorfológicamente el área de estudio, presenta unidades de origen volcánico, sedimentarias y fluvio-erosivas. Con un análisis de pendientes y drenajes (Figura 2), se clasificaron las principales unidades según su origen con lo que se generó una mapa geomorfológico general de la zona de estudio (Figura 3). Con este insumo se pueden mostrar las relaciones que podrían existir entre la geomorfología y la incidencia de lahares alrededor del volcán Turrialba. La información generada en esta sección fue base para elegir los sitios de disparo de lahares en el programa LAHARZ.

Las pendientes en los valles fluviales y cañones del sector NE pueden llegar a alcanzar valores superiores a 55° mientras que los flancos de los macizos presentan ángulos promedios entre $16 - 35^\circ$. Existen algunos conos satélites y campos de coladas de lava en el Irazú y Turrialba con morfologías, típicas que hay sido estudiadas en detalle (Soto 2012, Alvarado & Vega 2013).

Las zonas donde se ubican las principales ciudades dentro del área de estudio (Cartago, Turrialba, Guápiles, Guácimo y Siquirres), se ubican en zonas planas con pendientes $< 8^\circ$, en algunos casos estas zonas coinciden con los abanicos aluviales donde los ríos depositan sus materiales al perder energía.

El sistema de drenaje general del área de estudio es de tipo radial al rededor de los volcanes Irazú y Turrialba. Sin embargo, en algunos sitios donde hay presencia de fallas y estructuras se puede presentar como dendrítico y hasta subparalelo. Al llegar a las zonas planas especialmente en sector Caribe, los ríos al perder energía presentan un comportamiento entrelazado y meándrico.

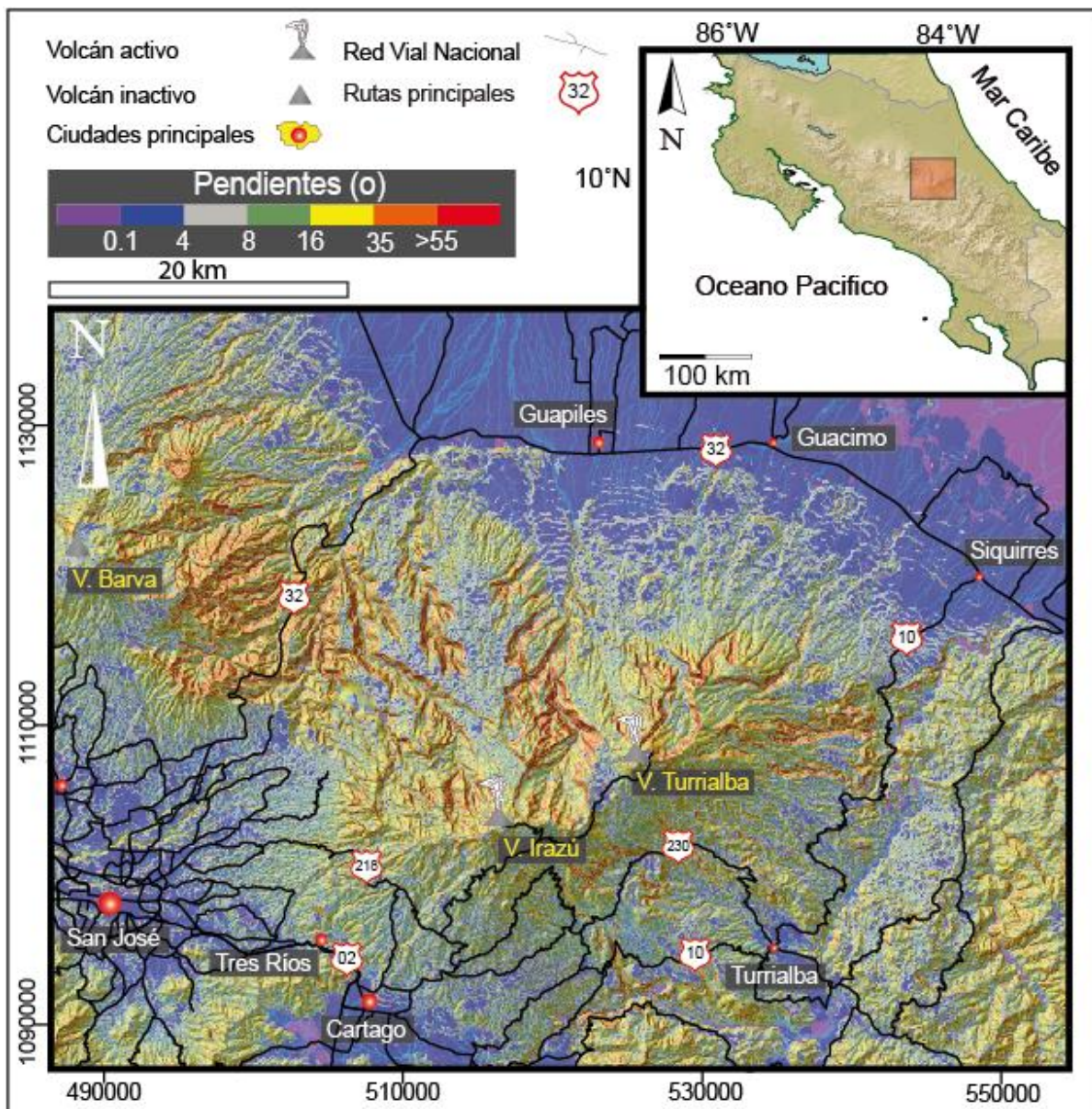


Figura 2. Modelos de elevación digital con información de las pendientes de la zona de estudio. Se nota como los sectores norte, noreste y noroeste de los volcanes Irazú, Turrialba, y los Cerros Zurquí presentan las pendientes más fuertes del área de estudio. Las pendientes más bajas están ubicada en el sector norte y coinciden con la ubicación de Guápiles, Guácimo y Siquirres. Sistema de coordenadas (CRTM-2005)

Los Cerros del Zurquí por donde atraviesa parte de la Ruta 32 en el sector montañoso, se encuentran delimitados al norte y al este por los valles fluviales formados por los ríos General y Sucio respectivamente. Se caracterizan por laderas de alta pendiente entre 35° a 55° , muy susceptibles a la erosión fluvial. Son alargados y tienen un fondo del cauce angosto que se va ensanchando conforme se acercan a las zonas bajas. Además algunos evidencian alineamientos que pueden corresponder con alineamientos o posibles fallas geológicas.

En las laderas bajas del sistema montañoso del Zurquí, principalmente al suroeste, se localizan áreas de tipo denudacional volcánico de bajas pendientes con ángulos entre 0° a 15° . Éstas son superficies onduladas a planas con un patrón de drenaje paralelo, que corresponden principalmente a campos de deposición de lahares y ceniza.

En los alrededores del volcán Barva y al noroeste de los cerros del Zurquí se delimita la zona denudacional volcánico con pendientes muy altas, de más de 55° . Presenta un patrón de drenaje radial ya que se desarrolla alrededor del cono del volcán. Además al sureste, se encuentra el cono volcánico del Volcán Irazú el cual también presenta pendientes muy altas, pero en su mayoría son pendientes moderadas de entre 15° a 35° y también se caracteriza por un patrón de drenaje radial.

Al noreste de la zona del Zurquí se encuentran las zonas de muy baja pendiente que corresponden con los abanicos aluviales. Por lo tanto, son superficies planas onduladas con patrón de drenaje dendrítico y ríos entrelazados, como el Chirripó desarrollándose dentro de la llanura aluvial. Esta misma morfología de abanicos se extiende en toda la zona baja del flanco norte y noreste del Volcán Turrialba.

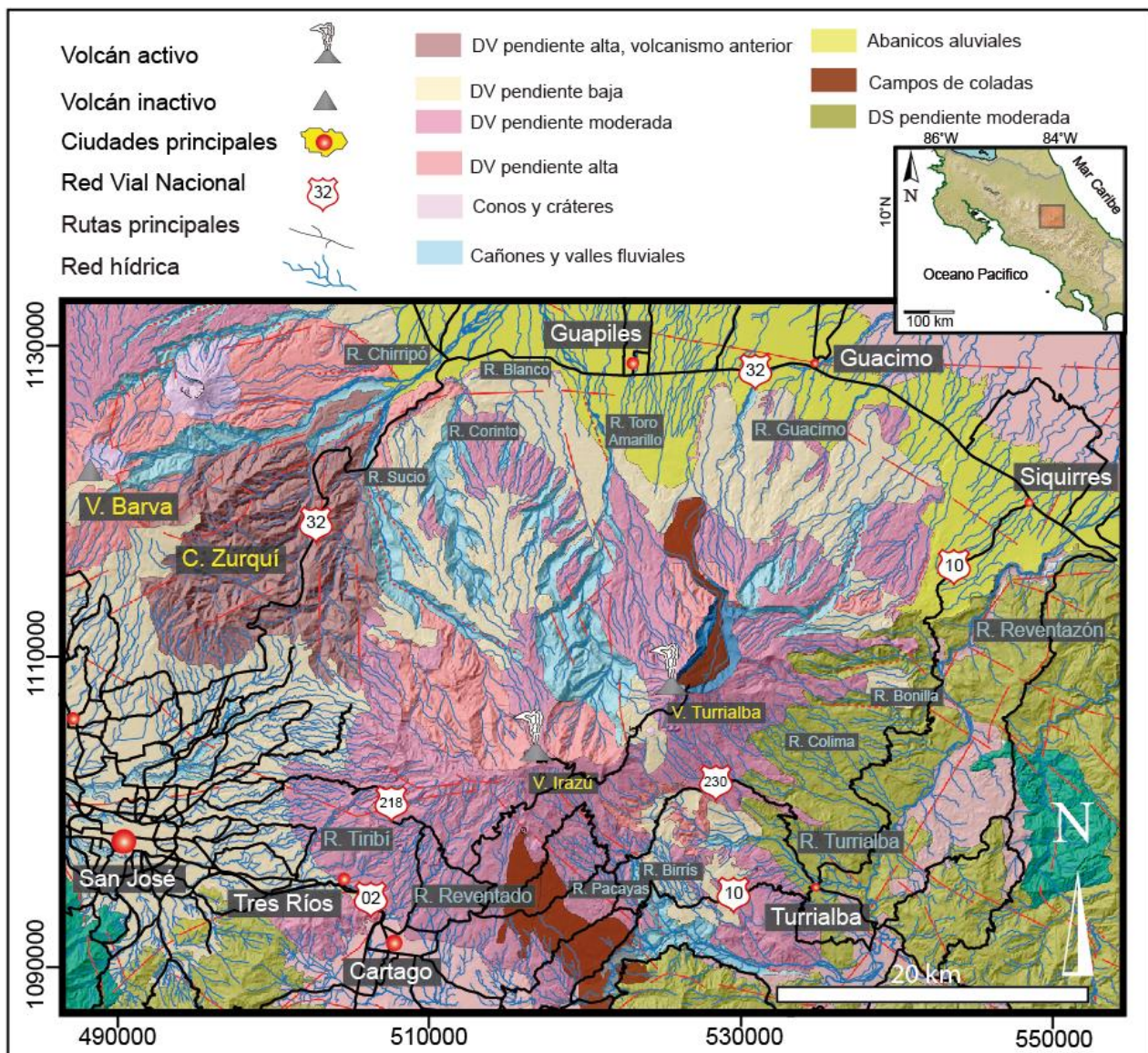


Figura 3. Mapa geomorfológico general del área de estudio. Se muestran los principales ríos en los que se utilizó software LAHARZ para modelar los flujos que podrían afectar la red vial nacional. Sistema de coordenadas (CRTM-2005).

5.4 Geología del área de estudio

En los sectores SW, S, SE y E del volcán Turrialba afloran rocas sedimentarias clásticas y bioclásticas que varían en edad desde Paleoceno, Mioceno Inferior y Superior hasta Plioceno-Pleistoceno. Su origen varía entre continental a marino y representa el basamento del Volcán Turrialba. En el sector NE del Turrialba (Cerro Guayacán) afloran basaltos alcalinos de más de 1 millón de años de edad. Los volcanes Irazú y Turrialba son estratovolcanes complejos. Se han construido aproximadamente en el último millón de años (Alvarado & Gans 2012) por intercalación de flujos de lava, flujos piroclásticos y material de caída (ceniza, lapilli, bloques, etc). Geoquímicamente, la composición de sus productos varía desde basaltos hasta dacitas. Los Cerros del Zurquí, también corresponden con edificios volcánicos, pero más viejos (edad > 1 millón de años), erosionados e inactivos. Finalmente en las zonas bajas del sector N del volcán Turrialba aflora material coluvio-aluvial transportado por los ríos.

6. METODOLOGÍA, ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

La modelación de los lahares se realizó con el programa conocido como LAHARZ, es un modelo empírico que fue desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos para delimitar objetivamente las zonas de amenaza de lahares utilizando modelos de elevación digital (MED). La metodología está desarrollada para que cualquier persona que pueda manejar sistemas de información geográfica (SIG) pueda reproducir los resultados siempre y cuando utilice los mismos volúmenes de los lahares y el MED. A continuación se describe el procedimiento utilizado en este trabajo.

6.1 Funcionamiento básico de LAHARZ

La aplicación del modelo LAHARZ se da para la plataforma ARC-GIS y utiliza ecuaciones derivadas estadísticamente de datos de flujos de lahares históricos en diferentes lugares del mundo (Schilling, S. P., 2014). Permite calcular una zona de amenaza próxima y mediante sus ecuaciones utiliza un modelo de elevación digital para la estimación de zonas de amenaza distantes según los volúmenes que se le asignen.

6.1.1 Supuestos con los que trabaja LAHARZ

El software funciona bajo ciertos supuestos y premisas que hay que considerar para su modelaje y análisis de los resultados obtenidos. A continuación se mencionan los más importantes:

1. Las inundaciones por lahares pasados pueden suministrar la información base para predecir posibles inundaciones futuras.
2. Las zonas de amenaza distantes están confinadas a los valles y se dirigen a los flancos del volcán.
3. El volumen del lahar controla mayormente la extensión de la inundación que se da río abajo.
4. Los lahares muy voluminosos ocurren con menor frecuencia.
5. Nadie puede predecir el tamaño que tendrá el próximo lahar que descenderá por un río (Iverson et al, 1998).

Uno de los puntos más importantes a considerar es la selección del tamaño de volumen para los lahares que podría generar el volcán Turrialba, pues en conjunto con la información del elevación y el sitio de disparo del lahar es lo que va a controlar el alcance del flujo.

6.1.2 Funcionamiento del software LAHARZ

Para modelar los flujos con LAHARZ se derivaron de forma estadística las ecuaciones que relacionan el volumen del lahar con el área inundable de la sección transversal y con él área inundable planimétrica (Iverson et al, 1998). Dichas formulas permiten al LAHARZ controlar los límites laterales de la sección transversal (A) y determinar el área de inundación planimétrica (B) (Figura 4). Mediante la relación de la caída vertical con la distancia horizontal llamada H/L (Figura 4), se definen las fronteras de la zona proximal de amenaza y distal, donde sus valores de H/L están en el rango de 0.1 a 0.3, dependiendo del tamaño y tipo del evento proximal (Iverson et al, 1998).

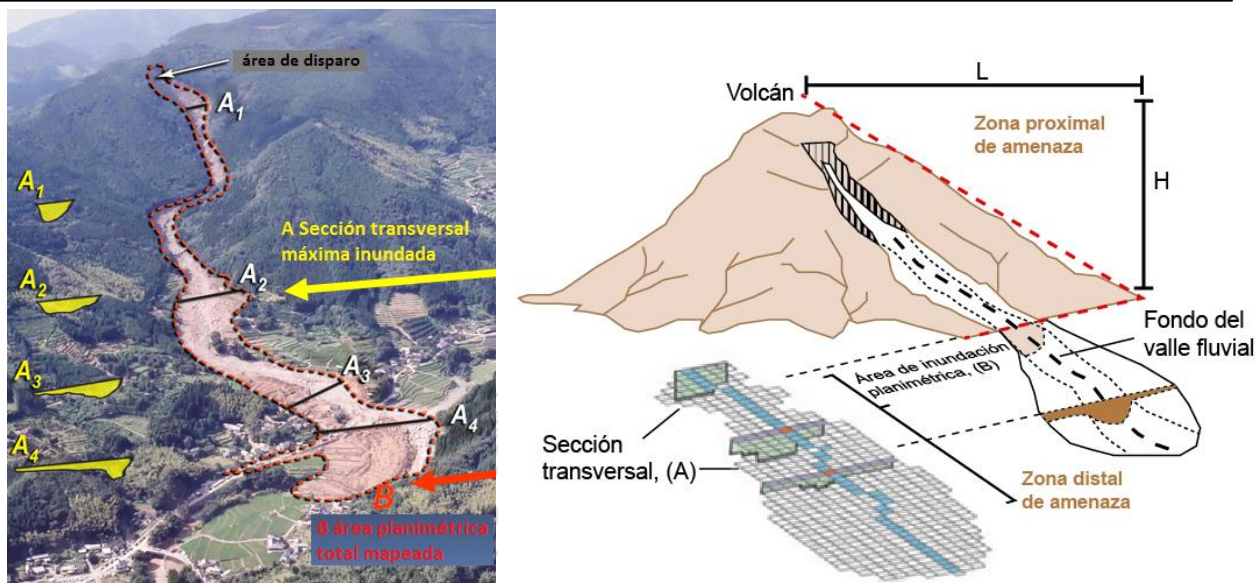


Figura 4. En la imagen de la izquierda, se muestran el área de disparo del lahar, los límites laterales de la sección transversal (A) y el área de inundación planimétrica. En la figura de la derecha, se muestra un esquema del funcionamiento conceptual de LAHARZ, modificado de Iverson et al., 1998

6.1.3 Insumos

Para su funcionamiento el LAHARZ requiere tres insumos:

1. El modelo de elevación digital (DEM), que es utilizado para determinar la forma de cada sección transversal,
2. El tamaño de los volúmenes que se van a modelar
3. La ubicación de la zona de disparo en la cual se ejecutará el cálculo del flujo.

Cada uno de estos insumos deben ser procesado y/o seleccionado según se requiera, a continuación se detalla cada uno de los insumos utilizados para modelar los lahares del volcán Turrialba:

6.1.3.1 Modelo de elevación digital (DEM)

Para realizar el MED del área de estudio, se trabajó con dos fuentes para realizar la interpolación de datos, la primera fueron las curvas de nivel escala 1:25 000 del proyecto Terra 1998 con las cuales fue posible elaborar la mayoría del modelo, la segunda fuente fueron las curvas de nivel escala 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) las cuales, se utilizaron

para completar los sectores donde no se tenía información 1:25 000. Los nombres de la hojas topográficas del Instituto Geográfico Nacional que se utilizaron para generar el MED son: Poás, Guápiles, Guácimo, Bonilla, Carrillo, Barva, Abra, Istarú y Tucurriquí.

La resolución espacial del MED es muy importante para que el software LAHARZ genere resultados más cercanos a la realidad, este debe tener coordenadas métricas (X, Y, Z) y debe contener dentro de su área el edificio volcánico así como la sección aguas abajo por donde se modelaran los flujos (Schilling, S. P., 2014).

Para el volcán Turrialba el MED se generó con un tamaño de celda de 10 x 10 metros tomando en cuenta la recomendación de los autores del software y la necesidad de que los resultados sean más precisos, ya que un MED con tamaños de celda de kilómetros no podría ser utilizado para el cálculo de los drenajes que sean de mayor resolución (Schilling, S. P., 2014), por lo que la recomendación es que el MED tenga una resolución de entre 1 a 30 metros como máximo.

6.1.3.2 Volúmenes de lahares

El volumen asignado a los lahares que se modelan, es utilizado por el software LAHARZ para modelar las zonas de inundación, de tal forma que un volumen mayor tendrá mayor alcance río abajo que uno de menor tamaño. Para el caso del volcán Turrialba, hasta el momento no se tienen documentados volúmenes de lahares históricos, debido a esta situación se extrapolaron los datos registrados del volcán Irazú entre 1963-1965. La posibilidad de que ocurran lahares con volúmenes menores son más frecuentes durante los periodos de actividad de los volcanes que los de mayor volumen.

Durante el periodo eruptivo del volcán Irazú entre 1963 - 1965 se dio una gran acumulación de ceniza en los flancos del volcán que causaron corrientes laháricas. Aguilar & Alvarado, (2014), estiman que los lahares de Taras - Cartago tuvieron un volumen total de diez millones de metros cúbicos. Este fue el dato que se utilizó en la modelación de los eventos que se podrían dar en el Volcán Turrialba. Este volumen total, fue dividido en tres volúmenes menores de dos, tres y cinco millones de metros cúbicos debido a que la posibilidad que un evento ocurra con estos valores es mayor que un solo evento de 10 millones de m³. Más adelante se muestra una recreación de estos lahares en el sector de Taras-Cartago.

6.1.3.3 Zona de disparo y ríos evaluados

Los puntos de inicio fueron seleccionados utilizando el sistema de coordenadas CRTM05 y se utilizó el mapa de distribución y espesor de cenizas compuesto por cuatro periodos para el volcán Turrialba propuesto por Soto en 2012, en el cual se presenta la dinámica que podría tener el material acumulado por una posible erupción de tipo vulcaniana. (figura 5). Una erupción vulcaniana podría tener una columna menor a 20 km de altura y depositar material hasta en un radio de 25 km aproximadamente según la dirección del viento.

Como se ve en la figura 5 existen dos rangos de espesores de ceniza. La zona más cercana al edificio volcánico representada con tonalidades de color morado, presentaría espesores de 20 a 3000 milímetros, mientras que las zonas ubicadas a unos 15 km del volcán representadas por tonalidades celestes tendrían espesores de 1 a 20 milímetros (Soto, 2012). Debido a la posibilidad existente de que en el área de mayor rango haya más depositación de cenizas se decidió tomar las coordenadas de inicio en los ríos principales y en sectores de confluencias ubicados en lugares de mayor pendiente que pudiera aportar más energía al mecanismo disparador del flujo lahárico. En total se tomaron 41 pares de coordenadas de diferentes ríos.

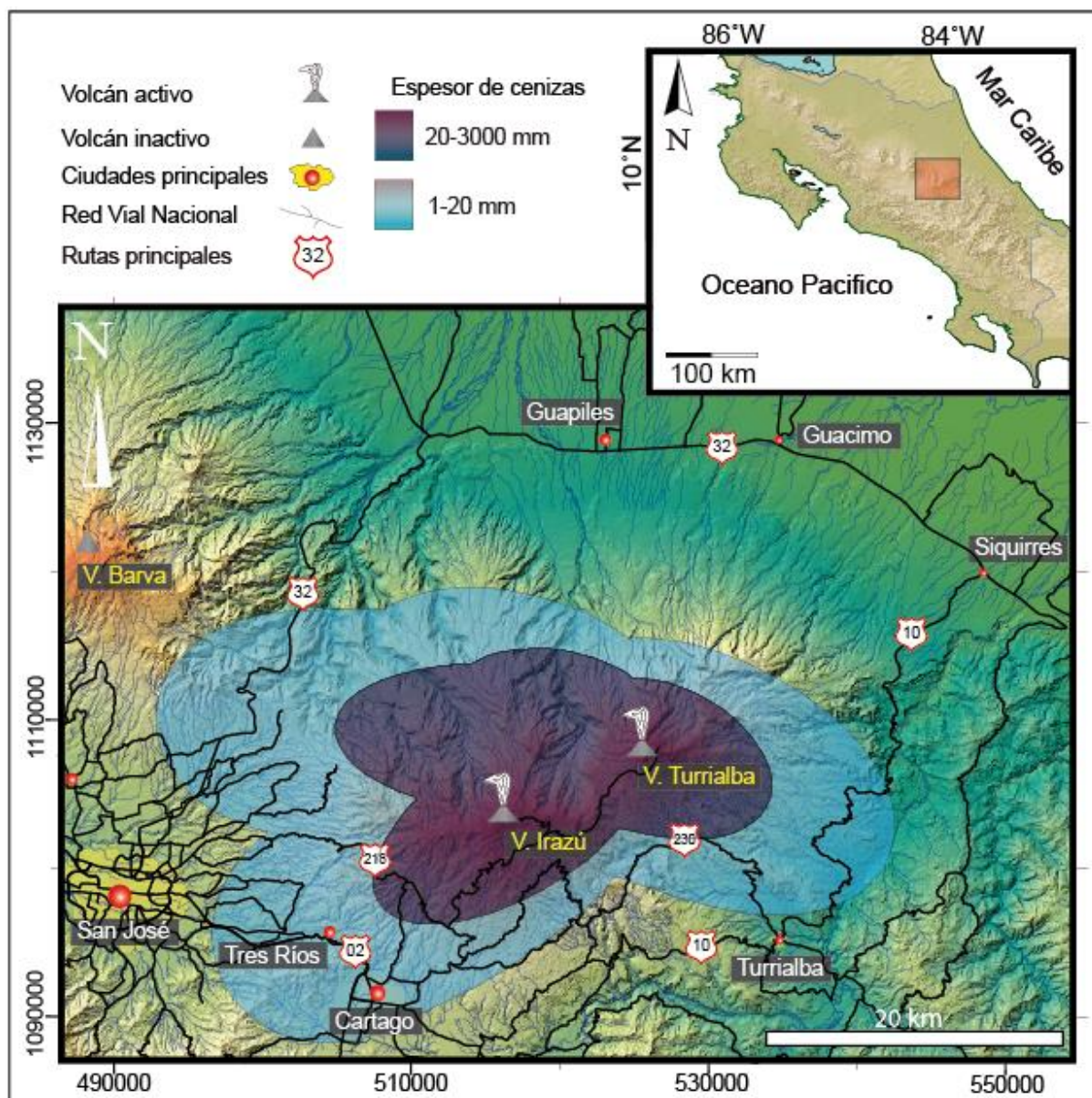


Figura 5. Área de distribución de la ceniza para un evento vulcaniano, combinando 4 periodos del año según la dirección de los vientos, modificado de (Soto, 2012). La información de este mapa junto con los cambios de quiebre de pendiente se utilizaron para elegir los sitios de disparo de los lahares que se modelaron con LAHARZ.

7. LAHARES HISTORICOS EN COSTA RICA

En la historia reciente de Costa Rica varios poblados han sido afectados por lahares, llegando a ocasionar grandes problemas ambientales y destrucción de infraestructura. Entre los principales daños en infraestructura están: corte de vías de comunicación como carreteras, líneas de ferrocarril y puentes; además de servicios básicos como agua y electricidad.

Algunos de los lahares históricos más recientes que han generado afectación a parte de la red vial se resumen a continuación.

7.1 Lahares del volcán Irazú - Eventos 1963-1965

Después de la constante actividad volcánica del Irazú entre los años 1963-1965, en sus flancos se acumuló gran cantidad de ceniza que ocasionó la impermeabilización de los suelos, aumentando la escorrentía y provocando el represamiento de algunos cauces, lo que generó el disparo de varios eventos laháricos que bajaron principalmente por el río Reventado, aunque también se dieron en otros ríos como el Virilla por ejemplo. Las zonas más afectadas por estos eventos se localizaron en el sector de Taras y La Lima de Cartago, donde ocasionaron la destrucción de un total de 300 casas y unas 400 más afectadas, para un aproximado de más de 500 personas sin hogar. También se vieron afectados zonas de cultivo, fábricas y la red vial (Ruta 236) que atraviesa la zona (Aguilar & Alvarado, 2014). En el año de 1963, el 31 de octubre un evento lahárico provocó el desalojo de más de 300 personas de sus hogares, el 2 de noviembre otro evento causó la evacuación de 200 personas y en las fechas 9-10 de diciembre, se contabilizaron un aproximado de 20 fallecidos y hasta 250 personas hospitalizadas (Figura 6). Para el 23 de junio de 1964, se evacuaron a más de 700 personas. Debido a que los eventos se volvieron recurrentes, se instaló un sistema de protección civil que consistía en radios de comunicación para alertar a las personas de las zonas bajas (Aguilar & Alvarado, 2014).

La infraestructura vial y de transporte fue afectada por la destrucción del puente del ferrocarril sobre el río Reventado, interrumpiendo el servicio de trenes entre San José y Puerto Limón. En un solo día el evento lahárico llegó a destruir más de 15 puentes (Aguilar & Alvarado 2014).

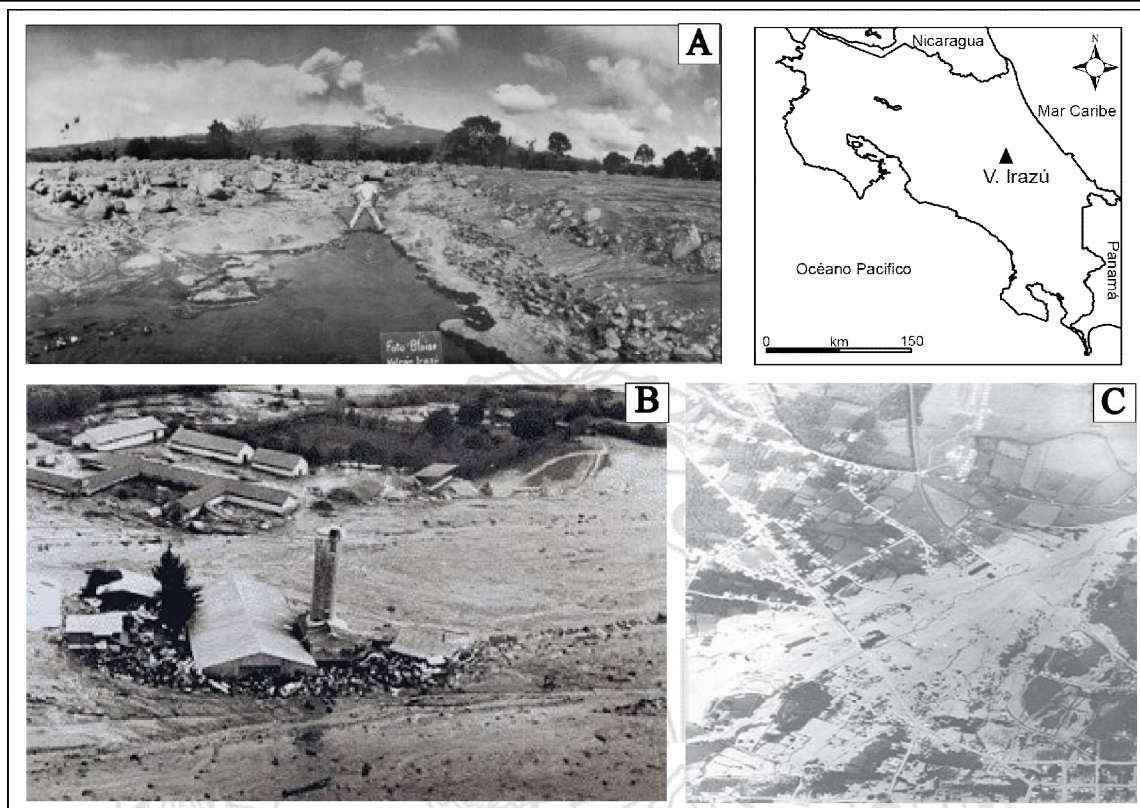


Figura 6. Efectos de lahares de 1963-1964 en el volcán Irazú. A.) Vista general del lahar del 9 y 10 de diciembre de 1963 en el río Reventado. La zona más afectada por estos eventos fue el poblado de Taras. B.) Antigua fábrica de Kativo, completamente destruida, por la actividad lahárica. C.) Fotografía aérea de lahar en el río Reventado, se aprecia su extensión y como el flujo cubrió carreteras y la línea férrea.

7.2 Lahares del volcán Rincón de la Vieja - Eventos 1991, 1998

Los lahares asociados a este volcán son primarios, es decir ocurren al mismo tiempo de la erupción volcánica. Están relacionados con un colapso parcial del lago cratérico al momento de una erupción freática. El agua del lago es expulsada por la fuerza de la erupción y posteriormente se encausa en los diferentes drenajes que bajan del macizo.

En los años 1991 y 1998 los lahares han afectado principalmente los ríos Pénjamo, Azul y quebrada Azufrosa, ubicados en los valles del flanco norte del Volcán. El lahar del 8 de mayo de 1991 tuvo una distancia de 16,6 km del cráter y presentó un espesor máximo de 6 m a una distancia de 6-7 km del cráter. (Paniagua et al., 1996).

En el río Azul superó los 8 m de altura sobre el cauce original, la velocidad de descenso se estimó en 50 km/h (ver Figura 7). Además, en el río Pénjamo cerca de su puente sobre el camino hacia la región de Buenos Aires, la avalancha alcanzó 20 m de altura, rebalsando su cauce aproximadamente 75 m a ambos lados. (Paniagua et al., 1996).

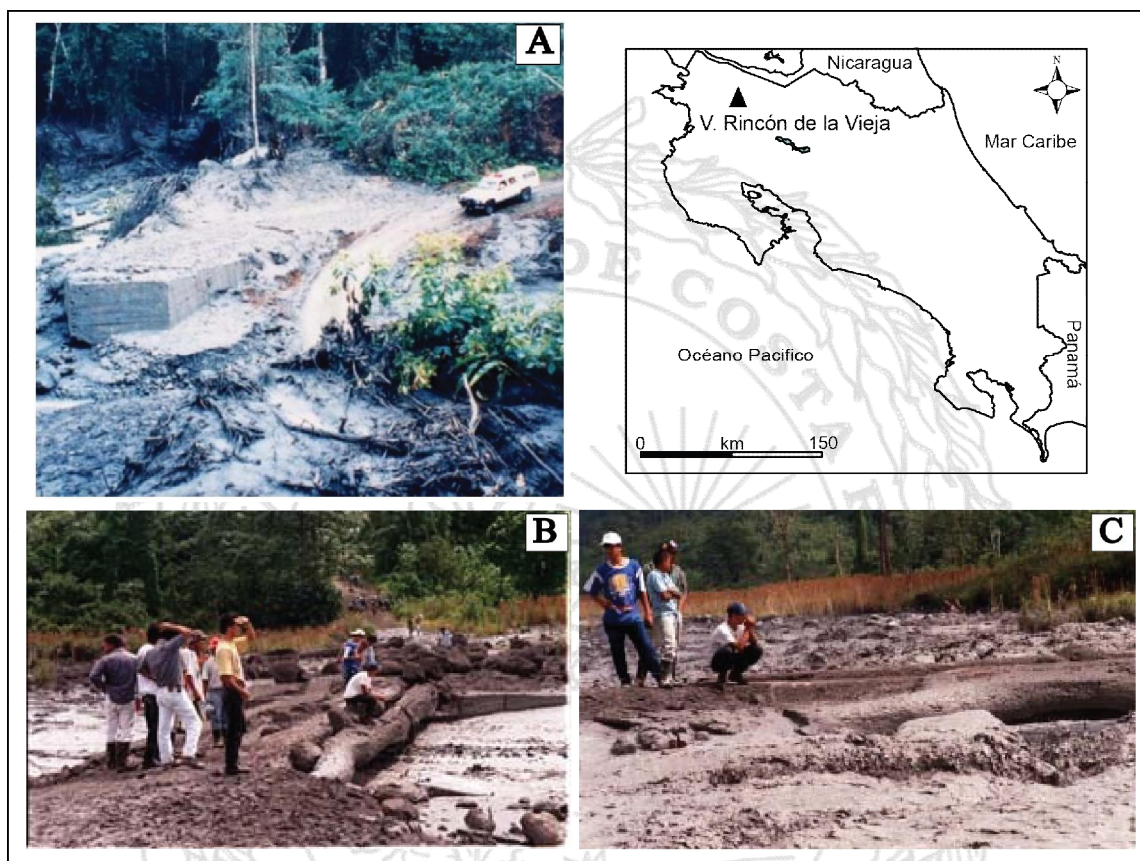


Figura 7. En los años 1991 y 1998 los ríos más afectados por el paso de lahares producidos por la actividad del Volcán Rincón de la Vieja, son los ríos Pénjamo, Azul y quebrada Azufrosa. A.) Puente del río Azul, arrasado por el lahar el 8 de mayo de 1991. B.) y C.) Destrucción del puente del río Pénjamo por el paso del lahar.

7.3 Lahares del volcán Poás - Eventos 2009, 2013

Los lahares más recientes que han ocurrido en el edificio volcánico del Poás se atribuyen directa e indirectamente con el terremoto de M_w 6,2 del 8 de enero del 2009 (Alvarado, 2010). El terremoto originó miles de deslizamientos en los alrededores de la zona provocando el desplazamiento de material volcánico saturado, en las laderas que luego se encausaron por los

ríos Sarapiquí, Seco, Toro, María Aguilar, Poasito, entre otros. (Figura 8). Esta situación origina la afectación a varios puentes: como: puente en Los Ángeles, Sarapiquí, (arrasado), puentes dañados en Poasito, Río Cuarto de Grecia, Bajos del Toro, y río seco (colapsados). Debido a la inestabilidad de las laderas así como materiales acumulados en ellas, varios años después del terremoto de Cinchona, aún se siguen generando deslizamientos que producen lahares disparados por las lluvias de la zona. Un caso de este tipo se dio en setiembre del 2013 cuando un torrente de agua y escombros destruyó el puente sobre el río la Paz frente a la catarata del mismo nombre (Figura 8).

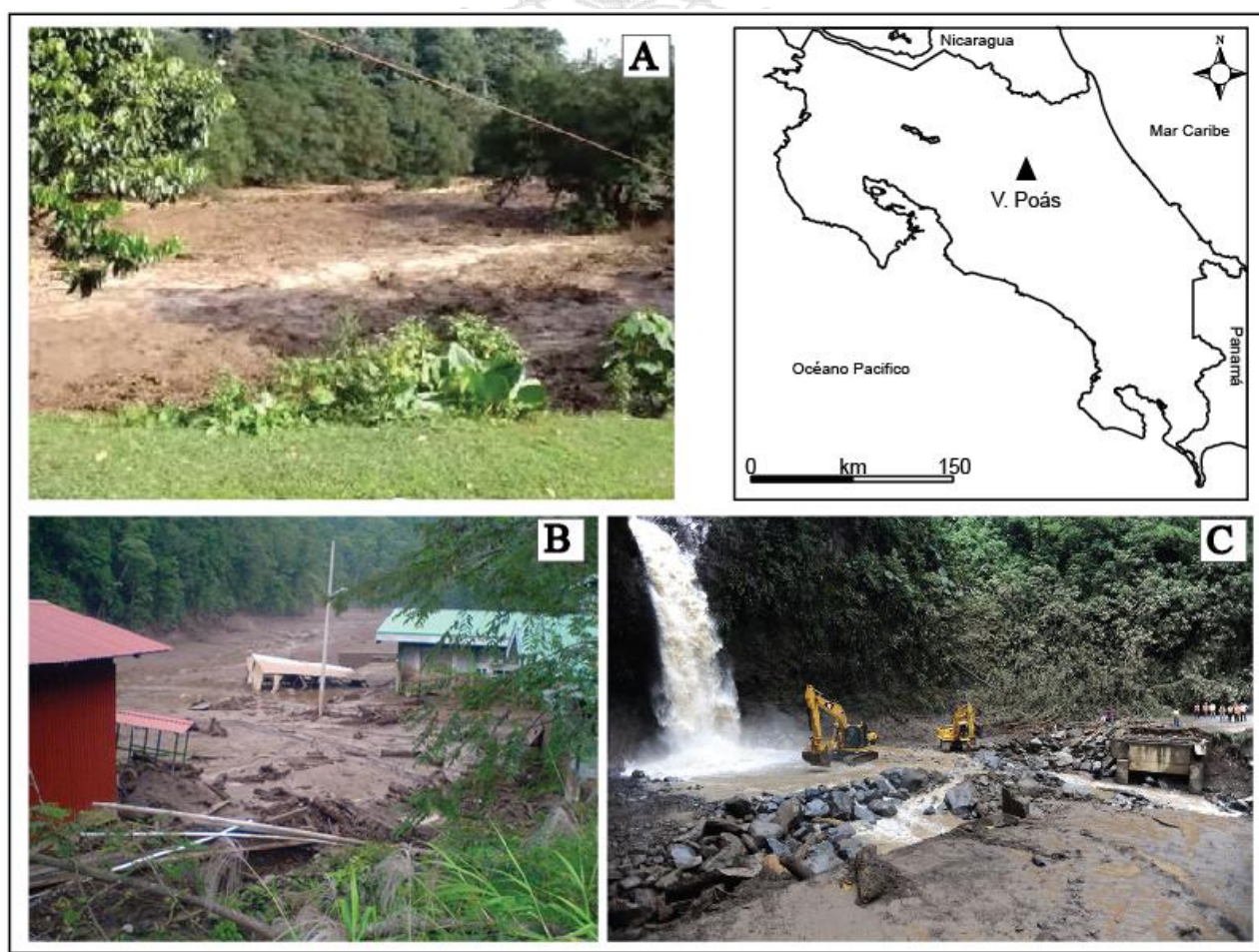


Figura 8. A.) Río Sarapiquí después del terremoto del 8 de enero 2008. B.) Río Sarapiquí en el sector de la casa de maquinas del proyecto hidroeléctrico Cariblanco. C.) Puente frente a la catarata de la Paz, Poasito, completamente destruido por un torrente de agua y escombros que bajo en setiembre del 2013.

7.4 Lahares del volcán Turrialba - Eventos 2014

El lahar más reciente que ha ocurrido en el edificio del volcán Turrialba, se dio el 4 de noviembre del 2014 en el cauce de la quebrada Paredes, a consecuencia de la actividad volcánica ocurrida durante el 2014 y las constantes precipitaciones; este contenía depósitos de ceniza, pequeños clastos, lodo y troncos (ver Figura 9). Los troncos y escombros provienen de la vegetación que se ha visto afectada durante los últimos años por la desgasificación del volcán. Podrían esperarse más de estos eventos apenas inicie la estación lluviosa.



Figura 9. Se observa material volcánico acumulado por la reciente actividad (ceniza principalmente) y así como troncos que corresponden con la vegetación afectada por los gases volcánicos durante los últimos años. Este material reciente y los troncos han sido transportados por lahares menores en quebrada Paredes el 4 de noviembre 2014. Fotografía de la Red Sismológica Nacional.

8. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la calibración de LAHARZ con el volumen estimado para los eventos generados por el volcán Irazú en Taras 1963-1965 así como los lahares que podrían llegar a ocurrir en los cauces alrededor del volcán Turrialba en caso de que este volcán llegara a presentar una erupción similar o mayor a la del volcán Irazú entre 1963-1965.

8.1 Modelación y calibración de lahares del volcán Irazú 1963-1965

Debido a que el LAHARZ es un modelo empírico, para corroborar su calibración para la zona de estudio se realizó una comparación cualitativa de los resultados obtenidos con el software y los eventos generados por el Volcán Irazú en su periodo eruptivo entre 1963-1965 (Figura 10A). La comprobación visual se realizó mediante la superposición de los resultados de LAHARZ con una fotografía aérea tomada en el año 1964 justo después del flujo lahárico que afectó parte de Taras y Cartago sobre el río Reventado (Figuras 10B y 10C). Utilizando sistemas de información geográfica se realizó una georreferenciación en el sistema de coordenadas CRTM05 de la imagen. Sin embargo la fotografía no cuenta con los datos necesarios para que sea sometida a un proceso de ortorectificación. A pesar de esto, visualmente se observa una muy buena correlación entre el área planimétrica cubierta por los lahares sintéticos y el área afectada por los lahares reales (Figuras 10B y 10C).

Como ya se describió en la sección de metodología, la precisión del MED con el que se realizan los modelajes de LAHARZ es muy importante pues si este no tiene una buena resolución espacial es posible que las formas de los lahares no puedan representarse correctamente del relieve. Cuando esto ocurre, son frecuentes la aparición de "picos" en las zonas planas de inundación donde los datos topográficos no son los más adecuados (Iverson et al, 1998). En la figura 10A y 10C se observa esta situación, específicamente en el límite correspondiente al lahar de 5 millones de m³ (color morado). Sin embargo el modelo en general sigue presentando una forma aceptable y coincide muy bien con la zona por la cual bajaron los lahares del volcán Irazú en 1964 que se observa en la fotografía aérea.

Con base en los resultados obtenidos al modelar los lahares del Irazú 1963-1965, se considera que es factible utilizar el mismo volumen y distribución en tres eventos para modelar los

lahares que podrían ser disparados desde distintos puntos de los volcanes Turrialba e Irazú, para así generar posibles escenarios que se puedan dar por la actividad del volcán Turrialba.

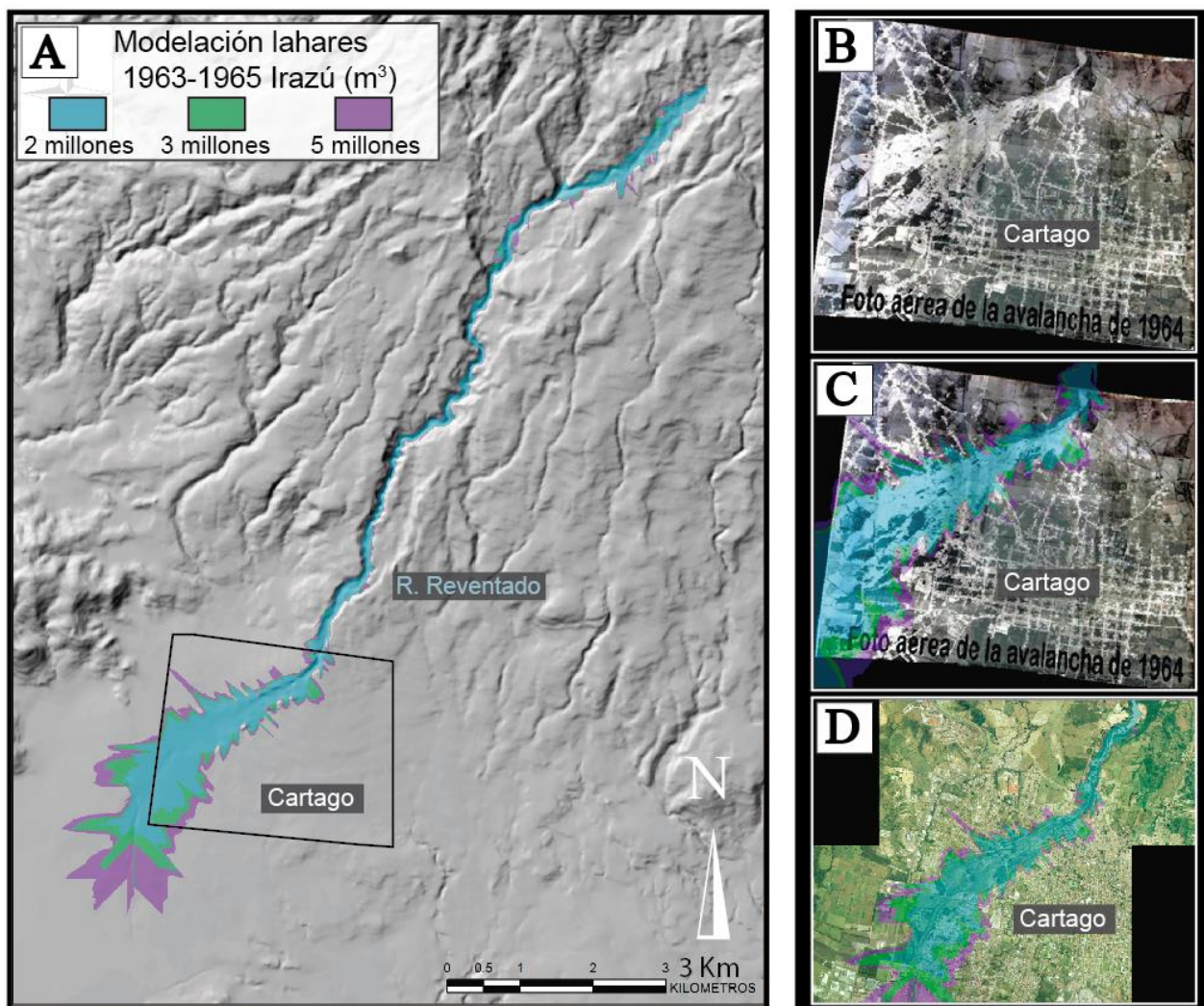


Figura 10. A.) Resultado de modelación con LAHARZ para el volcán Irazú. Se recrearon los lahares del río Reventado con un volumen total estimado en 10 millones de m^3 divididos en 3 eventos. 5 , 3 y 2 millones de metros cúbicos respectivamente. B.) Imagen aérea disponible de los lahares del Irazú hasta 1964 que afectaron Taras, Cartago (Tomada de Fotos Históricas de Costa Rica). C.) Superposición de la modelación realizada con LAHARZ sobre la fotografía aérea. Se observa que los resultados dentro del área afectada de la fotografía aérea son cercanos a la realidad, representando la forma y distribución del material. D.) Superposición de modelaje realizado con LAHARZ y un fotografía aérea de la zona del año 2005 (SNIT-CR), nótese como la densidad de infraestructuras ha aumentado considerablemente con respecto a la imagen de 1964.

8.2 Modelación de lahares alrededor del volcán Turrialba

Se realizó una simulación con el mismo volumen de lahares que afectaron Taras entre 1963-1965, (10 millones de m^3) distribuidos en tres eventos según su volumen (2, 3 y 5 millones de metros m^3) y disparados desde diferentes cauces alrededor del volcán Turrialba, todos dentro del área definida por Soto (2012) como zonas de mayor acumulación de ceniza en una posible erupción de tipo vulcaniana. Los resultados son presentados en la figura 11.

8.2.1 Sector noroeste de la zona de estudio

Según los resultados obtenidos de la modelación realizada, dentro del sector del Parque Nacional Braulio Carillo el puente ubicado cerca de donde se unen los ríos La Hondura y Sucio, se vería afectado por cualquiera de los tres lahares modelados. Esto debido a que todos los eventos sobrepasan el sitio donde se localiza esta estructura. Esta situación se daría tanto para los eventos que bajarían por el cauce del río La Hondura como los que provienen de la zona alta del río Sucio. Hay que destacar, que con el volumen modelado ninguno de los eventos llegaría hasta donde se encuentra el puente sobre el río Chirripó de la Ruta Nacional No. 4. La otra situación que hay que destacar es que la cuenca del río Sucio es más susceptible a generar lahares no solo por la posible acumulación de ceniza que vendría del Turrialba, sino por los deslizamientos y zonas de intensa alteración hidrotermal que existen actualmente en la zona alta de esta cuenca, en el flanco noroeste del volcán Irazú (Figura 11).

Según los resultados de los lahares modelados en el cauce del río Corinto, el puente de la Ruta Nacional No. 32 sobre este cauce, se podría ver afectado por cualquiera de los tres eventos sugeridos (Figura 11).

La situación que se podría presentar en los puentes de la Ruta Nacional No. 32 sobre los ríos Blanco y Toro Amarillo, parece ser más favorable que en los casos anteriores, ya que en estos dos casos, ninguna de las áreas de inundación de los lahares modelados llegaría a hasta donde se ubican los puentes (Figura 11). Esto no significa que si ocurriera un lahar con un volumen superior a los 10 millones de m^3 , estos puentes no van a ser afectados.

8.2.2 Sector noreste de la zona de estudio

Hacia el sector noreste del volcán Turrialba no se modelaron los eventos con volumen de 10 millones de m^3 debido a que las zonas de disparo en este sector del volcán estarían ubicadas fuera del anillo de máxima acumulación de ceniza propuesto por Soto (2012). Más adelante se presentan los resultados de tres eventos de menor tamaño en este sector del volcán pero con el sitio de disparo ubicado en el segundo anillo de acumulación de ceniza sugerido por Soto (2012).

8.2.3 Sector sureste de la zona de estudio

Este es el sector del volcán Turrialba donde más rutas nacionales están expuestas a ser afectadas por lahares. Los puentes de las rutas 10, 230 y 415 se podrían ver afectados por cualquiera de los 3 lahares modelados. Los ríos que podrán afectar los puentes de las rutas antes mencionadas son: En la Ruta 10, Río Birrís y un Canal de Riego., En la Ruta 230, los ríos Colorado, Turrialba, Pacayas, Birrís, Ortiga, Aquiares, Coliblanco y un río sin nombre. En la ruta 415, los ríos que podrían causar afectación a los puentes son: Colorado, Turrialba, Aquiares, Vara, Danta, Guayabo, Lajas, Colima y uno sin nombre (Figura. 11)

8.2.4 Sector suroeste de la zona de estudio

En este sector, la cabeceras de las cuencas y las nacientes de los ríos evaluados están ubicados sobre el edificio del volcán Irazú. Se trata de los ríos Tiribí y Reventado. Estos podrían afectar las rutas 2 y 10 respectivamente ya que los tres eventos modelados sobrepasan la ubicación de los puentes sobre estos cauces. Hay que destacar que según el modelo realizado, un lahar con un volumen de 5 millones de m^3 podría llegar hasta la zona de Hacienda Vieja en Curridabat.

En el cuadro 1, se presentan los cauces que fueron incluidos en el modelaje y las rutas que podrían llegar a afectar los tres lahares que juntos tendrían un volumen de 10 millones de m^3 .

Cuadro 1. Lista de puentes que podrían ser afectados por lahares en rutas nacionales, según el modelo de tres eventos de 5, 3 y 2 millones de m³ respectivamente.

Ruta No.	Puente sobre río	Ruta No.	Puente sobre río
10	R. REVENTADO B	230	R. PLAYAS
10	R. REVENTADO A	230	R. TURRIALBA
10	R. BIRRIS	230	Q. SIN NOMBRE
10	C. DE RIEGO	230	Q. SIN NOMBRE
32	R. REVENTAZON	230	R. SERENO
32	P. SUP FERROCARRIL	230	R. JESUS MARIA
32	R. SAN RAFAEL	230	Q. SIN NOMBRE
32	R. TORO AMARILLO	230	Q. SIN NOMBRE
32	R. CORINTO	230	Q. SIN NOMBRE
32	R. BLANCO	402	R. BIRRIS
32	Q. FLORES	402	Q. PACAYAS
32	R. SUCIO	415	R. COLORADO
230	R. COLORADO	415	R. TURRIALBA
230	R. TURRIALBA	415	R. AQUIARES
230	Q. PACAYAS	415	Q. VARA
230	Q. PACAYAS	415	Q. DANTA
230	R. BIRRIS	415	R. GUAYABO
230	R. ORTIGA	415	R. LAJAS
230	R. AQUIARES	415	Q. SIN NOMBRE
230	R. COLIBLANCO	415	R. COLIMA
230	Q. SIN NOMBRE		

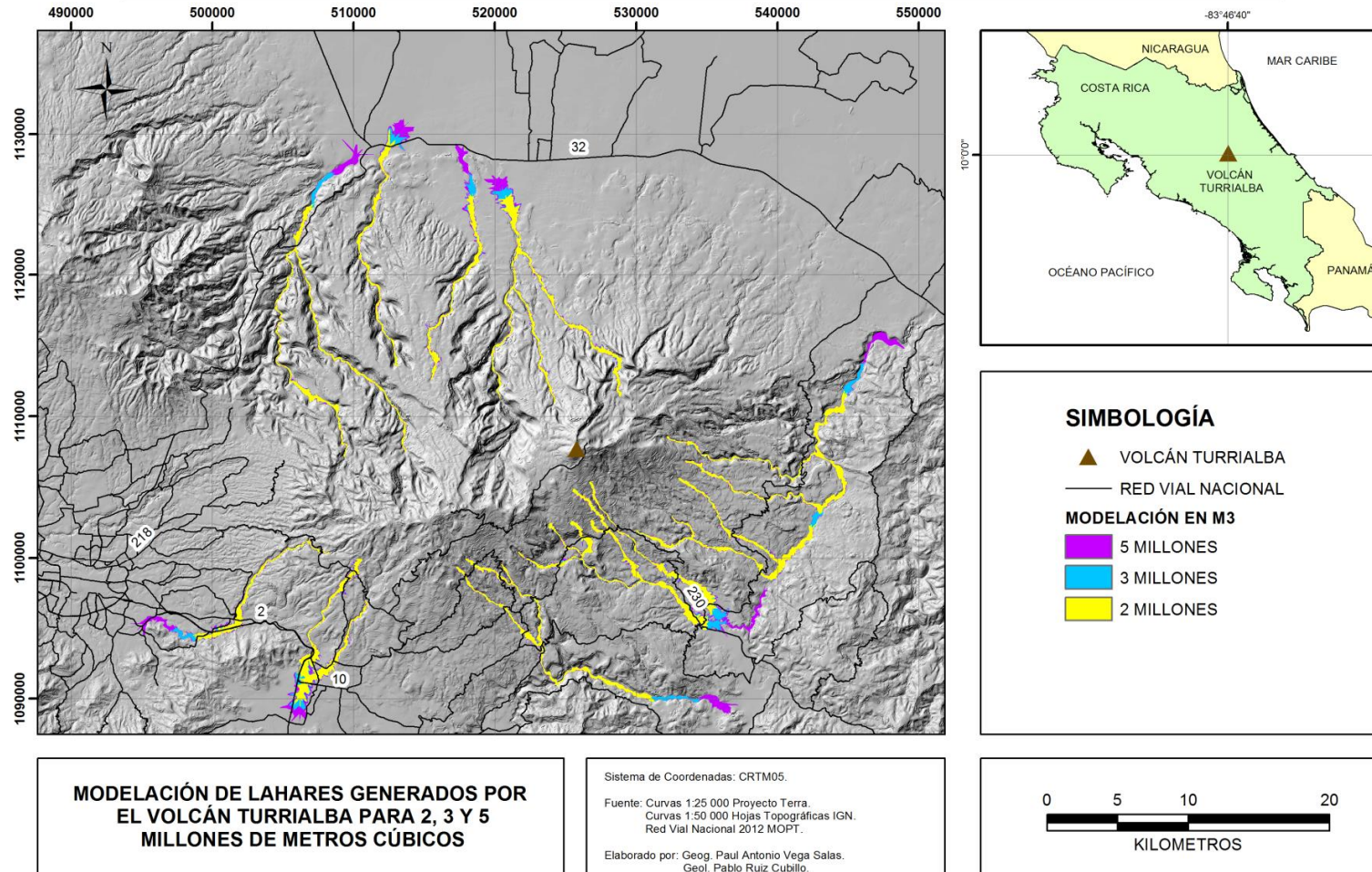


Figura 11. Modelación de lahares alrededor de los volcanes Irazú y Turrialba que podrían afectar infraestructuras de rutas nacionales. Se muestran tres eventos que suman un volumen similar al de los lahares generados por el Irazú entre 1963-1965.

8.3 Modelación de lahares de 2 millones de m³ con 95% de confiabilidad.

Las condiciones que se requieren para que se den lahares con un volumen total de 10 millones de m³ son bastante particulares. Por esta razón, se modeló un lahar más pequeño de tan solo dos millones de m³ y disparado desde las zonas de mayor acumulación de ceniza según Soto (2012) con el objetivo de determinar las áreas de inundación que podría tener un evento con mayor posibilidad de ocurrir y su posible afectación a los puentes de la red vial nacional. Adicionalmente a los resultados de este modelaje se le aplicó dos veces la desviación estándar para así obtener un índice de confiabilidad al 95% y mostrar los límites superior e inferior del modelo. Estos límites junto con el resultado de la regresión lineal se representan en los mapas como 3 tipos de escenarios:

1. El modelo generado a partir de la regresión lineal, este sería el equivalente a un escenario promedio (Figuras 12-15).
2. El modelo generado con el límite inferior del índice de confiabilidad al 95%. Este corresponde con el escenario más conservador en el que los lahares no recorren grandes distancias desde su sitio de origen (Figuras 12-15).
3. El modelo generado con el límite superior del índice de confiabilidad al 95%. Este corresponde con el peor escenario posible para ese volumen, ya que los lahares recorren la distancia máxima desde su sitio de origen (Figuras 12-15).

A continuación se presentan los resultados de este modelaje en los distintos cuadrantes de la zona de estudio (Figuras 12-15).

8.3.1 Sector noroeste de la zona de estudio

Los lahares fueron modelados en los ríos Hondura, Sucio, Corinto, Blanco, Toro Amarillo, Mercedes y Guácimo. En ninguno de ellos el escenario más conservador llega a la zona donde se ubican los puentes de la Ruta Nacional No. 32 (Figura 12). Para el evento promedio, el lahar modelado en los ríos Hondura, Sucio, y Corinto llega a pasar el punto donde se ubican los puentes de la Ruta Nacional No. 32. En el peor escenario modelado para todos los ríos de este sector los lahares pasan la zona donde se ubican los puentes de la Ruta 32, inclusive el lahar del río sucio, podría llegar hasta el puente de la Ruta Nacional 4, sobre el río Chirripó.

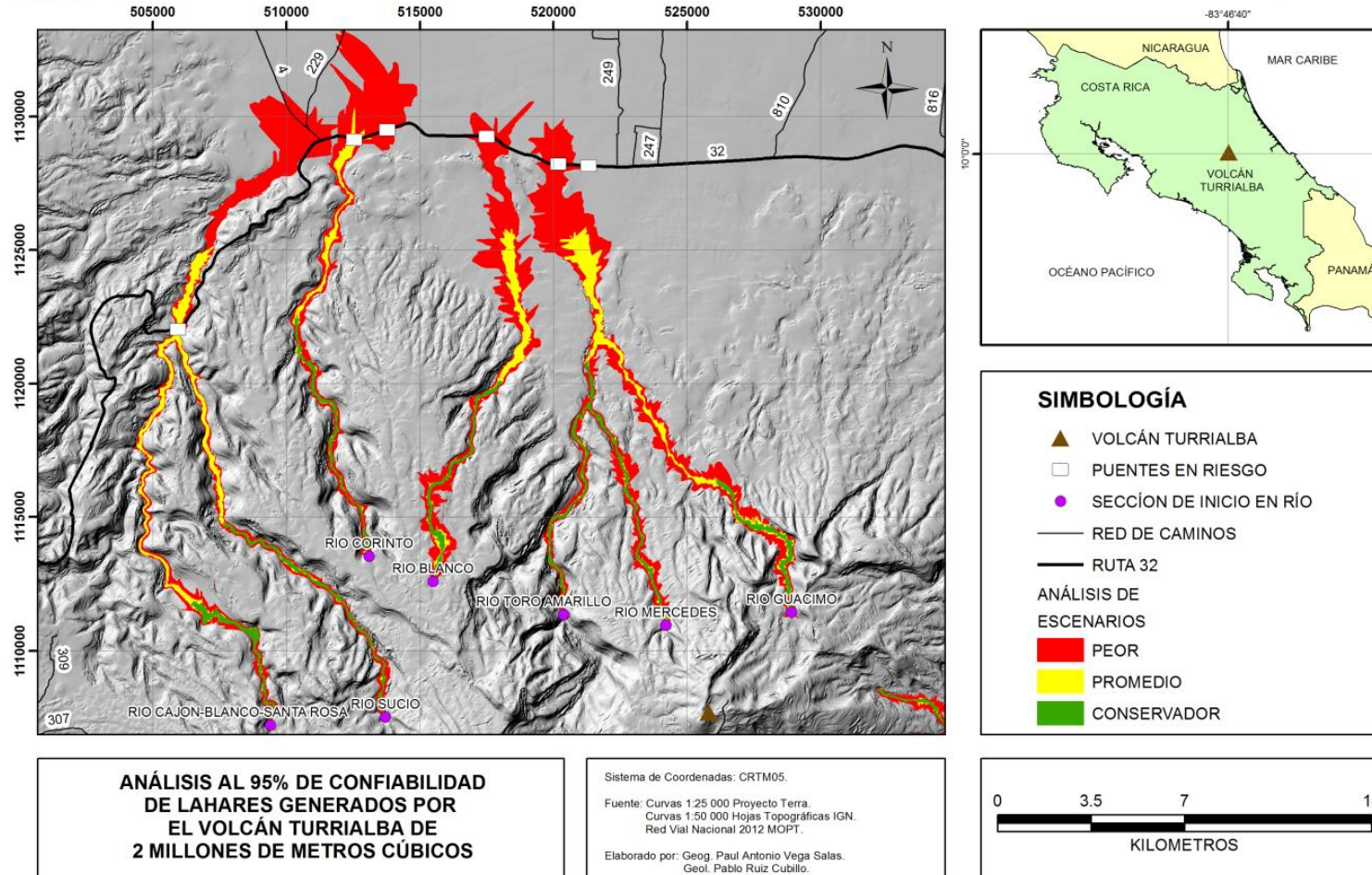


Figura 12. Modelación de lahares de 2 millones de m³ en el sector noroeste del volcán Irazú y norte del volcán Turrialba con 95 % de confiabilidad. Como se muestra en la imagen estos eventos tiene potencial de afectar puentes sobre la Ruta Nacional N° 32.

8.3.2 Sector noreste de la zona de estudio

Al igual que para el modelaje de la sección 8.2, en este caso tampoco se realizaron pruebas para lahares que podrían ser disparados desde la zona de mayor acumulación hacia este sector del volcán Turrialba. Sin embargo en la figura 13 se puede apreciar como el lahar que corresponde con peor escenario posible del río Reventazón llega a la zona donde se ubican los puentes de la Ruta Nacional 32 (Figura 13).

8.3.3 Sector sureste de la zona de estudio

En este sector, las secciones de las rutas nacionales 215 y 230 que se localizan en las partes más altas de las cuencas podrían verse afectadas por lahares de cualquiera de los escenarios modelados. Los ríos que afectarían los puentes de estas rutas son: Río Bonilla, Quebrada Caño Seco, Río Guayabo, Río Guayabito, Río Aquiares, Quebrada Ariete, Río Turrialba. Mientras que la Ruta Nacional No. 10 solamente se vería afectada por eventos modelados como el peor escenario posible y cerca de la ciudad de Turrialba (Figura 14).

8.3.4 Sector suroeste de la zona de estudio

En este sector el modelo para el río Tiribí muestra el lahares del escenario más conservador pasando la intersección con la Ruta Nacional 251, mientras que los escenarios promedio y el peor sobre pasan la intersección con la ruta nacional No. 2, llegando hasta el sector de Hacienda Vieja en Curridabat. Los tres escenarios modelados para el río reventado llegan a la intersección con la ruta 10. Este es el mismo sector en Taras que fue afectado por los lahares del Irazú entre 1963-1965. El modelaje sobre río Arriaz, muestra que los escenarios promedio y el peor podrían llegar afectar la ruta 2 en el sector de La Lima.

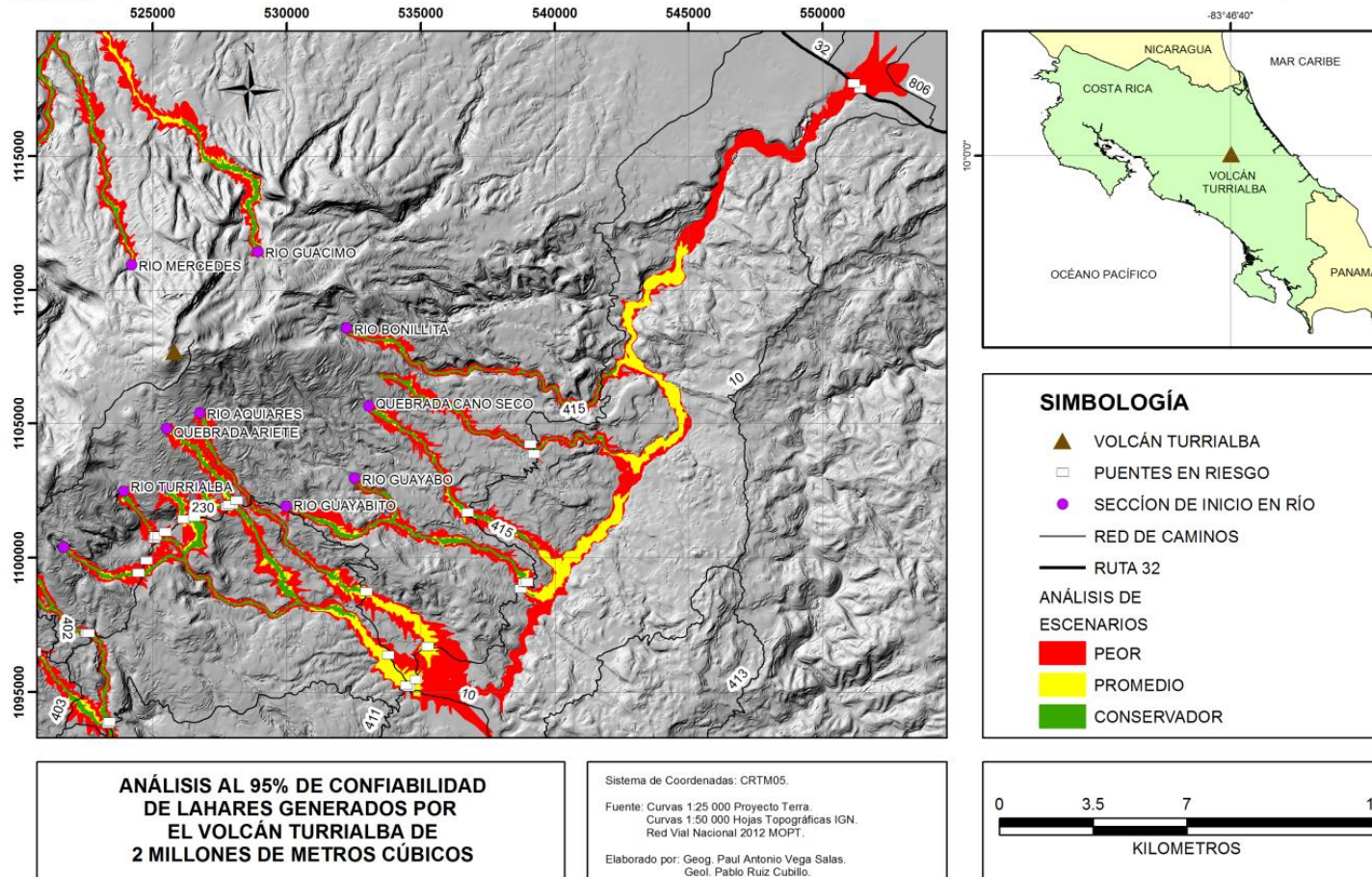


Figura 13. Modelación de lahares de 2 millones de m³ en el sector noreste del volcán Turrialba con 95 % de confiabilidad. Como se muestra en la imagen los eventos que se dan en el sector sureste son los que tiene potencial de afectar puentes sobre la Ruta Nacional N° 32.

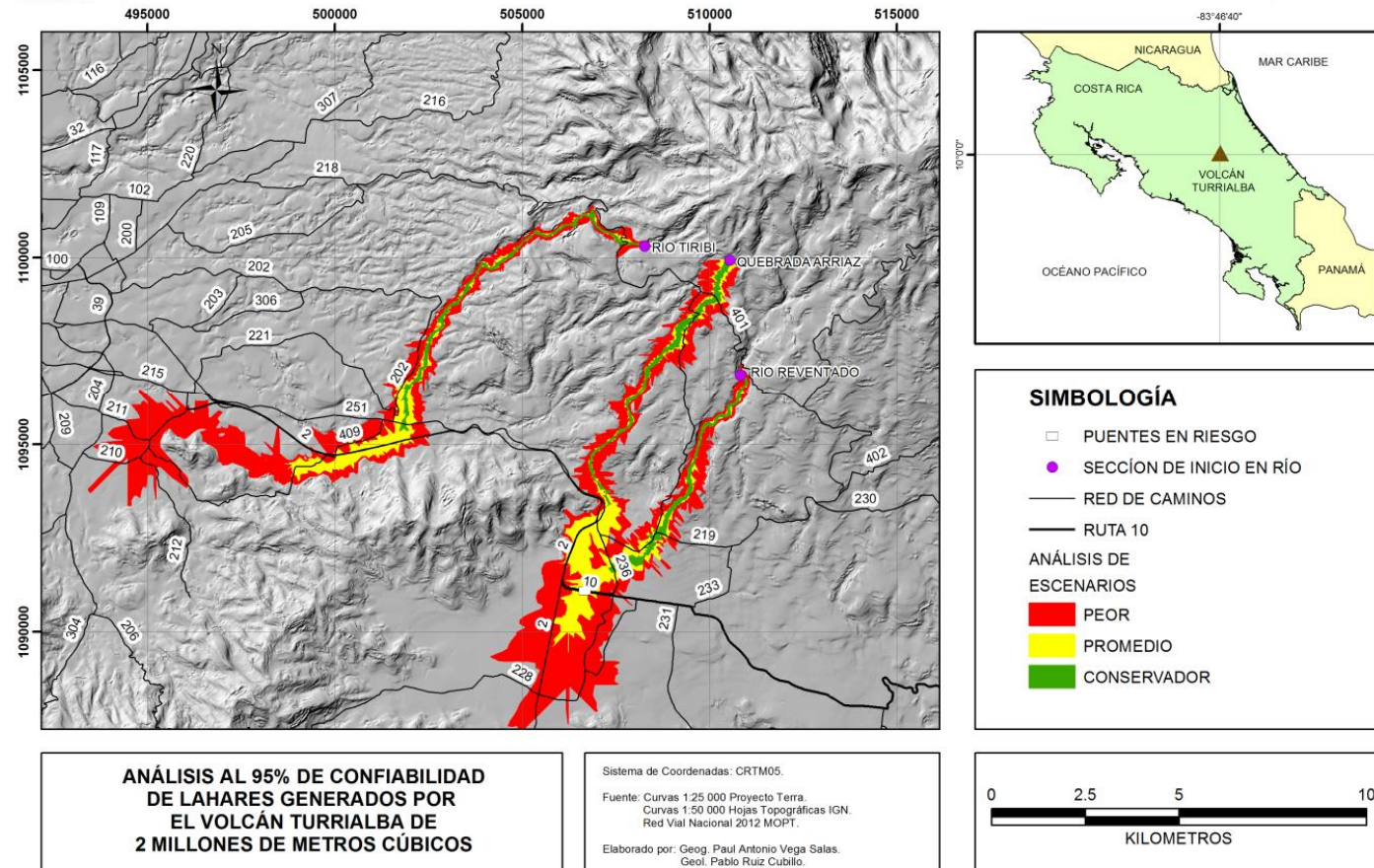


Figura 15. Modelación de lahares de 2 millones de m^3 en el sector suroeste del volcán Turrialba con 95 % de confiabilidad.

8.4 Modelación de lahares menores

Los lahares modelados en esta sección corresponden con tres eventos que juntos suman un volumen total de 6 millones de m³. El sitio de disparo de estos eventos se ubicó a una distancia de 15 km del sector central del volcán Turrialba y dentro del segundo anillo de acumulación de cenizas para una posible erupción de tipo vulcaniano según el estudio de (Soto, 2012).

De los resultados obtenidos y mostrados en la figura 16, se muestra que los lahares modelados en el sector este del volcán Turrialba sobrepasan la ubicación de los puentes de la Ruta Nacional No. 415, específicamente los puentes sobre Quebrada Linda y el río Pascua. En el sector sur del volcán Irazú los lahares modelados sobre el río Páez, sobrepasan los puentes de las rutas nacionales 230 y 10. El resto de los eventos modelados no llegan a sobrepasar los puentes de rutas nacionales. Sin embargo esto es posible que lahares con mayor volumen si lo hagan. En el cuadro 2, se muestran los puentes de las rutas nacionales que podrían llegar a ser afectados por lahares modelados en esta sección.

Cuadro 2. Lista de puentes que podrían ser afectados por lahares en rutas nacionales originados en cauces menores y fuera de la zona con mayor depositación de cenizas. Los puentes de la Ruta nacional No. 32 no son sobrepasados por ninguno de los lahares modelados.

Ruta No.	Puente sobre río
10	R. PÁEZ
230	R. PÁEZ
402	R. PÁEZ
415	Q. LINDA
415	R. PASCUA
32	R. REVENTAZON
32	P. SUP FERROCARRIL
32	Q. STA EMILIA

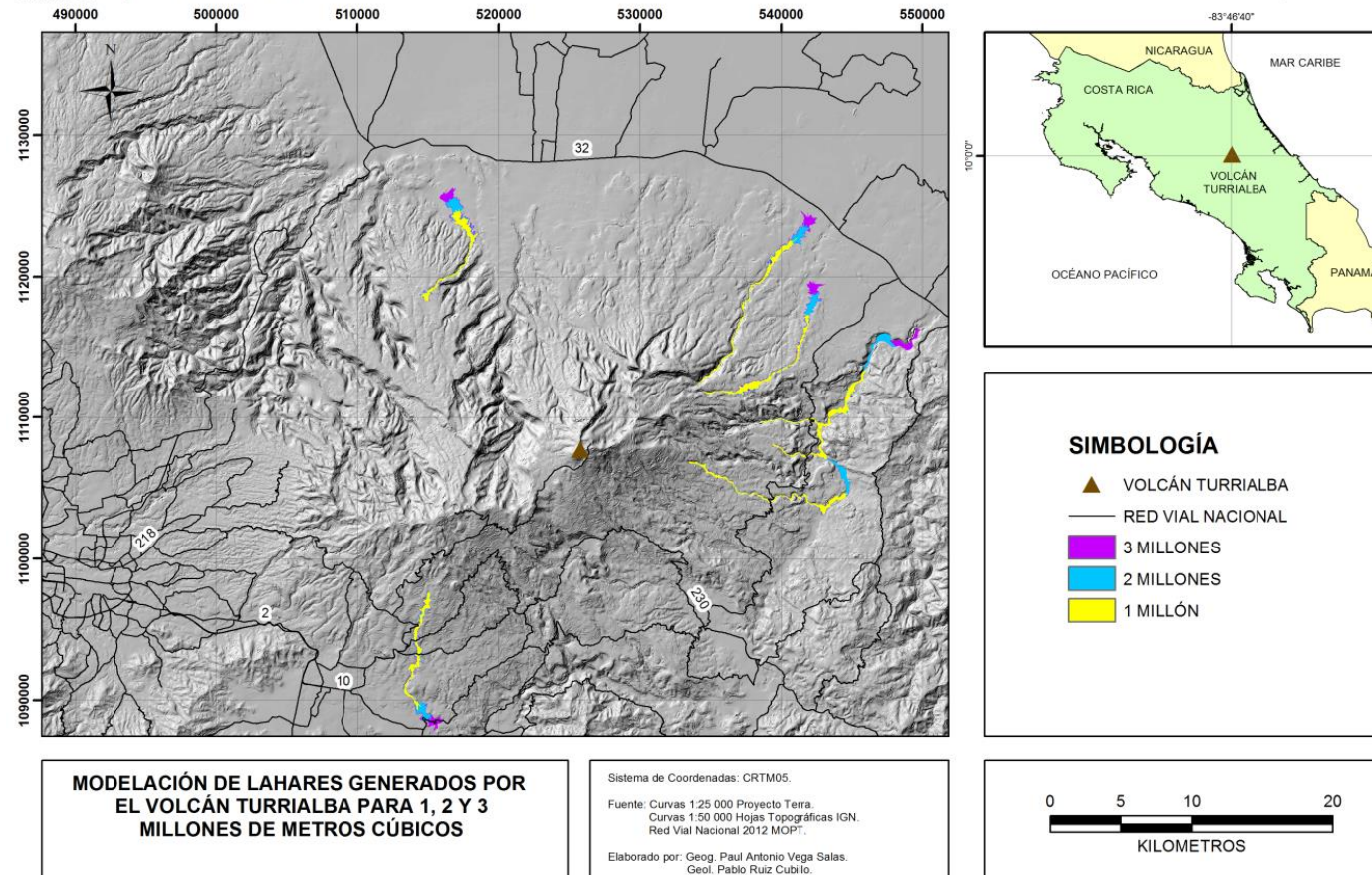


Figura 16. Modelación de lahares alrededor de los volcanes Irazú y Turrialba que podrían afectar infraestructuras de rutas nacionales. Se muestran tres eventos originados en zonas fuera de las áreas con mayor depositación de ceniza. Los lahares suman un volumen de 3, 2 y 1 millón de metros cúbico.

9. CONCLUSIONES

Se logró realizar una calibración del software LAHARZ del USGS para los posibles eventos que se darían en el volcán Turrialba. Se utilizó con éxito el volumen de los eventos generados por el volcán Irazú entre 1963-1965 (10 millones de m³), segmentado en tres eventos (2, 3 y 5 millones de m³) y fue corroborado una fotografía aérea de la zona.

Si el volcán Turrialba llegara a presentar una erupción tipo vulcaniana o aun de menor tamaño, es posible que se generen lahares disparados por las lluvias en las zonas de mayor acumulación de ceniza y de precipitación en la estación lluviosa.

Si en el volcán Turrialba se llegaran a presentar lahares y estos presentaran un volumen similar a los eventos que afectaron Taras - Cartago entre 1963 - 1965 (10 millones de m³), el área de inundación que generarían podría sobrepasar la ubicación de varios puentes de rutas nacionales ubicadas alrededor del volcán.

Un posible lahar más pequeño de tan solo 2 millones de m³ también podría tener potencial de llegar a pasar la ubicación de varios puentes de rutas nacionales alrededor del volcán Turrialba.

10. RECOMENDACIONES

10.1 Recomendaciones generales

Determinar el estado actual de los puentes que están sobre los cauces en los que se modelaron lahares en este trabajo.

Informar a las comunidades cercanas a los puentes sobre este estudio y trabajar junto con la Comisión Nacional de Emergencias en medidas de mitigación y prevención para este tipo de peligro volcánico.

Las siguientes recomendaciones son basadas en el manual de manejo de riesgo volcánico para prevención, manejo de crisis y resiliencia de MIAVITA (2012) y específicamente para el peligro volcánico generado por los lahares.

1. Generar un programa de vigilancia de las partes altas de los cauces en los que se podrían presentar lahares. La vigilancia puede ser de tipo visual y podrían participar personas que vivan en la partes altas de los cauces. Las personas designadas para la vigilancia de cauces deberían llevar una capacitación mínima enfocada en lahares, manejo de radios de comunicación y emisión de alertas.
2. Utilización de información meteorológica: Actualmente existe una sola estación meteorológica en la cima del volcán Turrialba, sin embargo los datos generados por esta no son suficientes para determinar lo picos máximos de lluvias que podrían llegar a disparar los lahares, se requiere una red más densa de estaciones y que estén ubicadas tanto en el sector Caribe como en el sector Sur del volcán Turrialba.
3. Colocación de sensores remotos y cámaras en tiempo real que enfoquen los principales cauces en las partes altas de la cuenca. Las imágenes deberían tener vigilancia constante para en caso de un evento dar los avisos de alerta.
4. Colocación con cableado eléctrico y sensores de vibración de suelo en la parte alta de los cauces en los que se podrían generar lahares.

11. AGRADECIMIENTOS

Se agradece, al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) por facilitarnos el programa LAHARZ para ser utilizado en este trabajo. A Lucia Capra de la Universidad Autónoma de México UNAM por la colaboración brindada en la modelación e interpretación de los posible lahares del volcán Turrialba. Finalmente, a Gerardo Soto por la colaboración brindada en la interpretación de sus modelos de acumulación de ceniza alrededor del volcán Turrialba en caso de diferentes tipos de erupciones.

12. REFERENCIAS

AGUILAR, I & ALVARADO, G. E., 2014: Pérdidas humanas y económicas causadas por el vulcanismo en Costa Rica entre 1953 y 2005.- Rev. Geol. Amér. Central, 51: 93-128.

ALVARADO, G.E., VEGA, A.E., 2013: La geomorfología de la colada de Cervantes, volcán Irazú (Costa Rica): Descripción de uno de los campos de coladas más grandes de América Central.. - Rev. Geol. Amér. - Central, 48: 99-118.

ALVARADO, G.E., 2010: Aspectos Geohidrológicos y sedimentológicos de los flujos de lodo asociados al terremoto de Cinchona (Mw 6,2) del 8 de enero del 2009, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 43: 67-96, 2010.

ALAVARADO, G:E., & GANS P.B., 2012: Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. - Rev. Geol. Amér. Central, 46: 7-122.

BARQUERO, R., 2005: Los principales volcanes activos de Costa Rica: Rincón de la Vieja, Arenal, Poás e Irazú. -14 págs. Instituto Costarricense de Electricidad, San José.

BOLAÑOS, R., WATSON, V., & TOSI, J., 2005: Mapa ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida), según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge, Escala 1:750 000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.

IVERSON, R.M.; SCHILLING, S.P. & VALLANCE, J.W. (1998): Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *GSA Bulletin* 100: 972-984.

MIAVITA, 2012: Handbook for volcanic risk management prevention, crisis management, resilience. Library of Congress Cataloging in Public Data, Printed in Orleans (France). 204 p

PANIAGUA, S., SALAZAR, L.G., KUSSMAIL, S., MONGE, A. & OBANDO, L.G., 1996: Síntesis de la amenaza volcánica y estimación básica del riesgo del volcán Rincón de la Vieja, Cordillera de Guancaste, Costa Rica. . 61 págs. Universidad de Costa Rica [Informe Final].

RED SISMOLOGICA NACIONAL (RSN), 2009: El terremoto de Cinchona del jueves 8 de enero de 2009.- Rev. Geol. Amér. Central, 40: 91-95.

SIGURGDSSON, H., HOUGHTON, B., MCNUTT, S., RYMER, H. & STIX J., 1999: Encyclopedia of Volcanoes.- 1417 págs. Academic Press. Massachusetts, Estado Unidos.

SCHILLING, S. P., 2014: LAHARZ - GIS Programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones: U.S. Geological Survey Open - File Report 2014-1073, 82p

SOTO, G., 2004: La erupción del Rincón de la Vieja del 8 de mayo de 1991.- 6 págs. Consultor en Geología y Vulcanología, San José, Costa Rica.

SOTO, G., 2012: Preparación de mapas de peligros volcánicos y restricción de uso de la tierra en el volcán Turrialba.- 186 págs. FUNDEVI, San José, Costa Rica.

REFERENCIAS HEMEROGRÁFICAS

Blog los Rincones de mi país. (Consultado el 3 de febrero 2015) Foto Antigua fábrica de Pinturas Kativo - Taras Cartago.

http://www.losrinconesdemipaiscr.blogspot.com/2013_06_01_archive.html

Comisión Nacional de Emergencias. Avalancha, flujo de lodo y detritos en erío Reventado. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias de Costa Rica (CNE). Sección Sistemas de Información (SIE).

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). 1991. Archivos del ICE, foto, lahares en el río Azul, con el puente arrastrado.

La Nación. Consultado el 3 de febrero del 2015. Fotos de puente del río Pénjamo.

http://www.nacion.com/ln_ee/1995/noviembre/09/pagina05.html

La Nación Destrucción del puente frente a la catarata de la Paz. Consultado el 3 de febrero del 2015

http://www.nacion.com/sucesos/desastres/Suelo-fragil-terremoto-facilito-avalancha_0_1366863342.html. 18 de setiembre 2013

Red Sismológica Nacional: Foto Lahar Quebrada Paredes, Volcán Turrialba, 2014.

<http://www.rsn.ucr.ac.cr>

Videos históricos de Costa Rica. (Consultado el 3 de febrero del 2015). Foto, vista general del lahar del 9 y 10 de diciembre en el río Reventado.

<http://www.videos.historia.fcs.ucr.ac.cr/view-image/326/avalancha-de-lodo>.