

Figura 91: Vista 3D del mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas de máximo peligro.

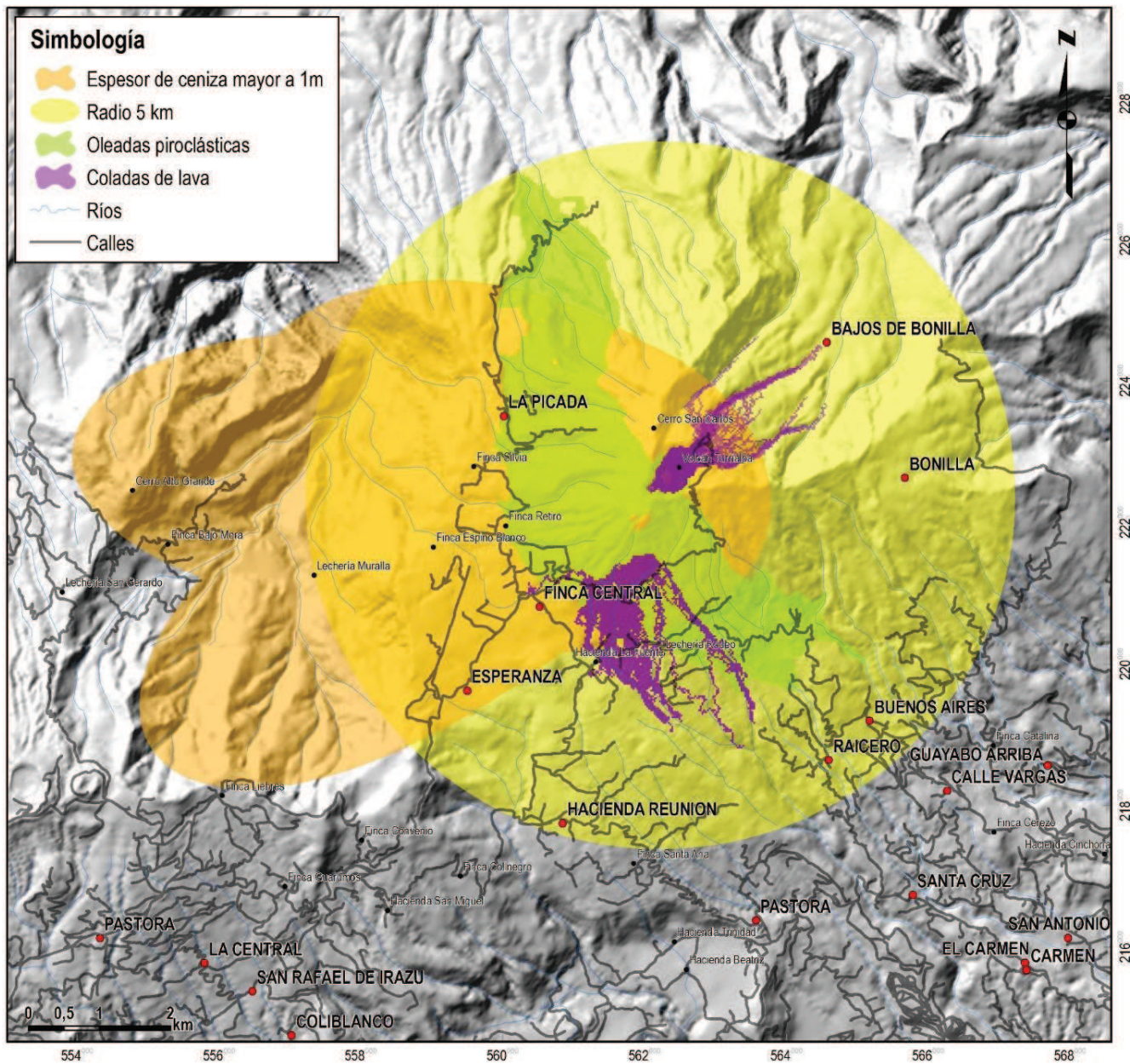


Figura 92: Mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas incluidas en el peligro intermedio a alto.

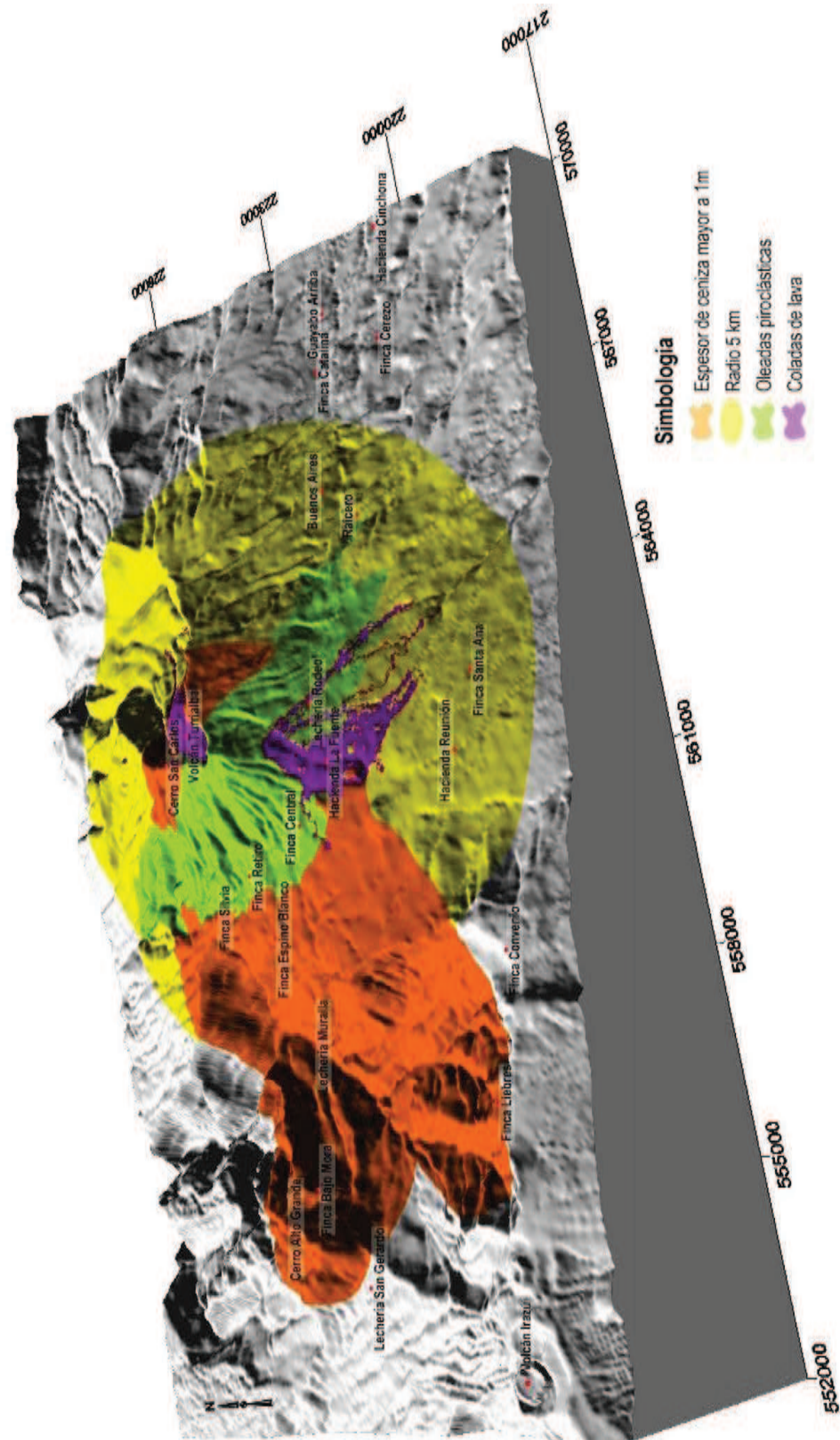


Figura 93: Vista tridimensional del mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas incluidas en el peligro intermedio a alto.

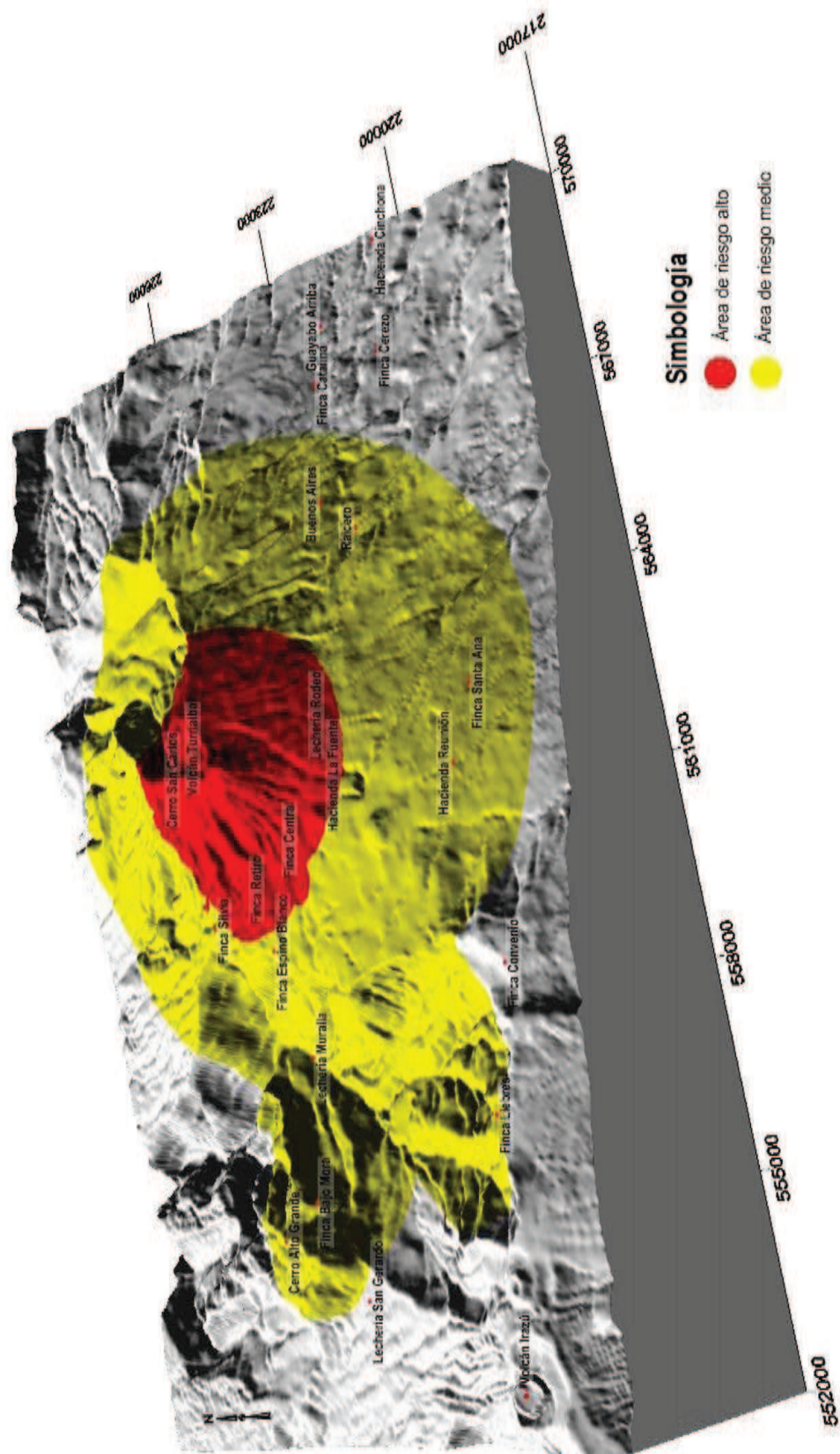
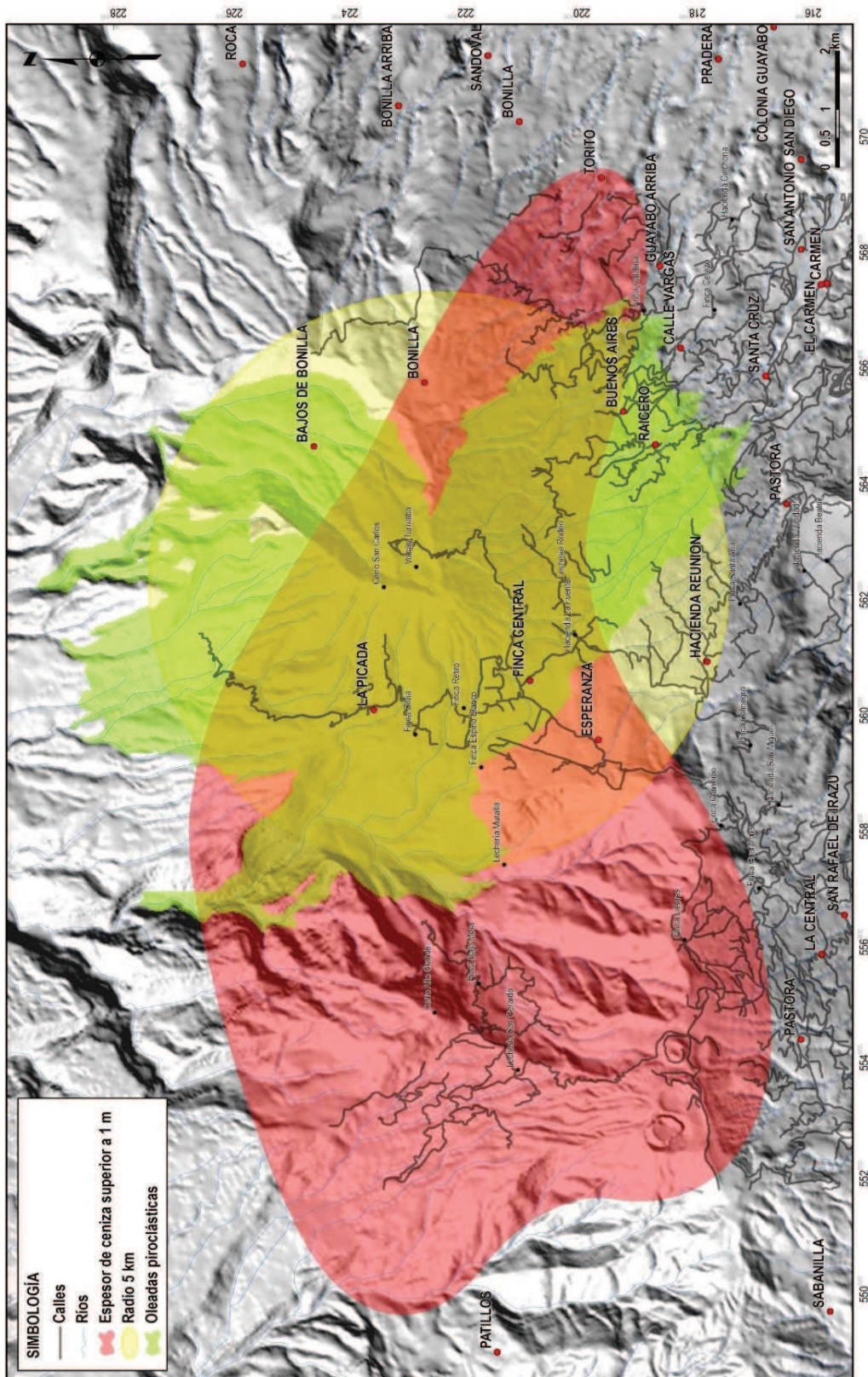


Figura 94: Vista tridimensional del mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas de peligro intermedio a alto y alto.



6.2. Figura 95: Mapa de amenaza volcánica a largo plazo, áreas límite de peligro máximo a intermedio

## **Mapa y restricciones de uso del suelo**

Los dos objetivos primigenios de este trabajo son la producción de mapas de peligros actualizados, y consecuentemente, un mapa y directrices para las restricciones de uso del suelo en la periferia del volcán. Una vez evaluadas las áreas de peligros con base en: 1) la geología; 2) el detalle de los depósitos; 3) los modelos de escenarios temáticos para los diferentes peligros esquematizados antes, y 4) los mapas de peligros volcánicos con los escenarios a corto y largo plazo, se propone un mapa de restricciones de uso del suelo, con base además en los usos del suelo en las áreas periféricas de la cima del Turrialba, que se dedican principalmente a bosques primarios en la inmediatez de la cima y hacia el sector noroeste (Figura 96). La mayoría, sin embargo, de las áreas a 5 km de radio, son de pastoreo y cultivos (>70%), sobre todo hacia el oeste y sur.

Se indican las áreas con 2 y 5 km de diámetro (Figura 97) porque son aquellas determinadas en el subcapítulo 5.1.2. como las de alto y moderado peligro por caída balística (aproximadamente fragmentos de 110 mm y 45 mm respectivamente), afectables además por bombardeo balístico, lavas, caída de ceniza > 50 cm y lluvia ácida frecuente. Los primeros tipos de eventos ocurrirán infrecuentemente en periodos de eruptividad, mientras que la lluvia ácida afectará por un periodo de años a décadas esta área.

### **6.2.1. Área radio de 2 km alrededor**

En vista de que el radio de 2 km alrededor del cráter SW coincide en gran parte con el área del Parque Nacional, se sugiere que hasta donde sea posible, se reviertan las áreas de pastoreo y cultivos dentro de este radio de 2 km de radio alrededor del cráter SW y la totalidad del Parque Nacional a 2 km de radio a bosques autóctonos, con especies que soporten mejor el embate de la lluvia ácida. Se sugieren estudios para sentar bases en argumentos sociológicos y económicos, para que la única actividad económica de interés en ese radio de 2 km, sea la turística en tiempos de quietud volcánica, con las condiciones de caminos y protección adecuadas.

### 6.2.1. Área radio de 5 km alrededor

En el radio de 5 km alrededor del cráter, gran parte son bosques, dentro del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central. Se sugiere que esas áreas conserven su vocación forestal y no se promuevan actividades turísticas con alta concentración de personas. Asimismo, las áreas de ganadería y cultivos en los sectores SW, S y SE, deberían conservar áreas de vivienda de baja densidad, y los centros de población contar con planes de emergencia y estar en posibilidad de evacuación con respuestas rápidas ante alertas.

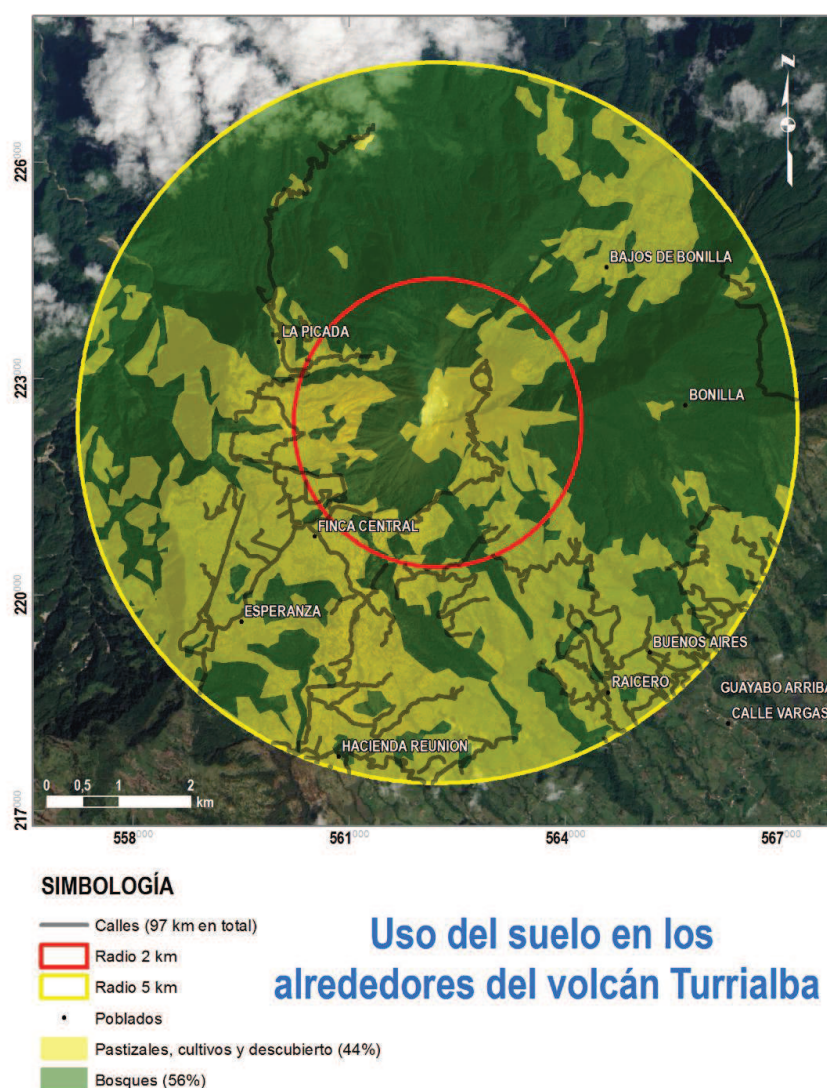


Figura 96: Uso del suelo en las áreas de peligros alrededor del volcán (2 y 5 km), afectables por lluvia ácida frecuente, bombardeo balístico, lavas y caída de ceniza > 50 cm. A partir de imagen Google Earth™ del 2007.

**Área con radio de 2 km alrededor**

Se sugiere que hasta donde sea posible, se reviertan las áreas de pastoreo y cultivos dentro del Parque Nacional a 2 km de radio a bosques autóctonos, con especies que soporten mejor el embate de la lluvia ácida. Se sugieren estudios para sentar bases en argumentos sociológicos y económicos, para que la única actividad económica de interés en ese radio de 2 km, sea la turística en tiempos de quietud volcánica, con las condiciones de caminos y protección adecuadas.

**Área con radio de 5 km alrededor**

Se sugiere que esas áreas conserven su vocación forestal y no se promuevan actividades turísticas de alta concentración de personas. Asimismo, las áreas de ganadería y cultivos en los sectores SW, S y SE, deberían conservar áreas de vivienda de baja densidad, y los centros de población contar con planes de emergencia y estar en posibilidad de evacuación con respuestas rápidas ante alertas.

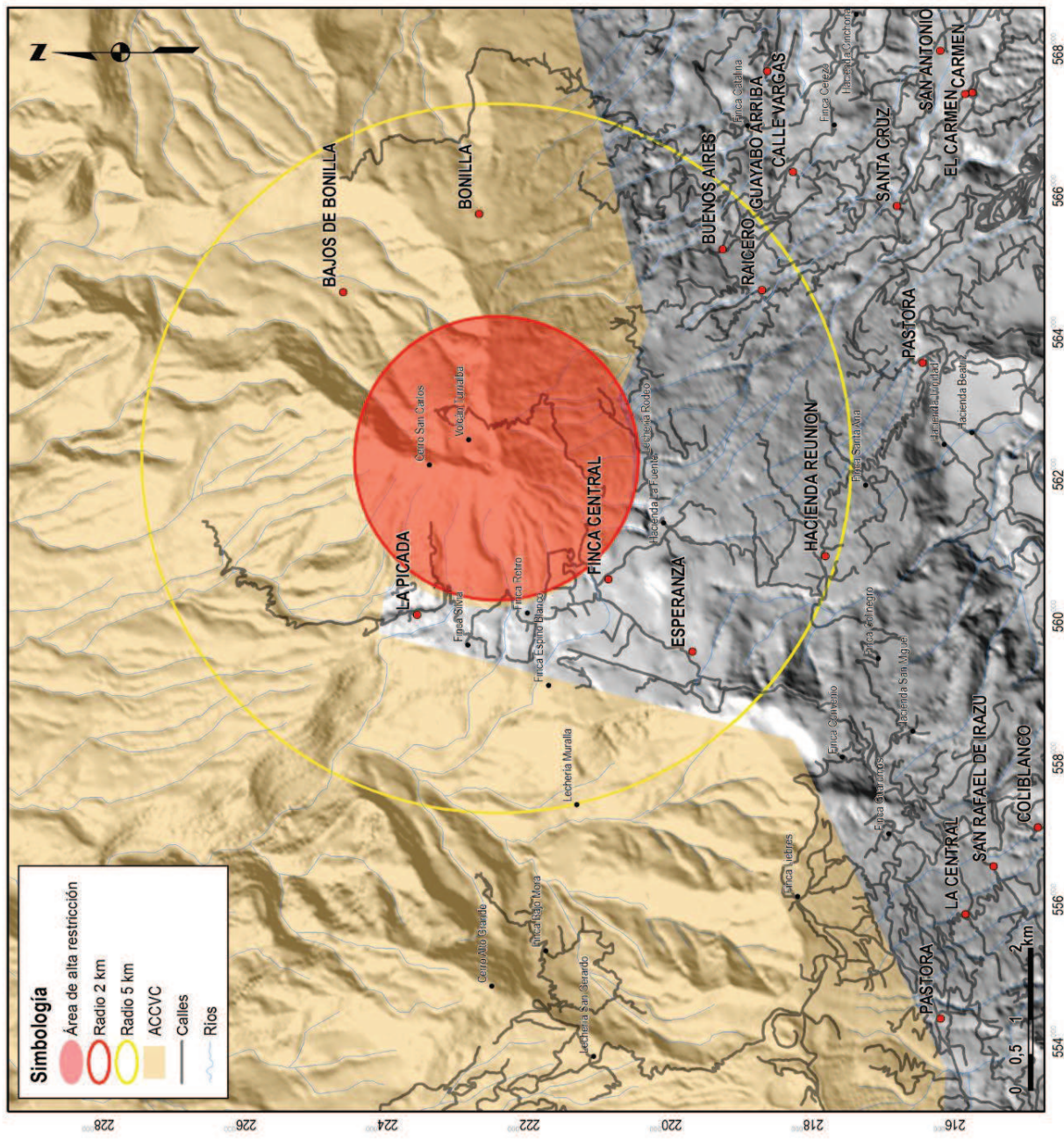


Figura 97: Áreas de restricción sugeridas a 2 y 5 km de radio a partir del cráter SW.



### 6.3. Rutas de escape y refugios

En el caso del área periférica del Turrialba, las rutas de acceso son pocas, y en condiciones variables desde regulares a malas, en particular afectables por el mal o pobre diseño de los caños y alcantarillados y por el clima inclemente, con alta pluviosidad todo el año.

Como se ve en la Figura 98, la única ruta accesible con vehículo hacia el área pericratérica es desde el sector suroeste-sur, y es de alta pendiente y múltiples curvas. Esta va desde el poblado-lechería La Central. Hasta allí se llega por dos vías principales, desde Coliblanco o desde La Pastora, vías que se encuentran en condiciones también regulares y variables. En caso de emergencia o erupción, esta corta red de vías son las de escape o evacuación.

Existe otra ruta de acceso al área pericratérica, desde el sector noreste, pero es una ruta que sube desde los Bajos de Bonilla, apta solo para caballo o a pie (Figura 98). Desde Bajos de Bonilla hay ruta de vehículo de doble tracción que rodea el sector occidental del volcán y lleva hasta varios sectores, pero el nodo principal de conexión es hasta Santa Cruz, en la falda sureste del volcán. En caso de emergencia en el área de los cráteres, esta vía no puede usarse, a menos que haya que evacuar gente que se encuentre en el sector norte o noreste de la cima. En caso de erupción que afecte el sector noreste, la ruta de Bajos de Bonilla - Santa Cruz es la única opción viable para evacuar a los pobladores dispersos de “Los Bajos”, que se encuentran en las áreas de mediano a alto y máximo peligro en el escenario a corto plazo.

Puesto que para visitantes en la cima o miembros de Parques Nacionales o del Instituto Costarricense de Electricidad (funcionarios que visitan la cima para dar mantenimiento a las torres de comunicación al este del cráter activo), la única ruta viable de escape y evacuación es hacia el sur hasta La Central, en caso de una emergencia por bombardeo balístico debe darse una opción de protección. Existen en otros volcanes del mundo, refugios sólidos ante tal eventualidad, como es el caso del volcán Aso, en el sur de Japón, y que se presenta en la Figura 99. Se sugieren sitios para la instalación de estos refugios de concreto armado en la cercanía de las torres del ICE, que se ha convertido en un mirador actualmente, en la periferia del

mirador principal y en la periferia de la última caseta de guardaparques (sitios mostrados en la Figura 98).



Figura 98: Sitios mencionados como rutas de evacuación o escape y sitios para refugios.



Figura 99: Prototipos de refugio que podría establecerse en la cima del volcán para protegerse de eventuales explosiones y bombardeo balístico. Arriba, foto de la cima del volcán Aso (Japón), tomada de <http://www.twitpic.com/6ks3xb>. Abajo, ejemplo de refugio temporal ante explosiones e impactos balísticos en la periferia del volcán Sakurajima (Japón). Tomado de: [http://www.photovolcanica.com/VolcanoInfo/Sakurajima/JAP09\\_1139.jpg](http://www.photovolcanica.com/VolcanoInfo/Sakurajima/JAP09_1139.jpg)

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

- Este informe final integra el trabajo de los dos informes parciales anteriores y ha analizado una serie de variables para incorporar en los mapas de peligros y de restricción de uso del suelo.
- Se ha realizado y conjuntado una investigación bibliográfica, de documentos inéditos, fuentes cartográficas y hemerográficas y trabajo de campo para reconstruir la historia volcánica del Turrialba, encaminada a la producción de mapas de peligro volcánico que sustenten la zonificación de las áreas de restricción del uso del suelo en el volcán Turrialba y alrededores. Se presentan los detalles de tal recopilación bibliográfica con detalles de campo. El Turrialba ha crecido en el último cuarto millón de años, y particularmente presenta episodios de construcción importantes alrededor de 60-100 ka y en los últimos 10 ka.
- Se ha caracterizado el entorno cortical y litosférico del volcán, así como su geología e historia de los últimos 250 ka y en detalle de los últimos 10 ka, con énfasis en los depósitos explosivos de los últimos 3,4 ka. No ha sido posible conseguir un mayor detalle sobre la historia explosiva entre 3,4 - 10 ka, debido a la falta de niveles correlacionables en áreas aflorantes alrededor del volcán. Sin embargo, sí se ha podido establecer que el volcán ha mostrado una profusa actividad volcánica en los últimos 10 ka, tanto efusiva como explosiva. Se ha trabajado en la caracterización geoquímica de los productos para ayudar a definir los escenarios eruptivos y los escenarios de peligros.
- Con base en la información de campo se han construido en detalle evaluaciones sobre los peligros de salida de gases y lluvia ácida, balística, caída de piroclastos y áreas de afectación por lavas y flujos piroclásticos, así como por eventos sísmicos volcánicos y tectónicos originados en las áreas pericratéricas.
- Se han aplicado modelos a partir del programa Ejecta! (Mastin, 2001) para la modelización de caída de elementos balísticos, así como la herramienta Voris 2.0.1. (Felpeto et al., 2007), para dispersión de cenizas, flujos piroclásticos y

lavas. Se han vertido en el mapa de peligros. Se han definido áreas de lluvia ácida frecuente hacia el oeste y suroeste y lluvia ácida ocasional hacia el suroeste y sureste del volcán, con alcances de hasta unos 8 km del volcán. Se han definido las áreas de alta y moderada peligrosidad por balística con radios de 2 y 5 km respectivamente, equivalente a caída de fragmentos de 11 cm y 4,5 cm de diámetro.

- Se han recopilado los diferentes mapas de peligros existentes y se han tratado de comparar a escalas similares, como base para los nuevos mapas.
- Se ha construido una base cartográfica originada en los mapas del Instituto Geográfico Nacional, depurada para la producción de un mapa de elevación digital (MED) de todo alrededor del volcán (cerca de 6000 km<sup>2</sup>), el cual se ha utilizado para verter los mapas de peligros.
- Se ha depurado el análisis de peligro y los escenarios ante sismicidad volcánica y tectónica con  $M_w$  6,0 - 6,5, originada en el macizo volcánico cuspidal, de modo que se tengan escenarios posibles de áreas afectadas.
- Los mapas producidos muestran dos escenarios, a corto y largo plazo, a la luz de los modelos desarrollados, validados con la información de campo obtenida:
  - Mapa de peligros por erupción a corto plazo (de meses a años a partir del presente), con una erupción esperable similar a 1864-66. Contempla fases freáticas, estrombolianas y vulcanianas.
    - i. Contempla una zona de alto o máximo peligro definida por el área de balística de 2 km alrededor del cráter SW, con caída de ceniza vulcanianas de > 1 m de espesor y flujos piroclásticos por colapso de columnas estrombolianas.
    - ii. Una zona de peligro intermedio a alto definida por las áreas afectables por balística de 5 km, lavas, flujos y oleadas piroclásticas por eventos vulcanianos y áreas con espesores de ceniza > 30 cm por eventos vulcanianos.

- Mapa de peligros por erupción a largo plazo (décadas a siglos), que contempla diversos escenarios, y serán evaluables según evoluciones la actividad volcánica en su momento:
  - iii. Áreas de afectables por flujos piroclásticos por colapso de columnas plinianas.
  - iv. Áreas con espesores de cenizas > 1 m por eventos plinianos, en todos los escenarios temporales.
  - v. Área de caída balística de 5 km d radio alrededor del cráter.
  - vi. Área de lavas, incluida en general dentro del radio de 5 km.
- Los mapas deben usarse de manera dinámica, y conforme cambien las etapas de una erupción, con posibles periodos de calma o incluso migración de bocas eruptivas, los escenarios son cambiables.
- Para erupciones consideradas en el corto plazo, debería procederse a la evacuación inmediata del área de máximo peligro una vez que se tengan signos de erupción inminente, o bien que inicien etapas con explosiones freáticas vigorosas. Asimismo, las áreas de peligro intermedio a alto, deberían estar en posibilidad de ser evacuadas de inmediato o con prontitud.
- Se ha hecho un estudio de rutas de evacuación con base en trabajo de campo y análisis de sitios posibles para instalación de refugios a prueba de proyectiles balísticos. En el caso del área periférica del Turrialba, las rutas de acceso son pocas, y en condiciones variables desde regulares a malas.
- La única ruta accesible con vehículo hacia el área pericratérica es desde el sector suroeste-sur, y es de alta pendiente y múltiples curvas. En caso de emergencia o erupción, esta corta red de vías son las de escape o evacuación. Existe otra ruta de acceso al área pericratérica, desde el sector noreste, pero es una ruta que sube desde los Bajos de Bonilla, apta solo para caballo o a pie. Desde Bajos de Bonilla hay ruta de vehículo de doble tracción que rodea el sector occidental del volcán y lleva hasta varios sectores, pero el nodo principal de conexión es hasta Santa Cruz, en la falda sureste del volcán. En caso de emergencia en el área de

los cráteres, esta vía no puede usarse, a menos que haya que evacuar gente que se encuentre en el sector norte o noreste de la cima. En caso de erupción que afecte el sector noreste, la ruta de Bajos de Bonilla - Santa Cruz es la única opción viable para evacuar a los pobladores dispersos de “Los Bajos”, que se encuentran en las áreas de mediano a alto y máximo peligro en el escenario a corto plazo.

- Puesto que para visitantes en la cima o miembros de Parques Nacionales o del Instituto Costarricense de Electricidad (funcionarios que visitan la cima para dar mantenimiento a las torres de comunicación al este del cráter activo), la única ruta viable de escape y evacuación es hacia el sur hasta La Central, en caso de una emergencia por bombardeo balístico debe darse una opción de protección. Se sugieren sitios para la instalación de estos refugios de concreto armado en la cercanía de las torres del ICE, en la periferia del mirador principal y en la periferia de la última caseta de guardaparques.
- Respecto a la zonificación del uso del suelo, se indican las áreas con 2 y 5 km de diámetro porque son aquellas determinadas en el subcapítulo 5.1.2. como las de alto y moderado peligro por caída balística (aproximadamente fragmentos de 110 mm y 45 mm respectivamente), afectables además por bombardeo balístico, lavas, caída de ceniza > 50 cm y lluvia ácida frecuente.
- Para el área con 2 km de radio, **se sugiere** que hasta donde sea posible, se reviertan las áreas de pastoreo y cultivos dentro de este radio de 2 km de radio alrededor del cráter SW y la totalidad del Parque Nacional a 2 km de radio a bosques autóctonos, con especies que soporten mejor el embate de la lluvia ácida. Se sugieren estudios para sentar bases en argumentos sociológicos y económicos, para que la única actividad económica de interés en ese radio de 2 km, sea la turística en tiempos de quietud volcánica, con las condiciones de caminos y protección adecuadas.
- En el radio de 5 km alrededor del cráter, **se sugiere** que esas áreas conserven su vocación forestal y no se promuevan actividades turísticas con alta concentración

de personas. Asimismo, las áreas de ganadería y cultivos en los sectores SW, S y SE, deberían conservar áreas de vivienda de baja densidad, y los centros de población contar con planes de emergencia y estar en posibilidad de evacuación con respuestas rápidas ante alertas.



## **CAPÍTULO 8: RECOMENDACIONES**

Con base en las conclusiones de este trabajo se recomienda:

- Discutir y promocionar entre los comités locales los mapas de peligros volcánicos y sus diferentes escenarios.
- Iniciar un proceso de análisis de las áreas sugeridas para restricción, desde el punto de vista económico y sociológico, para una futura restricción de usos acordes con la realidad local y el peligro volcánico indicado en este trabajo.
- Distribuir el anexo 5 entre la población en general, una vez que haya sido discutido y mejorado por las autoridades de divulgación de la CNE con base en los parámetros pedagógicos por ellos establecidos.
- Continuar con el proceso de educación poblacional en los alrededores del volcán, independientemente del estado de actividad que muestre el volcán.
- Que la CNE continúe y amplifique su ayuda a los entes de investigación vulcanológica para un adecuado monitoreo y discusión amplia de los parámetros de actividad del volcán.

## **CAPÍTULO 9: AGRADECIMIENTOS**

Se agradece la participación y colaboración en diferentes formas y estadios de este trabajo a:

- Mauricio Mora, en los aspectos sismológicos de análisis de la actividad actual del volcán.
- Carlos Redondo, por su aporte en el trabajo de campo.
- Laboratorio de Geotecnia de la Escuela Centroamericana de Geología por análisis granulométricos y de densidades de bloques balísticos, a cargo del Profesor Rolando Mora.
- Laboratorio de Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología por la caracterización petrográfica de diferentes productos del volcán, a cargo del Profesor Luis Obando.
- Los aportes de los miembros de la Red Sismológica Nacional en la Universidad de Costa Rica y el Instituto Costarricense de Electricidad para el conocimiento del comportamiento del volcán.

## CAPÍTULO 10: REFERENCIAS

- ALVARADO, G. (1984) Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. - vii + 183 págs. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- ALVARADO, G.E., BARQUERO, R., BOSCHINI, I., CHIESA, S. & CARR, M.J. (1986) Relación entre la neotectónica y el vulcanismo en Costa Rica. – Revista CIAF, 11 (1-3): 246-264, Bogotá.
- ALVARADO, G.E. (1989) Volcanes de Costa Rica. - 175 págs. EUNED, San José.
- ALVARADO, G.E. (2000) Los volcanes de Costa Rica: Geología, historia y riqueza natural. – Editorial Universidad Estatal a Distancia, 269 + xv pp.
- ALVARADO, G.E. (2006) Evaluación del peligro volcánico. – En: Vargas, A. (ed.): Informe de avance a la factibilidad del P.H. Reventazón. Inf. Interno ICE, págs: 7.1-7.27.
- ALVARADO, G.E. (2010) Aspectos geohidrológicos y sedimentológicos de los flujos de lodo asociados al terremoto de Cinchona ( $M_w$  6,2) del 8 de enero del 2009, Costa Rica. – Revista Geológica de América Central, 43: 67-95.
- ALVARADO, G.E., SOTO, G.J., SCHMINCKE, H.-U., BOLGE, L.L. & SUMITA, M. (2006) The 1968 andesitic lateral blast eruption at Arenal volcano, Costa Rica. – En: Gill, J., Reagan, M., Tepley, F. & Malavassi, E. (Eds): Arenal Volcano Special Volume, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 157 (1-3): 9-33 [doi 10.1016/j.jvolgeores.2006.03.035].
- ALVARADO, G.E., VEGA, E., CHAVES, J. & VÁSQUEZ, M. (2004) Los grandes deslizamientos (volcánicos y no volcánicos) de tipo *debris avalanche* en Costa Rica. – Revista Geológica de América Central, 30: 83-99.

- ARTUNDUAGA, A.D.H. & JIMÉNEZ, G.P.C. (1997) Third version of the hazard map of Galeras Volcano, Colombia. — *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77 (1–4): 89-100.
- BARBOZA, V., FERNÁNDEZ, E., DUARTE, E., SÁENZ, R., MARTÍNEZ, M., MORENO, N., MARINO, T., VAN DER LAAT, R., HERNÁNDEZ, E., MALAVASSI, E. & VALDÉS, J. (2003) Changes in the activity of Turrialba volcano, seismicity, geochemistry and deformation.— *Seismological Research Letters*, 74: 215.
- BARQUERO, R. & ALVARADO, G.E. (1989) Los enjambres de temblores en el arco volcánico de Costa Rica. – *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Turrialba*, 2 (4): 18-39.
- BAXTER, P. (2000) Impacts of eruptions on human health. - En Sigurdsson, H. (Ed.) *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 1035-1044), Academic Press, San Diego.
- BEDOYA, E. (2004) La ciudad de Turrialba: un siglo de evolución histórico-geográfica. -*Revista Reflexiones*, 83(2), 7-23.
- BLONG, R. (2000) Volcanic hazards and risk management. - En Sigurdsson, H. (Ed.) *Encyclopedia of volcanoes* (pp. 1215-1228), Academic Press, San Diego.
- BLONG, R.J., (1981) Some effects of tephra falls in buildings. - En: S. SELF y R.S.J. SPARKS (eds.), *Tephra Studies*, págs 405-420, NATO Advanced Study Institutes Series, D. Reidel Publishing Co., Boston.
- BLONG, R.J. (1984) *Volcanic hazards: A Sourcebook on the effects of eruptions*. - 424 págs. Academic Press, Orlando.
- BLONG, R.J. (1996) *Volcanic Hazards Risk Assessment*. - En: R SCARPA & R.I. TILLING (eds.): *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg: 675-698.
- CARR, M.J. (1984) Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics of the Central American volcanic front. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 20: 231-252.

- CHOUET, B.A., HAMISEVI, N. & MCGETCHIN, T.R. (1973) Photoballistic analysis of main volcanic jet, Stromboli, Italy. - EOS Transactions American Geophysical Union, 54 (4): 510.
- CHOUET, B.A., HAMISEVI, N. & MCGETCHIN, T.R. (1974) Photoballistics of volcanic jet activity at Stromboli, Italy. - Journal of Geophysical Research, 79 (32): 4961–4976.
- COHEN, A.D. & RAYMOND, R. Jr. (1984) Final Report of short-term mission for preliminary evaluation of the peat resources of Costa Rica. - Inter-American Development Bank, Los Alamos National Laboratory, 31 págs.
- COHEN, A.D., RAYMOND, R. Jr., MORA, S., ALVARADO, A. & MALAVASSI, L. (1986) Características geológicas de los depósitos de turba en Costa Rica (estudio preliminar). - Revista Geológica de América Central, 4: 47-67.
- DEL POTRO, R., en prep.: Análisis de estabilidad del estratovolcán Turrialba.
- DELMELLE, P. & STIX, J. (2000) Volcanic gases. - En Sigurdsson, H. (Ed.) Encyclopedia of volcanoes (pp. 803-815), Academic Press, San Diego.
- DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G.E. (2003) Atlas Tectónico de Costa Rica. – 81 págs. Editorial de la Universidad de Costa Rica, San José.
- DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G.E. (2009) Atlas Tectónico de Costa Rica. – 2ª edición, 55 págs. Editorial de la Universidad de Costa Rica, San José.
- DÍAZ, J.A., PIERI, D., ARKIN, C.R., GORE, E., GRIFFIN, T.P., FLADELAND, M., BLAND, G., SOTO, C., MADRIGAL, Y., CASTILLO, D., ROJAS, E. & ACHÍ, S. (2010) Utilization of in situ airborne MS-based instrumentation for the study of gaseous emissions at active volcanoes. - International Journal of Mass Spectrometry, 295 (3): 105-112.
- DÓNDOLI, C. & TORRES, C. (1954) Estudio geoagronómico de la región oriental de la Meseta Central. - Ministerio de Agricultura e Industrias, Costa Rica, 180 págs.
- DZIERMA, Y., THIRWART, M.M., RABELL, W. FLUEH, E.R., ALVARADO, G.E. & MORA, M., (2010) Imaging crystal structure in south central Costa Rica with receiver

- functions. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11, Q08S26, doi: 10.1029/2009GC002936.
- EYRE, T., O'BRIEN, G.S., MARTINI, F., BEAN, C.J., MORA, M.M., PACHECO, J.F. & SOTO, G.J. (2011) Investigating seismic source mechanism at Turrialba volcano, Costa Rica. - *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-8859, 2011. EGU General Assembly 2011.
- EYRE, T., BEAN, C.J., DE BARROS, L., O'BRIEN, G.S., MARTINI, F., MORA, M.M., PACHECO, J.F. & SOTO, G.J. (2012) Comparing the source mechanisms of long period (LP) volcano-seismic events recorded in 2009 and 2011 at Turrialba volcano, Costa Rica. - EGU General Assembly 2012.
- FELPETO, A. (2002) Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica. – 250 pp. Universidad Complutense, Madrid. [Tesis doctoral].
- FELPETO, A., MARTÍ, J. & ORTIZ, R. (2007) Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166: 106-116.
- FERNÁNDEZ, A. (1987) Geología de la Hoja Topográfica Tucurrique (1:50 000 IGNCR, 3445I). – 206 págs. Tesis de Licenciatura, Escuela de Geología, Universidad de Costa Rica.
- FERNÁNDEZ, M., MORA, M. & BARQUERO, R. (1998) Los procesos sísmicos del volcán Irazú. - *Revista Geológica de América Central*, 21: 47-59.
- FERNÁNDEZ, R. (1921) Un volcán olvidado. *Revista de Costa Rica*, 3,4-5:110-120.
- GANS, P. B., ALVARADO, G., PÉREZ, W., MACMILLAN, I. & CALVERT, A. (2003) Neogene evolution of the Costa Rican Arc and development of the Cordillera Central. – *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 35:74.
- GONZÁLEZ, C. (1910) Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica 1608-1910. - 239 págs. Editorial Tecnológica de Costa Rica, primera reimpresión (1994) del original de la Tipografía de Avelino Alsina.

- GRANDOSO, H., V. DE MONTERO, A., & CASTRO, V. (1981) Características de la atmósfera libre sobre Costa Rica y sus relaciones con la precipitación. – Informe Semestral Instituto Geográfico Nacional, enero-junio 1981: 11-52.
- GÜENDEL, F. (1985) Enjambres sísmicos en el volcán Irazú. - Catálogo de temblores 1984, OVSIORI, Universidad Nacional, Costa Rica: 100-104.
- HEIKEN, G., MURPHY, S., HACKETT, A. & SCOTT, K. (1995) Volcanic Hazards and Energy Infrastructures. -U.S Dept. of Energy Code EH-33: Office of Risk Analysis and Technology. LA-UR, 95-1087:1-45 pp.
- HENAR, J.A. (2011) Análisis morfotectónico y paleosísmico de la falla de Aguacaliente (Valle Central de Costa Rica). – 48 págs. Tesis de Maestría, Universidad Complutense de Madrid.
- HILTON, D.R., RAMÍREZ, C., MORA, R., FISCHER, T.P., FÜRI, E., BARRY, P.H. & SHAW, A.M., (2010) Monitoring of temporal and spatial variations in fumaroles helium and carbon dioxide characteristics at Poás and Turrialba volcanoes, Costa Rica (2001-2009). - Geochemical Journal, 44: 431-440.
- HORTON, R.J.M. & McCALDIN, R.O. (1964) Observations on air pollution aspects of Irazú volcano, Costa Rica. - Public Health Reports, 79, 925-929.
- JEREZ, D. & CLINE, M. (1990) Preliminary hazard map for Turrialba volcano. USAID/RET Corporation (1: 50 000). – En: WOODWARD-CLYDE (1993): A preliminary evaluation of earthquake and volcanic hazards significant to the major population centers of Central Valley, Costa Rica.
- KUSSMAUL, S., PANIAGUA, S. & GAÍNZA, J. (1982) Recopilación, clasificación e interpretación petroquímica de las rocas ígneas de Costa Rica. - Informe Semestral Instituto Geográfico Nacional, julio a diciembre 1982, San José, Costa Rica, págs. 17-79.
- LINKIMER, L. (2003) Neotectónica del extremo oriental del cinturón deformado del centro de Costa Rica. - 103 págs. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.

- LÜCKE, O.H., GÖTZE, H.-J. & ALVARADO, G.E. (2010) A Constrained 3D Density Model of the Upper Crust from Gravity Data Interpretation for Central Costa Rica. – International Journal of Geophysics, Article ID 860902, doi: 10.1155/2010/860902, 9 pp.
- MARINI, L., PRINCIPE, C., CHIODINI, G., CIONI, R., FYTIKAS, M. & MARINELLI, G. (1993) Hydrothermal Eruptions of Nisyros (Dodecanese, Greece) — Past Events and Present Hazard. - Journal of Volcanology and Geothermal Research 56 (1–2): 71–94.
- MARTINI, F., TASSI, F., VASELLI, O., DEL POTRO, R., MARTÍNEZ, M., VAN DER LAAT. & FERNÁNDEZ, E. (2010) Geophysical, geochemical and geodetical signals of reawakening at Turrialba volcano (Costa Rica) after almost 150 years of quiescence. - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 198 (3-4) : 416-432.
- MASTIN, L.G. (2001) A Simple Calculator of Ballistic Trajectories for Blocks Ejected during Volcanic Eruptions. - USGS Open-File Report 01-45, version 1.2 online November 2009.
- MCGETCHIN, T.R., SETTLE, M. & CHOUET, B.A. (1972) Geologic and photoballistic studies at Mt Etna and Stromboli. – EOS Transactions of the American Geophysical Union, 53 (4): 533.
- MELSON, W.G.; BARQUERO, J.; SÁENZ, R. & FERNÁNDEZ, E. (1986) Erupciones explosivas de importancia en volcanes de Costa Rica (un reporte del progreso alcanzado). - Boletín de Vulcanología, 16: 15-20, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- MÉNDEZ, J., SOTO, G.J., ZAMORA, N., VARGAS, A., SJÖBOHM, L., BONILLA, E., BARAHONA, D., SOLÍS, L., KYCL, P. & BAROÑ, I. (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.



- MONTERO, W. (2003) El sistema de falla Atirro-Río Sucio y la cuenca de tracción de Turrialba-Irazú: Indentación tectónica relacionada con la colisión del levantamiento del Coco. – Revista Geológica de América Central, 28: 5-29.
- MONTERO, W. & ALVARADO, G. (1995) El terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 ( $M_s= 5.9$ ) y el contexto geotectónico de la región del volcán Irazú, Costa Rica. – Revista Geológica de América Central, 18: 25-40.
- MONTERO, W., SOTO, G.J., ALVARADO, G.E. & ROJAS, W. (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, 43: 13-36.
- MORA, M., ROJAS, R. & LINKIMER, L. (2001) Resultados de una campaña sismológica realizada del 12 al 14 de marzo del 2001 en el volcán Turrialba, Costa Rica. - Informe Interno. Red Sismológica Nacional (UCR-ICE). 13 páginas + anexos.
- MORA, M., ROJAS, W. & LINKIMER, L. (2001) Resultados de una campaña sismológica realizada del 12 al 14 de marzo del 2001 en el volcán Turrialba, Costa Rica. - Inf. Interno RSN, 15 págs.
- MORA, R. (2001) Informe Semestral de la actividad volcánica de la Cordillera Volcánica Central, Enero-junio 2001. – Inf. Interno RSN, 35 págs.
- MORA, R. (2003) Informe anual de la actividad de la Cordillera Volcánica Central, 2002, Costa Rica. – Inf. Interno RSN, 50 págs.
- MORRISSEY, M.M. & MASTIN, L.G. (2000) Vulcanian eruptions. – En Sigurdsson, H. (Ed.) Encyclopedia of volcanoes (pp. 463-476), Academic Press, San Diego.
- NÉMETH, K. & MARTIN, U. (2007) Practical Volcanology. - Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary, 207, Budapest, 221 pp.
- NEWHALL, C.G. & HOBLITT, R.P. (2002) Constructing event trees for volcanic crises. – Bulletin of Volcanology, 64: 33-20.

- OBANDO, L.G. & SOTO, G.J. (1994) La turbera del río Silencio (El Cairo, Siquirres, Costa Rica): paleoambientes lagunares influenciados por las cenizas del Volcán Turrialba. – *Revista Geológica de América Central*, 15:41-48.
- ORTIZ, R. & ARAÑA, V. (1996) Daños que pueden producir las erupciones. - En: R. ORTIZ (ed.): *Riesgo Volcánico, Serie Casa de los Volcanes*, Cabildo de Lanzarote, 5: 37-96.
- OVSICORI (1996) Estado de los volcanes. Informe interno. Universidad Nacional. 6 páginas.
- OVSICORI (2001<sup>a</sup>) Estado de los volcanes: Marzo 2001. Informe interno. Universidad Nacional. 6 páginas.
- OVSICORI (2001b) Estado de los volcanes: Octubre 2001. Informe interno. Universidad Nacional. 6 páginas.
- PANIAGUA, S. & SOTO, G. (1986) Reconocimiento de los riesgos volcánicos potenciales de la Cordillera Central de Costa Rica. – *Ciencia y Tecnología*, 10(2):49-72, San José, Costa Rica.
- PANIAGUA, S. & SOTO, G. (1988) Peligros volcánicos en el Valle Central de Costa Rica. – *Ciencia y Tecnología*, 12(1-2): 145-156, San José, Costa Rica.
- PFEIFFER, T. (2001) Vent development during the Minoan eruption (1640 BC) of Santorini, Greece, as suggested by ballistic blocks. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106 (3–4): 229–242.
- REAGAN, M.K. (1987) Turrialba Volcano, Costa Rica: Magmatism at the southeast terminus of the Central American arc. – 215 págs. Tesis doctoral, Universidad de California en Santa Cruz.
- REAGAN, M.K. & GILL, J.B. (1989) Coexisting calcalkaline and high-niobium basalts from Turrialba volcano, Costa Rica: Implications for residual titanates in arc magma sources. – *Journal of Geophysical Research*, B94: 4619-4633.
- REAGAN, M., HILL, J. & SOTO, G. (1993) An outline of the recent eruptive history of Turrialba Volcano, Costa Rica. – En: Woodward-Clyde Consultants, 1993: A

- preliminary evaluation of earthquake and volcanic hazards significant to the major population centers of the Valle Central, Costa Rica. – UNA - UCR - ICE - CNE - Roy F. Weston, Inc, Final report prepared for Ret Corporation: 120-155.
- REAGAN, M., DUARTE, E., SOTO, G.J. & FERNÁNDEZ, E. (2006) The eruptive history of Turrialba volcano, Costa Rica, and potential hazards from future eruptions. – En: Rose, W.I., Bluth, G.J.S., Carr, M.J., Ewert, J.W., Patino, L.C. & Vallance, J.W. (Eds.): Volcanic hazards in Central America. Geological Society of America Special Paper 412: 235-257.
- RUIZ, P., TURRIN, B.D., SOTO, G.J., DEL POTRO, R., GAGNEVIN, D., GAZEL, E., MORA, M., CARR, M.J. & SWISHER, C.C. (2010) Unveiling Turrialba (Costa Rica) volcano's latest geological evolution through new  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  ages. – Abstract V23B-2437 presentado en la 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, California, 13-17 diciembre.
- SARNA-WOJCICKI, A.M., SHIPLEY, S., WAITT, R.B., DZURISIN, D. & WOOD, S.H. (1981) Areal distribution, thickness, mass, volumes and grain size of air-fall ash from the six major eruptions of 1980. - En: P.W. LIPMAN & MULLINEAUX, D.R. (eds.): The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, USGS Professional Paper 1250: 577-600.
- SEEBACH, K. VON (1865) Volcanes situados al norte de las tierras altas de Costa Rica: Turrialba, Irazu-Tenorio. - En: Karl von Seebach y sus estudios sobre Costa Rica. - Publicaciones del Liceo de Costa Rica, 9: 9-28, Imprenta Lehmann, San José (reproducción en 1922).
- SIMKIN, T. & SIEBERT, L. (1994) Volcanoes of the World. – x + 349 págs., Geoscience Press, Inc. y Smithsonian Institution (2<sup>a</sup> ed.).
- SOTO, G.J. (1988a) Estructuras volcano-tectónicas del Volcán Turrialba, Costa Rica, América Central. – Actas V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 de agosto de 1988, Tomo III: I 163-I 175.

- SOTO, G.J. (1988b) Geología y vulcanología del Volcán Turrialba, Costa Rica. – Costa Rican Volcanism Workshop, 14-18 de noviembre de 1988, Washington, D.C. y Shenandoah National Park, 18 pp.
- SOTO, G.J. (1994) Volcanología Física. – En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (comps.): Atlas Geológico Gran Área Metropolitana. - Editorial Tecnológica de Costa Rica: 131-146.
- SOTO, G.J. (2010) Características y distribución de las emisiones de gases del Volcán Turrialba, Costa Rica. - II Jornada de Investigación de la Escuela de Tecnologías en Salud, Universidad de Costa Rica, setiembre de 2010.
- SOTO, G.J. & PANIAGUA, S. (1992) La Cordillera Volcánica Central (Costa Rica): sus peligros potenciales y prevenciones. – Revista Geográfica de América Central, N° 25-26:291-304.
- SOTO, G.J. & SJÖBOHM, L. (2005) Sobre el mapeo de los peligros volcánicos del Arenal (Costa Rica) como una herramienta para la planificación del uso del suelo y la mitigación de desastres. - En Memoria VIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica (26 pp.), San José, Costa Rica.
- SOTO, G.J. & ALVARADO, G.E. (2006) Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present. – En: Gill, J., Reagan, M., Tepley, F. & Malavassi, E. (Eds): Arenal Volcano Special Volume, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 157(1-3):254-269 [doi 10.1016/j.jvolgeores.2006.03.041].
- SOTO, G.J. & ALVARADO, G.E. (2008) Evaluación de la amenaza volcánica del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón para el Estudio de Impacto Ambiental. – Informe interno Instituto Costarricense de Electricidad, IX+39 págs.
- SOTO, G.J. & MORA, M. (en prensa) Actividad del volcán Turrialba (2007-2011) y perspectivas de amenaza volcánica. - Costa Rica en el tercer milenio: desafíos y propuestas para la reducción de vulnerabilidad ante los desastres, Preventec UCR
- SOTO, G.J., FERNÁNDEZ, J.F., ROJAS, M. & PANIAGUA, C. (2008) Lluvia ácida en el volcán Turrialba (Costa Rica): abril 2007 - abril 2008. - Memoria: Programa y

Resúmenes, IX Congreso Geológico de América Central y VI Congreso Geológico Nacional, 2-4 de julio del 2008, San José, Costa Rica, p. 183-184.

SOTO, G.J., MORA, R., MORA, M., BARQUERO, R., TAYLOR, W., VARGAS, A., ALVARADO, G.E., RAMÍREZ, C., GONZÁLEZ, G., MORA, R., PANIAGUA, C. & FERNÁNDEZ, J.F. (2010) Turrialba volcano's threat to the cities of the Central Valley of Costa Rica. - En Abstracts Volume (p. 138), Cities on Volcanoes 6<sup>th</sup>, Puerto de la Cruz, Tenerife.

STIRLING, M., RHOADES, D. & BERRYMAN, K. (2002) Comparison of earthquake scaling derived from data of the instrumental and preinstrumental era. - Bulletin of the Seismological Society of America, 92 (2): 812-830.

STOIBER, R. & CARR, M.J. (1974) Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America. - Bulletin Volcanologique, 37, 3: 304-326.

TOURNON, J. (1984) Magmatismes du Mesozoïque à l'actuel en Amérique Centrale: l'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andésites. - Mémoire Sciences de la Terre, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 84-49, 335 págs.

TOYOS, G.P., COLE, P.D., FELPETO, A. & MARTÍ, J. (2007) A GIS-based methodology for hazard mapping of small volume pyroclastic density currents. - Natural Hazards, 41: 99-112.

VASELLI, O., TASSI, F., DUARTE, E., FERNÁNDEZ, E., POREDA, R.J. & DELGADO, A. (2010) Evolution of fluid geochemistry at the Turrialba volcano (Costa Rica) from 1998 to 2008. - Bulletin of Volcanology, 72(4): 397-410.

VERGNOLLE, S. & MANGAN, M. (2000) Hawaiian and strombolian eruptions. - En Sigurdsson, H. (Ed.) Encyclopedia of volcanoes (pp. 447-462), Academic Press, San Diego.

WADE, J.A. (2008) Constraints on the Central American Slab Fluid Composition From Arc Melt Inclusions And Phenocrysts. - 304 pp. [Tesis doctoral], Boston University, EE. UU.

WALLACE, P. & ANDERSON, A.T. JR. (2000) Volatiles in Magmas. - En Sigurdsson, H. (Ed.) Encyclopedia of volcanoes (pp. 149-170), Academic Press, San Diego.

- WILSON, C.J.N. & HOUGHTON, B.F. (2000) Pyroclastic transport and deposition. - En Sigurdsson, H. (Ed.) Encyclopedia of volcanoes (pp. 463-476), Academic Press, San Diego.
- WOODS, A. W. (1995) A model of Vulcanian explosions. - Nuclear Engineering and Design, 155 (1-2): 345-357.
- YAMAGISHI, H. & FEEBREY, C. (1994) Ballistic ejecta from the 1988-1989 andesitic Vulcanian eruptions of Tokachidake volcano, Japan: morphological features and genesis. - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 59: 269-278.
- ZÁRATE, E. (1988) Factores meteorológicos asociados a desastres causados por erupciones volcánicas en Costa Rica. - Ciencia y Tecnología, 12 (1-2): 41-52.
- ZOBIN, V.M. (1979) Dinámica de la fuente de los sismos volcánicos. - 92 págs., Nauka, Moscú [en ruso].
- ZOBIN, V. (2001) Seismic hazard of volcanic activity. - Journal of Volcanology and Geothermal Research, 112: 1-14.

## Glosario

ANDESITA: Roca volcánica con contenido de sílice entre 52 y 63 %.

ANDESITA BASÁLTICA: Roca volcánica con contenido de sílice entre 52 y 56 %.

DACITA: Roca volcánica con contenido de sílice entre 63 y 70 %.

DOMO: Estructura volcánica de lavas viscosas que forma una cúpula en el sitio de la extrusión.

ESCORIA: Roca volcánica piroclástica caracterizada por su densidad intermedia, producto de su vesicularidad interna. Suele ser de colores oscuros.

ESTROMBOLIANA: Tipo de erupción volcánica, con explosión de magma nuevo, de tamaño pequeño a mediano y que genera columnas de piroclastos que se levantan como un penacho sobre el cráter, de 1-5 km de altura.

FLUJO PIROCLÁSTICO: Evento volcánico que proyecta piroclastos desde el punto de explosión, fluyendo por las laderas del volcán, a alta velocidad y temperatura.

FREÁTICA: Tipo de erupción volcánica, con explosión de agua subterránea que genera mucho vapor de agua y la fragmentación de materiales preexistentes que circundan el sitio de explosión.

FREATOMAGMÁTICA: Tipo de erupción volcánica, con explosión de agua subterránea en interacción con magma, que genera mucho vapor de agua y la fragmentación del magma.

HAWAIANA: Tipo de erupción volcánica, con explosión de magma nuevo, de tamaño pequeño y que genera columnas de piroclastos que se levantan como un penacho sobre el cráter, de <1 km de altura, y genera flujos de lava principalmente.

IGNIMBRITA: Roca volcánica producto de la depositación de flujos piroclásticos voluminosos, generalmente de pómez, y que puede ser soldada o no.

LAVA: Magma desgasificado que llega a la superficie y llena un cráter o fluye por las pendientes de un volcán.

**PIROCLASTO:** Clasto volcánico producido por la fragmentación del magma debido a un explosión cercana a la superficie. Pueden caer luego por trayectoria balística, arrastrados por el viento y caída por gravedad, o por flujos.

**PLINIANA:** Tipo de erupción volcánica, con explosión de magma nuevo, de tamaño muy considerable y que genera columnas de piroclastos que se levantan como un penacho sobre el cráter, de más de 20 km de altura.

**PÓMEZ:** Roca volcánica piroclástica caracterizada por su baja densidad, con frecuencia menor a la del agua, producto de una alta vesicularidad interna. Suele ser de colores claros.

**SUBPLINIANA:** Tipo de erupción volcánica, con explosión de magma nuevo, de tamaño considerable y que genera columnas de piroclastos que se levantan como un penacho sobre el cráter, de 15-20 km de altura.

**VULCANIANA:** Tipo de erupción volcánica, con explosión de magma juvenil, de tamaño mediano a considerable y que genera columnas de piroclastos que se levantan como un penacho sobre el cráter, de 5-15 km de altura.

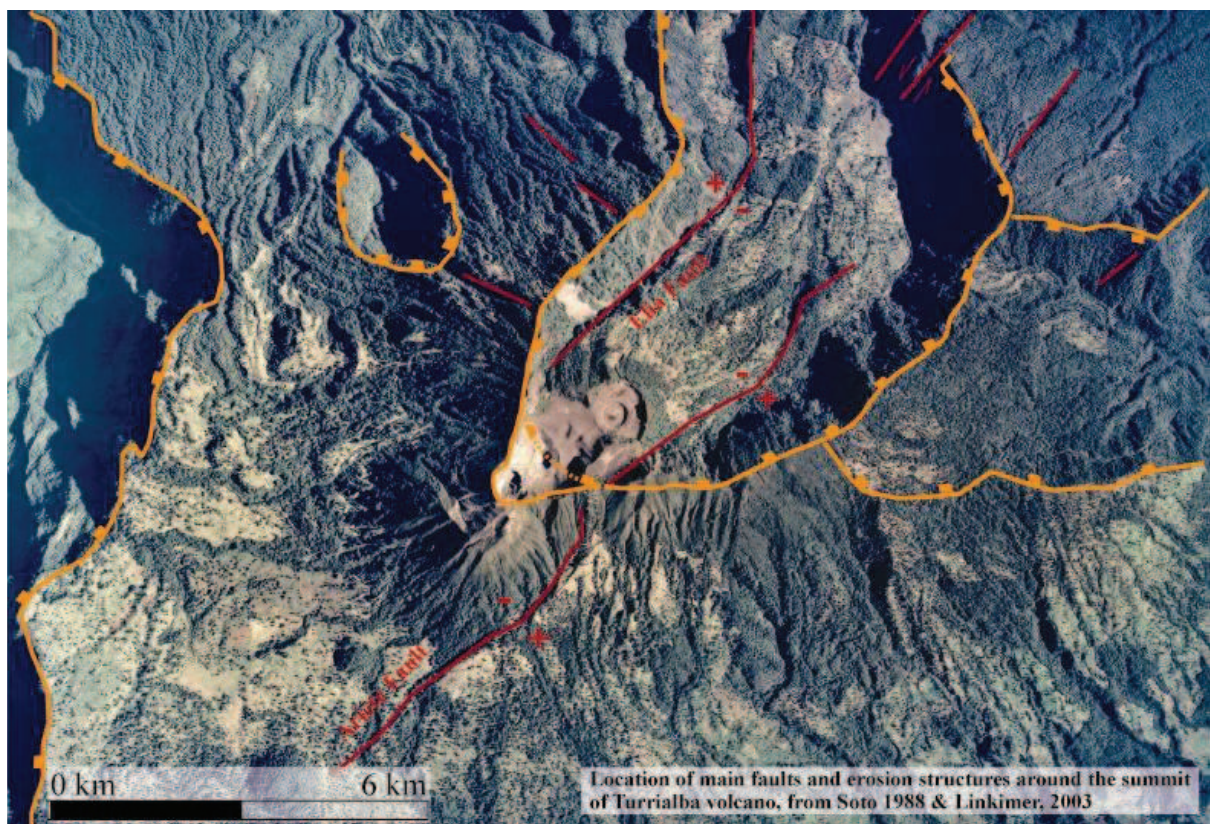


**Anexos:**

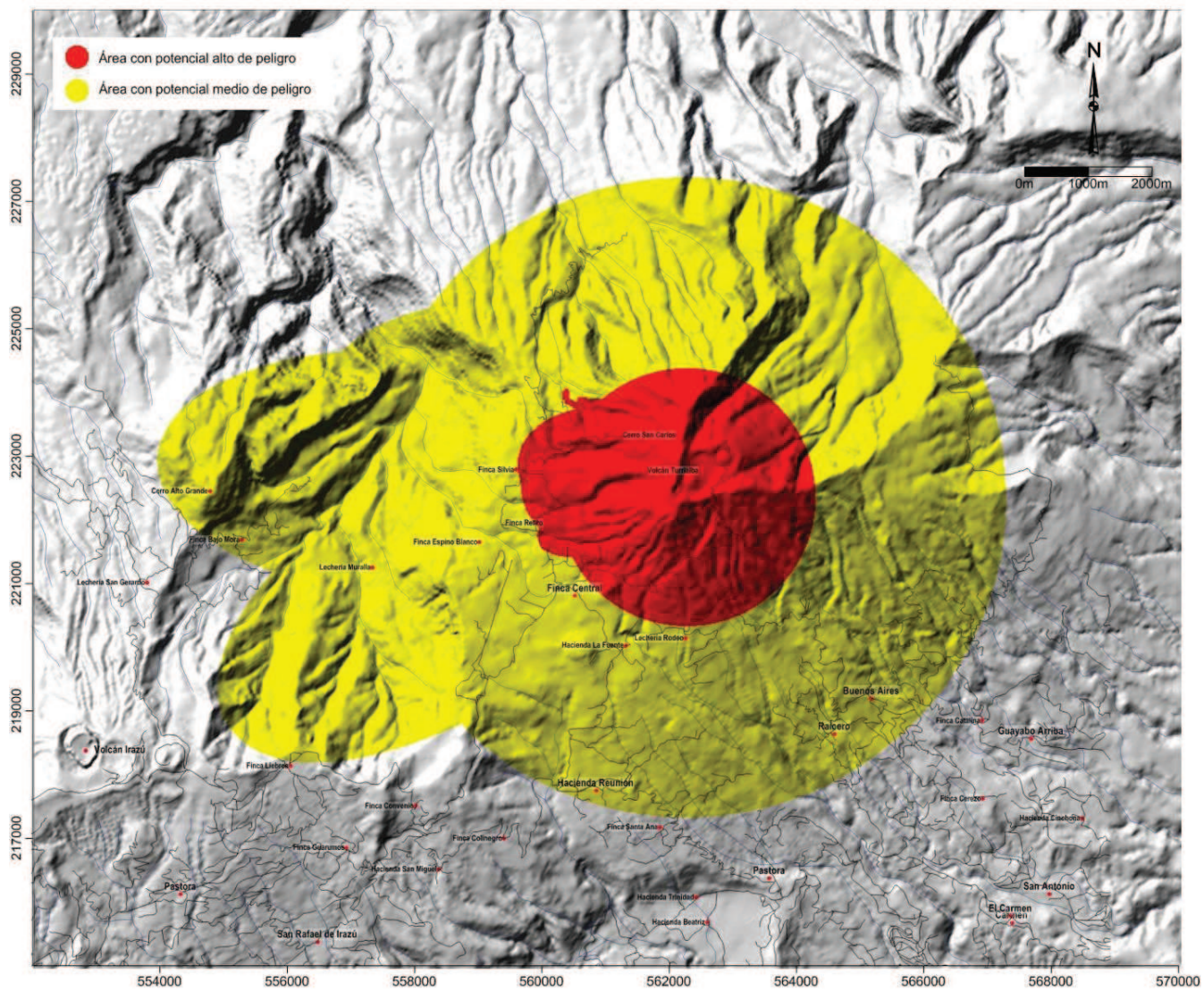
1. Mapa de elevación digital generado a partir de la cartografía del IGN editada y mejorada. Incluye 12 hojas topográficas a escala 1:50 000 (cerca de 6000 km<sup>2</sup>).
2. Vista aérea de la cima del Turrialba. Con su estructura: alineamiento de cráteres dentro de la gran depresión volcánica abierta hacia el sector caribe, producto del graben cuspidal, anfiteatro de avalancha volcánica y erosión (glaciar?), así como las principales fallas y aperturas erosionales probablemente relacionadas estructuralmente (reformada de Soto, 1988 y Linkimer, 2003).
3. Mapa de peligro volcánico a escala 1:50 000, escenario corto plazo.
4. Mapa de peligro volcánico a escala 1:25 000 del área de la cima.



## Anexo 2: Vista aérea de la cima del Turrialba y sus estructuras



**Anexo 3: Mapa de peligros a corto plazo simplificado en alto y mediano-alto peligro, escala 1:50 000**



**Anexo 4: Detalle de la cima, con los peligros asociados al corto plazo: toda el área amenazada por balística, y las diferentes áreas amenazadas por caída de ceniza de hasta 1 m de espesor, por lavas y por flujos y oleadas piroclásticas.**

**Escala 1:25 000.**

