

UNIVERSIDAD DE SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Postgrados

**APLICACIÓN DE GIS PARA LA PREPARACIÓN DE MAPAS DE
PELIGROS VOLCÁNICOS Y RESTRICCIÓN DE USO DE LA
TIERRA EN EL VOLCÁN TURRIALBA, COSTA RICA**

Linda Marie Sjöbohm Castillo

Richard Resl, Ph.Dc., Director de Tesis

**Tesis de posgrado presentada como requisito para la obtención del título
de Magister en Sistemas de Información Geográfica**

Quito, junio 2013

UNIVERSIDAD DE SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Postgrados

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Aplicación de GIS para la preparación de mapas de peligros
volcánicos y restricción de uso de la tierra en el volcán
Turrialba, Costa Rica**

Linda Marie Sjöbohm Castillo

Richard Resl, Ph.Dc.
Director de tesis

Pablo Cabrera, Ms
Miembro del comité de tesis

Richard Resl, Ph.Dc.
**Director de la Maestría en
Sistemas de Información
Geográfica**

Stella de La Torre, Ph.D.
**Decana del Colegio de Ciencias
Biológicas y ambientales**

Víctor Viteri Breedy, Ph.D.
**Decano del Colegio de
Postgrados**

Quito, junio 2013

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: LINDA MARIE SJÖBOHM CASTILLO

C.I.:111430504

Fecha: Quito, 8 de junio 2013

RESUMEN

Este informe final integra el trabajo de los dos informes parciales anteriores y ha analizado una serie de variables y modelos para incorporar en los mapas de peligros y de restricción de uso del suelo que se proponen al final.

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 km²), el cual se ha utilizado para verter los mapas de peligros **[Capítulo 3]**.

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 **[Capítulo 4]**. Se presentan los detalles de tal recopilación bibliográfica con detalles adicionales de trabajo de campo. Esto nos ha llevado a concluir que el volcán Turrialba actual ha crecido en el último cuarto millón de años, y particularmente presentó 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 **[Capítulo 4]**. 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 **[Capítulo 5]**.

Se recopilaron los diferentes mapas de peligros existentes y se han tratado de comparar a escalas similares, como base para los nuevos mapas.

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 la dispersión de cenizas, flujos piroclásticos y lavas **[Capítulo 5, Figuras 45, 52-54, 59-73, 76-78, 83 y 85]**. Se han vertido en los mapas de peligros **[Figuras 90-95]**.

Además, se han identificado 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.

Los modelos de dispersión de cenizas incluyen 12 escenarios, cuatro (estacionales según vientos tipo) para cada uno de los escenarios estromboliano (2×10^6 m³ de material, columna de 4 km de altura), vulcaniano (30×10^6 m³ de material, columna de 8 km de altura) y pliniano (200×10^6 m³ de material, columna de 15 km de altura). Con base en esto se han caracterizado las áreas afectables por erupciones pequeñas, medianas (corto plazo) y paroxísmicas (largo plazo). Las áreas más afectables son las de la inmediatez en unos 2-5 km alrededor del cráter y en particular el sector oeste del volcán.

También se han construido modelos para flujos piroclásticos por colapso de columnas de los mismos tipos de erupción, y además los pasos probabilísticos posibles por lavas desde la cima y desde un foco lateral en el área de la falla Ariete. 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 **[Figuras 90-94]**.

- a. 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.
- b. 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, que contempla **[Figura 95]**:

- a. Áreas de afectables por flujos piroclásticos por colapso de columnas plinianas.
- b. Áreas con espesores de cenizas > 1 m por eventos plinianos, en todos los escenarios temporales.
- c. Área de caída balística de 5 km de radio alrededor del cráter.
- d. 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, cambios en el comportamiento eruptivo 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 (aproximadamente 2 km a la

redonda y el sector oeste del volcán) 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.

Con base en los escenarios de peligro mediano a máximo, se sugieren dos áreas principales de restricción **[Capítulo 6] [Figura 97]**, coincidentes con 2 km a la redonda del cráter SW + el PNVT en 2 km a la redonda del cráter, con restricción total y promoción de cambio de uso del suelo, y 5 km a la redonda, donde abunda la vocación forestal y de protección.

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 **[Capítulo 6] [Figuras 98 y 99]**.

ABSTRACT

This final report incorporates the work of the two previous progress reports and analyzed a number of variables and models to incorporate hazard maps and land use restrictions that are proposed at the end.

It has built a cartographic base maps originated in the National Geographic Institute, purified for the production of a digital elevation map (DEM) from all around the volcano (about 6000 km²), which has been used to pour maps dangers [Chapter 3].

It has made and outfitted a literature, unpublished documents, and periodical cartographic sources and field work to reconstruct the history of Turrialba volcano, aimed at the production of volcanic hazard maps that support zoning restriction areas use Turrialba volcano soil in and around [Chapter 4]. We present the details of such a bibliography with additional details of fieldwork. This has led us to conclude that the current Turrialba volcano has increased in the last quarter million years, and particularly had episodes of major construction around 60-100 ka and in the last 10 ka.

We have characterized the cortical and lithospheric setting of the volcano, as well as its geology and history of the last 250 ka and detail of the last 10 ka, with emphasis on the recent explosive deposits 3.4 ka [Chapter 4]. Unable to get more detail on the explosive story between 3.4 to 10 ka, because of lack of levels correlated in outcrop areas around the volcano. However, it has been established that the volcano has shown a profuse volcanic activity in the last 10 ka, both effusive and explosive. He has worked in the geochemical characterization of products to help define the eruptive scenarios and hazard scenarios.

Based on field data have been constructed in detail assessments about the dangers of exhaust and acid rain, ballistics, pyroclastic fall and the areas affected by lava and pyroclastic flows, as well as volcanic and tectonic seismic events originating in the pericratéricas areas [Chapter 5].

Were collected from different existing hazard maps have tried to compare to similar scales as a basis for the new maps.

Models have been applied from Ejecta program! (Mastin, 2001) for modeling drop ballistic elements and Voris 2.0.1 tool. (Felpeto et al., 2007), for the dispersion of ash, pyroclastic flows and lava [Chapter 5, Figures 45, 52-54, 59-73, 76-78, 83 and 85]. They have poured into hazard maps [Figures 90-95].

In addition, we have identified common areas of acid rain to the west and southwest and occasional acid rain to the southwest and southeast of the volcano, with ranges of up to about 8 km from the volcano. Defined areas of high and moderate hazard radios ballistic with 2 and 5 km, respectively, equivalent to falling fragments of 11 cm and 4.5 cm in diameter.

The ash dispersion models include 12 stages, four (seasonal winds as type) for each of the scenarios Strombolian (2×10^6 m³ of material, column 4 km high), Vulcan (30×10^6 m³ of material, column 8 km from height) and Plinian (200×10^6 m³ of material, column 15 km high). Based on this have been characterized by eruptions affectable areas small, medium (short term) and paroxysmal (long term). The affectable areas are the immediacy of about 2-5 km around the crater and in particular the western sector of the volcano.

Models have also been constructed for pyroclastic flows by column collapse of the same types of eruption, and also the possible probability steps lavas from the top and from a side focus on the area of the fault Ariete. It has refined risk analysis and scenarios to volcanic and tectonic seismicity MW from 6.0 to 6.5, which originated in the volcanic cuspidal, so that scenarios are taken from affected areas.

The maps produced show two scenarios, short and long term, in light of the models developed, validated with field data obtained:

Eruption hazard map for short-term (months to years from the present), with an expected eruption similar to 1864-66. Contemplate groundwater phases, strombolian and Vulcanian [Figures 90-94].

a. It provides a high-or maximum defined danger ballistic area around the crater 2 km SW, with Vulcan ashfall > 1 m thick pyroclastic flows by column collapse estrombolianas.

b. An area of intermediate to high-risk areas defined by ballistic affectable of 5 km, lava, pyroclastic flows and surges by Vulcans events and areas with ash thickness > 30 cm Vulcans events.

Hazard map for long-term eruption, which includes [Figure 95]:

a. Areas affectable by pyroclastic flows by Plinian column collapse.

b. Areas ash thicknesses > 1 m plinianos events in all temporal scenarios.

c. Ballistic drop area of 5 km radius around the crater.

d. Wash area, including general within the radius of 5 km.

Maps should be used dynamically, and stages of change as a rash, with possible periods of calm, changes in behavior or migration eruptive eruptive mouths, scenarios are changeable.

To eruptions considered in the short term, there should be immediate evacuation of the area of maximum danger (approximately 2 km radius and the western sector of the volcano) once you have signs of imminent eruption, or initiate explosions stages vigorous groundwater. Also, areas of intermediate to high risk, should be in a position to be evacuated immediately or promptly.

Based on the hazard scenarios medium to maximum, suggests two main areas of restriction [Chapter 6] [Figure 97], coincident with 2 km radius of the crater SW + the PNVN in 2 km radius of the crater, with total restriction and promotion of land use change, and five miles around, with plenty of protective forest vocation.

It has made a study of evacuation routes based on field work and analysis of potential sites for installation of shelters ballistic proof [Chapter 6] [Figures 98 and 99].

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	24
1.1. Antecedentes y justificación.....	24
1.2. Objetivos.....	25
CAPÍTULO 2: TRABAJOS REALIZADOS POR FUNDEVI	26
2.1. Recopilación de información.....	26
2.2. Trabajo de campo.....	29
2.3. Modelado de los eventos volcánicos	29
CAPÍTULO 3: BASES PARA LOS MAPAS DE PELIGROS VOLCÁNICOS	30
3.1. La base topográfica para los mapas.....	35
CAPÍTULO 4: GEOLOGÍA, TEFROESTRATIGRAFÍA Y TECTÓNICA DEL VOLCÁN TURRIALBA.....	38
4.1. La corteza y litosfera bajo la Cordillera Volcánica Central.....	39
4.2. Evolución geológica del volcán Turrialba.....	42
Tefroestratigrafía reciente.....	46
4.4. Estructura	58
4.5. Actividad reciente 2007-2012	66
Actividad sísmica 2007-2012.....	74
4.6. Actividad futura	79
CAPÍTULO 5: LOS PELIGROS VOLCÁNICOS EN EL TURRIALBA	82
5.1. Peligros volcánicos, volcán Turrialba.....	84
5.1.1 La salida y dispersión de gases y lluvia ácida	85
5.1.2. Caída balística de bloques.....	98
5.1.3. Caída de piroclastos	109
5.1.4. Flujos piroclásticos.....	132
5.1.5. Apertura de cráteres laterales.....	136
5.1.6. Coladas de lava	138
5.1.7. Lahares.....	142

5.1.8. Deslizamientos y avalanchas volcánicas	144
5.1.9. Sismos volcánicos y tectónicos en el macizo	146
CAPÍTULO 6: ESCENARIOS PARA LOS MAPAS DE PELIGROS	150
6.1. Mapas de peligro volcánico	150
Mapa y restricciones de uso del suelo	166
6.2.1. Área radio de 2 km alrededor	166
6.2.1. Área radio de 5 km alrededor	167
6.3. Rutas de escape y refugios	169
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	172
CAPÍTULO 8: RECOMENDACIONES	177
CAPÍTULO 9: AGRADECIMIENTOS	178
CAPÍTULO 10: REFERENCIAS	179
Glosario	191
ANEXOS:	193
Anexo 1: Mapa de elevación digital	194
Anexo 2: Vista aérea de la cima del Turrialba y sus estructuras	194
Anexo 3: Mapa de peligros a corto plazo simplificado en alto y mediano-alto peligro, escala 1:50 000.....	196
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.....	197
Escala 1:25 000.....	197

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo metodológico para la construcción de mapas de peligros y el proceso de investigación. Los pasos pueden ser sustituidos o simplificados según el grado de detalle e información disponible (tomado de Soto & Alvarado, 2008).

- Figura 2: Diagrama de flujo metodológico detallado propuesto por Delgado (2010).* 34
- Figura 3: 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 km²).* _____ 35
- Figura 4: Imagen de Google EarthTM del 2007 que muestra el volcán Turrialba (flecha roja), el área del volcán desde Guápiles hasta Turrialba, y las áreas del Valle Central hacia el suroeste, que podrían ser afectables por la actividad del volcán. Muestra un área ligeramente menor a la de la Figura 3.* _____ 36
- Figura 6: La Cordillera Volcánica Central y los diferentes conos y estratovolcanes mayores que definen sus tres ejes.* _____ 39
- Figura 7: Profundidad de la Zona de Wadati-Benioff bajo el extremo oriental de la Cordillera Volcánica Central (con base en datos cortesía de Ivonne Arroyo, Universidad de Kiel, Alemania).* _____ 40
- Figura 8: Arriba: Perfil sísmológico cortando los volcanes Irazú y Turrialba (triángulos negros), que muestra la litosfera y sus divisiones (tomado de Dzierma et al., 2010). Abajo: Perfil gravimétrico cortando los mismos volcanes, con la zona de baja densidad, área que aloja probablemente una cámara magmática somera a 4-11 km bajo las cimas de los volcanes (tomado de Lücke et al., 2010).* _____ 41
- Figura 9: El macizo del Turrialba con sus diferentes estadios de evolución. A la derecha, un detalle mostrando los conos compuestos y piroclásticos mencionados en la Tabla 1.* _____ 43
- Figura 10: Geología del Turrialba basada en Soto (1988) y estructuras de Linkimer (2003), remapeada y con algunas nuevas dataciones.* _____ 48
- Figura 11: Depósitos del volcán Turrialba. A: Flujo soldado de la Unidad Turrialba Inferior. B: Cono piroclástico de la Unidad Los Cabros. C: Dique asociado al cono de la Unidad Los Cabros. D: Oleadas piroclásticas en el camino entre La Central y La Picada, cerca de la quebrada Paredes, unos 2 km al WSW del cráter. E: Oleadas piroclásticas en la cima del Turrialba. F: Vista desde el Irazú, con la clara morfología de la lava reciente de La Picada.* _____ 49
- Figura 12: Izquierda: Uno de los pocos dibujos del Turrialba en plena actividad exhalativa (fumarolas), según reinterpretación del documento de Meagher en 1858.*

- Abajo: Dibujo de Karl von Seebach del Turrialba en plena erupción en 1864-66. Es la única imagen del volcán en erupción. _____ 49*
- Figura 13: Depósitos de pómez de la Subunidad 4, algunos km al oeste de la cima del Turrialba. _____ 52*
- Figura 15: Depósitos de la erupción subpliniana de hace ~2 ka (flecha azul) en la cima sector W del cráter, donde alcanza varios m de espesor sobre la lava La Picada (contacto señalado con flecha roja)._____ 53*
- Figura 16: A la izquierda, la distribución e isopacas (espesor en cm de los depósitos) de la subunidad 4, de hace 2000 años, del Turrialba (Tomado de Reagan et al., 2006). A la derecha, la columna estratigráfica en la turbera del río Silencio, Siquirres, que muestra el material arcilloso entre 240-270 cm de profundidad, correlacionable con subunidad 4, y que demuestra alguna distribución anómala hacia el este, de las cenizas (Tomado de Obando & Soto, 1993). _____ 53*
- Figura 17: Depósitos de la erupción subpliniana de hace ~2 ka en el sector sur del Cerro Alto Grande, al NE del Irazú. _____ 54*
- Figura 18: Perfil del viento en Costa Rica a diferentes alturas para la época seca (a) y la época lluviosa (b). Reformado de Zárate (1990). _____ 56*
- Figura 19: Depósitos piroclásticos de edad <2ka y de la erupción subpliniana de hace ~2 ka subyaciéndolos (flechas rojas). La palita a la izquierda mide 25 cm y el mazo a la derecha mide 40 cm. Los colores amarillentos de los depósitos documentan una componente importante de material alterado y emitido durante explosiones freáticas. _____ 57*
- Figura 20: Depósitos piroclásticos de la erupción de 1864-66. A la izquierda en la Finca El Retiro, unos 2,5 km al WSW del cráter central (La flecha es de unos 50 cm). A la derecha en el borde W del cráter (la flecha indica el inicio freático). _____ 58*
- Figura 21: 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). _____ 59*

- Figura 22: Fallas a nivel regional que cortan el macizo del Turrialba-Irazú y alrededores, en los dominios de los cinturones deformados del Norte de Panamá y del Centro de Costa Rica (figura tomada de Linkimer, 2003, figura 18). _____ 63*
- Figura 23: Distribución de la sismicidad en el volcán Turrialba 2008-2011, densidad de epicentros y ubicación de perfiles de las figuras 13, 14 y 15. _____ 64*
- Figura 24: Perfil A-B (NW a SE) de la Figura 12, con los hipocentros proyectados de la sismicidad en el volcán Turrialba 2008-2011, y la densidad de hipocentros. _____ 65*
- Figura 25: Perfil A-B (NW a SE) de la Figura 12, con los hipocentros proyectados de la sismicidad en el volcán Turrialba 2008-2011. _____ 65*
- Figura 26: Perfil C-D (SW a NE) de la Figura 12, con los hipocentros proyectados de la sismicidad en el volcán Turrialba 2008-2011. _____ 66*
- Figura 27: Enjambres sísmicos y sismicidad ubicada en el Turrialba desde 1982 y alrededores desde abril del 2007. El área periférica hacia el suroeste estuvo activa previo a la crisis sísmica del 2007, cuando la sismicidad se ubicó en la periferia este y bajo el cráter SW. _____ 68*
- Figura 28: Nueva boca fumarólica abierta en enero del 2010, vista arriba el día 7 de enero (dos bocas) y abajo el día 15 de enero del 2010 (una boca unida, de unos 100 m de largo y 20 m de ancho). La silueta blanca arriba es la de un individuo anónimo, usado para escala. _____ 69*
- Figura 29: Actividad exhalativa y el RSAM: actividad sísmica antes y después de la erupción menor de enero del 2010 (Tomado de Soto et al., 2010). _____ 70*
- Figura 30: Vistas aéreas de la cima del Turrialba. Arriba en enero del 2006 y abajo en abril del 2007. Se observan los cambios en la cantidad de fumarolas visibles, aunque es evidente en la foto de arriba que existe toda un área de alteración hidrotermal que ha sido el sitio de fumarolas no muy antiguas. Fotos cortesía de Raúl Mora (UCR). 71*
- Figura 31: Salidas de vapores y gases en el sector sur del volcán, en abril del 2007, en el sector de Los Quemados, en coincidencia con la traza de la Falla Ariete. A la izquierda, salida de vapores a lo largo de una fractura en el bordel del camino. A la derecha, vapores en Q. Ariete, cerca de Los Quemados, vista desde cerca de la cima (Foto cortesía de Wilfredo Rojas, 07/11/2007). _____ 72*

- Figura 32: Evolución del área afectada por lluvia ácida en el sector occidental del volcán Turriaba: vegetación decolorada y quemada Vistas desde el volcán Irazú en enero del 2007 (arriba), junio del 2007 (centro) y enero del 2008 (abajo). Fotos cortesía de Pablo Ruiz (Rutgers University). _____ 73*
- Figura 33: RSAM (Real-time Seismic-Amplitude Measurement) o “Medida de la Amplitud en Tiempo Real” calculado con una ventana móvil y a partir del registro continuo de la estación CIMA de la Red Sismológica Nacional (RSN:UCR-ICE), ubicada al sur del cráter central y que se compone de un sismómetro GURALP 6TD de 30s. La frecuencia de muestreo es de 100 Hz (Tomado de Soto & Mora, en prensa). _____ 75*
- Figura 34: Vistas del boquete fumarólico 12-01-2012 a finales de febrero. Las fumarolas mantienen una alta temperatura de hasta unos 700°C. _____ 77*
- Figura 35: Modelo esquemático del aporte de gases, el sistema hidrotermal, las fumarolas, y las áreas de origen de la sismicidad bajo el cráter del Turrialba. _____ 77*
- Figura 37: Esquemas que muestran el sistema volcánico del Turrialba, con un cuerpo magmático somero, un sistema hidrotermal, movimientos de fluidos, fallas activas y toda su posible interacción. _____ 80*
- Figura 38: Mapa de la CNE de la cuenca del Reventazón-Parímina, que muestra los diferentes peligros geológicos, incluidos los volcánicos. Los peligros del Turrialba se encuentran muy simplificados, particularmente hacia el sector caribe. Tomado del ciber sitio www.cne.go.cr. _____ 83*
- Figura 39: Algunos volcanes de Costa Rica con afectación por gases y lluvia ácida. Se muestran las áreas más severamente afectadas. A: Rincón de la Vieja (foto de la década de 1970). B: Poás (foto de 1998). C: Arenal (Tomado de Soto & Sjöbohm, 2005). D: Turrialba (foto de 1998). Fotos aéreas de A, B y D del Instituto Geográfico Nacional. El norte está hacia arriba en todas las imágenes. Tomado de Soto & Mora (en prensa). _____ 87*
- Figura 40: Proceso de desgasificación en la cima del volcán Turrialba. A: Condiciones cambiantes del penacho de gases según el perfil de vientos predominantes, que varían según hora, estación y altura, y por lo tanto se distribuyen diferentemente en el tiempo. B: La nueva boca fumarólica instalada en enero del*

2010. C: Ejemplo de penacho alto (el de la izquierda. A la derecha, el Irazú con nubes) con amplia distribución y visible desde vastas áreas (foto de Raúl Mora desde San Rafael de Heredia, 08-04-2010). D: Ejemplo de penacho rasero sobre el cráter visible casi solo desde las cercanías del volcán (foto de G.J. Soto desde La Pastora, 11-06-2010). Tomado de Soto (2010). _____ 89

Figura 41: Diferentes vistas de la actividad exhalativa del Turrialba, en diferentes momentos, cuya orientación depende de los vientos predominantes. Arriba a la izquierda, 2010-04-14, foto Daniela Herra desde Heredia, se ve el penacho hacia el sur-sureste. Arriba a la derecha, 2010-06-07, foto del Ing. Luis Rodríguez U. (cortesía de G.E. Alvarado) desde Belén (cortesía de Guillermo Alvarado), hacia el oeste. Medio a la izquierda, 2010-06-21, foto Lepolt Linkimer desde Turrialba, hacia el este-sureste. Medio a la derecha, 2010-08-24, foto La Nación desde San José, hacia el oeste. Abajo a la izquierda, 2011-03-09, foto Gerardo J. Soto desde La Esperanza, hacia el sureste. Abajo a la derecha, 2011-07-04, foto Aristides Alfaro desde Grecia, hacia el oeste. _____ 90

Figura 42: Arriba, imagen satelital del volcán Turrialba del 21 de enero del 2010, que muestra el penacho dirigido hacia el norte (Cortesía de NASA, disponible en línea en: http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/42000/42425/turrialba_al_i_2010021_lrg.jpg). Abajo, imagen satelital de OMI, producido por la NOAA estadounidense, del 15 de agosto del 2010, que muestra la concentración de SO₂ en la atmósfera alta (Imagen 2010-08-15, 1858 UTC, adquirible en línea: <ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images>). Estas imágenes no siempre se pueden obtener, pues dependen del clima, particularmente de la nubosidad. _____ 91

Figura 43: Vistas del penacho de gases del Turrialba distribuido hacia el oeste ("normal") del volcán. Arriba, vista desde La Esperanza, unos 4 km al suroeste del cráter activo, en marzo del 2011) Abajo, una vista desde el camino entre Capellades y La Pastora, unos 10 km al suroeste, en febrero del 2011. _____ 93

Figura 44: Distribución del penacho de gases del volcán Turrialba hacia el sur-sureste ("anómalo), visto durante el atardecer de un día de marzo del 2011, desde La Esperanza, unos 4 km al suroeste del cráter activo. _____ 94

- Figura 45: Distribución de lluvia ácida en los alrededores del volcán Turrialba. La línea discontinua marca el área con lluvia ácida ocasional entre 2007-2011. La línea continua marca el área con lluvia ácida frecuente entre 2007-2011. Dibujado con base en los datos del ICE publicados en la ciberpágina de la RSN. _____ 94*
- Figura 46A: Distribución de lluvia ácida en los alrededores del volcán Turrialba, enero del 2010, hacia el oeste. Datos del ICE publicados en la ciberpágina de la RSN (UCR-ICE). _____ 95*
- Figura 46B: Distribución de lluvia ácida en los alrededores del volcán Turrialba, enero del 2011, hacia el oeste, suroeste y sureste. Datos del ICE publicados en la ciberpágina de la RSN (UCR-ICE). _____ 96*
- Figura 46C: Distribución de lluvia ácida en los alrededores del volcán Turrialba, setiembre del 2011, hacia el oeste y sur-sureste. Datos del ICE publicados en la ciberpágina de la RSN (UCR-ICE). _____ 97*
- Figura 47: Eventos explosivos: tefras y bombardeo balístico. _____ 98*
- Figura 48: Bloques balísticos en el área pericratérica. El origen de estos bloques fue el cráter central (562335 E – 222610 N). A, B y C corresponden con balística originada en 1864-66. A es un bloque juvenil con corteza de pan de 1,55 m en 562500 E – 222800 N (0,25 km del origen). B es un cráter de impacto de 2 m de diámetro en 562556 E – 222954 N (0,41 km del origen). C es un bloque métrico a unos 200 m del origen. D es un bloque juvenil fracturado de 65 cm de diámetro, densidad 2,76 g/cm³, en 562701 E – 222451 N, 3308 m s.n.m., a 0,40 km del cráter emisor, emitido durante la penúltima erupción (hace 660? años). _____ 100*
- Figura 49: Bloques balísticos en el área de la periferia media del cráter. El origen de estos bloques fue el cráter central (562335 E – 222610 N). A muestra un bloque balístico de 42 cm de diámetro en 562739 E – 222302 N. B muestra un corte con al menos tres eventos freáticos en la vecindad de la última caseta de guardaparques en 562721 E – 221792 N, y C y D corresponden con balística originada en el nivel inferior. Ambos son bloques no juveniles, el segundo ligeramente alterado y el primero fresco. _____ 101*
- Figura 50: Bloques balísticos en el área de la periferia distal del cráter. A es el corte en 562206 E – 221355 N. B y C corresponden con los fragmentos balísticos de dos*

depósitos de explosión freática en ese corte. D es un corte en 562110 E – 221218 N, que muestra un depósito de caída y balística freática sobreyaciendo a lahares y suelos. E es un bloque alterado hidrotermalmente de 23 cm de diámetro, emitido durante ese evento freático, probablemente la penúltima erupción (hace 600? años).

	102
Figura 51: Ubicación de sitios con balística en el área pericratérica, media y distal, según su ubicación de la Tabla 3.	103
Figura 52: Distancia versus diámetro de bloques en un gráfico semilogarítmico, según su ubicación de la Tabla 3.	104
Figura 53: Ejemplos de las corridas para ajuste de la velocidad de eyección de acuerdo con los datos de densidad y tamaño de la Tabla 3. Todos los datos obtenidos se dan en la Tabla 4.	107
Figura 54: Variables utilizadas en el programa Ejecta! para obtener que el diámetro de partícula balística de 110 mm llegue a 2 km de distancia del cráter del Turrialba.	108
Figura 55: Tipos de erupciones con las alturas de columna y explosividad relativa. Reformada de Cas & Wright, 1987.	109
Figura 56: El volcán Turrialba y el Valle Central de Costa Rica. La elipse blanca muestra la isopaca de 10 cm de los depósitos de la erupción subpliniana de hace unos 2 ka (Reagan et al., 2006). Los otros contornos marcan los posibles límites de tefra caída y preservada durante los últimos 3400 años (adaptado de Soto et al., 2010).	111
Figura 57: Distribución de cenizas entre setiembre de 1864 y febrero de 1866, dibujadas acorde con las descripciones contenidas en González (1910) (adaptado de Soto et al., 2010).	112
Figura 58: Distribución de la ceniza fina eruptada en enero del 2010 (adaptado de Soto et al., 2010).	113
Figura 59: Distribución y espesor de cenizas para erupción estromboliana, periodo 1	117
Figura 60: Distribución y espesor de cenizas para erupción estromboliana, periodo 2.	118

<i>Figura 65: Distribución y espesor de cenizas para erupción vulcaniana, periodo 2</i>	123
<i>Figura 74: Tipos y forma de movimiento de los flujos piroclásticos en general (modificado de Cas & Wright, 1987).</i>	132
<i>Figura 75: Depósitos de oleadas piroclásticas en la vecindad de la última caseta de guardaparques en 562721 E – 221792 N.</i>	133
<i>Figura 76: Distribución de flujos piroclásticos originados en el cráter SW por colapso de columna estromboliana.</i>	134
<i>Figura 77: Distribución de flujos piroclásticos originados en el cráter SW por colapso de columna vulcaniana.</i>	135
<i>Figura 78: Distribución de flujos piroclásticos originados en el cráter SW por colapso de columna pliniana.</i>	136
<i>Figura 79: Arriba, el cono El Armado visto desde el oeste. Centro, el mismo cono (al centro, a la izquierda del cono humeante) visto desde Capellades. Abajo, el cono Tiendilla visto desde La Central, ligeramente al oeste-suroeste.</i>	137
<i>Figura 80: Esquema de la salida y movimiento de una colada de lava sobre el terreno (modificado de Cas & Wright, 1987).</i>	138
<i>Figura 81: Geoquímica de las lavas del Turrialba de los últimos 100 ka: rocas de basaltos a dacitas con alto potasio (modificado de Ruiz et al., 2010). Abajo se aprecian ejemplos de las rocas vistas en microscopía.</i>	140
<i>Figura 82: Lavas en el sector de Los Bajos de Bonilla, lado noreste del volcán, con morfologías blocosas (arriba) y con sus fuertes pendientes, levées y canales (abajo, terreno intermedio, al fondo el escarpe de la falla Elia).</i>	141
<i>Figura 83: Distribución probabilística de lavas originados en diferentes puntos del volcán.</i>	142
<i>Figura 84: Vista oblicua obtenido de Google Earth™ de la falda sur del Turrialba, cerca del límite de las Lavas El Armado, y el término de la Falla Aguacaliente-Navarro, donde se observa el anfiteatro de Coliblanco, posible fuente de origen de la Avalancha de Angostura.</i>	145
<i>Figura 85: Intensidades máximas esperables con un sismo de M_w 6,0 con hipocentro somero (3-8 km) y epicentro en las cercanías de la cima, originado bajo el volcán o en las fallas Ariete o Elia. Las curvas son suavizadas y recalculadas con base en las</i>	

<i>intensidades observadas en el sismo de Patillos del 30 de diciembre de 1952, en el flanco NW del Irazú (isosistas a partir de Montero & Alvarado, 1995).</i>	148
<i>Figura 86: Esquema de flujo de posibles eventos esperables en un futuro cercano en el volcán Turrialba.</i>	151
<i>Figura 87: Mapa de peligros de la Cordillera Volcánica Central de Paniagua & Soto (1986). Muestra al Turrialba como uno de los volcanes activos y con evaluación de su peligro.</i>	155
<i>Figura 88: Página siguiente: Mapas de peligros presentados por Soto & Alvarado (2008). a) Mapa de estructuras de colapso sectorial, depósitos de avalancha y áreas de campos de lavas del Turrialba y alrededores. Representan eventos de muy largo plazo de retorno. b) Peligros asociados con el volcán Turrialba: A, área de alto peligro por bombardeo balístico; B, ídem de mediano peligro; C, área de alto-mediano peligro por caída de piroclastos y distribución de lluvia ácida; D, área de bajo peligro por caída de cenizas finas con vientos anómalos; E, áreas de mediano-alto peligro por flujos y oleadas piroclásticas, y lavas; F, áreas de mediano-alto peligro por lahares; G, área de debilidad estructural con posibilidades de erupciones fisurales (reformado con base en los trabajos de Paniagua & Soto, 1986; Jerez & Cline, 1990; Reagan et al., 2006).</i>	156
<i>Figura 89: Síntesis de mapas de peligros volcánicos del Turrialba, a la misma escala, que incluye los de Paniagua & Soto, 1986; Jerez & Cline, 1990; Soto & Alvarado, 2008, con sus diferentes posibles escenarios, con el fin de adecuar los criterios, de manera geológica y con base en ellos, proceder a escenarios determinísticos.</i>	157
<i>Figura 90: Mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas de máximo peligro.</i>	160
<i>Figura 91: Vista 3D del mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas de máximo peligro.</i>	161
<i>Figura 92: Mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas incluidas en el peligro intermedio a alto</i>	162
<i>Figura 93: Vista tridimensional del mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas incluidas en el peligro intermedio a alto.</i>	163
<i>Figura 94: Vista tridimensional del mapa de amenaza volcánica a corto plazo, áreas de peligro intermedio a alto y alto</i>	164

.	165
6.2. Figura 95: Mapa de amenaza volcánica a largo plazo, áreas límite de peligro máximo a intermedio	165
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 EarthTM del 2007.	167
Figura 97: Áreas de restricción sugeridas a 2 y 5 km de radio a partir del cráter SW	168
Figura 98: Sitios mencionados como rutas de evacuación o escape y sitios para refugios.	170
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	171

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Conos volcánicos en los alrededores del volcán Turrialba (ver Figura 9).	43
Tabla 2: Erupciones del Turrialba en los últimos 9000 años (adaptado de Reagan, 1987 y Reagan et al., 2006).	51
Tabla 3: Datos de la ubicación de secciones donde se han observado y medido bloques balísticos para la caracterización del peligro. Se identifican con base en las fotografías supra (48 a 50) o en nombres alfabéticos, y se muestran en las Figuras 51 y 52.	104
Tabla 4: Secciones donde se han observado y medido bloques balísticos y datos de resultados de ángulos de salida y velocidades de eyección.	106
Tabla 5: Datos de vientos utilizados para la modelización de distribución de piroclastos, tomados de Grandoso et al. (1981).	114

<i>Tabla 6: Datos de los escenarios de erupción considerados para el análisis, cuyos resultados se muestran en las Figuras 59 a 73.</i>	115
<i>Tabla 7: Principales erupciones del Turrialba y su lapso de ocurrencia</i>	152
<i>Tabla 8: Sistema de evaluación de volcanes peligrosos, de acuerdo con Yokohama et al. (1984).</i>	153

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y justificación

El volcán Turrialba es uno de los cinco volcanes activos y que han estado en erupción en Costa Rica en los últimos 300 años (junto con Irazú, Poás, Arenal y Rincón de la Vieja). Su última erupción magmática finalizó hace 146 años, en marzo de 1866. Desde ese momento, permaneció activo con fumarolas de mayor o menor intensidad. Desde 1996 se ha venido incrementando su actividad sísmica y fumarólica, y en particular desde el 2007. En enero del 2010 presentó un corto periodo de erupción de cenizas finas de materiales no juveniles, eruptadas por procesos freático-fumarólicos, que se repitieron algunas veces ese año y luego en enero del 2011 y enero y abril del 2012. Los procesos tectónicos, tectono-volcánicos, y de su sistema hidrotermal hacen entrever que esta actividad intensa durará años o décadas y eventualmente en el futuro hará erupción. No es posible, sin embargo, estimar o pronosticar cuándo o de qué tipo será la siguiente erupción.

Por esto, se justifica que se detallen mapas geológicos y de peligros volcánicos. La Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica ha dedicado esfuerzos importantes a través de proyectos de investigación y publicaciones con tales objetivos a lo largo del último cuarto de siglo. Por ejemplo, los trabajos de Soto (1988 a y b) tratan sobre la geología del volcán, y los trabajos de Paniagua & Soto (1986, 1987) y Soto & Paniagua (1992) se han ocupado de manera regional de los peligros volcánicos del Turrialba, junto con los otros volcanes de la Cordillera Central. Otros trabajos han tratado estos aspectos y alrededores, como son el de Reagan et al. (2006) sobre la estratigrafía más reciente (los últimos 50 mil años y en particular los últimos 10 mil años) y trabajos dentro del Instituto Costarricense de Electricidad, en solitario o en asocio con la Universidad de Costa Rica, sobre la actividad reciente y sus implicaciones, en un marco del análisis de peligro. También un proyecto dentro de CONARE, ha sido en gran parte desarrollado por la UCR, en el aspecto de evolución volcánica del Turrialba, del cual han derivado informes de

proyecto, algunos trabajos publicados, en prensa y en preparación (Ruiz et al., 2010; Soto et al., 2010; Soto & Mora, en prensa).

Los alcances, sin embargo, de los mapas geológicos y de peligros volcánicos del Turrialba, deben hacerse a mayores escalas y con mejores alcances cartográficos, así como con modelos computacionales que integren factores determinísticos que superen las etapas previas empírico-determinísticas, y con base en ellos, planificar el uso de la tierra y posibles áreas de restricción, en asocio con el parque nacional, para poder salvaguardar mejor las vidas humanas y los recursos de infraestructura y económicos de la región aledaña al volcán.

1.2. Objetivos

Al terminar el proyecto de consultoría, se pretende que los productos sean:

- ◆ Síntesis de la historia geológica y volcánica del Turrialba.
- ◆ Producción de una columna estratigráfica detallada, con explicaciones.
- ◆ Determinación de la secuencia eruptiva en función del tiempo, de los últimos 5 mil años. Este y los dos ítems anteriores, encaminados para el documento de evaluación de peligros.
- ◆ Producción del documento de evaluación de peligros volcánicos.
- ◆ Producción del mapa de peligro volcánico a escala 1:50 000 en impreso y 1:25 000 en SIG, con la asesoría y sugerencias de las instituciones mencionadas, para vertirlos en el mapa de peligros.
- ◆ Producción del mapa de peligro volcánico a escala 1:25 000 del área de la cima.
- ◆ Producción de un manual explicativo científico, para el público en general, junto con la adecuación del “Mapa de restricciones para el uso del suelo”, para el público en general.
- ◆ Adecuación de los planes y rutas regionales de evacuación, a una escala 1:25 000.

CAPÍTULO 2: TRABAJOS REALIZADOS POR FUNDEVI

2.1. Recopilación de información

Según el cronograma presentado en el punto 1.4., se ha procedido a recopilar la información vulcanológica y cartográfica disponible sobre el volcán en:

1. Publicaciones científicas.
2. Documentos internos de investigación, algunos inéditos.
3. Documentos informales de investigación.
4. Mapas topográficos y de peligros y cartográfica en general.
5. Documentación gráfica y hemerográfica.

Uno de los aspectos primordiales para la producción del mapa de peligros es la información topográfica de base.

Existe la topografía a escala 1:50 000 de los mapas de las hojas Bonilla, Istarú, Carrillo y Tucurrique, del Instituto Geográfico Nacional (IGN), puesto que la cima se encuentra cerca de la intersección de estas cuatro hojas. La información cartográfica también existe de manera digital, de modo que se ha recopilado para producir mapas base como Mapas de Elevación Digital (MED o DEM, como se conoce a veces por su acrónimo inglés). También se ha usado la topografía de Terra (1998) a escala 1:25 000.

Existen además como fotografías aéreas tomadas desde 1961, y que dieron los mapas de 1962. Numerosas fotografías aéreas incluyen las de la década de 1970, y las más recientes de los proyectos Terra (1998) y Carta (2005), que cubren diferentes partes del macizo volcánico. Los juegos de fotografías aéreas utilizadas son:

1961: VM_M-726USAF_6916; VM_M-726USAF_6917; VM_M-726USAF_6918

1974: R70Lunica_255; R70Lunica_256

1978: R133L219_3/46; R133L219_3/47

Terra98: T011L35AF_140; T011L35AF_141; T011L35AF_142; T011L35AF_143;
 T011L35AF_144; T011L35AF_145; T011L35AF_146; T011L35AF_147;
 T011L35AF_148

Carta03: 3003_5744_4352; 3003_5744_4353; 3003_5744_4354;
 3003_5744_4355
 3003_5752_8068; 3003_5752_8069; 3003_5752_8070; 3003_5752_8071;
 3003_5752_8072; 3003_5752_8073
 3003_5757_8384; 3003_5757_8385; 3003_5757_8386; 3003_5757_8387;
 3003_5757_8388; 3003_5757_8389

Carta05: 05003_5841_2727; 05003_5841_2728; 05003_5841_2729;
 05003_5841_2730; 05003_5841_2731; 05003_5841_2732
 05003_5851_4190; 05003_5851_4191
 05003_5851_4323; 05003_5851_4324; 05003_5851_4325;
 05003_5851_4326; 05003_5851_4327;
 05003_5851_4414; 05003_5851_4415; 05003_5851_4416;
 05003_5851_4417; 05003_5851_4418
 05003_5879_9107; 05003_5879_9108; 05003_5879_9109;
 05003_5879_9110; 05003_5879_9111; 05003_5879_9112;
 05003_5879_9113; 05003_5879_9114
 05003_5879_9188; 05003_5879_9189; 05003_5879_9190;
 05003_5879_9191; 05003_5879_9192; 05003_5879_9193;
 05003_5879_9194; 05003_5879_9195; 05003_5879_9196

En cuanto a los documentos y mapas fundamentales que contienen la información geológica, estructural y estratigráfica de primera mano, que han sido recopilados, están:

1. El mapa geológico y detalles geológicos del área periférica a la cima, así como estructuras tectónicas de Soto (1988a y b).

2. La tesis de Linkimer (2003), con detalles tectónicos de las áreas regionales alrededor del volcán.
3. El trabajo tefroestratigráfico de los depósitos explosivos y lávicos más recientes del volcán, de Reagan et al. (2006).
4. Los documentos de investigación de CONARE (2009 y 2010) sobre detalles de edad y evolución del volcán.
5. Los trabajos con nuevas edades radiométricas del volcán, de Ruiz et al. (2010).

Respecto a los diferentes estadios de evaluación sobre los peligros volcánicos del Turrialba, se tienen los trabajos de:

1. Paniagua & Soto (1986, 1988).
2. Reagan (1987).
3. Jerez & Cline (1990).
4. Soto & Paniagua (1992).
5. Reagan et al. (2006).
6. La síntesis y revisión de Alvarado (2006) y Soto & Alvarado (2008) para el P.H. Reventazón del ICE (documentos presentados a SETENA).
7. Estudios sobre lluvia ácida de Soto et al. (2008).
8. Los estudios de lluvia ácida llevados a cabo por el ICE, que se publican mensualmente en la ciberpágina de la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE) desde 11 2007 y recopilados hasta diciembre del 2011.
9. Nuevas aproximaciones vertidas en un mapa de Soto et al. (2010), presentado en el congreso *Cities on Volcanoes 2010* en Tenerife, Islas Canarias.
10. Trabajos sobre la sismología y el comportamiento reciente del volcán, como los de Tassi et al. (2010), Martini et al. (2010), Eyre et al. (2011 a y b; 2012), y Soto & Mora (en prensa).

2.2. Trabajo de campo

Se realizaron giras de campo, durante las cuales se visitaron sitios claves de afloramientos para afinar la estratigrafía y muestrear rocas para posteriores ensayos de laboratorio, recabar datos sobre geología, tectónica y distribución de gases, piroclastos y lavas, todos ellos para refinar el mapa de peligros.

2.3. Modelado de los eventos volcánicos

Se realizaron modelados computacionales de los diferentes eventos volcánicos con diferentes software y metodologías disponibles. Los datos recabados en el campo han servido para validar y rectificar los datos obtenidos de tales modelos. Así se ha hecho con el programa **Ejecta!** del USGS (Mastin, 2001) para la balística y con la plataforma Voris (Felpeto, 2002) para la dispersión de cenizas, flujos piroclásticos y lavas. Se presentan una serie de mapas temáticos con discusión sobre su veracidad y validación.

CAPÍTULO 3: BASES PARA LOS MAPAS DE PELIGROS VOLCÁNICOS

Los objetivos fundamentales por los cuales se procede a la confección de los mapas de peligros volcánicos son:

1. Mostrar cartográficamente los posibles alcances de los eventos volcánicos (y sus productos, por supuesto) de acuerdo con escenarios posibles de las erupciones.
2. Que este recurso cartográfico sirva a las autoridades correspondientes (en este caso la CNE, comités municipales de emergencia y Municipalidad de Turrialba), para el planeamiento de cualquier actividad que pretenda la prevención y mitigación de los efectos de la actividad volcánica.
3. Informar a la población vecina al volcán Turrialba sobre los peligros que pueden presentarse en su hábitat.

Usualmente, los mapas de peligro volcánico derivan en una etapa subsiguiente, que es la construcción de mapas de riesgo volcánico, o en el caso que nos atañe en el Turrialba, de mapas de zonificación o de restricción del uso del suelo.

Los mapas tradicionales, desde hace siglos, son impresos, y así son los de peligro volcánico, pero con la llegada de los sistemas de información geográfica (SIG), hoy es posible tener mapas que pueden manipularse rápidamente y cambiar, conforme cambien parámetros o escenarios. Esto ha dado en que a los mapas tradicionales se les llame “estáticos”, y a los montados con SIG, sin impresión masiva, sean llamados “dinámicos”. Estos últimos normalmente no son de uso público, sino de uso estratégico por autoridades, como la CNE. Obviamente son más complicados y necesitan una manutención periódica o constante en casos de emergencias. El mapa que estamos construyendo es un mapa estático, que pretende ser de distribución restringida al principio y eventualmente masiva en su momento.

Posteriormente, podría optarse por un mapa dinámico, en cuyo tipo no se tiene experiencia previa en Costa Rica.

Los mapas de peligro volcánico se construyen a partir de mapas geológicos y geomorfológicos, la información volcano-estratigráfica, y de curvas isopacas y de isopletas de depósitos piroclásticos. Señalan las probabilidades de que tal o cual evento ocurra en un espacio determinado, y usualmente en un periodo determinado. No obstante, las probabilidades en los casos de mapas volcánicos no son muy conseguibles debido a la poca repetibilidad de los procesos y a las restringidas ventanas de observación temporal que usualmente se tienen. Los niveles de probabilidad de ocurrencia determinan los escenarios, pero a falta de buenas aproximaciones de probabilidad, se recurre a la experiencia de los depósitos geológicos (base empírica y en parte determinística). Por esto, la recopilación original de la información geológica existente, o bien producir nueva información geológica de base, es muy importante para la confección de los mapas de peligro.

A pesar de que involucran información científica de primer orden, debido a que el uso es por personal no científico o el público mismo, debe tener sencillez en su formato y en el manual explicativo, lo cual por supuesto es siempre un reto, y no siempre fácil de conseguir. Las nomenclaturas deben ser sencillas y explicadas, y en lo posible evitar simbología especializada. Algunos mapas que sirven de base -como geológicos, geomorfológicos, estructurales y de isopletas-, no deberían formar parte del mapa de peligros, sino acompañarlo a modo de anexos, para los usuarios que requieran más información.

Los estudios de peligro volcánico comprenden diferentes ramas de la geología y ciencias afines (p.ej., geología de campo, geocronología, tefroestratigrafía, geoestadística, modelado computacional), por lo cual pueden llegar a ser generalizados a modo de reconocimiento o evaluación preliminar, presentándose generalmente los escenarios de máximo peligro. También pueden ser muy detallados, en los cuales no solo se presentan diferentes situaciones o escenarios y los sectores con mayor probabilidad de ser afectados ante cada tipo de peligro, sino además se incluyen recurrencia y probabilidad de erupción. Los estudios de detalle

requieren de un buen soporte económico para poder realizar los trabajos necesarios que los sustenten.

Dependiendo de los grados de detalle requeridos o de los alcances esperados o de la aplicación directa en sitios muy cercanos al aparato volcánico, se pueden seguir varios pasos alternativos para el estudio y la producción de mapas detallados de peligros volcánicos, como se muestra en la figura 1.

Un detalle metodológico más pormenorizado puede construirse a través de árboles de lógica o procesos que impliquen el modelado matemático o computacional, como el mostrado por Delgado (2010), que se ilustra en la Figura 2.

Otro factor importante, es que una vez producido un mapa útil y gráfico a nivel operativo (de la CNE, por ejemplo), debe haber una evaluación pre-publicación masiva, puesto que se debe estar seguro que el público final lo entenderá y usará adecuadamente. Y además, se debe tener presente que la “vida útil” debería ser de al menos un lustro, puesto que aquellos mapas que cambien con frecuencia, tienden a confundir al usuario, y perder credibilidad, aparte de que implica altísimos costos de producción.

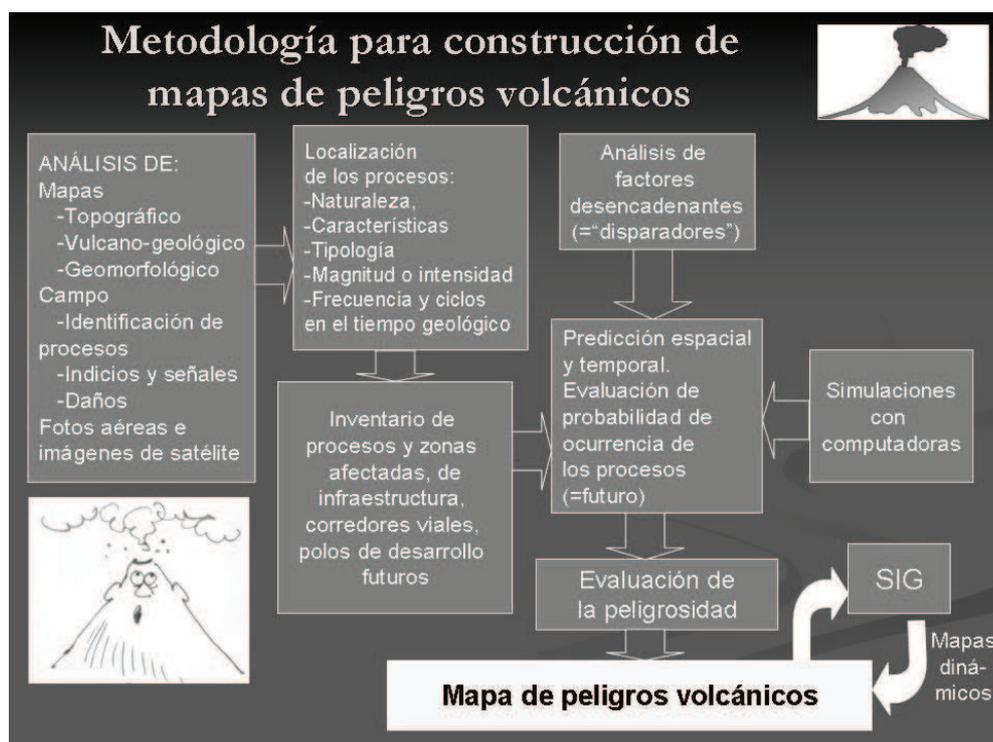


Figura 1: Diagrama de flujo metodológico para la construcción de mapas de peligros y el proceso de investigación. Los pasos pueden ser sustituidos o simplificados según el grado de detalle e información disponible (tomado de Soto & Alvarado, 2008).

De modo que los pasos a seguir (los cuales han sido contemplados en los objetivos propuestos en la contratación) son la recopilación de la información cartográfica base (topográfica y geológica), así como la información geológica, estructural, vulcano-estratigráfica, mapas de peligros previos, y datos meteorológicos que sean de utilidad (vientos y precipitación). Como veremos, gran parte de la información requerida para el Turrialba, existe, pero dispersa y en formatos muy diferentes, por lo que se ha trabajado en su recopilación lógica, en su unificación y reinterpretación.

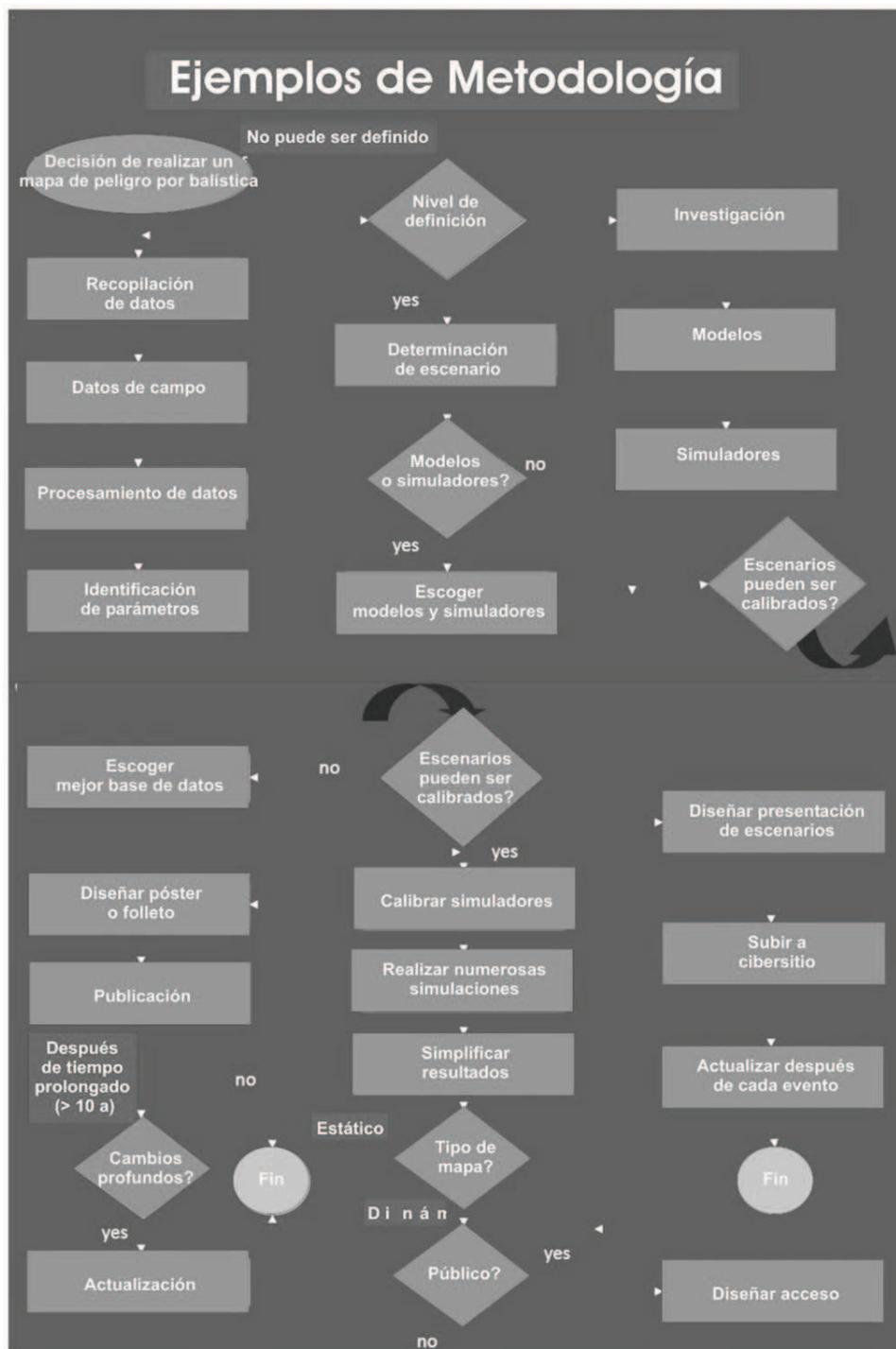


Figura 2: Diagrama de flujo metodológico detallado propuesto por Delgado (2010).

La información cartográfica también existe de manera digital, de modo que se ha recopilado para producir los mapas base como Mapas de Elevación Digital (MED o DEM, como se conoce a veces por su acrónimo inglés). La información cartográfica digital del Instituto Geográfico Nacional (IGN) muestra numerosos problemas sobre todo en las áreas límite entre mapas, por lo que ha sido editada y mejorada. Toda la base digital incluye un MED con doce hojas topográficas: Poás, Barva, Abra, Caraigres, Guápiles, Carrillo, Istarú, Tapantí, Guácimo, Bonilla, Tucurrique y Pejibaye (Figura 3). Los mapas a escala 1:25 000 utilizarán esta escala extrapolada y en parte con la información de Terra 1998, como Guápiles, Guácimo, Abra, Barva, Tapantí y Caraigres.

Existen además como fotografías aéreas tomadas desde 1961, y que dieron los mapas de 1962. Numerosas fotografías aéreas incluyen las de la década de 1970-80, y las más recientes de los proyectos Terra 1998 y Carta 2005, que cubren diferentes partes del macizo volcánico. La base dada por Google Earth™ también es útil para este trabajo, de modo que se utilizará para diferentes tipos de escenarios (Figuras 4 y 5).

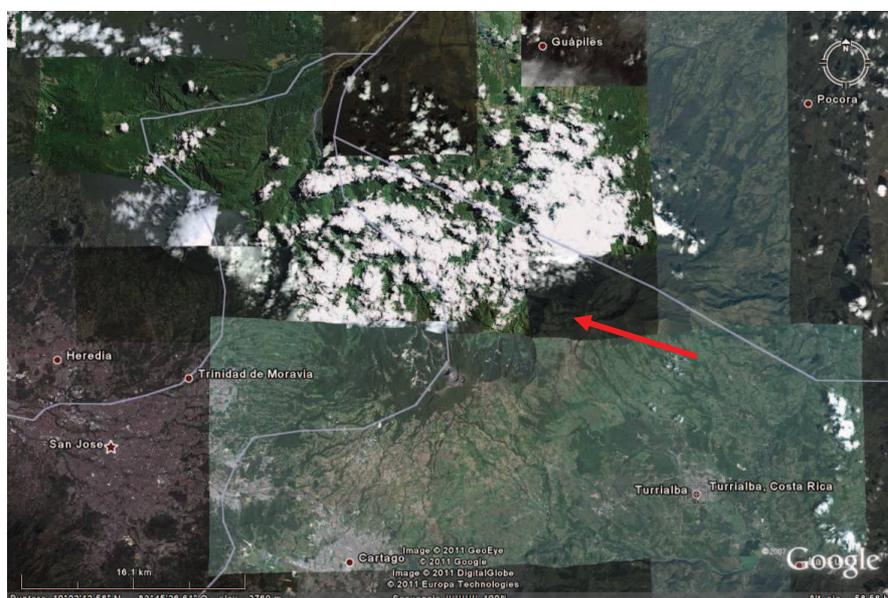


Figura 4: Imagen de Google Earth™ del 2007 que muestra el volcán Turrialba (flecha roja), el área del volcán desde Guápiles hasta Turrialba, y las áreas del Valle Central hacia el suroeste, que podrían ser afectables por la actividad del volcán. Muestra un área ligeramente menor a la de la Figura 3.

Las imágenes de Google Earth™ también se han utilizado para este trabajo, como imágenes recientes, para visualizar de manera oblicua las áreas (Figura 5) y calificar áreas de uso del suelo (ver capítulo 6.1.).

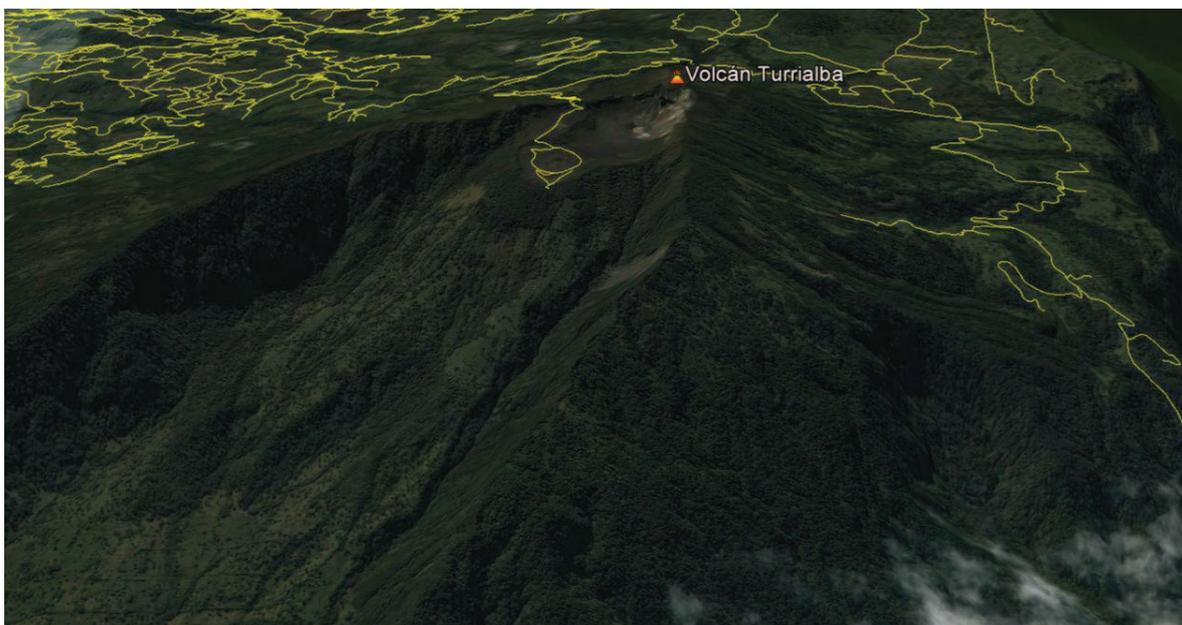


Figura 5: Vista oblicua del volcán Turrialba generada a partir de Google Earth™ del 2001, visto desde el NNW, mostrando el área de la cima y las áreas boscosas de alta pendiente hacia el sector caribe, las áreas con pastizales en los sectores NE y E del cono volcánico y la red de caminos en el cuadrante sur. Se ha superpuesto la red de caminos interpretada a partir de las fotografías Terra.

CAPÍTULO 4: GEOLOGÍA, TEFROESTRATIGRAFÍA Y TECTÓNICA DEL VOLCÁN TURRIALBA

Se ha recopilado y en parte reestudiado y reinterpretado la geología, estratigrafía, cronología y geoquímica del volcán Turrialba, en el marco de la Cordillera Volcánica Central.

El eje volcánico de la Cordillera corre en dirección N60°W, definido por los volcanes Porvenir, Poás, Barva e Irazú, distanciados 150 km de la Fosa Mesoamericana, donde se subduce la Placa del Coco bajo la Caribe. El Turrialba, sin embargo, no forma parte de este eje, dado que se encuentra 10 km por detrás del eje volcánico, formando un segundo alineamiento de volcanes definidos por el Turrialba, Cacho Negro, Congo y Platanar (Figura 6). Hay un tercer eje menor trasero al eje principal, definido por los volcanes Hule (tras el Poás), Pozo Azul (tras el Barva) y Dos Novillos (tras el Turrialba) (Figura 6), los dos últimos definidos con base en el mapeo geológico de Soto (1988, 1999).

Al comparar las Figuras 6 y 7, se sugiere que haya una relación estructural entre las zonas de origen de los magmas, sobre la Zona de Wadati-Benioff, y los ejes volcánicos.

Los principales centros volcánicos de la Cordillera son masivos y voluminosos complejos estratovolcánicos, de forma subcónica de amplias bases y cimas coronadas por estructuras complejas.

El volcán Turrialba (10°02'N - 83°46'W), es el más oriental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica (Figura 6). Es un estratovolcán complejo (aprox. 3340 m s.n.m.) que comparte la misma base con el volcán Irazú, y está localizado 16 km al noroeste de la ciudad homónima y 35 km al este-noreste de San José.

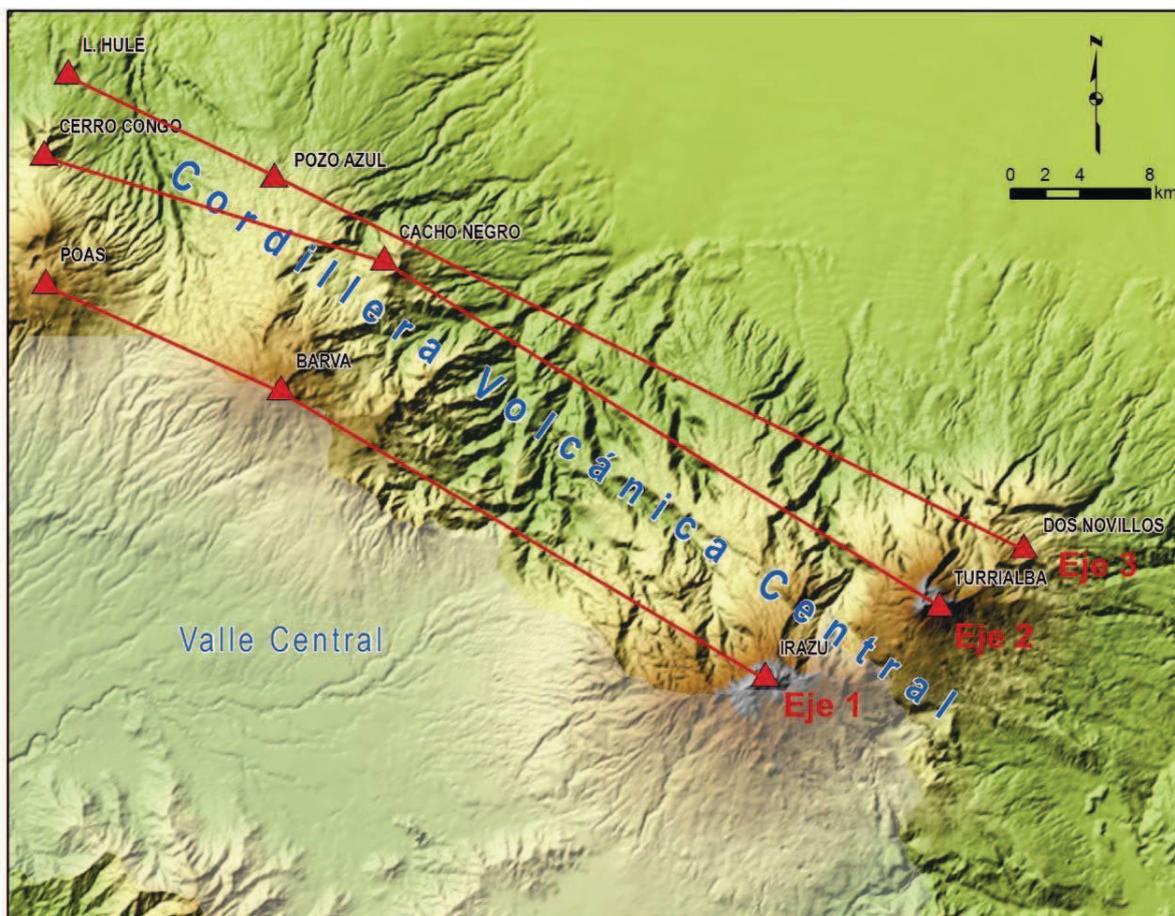


Figura 6: La Cordillera Volcánica Central y los diferentes conos y estratovolcanes mayores que definen sus tres ejes.

4.1. La corteza y litosfera bajo la Cordillera Volcánica Central

La zona de Wadati-Benioff bajo la Cordillera Central se encuentra entre 80-110 km de profundidad (Figura 7) y es claramente más profunda bajo el Turrialba que bajo el Irazú, y de la misma manera, así es entre el primero y segundo ejes volcánicos mencionados supra.

La corteza bajo el Turrialba e Irazú se caracteriza por una zona de baja velocidad que ha sido mostrada por Husen et al. (2003) en general y de manera más detallada por Lücke et al. (2010) y Dzierma et al. (2010). La Figura 8 muestra un perfil perpendicular a la fosa Mesoamericana y al arco magmático, justo cortando los volcanes Irazú y Turrialba, que muestra el límite entre corteza superior e inferior

entre 15-20 km y el Moho a unos 35 km bajo el Turrialba. La zona de baja densidad determinada por Lücke et al. (2010) dejan entrever una posible cámara magmática bajo Irazú-Turrialba a 1-8 km de profundidad (esto es, 4-11 km bajo las cimas), aunque por supuesto el tamaño de la zona de baja velocidad no es el de toda la cámara posible. Tal como había sido previamente observado por Alvarado et al. (1993) para el caso del Irazú con sismicidad volcánica y otros modelos. De tal manera, es posible que el techo de la cámara somera del Turrialba se encuentre a tan solo 4 km de profundidad. Más detalles sobre la estructura bajo el Turrialba se tratarán en el capítulo siguiente.

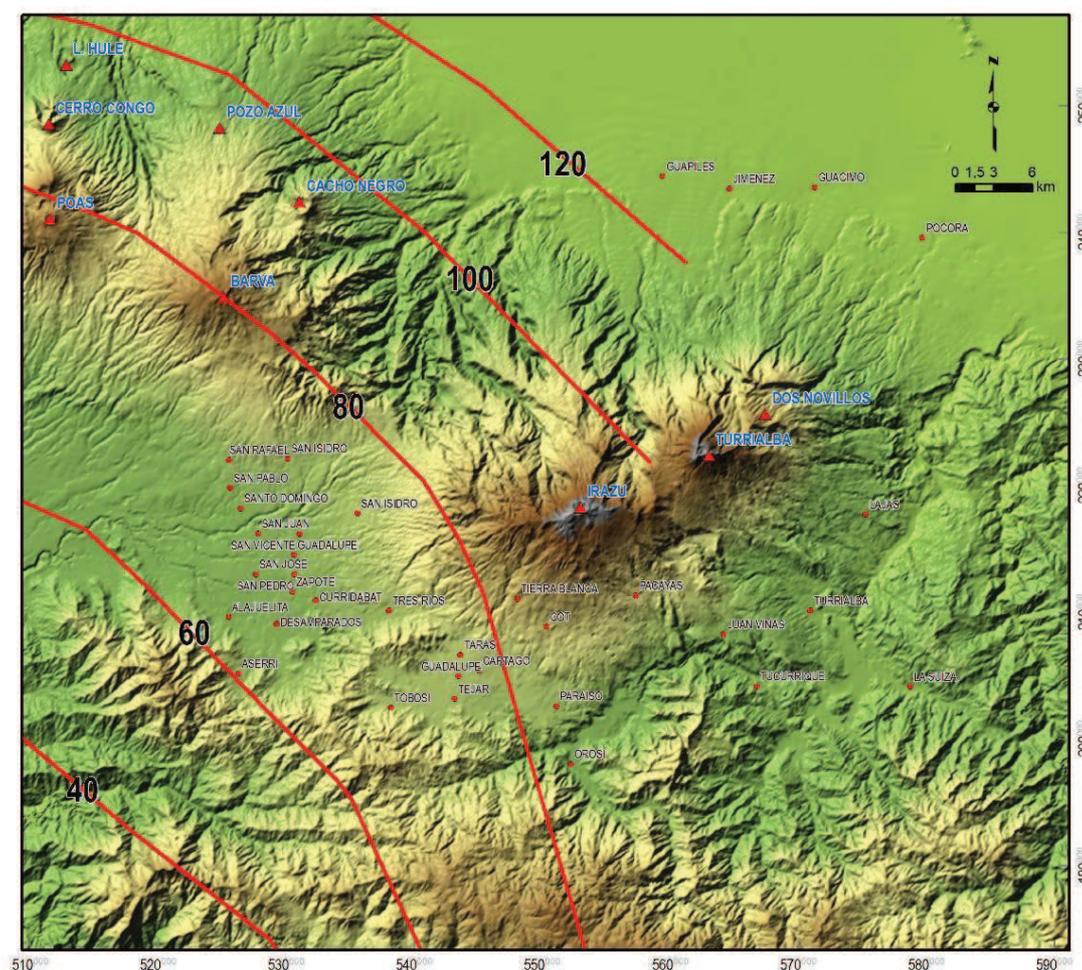


Figura 7: Profundidad de la Zona de Wadati-Benioff bajo el extremo oriental de la Cordillera Volcánica Central (con base en datos cortesía de Ivonne Arroyo, Universidad de Kiel, Alemania).