

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

Gerardo J. Soto¹ & Linda Sjöbohm²

“Las erupciones volcánicas de tierra y de mar son las pesadillas más horribles del planeta y los pájaros que comen sueños, por ley del instinto, se abstienen de probarlas, porque no matan por veneno sino por la aspereza de su sabor.”

Fernando Contreras Castro, “Los pájaros que comen sueños (*ballet*)”, en *Sonambulario*, 2005

RESUMEN

Como una secuela de su erupción de julio de 1968 hasta el presente –81 decesos–, el volcán Arenal ha sido el objeto de una minuciosa investigación vulcanológica, que ha derivado en un preciso conocimiento de sus características geológicas y su historia volcánica de 7 milenios. Sus erupciones han variado dentro de un amplio espectro de procesos: efusiones lávicas sostenidas por años, erupciones explosivas de corta duración y poco volumen de material eruptado, hasta erupciones muy explosivas, violentas y destructivas, de tipo pliniano. En este artículo se sintetiza la reevaluación del peligro volcánico en el Arenal. Se han identificado los siguientes tipos de peligros volcánicos: 1) salida de gases, su dispersión por los vientos y lluvia ácida; 2) proyección balística de bloques y bombas; 3) caída de piroclastos arrastrados por el viento; 4) flujos y oleadas piroclásticas; 5) apertura de nuevos cráteres laterales, y generación de explosiones dirigidas; 6) coladas de lava blocosas; 7) lahares durante o después de períodos eruptivos; 8) deslizamientos y avalanchas volcánicas, por la caída de un sector del edificio volcánico; 9) olas generadas por avalancha o flujo piroclástico que ingresen al embalse de Arenal (*seiches*); 10) sismos volcánicos ($M \leq 5$) generados por el ascenso de magma antes de ser eruptado.

Se ha creado una serie de mapas temáticos para cada peligro por separado, atendiendo al comportamiento histórico del volcán. En consecuencia, se han establecido dos escenarios básicos en el Arenal, cuyos mapas de peligros volcánicos combinan los mapas temáticos. El primero es de corto plazo, que tiene semejanzas con el escenario de la erupción de 1968 al presente. Comprende las zonas de “alta peligrosidad” (un área de $\sim 32 \text{ km}^2$), “mediana peligrosidad” ($\sim 24 \text{ km}^2$ adicionales) y “baja a moderada peligrosidad” (otros $\sim 23 \text{ km}^2$). El segundo escenario, de largo plazo, contempla los eventos prehistóricos mayores observados en el Arenal: erupciones vulcanianas con explosiones dirigidas, estrombolianas fuertes y plinianas. El mapa combinado resultante incluye las zonas de “alta peligrosidad” y “mediana peligrosidad”. Este escenario implica el cese del presente ciclo eruptivo, un período de reposo, y el inicio de una nueva erupción. Aunque no es posible predecir cuándo finalizará la presente erupción, se considera que la próxima gran erupción pliniana se daría cerca de 2100-2200 E.C. Para efectos prácticos, se considera que un lapso ≥ 50 años para la siguiente erupción de “largo plazo” (v.gr. vulcaniana, ≥ 2050

¹ Geólogo consultor, Apdo. 360-2350, Costa Rica; correo-e: katomirodriguez@yahoo.com

² Geóloga, Departamento de Prevención y Mitigación, Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias; correo-e: lsjobohm@cne.go.cr

E.C.), podría ser una aproximación valedera para tener en cuenta en la planificación del uso del suelo en el Arenal, que deberá replantearse cada lustro, al menos. La idea básica consiste en evitar seguir construyendo la vulnerabilidad e iniciar un verdadero proceso de gestión del riesgo.

El mapa del escenario a corto plazo corrobora las zonas de restricción de uso del suelo reglamentadas en el 2001. El de largo plazo corrobora las restricciones a las áreas delimitadas, para evitar el desarrollo en ellas, y con esto, mitigar los efectos desastrosos de erupciones futuras. Este último mapa debería servir como base para la planificación durante al menos los siguientes cinco decenios, y por tanto es posible establecer una tripleta ordenada para la gestión del riesgo [mapa de peligros volcánicos, planificación de uso del suelo, mitigación del desastre volcánico]. Otras medidas son la producción de folletos informativos sobre la historia y peligros del volcán, la rotulación preventiva en las áreas más peligrosas, y la identificación de rutas de escape.

ABSTRACT

As a sequel from the eruption of July 1968 to present –81 fatalities–, Arenal volcano has been the object of a thorough volcanological investigation, which has derived in a precise knowledge of its geological characteristics and its volcanic history through 7 millennia. Its eruptions have varied within a wide spectrum of processes: lava effusions sustained for years, short-duration and low-volume explosive eruptions, up to highly explosive, violent and destructive eruptions, of the plinian type.

This work summarizes the result of a reassessment of volcanic hazards at Arenal. The following volcanic hazards have been identified: 1) gas discharge, its dispersion by the winds and acid rains; 2) ballistic bombardment of blocks and bombs; 3) fall of pyroclasts carried by the winds; 4) pyroclastic flows and surges; 5) opening of new lateral craters and generations of blasts; 6) blocky lava flows; 7) lahars originated during or after eruptive periods; 8) volcanic rockslides and avalanches, because of the collapse of segments of the volcano edifice; 9) seiches generated by avalanches or pyroclastic flows entering the reservoir; 10) volcanic earthquakes ($M \leq 5$) generated by the ascent of magma before eruptions.

A series of thematic maps have been created for each hazard, taking into account the behavior of the volcano through its history. Consequently, two basic scenarios have been established at Arenal, whose volcanic hazard maps result from the combination of thematic maps. The first is a short-term scenario, resembling the eruption from 1968 to present. It comprises the “high hazard” zone ($\sim 32 \text{ km}^2$), “medium hazard” zone (additional $\sim 24 \text{ km}^2$), and “low to moderate hazard” zone (other $\sim 23 \text{ km}^2$). The second scenario, the long-term, includes all major events observed at the prehistorical records of Arenal: vulcanian eruptions with blasts, strong strombolian and plinian eruption. The resulting combined map includes the “high hazard” and “medium hazard” zones. This scenario implies the cease of the present eruptive cycle, a repose period, and the beginning of a new eruption. Despite the fact that it is not possible to predict when the present eruption will end, it is considered that the next plinian eruption would occur around 2100-2200 C.E. For practical purposes, a lapse ≥ 50 years might be considered before the next “long-term” eruption (i.e., vulcanian ≥ 2050 C.E.), as an approximation to be considered for the land-use planning at Arenal, which should be reassessed every quinquenium, at least.

The short-term-scenario map corroborates the restriction zones for land-use established in 2001, while the long-term scenario corroborates the delimited restriction areas, in order to avoid future developments in those areas, and mitigate the disastrous effects of future major eruptions. This latter map should be used for planning during the next five decades, and therefore to establish the ordered risk management triplet [volcanic hazard maps, land-use planning, mitigation of volcanic disaster]. Other measures taken should be the production and broadcast of informative brochures, preventive labeling of the most hazardous areas, and the identification of escape routes.

INTRODUCCIÓN

Los antecedentes

A raíz de la erupción de julio de 1968 (Fig. 1) hasta el presente -con un saldo de 81 muertes-, el volcán Arenal ha sido el objeto de una minuciosa investigación vulcanológica, que ha derivado en un preciso conocimiento de sus características geológicas y su historia volcánica de 7 milenios. Además, por ubicarse en un área que ha pasado de una modalidad de ocupación rural netamente a urbana-rural, en la vecindad de una de las plantas hidroeléctricas de mayor importancia del país, con una tasa de visitantes turísticos que ronda el millar diario, la preocupación por los peligros volcánicos, su cartografía y la zonificación del uso del suelo, han sido una prioridad desde el decenio de los años 1990.

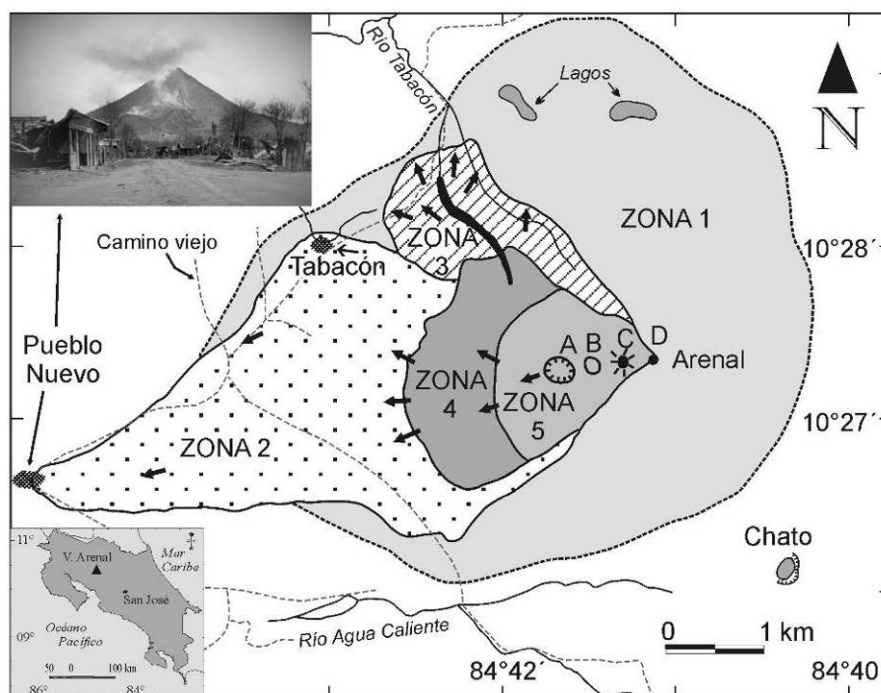


Figura 1. Ubicación del Arenal (inserto inferior) y las áreas más afectadas por la erupción de julio de 1968 (modificado de [6]). Zona 1: Límite de impacto de bombas. Zona 2: Región afectada por explosiones, donde ocurrieron la mayoría de las muertes, sobre todo en Pueblo Nuevo (inserto superior). Las flechas indican la dirección de los flujos. Zona 3: Región afectada por explosiones del 31 de julio. El área negra corresponde con flujos de bloques y cenizas. Zona 4: Área con pocos impactos, vegetación destruida y gruesos depósitos de tefras. Zona 5: Zona con los 3 nuevos cráteres y vegetación arrasada.

En el 2001 aparecieron, el reglamento “Uso de suelos en los alrededores del Volcán Arenal”, y las “Restricciones para el uso del suelo en los alrededores del Volcán Arenal” (*La Gaceta*, 11 de enero, pp. 41-47), suscritos por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y el Comité Asesor Técnico (CAT) en Vulcanología. Los sucesos que movilizaron la producción del reglamento fueron la muerte de dos personas y las pérdidas materiales surgidas por los flujos piroclásticos del 23 de agosto del 2000. La propuesta de utilización de las áreas de mayor amenaza en el entorno de la región, toma en cuenta no solo las condiciones del riesgo (amenaza * vulnerabilidad), sino también los usos históricos del suelo en la región desde antes que se iniciara el actual periodo eruptivo, en amparo de la Ley Nacional de Emergencia de 1999 [12].

Por otra parte, con base en el sistema de evaluación de volcanes peligrosos [40], el Arenal alcanza 14 sobre 16 puntos posibles. La población expuesta a las amenazas se acerca a 11 800 personas (10 971 en el distrito Fortuna al 2004, más unos 800 turistas diarios). Todo esto en conjunto justifica la evaluación y mapeo del peligro volcánico y la zonificación del uso de la tierra. Justificaciones ulteriores de orden geográfico-social pueden encontrarse en trabajos que toman en cuenta el crecimiento poblacional y turístico de La Fortuna y alrededores [12, 18, 37].

Los mapas de peligros volcánicos

Los objetivos de la confección de los mapas de peligros volcánicos son: 1) mostrar los alcances de los eventos volcánicos y sus productos, de acuerdo con escenarios posibles de las erupciones; 2) apoyar a las autoridades correspondientes para el planeamiento y toma de decisiones acerca de actividades de prevención y mitigación de los efectos de la actividad volcánica; 3) informar a la población vecina a los volcanes sobre los peligros a los que está expuesta en su hábitat. Usualmente derivan en la construcción de mapas de riesgo volcánico, o mapas de zonificación o de restricción del uso del suelo. Los mapas tradicionales son impresos (“estáticos”), pero con los sistemas de información geográfica (SIG), es posible tener mapas que pueden manipularse rápidamente y cambiar, conforme cambien los parámetros o escenarios (mapas “dinámicos”). Estos últimos normalmente son de uso estratégico para las autoridades.

Los mapas de peligro volcánico se construyen a partir de mapas geológicos y geomorfológicos, la información volcano-estratigráfica, curvas isopacas (variación de espesores en una región) y de isopletas (tamaños máximos de los clastos en una región) de los depósitos piroclásticos. Señalan las áreas expuestas dentro de un espacio determinado, y usualmente en un periodo determinado. Involucran información científica de primer orden, pero sus usuarios incluyen tomadores de decisiones y el hombre común, por lo que su “vida útil” debería ser de al menos un lustro, puesto que aquellos mapas que cambian con frecuencia, tienden a confundir al usuario, y perder credibilidad, aparte de que implica altísimos costos de producción.

Los mapas de peligro se pueden producir a partir de modelos computacionales que tomen los diferentes eventos volcánicos posibles con base en la historia previa del volcán. Para esto se necesitan, empero, mapas topográficos digitales con muy buen detalle y actualizados [11, 23, 27]. Han sido usados con éxito para reconstruir y modelar flujos piroclásticos, y compararlos con los depósitos, en un control cruzado de modelo-geología-topografía [29]. En el caso del Arenal, donde este requisito de mapas no se cumple, los mapas de peligro han debido construirse de manera inductiva, con base en un nuevo mapa topográfico, que ha permitido la visualización de sus características topográficas no actualizadas. De tal manera, los diferentes peligros han sido analizados con base en el comportamiento histórico del volcán, e inductivamente, con criterios geológicos y geomorfológicos.

LAS BASES PARA LOS MAPAS DE PELIGROS EN EL ARENAL

La base topográfica

Ante la ausencia de mapas actualizados, el primer paso fue la construcción de un mapa que reprodujera la topografía producida por los depósitos volcánicos desde 1968. Se basa en las curvas de nivel de 1962 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), a escala 1:50 000, hibridizado con las curvas fotogramétricas obtenidas por la Universidad de Milán y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en 1996, a partir de las fotografías aéreas de 1988. Por supuesto que el mapa está desactualizado, en tanto que cerca de $150 \times 10^6 \text{ m}^3$ de lavas y piroclastos se han apilado en la falda oeste del volcán, pero no hay otra opción cartográfica utilizable y disponible viable hasta el momento.

La base geológica y la historia volcánica

Para la confección de los mapas de peligros volcánicos del Arenal se ha usado la geología actualizada al 2003, con base en varios trabajos publicados [1, 6, 9, 19] (Fig. 2).

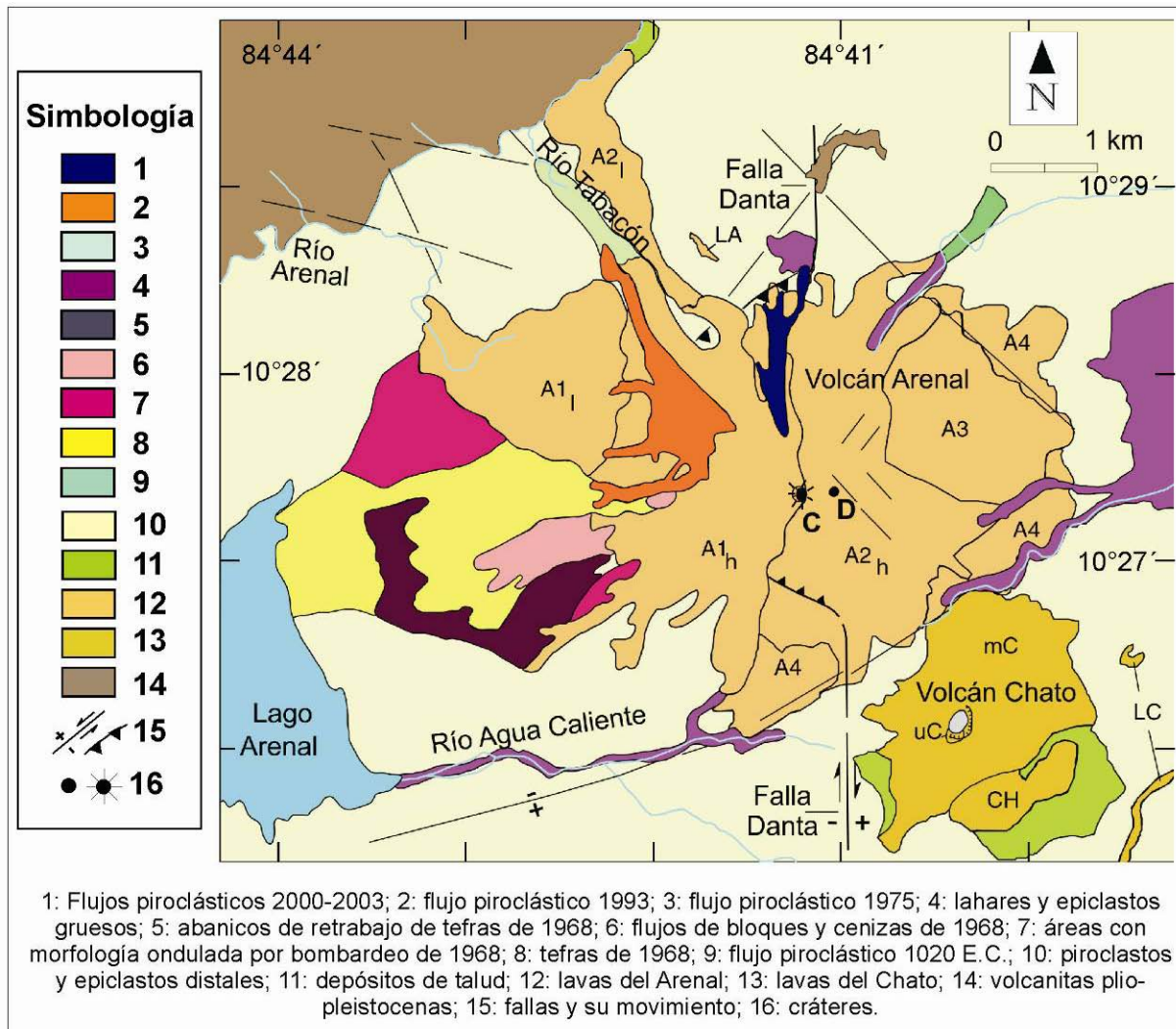


Figura 2. Mapa geológico del volcán Arenal.

Los primeros estudios sobre la estratigrafía del Arenal habían descubierto 9 capas de tefras depositadas en los últimos 3000 años [20]. Ulteriores trabajos de detalle [15, 16, 33, 35] han mostrado al menos 22 eventos explosivos mayores y al menos 5 ciclos lávicos a lo largo de la historia del Arenal (Fig. 3, Cuadro 1). Entre los niveles guía del Arenal, 5 eventos son de tipo pliniano, los más violentos y destructivos, con volúmenes de tefra de entre $>0,13$ y $0,44 \text{ km}^3$. Pueden caracterizarse además en el registro geológico, 7 erupciones subplinianas y 7 erupciones estrombolianas violentas, sostenidas por un tiempo considerable, que le dan un carácter pseudo-pliniano (esto es: extensos y voluminosos depósitos), así como erupciones de carácter vulcaniano, como el caso de la de julio de 1968, que emitió $0,026 \text{ km}^3$ de tefra. La mayoría de los niveles guía del Arenal tienen flujos piroclásticos asociados, que se reconocen en las faldas bajas del volcán, y tienden a desaparecer al alejarse del edificio volcánico (como máximo a 4,5

km con respecto al cráter). Las áreas de paso preferencial de estos flujos están limitadas a los valles del volcán, donde la componente gravitatoria es muy importante.

Cuadro 1. Características de las principales erupciones del Arenal (reformado de [33])

Erupción	Edad	Años reposo ^(a)	V (km ³)	VEI ^(c)	Tipo de erupción
AR-22	1968 E.C.	530	0,003 ^(b)	3	Vulcaniana
AR-21	1440 E.C.	40	?	?	Vulcaniana?
AR-20	1400 E.C.	380	0,44	4+	Pliniana
AR-19	1020 E.C.	0	0,90	4	Estromboliana violenta
AR-18	1020 E.C.	~270	0,27	4	Subpliniana
AR-17	~750 E.C.	~50	0,165	4-	Subpliniana
AR-16	~700 E.C.	~50	0,19	4-	Estromboliana violenta
AR-15	650 E.C.	~100	0,38	4	Pliniana
AR-14	~550 E.C.	120	~0,15	4-	Estromboliana violenta
AR-13	430 E.C.	600	~0,20	4-	Subpliniana
AR-12	170 a.E.C.	~100	~0,35	4	Pliniana
AR-11	~270 a.E.C.	~110	~0,15	4-	Subpliniana
AR-10	380 a.E.C.	870	~0,15	4-	Estromboliana violenta
AR-9	1250 a.E.C.	~200	>0,13	4	Pliniana
AR-8	~1450 a.E.C.	~200	~0,15	4-	Subpliniana
AR-7	~1650 a.E.C.	~600	~0,15	4-	Subpliniana
AR-6	~2250 a.E.C.	~550	~0,20	4-	Subpliniana
AR-5	~2800 a.E.C.	~550	~0,15	4-	Estromboliana violenta
AR-4	~3350 a.E.C.	~550	~0,20	4-	Estromboliana violenta
AR-3	~3900 a.E.C.	~550	~0,15	4-	Estromboliana violenta
AR-2	~4450 a.E.C.	~610	?	?	?
AR-1	5060 a.E.C.	-	?	4?	Pliniana?

E.C.: Era Común según el Calendario Gregoriano; a.E.C.: antes de la Era Común. (a) Entre erupciones mayores, puesto que ocurrieron otras erupciones explosivas menores o de lava. (b) Según [28]. (c) Índice de Explosividad Volcánica, ligeramente reformado de [24].

El registro geológico muestra además numerosos depósitos de eventos menores que no son correlacionables certeramente. Casi todos los depósitos de caída del Arenal se han distribuido hacia el oeste o suroeste, de acuerdo con los vientos regionales predominantes, con una única excepción conocida (Fig. 4).

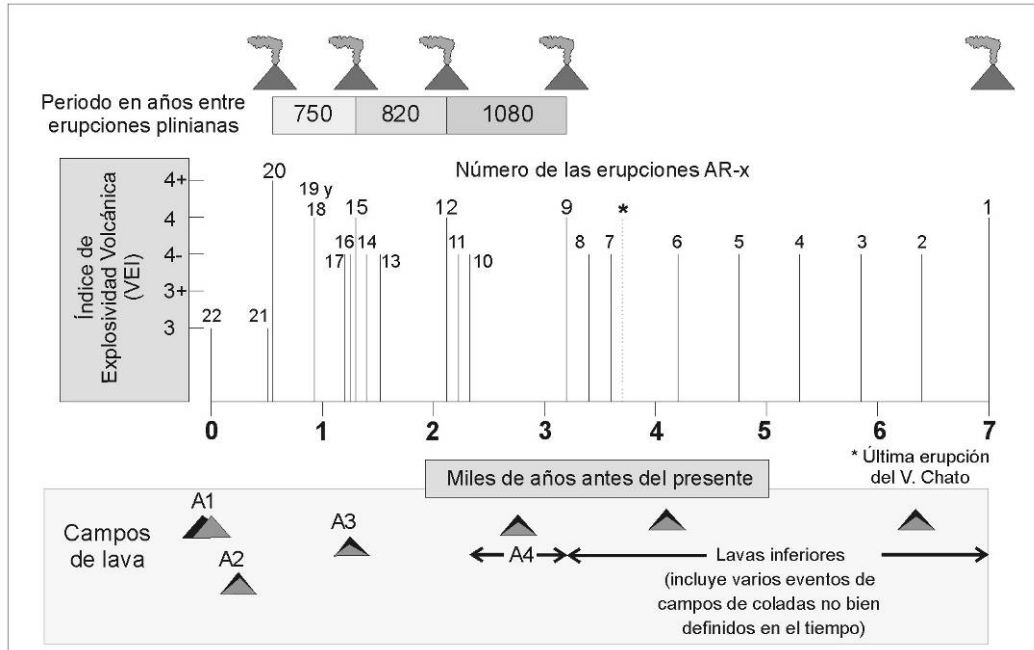


Figura 3. Secuencia temporal de las erupciones más importantes (Índice de Explosividad Volcánica ≥ 3) a lo largo de la historia del Arenal. Modificado de [33].

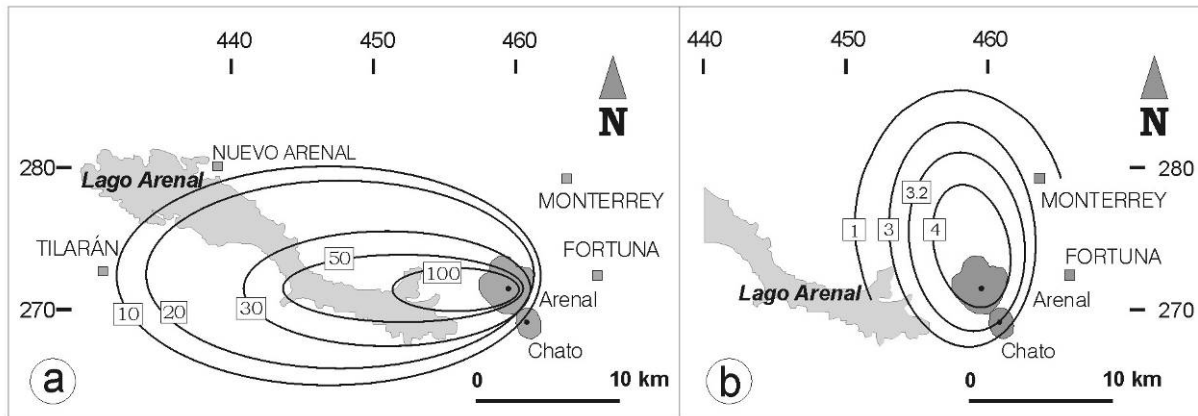


Figura 4. Espesores de los piroclastos de caída (curvas isopacas, en cm) de las erupciones a) AR-20, la más grande erupción explosiva en la historia del Arenal, cuyos depósitos de caída se dirigieron hacia el oeste, como casi todos los otros depósitos y b) AR-17 inferior, con depósitos que se distribuyen de manera anómala al norte, caso único conocido. Modificadas a partir de [15].

La correlación temporal de los últimos eventos plinianos del Arenal, muestra que están separados entre sí por lapsos de 750-1080 años. Los períodos más prolongados de inactividad explosiva importante son de 600 y 870 años. Los ciclos lávicos (ver Fig. 3) han sido ubicados con buena aproximación temporal y suceden generalmente a las erupciones plinianas, y parecen tener volúmenes de entre 0,5 y 1 km³. Se ha calculado [33] que el Arenal ha producido 0,08 m³/s de material volcánico en promedio durante su historia total de 7000 años, para alcanzar un total de 17 km³, y por tanto, ha pasado al menos un cuarto de su vida en erupción.

LOS PELIGROS VOLCÁNICOS EN EL ARENAL

Varios trabajos anteriores han producido síntesis de mapas de peligros con base en el conocimiento de su tiempo [4, 5, 14, 19, 41], mientras que otros [3, 32] ofrecen parámetros cartográficos adicionales para ser considerados durante la generación de los flujos piroclásticos. Las bases conceptuales para la producción del mapa de peligros del Arenal han sido reevaluadas y ampliadas, de donde se han identificado los siguientes peligros volcánicos (Fig. 5):

- Salida y dispersión de gases a la atmósfera, acarreados principalmente por los vientos que soplan hacia el oeste.
- Proyección y caída balística de bloques, que por su dinámica, pueden ser lanzados en ángulos cercanos a la vertical, o en ángulos bajos, cercanos a la horizontal.
- Caída de piroclastos, con cuatro escenarios típicos (*in crescendo*):
 - 1) Erupciones estrombolianas pequeñas a moderadas, con columnas de cenizas < 3 km de altura.
 - 2) Erupciones vulcanianas, con columnas de cenizas de 5-10 km de altura.
 - 3) Erupciones estrombolianas fuertes, con columnas de cenizas \geq 10 km de altura.
 - 4) Erupciones plinianas, con columnas de cenizas de 20-25 km de altura, con un volumen eruptado $\sim 0,5 \text{ km}^3$.
- Flujos piroclásticos y oleadas acompañantes, o bien generadas independientemente por explosiones freatomagmáticas. Sus escenarios (*in crescendo*) son:
 - 1) Por el colapso de columnas piroclásticas densas de erupciones estrombolianas moderadas.
 - 2) Por colapso de frentes de coladas de lava o por caída de una pared del cráter y la evacuación de lagos de lava.
 - 3) Los flujos de bloques y cenizas.
 - 4) Los originados por colapso de columnas estrombolianas densas.
 - 5) Los asociados con el colapso de columnas de erupciones plinianas o subplinianas o domos.
- Apertura de bocas eruptivas laterales, y generación de explosiones dirigidas.
- Coladas de lava blocosas, de discurrir lento.
- Lahares, originados por lluvias intensas durante o después de períodos eruptivos intensos, que arrastran gran cantidad de lodo, arenas y rocas de dimensiones métricas.
- Deslizamientos y avalanchas volcánicas, por la caída gravitacional de un sector del edificio.
- *Seiche*, por la ola generada por alguna avalancha o flujo piroclástico que ingresen a alta velocidad desplazando un volumen importante de agua dentro de la laguna de Arenal.
- Sismos volcánicos, particularmente por el ascenso de magma.

La salida y dispersión de gases

Cuando el magma llega cerca de la superficie, pierde la mayoría de sus gases disueltos en forma pasiva o durante las explosiones. El Arenal emite gases a la atmósfera desde varios puntos en sus faldas. Por ejemplo, las emisiones de CO_2 y CH_4 en la quebrada Naranja, relacionada con la traza de una falla que corta parte del edificio volcánico en el lado norte. La tasa de emisión de los gases sulfurados emitidos pasivamente desde la cúspide ha sido calculada en un promedio mínimo diario de $130 \pm 60 \text{ t de SO}_2$ [39]. La mayoría de estos gases expulsados desde la cúspide, se diluyen en la atmósfera o bien en las nubes y forman lluvia ácida, que se dispersa principalmente hacia el oeste, debido a los vientos predominantes. Esta lluvia ácida puede llegar a tener valores de acidez tan bajos de $\text{pH} \sim 2$ a unos 2 km, aunque lo usual sea $\text{pH} = 4-5$ [38], y $\text{pH} \sim 5$ en la Presa de Sangregado. La dinámica vegetal en el flanco oeste del Arenal entre 1985 y 1993, mostró ser lenta en su crecimiento, afectada por la lluvia ácida y las cenizas que le caían [38]. Con base en estos datos, se puede extrapolar un área elíptica de 3 km al oeste del cráter activo, como la de alta afectación por gases y lluvia ácida, y hasta unos 5 km, de afectación moderada.

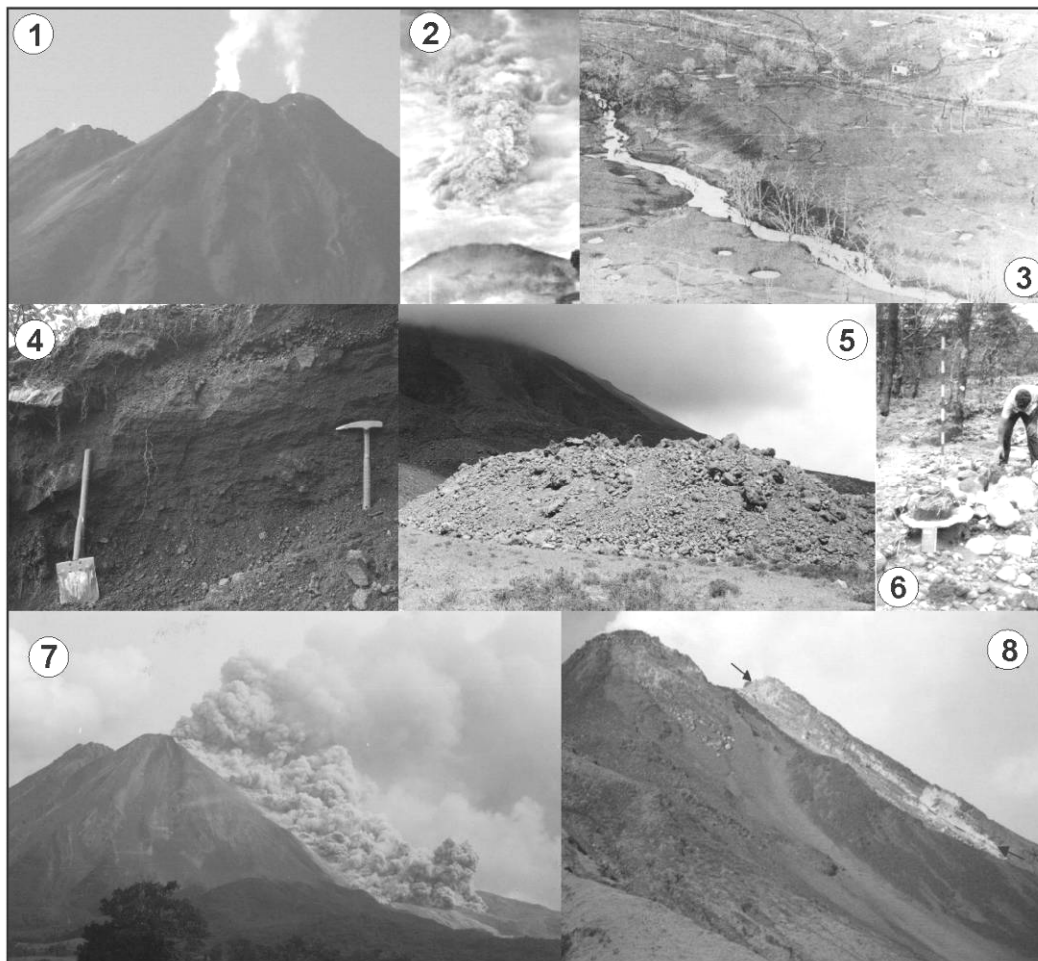


Figura 5. Peligros volcánicos del Arenal. 1: Salida de gases (2004). 2: Erupción piroclástica (30 de julio de 1968, en *La Nación*). 3: Bombardeo balístico (flanco oeste, tomada de [13]). 4: Depósitos piroclásticos de los depósitos de apertura de cráter lateral. 5: Lavas en bloques (lado occidental, 1995). 6: Depósitos de lahares (costado norte de Laguna Cedeño, 1990). 7: Flujos piroclásticos (1998). 8: Áreas de inestabilidad en el cono del Arenal, que podría generar avalanchas volcánicas.

Caída balística de bloques

Al ocurrir explosiones volcánicas, se originan bloques y bombas de diversos tamaños que acompañan la salida de ceniza y lapilli, conocidos todos en su conjunto como tefra. La caída de bloques, luego de una trayectoria balística en el Arenal es muy conocida a partir del bombardeo ocurrido el 29 de julio de 1968, que fue responsable en parte de la destrucción de Pueblo Nuevo (Fig. 1). Los cráteres de impacto se formaron principalmente en el flanco oeste del volcán (Fig. 5.3), pero también se vieron en otros lugares, como cráteres aislados (Fig. 6.2). Formaron dos grupos: unos radialmente distribuidos desde los nuevos cráteres A, B y C, que alcanzaron hasta 3,6 km de distancia; los otros, orientados por bajo ángulo, hasta 5 km del cráter A, a unos 6,4 km desde el cráter cuspidal D. El estudio de la distribución y mecánica de los impactos concluyó que fueron emitidos a muy altas velocidades [13]. Otros cráteres de impacto relacionados con erupciones más antiguas, aunque relativamente recientes, han sido observados fuera de las áreas de bombardeo de 1968. La gran mayoría se encuentra a menos de 2,5 km del cráter D o cuspidal, sitio supuesto de emisión de tales proyectiles balísticos. Sin embargo, hacia el este, algunos llegan hasta casi 3 km y hacia el noreste hasta 3,75 km. Los diámetros de los cráteres llegan hasta 16 m,

aunque el promedio es de 5,6 m. Se puede concluir que a menos de 2,5 km de distancia radial desde el cráter D, el peligro generado por los impactos balísticos es elevado, moderado hasta 4 km, bajo hasta 6,5 km, e improbable más allá de esa distancia radial.

Caída de piroclastos

Debido a la desgasificación del magma, se producen explosiones que lo fragmentan, formando los piroclastos lanzados hacia la atmósfera mediante un chorro de alta velocidad que puede alcanzar varios kilómetros de altura, dependiendo de la magnitud de la erupción. Una vez en la atmósfera, los piroclastos son arrastrados por el viento y luego caen por gravedad: son los piroclastos de caída. Hay cuatro escenarios posibles por considerar:

- 1) Erupciones estrombolianas pequeñas a moderadas, como las ocurridas entre 1984 y 1996, con penachos de cenizas ≤ 3 km de altura. Las áreas de mayor afectación, que incluyen las de los impactos balísticos están restringidas a 1 km de radio alrededor del cráter activo.
- 2) Erupciones vulcanianas, como las de 1968, con columnas de cenizas de 5-10 km de altura que produjeron $3,0 \pm 1,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ de cenizas, y que alcanzaron la costa pacífica [6]. El área levemente afectada por las cenizas fue de 230 km^2 y trazas de cenizas cubrieron 1580 km^2 [10, 28]. Las áreas más peligrosas se consideran dentro de una elipse con un semieje a 5 km del cráter D.
- 3) Erupciones estrombolianas fuertes (como AR-19), con columnas que han de haber alcanzado 10-15 km de altura. Las áreas de mayor afectación, con espesores ≥ 100 cm de cenizas, alcanzan hasta unos 12,5 km al oeste del volcán. Las áreas de afectación moderada, con espesores de ~ 50 cm de cenizas, decrecen rápidamente, y alcanzan hasta ~ 15 km al oeste del volcán, en un una elipse poco achatada.
- 4) Erupciones plinianas (p.ej. AR-20), con columnas de 20-25 km de altura, y con un volumen eruptado $\sim 0,5 \text{ km}^3$. Las áreas de mayor afectación, con espesores ≥ 100 cm de cenizas, alcanzan hasta $\sim 8,5$ km al oeste del volcán, con un ancho de ~ 3 km. Las áreas de afectación moderada, con espesores de ~ 50 cm de cenizas, alcanzan hasta ~ 16 km al oeste del volcán, en un área elíptica de $\sim 4,5$ km de semieje menor.

Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos se pueden originar por el colapso de domos, coladas de lava o paredes del cráter, o bien, por el colapso debido a la enorme densidad de las columnas de piroclastos. Se mueven canalizados por los valles, son de alta energía, temperatura y velocidad, y con un alto poder destructivo. Otros eventos asociados, con explosiones donde el agua subterránea calentada por el magma en ascenso interviene (llamados freáticos y freatomagmáticos), originan las llamadas oleadas piroclásticas, con gran cantidad de gases, pero menos calientes, aunque más rápidas y destructivas. Estas oleadas suelen acompañar a los flujos piroclásticos y normalmente afectan áreas más extensas que los flujos, debido a su gran movilidad por los gases calientes. A lo largo de la historia del Arenal se han observado flujos o bien depósitos, de cinco tipos diferentes:

- 1) Por el colapso de columnas piroclásticas densas de erupciones estrombolianas moderadas, eventos típicos entre 1986 y 1992 [2], que raramente han excedido los 2 km de distancia radial desde el cráter D.
- 2) Por el colapso de frentes de coladas de lava o por la caída de una pared del cráter y la evacuación sucesiva de lagos de lava, como el flujo del 28 de agosto de 1993 [2, 3]. Los causados por colapso de frentes de coladas de lava blocosas en las partes de alta pendiente no suelen llegar más allá de los 2,3 km radiales desde el cráter D. Desde 1998 el cono C ha desarrollado estructuras de conos-domos, con lóbulos cortos en altas pendientes, que han facilitado los flujos piroclásticos mencionados. En este tipo de estructuras, las fracturas tensionales desarrolladas perpendicularmente a la dirección del flujo, una vez rellenas de agua de lluvia, incrementan la presión de fluidos y los hacen más susceptibles de colapsar y

causar flujos piroclásticos [30], lo cual es un factor adicional evidente en el Arenal, donde la lluvia es intensa.

Los flujos piroclásticos que implican la caída de una parte de la pared del cráter y la evacuación del lago de lava intracrático, son más móviles, más ricos en gases, más calientes ($< 1000^{\circ}\text{C}$), con mayor energía potencial y cinética, más veloces ($11\text{-}33\text{ m/s} = 40\text{-}120\text{ km/h}$), más voluminosos ($1\text{-}3 \times 10^6\text{ m}^3$), y por lo tanto más destructivos y de mayor alcance (Alvarado & Soto, 2002). Estos son los casos de junio de 1975 y agosto de 1993, que alcanzaron hasta 4,3 km y 3,3 km de distancia radial desde el cráter D, respectivamente. Para alcanzar tales áreas terminales se necesitan solo entre 90 y 180 segundos y debe tomarse en cuenta la existencia de algunos sitios con desarrollo turístico en esos posibles caminos (*e.g.* Tabacón). En promedio, se ha calculado [2] la generación de un flujo mayor cada 4,6 años, pero conforme las paredes se hacen más empinadas e inestables, esta periodicidad podría acelerarse.

3) Flujos de bloques y cenizas, como los del 31 de julio de 1968 [6, 21, 22], que se presentan hasta 3,2 km de distancia radial del cráter D.

4) Los originados por colapso de columnas estrombolianas densas. La distancia máxima observada a la que han llegado es de 3,5 km radiales desde el cráter D.

5) Aquellos asociados con el colapso de columnas de erupciones plinianas o domos, o ambos, como se ha observado en los más antiguos depósitos conocidos de AR-1 y en algunos flujos asociados con AR-20. Las distancias radiales máximas observadas son de 4,15 km desde el cráter D [35].

Apertura de cráteres laterales y generación de explosiones dirigidas (*blasts*)

En volcanes complejos como el Arenal, el ascenso de magma para nuevas erupciones, suele producirse en áreas de debilidad existentes, y por eso las erupciones no siempre suceden en la cúspide, sino en las faldas y abriendo nuevos cráteres. Tal es el caso de las lavas A2 inferiores, eruptadas desde el cráter E, 1,5 km al noroeste del cráter D [9]. La formación de los cráteres A, B y C en el inicio de la erupción de 1968 es otro ejemplo evidente. La apertura de este tipo de nuevos cráteres suele acompañarse de explosiones dirigidas de bajo ángulo, mediante la combinación de gases magmáticos y agua subterránea sobrecalentada y genera flujos-oleadas piroclásticos de altísima energía y velocidad (*blasts*), acompañadas de intensos bombardeos balísticos, tal y como sucedió en julio de 1968 (Fig. 6). Bajo las condiciones estructurales del volcán, se especula que el sector completo del flanco occidental del edificio volcánico [1, 9], es el área más propensa a producir nuevos cráteres (radio máximo de 1,5 km desde el cráter D) y afectarían áreas radiales de hasta 6,5 km desde el cráter D, similares a las de julio de 1968.

Coladas de lava

Las coladas de lava se presentan cuando el magma llega a la superficie y ha perdido gran cantidad de los gases que tenía en su interior, de modo que fluyen desde las bocas de salida, pendiente abajo, a velocidades variables. Pueden afectar amplias áreas, y debido a su temperatura, pueden causar incendios. Son destructivas y difíciles de detener.

A lo largo de la historia del Arenal, las lavas han cambiado muy poco en su dinámica, alcance, petrología, quimismo y comportamiento mecánico en general: composición andesítico-basáltica, blocosas y de baja velocidad [8, 9]. Considerando aun las lavas emitidas desde cráteres laterales, como los A y E, las distancias máximas alcanzadas desde el cráter D son de 4,6 km para las más distales (al este de Tabacón). Los frentes de las lavas más distales emitidas entre 1968-73 están a 4,2 km y la lava de mayor longitud emitida desde el cono C, cruza el sendero dentro del Parque Nacional y tiene su frente a 3, 2 km del cráter D.

Lahares

Las lahares son flujos ricos en agua que arrastran gran cantidad de lodo, arena y rocas de dimensiones métricas. Se originan durante lluvias intensas, durante o después de períodos eruptivos intensos. Se movilizan encauzados, con un alto poder destructivo, se depositan en sitios con cambios de pendiente y pueden llegar a decenas de km desde su fuente, aunque en el caso del Arenal, pareciera que las áreas límite se encuentran a unos 5 km del cráter cuspidal [41], en tanto que las áreas de cauces entre 3 y 5 km de distancia radial, justo donde cambia la pendiente y se forman abanicos lahárico-aluviales, son las áreas más peligrosas.

Se han visto producirse luego de las primeras erupciones de julio de 1968 en los cauces del río Tabacón, y en años posteriores en los cauces de los ríos Aguacaliente y Calle de Arena. Estos últimos han sido promovidos por el deterioro erosivo de las cuencas altas del volcán. Se considera que las lluvias intensas entre 50-80 mm en lapsos de 2-8 horas, o bien 100 mm de lluvia en 24 horas, o 300 mm de lluvia en 3-4 días, serían suficientes para disparar lahares en el Arenal, lo cual en promedio sucedería al menos 2 veces al año, con tamaños e intensidades variables [41]. Las áreas afectadas y afectables por estos lahares, serían los cuadrantes suroeste (río Aguacaliente), norte (quebradas hacia los lagos), este (quebradas Guillermina, Platanillo y Calle de Arena) del aparato volcánico.

Algunos casos excepcionales durante erupciones muy grandes (como AR-20) podrían generar lahares que fluyeran mucho más lejos (~10 km), pero no se tienen pruebas estratigráficas concluyentes.

Deslizamientos y avalanchas volcánicas

Los deslizamientos en las paredes inestables altas de los volcanes son comunes en el mundo. La mayoría son deslizamientos de depósitos de suelo y rocas que afectan áreas restringidas, aunque si llegan a cauces caudalosos, o provocan represamientos en ellos, es posible que generen lahares. Cualquiera de las paredes altas del sector occidental del volcán son susceptibles de deslizarse [1]. Algunos de estos deslizamientos pueden producirse también en lavas en movimiento, lo que causa flujos piroclásticos, o al dejar al descubierto el lago de lava, provocan también otros flujos piroclásticos mayores. Otros posibles factores desestabilizantes incluyen la intrusión de nuevo magma, o un sismo importante local o regional, o una serie local de sismos de magnitud intermedia. Las consecuencias dependen del volumen del material movilizado y la cantidad de agua y gases disponibles. En general se considera que deslizamientos pequeños a moderados no afectan más allá de 2,5 km radiales del cráter D; y si alcanzan el orden máximo de $3 \times 10^7 \text{ m}^3$, no llegarían a sitios más allá de los 4,5 km de distancia radial, aun si se encauzacen.

Los casos de avalanchas de mayores dimensiones (poco probable, pero no imposible), podrían llegar a ser catastróficos en el flanco occidental, en particular si afectan parte del creciente cono C, y fuese liberado el magma en el conducto eruptivo, de modo que se tendría una combinación de avalancha primero y flujos piroclásticos después. Al llegar al embalse del Arenal, podría luego desencadenar una serie de olas dentro de él (*seiche*). Una secuencia de este tipo sobrepasa las posibilidades especulativas e informativas de los mapas de amenaza.

Olas dentro del embalse (*seiche*)

Se considera la generación de olas dentro del embalse de Arenal debido al desplazamiento súbito de agua producto de la entrada de flujos piroclásticos, deslizamientos o avalanchas volcánicas de volumen significativo. Si esto llegara a suceder en el Arenal, el solo hecho de que el flujo o avalancha llegara al embalse, implicaría de antemano haber arrasado al menos una parte considerable del área turística del Parque Nacional y la carretera que comunica con El Castillo, lo cual ya sería una catástrofe. Análisis por simulación numérica sobre el efecto de las ondas de agua generadas y al alcanzar las riveras del lago y la presa [17], mostraron que la respuesta del embalse a la intrusión del material es moderada, sobre todo

para aquellos eventos cuya posibilidad de ocurrencia sea mayor, por lo que se considera que las obras de excedencia del complejo hidroeléctrico están en capacidad de manejarla y controlarla. Habría, no obstante, oleajes del orden de 1-2 m, que golpearían algunas riveras y podrían causar daños adicionales. Se especula que alturas mayores se darían en el caso de un deslizamiento entrante en el embalse [1].

Sismos volcánicos

El ascenso del magma hacia la superficie produce condiciones de esfuerzos que fracturan el entorno rocoso interno, provocando sismos locales desde muy pequeños hasta de magnitudes considerables (casos excepcionales de $M=7$ [43]). Debido a que la mayoría de estos sismos son superficiales (profundidades 5-15 km) y con epicentros muy cercanos al volcán, los efectos suelen concentrarse en áreas mesosísmicas restringidas a la vecindad del volcán. En el Arenal, el 28 de julio de 1968, unas 9 horas antes del inicio de la erupción, numerosos temblores sacudieron sus inmediaciones, con magnitudes máximas calculadas entre 4,5-5,1 [7, 43]. Muchos otros enjambres sísmicos han afectado el volcán desde 1968 al presente, con profundidades entre 1-20 km bajo el volcán, usualmente con magnitudes <2 [32, 34]. En el caso del Arenal, los de mayor magnitud ($M=5,0-5,5$) podrían generar daños menores a la infraestructura en un radio de unos 5 km alrededor del volcán. No obstante, el disparo de deslizamientos rocosos en áreas inestables del volcán, que conlleven a la generación de avalanchas o flujos piroclásticos, podrían ser las consecuencias más funestas. Otras consecuencias probables de los sismos volcánicos son las de cambiar el estado dinámico del magma en erupción, disparando explosiones inusuales, el fracturamiento del edificio, la puesta en contacto de agua subterránea con magma (erupciones freatomagmáticas), o incluso la apertura de nuevos cráteres.

LOS MAPAS DE PELIGROS VOLCÁNICOS EN EL ARENAL

Los escenarios para el mapa de peligros

Considerando los diferentes peligros discutidos y las secuencias eruptivas pasadas en el Arenal, se han elegido los escenarios para ser tratados en el mapa de peligros volcánicos. Para tal efecto, se ha creado una serie de mapas temáticos que representan cada peligro por separado y de manera estática (Figs. 6.1 a 6.8), con el propósito de fundamentar posteriormente los escenarios del mapa integrado de peligros. Los mapas se han realizado inductivamente con la información geológica y de la historia volcánica integrados, con criterios similares a los que han sido usados para análisis de amenaza volcánica, en una compilación global de efectos de erupciones con la distancia para $VEI = 3-5$, donde se encontró que para erupciones pequeñas a moderadas, los peligros severos solo alcanzan de 5 a 10 km de la fuente [25], y como se ve en las figuras de subescenarios (Fig. 6), son coincidentes con el caso del Arenal.

Se ha considerado establecer dos escenarios básicos. El primero es uno de corto plazo y que en términos generales viene a tener semejanzas con el de la erupción de 1968 al presente, con algunas variantes. Visto de otra manera, es el escenario para lo que resta del presente periodo eruptivo. El segundo escenario, de largo plazo, contempla erupciones como las plinianas, estrombolianas fuertes y vulcanianas (el inicio de 1968, verbigracia).

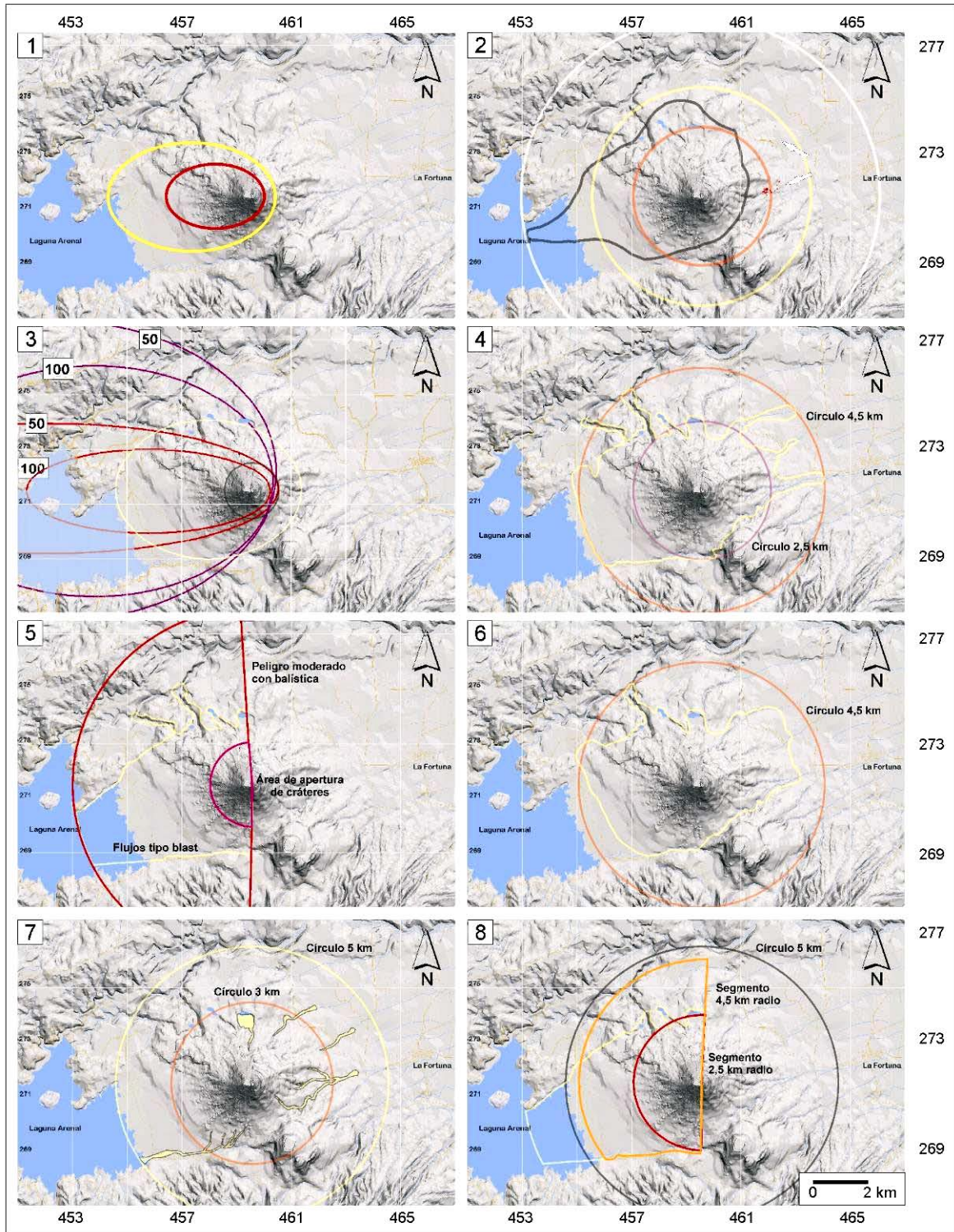


Figura 6. Mapas temáticos de peligros volcánicos del Arenal. **1:** Salida y dispersión de gases y lluvia ácida. Zonas de alta (rojo) y moderada (amarillo) peligrosidad, de forma elipsoidal. **2:** Bombardeo balístico. Zonas circulares de alto (2,5 km, rojo), moderado (4 km, amarillo) y bajo peligro (6,5 km, blanco), comparado con datos históricos (negro) y prehistóricos (flechas). **3:** Caída de piroclastos: alto por estrombolianas pequeñas a moderadas (círculo negro); alto por vulcanianas (elipse amarilla); alto por estrombolianas fuertes (elipse púrpura de 100), moderado por estrombolianas fuertes (elipse púrpura de 50); alto por plinianas (elipse roja de 100), moderado por plinianas (elipse

roja de 50). **4:** Flujos piroclásticos: círculo interno púrpura de 2,5 km de radio con la intersección del área amarilla, incluye los originados por colapso de columnas estrombolianas pequeñas y colapso de coladas de lava; el área amarilla externa al círculo interior incluye flujos piroclásticos por colapso de la pared del cráter, columnas estrombolianas densas y columnas plinianas; el círculo externo rojo, de 4,5 km de radio marca los límites posibles de los flujos piroclásticos, excepto aquellos encauzados por valles profundos. **5:** Apertura de cráteres laterales y generación de explosiones dirigidas: el segmento de círculo interno púrpura de 1,5 km de radio indica las áreas con posible apertura de nuevos cráteres laterales; el área amarilla indica las áreas con peligro alto a moderado por generación de explosiones dirigidas (tipo 1968); el segmento de círculo externo rojo, de 6,5 km de radio marca los límites posibles con peligro de moderado a bajo por balística por explosiones dirigidas. **6:** Coladas de lava: el círculo rojo de 4,5 km de radio indica los alcances máximos observados de lavas; el área amarilla indica las áreas con peligro alto a moderado por lavas futuras, con base en la topografía actual. **7:** Lahares: el círculo rojo interno de 3 km de radio indica las áreas de alto peligro y algunos sitios de depositación; el área entre el círculo interno y el círculo amarillo externo de 5 km de radio indica las áreas máximas de depositación; las áreas estrechas en amarillo indican las áreas de flujo y depositación de lahares. **8:** Deslizamientos, avalanchas y sismos: el segmento interno rojo de 2,5 km de radio indica las áreas de alto peligro por deslizamientos de roca; el segmento naranja intermedio, de 4,5 km de radio indica las áreas de peligro moderado por deslizamientos; la zona amarilla, áreas de afectación por avalanchas volcánicas (eventos poco probables), así como los sitios de generación de *seiches* en la Laguna de Arenal; el círculo externo negro, de 5 km de radio, ilustra las áreas de peligro moderado por sismos volcánicos.

Escenario a corto plazo

El volcán ha estado activo desde 1968, y no hay evidencias de que vaya a terminar pronto la erupción. Algunos indicios podrían indicar que la tasa de alimentación de magma ha decaído desde 1997. Las altas tasa de material eruptado entre 1968 y 1978, decayeron para finales de la década de 1980 a tasas de $\sim 10^7$ m³/año, que se mantuvieron durante el quinquenio 1992-96 [31]. Desde 1997, el volumen y longitud de las lavas ha decrecido, al tiempo que empezaron a instalarse conos-domos en el cono C, una evidencia indirecta de menor alimentación de magma. Las tasas de emisión de SO₂ también han decrecido [cf. 39, 42]. Dentro de este período eruptivo ha habido reactivaciones estrombolianas importantes en 1975 (previa a los flujos piroclásticos de junio) y en 1984, pero no de las dimensiones de la erupción inicial de julio de 1968, puesto que el conducto ha permanecido abierto. Así, puesto que el volcán ha mantenido un comportamiento con pocas variaciones durante más de 3 decenios, y aunque llegue a estar casi apagado por algunos años, existen posibilidades de que se reactive, o cambie de su patrón eruptivo, a pesar de que no hay evidencias pasadas inequívocas de que grandes explosiones como la inicial, hayan sido originadas a lo largo de un ciclo eruptivo.

La Fig. 1 ilustra las áreas afectadas durante la erupción inicial de 1968, y la distribución de los diferentes eventos y depósitos. El escenario de corto plazo considera que el conducto seguirá abierto por lo que resta de esta erupción, sin situaciones explosivas similares a las de julio de 1968, sin apertura de nuevos cráteres ni explosiones dirigidas. Sí se consideran posibles erupciones vulcanianas con origen en los cráteres C o D, salida y dispersión de gases y lluvia ácida, balística de alto ángulo, flujos piroclásticos, coladas de lava, lahares, deslizamientos y sismos ($M < 5$). Para el caso de flujos piroclásticos y lavas, se han considerado dos subescenarios. La erupción hasta el presente ha afectado principalmente el sector occidental del volcán. Paulatinamente, las áreas afectadas se han ido acrecentando al norte y al noreste, porque el cono C ha estado creciendo y evolucionando, desde ser un cráter que emitió sus primeras lavas en 1974, luego un cono adventicio lateral, hasta ser hoy el cono prominente (~ 50 m más alto que el precedente cono D, Fig. 7). A menos que haya un deslizamiento de grandes proporciones, o que la erupción se termine, seguirá creciendo y absorberá al cono D, dando un cono superpuesto, en vez de uno doble, como lo es en la actualidad. Esto cambiaría significativamente el panorama de peligros, porque el sector este, que mira hacia La Fortuna, empezaría a ser afectable por flujos piroclásticos, coladas de lava y eventualmente lahares. Por eso, se subdividen los peligros de flujos y lavas en sectores occidental y oriental.

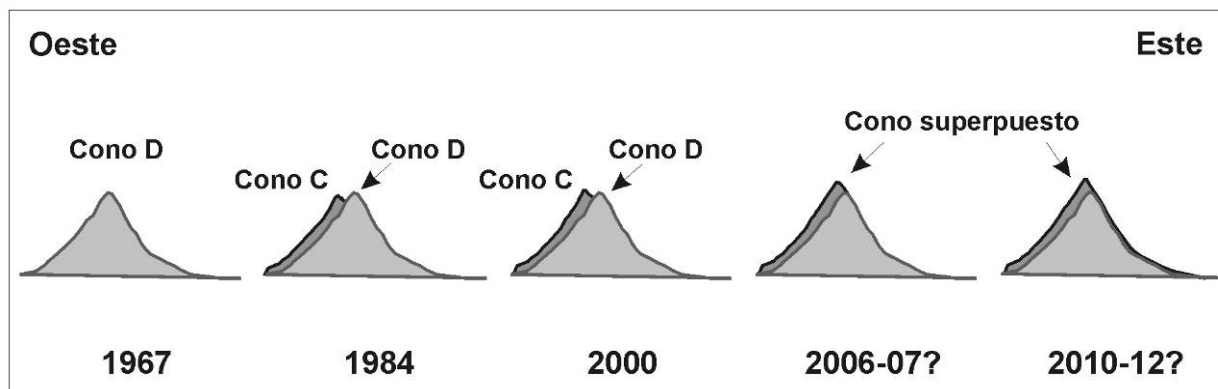


Figura 7. Evolución de los conos del Arenal, y proyecciones si el crecimiento continúa al mismo ritmo.

El mapa resultante de peligros volcánicos a corto plazo combina la sumatoria de los factores explicados, (la Fig. 8). Las zonas de peligrosidad incluyen los siguientes elementos:

Zona de alta peligrosidad (borde en rojo): Área elipsoidal por alta afectación de gases y lluvia ácida; círculo de 2,5 km de radio por bombardeo de erupciones estrombolianas moderadas a grandes; círculo de 1 km de radio por bombardeo y caída de piroclastos por erupciones estrombolianas pequeñas; sección de la elipse por caída de piroclastos por erupciones vulcanianas hasta 2,5 km de radio; sector occidental de la área afectable por flujos piroclásticos (por colapso de columnas estrombolianas, de coladas de lava y de pared del cráter) hasta un radio de 4,5 km del cráter D; sector occidental en la trayectoria de coladas de lava, hasta 4,5 km del cráter D; sector occidental con posible tránsito de lahares, hasta 5 km del cráter D; sección de círculo de 2,5 km de radio afectable por deslizamientos.

Zona de mediana peligrosidad (borde en amarillo): Elipse por influencia moderada de gases y lluvia ácida, hasta 5 km de radio; círculo de 4 km de radio por bombardeo de erupciones estrombolianas grandes y vulcanianas; círculo de 1 km de radio por bombardeo y caída de piroclastos por erupciones estrombolianas pequeñas; sección de la elipse por afectación de caída de piroclastos por erupciones vulcanianas hasta 5 km de radio; sector oriental afectable por flujos piroclásticos (colapso de columna estrombolianas, de coladas de lava y de pared del cráter), hasta un radio de 4,5 km del cráter D, y del lado occidental, más allá de 4,5 km; sector oriental en la trayectoria de coladas de lava, hasta 4 km del cráter D, y del lado occidental, más allá de 4,5 km; sector oriental por afectación de lahares, hasta 4,5 km del cráter D; parte de la sección de círculo de 4 km de radio afectable por deslizamientos.

Zona de baja a moderada peligrosidad (borde en negro): Todos los sectores del círculo de 5 km de radio alrededor del cráter D, no incluidos en las dos zonas anteriores, que considera el peligro por sismos volcánicos y caída de cenizas y gases ante eventos meteorológicos con orientación anómala de vientos.

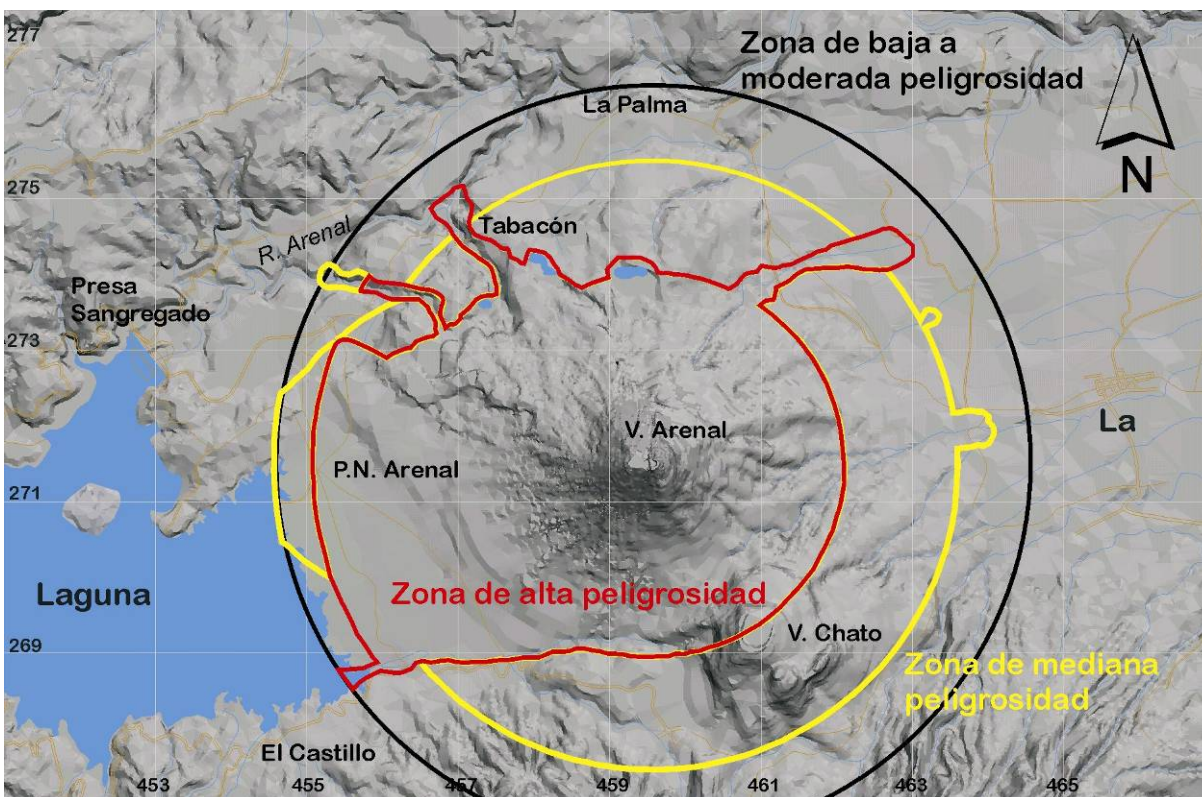


Figura 8. Mapa de peligros volcánicos del Arenal, escenario a corto plazo.

Escenario a largo plazo

Se ha considerado la reconstrucción de los mapas temáticos de las Figs. 6.1 a 6.8, con los eventos mayores, de largo plazo: erupciones de tipo vulcaniano con explosiones dirigidas (tipo julio de 1968), plinianas o estrombolianas fuertes. Asimismo, el alcance de los flujos piroclásticos ante eventos de tal cuantía, serían similares a los observados para la erupción más antigua, hasta unos 4,5 km. Los subescenarios combinados incluyen además: balística hasta 6,5 km; apertura de nuevos cráteres laterales; las lavas hasta 4,5 km; lahares que alcanzarían sus puntos máximos a unos 5 km, y eventualmente hasta 10 km encauzados, y avalanchas volcánicas, en particular hacia el sector oeste.

El mapa resultante se muestra en la Fig. 9, en donde se separa cada uno de los elementos, puesto que es muy posible que actúen por separado, dependiendo de la erupción que ocurra (p. ej.: un subescenario diferente para erupciones vulcanianas, dirigidas, estrombolianas fuertes, plinianas), a pesar de que algunos elementos conlleven a otros dentro de una misma erupción (p.ej.: erupción pliniana → flujos piroclásticos → lahares).

Las zonas de peligrosidad señaladas incluyen los siguientes elementos combinados, que se han denominado por letras dentro del mapa, para que puedan ser separables entre sí:

Zona de alta peligrosidad (borde en rojo): (A) Círculo de 5 km de radio por bombardeo de erupciones vulcanianas laterales, plinianas y estrombolianas fuertes. (B) Áreas elipsoidales de caída de piroclastos por erupciones plinianas y (C) estrombolianas fuertes hasta un espesor acumulado de 100 cm. (D) Zona de flujos piroclásticos, que incluye los originados por colapso de columna plinianas y estrombolianas fuertes, hasta un radio de 5 km del cráter D. (E) Área por posible apertura de nuevos cráteres, con un segmento de círculo de 1,5 km de radio. (F) Zona de afectación por coladas de lava de máxima longitud conocida. (G) Sector afectable por lahares, hasta 5 km del cráter D. (H) Zona de afectación por

deslizamientos y avalanchas volcánicas en el sector occidental hasta 6,5 km. (I) Zona circular de 5 km de radio expuesta a sismos volcánicos.

Zona de mediana peligrosidad (borde en amarillo): (J) Círculo de 6,5 km de radio por bombardeo de erupciones vulcanianas laterales con generación de explosiones dirigidas y quizás ante erupciones plinianas. (K) Elipses de áreas expuestas a la caída de piroclastos generados por erupciones plinianas y (L) estrombolianas fuertes hasta un espesor acumulado de 50 cm. (M) Sector por afectación de lahares, hasta ~10 km encauzados por los ríos más importantes. Podrían incluirse posibles flujos piroclásticos encauzados distales ante eventos plinianos, de los que sin embargo no hay registro geológico.

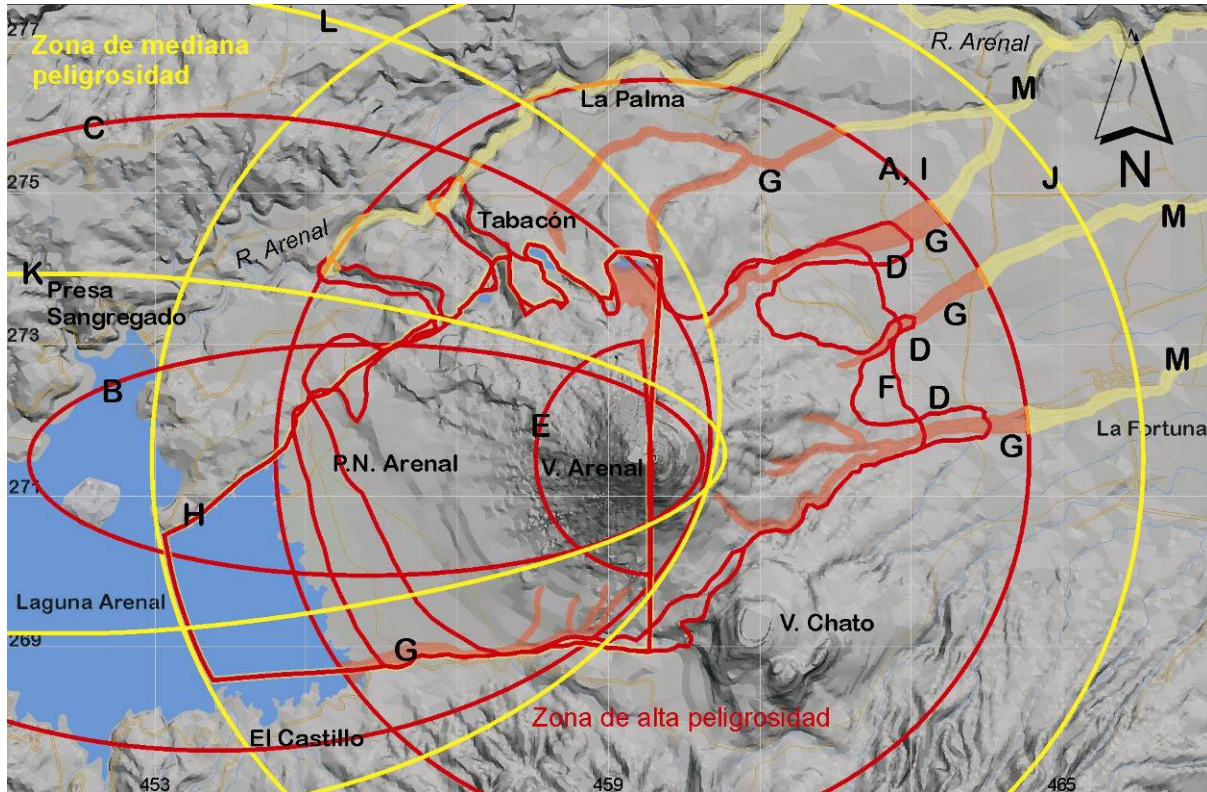


Figura 9. Mapa de peligros volcánicos del Arenal, escenario a largo plazo.

La pregunta de cuánto tiempo cubre este “largo plazo” no es inequívocamente contestable. Implica el cese del presente ciclo eruptivo, un periodo de reposo, y una nueva erupción, pero no podemos hipotetizar cuándo finalizará la presente erupción. Se ha intentado antes un juego de hipótesis que no concluyó ni de qué tipo ni cuándo esperar la próxima erupción [5]. Han ocurrido eventos plinianos con intervalos de 750-1080 años. El último ocurrió ~1400 E.C. (AR-20), y con el mínimo de recurrencia, debería esperarse la siguiente no antes de alrededor del 2150 E.C., o tan lejos como el 2500 E.C. Antes de las plinianas, podrían ocurrir eventos basálticos grandes, como AR-19, que ocurrió 380 años antes que AR-20. Si restamos esa diferencia de las edades de las plinianas posibles siguientes, las posibles fechas serían entre 1770 y 2120 E.C., pero una erupción mayor no ha ocurrido entre la que originó las lavas A2 (~1700 E.C.) y 1968, o sea, unos 250 años. El juego de fechas puede parecer interminable, y la simple aritmética –y frecuentemente la estadística– ha demostrado ser de relativa poca utilidad para estas aproximaciones vulcanológicas, de modo que para efectos prácticos, considerar como un lapso de 50 años para la siguiente erupción vulcaniana de “largo plazo”, y una pliniana entre los años 2100-2200

E.C., podrían ser aproximaciones valederas para tener en cuenta en la planificación del uso del suelo en el Arenal y su entorno.

USO DE LOS MAPAS DE PELIGROS VOLCÁNICOS PARA LA PLANIFICACIÓN

Para el caso del Arenal, el estudio geológico de su entorno y sus peligros, ha conllevado a la producción de la reglamentación restrictiva para el uso del suelo, que a su vez retroalimenta a los mapas de peligros aquí discutidos, y que son la base para una serie de medidas por tomar en el Arenal, encaminadas a la planificación territorial y la mitigación de posibles desastres, y a una gestión integrada del riesgo (Fig. 10).

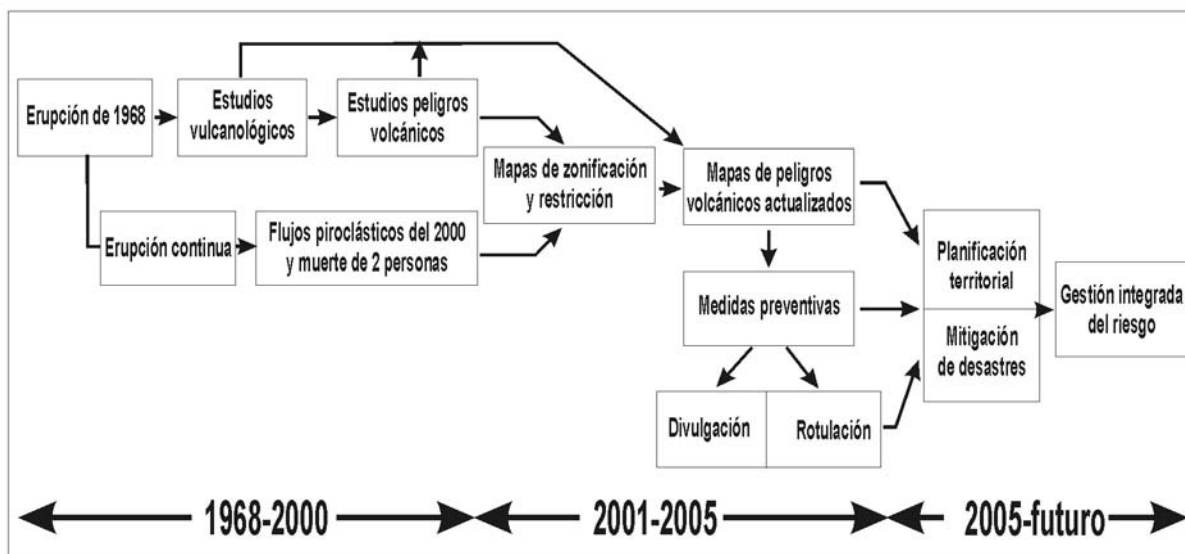


Figura 10: Flujo de eventos y actividades envueltas en los estudios de peligros volcánicos en el Arenal.

La reglamentación del uso del suelo ha tomado en cuenta las condiciones de riesgo y los usos y abusos históricos del suelo [12]. Las áreas restrictivas (Fig. 11a) se dividen en R1: Prohibición total de actividades turísticas, visita y libre tránsito de personas; R2: Bajo administración del Área de Conservación Arenal, con control de visitantes, a los cuales se les permite el acceso solo a ciertas partes del flanco oeste del volcán; R3: Permite senderismo, cabalgatas, pesca, y otras actividades al aire libre, y prohíbe nuevas construcciones y facilidades para acampar, permite el tránsito vehicular en la carretera a El Castillo, con flujo vehicular controlado; R4: Permite actividades de índole forestal, agropecuaria y explotación de tajos, pero no permite la ampliación de la infraestructura utilizada para esos fines; se prohíbe la visita y libre tránsito de personas en el sector este. El círculo de 5,5 km de radio permite las construcciones siempre y cuando cuenten con investigaciones avaladas por los centros de vigilancia volcánica.

Los sistemas volcánicos activos son extremadamente dinámicos y, conforme evolucionan las erupciones, pueden cambiar las áreas afectadas o afectables, por lo tanto, las áreas en peligro y en consecuencia, cualquier mapa de uso del suelo, debe obedecer a tales cambios. Esto se hace evidente para el escenario de peligros a corto plazo, que ha considerado que el cono C ha crecido y eventualmente absorberá al cono D (Fig. 7), cambiando el panorama de peligros que se tiene en la actualidad. Son situaciones que deben preverse con cierta antelación, y de ahí viene el interés en comparar las áreas bajo peligro con las áreas restringidas o restringibles.

Comparación de las zonas de restricción y los mapas de peligro volcánico

La comparación entre el mapa de zonas de restricción y el mapa combinado de peligro a corto plazo (Fig. 11) muestra concordancias evidentes. La zona R1, definida por el peligro de flujos piroclásticos, casi en su totalidad está incluida dentro del área de alta peligrosidad. Esta es más extensa porque incluye el escenario de que el cono C absorba al D y genere flujos hacia el lado este. Asimismo, hacia el lado oeste, considera la extensión total posible de lavas y flujos piroclásticos documentados histórica y prehistóricamente. La extensión de R1 hacia el oeste hasta los 600 m s.n.m. parece correcta con base en lo observado desde 1968 hasta el presente respecto a flujos piroclásticos y lavas. Hacia el noroeste, la zona R1 es más extensa debido a que ha primado un criterio de precaución en áreas de alta vulnerabilidad, debido al desarrollo turístico, la carretera principal, y a la proclividad de la zona a desarrollarse. La zona R1 podría ser ampliada hasta incorporar las áreas R2 y R4, y parte de R3, en caso de que los escenarios eruptivos cambien. Por ejemplo el citado crecimiento del cono C hacia el lado oriental, o bien, ante la posibilidad de que ocurran deslizamientos importantes y consecuentes flujos piroclásticos en las paredes superiores del cono C, del lado occidental o norte. La zona R2 se encuentra dentro del área de alta peligrosidad, pero en sus partes más distales, de modo que sus límites actuales se consideran convenientes, y podrían estar sujetos a convertirse en R1. La zona R3, en vista de que partes importantes se encuentran dentro de las áreas de alta y mediana peligrosidad, sus límites se consideran convenientes. Además, en el mapa de peligrosidad a largo plazo (Fig. 10), queda dentro de los límites de alta y mediana peligrosidad por una serie de posibles eventos futuros, por lo que debería primar el criterio de no promover su desarrollo, mantener sus límites, y eventualmente reconsiderar que algunas partes podrían ser incorporadas a la zona R1.

El sector este de R4 se encuentra en parte dentro de la zona de alta peligrosidad y por entero dentro de la zona de mediana peligrosidad, en particular sujeto al bombardeo piroclástico, proclive a ser transitado por lahares, lavas y flujos piroclásticos distales a corto plazo, así como por varios eventos de alta peligrosidad a largo plazo. Dependiendo de la escalada en la presente erupción, podría incluso ser considerado como R1, o al menos como R2, por lo que debería mantenerse el criterio de sus límites. El sector noroeste de R4 tiene ciertas protecciones topográficas que lo han convertido en una zona relativamente poco afectada. Sin embargo, partes se consideran dentro de las zonas de alta y mediana peligrosidad a corto plazo y afectable por varios eventos de alta peligrosidad a largo plazo, por lo que se considera que también podría variar a R1 ó R2 y por lo tanto, conservar sus límites.

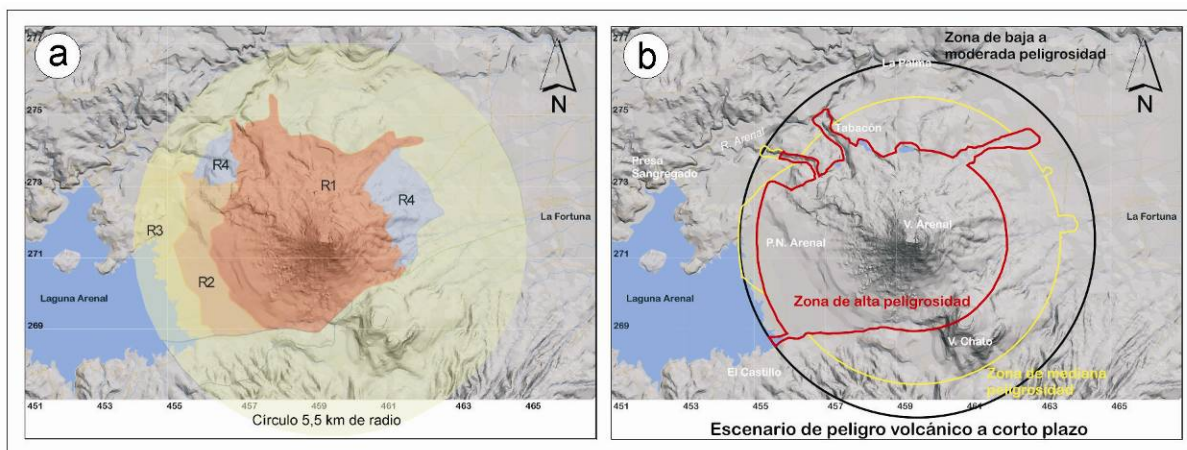


Figura 11. Comparación entre el mapa de restricción de uso del suelo en el área de Arenal según la reglamentación de la CNE (a), con el escenario de peligros volcánicos a corto plazo (b).

Los 5,5 km de radio de restricción primaria fueron establecidos considerando que las lavas y flujos piroclásticos generados por el volcán, han alcanzado hasta 4,5 km de distancia radial desde el cráter D y le han sumado 1 km como factor de seguridad. Los estudios globales de crisis volcánicas [25] contemplan 5 km como el radio de las áreas sujetas a la influencia de eventos moderados, aunado a que en efecto, en el Arenal, casi todos los eventos volcánicos proximales no han alcanzado más allá de los 4,5 km, excepto los impactos por el bombardeo balístico de bajo ángulo y flujos tipo *blast*. De hecho, el escenario de peligros volcánicos a corto plazo (Fig. 8), que contempla este ciclo eruptivo desde 1968 con excepción de la fase inicial, propone los subescenarios de alta y mediana peligrosidad, en su mayoría dentro de un radio de 4,5 km, y de baja a moderada peligrosidad, con un radio de 5 km. Por todo esto, se considera que el radio de 5,5 km parece justificado y en apego del principio de “restricciones mínimas”.

Medidas preventivas: Rotulación y folletos informativos

En la reglamentación publicada se establecía “demarcar nuevamente con rótulos en varios idiomas (al menos inglés/español) que indiquen los límites máximos de acercamiento recomendados”, mas no fue sino como corolario a los estudios de peligro volcánico, que se produjo un total de 19 rótulos informativos en español e inglés (Fig. 12), el primer semestre del 2005. La mayoría llevan mensajes breves como “Zona de alto riesgo volcánico. No pasar”, y con un detalle prolijo sobre el volcán en las entradas del Área de Conservación Arenal.

Por otra parte, posterior a la publicación de la reglamentación, se produjo una versión de mano del mapa de restricciones, con una hoja explicativa [26], así como publicaciones informativas [12, 36]. Con la confección de los mapas de peligro volcánico, se planeó la edición de un folleto informativo (un desplegable de mano con ocho carillas) dirigido al sector turístico y pobladores de los alrededores del Arenal, el cual fue publicado en el primer semestre del 2005 (Fig. 12) en versiones en español (“El volcán Arenal: Historia y peligros”) y en inglés (“Arenal Volcano: History and Hazards”).

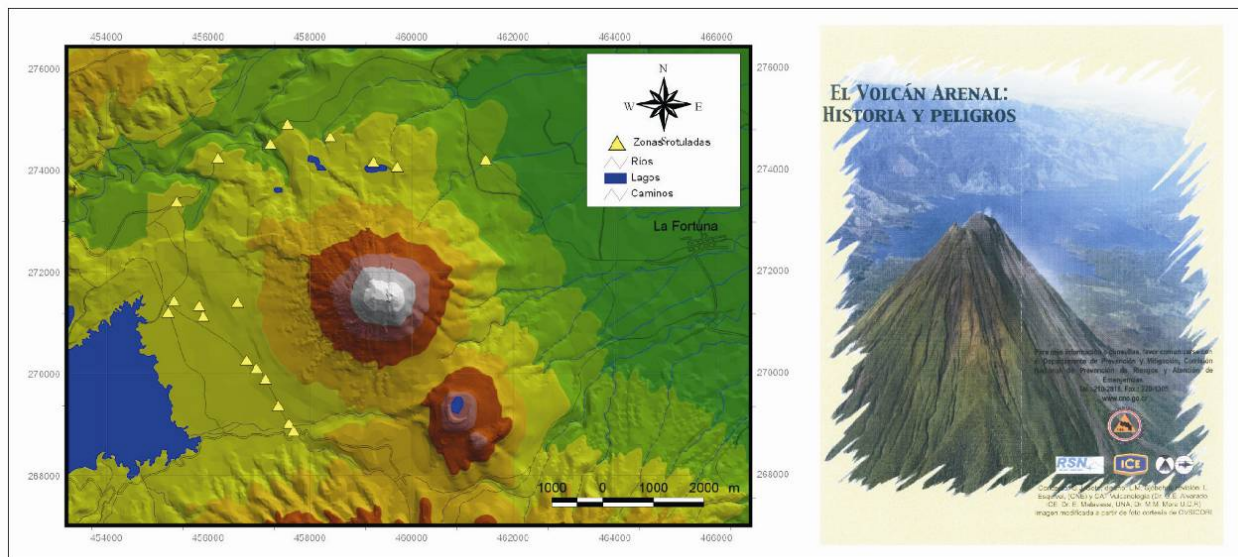


Figura 12. Medidas tomadas con base en la evaluación de peligros volcánicos en el Arenal. A la izquierda, los sitios en donde se instalaron rótulos preventivos (triángulos). A la derecha, el folleto informativo y divulgativo, en su versión en español.

Los corredores viales y las rutas de escape en el Arenal

Los eventos volcánicos pueden tener efectos directos e indirectos en los corredores viales alrededor del volcán Arenal. Los directos implican los daños materiales a la infraestructura vial (pavimentos, terraplenes, alcantarillas, puentes, Cuadro 2); los indirectos, la suspensión del servicio de transporte público y de turismo, a causa de la reducción de la visibilidad, contaminación del aire, y otros.

Cuadro 2. Posibles efectos directos de los eventos volcánicos sobre la infraestructura vial en el Arenal

Tipo de evento	Componentes	Efectos
Caída de piroclastos y bombardeo balístico	Caminos, puentes	Recubrimiento de ceniza, baja visibilidad, destrucción por impacto
Flujos piroclásticos	Estructuras de drenaje, terraplenes, pavimentos, caminos, puentes	Obstrucción de desagües; erosión de terraplenes; derretimiento de asfalto; obstrucción o destrucción de caminos y puentes
Lahares	Estructuras de drenaje, puentes, terraplenes, pavimentos	Destrucción y arrastre, inundación; falla estructural, obstrucción y destrucción de puentes
Lavas	Caminos, pavimentos, puentes	Obstrucción de caminos, fusión del asfalto, destrucción de puentes
Deslizamientos y avalanchas volcánicas	Caminos, puentes	Obstrucción de caminos, destrucción de puentes
Sismos volcánicos	Caminos, terraplenes, puentes	Fallas en la base de caminos por deslizamiento, obstrucción y destrucción de puentes

Con base en el mapa de peligros, escenario de corto plazo, se considera que las áreas más expuestas en donde pueden ocurrir daños a la red vial son: 1) Quebrada Guillermina, 2) Río Tabacón, 3) entre el cruce al volcán y el río Aguacaliente, y 4) río Aguacaliente (Fig. 13, puntos 1 a 4). Dependiendo de las diferentes posibilidades de áreas afectadas, se pueden utilizar diferentes rutas de escape, que a su vez podrían verse obstaculizadas por caída de cenizas, o por condiciones meteorológicas adversas que converjan en ese momento.

Las rutas de escape serían hacia La Fortuna (punto 5, Fig. 13), hacia Sangregado (6), hacia La Palma y las fincas al norte (7), hasta la margen derecha del río Arenal (8), a pesar de que no hay puente, desde el Parque Nacional hacia el cruce (9), o bien hacia el oeste, en el camino viejo hacia Sangregado (10), hacia El Castillo (11), hacia el este desde Jilguero, en el lado suroeste del Chato (12), hacia las vecindades de la catarata del río Fortuna, en el flanco sureste del Chato (13), donde existían senderos que se han perdido por la proliferación de charral, pero podrían utilizarse en casos de emergencia. Si hubiera una obstrucción en dos puntos entre la casetilla de entrada al Parque Nacional y el río Aguacaliente, la gente que quede atrapada en el medio, solo podría ser evacuada vía lacustre (14), lo cual es difícil y peligroso, pues el terreno entre el camino y el lago es acharralado y pantanoso. La opción final es vía helicóptero (15), que se podría ver dificultado por ceniza y lluvia, o ambas. Este hipotético escenario justifica adicionalmente la conservación de las áreas R2 y R3 con sus restricciones actuales. Una última ruta de salida es a través del río Caño Negro hacia Tilarán, pero no existe puente sobre él.

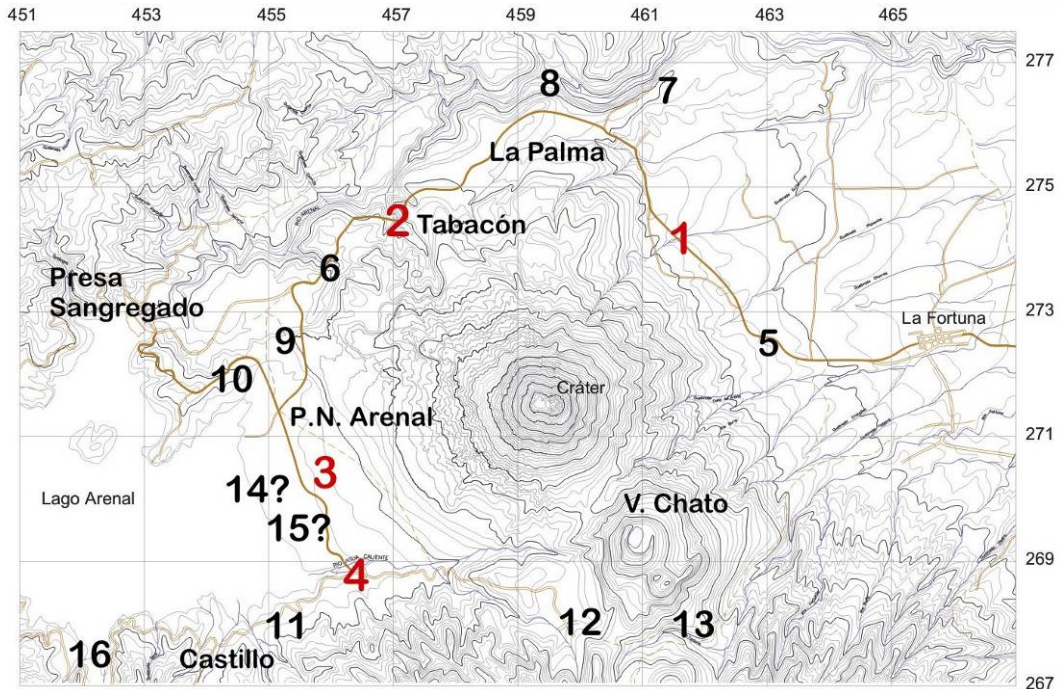


Figura 13. Áreas susceptibles de sufrir obstrucción durante eventos volcánicos severos en el Arenal (1-4) y rutas de escape opcionales (5-16). Números explicados en el texto.

CONCLUSIONES

- Las erupciones del volcán Arenal, a lo largo de 7 milenios, han variado dentro de un amplio espectro, desde efusiones lávicas sostenidas por años a erupciones explosivas, ya sea de corta duración y poco volumen eruptado, hasta muy explosivas (plinianas), con columnas de piroclastos que han alcanzado las capas medias de la estratosfera. En los últimos 3200 años, han ocurrido 4 erupciones plinianas de manera cíclica, cada 750-1080 años.
- La geología y la historia volcánica del Arenal, han permitido pormenorizar los peligros volcánicos a los que se enfrenta el entorno geográfico, en el cual la población bajo riesgo alcanza casi 12 000 personas (autóctonos y foráneos transitorios).
- Se han construido mapas de peligro volcánico de manera inductiva, partiendo de mapas geológicos, la información de la historia del volcán y del estudio de la distribución y espesor de las tefras eruptadas en el pasado.
- La identificación de los peligros ha permitido crear una serie de mapas temáticos para cada peligro por separado, y con su combinación se han establecido dos escenarios básicos en el Arenal.
- El escenario de corto plazo tiene semejanzas con el escenario de la erupción de 1968 al presente. Comprende las zonas de “alta” (~32 km²), “mediana” (~24 km² adicionales) y “baja a moderada” peligrosidad (otros ~23 km²). Los eventos más peligrosos son los flujos piroclásticos por colapso de pared del cráter y evacuación del lago de lava.
- El escenario de largo plazo contempla los eventos mayores: erupciones vulcanianas con explosiones dirigidas, estrombolianas fuertes y plinianas. El mapa combinado resultante incluye las zonas de “alta” y “mediana” peligrosidad. Los eventos más peligrosos serían los flujos piroclásticos y la intensa caída de piroclastos, incluidos los balísticos. Este escenario implica un periodo de reposo posterior al final del presente ciclo eruptivo y el inicio de una nueva erupción. La próxima gran

erupción pliniana se daría cerca de 2100-2200 E.C., aunque un lapso ≥ 50 años para la siguiente erupción de “largo plazo” (verbigracia vulcaniana, ≥ 2050 E.C.), podría ser una aproximación valedera para tener en cuenta en la planificación del uso del suelo en el Arenal.

- Las zonas del mapa con escenario a corto plazo coinciden con las zonas de restricción de uso del suelo: alta peligrosidad con las áreas de mayor restricción de actividades y uso en los alrededores del volcán (zonas R1 y R2), la mediana peligrosidad con las medianamente restrictivas (R3 y R4) y la baja a moderada peligrosidad con el círculo restrictivo de 5,5 km de radio alrededor del cráter de la cima. El escenario a largo plazo corrobora las restricciones a las áreas delimitadas, para evitar su desarrollo y mitigar los efectos desastrosos de erupciones futuras. Este último mapa debería servir como base para la planificación territorial durante el siguiente medio siglo, y por tanto es posible establecer una tripleta ordenada [mapa de peligros volcánicos, planificación de uso del suelo, mitigación del desastre volcánico], como paso inicial del proceso de gestión integrada del riesgo.
- Luego del proceso de evaluación de la amenaza, deben seguir los procesos de cuantificación de la vulnerabilidad y la definición de medidas de retención y/o transferencia del riesgo. La sola producción de los mapas de peligros volcánicos es apenas un paso en el proceso de gestión del riesgo, que además deben incluir protocolos para la atención de emergencias y desastres, con base en los escenarios planteados.
- Como medidas con fines preventivos, se identificaron 19 sitios donde se instalaron rótulos de información preventiva, y se editó un folleto informativo en dos idiomas.
- Con base en la información de los mapas de peligros se identificaron 4 sectores en los corredores viales alrededor del Arenal, susceptibles de sufrir efectos primarios por los eventos volcánicos. Se han analizado los posibles daños y las rutas de escape en caso de contingencia.

AGRADECIMIENTOS

La Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) financió el proceso de confección de los mapas de peligros volcánicos en el año 2004. Las sugerencias y comentarios de Sergio Mora (BID, Bolivia) han sido muy constructivos para mejorar este trabajo. Se agradece la revisión de Elena Badilla (UCR), el trabajo de Oscar Lucke para la Fig. 2, y a las siguientes personas por su permiso para usar fotografías: Allan López (Fig. 1), Luis Madrigal (Fig. 5.1), Fernando Alvarado (Fig. 5.7) y Ólger Aragón (Fig. 5.8).

REFERENCIAS

1. Alvarado, G.E., (2003), “Diagnóstico de la estabilidad del cono y comportamiento de la fundación debido al crecimiento del edificio volcánico del Arenal (Costa Rica)”, *Tesis de Maestría en Geología*, Universidad de Costa Rica, xv + 138 pp.
2. Alvarado, G.E. & Arroyo, I., (2000), “Los flujos piroclásticos del volcán Arenal (Costa Rica) entre 1975 y 2000: Origen, frecuencia, distribución y peligro asociado”, *Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles*, 12(23-24), 39-53.
3. Alvarado, G.E. & Soto, G.J., (2002), “Pyroclastic flow generated by crater-wall collapse and outpouring of the lava pool of Arenal Volcano, Costa Rica”, *Bulletin of Volcanology*, 63, 557-568.
4. Alvarado, G.E., Matumoto, T., Borgia, A. & Barquero, R., (1988), “Síntesis geovulcanológica del volcán Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988)”, *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 1(1), 1-55.
5. Alvarado, G.E., Soto, G.J., Ghigliotti, M. & Frullani, A., (1997), “Peligro volcánico del Arenal”, *Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles*, 8(15-16), 62-82.

6. Alvarado, G.E., Soto, G.J., Schmincke, H.-U., Bolge, L.L. & Sumita, M., (remitido), “The 1968 andesitic lateral blast eruption at Arenal volcano, Costa Rica”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
7. Barquero, R., Alvarado, G.E. & Matumoto, T., (1992), “Arenal Volcano (Costa Rica) Premonitory Seismicity”, *En: Gasparini, P., Scarpa, R. & Aki, K. (Eds): Volcanic Seismology. IAVCEI Proceedings in Volcanology*, 3, 84-96, Springer-Verlag, Berlín.
8. Borgia, A. & Linneman, S.R., (1990), “On the Mechanisms of Lava Flow Emplacement and Volcano Growth: Arenal, Costa Rica”, *En: Fink, J.H. (Ed.): Lava Flows and Domes. Emplacement Mechanisms and Hazard Implications. IAVCEI Proceedings in Volcanology* 2, 208-243, Springer-Verlag, Berlín.
9. Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G. & Alvarado, G.E., (1988), “Structural, stratigraphic, and petrologic aspects of the Arenal-Chato volcanic system, Costa Rica: Evolution of a young stratovolcanic complex”, *Bulletin of Volcanology*, 50, 86-105.
10. Chaves, R. & Sáenz, R., (1970), “Efectos de las erupciones recientes del volcán Arenal, Costa Rica”, *Informe Semestral Enero-Junio*, Instituto Geográfico Nacional, San José, 17-24.
11. Darteville, S., Rose, W.I., Stix, J., Kelfoun, K. & Vallance, J.W., (2004), “Numerical modeling of geophysical granular flows: 2. Computer simulations of plinian clouds and pyroclastic flows and surges”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5, Q08004, doi:10.1029/2003GC000637.
12. Esquivel, L., (2004), “Restricción del uso de la tierra en áreas bajo amenaza volcánica: el caso del Arenal”, *En: Soto, G.J. & Alvarado, G.E. (Eds.), 2004: La Vulcanología y su entorno geoambiental, Revista Geológica de América Central*, Número especial, 30, 203-211.
13. Fudali, R. & Melson, W.G., (1972), “Ejecta velocities, magma chamber pressure, and kinetic energy associated with the 1968 eruption of Arenal Volcano”, *Bulletin Volcanologique*, 35(2), 383-401.
14. Geotermica Italiana-ICE, (1992), “Evaluación del riesgo y monitoreo del volcán Arenal”, *Informe final*, 40 pp. + 39 figs. + anexos.
15. Ghigliotti, M., Frullani, A., Alvarado, G.E. & Soto, G.J., (1992), “Distribución areal y características de los depósitos de tefra más recientes (1080-1968 dC) del Volcán Arenal”, *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 4(8), 11-33.
16. Ghigliotti, M., Frullani, A., Soto, G.J. & Alvarado, G.E., (1993), “Tefroestratigrafía, historia y ciclos eruptivos del volcán Arenal”, *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 5(9-10), 52-96.
17. Hidalgo, A., (1997), “Evaluación sobre la eventual generación de una gran ola (seiche) en el Embalse de Arenal, debido a la entrada de un flujo de detritos volcánicos”, *Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles*, 8(15-16), 46-56.
18. Kerle, N., (1996), “An economic evaluation and human perspective for a moderate volcanic eruption at Arenal”, *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 6(11-12), 53-70.
19. Malavassi, E., (1979), “Geology and Petrology of Arenal Volcano, Costa Rica”, *Tesis de Maestría*, University of Hawaii, 111 pp.
20. Melson, W.G., (1982), “Alternation between acidic and basic magma in major explosive eruptions of Arenal volcano, Costa Rica”, *Boletín de Vulcanología*, UNA, Costa Rica, 14, 65-74.
21. Melson, W.G. & Sáenz, R., (1968), “The 1968 Eruption of Volcán Arenal, Costa Rica”, (*traducción española*) *Revista Geográfica de América Central*, 5-6, 55-148 (1977).
22. Minakami, T., Utibori, S. & Hiraga, S., (1969), “The 1968 Eruption of Volcano Arenal, Costa Rica”, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Tokio, 47, 783-802.
23. Neri, A., (2004), “The 25th IUGG International Meeting on Mathematical Geophysics, Frontiers in Theoretical Earth Sciences, Columbia University, New York City, June 16-18, 2004”, *IAVCEI News*, 2004(2), 10.
24. Newhall, C.G. & Self, S., (1982), “The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism”, *Journal of Geophysical Research*, 87(C2), 1231-1238.
25. Newhall, C.G. & Hoblitt, R.P., (2002), “Constructing event trees for volcanic crises”, *Bulletin of Volcanology*, 64, 3-20.

26. OVSICORI, (s.f.), “Mapa de restricciones al uso del suelo y libre tránsito de personas, Volcán Arenal, Costa Rica”. 1 hoja escala 1:35 000, 1 hoja explicativa desplegable.
27. Renschler, C.S., (2005), “Scales and uncertainties in using models and GIS for volcano hazard prediction”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 73-87.
28. Sáenz, R., (1977), “Erupción del volcán Arenal en el año 1968”, *Revista Geográfica de América Central*, 5-6, 149-188
29. Saucedo, R., Macías, J.L. & Bursik, M., (2004), “Pyroclastic flow deposits of the 1991 eruption of Volcán de Colima, Mexico”, *Bulletin of Volcanology*, 66(4), 291-306.
30. Simmons, J., Elsworth, D. & Voight, B., (2004), “Instability of exogenous lava lobes during intense rainfall”, *Bulletin of Volcanology*, 66(8), 725-734.
31. Soto, G.J. & Arias, J.F., (1998), “Síntesis de la actividad del volcán Arenal, año 1996”, *Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles*, 9(17-18), 11-18.
32. Soto, G.J. & Taylor, W., (2003), “Los flujos piroclásticos del volcán Arenal (5 de setiembre del 2003), y su influencia sobre las obras del ICE”, *Informe interno ICE*, Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, 8 pp.
33. Soto, G.J. & Alvarado, G.E., (remitido), “Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
34. Soto, G.J., Arias, F., Alvarado, G.E., Madrigal, L.A. & Barquero, R., (1996), “Resumen de la actividad del Volcán Arenal durante 1993. Summary of Arenal's volcanic activity during 1993”, *Boletín Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 6(11-12), 5-22.
35. Soto, G.J., Alvarado, G.E. & Ghigliotti, M., (1998), “El registro eruptivo del Arenal en el lapso 3000 - 7000 años antes del presente y nuevas deducciones sobre la edad del volcán”, *Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles*, 9(17-18), 19-49.
36. Van der Laat, R., (2003), “Zonas de restricción y planificación del territorio en áreas volcánicas”, *Ingenieros y Arquitectos*, 50(206), 8-9.
37. Vargas, J., (2003), “Crecimiento y desarrollo de la infraestructura turística de La Fortuna de San Carlos, Alajuela, 1972-2002”, *Reflexiones*, 82(1), 99-110.
38. Vargas, G., Cortés, V. & Zúñiga, W., (1993), “Evolución de la dinámica vegetal entre 1985 y 1993 sobre las lavas recientes (1968-92) y flujos piroclásticos (1968) del volcán Arenal”, *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 5(9-10), 31-51.
39. Williams-Jones, G., Stix, J., Heiligmann, M., Barquero, J., Fernández, E. & González, E.D., (2001), “A model of degassing and seismicity at Arenal Volcano, Costa Rica”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108, 121-139.
40. Yokoyama, I., Tilling, R.I. & Scarpa, R., (1984), “International Mobile Early-Warning Systems for Volcanic Eruptions and Related Seismic Activities”, *UNESCO*, París, 102 pp.
41. Zapata, M.I. & Soto, G.J., (1991), “Lahares antiguos y recientes en el Volcán Arenal, Costa Rica”, *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 3(5), 4-28.
42. Zimmer, M.M., Fischer, T.P., Hilton, D.R., Alvarado, G.E., Sharp, Z.D. & Walter, J.A., (2004), “Nitrogen systematics and gas fluxes of subduction zones: Insights from Costa Rica arc volatiles”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5, Q05J11, doi:10.1029/2003GC000651.
43. Zobin, V.M., (2001), “Seismic hazard of volcanic activity”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 112, 1-14.