

9. PELIGROSIDAD DEL ARENAL Y RIESGOS PARA LA PRESA

En los párrafos siguientes y en los Mapas A y B (Reconstrucción de la probable erupción futura y Peligrosidad Volcanica) anexos, se reportan los diferentes tipos de fenómenos que han ocurrido en el curso de la historia eruptiva pasada del Arenal y que podrían esperarse en el caso de una reactivación explosiva futura.

En detalle, el mapa A (Reconstrucción de la probable erupción futura del Arenal) sintetiza los máximos efectos observados en el campo, relativos a diferentes erupciones del volcán. El escenario de los fenómenos reportados, siendo el más peligroso y completo posible, ha sido convencionalmente identificado con un evento de tipo ET-2.

En el Mapa B (Peligrosidad del Arenal), que deriva del A, el volcán Arenal ha sido distinguido en cuatro sectores (de A a D), a nivel de peligrosidad decreciente.

Activación de bocas eruptivas laterales

La activación de bocas eruptivas laterales, ubicadas fuera del área sumital del volcán, tiene una alta probabilidad de ocurrencia. Existen evidencias geológicas de bocas periféricas del volcán (cráteres A y E del Mapa A) y que el conducto central no ha representado la única vía de ascenso del magma. Ambos cráteres se han abierto en áreas con ninguna o poca cobertura de lavas, a lo largo de la intersección de posibles áreas de debilidad y una antigua estructura de colapso. El flanco norte-occidental del Arenal (Qda. Tabacon) parece ser el más expuesto a la ocurrencia de un nuevo cráter lateral.

Formación de una avalancha de escombros

La formación de una avalancha de escombros constituye un punto de gran relevancia, debido a que la capacidad destructiva de estos fenómenos es extremadamente alta.

En el caso del Arenal no ha sido posible evaluar este nivel de amenaza. En efecto la formación de una avalancha de escombros es un fenómeno frecuente en una fase madura de la "vida" de un volcán. El Arenal, siendo todavía un volcán "joven", no ha producido depósitos en su historia eruptiva pasada que puedan ser asociados a un evento de avalancha de escombros ("debris avalanche").

Aparte de las razones de carga, el deslizamiento en masa se encuentra también ligado a situaciones estructurales contingentes, no fácilmente previsible, tales como: ocurrencia de un conducto cerrado, presencia de arcilla interestratificada, fracturación tectónica de la masa de roca, grado de saturación de agua y gradiente del desnivel altimétrico. Además, estos fenómenos pueden ser activados por terremotos, tal como ocurrió en 1987, en El Reventador de Ecuador (Aguilera et.al, 1988; Siebert, 1984)

Por otro lado es importante notar que el cono occidental se presenta hoydía bastante empinado y con un exceso de carga central. Por lo tanto la posibilidad que se genere una avalancha de bloques del tipo "lava collapse flow" a partir de cualquier sector del cono en ocasión de un sismo es real. Un evento de avalancha de detritos en estas circunstancias afectaría el flanco oeste del volcán, entrando a la laguna y podría ocasionar una ola de gran dimensión.

El monitoreo sísmico y inclinométrico continuo del Arenal, asociado a campañas periódicas de control topográfico permitirían detectar los indicios precursores, (crisis sísmicas, deformaciones del cono) normalmente asociados a esta clase de fenómenos.

Coladas lávicas

La emisión tranquila de masas de roca fundida origina la formación de coladas de lava de alta viscosidad, que se desplazan hacia los valles. La formación de coladas de lava, han sido frecuentes en la actividad de edificación del cono y, en general, es probable que las fases

efusivas hayan caracterizados la parte final posterior de algunas erupciones explosivas, como ocurrió en el caso de las lavas A1 y A2.

Las futuras emisiones de lava tendrían que salir del actual cráter C, alimentando flujos de lava a lo largo de los flancos occidentales del volcán o, eventualmente de nuevas bocas laterales en las faldas del aparato. La elevada viscosidad de estas lavas andesíticas limita enormemente sus capacidad de flujo. (Ver, en el mapa geológico de la fig. 5, el limitado movimiento del flujo lávico A11)

Desde el punto de vista de los riesgos, la formación de coladas lávicas no representa ninguna amenaza para la presa y tampoco para las personas que viven cerca de la presa (ver Mapa A). Localmente pueden originarse incendios forestales.

El derrumbe gravitacional de frentes de colada de las partes altas, sería de poco volumen y llegaría a afectar áreas locales sobre los 600 m en el flanco oeste. De esta manera, existe un riesgo potencial para los turistas que visitan esta área.

Caída de proyectiles balísticos y lluvia de cenizas y lapilli (air fall)

Durante las erupciones explosivas, la violenta expulsión de bloques de roca sólida (juveniles o accidentales) origina alrededor de la boca eruptiva, la caída de una lluvia de proyectiles cuya velocidad y energía puede ser extremadamente alta. Los fragmentos expulsados se mueven en forma pasiva a lo largo de parábolas balísticas.

En las erupciones explosivas de tipo pliniano, en las que ocurre la formación de una columna sostenida de gases y partículas, los bloques incluidos en el chorro ("volcanic jet") están menos dispersos y siguen preferentemente un movimiento subvertical. Al disminuir la velocidad, con la altura, los bloques pueden seguir dos rutas distintas: precipitarse inmediatamente hacia abajo, siguiendo trayectorias balísticas; o elevarse a una mayor altura, dentro de una eventual porción convectiva de la columna. Por lo tanto, para los fragmentos de dimensiones centimétricas, la caída puede ocurrir desde alturas muy grandes.

La caída de los bloques de mayor tamaño puede originar cráteres de impacto de dimensiones métricas, con evidentes implicaciones de riesgo para la vida humana y las construcciones. De cualquier forma, el área expuesta al riesgo de caída de bloques se encuentra circunscrita a las partes medio-altas del cono volcánico.

En cambio, los fragmentos pluricentimétricos elevados por la columna convectiva pliniana y eventualmente desplazados por el viento lejos de la boca eruptiva, pueden alcanzar una dispersión mucho más grande. La caída de fragmentos densos desde alturas superiores a 10 Km pondría en serio peligro a la seguridad de las personas que puedan ser eventualmente sorprendidas al descubierto.

Aparte de los fragmentos densos y de grandes dimensiones, las erupciones explosivas arrojan a la atmósfera enormes volúmenes de gases, partículas finas y fragmentos juveniles muy vesciculados y ligeros (pómez). A excepción de los gases, que entran a formar parte de la atmósfera, todas las partículas sólidas están sujetas a una caída más o menos rápida hacia el suelo que, frecuentemente, origina densas lluvias de cenizas y lapilli sobre áreas muy extensas.

En el momento del impacto con el suelo, las partículas finas y de pequeñas dimensiones se hallan completamente enfriadas por acción de su desplazamiento aéreo. En cambio, esto no resulta siempre válido para los fragmentos de mayores dimensiones que, especialmente en sus partes internas, pueden conservar una elevada temperatura. Comúnmente los pedazos de pómez de un tamaño igual o superior a 20 cm caen todavía incandescentes y pueden provocar incendios.

ICE

Evaluación del Riesgo y Monitoreo del Volcán Arenal
Orden de Trabajo 92-05 - INFORME FINAL

La caída de las partículas forma sobre el suelo, las acumulaciones estratiformes que recubren a la superficie terrestre (tefra). En condiciones de ausencia de viento, la forma del área recubierta por la caída de estos materiales tiende a ser circular alrededor de la boca de emisión; en presencia de viento, el área de caída asume una forma elíptica con los máximos espesores ubicados sobre el eje mayor de la elipse. La zona de máxima acumulación se encuentra generalmente ubicada muy cerca de la boca del volcán; sin embargo, en condiciones de viento fuerte puede también desplazarse a varios kilómetros del cráter.

Muy escasos son los datos meteorológicos relativos a los vientos en esta región. Los disponibles, que se refieren al Valle Central (aeropuerto Santa María), han sido extrapolados al Arenal. A alturas entre 20.7-24 km (alturas de columna de ET-5 y ET-2) en épocas lluviosas, las velocidades promedio son bajas, pero en época seca son más de 36 km/h (sin incluir rafagas). En el área del Arenal la componente del viento desde el este, para alturas mayores de 7 Km, es dominante todo el año. De todo modo parece que, las componentes de viento del oeste no han sido importantes, salvo para la dispersión anómala de ET-5A.

Como se puede ver en el Mapa A anexo, la presa de Sangregado se encuentra afuera de la zona de caída de los fragmentos balísticos y no sería afectada seriamente en el caso de una caída pluri-decimétrica de pomez, escorias y ceniza (los espesores máximos esperados en el caso de un evento tipo ET-2 serían de aprox. 1m).

El embalse del Arenal podría sufrir un parcial y modesto rellenamiento (algunos decímetros) debido a la acumulación de piroclastos de caída en el lago.

Flujos piroclásticos

Los flujos y las oleadas piroclásticas son masas turbulentas de alta temperatura, de gases volcánicos con fragmentos sólidos y líquidos, finos y gruesos, que se comportan como un fluido que, debido a su densidad media superior a la del aire, está obligado a desplazarse sobre la superficie terrestre con un movimiento eventualmente acelerado por acción de la gravedad.

Durante su desplazamiento, los flujos y los "surge" piroclásticos tienden a desarrollar una zona inferior, más densa, donde se acumulan los materiales más gruesos y pesados y, una superior, más diluida y enriquecida en gases y materiales finos. La porción inferior, denominada avalancha basal, tiende a ser controlada en su movimiento por la red hidrográfica pre-existente; en cambio, la superior, denominada "ash cloud surge", tiende a expandirse dependiendo sólo en una menor medida del control topográfico.

Los "base surge" (oleadas basales) representan una categoría particular de "surge" que se caracteriza por la ausencia de la avalancha basal y por la presencia de una marcada dispersión radial alrededor de la boca eruptiva. Los "base surge" se producen, probablemente, por explosiones que presentan un exceso de gas en la boca, el que, a su vez, está ligado con fenómenos de interacción del magma con agua freática o superficial. Las coladas y los "surge" piroclásticos se mueven con velocidades generalmente elevadas, frecuentemente del orden de 50-100 km/h, aunque en algunos casos pueden sobrepasar los 250 km/h. Sus temperaturas son generalmente muy elevadas, encontrándose cerca de las magmáticas, tal como se desprende del hallazgo de depósitos en los cuales los fragmentos se han soldado entre sí para formar una masa semejante a una lava.

En general, en los estrato-volcanes centrales como el Arenal, el movimiento de los flujos y "surge" piroclásticos se encuentra dominado por una zona de aceleración ubicada en las partes altas y empinadas del cono y por una zona de desaceleración situada en la base del edificio. El punto de inversión de la velocidad indica generalmente el comienzo del proceso de depositación que proseguirá con una razón proporcional a la siguiente desaceleración. En el caso del Arenal, las máximas acumulaciones de los productos piroclásticos de flujo se

ICE

Evaluación del Riesgo y Monitoreo del Volcán Arenal Orden de Trabajo 92-05 - INFORME FINAL

producen en el pie del cono o donde los valles que encauzan el flujo, presentan una sensible atenuación de la pendiente.

Si es que la acumulación de materiales llega a colmar completamente el valle precedente, el exceso se esparce en su alrededor tendiendo a formar amplias planicies. Dada su velocidad, los flujos piroclásticos poseen un momento de inercia que les permite rebasar algunas barreras topográficas.

La temperatura de depositación de los flujos y "surge" piroclásticos es generalmente muy elevada.

Debido a su temperatura, velocidad y momento de inercia, las coladas y "surge" piroclásticos provocan una devastación total de las áreas por ellos afectadas y la muerte de todos los seres vivos. Los riesgos son más elevados a lo largo de los valles por donde se desplaza la masa más consistente y más gruesa del flujo, que es también la zona donde se forman las mayores acumulaciones de productos.

De cualquier forma, la nube menos densa de ceniza y gases de alta temperatura ("ash cloud surge") puede causar, casi siempre, en las personas asfixia y quemaduras de la piel, así como derribar las edificaciones debido a su elevada velocidad. A causa de la rapidez con la que se desarrollan estos fenómenos, es necesario proceder a la evacuación preventiva de las poblaciones ubicadas en las áreas sujetas a ser alcanzadas por ellos.

El análisis del Mapa A indica que todos los flujos piroclásticos, "surges" y nubes ardientes producidos por el Arenal tienden a acumularse inmediatamente en la base del Arenal, lo que confirma su modesta energía (predominante componente gravitacional). El curso del Río Arenal, aguas abajo de la presa, que actuaría como zona preferencial de acumulación de los flujos, raramente ha sido alcanzado por éstos.

La presa de Sangregado se encuentra totalmente afuera de la zona de depositación directa de los flujos piroclásticos. La misma podría ser indirectamente amenazada por los efectos asociados a la ingresión de una parte de los flujos en el embalse. Estos podrían generar olas de agua (de tamaño reducido) en dirección oeste. Los efectos de estas olas sobre la presa tendrían que ser limitados y seguramente indirectos, estando la presa parcialmente protegida por una pequeña península. Adicionalmente, la acumulación de los flujos en la laguna podría originar un relleno local con posible disminución del volumen útil del embalse.

Explosiones laterales ("lateral blast")

Los "lateral blast" representan flujos piroclásticos extremadamente veloces y turbulentos, capaces de esparcir los materiales que transportan sobre áreas extremadamente grandes. En la zona próxima al centro de emisión, el flujo está dominado por un movimiento radial al que le afecta poco o nada, el relieve topográfico. A distancias mayores la desaceleración del flujo está acompañada por una creciente influencia de la topografía que tiende a controlar su desplazamiento. Cerca del centro de emisión, la fuerza propulsora se deriva fundamentalmente de un impulso direccional inicial combinado con un exceso de presión interna que tiende a producir, en la nube, una fuerte expansión y abertura en abanico.

La velocidad de la parte proximal del "lateral blast" del St. Helens (1980) fué estimada en más de 600 km/h; a mayores distancias la velocidad disminuía progresivamente hasta llegar a unos 100 km/h, en las zonas más distales ubicadas a más de 20 km del cráter (Blong, 1984). El ejemplo más elocuente de los potenciales efectos destructivos de estos fenómenos constituye la erupción del Mont Peleé en la Isla Martinica (Antillas), en la que perecieron todos los habitantes de la ciudad de St. Pierre (30000 personas). Para esta erupción se ha estimado, sobre la misma ciudad, temperaturas de 700-1000 °C y una velocidad de 150 km/h.

En el caso del Arenal, el evento ET-1 de 1968 ha producido una explosión lateral ("lateral blast") que ha causado la mayoría de los muertos de Pueblo Nuevo. Desafortunadamente, no es fácil obtener una estimación confiable del área que fue afectada por la explosión lateral debido al espesor relativamente delgado que presentan los depósitos y su escasa aptitud para conservarse. Basándose en el trabajo de Melson y Saéñz (1973) se hipotiza que la zona afectada para la explosión lateral fue principalmente el flanco oeste de volcán, seguida por flujos piroclásticos, muchos de ellos canalizados hacia la zona de Tabacon y las faldas occidentales del volcán.

La Presa de Sangregado está totalmente protegida de este tipo de fenómeno. Los espesores asociados (unos centímetros de arena) no afectarían el embalse del Arenal. Al contrario, todos los seres humanos presentes en el abanico de dispersión del depósito serían afectados de manera mortal.

Flujos de lodo o lahares

Un lahar (flujo de lodo) es una masa de lodo y detritos volcánicos que se desplaza hacia los valles, por acción de la gravedad. Durante su desplazamiento, el lahar tiene la apariencia de un flujo de cemento líquido que, debido a su fluidez, alcanza rápidamente los canales o los valles de la red hidrográfica.

La posibilidad que tiene un volcán de generar lahares se encuentra ligada a la existencia de dos condiciones:

- 1) una elevada disponibilidad de material no cohesivo, fácilmente removible por el agua;
- 2) la presencia de una masa de agua suficiente para iniciar el fenómeno.

En general, la primera condición se ve fuertemente favorecida durante o inmediatamente después de una erupción explosiva, cuando grandes volúmenes de materiales piroclásticos sueltos se acumulan, de improviso, sobre las laderas empinadas del volcán. La disponibilidad de grandes cantidades de agua es generalmente común en los países tropicales caracterizados por la ocurrencia de elevadas e intensas precipitaciones.

Una vez formados los lahares, pueden viajar a lo largo de distancias muy variables, dependiendo del desnivel existente entre la zona de origen y el punto en el que agotan su energía de movimiento.

La velocidad promedio de desplazamiento de una colada de lodo varía en función de la pendiente y de la cantidad de masa en movimiento. De todas formas, la velocidad media en recorridos largos puede variar entre 20 y 40 km/h.

Durante el desplazamiento, los cambios de pendiente influyen sobre las características de velocidad y turbulencia del flujo y, consecuentemente, modifican la capacidad de transportar o depositar los materiales pesados. En general, cada disminución de la pendiente corresponde a una depositación de materiales, mientras cada aumento de la misma provocará una acción erosiva sobre los sedimentos aluviales no cohesivos, eventualmente presentes en el cauce.

Las consecuencias particularmente catastróficas de los lahares se derivan, aparte de su elevado poder destructivo primario, del papel adicional que desempeñan otros dos factores que son: a) la presencia de un elevado porcentaje de asentamientos humanos en las cercanías de los cursos de agua; b) el bajo sentido del peligro habitualmente difundido entre la población que habita en las zonas ubicadas a una gran distancia de los volcanes que, erróneamente, se creen excluidas de la acción de estos fenómenos.

En el caso del Arenal, se han encontrado numerosos depósitos laharíticos acumulados preferentemente a lo largo de los valles o, en la desembocadura de importantes cursos de agua que se originan en el volcán (Ríos Agua Caliente y Calle de Arena).

Actualmente algunos lahares secundarios ocurren en los valles que nacen del viejo aparato del Arenal donde, evidentemente, se han productido las mayores acumulaciones de depósitos piroclásticos.

La ciudad de la Fortuna se encuentra expuesta a estos que se mobilizan a lo largo de la Qda. Calle de Arena.

La presa de Sangregado no está amenazada directamente por este tipo de fenómeno (ver Mapa A). Algunas zonas del embalse, ubicadas cerca de la desembocadura del Río Agua Caliente, podrían ser rellenadas en modo sensible en seguida de la acumulación de lahares de grandes dimensiones procedentes del Arenal.

Movimientos sísmicos

El ascenso de masas magmáticas hacia la superficie produce condiciones de esfuerzos que deforman las rocas hasta la fracturación. Estos fenómenos provocan sismos muy locales que pueden ser particularmente intensos en la fase inmediatamente anterior a la erupción, cuando el volcán todavía se encuentra en condiciones de conducto cerrado.

En forma similar, los fenómenos sísmicos se pueden presentar durante la erupción cuando la rápida expulsión de una masa de magma puede ocasionar súbitos sacudimientos de la estructura volcánica y producir eventuales colapsos de la cámara magmática.

Sin embargo, los fenómenos sísmicos anteriores o contemporáneos a la erupción están generalmente caracterizados por una magnitud más baja respecto a los eventos tectónicos, pero en cambio, presentan profundidades hipocentrales intermedias y superficiales. Como consecuencia de lo anterior, sus efectos en superficie tienden a ser intensos únicamente en la inmediata vecindad del volcán.

En el caso del Arenal, los sismos volcánicos podrían generar dos tipos de peligros:

I) daños directos sobre la presa ubicada cerca del volcán (no cuantificables con base a los datos disponibles, pero de limitada importancia);

II) formación de deslizamientos de materiales detríticos originados en los flancos del Arenal, en zonas estructuralmente inestables o propensas a la formación de lahares, que pero no afectarían a la presa.

Mucho más peligrosos para la presa son los sismos de origen tectónica en vista de su ubicación cercana a fallas neo-tectónicas activas.

Un sismo en la zona del Arenal podría ocasionar daños cuantiosos a la estructura de la presa y, adicionalmente, producir o nueva erupción o cambios repentinos en el tipo de actividad volcánica del Arenal.

Por ejemplo un sismo podría abrir fracturas que ponen en contacto el agua fría de la laguna con el magma en el conducto, generando explosiones freatomagmáticas de gran tamaño. En este caso los dos efectos asociados (debilitación de la presa y erupción freatomagmática con posible colapso del flanco occidental del cono) podrían generar un elevado nivel de peligrosidad para la presa Sangregado.

La evaluación del riesgo sísmico requiere de una serie de estudios especializados que se apartan de los objetivos del presente informe.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios realizados en el ámbito de este Proyecto han permitido reconstruir, con un buen grado de precisión la historia eruptiva del Arenal y, a partir de ésta, seleccionar el tipo de erupción que tiene la máxima probabilidad a presentarse en el futuro.

Mediante una combinación de las observaciones de campo sobre la dispersión de los productos de las erupciones pasadas, en base de asunciones razonables sobre la energía de la erupción, los datos disponibles sobre los vientos dominantes y la morfología del volcán, se han podido identificar las zonas expuestas al peligro. El anexo Mapa de Peligrosidad que resume estos resultados debería servir de base para la planificación de los desarrollos futuros del Arenal.

10.1. La próxima erupción del Arenal, cuándo y de qué tipo

Con base en las consideraciones anteriores se pueden extraer algunas importantes conclusiones:

-el Arenal es un volcán muy joven (menor de 3000 años de vida) cuya actividad ha sido caracterizada por alternancias de fases eruptivas explosivas e efusivas de reducida actividad explosiva.

-Con base en la frecuencia eruptiva pasada han sido definidos dos principales ciclos de erupciones: el "Long Term Period" que reúne los eventos dacíticos ET-2,7,9N y 9 y el "Short Term Period" que considera los tres ciclos ET-2-3-4; ET-7-8M-8B y ET-9B-9A-9N. Sin embargo hay que subrayar que esta ciclicidad no es regular, como está indicado por la presencia de importantes erupciones (ET-5-6) que no pertenecen a ningún ciclo.

-Desde un punto de vista probabilístico el volcán, se encuentra en un estado de potencial reanudación de la actividad explosiva intensa. El análisis de la fig. 38 indicaría que el evento que ha tenido el tiempo de retorno más regular, en el curso de la historia eruptiva del Arenal, han sido los de tipo ET-2. Cada 780 años (edad promedio, con un mínimo de 700 años y un máximo de 850 años), el Arenal ha producido una erupción ácida sub-pliniana (ET-2,ET-7, ET-9N y ET-9).

Con base en la estadística, la probabilidad que el Arenal pueda generar una erupción de tipo ET-2 está aumentando progresivamente. En efecto, considerando el valor promedio de 780 años, cual periodo de retorno, la probabilidad que ocurre un evento tipo ET-2 tendrá que alcanzar un valor igual a uno a partir del 2130 AD. Sin embargo, tomando en cuenta el atraso temporal que parece caracterizar el ciclo "Long Term Period" sería más correcto considerar un tiempo de retorno de 850 años y, por lo tanto hipotizar este evento solamente a partir del año 2200 AD.

-El tiempo de retorno promedio de los ciclos intermedio-básico-acido ("Short Term Period") es de 500-600 años a partir del anterior evento ácido.

Considerando el último evento dacítico (ET-2) del año 1350 AD y un periodo de retorno de 550 años, la reanudación de un eventual nuevo ciclo "Short Term Period" ya está atrasada aprox. 50-100 años.

Estos dos modelos de ciclicidad son sin embargo relativos y es posible que ocurran eventos fuera de ellos, como los pasados en el periodo entre ET-7 y ET-2 (o sea, ET-5 y ET-6).

ICE

Evaluación del Riesgo y Monitoreo del Volcán Arenal

Orden de Trabajo 92-05 - INFORME FINAL

-En los últimos 650 años, el Arenal ha modificado parcialmente su estilo de actividad con una progresiva disminución de las erupciones explosivas fuertes que han sido remplazadas por una actividad de tipo efusivo y estromboliano (los ciclos lávicos A1 y A2).

La velocidad constructiva del volcán, concomitantes a los ciclos efusivos-estrombolianos es muy rápida. Si consideramos el último ciclo lávico A1-estromboliano, iniciado en 1968 AD, a continuación de la erupción ET-1, se nota que en el transcurso de solamente 24 años, el aparato creció mucho y que las lavas A1h y los piroclastos producidos por el cráter C han casi completamente recubierto los flancos occidentales del volcán.

El cráter C, al momento de su abertura, estaba ubicado en las faldas altas del aparato A2h, unos centenares de metros más abajo de la vieja cumbre (cráter D). En dos décadas los productos emitidos por el cráter C han logrado levantar un edificio gemelo que actualmente alcanza casi la misma altura del anterior.

Por lo que se refiere al ciclo efusivo A1 se nota que:

1) actualmente el conducto volcánico está abierto y actúa de manera muy eficiente permitiendo al magma principalmente andesítico (ya bastante viscoso) subir hasta la cumbre del volcán y fluir tranquilamente de el propio cráter.

2) la tasa de alimentación del magma del Arenal es relativamente elevada y constante: episodios efusivos tipo A1 y también A2 pueden completarse en un lapso muy breve. Esto implicaría que, por intervalos de tiempo a veces muy largos, el volcán Arenal, haya permanecido completamente inactivo (situación Pre-1968).

Si las condiciones actuales del volcán (conducto abierto y magma basáltico-andesítico) no cambian, el máximo evento esperado por el Arenal tendría que ser otra erupción efusiva con abertura(s) de nueva(s) boca(s) lateral(es) a lo largo de una de las franjas de debilidad tectónica que cortan el aparato (sectores septentrional y occidental). Una componente explosiva de tipo estromboliano, de moderada intensidad y con eventuales pequeños episodios freatomagmáticos, debidos a la interacción magma-agua en el conducto, podría estar asociada con esta actividad efusiva.

Al terminar la fase eruptiva actual, es difícil predecir cuál será el posible tipo de reactivación explosiva intensa a corto-mediano plazo que podría caracterizar el Arenal. Varias son las hipótesis:

1) En los próximos decenios a siglar el volcán vuelve a una actividad explosiva intensa caracterizada por una erupción de quimismo intermedio (tipo ET-4, 8B ó 9B) seguida por un evento básico (ET-3, 8M ó 9A) y uno final ácido (ET-2, 7 y 9N) según la secuencia indicada por el ciclo "Short Term Period".

2) Ocurre una erupción explosiva fuerte tipo ET-5 ó ET-6, fuera de los ciclos mencionados supra.

3) La hipótesis que el Arenal, terminado el actual ciclo eruptivo (que correspondería a las erupciones básicas-andesíticas), pase directamente a una erupción dacítica tipo ET-2 ó 7 relacionada con el ciclo "Long Term Period" sería poco probable a corto plazo.

La evaluación del nivel de peligrosidad volcánica asociado con actividades explosivas de tipos 1,2 y 3 ha sido reportada en los mapas A y B.

4) El Arenal se reactiva con un evento explosivo menor, tipo ET-1 (1968). Este tipo de evento, caracterizado por un comportamiento imprevisible, podría ocasionarse de cualquier momento en el corto plazo. En la fig. 39 se presenta una reconstrucción esquemática del posible escenario eruptivo asociado con este evento.

ICE

Evaluación del Riesgo y Monitoreo del Volcán Arenal Orden de Trabajo 92-05 - INFORME FINAL

En general los fenómenos vulcánicos, hipotizados en el caso de una reactivación explosiva de tipos 1, 2, 3 y 4 del Arenal, no van a afectar, de manera importante, a la presa de Sangregado que se encuentra fuera del área de máximo peligro del volcán (ver capítulo 9 y los Mapas anexos).

Este cuadro general, en su conjunto bastante favorable, presenta pero las siguientes excepciones que podrían producir cuantiosos daños para la presa:

- 1) el colapso del cono, con asociado "debris avalanche" tipo St.Helens, 1980;
- 2) la ocurrencia concomitante de un sismo regional de origen tectónico que debilite la presa y produzca una fuerte erupción explosiva por la abertura de nuevas fracturas que permitan la interacción entre aguas frías de la laguna-magma.

Estos fenómenos, como ya mencionado en el texto, no pueden ser evaluados con base al nivel de conocimiento actual del volcán y necesitan ulteriores datos que derivan sea de la puesta en marcha de una red de monitoreo sísmico y inclinométrico del Arenal y de trabajos volcanológico-geoquímicos de detalle.

Por lo que se refiere a la vida de los empleados del ICE que trabajan en las infraestructuras del embalse, a los habitantes de la zona y los numerosos turistas, el nivel de peligrosidad varía sensiblemente en función del tipo de escenario eruptivo hipotizado y de la distancia del volcán.

En el Mapa B (Peligrosidad del Arenal), han sido distinguido cuatro sectores (de A a D), a nivel de peligrosidad decreciente. Este mapa, además de presentar los fenómenos que pueden ocurrir en cada sector, analiza las medidas de defensa civil a adoptarse en caso de erupción y proporciona algunas recomendaciones para el correcto desarrollo futuro del área.

RECOMENDACIONES

Los estudios tefroestratigráficos llevados a cabo en el curso de las OT-91/04 y 92/05 han permitido reconstruir finalmente la secuencia eruptiva de los eventos explosivos más importantes del Arenal. Este complejo y esmerado estudio de campo constituye el fundamento de cualquier tipo de investigación (petrológica, magmatológica, etc) sucesiva. Además el cuadro estratigráfico actualizado, evidenciando nuevos problemas específicos, abre la oportunidad para estudios orgánicos de gran detalle.

Sobre la base de la información obtenida en el curso del presente trabajo, se sugieren algunos estudios futuros que sirvan a integrar, con mayor detalle, la frecuencia eruptiva del Arenal, su comportamiento eruptivo en particular por lo que se refiere a las erupciones más antiguas, considerando que el volcán tiene menos de 3000 años de "vida".

Estratigrafía:

Los estudios tefroestratigráficos efectuados han logrado suministrar una nueva columna estratigráfica de referencia del Arenal que va a substituir la vieja de "El Tajo". Algunas incertidumbres relativas a la distribución de los niveles guías inferiores del Arenal (a partir del ET-9N para abajo) podrían ser aclaradas con un breve trabajo de campo.

Otro problema estratigráfico pendiente es el límite inferior del Arenal (convencionalmente atribuido al evento ET-9) que tendría que ser analizado en detalle. En efecto el corte 61 ha evidenciado que por lo menos 6 niveles de tefra (arbitrariamente atribuidos al Chato) están bajo ET-9. Un estudio tefroestratigráfico esmerado de estos niveles inferiores permitiría aclarar si, por debajo de ET-9, existe otro ciclo "Short term period" (característico del Arenal) o no (Chato?).

Adicionalmente, serían útiles más dataciones absolutas para datar los niveles todavía indeterminados.

ICE

Evaluación del Riesgo y Monitoreo del Volcán Arenal Orden de Trabajo 92-05 - INFORME FINAL

Petroquímica y magmatología:

Los modelos de ciclicidad "Short y Long Term" indicados por la estratigrafía tendrían que ser integrados por un estudio analítico completo a efectuarse mediante el estudio petrográfico y el análisis químico (elementos mayores y trazas) de muestras recolectadas en los horizontes guía de ET-7 (incluido) para abajo, en consideración de la nueva estratigrafía.

Adicionalmente, con el objetivo de comprender los mecanismos magmáticos-eruptivos que controlan al volcán (modelo "cerrado" de Borgia et al. 1988 o "abierto" de Reagan et al. 1987) serían útiles los siguientes estudios isotópicos y magmatológicos:

-realizar un muestreo de detalle de las secuencias eruptivas ET-2 y un muestro complementario de las lavas A2;

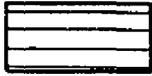
-efectuar, en 10-15 muestras seleccionadas, los análisis isotópico del $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ para comprobar la "consanguinidad" de los magmas eruptados en el curso del último ciclo de Borgia et al, 1988 (ET-2, A2,A1).

La evaluación del riesgo de un volcán es posible a través de un esfuerzo conjunto entre diferentes disciplinas como vulcanología, geoquímica y geofísica.

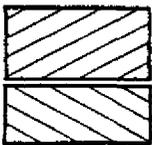
Por lo que se refiere al Monitoreo instrumental del Arenal esto será posible ya a partir del 1993 cuando la red geofísica de 6 estaciones será puesta en marcha. Finalmente, en un optica de monitoreo continuo del Arenal, sería útil efectuar una campaña geoquímica general de control de aguas y gases, a repetirse periódicamente.

**MAPA A:
RECONSTRUCCION DE LA PROBABLE ERUPCION
FUTURA DEL ARENAL**

LEYENDA



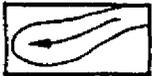
Area afectada por la explosión lateral dirigida del 1968 AD ("lateral blast")



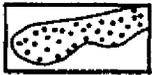
Area afectada por flujos de lava

Ciclos lavicos recientes A-1 y A-2 (post 1525 AD)

Ciclos lavicos antiguos A-3 y A-4 (pre 1525 AD)



Area afectada por flujos piroclasticos ("Flows" y "Surges")



Area afectada por lahares y subordinadamente por flujos piroclasticos (*)



Area afectada por la caída de proyectiles balísticos

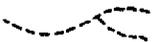


Area de posible abertura de nuevos crateres (**)



Curvas isopacas de 100 y 50 cm para los depositos de caída del evento ET-2 (***)

A,B,C,D e E Crateres



Río y/o quebrada



Carretera y/o camino

NOTA:

En el caso de una reactivación futura del Arenal, una erupción de este tipo representa, entre los eventos probables, la condición de más elevada peligrosidad.

En el mapa se presenta el escenario de dicha erupción a la vez que se analizan los diferentes fenomenos y las areas potencialmente afectadas.

(*) considerando Zapata y Soto (1990).

(**) según las indicaciones de Borgia et al. (1988) y del Informe OT-90-03.

(***) se ha considerado un viento dominante en cota (alrededor de 20 Km de altura) procedente del este (Caribe).

MAPA B PELIGROSIDAD DEL VOLCAN ARENAL

LEYENDA

A). AREA DE MAXIMA PELIGROSIDAD

Esta área sería la más expuesta en caso de una erupción del Arenal; los fenómenos a esperarse son los siguientes:

- coladas de lava, limitadamente al cono volcanico;
 - flujos piroclásticos, "surges", "lateral blast" y nubes ardientes;
 - lahares primarios y secundarios;
 - depositos de caída de pomez, de espesor superior a los 100 cm.
- (Los maximos espesores deberian acumularse segun la direccion E-O en la parte central del área A);
- caída de balísticos de gran tamaño;
 - posible abertura de nuevas bocas eruptivas en el flanco noroeste del volcan.

Las medidas a adoptarse, ya a partir de la ocurrencia de eventuales fenómenos precursores, deberian ser las siguientes:

- cerrar el hotel del Balneario del Río Tabacon;
- evacuar en forma total e inmediata a toda la población campesina residente en este área;
- cerrar la carretera Fortuna-Nuevo Arenal entre la presa y localidad Palma;
- prohibir la visita al volcán por parte de los turistas;
- alertar sobre el peligro de lahares a residentes ubicados a lo largo del Río Arenal.

Recomendaciones:

- abandonar los programas de terminación del Balneario del Río Tabacon;
- evitar cualquier tipo de asentamiento y desarrollo futuro del área.

B). AREA DE ALTA PELIGROSIDAD

Los fenómenos a esperarse en este sector son los siguientes:

- flujos piroclásticos, "surges", y nubes ardientes, limitadamente a las faldas del aparato;
- posibilidad de lahares primarios y secundarios a lo largo de los rios Arenal, Calle de Arena, Palma, Guillermina y las quebradas menores;
- depositos de caída de pomez, de espesor superior a los 100 cm, cuya probabilidad de ocurrencia es sensiblemente reducida;
- caída de balísticos de gran tamaño.

En el caso de erupción inminente, las medidas a adoptarse deberian ser las siguientes:

- prohibir el transito a lo largo de la carretera Fortuna-Nuevo Arenal en los tramos correspondientes a la desembocadura de las quebradas;
- prohibir la visita al volcan por parte de los turistas;
- alertar sobre el peligro de lahares a residentes ubicados a lo largo de los rios antedichos y, si necesario, proceder a su evacuación;
- sensibilizar los habitantes de Fortuna sobre el peligro de lahares del rio Calle de Arena que corta el pueblo mismo.

Recomendaciones:

- limitar el desarrollo futuro de este área;
- profundizar y mejorar, con eventuales obras civiles, el curso del rio Calle de Arena entre el volcán y la ciudad de Fortuna;
- identificar las zonas de refugio para la población que tendría que ser evacuada y difundir la ubicación de dichas zonas entre todos los habitantes;
- diseñar y ejecutar adecuadas campañas de educación para la población, junto con periodicos ejercicios de defensa civil.

C). AREA DE MEDIA PELIGROSIDAD

El sector C, por vientos procedentes del E (maxima probabilidad), sería afectado por una caída de tefra cuyo espesor, localmente, podría superar a los 100 cm.

En el caso de erupción las medidas a adoptarse son las siguientes:

- evacuar toda la población de las fincas y el personal del ICE no estrictamente necesario al mantenimiento de las infraestructuras de la presa Sangregado;
- trasladar el ganado afuera del área;
- evitar, en el campamiento ICE, si posible, el colapso de los techos por la excesiva acumulación de las tefras, considerando una carga accidental del orden de los 800 Kg/m², correspondiente a un deposito de caída de 100cm de espesor;
- permanecer al cubierto, en ambientes cerrados en edificios con techos resistentes, utilizando mascararas para el filtraje del polvo.

Recomendaciones:

- limitar el desarrollo futuro en este área;
- reforzar y/o construir una bodega cubierta, con techo inclinado, que pueda resistir a la carga accidental de las tefras;
- instruir al personal ICE de la presa, para que proceda, sin demora a remover las cenizas de los techos e impida su acumulación;
- dotar a esta pequeña comunidad, ubicada en zona lejana y aislada, de un sistema de radio comunicación de emergencia a utilizarse junto con un centro de asistencia en el cual sean almacenados los articulos de primera necesidad, agua potable, combustibles y medicinas pues que las carreteras y las comunicaciones telefonicas tendran que subir largas interrupciones.

D). AREA DE BAJA PELIGROSIDAD

El area D, por vientos procedentes del E (direccion dominante), sería afectado de manera muy marginal en caso de erupción del Arenal, y limitadamente a la caída de tefras .

En este sector las medidas a adoptarse, durante la erupción, deberian ser las siguientes:

- evitar el colapso de los techos, debido a eventual acumulación de material piroclástico;
- permanecer al cubierto, en ambientes cerrados en edificios con techos resistentes, utilizando, si posible, mascararas para el filtraje del polvo.

Recomendaciones:

- localizar sitios aptos para el eventual alojamiento temporal de la población desplazada de los sectores de mayor peligro;
- asegurarse de que existan las condiciones más idoneas para garantizar un rapido desenvolvimiento de los planes de defensa civil, previamente elaborados y evitar una evacuación espontánea y desordenada por parte de la población;
- impedir que el ganado apacente libremente en los campos contaminados por las cenizas volcánicas, hasta que ellas sean abundantemente lavadas por la lluvia; con este objeto se debería prever la acumulación de forraje para distribuirse entre los ganaderos;
- proteger de las contaminaciones al sistema de aprovisionamiento hidrico.

ICE

Evaluación del Riesgo y Monitoreo del Volcán Arenal
Orden de Trabajo 92-05 - INFORME FINAL

11. REFERENCIAS

- AGUILERA, E., (1988): Evidencia de tectónica activa en el área del volcán El Reventador. El terremoto del 5 de marzo de 1987. Geoinforme, Universidad Central del Ecuador, Quito, pp 28
- ALVARADO, G.E. (1989): Consideraciones neotectónicas recientes en los alrededores de La Laguna de Arenal, Costa Rica. Bol Obs. Vulc. del Arenal, 2 (3) -21; San José.
- ALVARADO, G.E. , MATUMOTO, T., BORGIA, A., BARQUERO, R., (1988): Síntesis geovulcanológica del Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988). Bol. Obs.Vulc. Arenal 1 (1): 1-55, ICE; San José.
- ARMIENTI, P., PARESCHI, M.T., (1987): Automatic Reconstruction of surge deposit thicknesses. Application to some volcanoes. J. Volcanol. Geotherm. Res. 31, 313-320
- ARMIENTI, P., MACEDONIO, G., PARESCHI, M.T. (1988): A Numerical Model for the Simulation of Tephra Transport and Deposition: Application to May 18, 1980 Mount. St. Helens Eruption. J. Geoph. Res. 93 (B6), 6463-6476
- BARDINTZEFF, J.M. (1985): Les nuées ardentes: Petrogenese et volcanologie. Bulletin PIRPSEV n. 109.
- BLONG, R.J. (1984): Volcanic hazards, a sourcebook on the effects of eruptions, 424 pp. Academic Press.
- BORGIA, A., LINNEMAN, S.R., SPENCER, D., MORALES, L.D., BRENES, J.A. (1983): Dynamics of lava flow fronts, Arenal Volcano, Costa Rica. J. of Volc. and Geoth. Res., 19, 303-329.
- BORGIA, A., POORE, C., CARR, M.J., MELSON, W.G., ALVARADO, G.E. (1988): Structural and stratigraphic and petrologic aspects of the Arenal - Chato volcanic system, Costa Rica: Evolution of a young stratovolcanic complex. Bull. Volc. 50: 86-105.
- BORGIA, A., LINNEMAN, S.R., (1990): On the mechanisms of lava flow emplacement and volcano growth: Arenal, Costa Rica. In: J.H.Fink (Ed.): "Lava Flows and Domes emplacement Mechanisms and Hazard Implications". IAVCEI Proceedings in Volcanology, Springer-Verlag, Berlin, 208-243.
- CAREY, S., & SIGURDSSON, H., (1989): The intensity of plinian eruptions. Bull. Volc. 51, 28-40.
- CAREY, S., & SPARKS, R.S.J., (1986): Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruptive columns. Bull. Volc. 48: 109-125.
- CASS, R.A.F., & WRIGHT, J.V., (1987): Volcanic Successions Modern and Ancient. Allen & Unwin, London.
- CHAVES, R., (1968): Características físicas, químicas y mineralógicas de los materiales eruptados por el volcán Arenal (Costa Rica). Dirección de Geología, Minas y Petróleo - Ministerio de Industrias - Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.
- CHAVES R., SAENZ R.(1970): Efectos de las erupciones recientes del volcán Arenal, Costa Rica. Informe semestral Enero a Junio 1970.

ICE

Evaluación del Riesgo y Monitoreo del Volcán Arenal
Orden de Trabajo 92-05 - INFORME FINAL

- CHIESA S. (1987 a): Estudio de las capas piroclásticas (tefras) del volcán Arenal (Costa Rica) con énfasis a la Unidad 20". 73 págs., ICE, Dept. de Geología.
- CHIESA S. (1987 b): La mayor erupción pliniana del volcán Arenal, Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 6: 25-41; San José.
- CRANDELL, D.R., & MULLINEAUX, D.R., (1978): Potential hazards from future eruptions of Mount St. Helens volcano, Washington. *Geological Survey Bulletin* 1383-C.
- CRANDELL, D. R., & HOBLITT, R.P., (1986): Lateral blasts at Mount St. Helens and hazard zonation. *Bull. Volc.* 48, 27-37
- LIPMAN, P.W., & MULLINEAUX, D.R., (eds) (1981): The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, US Geological Survey Professional Paper 1250
- MACEDONIO, G., PARESCHI, M.T. & SANTACROCE R. (1988): A numerical simulation of the Plinian fall phase of 79 A.D. eruption of Vesuvio. *J. Geophys. Res.* 93, B-12, 817-827
- MALAVASSI, R.E., (1979): Geology and Petrology of Arenal volcano: Costa Rica; Tesis de Maestría, Univ. of Hawaii
- MALIN, M.C., & SHERIDAN, M.F. ,(1982): Computer assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217, 637-639
- MELSON, W., (1984): Prehistoric eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. *Vínculos*, Vol. 10, (1-2) 34-59.
- MELSON, W., (1982): Alternation between acidic and basic magma in major explosive eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. *Bol. Volcanol.* 14, 65-74, Univ. Nacional, Costa Rica (1985)
- MELSON, W.G., Y SAENZ, R., (1968) , The 1968 eruption of volcano Arenal: preliminary summary of field and laboratory studies. Smithsonian Center for Short Lived Phenomena; Report 7.
- MELSON, W.G., Y SAENZ, R., (1973): Volume, Energy and Cyclicity of eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. *Bull. Volc.* 37
- MULLINEAUX, D.R., (1986): Summary of pre -1980 tephra-fall deposits erupted from Mount. St. Helens. *Washington State Bull. Volc.* 48, 17-26
- MUELLER, M., (1984): The Silencio Stratigraphic Sequence. *Vínculos* 10, (1-2).
- NAKAMURA , K.,(1964): Volcano-stratigraphic study of Oshima Volcano Izu. Tokyo Univ. Earthq. Res. Inst. Bull. 42, 649-728
- REAGAN, K., GILL, J.B., MALAVASSI, E., (1987) Changes in magma composition of Arenal volcano, Costa Rica, 1968-1985: realtime monitoring of open system differentiation, *Bull. Volc.* 49
- SAENZ, R., (1977): Erupción del volcán Arenal en el año 1968. *Rev. Geogr. de Amér. Centr.*, Heredia, 5-6: 149-188

- SANTACROCE, R., (1987): Somma-Vesuvius. Quaderni de "La ricerca científica". 114. Vol. 8.
- SIEBERT, L., (1984): Large volcanic debris avalanches: characteristic of source areas, deposits and associated eruptions. *J. Volc. Geoth. Res.* 22: 163-197
- SIGURDSSON, H., & CAREY, S., (1986): Volcanic disasters in Latin America and the 13th November 1985 eruption of Nevado del Ruiz volcano in Colombia. *Disasters* 10/3/205-216
- SIMKIN, T., SIEBERT, L., MCCLELL, L., BRIDGE, D., NEWHALL, C., & LATTE, J. H., (1981): *Volcanoes of the World* Smithsonian Institution. Pennsylvania 232 pp. Hutchinson Ross, Stroudsburg, PA
- SOTO, G.J., (1991): Avance de Investigación y Comentarios sobre la estratigrafía, Estructura y Geología del Volcan Arenal. Dept. Geología ICE, Informe interno inédito.
- SPARKS, R.S.J., (1986): The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bull. Volc.* 48, 3-15
- SUDRADJAT, A., & TILLING, R. (1984): Volcanic hazards in Indonesia: The 1982-83 Eruption of Galunggung. *Episodes* 7: 13-19
- THORARINSSON, S., (1967): The eruption of Hekla 1947-48, I. The eruptions of Hekla in historical times. A tephrochronological study. *Visindafelag Islendinga, Reykjavik*, 1-183.
- WADGE, G., (1983): The magma budget of volcano Arenal, Costa Rica, from 1968 to 1980. *Volc. and Geoth. Res.*, 19 (1983) 281-302.
- WALKER, G.P.L., (1983): Ignimbrite types and ignimbrite problems. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 17: 65-88.
- WALKER, G.P.L., (1971): Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *J. Geol.* 79: 696-714 .
- WALKER, G.P.L., & MCBROOME, C., (1983): Mount St. Helens 1980 and Mount Peleé 1902- flow or surge? *Geology* II, 571-574
- WALKER, G.P.L., & CROASDALE, R., (1971): Two plinian-type eruptions in the Azores. *J. Geol. Soc. London* 127, 17-55
- WILSON, L., SPARKS, R.S.J., HUANG, T.C., & WATKINS, N.D., (1978): The control of Volcanic column heights by eruption energetics and dynamics. *J. Geophys. Res.* 63, 1829-1835.
- ZAPATA, M.I., Y SOTO, G.J., 1990. Lahares antiguos y recientes en el volcán Arenal, Costa Rica. *Bol. Obs. Vulcanol. Arenal*, 3 (5): 4-28, ICE San José.