

Amenazas volcánicas en Costa Rica: Una estrategia de prevención

Ing. Ricardo Morales Vargas, M.Sc.¹
Lic. Alfonso Liao Lee, M.Sc.²

Resumen

Costa Rica, al igual que otros países centroamericanos, presenta un claro carácter volcánico, lo que le ha brindado un importante atractivo turístico, así como un componente de amenaza. Este artículo presenta una metodología de estudio para analizar, evaluar y minimizar los riesgos en la zona basado en varios enfoques complementarios: a) datos históricos de erupciones en el Arenal, b) datos históricos de erupciones en volcanes considerados similares c) análisis de simulación de la dispersión de contaminantes químicos y su efecto en la salud d) valoración toxicológica y epidemiológica del impacto de los contaminantes y e) influencia de los factores meteorológicos en la distribución y concentración de los contaminantes.

Los resultados se basan principalmente en la simulación numérica de la dispersión de dióxido de azufre utilizando el modelo de Pluma Gaussiana para una fuente de emisión y velocidad de viento constantes, para lo que se utilizaron las distintas condiciones meteorológicas que se presentan en la zona. Los estudios muestran que en una erupción intensa, aún a 30 kilómetros del Arenal, dependiendo de las condiciones meteorológicas, podría darse una concentración de dióxido de azufre superior a la inmediatamente peligrosa para la vida y salud, equivalente a 266 mg/m^3 .

La metodología utilizada muestra que la simulación numérica es un recurso de bajo costo, y con un potencial de beneficio relativo muy alto,

por lo que se recomienda que Costa Rica y los demás países de la región, inviertan en minimizar el riesgo recurriendo a ésta, tomando en consideración la influencia de las condiciones atmosféricas, y su afectación por la topografía. La simulación de la dispersión de contaminantes puede utilizarse para la planificación territorial y para la planificación, prevención y resolución médico – asistencial. Igualmente, la simulación numérica puede utilizarse para determinar los puntos de monitoreo atmosférico tomando en cuenta la escala de los fenómenos meteorológicos (microescala, mesoescala, escala sinóptica y global).

Es imprescindible, para lograr una solución global al problema de la mitigación, la cooperación entre diversas instituciones y pobladores para monitorear los volcanes y sus efectos en forma idónea (medición de gases atmosféricos, monitoreo geológico, vigilancia epidemiológica de la salud, monitoreo de efectos ambientales y mediciones meteorológicas). Este marco intersectorial y participativo permite una mejor utilización de recursos por su efecto sinérgico.

Introducción

A nivel mundial, las erupciones volcánicas han sido causa de aproximadamente 37000

¹ Ingeniero Químico, Control del Ambiente Humano, Dirección de Protección al Ambiente Humano, Ministerio de Salud.
² Meteorólogo, Red de Vigilancia Contaminantes Atmosféricos Residuales y Transfronterizos, Instituto Meteorológico Nacional.



muerres durante el último siglo. En las Indias Occidentales, el promedio de población expuesta en cada erupción ha sido de 56000 habitantes, y ha muerto una de cada 550 personas. En esa zona, durante los años 1680-1979 y con tan sólo tres eventos mayores registrados, las erupciones volcánicas han causado casi 75 veces más víctimas mortales que los huracanes, y 150 veces más que los terremotos (5). En Centroamérica, recientemente se han activado volcanes en Guatemala, El Salvador y Nicaragua; éste último país fue afectado por el Cerro Negro en 1992 y 1995, causó una destrucción en cada evento de aproximadamente 10 mil manzanas de terreno (21).

Costa Rica, por su ubicación geográfica ha presentado desde tiempos antiguos un claro carácter volcánico, lo que le ha otorgado un importante atractivo turístico, pues su territorio es atravesado de Norte a Sur por cordilleras donde se erigen estas imponentes formaciones geológicas. En tiempos recientes han sido el Volcán Irazú y el Volcán Arenal los que han generado los mayores problemas de salud pública y daños al medio ambiente, aunque también ha existido actividad pero de menor escala en el Poás y Rincón de la Vieja, así como actividad fumarólica en el Barva y Miravalles (2,3). La erupción del Arenal, en 1968, devastó un área aproximada de 12 km², ejerció una influencia en un área de 232 km² y ocasionó pérdidas en 387 fincas del área San Carlos-Tilarán, las que se estimaron en 846 mil US\$ en esa época. De estas pérdidas, casi el 70% fueron en caminos y construcciones, y el restante en cultivos y ganado, devastó casi totalmente 17 poblados y causó 65 muertes (2,3).

En 1998 el Volcán Arenal tuvo mucha actividad, causando la evacuación del paraje turístico y balneario termal de Tabacón, ubicado en sus faldas. El Arenal, con 1633 m.s.n.m.^{*}, amenaza zonas que se ubican en los alrededores de los 500 m.s.n.m., comprendiendo en este territorio a Ciudad Quesada aproximadamente

a 30 km., y La Fortuna a 6 km. Ciudad Quesada se destaca por ser un centro poblacional de alta densidad y de producción agrícola importante. La zona en general, en especial la subregión cercana a La Fortuna, se destaca por ser visitada por turistas de todas las latitudes.

Por la importancia económica y turística de la zona, las estrategias de prevención y evacuación en preparación para desastres deben incluir planes coordinados entre las instituciones involucradas, por ejemplo organismos internacionales. Ministerio de Salud, Ministerio de Ambiente, Instituto Costarricense de Turismo, Comisión Nacional de Emergencia, Cuerpos de Socorro, Caja Costarricense del Seguro Social, Ministerio de Agricultura y otros; planes que deben estar basados en una sólida evaluación del riesgo.

Metodología

El presente estudio propone una metodología para analizar, evaluar y minimizar los riesgos en la zona, basado en varios enfoques complementarios:

1. Datos históricos de erupciones en el volcán.
2. Datos históricos de erupciones en volcanes similares.
3. Análisis de simulación de la dispersión de contaminantes químicos y su efecto en la salud.
4. Valoración toxicológica y epidemiológica del impacto de los contaminantes.
5. Influencia de los factores meteorológicos en la distribución y concentración de los contaminantes.

^{*} m s n m = metros sobre el nivel mar



Se pretende así proveer a las instituciones involucradas de una metodología cualitativa y cuantitativa para predecir el impacto de un evento, partiendo de las condiciones meteorológicas y la magnitud del evento para estimar los radios de evacuación necesarios, número de desplazados y número de afectados y grado de afectación. Se utiliza un modelo de Pluma Gaussiana para la dispersión del dióxido de azufre, principal contaminante esperado, se comenta su efecto sinérgico con la ceniza (partículas), y se considera éste como un indicador de peligro oportuno, ya que éste, y en general los gases volcánicos, pueden dispersarse a mayor distancia que el área de impacto directo de los sólidos y partículas.

El modelo de Pluma Gaussiana ha sido ampliamente usado por la industria química para evaluar el impacto de sus emisiones (4), y ha sido utilizado adaptado para evaluar impactos ambientales de los volcanes (17), si bien sus ventajas no han sido explotadas en forma exhaustiva, y su uso ha permanecido poco diseminado. Se han simulado las condiciones en atmósferas tipo C (17), lo que, dependiendo de la zona, altura del cráter y temperatura de los gases, no necesariamente representa la condición de mayor riesgo para todas las distancias en dirección horizontal al volcán, por eso deben analizarse otras condiciones atmosféricas por igual.

Resultados

1. Datos históricos de erupciones en el volcán

El Volcán Arenal, que alcanza una altura promedio de 1633 m.s.n.m., amenaza zonas que en promedio se ubican a los 500 m.s.n.m., comprendidas Ciudad Quesada a aproximadamente 30 kilómetros, y La Fortuna a 6 kilómetros. Ciudad Quesada se destaca por ser un centro poblacional de alta densidad y de

producción agrícola importante, y La Fortuna, por ser ampliamente visitada por turistas.

Erupciones anteriores han tenido una influencia directa en un radio de aproximadamente 5 kilómetros, como la que acarreó flujos de lava hasta el Valle del Río Arenal. Igualmente, se observaron en las erupciones de 1968 "bombas" emitidas desde el cráter A, que alcanzaron una altura de 200 metros sobre el cráter y una distancia de hasta 5 kilómetros. (8) La columna de humo y cenizas se ha alzado 800 metros sobre el cráter y éstas se han depositado a una distancia de 5-10 kilómetros O/SO. (25), debido a la acción de los vientos alisios que oscilan entre 1-10 km/h en la zona (28).

Mediciones de la actividad volcánica entre 1975-1985 han estimado su actividad de emisión de gases en un rango de 50-200 toneladas/día, a una temperatura de aproximadamente 940 grados centígrados. Los gases contaminantes representan un 6% de las emisiones gaseosas, siendo el restante 94% vapor de agua. Este 6% de material tóxico y peligroso se compone así (27):

CO ₂	50%
SO ₂	37%
H ₂	8%
CO	0,27%
H ₂ S	900 ppm
CH ₄	120 ppm

Los datos anteriores: altura del cráter, altura de la nube sobre el cráter, velocidades de viento y cantidad de material tóxico emitido, formarán la base para el análisis de dispersión de contaminantes, como se tratará adelante enfatizando la dispersión de **dióxido de azufre**, el contaminante principal desde el punto de vista toxicológico y por su gran concentración en los gases.



2. Datos históricos de erupciones en volcanes similares

Es conocido que cada volcán tiene sus particularidades propias. Para efectos del estudio, se tomarán en cuenta datos de otros volcanes en Costa Rica, y de volcanes fuera de las fronteras del país, con la intención de establecer categorías de erupción, con base en la cantidad de material tóxico emitido, y usar estos antecedentes para estimar los parámetros meteorológicos, áreas de influencia y posibles magnitudes de erupción en el Arenal.

a) Uno de los volcanes más estudiados y documentado ha sido el Nevado del Ruiz, responsable de la destrucción de Armero, en Colombia. De los estudios de Eslava (16) se concluye que las emisiones de ese volcán pueden clasificarse en 3 fases principales, o magnitudes, según la cantidad de SO₂ emitido:

a) Fumarólica	200-500	ton/día
b) Activa	1000-12000	ton/día
c) Eruptiva	12000-700000	ton/día

b) El Volcán Masaya, en Nicaragua, con ciclos eruptivos de 25 años aproximadamente, tiene erupciones que se estiman en 1300 toneladas de SO₂ por día, y se han detectado concentraciones de 1 ppm a nivel del suelo en áreas pobladas que distan 30 kilómetros del volcán (5).

c) El Volcán Poás, también en Costa Rica, tiene una actividad fumarólica capaz de producir 800 ton/día (27), de las que se estima son 95% agua líquida y el resto vapores. El 5% de vapores se compone así:

SO ₂	61.2%
CO ₂	23.2%
H ₂ O	15.4%
CO	0.15%
H ₂ S	200 ppm
He	130 ppm
CH ₄	6 ppm

Un estudio epidemiológico llevado a cabo entre 1995-1997 por Gamboa (18), cita la velocidad de viento en la zona de 3-7 m/s, dirigidos del NO al SE, y concuerda con datos recopilados por Liao (19). Durante la erupción de 1910, el Poás emitió cerca de 640 mil toneladas de material (3), lo que, utilizando los métodos de Araña y Machado (6,20) sería equivalente a 12800 toneladas de material gaseoso, y 7700 toneladas de dióxido de azufre (61% de los gases).

d) Se conoce que el Volcán Irazú, en Costa Rica, elevó su columna de ceniza y gases, en el año 1963, hasta una altura de 300-500 metros sobre el volcán, documentándose que la velocidad de viento fue de 0-36 km/hr., siendo lo típico 6-18 km/hr. (21).

Como puede verse en la sección 3, el Volcán Arenal tiene una actividad fumarólica (50-200 ton.) comparable a la fumarólica de Nevado del Ruiz. Asimismo, la actividad fumarólica del Volcán Poás casi se acerca en magnitud a la fase activa del Nevado del Ruiz, y su erupción de 1910 se asemeja a la fase activa del Nevado del Ruiz. La actividad del Volcán Masaya, situado a una misma latitud que el Arenal y que emite también con vapores predominantemente sulfurosos, se enmarcaría en la magnitud similar a la fase activa del Nevado del Ruiz. Con estos datos, se pretende demostrar que, por analogía con otros volcanes, aún cuando no se han ocurrido grandes erupciones pasadas del Arenal, la posibilidad de exactitud de otros volcanes, las erupciones de éste fácilmente podrían alcanzar una fase activa de hasta 12000 ton/día y, en una fase eruptiva, podría llegar a las 700000 ton/día de SO₂, datos que se incorporarán al análisis de dispersión de contaminantes.

3. Análisis de simulación de la dispersión de contaminantes químicos y su efecto en la salud.



a. Análisis de dispersión de contaminantes químicos

Es importante establecer los parámetros básicos para el análisis de impactos recurriendo a: los datos de erupciones pasadas y de otros volcanes, información geográfica e información meteorológica. Obviando el modelado de la actividad fumarólica por su menor impacto en el ambiente y la salud, y por estar descritos sus efectos por otros autores (18, 24), se usará la herramienta de simulación matemática según la metodología de análisis de dispersión de contaminantes de Pasquill-Turner para una pluma Gaussiana (4, 17).

Para niveles de **actividad intermedia**, y para el máximo nivel de emisión cuando el **volcán entra en erupción**, se analizan las concentraciones de SO_2 a distintos niveles sobre el del mar (m.s.n.m.) y a diferentes distancias desde el foco de emisión. Se usan las distintas clases de estabilidad atmosférica y se comparará su efecto sobre los radios de evacuación recomendados, utilizando una velocidad de viento promedio para cada situación meteorológica.

Cabe indicar que la altura H se define como la suma de la altura del techo del cráter más la altura que alcanza la nube de gases (altura de chimenea). Utilizando condiciones más conservadoras y extremando precauciones, se considerará esta altura de chimenea como mínima. Se examinarán distintos casos que corresponden a los rangos de la Tabla 1.

La descripción de las demás variables se encuentra en la sección de modelo matemático. Los casos estudiados y presentados en detalle corresponden al Volcán Arenal, donde el cráter activo, denominado Cráter C, se encuentra a 1450 m.s.n.m., y es el más interesante por su mayor cercanía a centros de población y por su actividad reciente. El modelo matemático se basa en la distancia vertical entre el foco (volcán)

y el punto de interés (receptor), denominado (H-Z), por lo que los datos pueden ser extrapolables a otras zonas y volcanes donde se mantenga la misma relación: igual diferencia entre las altitudes de emisión y recepción.

b. Impacto en la salud

Para evaluar el impacto en la salud del contaminante principal, **dióxido de azufre**, se debe enfocar el problema desde varios ángulos (ver Tabla 2). El más general de estos enfoques puede ser la determinación de la calidad del aire elaborada por Baxter (9) (Report on the Quality of Air We Breath), citada por Gamboa (18), aplicable a los efectos de la calidad del aire sobre **la población en general y que se muestra en la Tabla 3.**

Desde el punto de vista de la **toxicología industrial** (ambientes de trabajo), tanto la ACGIH como la OSHA coinciden en establecer los siguientes límites permisibles de exposición (10,22), que pueden servir como una guía para la exposición de personas adultas sanas.

TLV-TWA	5 mg/m ³ (2 ppm)
TLV-STEL	10 mg/m ³ (5 ppm)
IDLH	266 mg/m ³ (100 ppm)

Debe hacerse notar que el American Institute of Chemical Engineers recomienda que para la población en general, el límite de exposición no sobrepase el 1% del TLV-TWA, con lo que se logra proteger a las poblaciones más sensibles como niños y ancianos (4). El límite de exposición permisible de la EPA (promedio geométrico anual) es de 80 ug/m³ (0.03 ppm), y de 365 ug/m³ (0.14 ppm) para un promedio de 24 hrs. (1) Igualmente, es importante señalar que el dióxido de azufre tiene un umbral olfativo (comienza a percibirse) entre los 1-5 ppm, lo que impide que se le perciba sino hasta que ya se han sobrepasado los límites permisibles anteriores, lo que pondría a la población en riesgo, al retardarse una posible evacuación hasta



superarlos. Si se excede el IDLH por más de 30 minutos, las personas expuestas podrían no estar en condiciones de ponerse a salvo.

Para planificación en **casos de emergencia**, la American Industrial Hygiene Association (AIHA, EEUU), establece los siguientes límites (10):

ERPG-1: 0.8 mg/m^3 (Concentración a la que pueden exponerse casi todos los individuos por una hora y solamente experimentar efectos leves transitorios, o un olor molesto).

ERPG-2: 8 mg/m^3 (Concentración a la que pueden exponerse la mayoría de las personas por una hora, sin ningún daño o efecto irreversible en su salud, sin disminuir su capacidad de ponerse a salvo).

ERPG-3 40 mg/m^3 (Concentración a la que puede exponerse casi toda la población por una hora sin ningún efecto o daño que amenace su salud).

Sin embargo, para las poblaciones sensibles, deben tenerse en cuenta otros efectos agudos y crónicos que se han documentado. La exposición a 3 mg/m^3 por un período de 6-8 horas, trae como consecuencia una disminución reversible de la función pulmonar. La exposición a 13 mg/m^3 por un período de 10-30 minutos produce encogimiento de los bronquios. La exposición a 21 mg/m^3 por 20 minutos produce enrojecimiento e irritación de la nariz y garganta. Al alcanzarse los 53 mg/m^3 la irritación se considera molesta al sistema respiratorio. Al alcanzarse los 1330 mg/m^3 puede darse la asfixia por constricción pulmonar. En este nivel de concentración de dióxido de azufre, se presenta una seria obstrucción de las vías respiratorias, hipoxemia, edema pulmonar, y puede sobrevenir la muerte en minutos. Los efectos en los ojos se empiezan a notar como irritación leve a los 14 mg/m^3 . A los 24 mg/m^3 la irritación de ojos es de moderada a severa, y entre los $24\text{-}32 \text{ mg/m}^3$ se inicia el lagrimeo con dolor irritante. Al alcanzarse los 133 mg/m^3 puede ocurrir la quemadura temporal de la córnea.

En cuanto a los efectos crónicos, se conoce que la exposición a 10 mg/m^3 puede causar daño permanente al pulmón, debido a la repetida bronco-constricción, lo que conlleva a la disminución de la función pulmonar. De ocurrir edema, éste puede suscitarse hasta 48 horas después de la exposición.

Existen igualmente aspectos que no han sido estudiados a fondo, como es el caso de la **sinergia entre el dióxido de azufre y partículas**, cuyos efectos en el caso de ceniza volcánica y dióxido de azufre son prácticamente desconocidos, ya que estos estudios se han realizado para ambientes de contaminación urbana. La OPS/OMS (23) ha analizado diversos estudios que indican la existencia de efectos sinérgicos del SO_2 y partículas. Para exposiciones breves y **combinadas** los niveles más bajos (promedio de 24 horas) a los que se observan cambios en la morbilidad es de 0.200 mg/m^3 (0.07 ppm) de SO_2 y de 150 ug/m^3 para las partículas. Estos serían niveles a los que los grupos de población más sensibles (niños, ancianos, personas con problemas pulmonares o cardíacos preexistentes) presentarían afectación. Se informó igualmente de un aumento en la mortalidad al llegarse a 0.500 mg/m^3 (0.18 ppm) de SO_2 y 500 ug/m^3 de partículas. Esta información debe utilizarse con cautela, pues la mayoría de los estudios se refieren a partículas provenientes de fuentes de combustión industriales y automotrices, las que pueden diferir de las emitidas por los volcanes, que generalmente son silicias, si bien de dimensiones comparables e igualmente en el rango respirable.

Modelo matemático

La mayor parte de los modelos locales más conocidos para plumas de emisiones se basan en fórmulas generalizadas de Pluma Gaussiana.



las cuales, cuando se utiliza una fuente de emisión y velocidad de viento constante, se simplifica (4):

$$C = [Q/(2\pi U O_z O_y)] (e^{-M})(e^{-N} + e^{-N'})$$

Donde $M = Y^2/[2(O_y)^2]$

$$N = (Z - H)^2/[2(O_z)^2]$$

$$N' = (Z + H)^2/[2(O_z)^2]$$

C = concentración en un punto en dirección del viento (mg/m^3)

U = velocidad de viento (m/s)

X = distancia en la dirección de viento (km)

Y = distancia perpendicular a la línea de dirección de viento (m)

Z = altura sobre el nivel de referencia del punto de interés (m)

H = altura sobre el nivel de referencia del foco de emisión (m)

O_z = coeficiente de difusión en la dirección z (m)

O_y = coeficiente de difusión en la dirección y (m)

Q = tasa de emisión (mg/s)

Los coeficientes de difusión pueden estimarse así:

$$O_y = ax^b \quad \text{y} \quad O_z = cx^d + f$$

La constante $b = 0.894$ y las constantes a , c , d y f se toman de la **Tabla 4**.

Las clases de estabilidad atmosférica son las

sugeridas por Turner, D.B. "Workbook for Atmospheric Dispersion Estimates," HEW, Washington, D.C., 1969 (4), y se detallan en la **Tabla 5**

Resultados del modelo matemático Volcán Arenal

Los resultados del modelo matemático se resumen en los Gráficos 1-5 para el **volcán en erupción**, y en los Gráficos 6-10 para el **volcán activo**. Cada gráfico muestra ambos casos: a) un receptor ubicado a 450 metros por debajo de la altura del cráter (1000 m.s.n.m.), y b) un receptor ubicado a 950, metros por debajo de la altura del cráter (500 m.s.n.m.), señaladas en el gráfico como $H-Z = 450$ y $H-Z = 950$, respectivamente. Para cada clase atmosférica se utilizó una velocidad de viento promedio, estableciéndose así, considerando las velocidades de viento de la zona (25) y la intensidad solar (11):

Clase A:	1.5 m/s
Clase B:	2.5 m/s
Clase C:	4.0 m/s
Clase D:	6.5 m/s
Clase E:	2.5 m/s

Se omiten datos de la clase atmosférica F ya que, si bien es probable su ocurrencia, los efectos no serían importantes, (concentraciones cercanas a cero) en el radio estudiado con el presente modelo (0-40 kilómetros de distancia del cráter).

4. Valoración toxicológica y epidemiológica del impacto de los contaminantes.

Existe en realidad bastante información a nivel nacional e internacional sobre el impacto



del SO₂ sobre el sistema respiratorio en diversas poblaciones, sin embargo ésta no ha sido necesariamente unida a la actividad volcánica. En Costa Rica, el estudio de Soto et al. establece la prevalencia de síntomas asociados con el asma en niños en un 23%; los estudios de Alfaro explican la mayor prevalencia de síntomas respiratorios al determinar mayores concentraciones de dióxido de azufre durante los meses secos del verano entre enero y abril (en la zona del Volcán Poás); y los estudios de Riggioni indican que los síntomas respiratorios se aumentan entre los meses de junio y julio (18). El estudio de Liao (19) describe la climatología del área del Volcán Poás. Solamente el estudio de Gamboa (18) analiza la relación de los síntomas respiratorios con los gases volcánicos para el Poás, por medio de un estudio comparativo entre dos zonas, adultos (20-44 años) expuestos y no expuestos. Ya que no existen estudios similares para el Volcán Arenal, los estudios del Poás pueden ser un punto de partida para estimar los efectos en el Arenal.

El estudio de Gamboa muestra un O.R. (expuesto/no expuesto) entre 1.48-1.72, según el tipo de cuestionario que se use para determinar la prevalencia de síntomas respiratorios. Se determinó que el asma es dos veces más común en las zonas expuestas que en las no expuestas, y los sujetos en las zonas expuestas utilizan más medicamentos bronco-dilatadores. Se evidenció un efecto dosis-respuesta, pero no se observó mediante la estratificación que ningún grupo de edad fuera más susceptible a los efectos del dióxido de azufre. La prevalencia de síntomas respiratorios fue de 26-35% en los sitios expuestos y de 17-27% en los no expuestos. La población expuesta se estima en 16000 personas distribuidas en 22 comunidades (18).

De acuerdo con los datos meteorológicos para la zona del Arenal y la experiencia de otras erupciones, las poblaciones expuestas estarían principalmente vientos abajo de la dirección predominante del viento, cuadrante Sur Oeste

en los alrededores del Volcán Arenal, por lo que la zona debe valorarse cuidadosamente a la luz de datos más recientes. Además, debido a que en condiciones atmosféricas de calma la difusión de gases tóxicos se puede realizar en todas las direcciones hasta una distancia de 40 kilómetros, no debe descartarse la evacuación total en los otros cuadrantes.

Según los datos toxicológicos y epidemiológicos, los servicios de salud deben prepararse para atender estas poblaciones a partir del evento y por un período de 48 horas (10), en el que aún puede presentarse edema pulmonar, entre otros síntomas. Estos síntomas podrían afectar principalmente a las personas con síntomas prevalentes antes de la erupción, lo que podría ascender fácilmente a un 25% de la población, y comprendiendo todos los estratos o rangos de edades. Con el fin de determinar la velocidad de respuesta necesaria para poner a salvo a las poblaciones, deben conocerse las condiciones meteorológicas. Para el caso de la zona del Arenal, las velocidades de viento imperantes en la zona podrían desplazar los gases tóxicos hasta 5 kilómetros en 8 minutos, lo que muestra lo necesario de la preparación comunitaria y sistemas de alerta temprana basados en monitoreos atmosféricos.

5. Influencia de los factores meteorológicos en la distribución y concentración de los contaminantes.

Los factores meteorológicos pueden ser determinantes en los procesos de dispersión y remoción de los contaminantes en el aire. El viento transporta los contaminantes de un punto a otro. En ausencia de éste, la acumulación de los contaminantes se realiza, produciendo episodios de eventos severos de contaminación.

La estabilidad atmosférica gobierna el comportamiento en la distribución de los contaminantes en la vertical. En una atmósfera inestable, los procesos de dispersión en la verti-



cal se producirán, mientras que si es estable, los procesos de dispersión en la vertical se verán sometidos a una oposición a que se distribuya. La presencia de inversiones en la tropósfera (aumento de la temperatura con la altura) contribuye a que los contaminantes no se dispersen en la vertical. Cuando se presentan condiciones adversas a los mecanismos de dispersión, difusión y transporte de los contaminantes, los lugares sometidos a estos fenómenos son vulnerables a eventos severos de acumulación de contaminantes atmosféricos.

El tipo de lluvia, y por consiguiente la nubosidad presente, contribuye al proceso de remoción de partículas y gases hidrosolubles. En las precipitaciones intensas producidas por nubes cumulonimbus, la remoción de partículas, ocurridas mediante la formación de núcleos de condensación, y por el arrastre de estas durante la caída de las gotitas de lluvia, tanto dentro como fuera de la base de la nube, contribuyen significativamente. Es decir, el proceso de remoción debido a este tipo de precipitación, es equivalente a un gigantesco lavador y removedor de las partículas y gases en el aire. Sin embargo, durante las precipitaciones producidas por nubes estratiformes, la lluvia que es del tipo llovizna continua, que puede durar incluso varias horas, es menos eficiente que la asociada a las lluvias intensas. Además, con la presencia de trióxido de azufre, la lluvia produce ácido sulfúrico, uno de los principales contribuyentes a la acidificación.

En un estudio realizado por Liao (19), se encontró en las inmediaciones del volcán Poás (Las Cornelias de Poás), República de Costa Rica, un fenómeno foehn (agua nieves), producto de la compresión de la masa de aire. Se registraron disminuciones de 5% en la humedad relativa y un aumento en la temperatura media de 3,8°C en la Finca Antolín (10°11' N, 84°6' W, 2400 msnm), localizada a la salida del paso inter-montano de El Desengaño, entre los volcanes Poás y Barva.

Además, se encontró que a la salida de este paso, durante la presencia del viento alisio fuerte (diciembre - marzo) una dirección anómala (circulación ciclónica a la derecha y anticiclónica a la izquierda de la salida del paso), lo que contribuye a la acumulación de contaminantes a ambos lados de la salida del paso de El Desengaño. En el caso del Arenal y por condiciones similares, las zonas dominadas por el cauce del Río Castillo principalmente, y el cauce del Río Arenal, serían vulnerables a la acumulación de contaminantes, por lo que dicha zona no debe utilizarse para refugios o zonas de acopio de recursos.

Los pobladores localizados en este tipo de lugares deben ser los primeros en ser evacuados durante un evento de emisiones volcánicas, y debe prohibirse emplearlos para acopiar materiales durante alguna emergencia volcánica, por los peligros que esto conlleva.

Este es sólo un ejemplo de los estudios pormenorizados que deben hacerse en el campo para detectar fenómenos de la escala local que afectan a los habitantes y sus propiedades en un punto cualquiera que sea vulnerable a emergencia volcánica.

Discusión

Los datos representados en los gráficos pueden ser un elemento valioso para establecer los radios de evacuación necesarios según los impactos por prevenir de aquellos contemplados en la Tabla 2 "Toxicidad del Dióxido de Azufre". La atmósfera tipo A (Gráficas 1 y 6) presenta un comportamiento asintótico descendente al aumentar las distancias al volcán, tanto para el volcán en erupción como para el volcán activo, se alcanzan las concentraciones máximas de dióxido de azufre antes de los 10 kilómetros. Igualmente, debe notarse que la atmósfera Tipo B (Gráficas 2 y 7) y la atmósfera Tipo C (Gráficas 3 y 8) presentan un comportamiento



particular, aumentan la concentración hasta un máximo ubicado entre los 5-15 kilómetros para luego descender rápidamente con la distancia. Para las atmósferas Tipo D (Gráficas 4 y 9) y Tipo E (Gráficas 5 y 10), las zonas más impactadas se observan más allá de los 15 kilómetros, siendo la atmósfera Tipo E de poca importancia en el rango estudiado (0-40 kilómetros). En resumen, dependiendo de las condiciones atmosféricas, distintas zonas serían afectadas en mayor grado, aspecto que debe considerarse en los planes de evacuación y atención de la emergencia, y al determinar los puntos de monitoreo atmosférico.

Conclusiones

El presente estudio estima y resume las posibles consecuencias de erupciones moderadas e intensas en el Volcán Arenal, con base en el impacto del contaminante principal, dióxido de azufre (SO_2), sobre la salud de la población, específicamente sobre el sistema respiratorio. El estudio propone una metodología integradora de: a) la experiencia en el volcán en estudio, b) experiencia en otros volcanes, c) análisis de dispersión de contaminantes para una Pluma Gaussiana, d) valoración toxicológica e epidemiológica del impacto sobre la salud y e) influencia de los factores meteorológicos en la transformación, difusión y dispersión de los contaminantes atmosféricos.

Los resultados (que pueden resumirse en forma gráfica como mapas de isoconcentraciones) pueden utilizarse para estimar los posibles radios de evacuación que serían necesarios dependiendo de la actividad volcánica y condiciones atmosféricas, así como para determinar los puntos que pueden ser útiles para el monitoreo del volcán. La valoración toxicológica y epidemiológica sirve para estimar los preparativos de emergencia que deben llevar a cabo los centros de salud en las

zonas aledañas a volcanes, y estimar las poblaciones a atender. Por lo general del estudio, la metodología o datos pueden utilizarse para estimar las consecuencias de erupciones en otros volcanes. Cabe resaltar que la integración de modelos de simulación numéricos en la literatura para evaluar la dispersión de contaminantes provenientes de los volcanes es escasa, y más bien es a posteriori que se realizan estudios similares, generalmente enfocados hacia la deposición de ceniza (5) utilizando isopacas, lo que se circunscribe a un radio menor por su mayor peso y subestima las consecuencias de los gases más livianos.

Si bien el modelo de Pluma Gaussiana tiene sus limitaciones, éstas hacen el error del lado más conservador y seguro para las poblaciones, ya que éste no incluye el efecto de deposición por gravedad, deposición en seco, deposición por lluvia o reacciones de neutralización en la atmósfera. Esto resulta en líneas de isoconcentraciones y radios de evacuación más amplios, con un margen de seguridad añadido. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el modelo de Pluma Gaussiana tiene un error inherente del 200% en el cálculo de las concentraciones (4), que debe incorporarse al análisis de sensibilidad al establecer isoconcentraciones y radios de evacuación.

Por último, los factores meteorológicos influyen grandemente para que en un punto se dé un evento de contaminación crítica. El viento, la estabilidad atmosférica y el tipo de lluvia son, entre otros, los principales factores que se deben tener en cuenta. El primero para el transporte horizontal, y el segundo factor para la difusión y transporte en la vertical, influyen grandemente para que en un lugar se den eventos de contaminación severa; y la lluvia, como principal agente removedor de particulado y gases hidrosolubles en la atmósfera.



Recomendaciones

- A. La simulación numérica de los efectos esperados por las erupciones volcánicas es un recurso de bajo costo, y con un potencial de beneficio muy alto, por lo que los países eminentemente volcánicos, como es el caso de la región centroamericana, deben invertir en minimizar el riesgo recurriendo a ésta.
- B. Los servicios médico-asistenciales en un radio de 40 kilómetros de los volcanes activos deben estar preparados para afrontar emergencias, principalmente respiratorias (tos, irritación de garganta, edema de glotis, edema pulmonar crítico) y oculares, en cualquier época del año por un incremento en la actividad volcánica, y poder observar a los afectados por 48 horas.
- C. A falta de otros datos, los estudios (18) que indican la proporción de la población que muestra diversos síntomas (durante la actividad fumarólica) deben utilizarse para estimar los números de personas con necesidades inmediatas de atención en caso de un evento de mayor magnitud, ya que estos serían los más sensibles y primeros en llegar a centros asistenciales.
- D. Si bien los datos de concentraciones atmosféricas de contaminantes puede depender de las condiciones meteorológicas, los datos históricos (1,2,,7.8) indican que debe establecerse un primer radio de evacuación total y preventivo de 5 kilómetros en forma inmediata, en caso de actividad incrementada o erupción intensa. Este radio corresponde a la zona de alto riesgo por lava, piedras, ceniza y gases.
- E. Debe comunicarse a los pobladores y visitantes el grado de riesgo y tiempo de evacuación requerido para ponerse a salvo. Se estima que la evacuación en caso de actividad incrementada o erupción intensa no debe sobrepasar los 8 minutos, tiempo en que las condiciones meteorológicas pueden hacer llegar los gases tóxicos hasta un radio de 5 kilómetros.
- F. Deben monitorearse los volcanes cercanos a poblados en un radio de 40 kilómetros en forma continua, y correlacionando las concentraciones a distintas distancias con las condiciones meteorológicas y la actividad observada (por otros medios) del volcán. Se puede así establecer las concentraciones de "línea base" (fumarólicas) esperadas para cada tipo de atmósfera, así como concentraciones de "alerta" (actividad incrementada o erupción intensa) basadas en la simulación o datos históricos. Los puntos idóneos de monitoreo también pueden derivarse de la simulación numérica (ver gráficas 1-10), considerando que existen puntos físicos que coinciden con máximos en las concentraciones, que harían más temprana la detección de desviaciones.
- G. Los datos históricos deben ser utilizados en la planificación territorial, incorporando zonas de protección. Los datos derivados de la simulación y del análisis epidemiológico-toxicológico deben ser usados para estimar las necesidades de evacuación y recursos médico-asistenciales, en caso de actividad incrementada o erupción intensa.
- H. Debe asumirse, de la forma más conservadora, que la dispersión de contaminantes es igual en todas las direcciones. Asimismo se debe recordar que el modelo de Pluma Gaussiana no contempla los efectos de una posible inversión atmosférica, por lo que una pluma que el modelo indica se empieza a depositar a una distancia considerable del volcán, puede depositarse, en caso de inversión, muy cerca del volcán y con muy poca dilución debido al componente vertical descendente generado.



- I. La cooperación necesaria para monitorear los volcanes y sus efectos en forma idónea (medición de gases atmosféricos, monitoreo geológico, monitoreo de salud, monitoreo de efectos ambientales, mediciones meteorológicas), debe realizarse en un marco intersectorial, lo que permite mejor utilización de recursos y agrega valor a los datos. La incorporación de representantes de las comunidades aledañas a los volcanes provee a los científicos de un ímpetu realista.
 - J. Es necesario realizar estudios de mesoescala para ver la influencia de los parámetros meteorológicos y su interacción con la topografía, empleando dichos estudios en los planes de contingencia por emergencia volcánica con miras a la mitigación de los fenómenos naturales.
7. Barquero H., Jorge. Volcán Poás-Costa Rica. 1ra. Ed. San José, Costa Rica, 1998
 8. Barquero H., Jorge. Volcán Arenal-Costa Rica. 1ra. Ed. San José, Costa Rica, 1997
 9. Baxter et al. Poás Volcano Acid Precipitation Assessment Project, Final Report, No. 2-07/97
 10. Canadian Council on Occupational Health and Safety, Base de Datos CCINFO, 1997
 11. Castro, Vilma. Nota de Investigación No. 6. Radiación Solar Global en Costa Rica. MAG-IMN, 1987.
 12. Coen, Elliot. An Introduction to the Study of Volcano Irazú. Geophysical Magazine, Vol. 32, No. 2. Japan Meteorological Agency, Tokyo, 1994.
 13. Comisión Nacional de Emergencias: "¿Viven Ustedes cerca del Volcán Poás?", San José, Costa Rica, 1994.
 14. Dóndoli, César. Informe Técnico No. 15. Dirección de Geología, Minas y Petróleo, Ministerio de Industrias, Costa Rica, 1965.
 15. Dóndoli, César. Informe Técnico y notas geológicas No. 15-B. "The Volcanoes of the Central Section of Costa Rica, Dirección de Geología, Minas y Petróleo, Ministerio de Industrias, Costa Rica, 1965.
 16. Eslava-Ramírez, Jesús Antonio. Cambios atmosféricos asociados a la erupción del Nevado del Ruíz, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Alvarez L., No. 4, Bogotá-Colombia, 1994.
 17. Faivre-Pierret, R. & Le Guern, F. "Health Risks linked with Inhalation of Volcanic Gases and Aerosols," Forecasting Volcanig

Bibliografía

1. Alfaro, María del Rosario, Contaminación del Aire, UNED, 1998.
2. Alvarado-Induni, Guillermo. Costa Rica-Land of Volcanoes, Gallo Pinto Press, 1993
3. Alvarado-Induni, Guillermo. Los Volcanes de Costa Rica, UNED, 1989
4. American Institute of Chemical Engineers (Center for Chemical Process Safety), Safety, Health and Loss Prevention in Chemical Processes, New York, 1990.
5. American Journal of Public Health, "Health Effects of Volcanoes: An Approach to Evaluating the Health Effects of an Environmental Hazard," Marzo 1986 Suplemento Volumen 76.
6. Araña Saavedra & Ortiz Ramos, Volcanología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1984.



- Events. Developments in Volcanology 1, Elsevier Science Publisher, Holanda, 1983.
18. Gamboa M., Domingo Francisco. The Prevalence of Respiratory Symptoms associated with Emissions from the Poas volcano, Costa Rica. Ministerio de Salud, San José, C.R., 1997.
 19. Liao Lee, Alfonso, Climatología de las áreas circunvecinas al Volcán Poás. Ministerio del Ambiente y Energía-Instituto Meteorológico Nacional, 1997.
 20. Machado, Frederico. Elementos de Vulcanologia, Estudos, ensaios e documentos No. 119, Junta de Investigações do Ultramar, Lisboa, Portugal, 1965.
 21. MASICA, OPS-OMS, San José, Costa Rica, Feb. 1999
 22. NIOSH, Pocket Guide to Chemical Hazards, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Services, Centers for Disease Control, 1990.
 23. OPS Criterios de Salud Ambiental No. 8, Oxidos de azufre y partículas en suspensión. Publicación Científica No. 424, OPS/OMS, Washington, DC, EEUU, 1982.
 24. Sandoval et al., Efecto de las Emisiones del Volcán Poás sobre la Vegetación, Costa Rica. III Simposio Centroamericano y del Caribe: Química Analítica Ambiental y Sanitaria. Ingeniería y Ciencia Química, Vol. 16, No. 2, Colegio Federado de Químicos e Ingenieros Químicos de Costa Rica, 1996.
 25. Seminario Vulcanológico USA-CR, 1982.
 26. Sheridan, M.F. & Barberi F., Explosive Volcanism, Elsevier Press, Amsterdam, Holanda, 1983
 27. Smithsonian Institution, Global Volcanism 1975-1985.
 28. Zarate, Eladio. Nota de Investigación No. 2. Instituto Meteorológico Nacional. IMN 12/78.



TABLA 1
Valor de las variables utilizadas en el Modelo Matemático

VARIABLE	VOLCÁN ACTIVO	VOLCÁN EN ERUPCIÓN
H (m.s.n.m.)	1450	1450
Q (ton/día)	12000	700000
U (m/s)	1-10	1-10
X (km)	1-40	1-40
Z (m.s.n.m.)	500 y 1000	500 y 1000

TABLA 2
TOXICIDAD DEL DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

Concentración (MG/M ³)	Ambiente urbano (1)	Ambiente trabajo (2)	Efectos agudos (3)	Efectos crónicos (4)	Emergencias (5)
0.17	Muy bueno				
0.20				+Morbilidad	
0.20-0.36	Bueno				
0.50				+Mortalidad	
0.80					ERPG-1
0.80-1.40	Malo				
+1.40	Muy malo				
3.0			Afectación de función pulmonar reversible		
5.0		TLV-TWA			
8.0					ERPG-2
10.0		TLV-STEL			
13.0			Constricción Bronquiolos	Daño permanente al pulmón	
14.0			Irritación leve de ojos		
21.0			Irritación nariz y garganta		
24.0			Irritación moderada a severa de ojos		
24.0-32.0			Dolor de ojos y lagrimeo		
40.0					ERPG-3
53.0			Irritación molestia del sistema respiratorio		
133.0			Quemadura de cómea		
266.0			IDLH		
1330.0			Asfixia por constricción pulmonar		

Notas a Tabla 1

- (1) Baxter, Report on the Quality of Air We Breathe, tomado de Gamboa
- (2) Criterios de OSHA y ACGIH (CCINFO)
- (3) Datos CCINFO
- (4) Datos OPS/OMS
- (5) AIHA (CCINFO)



TABLA 3 Calidad del aire

CALIDAD DEL AIRE	CONCENTRACIÓN SO ₂ (ug/m ³)
MUY BUENA	< 172
BUENA	172-358
MALA	358-1430
MUY MALA	1430

Nota a Tabla 3: tomada de Baxter (9), Report on the Quality of Air We Breath

TABLA 4
Valores de las constantes para calcular los coeficientes de difusión

Estabilidad atmosférica	X ≤ 1 km				X > 1 km		
	a	C	d	f	c	d	f
A	213	440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	106.5	1.149	3.3	108.2	1.098	2.0
C	104	61.0	0.911	0	61.0	1.098	0
D	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13.0
E	50.5	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.30	-34.0
F	34	14.35	0.74	-0.35	62.6	0.18	-48.6

TABLA 5
CLASES DE ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA

Velocidad de viento	DÍA			NOCHE	
	INTENSIDAD SOLAR				
	FUERTE	MODERADA	DÉBIL	NUBLADA	CLARA
(m/s)					
> 2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D



GRÁFICO 1 - 5 VOLCÁN EN ERUPCIÓN INTENSA

GRÁFICO 1

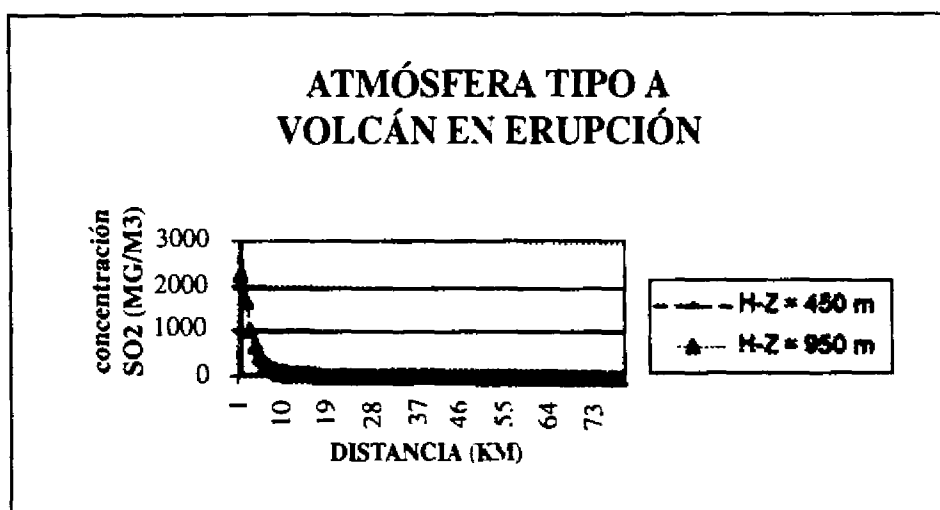


GRÁFICO 2

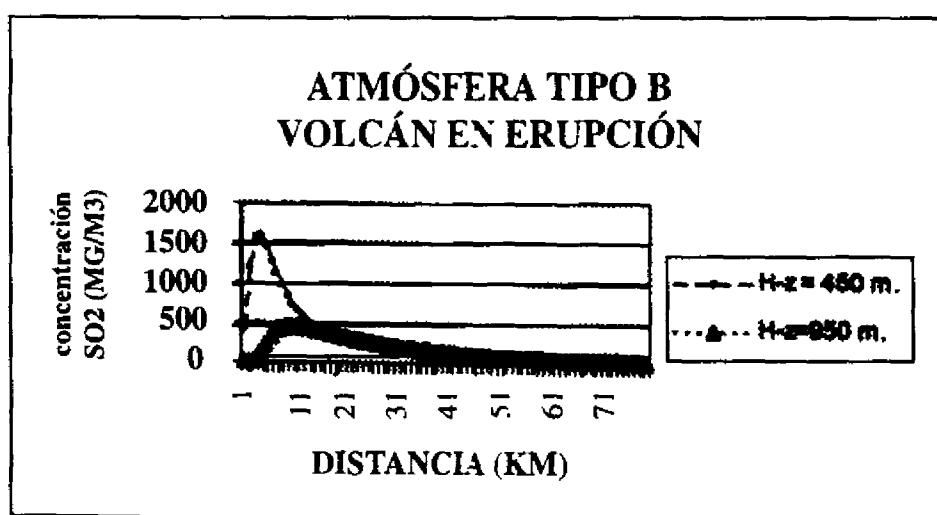


GRÁFICO 3

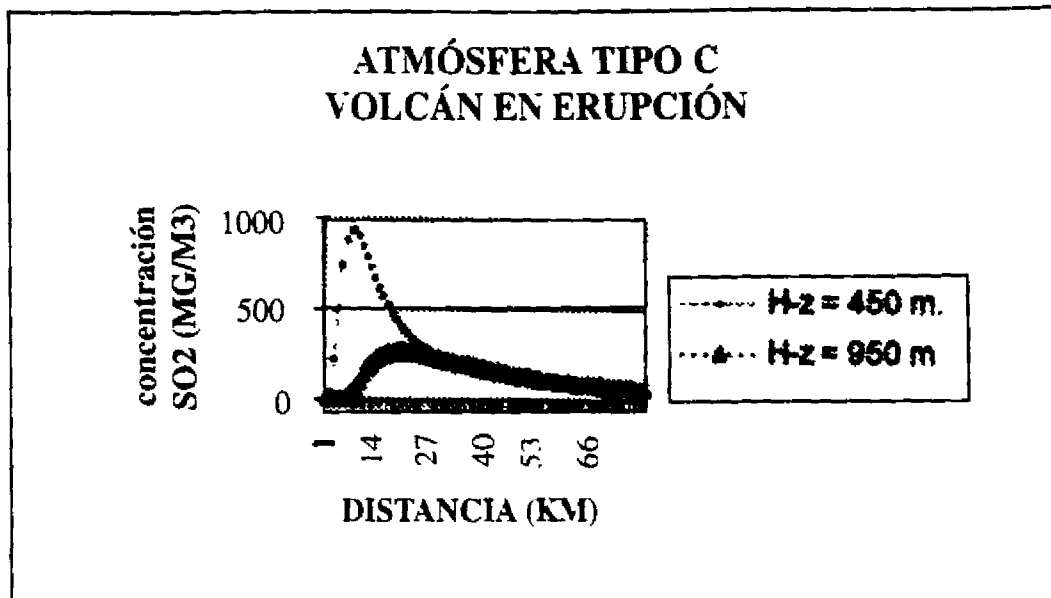


GRÁFICO 4

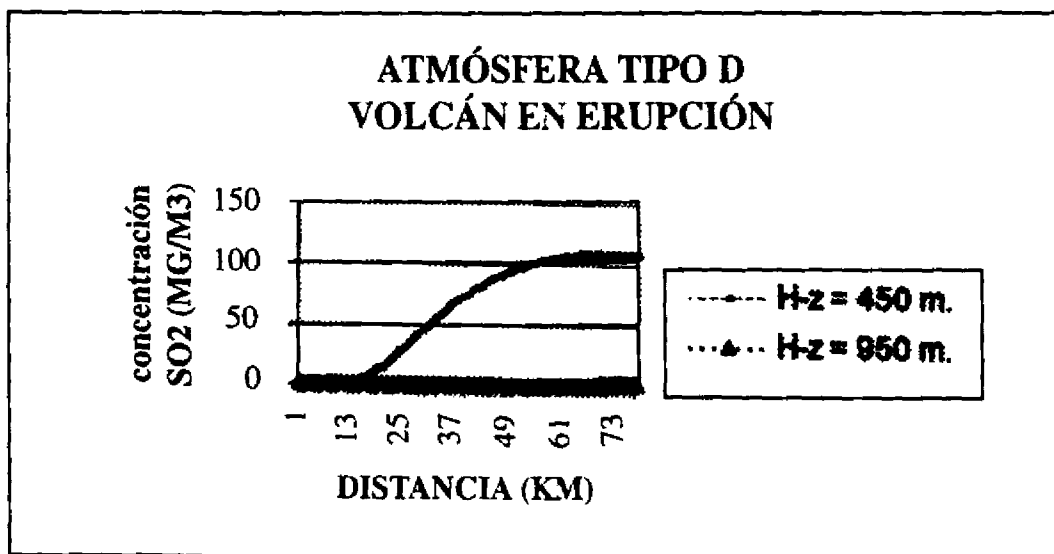
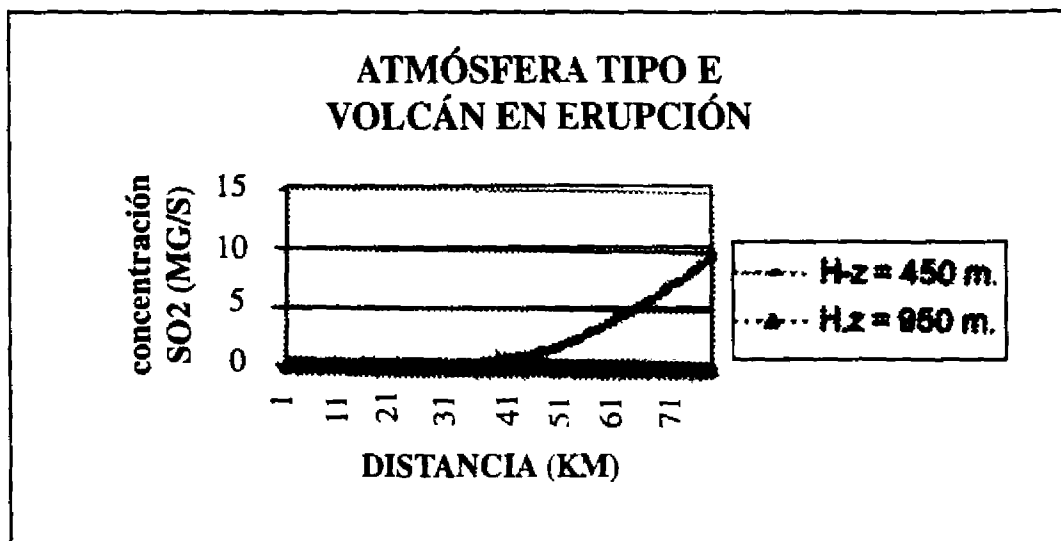


GRÁFICO 5



GRÁFICOS 6-10 VOLCÁN ACTIVO

GRÁFICO 6

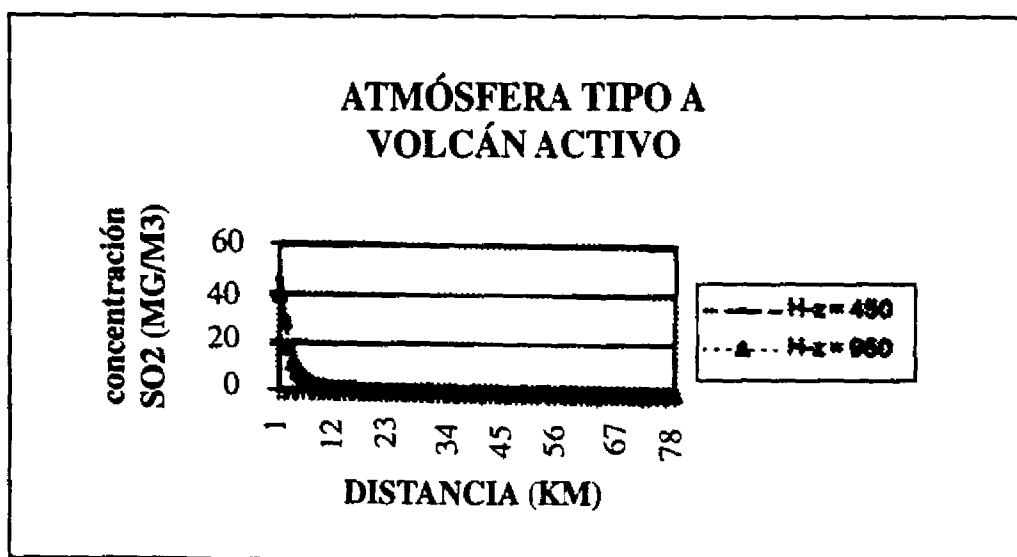


GRÁFICO 7

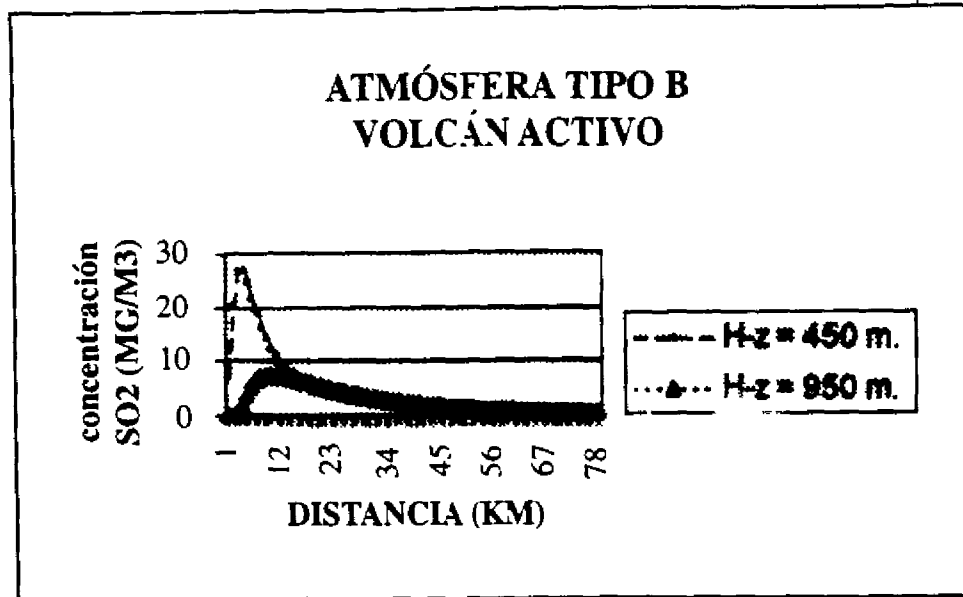


GRÁFICO 8

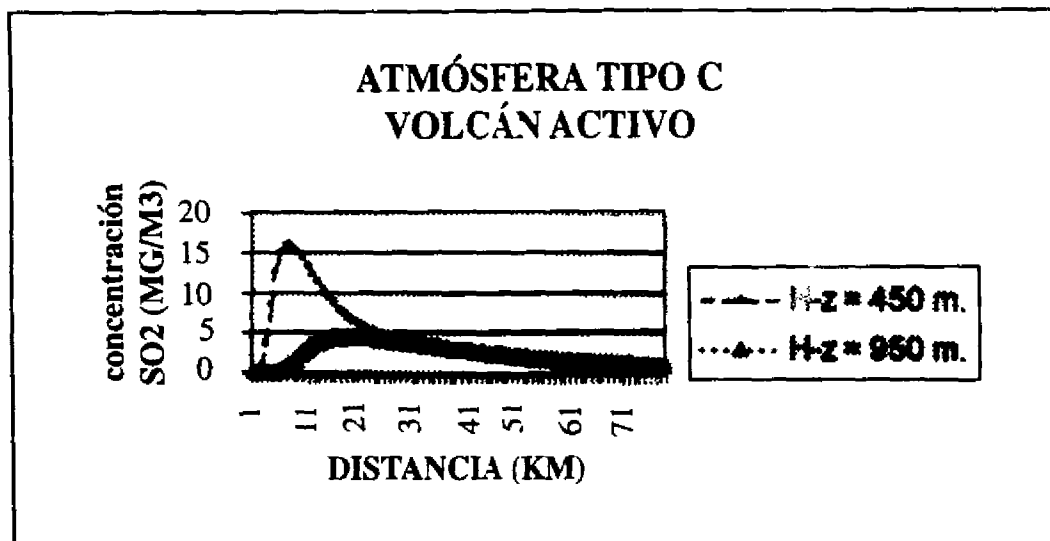


GRÁFICO 9

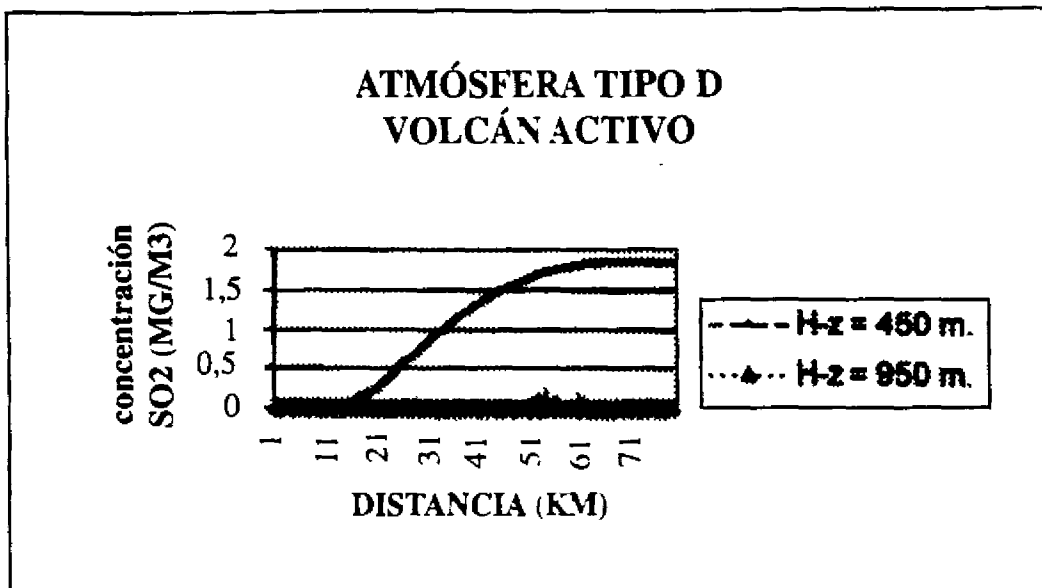


GRÁFICO 10

