

7. EVALUACION DEL RIESGO VOLCANICO

Conforme una definicion de la UNESCO, el riesgo volcanico representa la posibilidad de la perdida de la vida humana, la propiedad o la capacidad productiva.

El riesgo puede considerarse como producto de tres factores: valor, vulnerabilidad y peligrosidad.

El valor puede ser expresado por el numero de vidas humanas, del costo material de una propiedad o de la capacidad productiva (en nuestro caso il conjunto de todos estos valores en el area de San Salvador y en el area de la futura urbanizacion: Distrito 7), los cuales estan expuestos a un determinado peligro.

La vulnerabilidad, es una medida de la proporcion del valor arriba definido que podria perderse como consecuencia de un determinado evento. El tercer punto, la peligrosidad, puede ser definida como la probabilidad que una zona determinada (area del proyecto) se interesada, en un determinado periodo de tiempo, de un fenomeno destructivo.

En vulcanologia, la peligrosidad representa por lo tanto una funcion compleja de la probabilidad que un volcan produzca un determinado tipo de erupcion y que tal erupcion interese a una determinada zona (en nuestro caso el area del proyecto). La evaluacion cuantitativa, de la peligrosidad resulta normalmente bastante dificil, debido a la imposibilidad de obtener datos suficientes para realizar un analisis estadistico, confiable del comportamiento eruptivo de un volcan.

La evaluacion es basada en cada caso, en la reconstruccion precisa de la historia eruptiva, a partir de la cual, se pueden obtener indicaciones sobre los diferentes tipos de eventos eruptivos esperados, cada uno de ellos debera ser despues, evaluado bajo el perfil de la vulnerabilidad potencial.

El area del proyecto esta expuesta al riesgo de erupciones de tres aparatos volcanicos:

- complejo volcanico San Salvador
- volcan San Jacinto

- complejo volcanico Ilopango

Los estudios realizados en el ambito del proyecto han permitido de recoger la informacion que permite formular una evaluacion, aun cuando sea para un caracter preliminar, del riesgo volcanico en el area metropolitana de San Salvador y en el area del Distrito 7.

7.1 Riesgos relacionados con la actividad del complejo volcanico San Salvador

Resulta evidente de la descripcion estratigrafica y de la actividad historica, que el complejo volcanico de San Salvador es alimentado de un magma basico con un grado de evolucion pequeno o moderado. La actividad volcanica que resulta es por lo tanto, aquella característica de magmas con viscosidad relativamente baja y relativamente bajo contenido de volatiles, donde como consecuencia, los fenomenos explosivos siendo mas peligrosos para la vida humana, tienen un papel moderado.

En base a los resultados obtenidos en los estudios del terreno y a las descripciones relacionadas a la actividad historica, resulta claro que los eventos que deben ser considerados para evaluar la peligrosidad conectada con la actividad del volcan, son los siguientes:

- A - flujo de lava (actividad efusiva)
- B - caida de cenizas, escorias y lapilli; "surges" piroclasticos (actividad explosiva)
- C - flujo de lodo (lahar)

Ademas, deben ser considerados con cuidado los peligros ligados a la inestabilidad de los flancos del volcan, aun cuando, estos fenomenos no pueden tener ninguna relacion con la actividad volcanica.

En lo que respecta particularmente a la actividad del volcan San Salvador, se debe destacar que toda la actividad historica es caracterizada por la concomitancia de fenomenos efusivos con moderada actividad explosiva de tipo estromboliano o ultra-estromboliano (ver tab. 5).

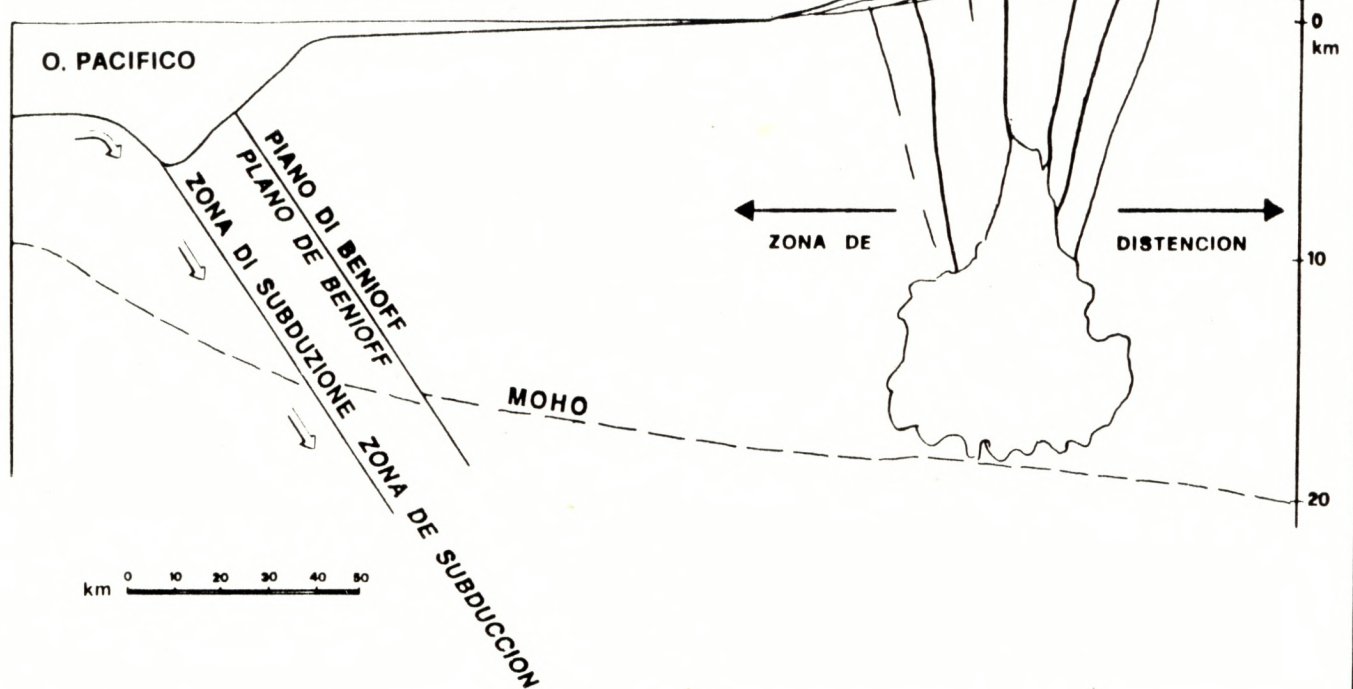
Los unicos fenomenos explosivos de cierta peligrosidad son debidos, al desarrollo de la interaccion entre el magma y el

ANO	TIPO DE ERUPCION	FRACTURA ERUPTIVA	TERREMOTOS ASOCIADOS (INTENSIDAD)	ZONA AFECTADA POR LOS TERREMOTOS	DURACION DE LA ERUPCION
1658 a 1659	Estromboliana excentrica. Formacion del cono El Playon y emision de flujos lavicos hacia el NE. Distancia maxima recorrida por las lavas = 8 km. Superficie cubierta = 10 km2.	NW-SE	La erupcion fue precedida por una serie de terremotos con intensidad VIII en la escala Mercalli.	Destruccion de San Salvador, Quezaltepeque, Nejapa y Apopa.	?
1671 (?)	Probable ultra estromboliana (hidromagmatica) con emision de grande cantidad de cenizas. Ximenez (1722) dice que las cenizas llegaron hasta Comayagua, Honduras.	?	La erupcion fue precedida por un terremoto destructivo con intensidad, VIII en la escala Mercalli (Terremoto de San Bartolomeo, segun Larde y Larin, 1950).	Destrucciones en San Salvador.	?
1806 (?)	Erupcion casi desconocida talvez del Playon.	?	Terremoto con intensidad VIII en la escala Mercalli. Destrucciones en San Salvador		?
1917 (6 de junio)	Estromboliana excentrica. Formacion de los crateres Los Chintos y Boqueroncitos y emision de coladas de lava hacia el N. Distancia maxima recorrida por las lavas = 12 km.	NNW-SSE y sucesivamente NW-SE	La erupcion fue precedida por un terremoto con intensidad VIII en la escala Mercalli	Destrucciones en San Salvador	10 dias
1917 (29 de junio)	Estromboliana Intracratrica con formacion del cono Boqueroncito.	NNW-SSE			130 dias

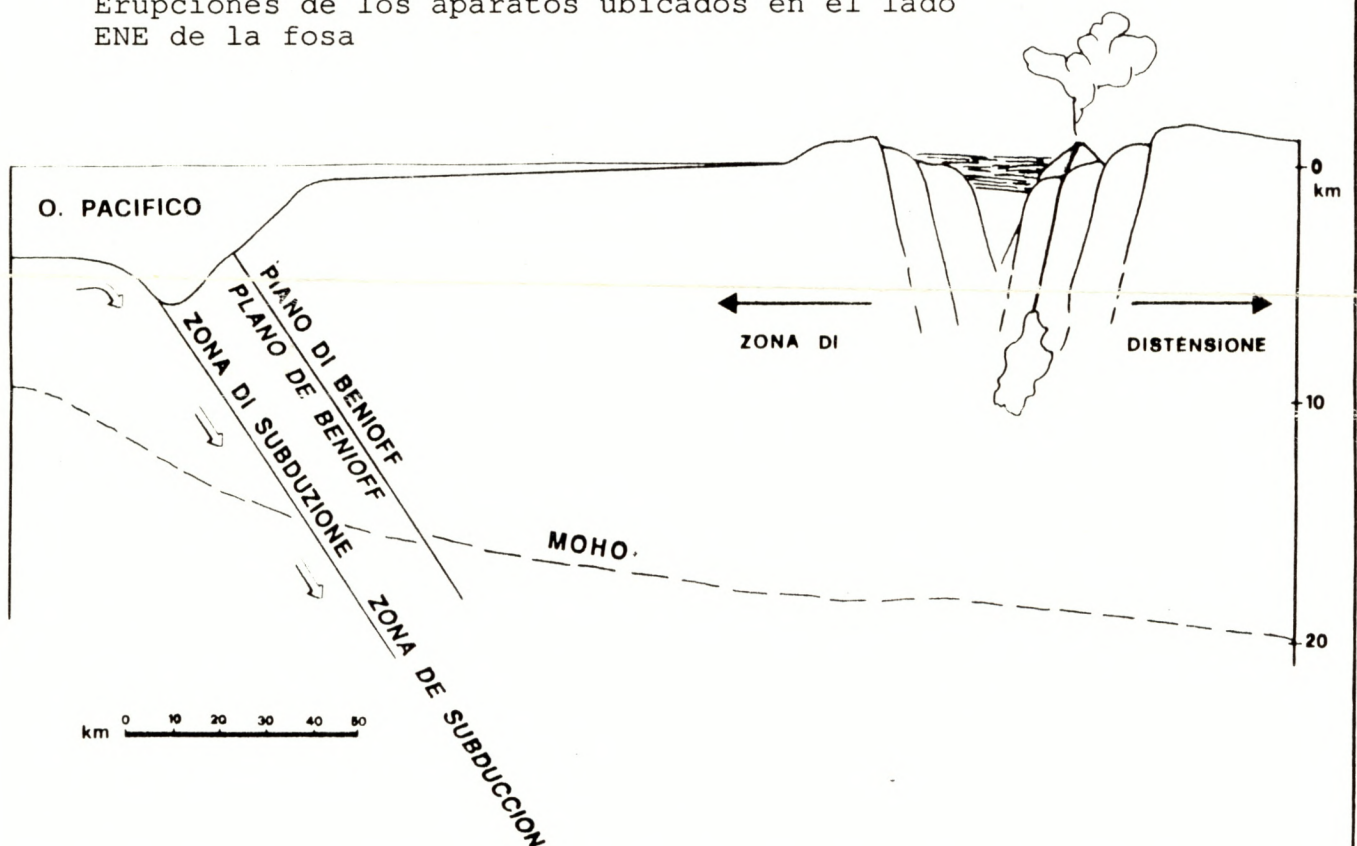
Tab. 5 Erupciones historicas del complejo volcanico
San Salvador.

Fase 1

- Erupciones explosivas con deposición de grandes volúmenes de ignimbritas, lahar, etc. a consecuencia de una tectónica de distensión muy violenta (formación de la Cordillera del Balsamo, Mio-Plioceno).



Fase 2 - Formación de la fosa mediana (Plioceno - Pleistoceno) por colapso vulcano - tectónico después de la fase ignimbrítica. Erupciones de los aparatos ubicados en el lado ENE de la fosa



Fase 3 - Situación actual

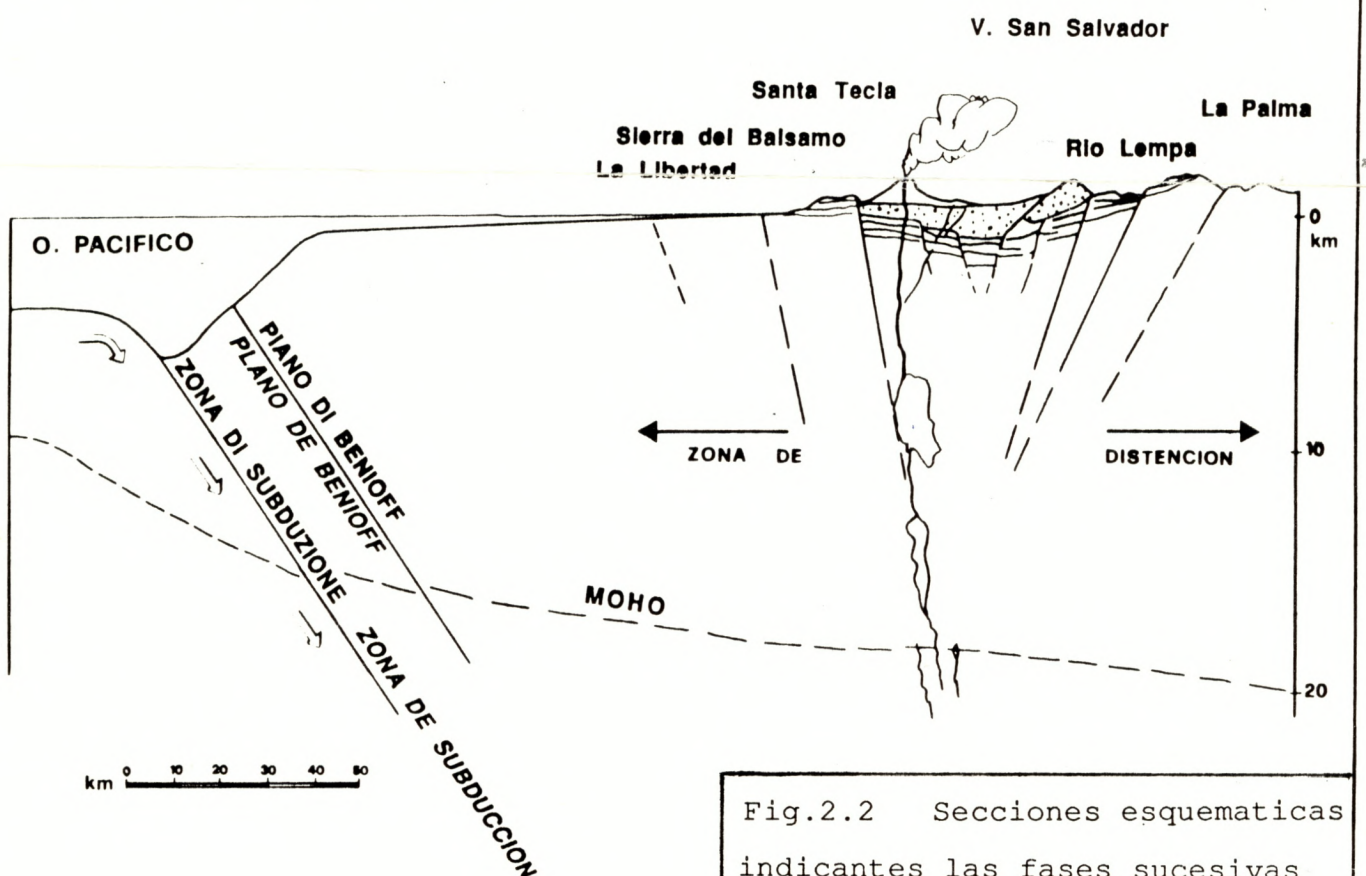


Fig.2.2 Secciones esquemáticas indicantes las fases sucesivas de formación de la fosa mediana.

89° 20'

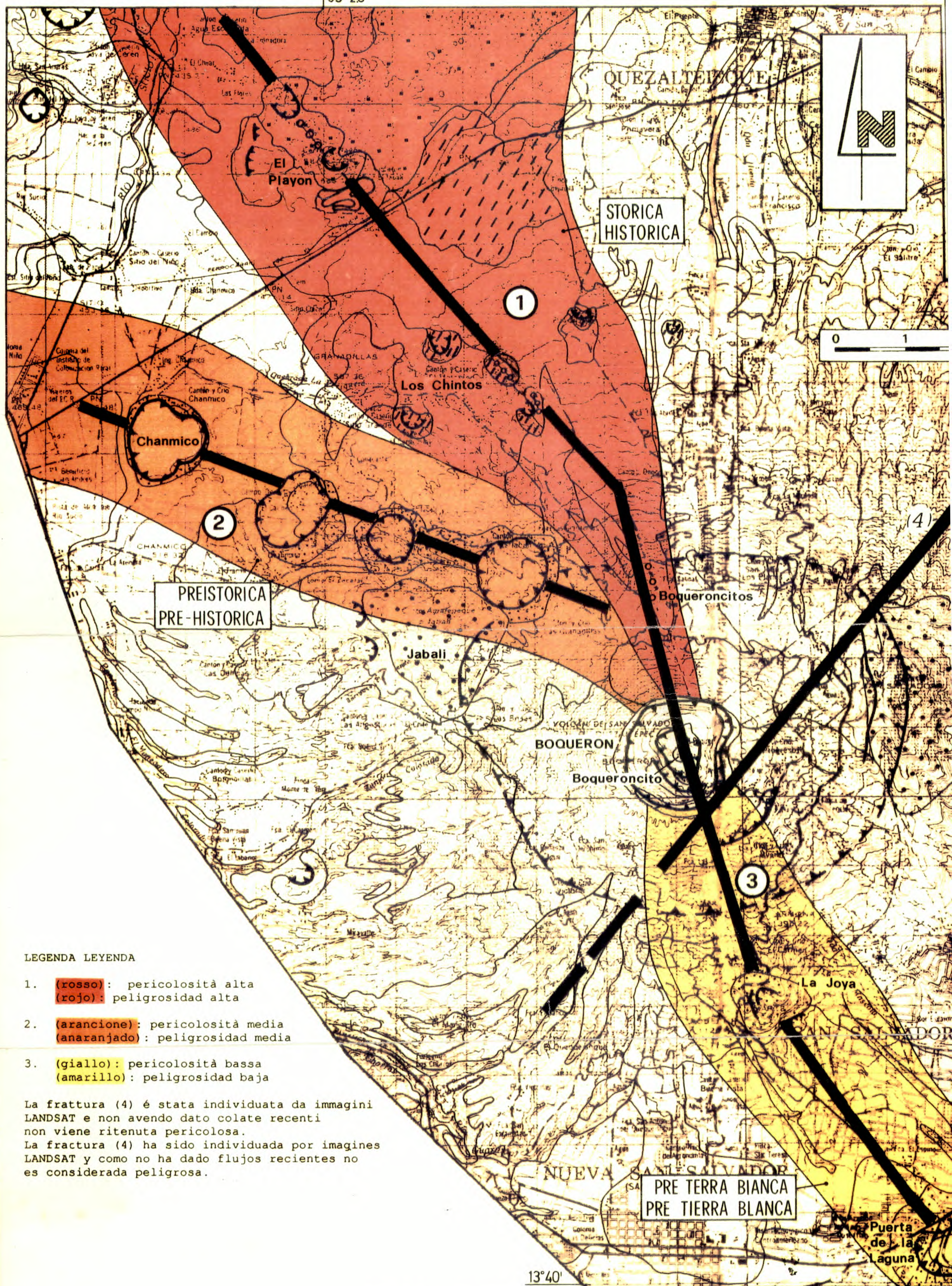


Fig. 7.1 Complejo volcanico San Salvador. Mapa de peligrosidad relativo a la abertura de fracturas (lineas negras espesas). Los numeros crecientes indican la prioridad relativa de peligrosidad.

agua de lagos a veces hospedados en el crater del Boqueron y que han producido en algunas ocasiones del pasado, volúmenes muy grandes de cenizas y depósitos de "surge" piroclástico. El episodio magmático explosivo de mayor relieve producido por el volcán San Salvador, es aquel que ha generado, el llamado "Fall gris" (fig. 5.4). Se trata de un evento de peligrosidad muy superior a aquellos de todas las erupciones sucesivas del volcán, como lo demuestra el hecho que ha producido depósitos de escorias pumíticas que tienen en toda la zona, espesores de 60-80 cm, y la presencia de relacionados depósitos de flujos piroclásticos, aun cuando poseen una extensión areal limitada.

Teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- que se trata de un evento de edad relativamente antigua (se recuerda que esta separado de los depósitos de la TBJ de los productos de las dos erupciones precedentes del Ilopango con paleosuelos bien desarrollados);
- que ningún fenómeno de este tipo se ha producido en la actividad histórica del volcán;
- que un evento de esta naturaleza que puede ser definido de tipo sub-pliniano, necesita que el magma logre un adecuado grado de evolución (viscosidad, contenido de volátiles) y que este hecho a su vez implica un período de residencia relativamente largo del magma, en el sistema de alimentación del volcán;
- que el tiempo transcurrido de la última erupción de magma básico (1917), no parece suficiente porque el magma haya alcanzado aquel nivel de evolución;

se considera como extremadamente improbable que una erupción del tipo "Fall gris" pueda actualmente producirse en el volcán San Salvador. Esta erupción no vendrá por lo tanto considerada en la evaluación de la peligrosidad la cual será concentrada en los fenómenos que han ocurrido en aprox los últimos 2000 años post TBJ.

7.1.1 Peligrosidad de los flujos lavicos

La emision de flujos lavicos representa junto con las explosiones del tipo estromboliano, la actividad predominante en el San Salvador. En efecto, los flujos lavicos constituyen la mayor parte del cono actual (paredes del crater del Boqueron).

La emision de lava puede ocurrir ya sea del crater central del Boqueron o bien, mas probablemente de fracturas eruptivas que se abren en el flanco del edificio del San Salvador. Considerando que solo una erupcion de certa energia que permita al crater de rellenarse rapidamente, puede alimentar significativos flujos sobre los flancos externos del Boqueron, es en la abertura de las fracturas emisivas excentricas que se debe atribuir la maxima peligrosidad entre los eventos efusivos del volcan. En la fig 7.1 estan indicadas las zonas mas susceptible a la abertura de fracturas eruptivas, como se ha evidenciado de los estudios estructurales y de la historia eruptiva pasada. Las tres zonas identificadas, conectadas al sistema tectonico dominante NNW, NW y WNW, han sido clasificadas segun una graduacion relativa de probabilidad deducida en base a la frecuencia y edad de los fenomenos en el pasado.

Los flujos lavicos emitidos en epoca historica han recorrido la distancia maxima desde la boca de 7-8 km, produciendo graves danos en las zonas invadidas.

Para la ultima erupcion del 1917 se estima, en base a los datos geologicos, un volumen de lava de aproximadamente 30 millones de m³. Considerando que la fase efusiva duro solo 10 dias se calcula una tasa de emision de magma de 3 millones de metros cubicos al dia, resultando un valor elevado (0.9-1.3 millones m³/dia en la erupcion del Etna del 1983) que explica la distancia relativamente importante alcanzada en tiempo breve por los flujos lavicos.

En consideracion a estos valores elevados de la tasa de emision, del grado bajo de cristalizacion de estas lavas (y su consecuente baja viscosidad) se considera poco probable que fenomenos eruptivos del futuro puedan superar las

distancias maximas, logradas desde la boca, en las erupciones del pasado.

Las zonas indicadas en la figura 7.1 como sujetas a peligro de emision lavica, han sido obtenidas en base a estas consideraciones y mantienen la misma clasificacion en terminos de probabilidad relativa de la abertura de las fracturas de alimentacion a ellas asociadas.

En conclusion, la zona del Distrito 7 no tiene algun problema de peligrosidad por invasion lavica. Las zonas sujetas a riesgo son, en cambio, las siguientes:

- la parte somital del volcan, particularmente el area comprendida entre el Picacho, el bordo de la caldera y el Boqueron;
- el sector meridional del volcan con posibilidad de invasion lavica en las colonias situadas mas hacia el occidente de San Salvador y tambien Santa Tecla. En particular, el sector comprendido entre la bocas eruptivas de la Joya y Puerta de la Laguna, estan sujetas a peligro de invasion lavica, aunque la zona no ha tenido fractura eruptiva de almenos desde hace 2000 anos aproximadamente.

7.1.2 Peligrosidad de los fenomenos piroclasticos

7.1.2.1 Peligrosidad de la caida de material piroclastico

La componente explosiva de las erupciones historicas del San Salvador, consiste esencialmente en proyeccion balistica de bombas y fragmentos lavicos y en la emision de cenizas y lapilli a la atmosfera. Se trata de una actividad de tipo estromboliana con una energia un poco mas alta de lo normal. A parte del problema de la ocurrencia episodica de "surge" piroclasticos, el cual sera discutido en el proximo parrafo, el fenomeno mas frecuente asociado a esta erupcion es la caida de material piroclastico de granulometria variada. Los materiales mas gruesos (bombas, escorias y en parte tambien lapilli) caen en la proximidad del crater, mientras que el material fino (cenizas), puede ser por otro

lado, transportado a una distancia bastante considerable del centro de emision.

La energia de la erupcion que determina la altura de la columna eruptiva, y la tasa de emision, la granulometria, la densidad y la concentracion de las particulas, la direccion y la velocidad del viento a diversa alturas (cotas) son los parametros principales que influyen la distribucion de los depositos piroclasticos de caida. La mayor parte de estos datos no son conocidos para las erupciones del volcan de San Salvador.

Datos obtenidos en el Servicio de Meteorologia e Hidrologia, indican la direccion del viento (entre la superficie y 600 m de altitud) en la zona del proyecto, senalan ademas la predominancia de los vientos orientales con velocidad bastante variable de 1-4 a 11 m/s; en el periodo de octubre a marzo vienen tambien registrados vientos septentrionales con velocidad de 4 a 14 m/s; finalmente, entre junio y octubre se registran vientos meridionales.

Estos datos son dificiles de utilizarse por que no proveen indicaciones sobre las variaciones de direccion y velocidad con la altura. Alguna informacion se ha obtenido a traves de tablas relativa a la circulacion atmosferica en las regiones tropicales (Newell et al., 1971; tab 6). Estos datos indican que para alturas de 1500 y 3000 m, en todas las estaciones, el viento dominante es oriental con velocidad media entre 4 y 6 m/s. Tales datos concordan con las evidencias de campo que indican, en efecto, una predominante distribucion al oeste del crater de los depositos piroclasticos finos de caida (vease en particular la descripcion de la distribucion de las cenizas del Talpetate). Las observaciones de campo senalan entonces, que para erupciones con la energia de aquella historica del San Salvador, el peligro ligado a la caida de material piroclastico es muy limitado en el area del proyecto con la unica excepcion de la ciudad de Santa Tecla. Se ha considerado util, en efecto, intentar una modelizacion del fenomeno de caida en las condiciones mas proximas a aquellas que probablemente existen en San Salvador, con el objetivo de obtener una distribucion de los productos.

PRESION (m b a r)	COTA (k m)	VELOCIDAD (m/sec)			
		Dic - Feb	Mar - May	Jun -Ago	Sep - Nov
8 5 0	1 . 5	5 . 6	4 . 1	1 . 5	3 . 7
7 0 0	3	3 . 1	3 . 8	3 . 3	3 . 8

De Newell R.E. et al. ,1972.

Tab. 6. Valores medidos de la velocidad del viento del este
(componente horizontal) a 10° Lat. N.

La modelización de la caída de los depósitos piroclásticos se ha efectuado utilizando la siguiente ecuación (Armienti et al., 1987):

$$\frac{dc}{dt} + \frac{dU_x C}{dx} + \frac{dU_y C}{dy} + \frac{dU_z C}{dz} + \frac{dU_s C}{dz} = K_x \frac{d^2 C}{dx^2} + \frac{d^2 C}{dy^2} + \frac{d^2 C}{dz^2} + S$$

donde:

C = concentración de las partículas

U = campo de los vientos

K = coeficiente de difusión horizontal

Vs = Velocidad de caída para cada clase granulométrica considerada

S = exprese la condición de la columna eruptiva.

PARAMETROS PARA LA SIMULACION

1) Viento: ha sido utilizado un campo de vientos orientales con una componente meridional cero de la velocidad y se ha considerado una velocidad igual para todas las elevaciones. Se han asumido el valor promedio mas elevado de la Tabla 6 (5 m/s) y el mas bajo (1.5 m/s).

2) Altura de la columna: considerando que el crater actual del volcan esta situado a 1800 m de altura sobre el nivel del mar, se ha considerado una altura de la columna eruptiva de 5 km, la cual seguramente representa el limite maximo de peligrosidad para erupciones típicas del San Salvador.

La distribucion de masa en el interior de la columna eruptiva se ha aproximada mediante la siguiente ecuacion (Armienti et al., 1987).

$$m(z) = \frac{Q A \exp^2 (1-Z/H_c) \exp A (Z/H_c-1)}{H_c (1- (1 + A) \exp - A)}$$

donde:

H_c = altura maxima de la columna

A = parametro adimensional que determina la cota a la cual se logra la maxima concentracion de masa. Para la simulacion ha sido asumida igual a 2. Esto equivale a una columna donde la maxima concentracion de las particulas alcanza una elevacion de 2.5 km.

3) Masa emitida y velocidad de caida en la columna: no hay datos disponibles relativos a la masa total de magma emitido durante la fase explosiva del San Salvador. Ha sido asumido un valor de 40×10^9 kg por analogia con otras erupciones conocidas similares a aquellas características del San Salvador. Estos puede ser considerado un valor maximo y han sido calculados tambien los efectos de una masa 10 veces menor. Al final de la simulacion esa masa ha sido dividida en cuatro diferentes clases granulometricas, correspondientes a cuatro distintas velocidades de caida (Tabla 7).

Las velocidades de caida han sido calculadas segun la siguiente formula (Armienti et al., 1987):

$$V_s = \frac{8dp_g}{3SD}$$

donde:

d = diametro de la particula

p = densidad de la particula (asumida igual a 2 gr/cm³ para todas las clases).

g = aceleracion de la gravedad

S = densidad del aire

D = factor de forma (asumida igual a 3.6 considerando que se trata de escorias, lapilli y cenizas).

F 1	Vs (m/s)	PORCENTAJE EN PESO
------------	-----------------	---------------------------

- 1	3. 4	5
0	2. 4	1 5
1	1. 7	6 0
2	1. 2	2 0

Tab. 7 Distribucion porcentual de la masa
piroclastica en funcion de la granulometria
(Fi) y de la velocidad de caida (Vs)

Se asume que todas las clases granulometricas poseen la misma distribucion en el interior de la nube eruptiva.

4) Coeficiente de difusion: Considerado el tipo erupcion se evalua de 2000 m²/s (Macedonio et al, 1987).

Resultados de la simulacion.

Los resultados de la simulacion se han presentado en las figuras 7.2a,b y 7.3a,b, como valor total del deposito correspondiente a la suma de las cuatro clases granulometricas consideradas. Las curvas estan expresadas en kg/m². En la tabla 8, se indican los valores de concentracion en el suelo obtenidos de la simulacion a varias distancias viento abajo al crater, variando la velocidad del viento y la masa de la columna.

Los datos indican que, aunque en el caso de una masa muy elevada de material emitido, la concentracion al suelo del material piroclastico en la zona del proyecto y, en general, en el area metropolitana de San Salvador, no son tales de representar un serio peligro. Lo que es debido a la direccion de los vientos dominantes que desplazan las cenizas en direccion opuesta, respecto a la ciudad y a la zona del Distrito 7.

Las zonas mas seriamente expuestas, son aquellas en el occidente, y todavia, una vez mas, no puede considerarse exenta de este peligro la ciudad de Santa Tecla.

7.1.2.2 Peligrosidad de los "surges" piroclasticos

Los llamados "surges" piroclasticos estan entre los fenomenos mas peligrosos que pueden suceder durante las erupciones volcanicas explosivas. El mecanismo de genesis comunemente aceptado para explicar la formacion de los "surges" es por colapso gravitacional de la columna eruptiva. Durante la erupcion, la columna integrada por una mezcla de gases y fragmentos de magma aun plastico puede alcanzar condiciones tales que el peso de los fragmentos no esta mas sostenido del empuje de los gases de tal manera que se verifica el colapso de la parte externa de la columna misma. Se produce así un flujo (gas + particulas) que cayendo verticalmente a la base de la columna se propaga

MASSA (kg) NELLA COLONNA	DISTANZA DAL CRATERE (sottovento) (km)	VELOCITA' VENTO (m/s)	CONCENTRAZIONE AL SUOLO DEI DEPOSITI DI CADUTA kg/m ²
-----------------------------	---	-----------------------	---

40 x 10 ⁹	10	5	200
4 x 10 ⁹	10	5	20
40 x 10 ⁹	10	1.5	0.1
40 x 10 ⁹	20	5	50
40 x 10 ⁹	45	5	10 (g/m ²)

Tab. 8 Concentracion en el terreno de los depositos
piroclasticos de caida (simulacion)

despues paralelamente a la superficie del suelo. La porcion superior (menos densa) del material colapsado origina los "surges" mientras que la parte inferior (mas densa) origina los flujos piroclasticos. La velocidad de propagacion de este flujo, puede ser del orden de cien kilometros por hora cerca del crater.

La resistencia del aire provoca, de algun modo, una rapida disminucion de velocidad alejandose del crater. Este tipo de fenomenos se desarrollan frecuentemente cuando el magma fragmentado por una explosion estromboliana entra en contacto con el agua externa (ya sea esta superficial o subterranea). El resultado de la interaccion entre el magma y agua es la formacion de una nube cargada, de vapor de agua y de particulas finas derivadas de la alta fragmentacion del material piroclastico. Los fenomenos de colapso requieren columnas particularmente densas cargadas de particulas y pueden ser favorecidos por fenomenos particulares cuales la disminucion del contenido de gas o variaciones del diametro del conducto; son en general, caracteristicos de erupciones de mayor energia (pliniana, sub-pliniana) de aquellas normales del San Salvador.

En efecto, en la actividad del San Salvador, depositos con las caracteristicas tipicas de los "surges" piroclasticos de origen freatomagmatico han sido reconocidos, con seguridad, unicamente en las tobas de Talpetate. La distribucion de estos depositos interesa los sectores occidental y sur-occidental del volcan (aun una vez mas esta comprendida la zona de Santa Tecla) con espesores superiores a 1m, mientras que no se encuentran ni en el area metropolitana ni en la zona del Distrito 7). Tambien en la erupcion del 1671 se reportan muchas cenizas que pueden ser ligadas, aunque con duda, a fenomenos hidromagmaticos. En ambos casos, es muy probable que la produccion de estas cenizas sea debida a la fragmentacion de la escorias estrombolianas por la interaccion explosiva del agua de un lago que ocupaba el fondo del Boqueron. Este lago ha existido hasta la ultima erupcion del 1917 y debia entonces tener un volumen de agua muy reducido, considerando que fue totalmente evaporizada sin producir apreciables depositos fuera del crater. La

ausencia actual del lago, rende sustancialmente nula la posibilidad que estos fenomenos puedan ocurrir en la proxima erupcion del Boqueron. Si bien el hecho que los depositos de "surge" del Talpetate no han sido encontrados en la zona metropolitana, sugiere que han tenido una amplitud limitada y que la mayor parte de las tobas Talpetate dispersas al oeste del crater son el resultado predominante de la caida de la nube piroclastica dispersa por el viento.

Aun cuando, fenomenos de este tipo resultan por lo tanto poco probables en la actividad del volcan se ha creido util por razones de completamentacion de evaluar la posibilidad que los "surge" puedan llegar a interesar la zona del proyecto y el area metropolitana. Para este fin, se ha adoptado el modelo del cono de energia (Malin y Sheridan, 1982) y la relativa elaboracion reciente de Armienti y Pareschi, (1987). De acuerdo a este modelo, la distancia recorrida de los "surges" piroclasticos originados por el colapso gravitacional de la columna eruptiva, asi como tambien sus capacidad de superar los relieves y obstaculos morfologicos, depende de la inclinacion del cono (angulo con la superficie horizontal) y de su altura (distancia H vertical entre el crater y el nivel en la columna del cual se ha originado el colapso). Para las erupciones con la energia correspondiente a aquellas del San Salvador, se calculan normalmente inclinaciones del cono de energia de aprox 30° . Teniendo en consideracion estos hechos, se puede observar en la fig. 7.4 (figura fuera del texto) como la zona del distrito 7 se puede considerar fuera del area de posible influencia de "surge" piroclasticos productos del Boqueron actual. En efecto, para una inclinacion del cono de energia de 30° , seria necesaria una columna eruptiva mas alta de 10 km por que los flujos originados de su colapso puedan alcanzar el centro del Distrito 7. Una elevacion asi, requiere un tipo de erupcion que no tiene ninguna probabilidad de ser producida por el volcan Boqueron.

Por otro lado, utilizando una columna con altura mas racional para estos tipos de erupcion, por ejemplo 1500 m, el cono de energia debera tener un imposible bajo angulo de

8° para interesar el Distrito 7. Igualmente poco probable es que estos fenomenos pueden afectar al area metropolitana de San Salvador.

Es de observar tambien que el sector meridional de la ciudad, situado al SE del volcan a lo largo de una potencial trayectoria de flujos piroclasticos que no tiene mas la proteccion de la barrera morfologica del Picacho (Fig. 7.5; figura fuera del texto), no esta del todo exente de esto peligro. En particular, el margen de la ciudad mas cercano al volcan, ubicado a solo 7 km en linea recta al crater del Boqueron, podria estar afectado de los "surges" piroclasticos originados por una columna de altura comprendida entre 1800 y 3000 m y con una inclinacion del cono de energia comprendida entre 20° y 30°. Estos valores ya sea de H como de α son poco probables pero no tales de poder ser excluidos de la futura actividad del volcan.

El elemento mas tranquilizante permanece por tanto en la ya citada falta de un lago en el interior del crater del Boqueron. En el caso que un tal lago se forme en el futuro, la peligrosidad del "surge" piroclastico deberia ser muy seriamente considerada en los escenarios de la proteccion civil, al menos para la franja mas vecina al volcan en la parte meridional de la ciudad de San Salvador y para la ciudad de Santa Tecla.

7.1.3 Peligrosidad de los flujos de lodo ("lahar")

Se trata de flujos de lodo a veces turbulentos, constituidos por material volcanico fino y agua que frecuentemente contienen y transportan bloques grandes. No presentan ninguna evidencia de seleccion o estratificacion y cambian los caracteres texturales en funcion de la variacion de la relacion entre material solido transportado y el agua.

Los "lahares" pueden originarse por dos distintos mecanismos. Algunos no tienen alguna relacion directa con la actividad volcanica y se forman por mobilizacion de materiales sueltos saturados de agua, que descienden de los flancos del aparato canalizandose a lo largo de los cauces y

que pueden haber sido causados por las lluvias muy violentas o los terremotos. Entran en una categoria muy particular de deslizamientos que se diferencia por la modalidad de emplazamiento del material pero que tiene las mismas causas ligadas a la inestabilidad del edificio volcanico. Fenomenos de este tipo han sucedido tambien en epocas recientes en el edificio del San Salvador y estan por tanto destinados a repetirse tambien en el futuro. Estos han sido mas especificamente tratados en el informe geomorfologico.

La segunda categoria de "lahares" es aquella de origen volcanica y puede producirse ya sea directamente (fenomenos hidromagmaticos con relacion magma/agua bajo) o bien indirectamente por mobilizacion, debida a la lluvia, del material encoherente acumulado en la actividad explosiva sobre las laderas abruptas del cono. Tambien en este caso el flujo de lodo se canaliza a lo largo de la red hidrografica y se expande dispersandose rapidamente hacia la base del edificio. Las observaciones de campo han relevado pocos y modestos ejemplos de depositos de "lahares" a lo largo de los cauces en las laderas del volcan. La probabilidad que estos fenomenos sucedan en el futuro es sin embargo relativamente baja y esta posteriormente disminuida por la actual imposibilidad de producir grandes acumulaciones de cenizas a consecuencia de la desaparicion del lago craterico. Todavia tomando en consideracion las lluvias torrenciales que episodicamente aparecen en la zona, una norma prudencial sugiere que se evite las urbanizaciones en coincidencia con las salidas de los valles cortados o seccionados en el flanco del volcan. Los principales de estos valles son indicados en la fig 7.6.

7.2 Riesgos relacionados con la actividad del San Jacinto

La actividad mas reciente del San Jacinto es constituida solo de extrusion de domos lavicos con pequenas coladas lavicas asociadas, sin haber significativos episodios explosivos. Esta actividad es datada a 0.77-1 MA y por tanto no hay trazas de actividad eruptiva del San Jacinto en

los ultimos 2.000 anos. Se puede asi concluir que el San Jacinto entre en la categoria de los volcanes practicamente extintos, para los cuales resulta casi cero la posibilidad que erupen aun, en el futuro. A la luz de los datos disponibles se puede concluir que la peligrosidad de la erupcion del San Jacinto debe considerarse practicamente inexistente porque es muy baja la probabilidad que este erupcione de nuevo en el futuro.

7.3 Riesgos relacionados con la actividad de la caldera Ilopango

La caldera del Ilopango pertenece a una categoria de volcanes caracterizados por:

- camara magmatica con alimentacion superficial, de grandes dimensiones, en el interior de la cual el magma se diferencia hasta alcanzar niveles de evolucion (explosividad) muy altos;
- largos intervalos de reposo entre una erupcion y otra.

La edad reciente (1.700 anos) de la ultima grande erupcion pliniana, la sucesiva expulsion, ocurrida hace 100 anos, de lava viscosa (domos de las Islas Quemadas) indican que el sistema debe ser considerado todavia activo. Faltan datos cronologicos de la historia eruptiva del pasado, de los cuales se pueda obtener una especie de relacion magnitud - frecuencia de las erupciones del volcan y de esta estimar un indicativo periodo de retorno. Esto, como ya senalado, necesitaria un trabajo de campo y de laboratorio mucho mas detallado y preciso de como sea posible en el actual proyecto urgente. Por otro lado, la energia elevada de la erupcion de la TBJ y su edad reciente, sugieren que el volcan es todavia activo y por tanto tales estudios son altamente recomendables. Una erupcion del tipo de la TBJ representaria hoy una catastrofe de proporciones espantosas. Se recuerda de hecho que mas de 3000 km² han sido devastados (depositos de 1 m) y otros 7.000 km² han sido cubiertos enteramente (espesores superiores a 50 cm).

Erupciones ignimbricitas de energia similar son por suerte raras, porque requieren el alcance de condiciones

especificas, grandes volúmenes de magma evolucionado con altas concentraciones de gases, que a su vez implican largos tiempos de residencia antes de la erupción. El Ilopango pertenece a aquella categoría de volcanes caldera (como Amatitlán en Guatemala, Campi Flegrei en Italia, Long Valley en California, Rabaul en Nueva Guinea y otros más), de los cuales podrían ocurrir erupciones con enorme poder destructivo. En el caso del Ilopango, la proximidad a la capital lleva indiscutiblemente a tomar algunas, medidas preventivas, las cuales podrían ser permitidas de:

a) un estudio preciso, destinado a estimar con la máxima exactitud posible la energía de la erupción esperada, a través de la elaboración de un modelo del comportamiento del volcán;

b) La puesta en operación de un adecuado sistema de control instrumental del volcán.

En la presente situación, es inútil hacer una evaluación de peligrosidad; en el caso de una erupción como aquella de la TBJ, toda la zona metropolitana de San Salvador y la zona del Distrito 7 serán enteramente devastadas. Del punto de vista de la zonificación del peligro, toda el área del proyecto corresponde para aquel tipo de evento, a una sola zona con ninguna probabilidad de supervivencia. Por otro lado la probabilidad de acontecer un evento tal en un espacio de tiempo de unos 100 años, es en el momento poco probable.

En el verano 1986 una nube de gas (principalmente CO₂) expulsada del lago volcánico de Nyos en Camerun ha matado más de 1700 personas; este evento catastrófico y uno similar ocurrido el año antes en un otro lago del Camerun han atraído la atención sobre un nuevo peligro relacionado a lagos crátericos como lo de Ilopango. Evaluar este peligro significa conocer antes de todo las causas que han originado el fenómeno de Nyos y determinar si similares condiciones pueden producirse a Ilopango.

Esta operación es difícil porque las causas están todavía objeto de controversa interpretación. Los científicos en efecto concordan solo en excluir un origen volcánico directo

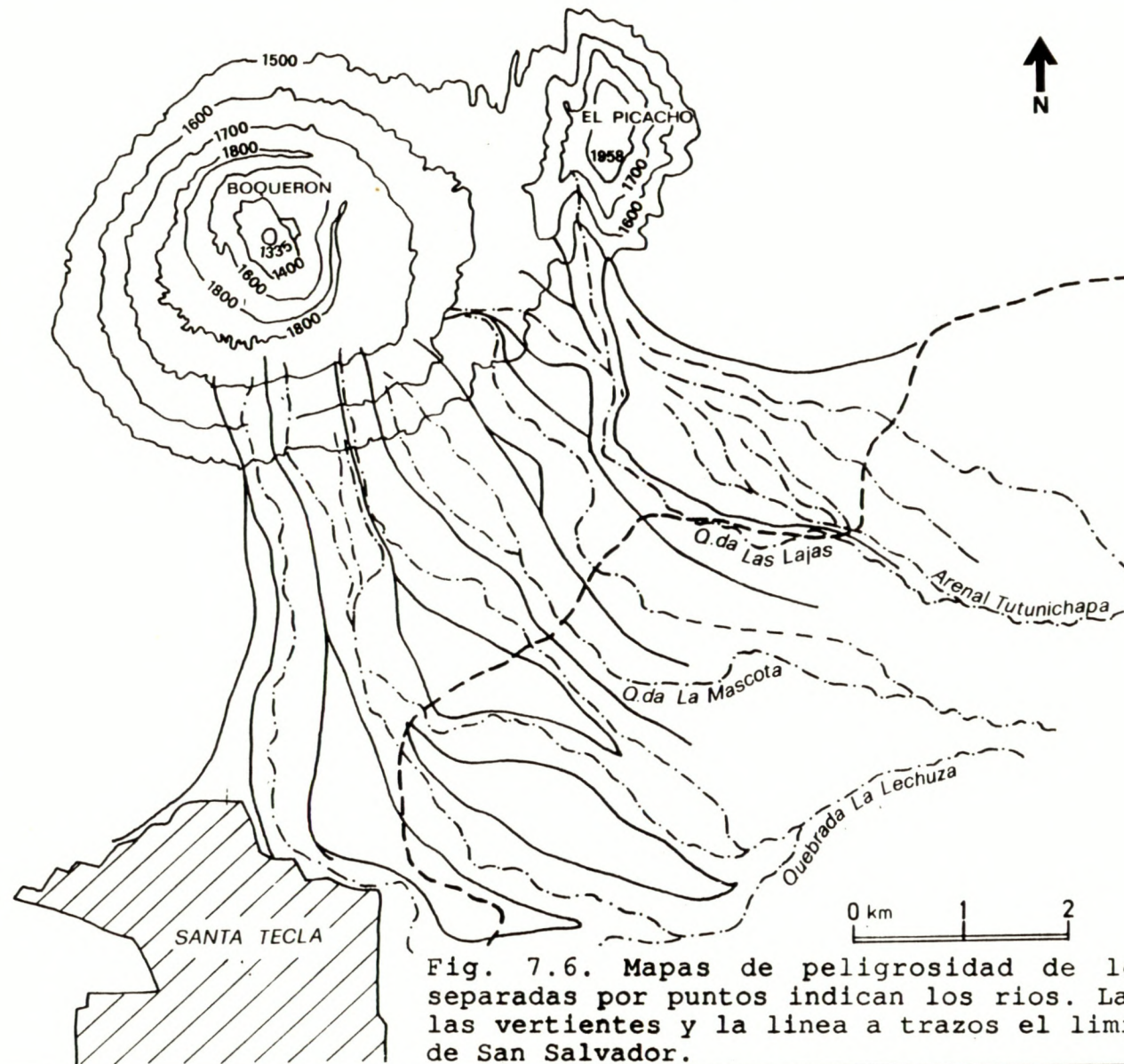


Fig. 7.6. Mapas de peligrosidad de los "lahares". Las líneas separadas por puntos indican los rios. Las líneas continuas indican las vertientes y la línea a trazos el limite aproximado de la ciudad de San Salvador.

(con intervencion de magma). Las dos hipotesis mas acreditadas son las siguientes:

- un origen por explosion freatica ocurrida en el subsuelo del lago y causada por acumulacion de vapor, CO₂ y menores cantidades de otros gases, bajo la cubierta impermeable de los sedimentos del fondo del lago.

La explosion habria provocado una inyeccion de gas en el lago, el calentamiento del agua y la salida consecuente de la nube de gas.

- un origen llamado "limnico" segun el cual la nube de gas se habria originado desde la parte profunda del agua del lago, saturada en CO₂ por procesos de putrefaccion y por lento aporte desde el bajo. La nube se habria producido como consecuencia del desbaratamiento del agua del lago debido a factores externos (deslizamientos o ondas de "sessa").

En el conjunto los datos disponibles hacen la primera hipotesis mas probable.

En el caso de Ilopango faltan datos que puedan permitir de evaluar la posibilidad de la existencia de condiciones tales de determinar el uno o el otro de los fenomenos hipotizados.

La posibilidad de un evento de tipo "limnico" podria ser facilmente controlada a traves de una indagacion geoquimica sobre las aguas profundas del lago.

La posibilidad de un evento "freatico" no puede ser excluida pero por ser evaluada de modo mejor, se requiere una extension de los estudios.

7.4 Peligrosidad de erupcion para el area metropolitana de San Salvador.

En la fig. 7.7 estan representados todos los riesgos de erupcion volcanica que pueden afectar al area metropolitana de San Salvador:

- peligrosidad de flujo lavico (complejo volcanico San Salvador);
- peligrosidad de lahar (complejo volcanico San Salvador);
- peligrosidad de caida de material piroclastico (complejo volcanico San Salvador y caldera Ilopango).

Como ya explicado antes, la evaluacion del riesgo de la caldera Ilopango es indicativa; la curvas isopacos reportadas en la figura son preliminares y en gran parte basadas sobre los datos de Hart y Steen Mc Intyre (1983).

En las secciones de fig. 7.8 se ha tratado de dar una representacion esquematica de los distintos tipos de erupciones y de los fenomenos que las acompañan en relacion a la actividad del complejo volcanico San Salvador y de la caldera Ilopango.

8 . EFECTOS DE LOS FENOMENOS ERUPTIVOS MAS PROBABLES Y MEDIDAS DE PROTECCION CIVIL RELACIONADAS

En este capitulo, seran descritos los tipos de erupciones mas probables en el area en examen y las medidas de seguridad que se pueden adoptar para establecer una proteccion permanente o temporal contra los diversos fenomenos destructivos que los acompanan.

En particular se examinaran los siguientes tipos de erupcion:

- flujos de lava;
- caida de cenizas;
- "surge" piroclasticos;
- flujos de lodo;
- erupciones cataclismicas.

8.1 Flujos de lava

Los flujos de lava, indipendientemente de sus viscosidad ya ser alta o baja, destruyen virtualmente todo lo que no pueda moverse o ser alejado de su trayecto.

Las areas cubiertas por lava, no pueden ser explotadas o utilizadas en actividades agricolas por muchos anos; sin embargo la alteracion meteorica transforma gradualmente la lava solidificada en un suelo muy fertil.

La velocidad de movimiento de los flujos de lava es generalmente baja y permite a personas o animales alcanzar a tiempo lugares seguros.

En pendientes inclinadas, la lava fluida puede moverse mas rapidamente que una persona y es posible que flujos adyacentos que se unan, atrapen a alguien que se encuentre en su curso.

De todas maneras, en general, los flujos de lava no representan peligro para la vida humana.

Varias son las acciones de proteccion contra las coladas lavicas. El primer intento de desviar un flujo de lava se dio en Sicilia en 1669, cuando una colada del Etna, se dirigia hacia Catania. Docenas de hombres se cubrieron con

pieles humedas de vaca como proteccion contra el calor y utilizando barras de hierro lograron abrir una brecha sobre el flanco de la colada. Por lo que permitio a la lava fluida, dirigirse en otra direccion.

Desafortunadamente el nuevo flujo de lava amenazo al pueblo de Paterno, suspendiendo entonces, sus habitantes la operacion de desviacion. La salida lateral abierta se cerro y el flujo principal continuo hasta alcanzar la ciudad de Catania.

A partir de esta fecha se han utilizado otros metodos para desviar las coladas; entre los cuales estan:

- Bombardeos: flujos de lava basaltica de baja viscosidad han sido bombardeados por aviones con el objeto de abrir nuevos canales, o crear barreras para proteger valiosas propiedades.

El bombardeo se puede efectuar solo con buenas condiciones atmosfericas pues a menudo la visibilidad es poca y las violentas turbulencias del aire pueden hacer peligrosa la operacion.

Los misiles aire-tierra podrian dar mejores resultados pero todavia no se han utilizado. Tambien en las mejores condiciones, el bombardeo no es muy preciso y se corre el riesgo de que una bomba caiga en el sitio errado y aumente el flujo en una direccion equivocada.

Es ademas, dudoso que el bombardeo pueda tener un efecto significativo cuando se tienen flujos de considerable espesor. Una alternativa utilizada en el Etna en mayo de 1983, fue la de colocar manualmente explosivos en huecos poco profundos perforados en la corteza lavica para abrir una brecha y desviar el flujo.

- Barreras para desviacion: se ha observado en muchas ocasiones que la lava tiende a fluir alrededor de obstaculos tales como casas o muros de piedra, en vez de abatirlos. Durante la erupcion del Vesuvio en 1906, la lava, poco viscosa, fluyo alrededor de las casas de Bosco Trecase sin destruirlas. La lava mas viscosa como la emitida por el Etna en 1983 abatio en vez un edificio. Durante esta erupcion fue

intentada la desviacion de una colada que amenazaba un albergó. La operacion que se efectuó, construyendo barreras de considerable costo (utilizando buldoceres y camiones) dio buenos resultados.

- Enfriamiento por rociadores de agua: la idea de enfriar los flujos de lava con grandes cantidades de agua ha sido discutida por mucho tiempo. La primera prueba a gran escala de parar la avanzada de una colada enfriandola, se hizo en Islandia en Heimay en 1973. En este caso la lava se aproximaba al pueblo de Vestmannayiar y a su puerto, vital para la supervivencia de la poblacion de esa isla. La operacion de enfriamiento del frente lavico inicio cuando esto era vecino a la entrada del puerto, duro cerca de 150 dias y se utilizaron 6.2 millones de metros cubicos de agua.

La operacion dio buenos resultados, la lava fue detenida y no alcanzo al puerto, pero el costo fue muy alto (1.6 millones de dolares) y por esto se discutió mucho sobre la validez de la entera operacion. Pero, dado que el frente de lava en avanzada, significaba la destruccion de propiedades, cualquier desaceleracion del flujo implicaba la salvacion de valiosos bienes.

Es imposible decir cuantos metros hubiera podido avanzar la lava, si no se hubiera enfriado, pero lo cierto es que las instalaciones del puerto se salvaron y el costo de la operacion fue completamente justificado.

8.2 Caida de ceniza

Los efectos de la caida de ceniza varian ampliamente dependiendo del volumen del material emitido y de la duracion o intensidad de la erupcion. Las nubes de polvo y pequenas particulas suspendidas en el aire pueden permanecer en la atmosfera por largos periodos (dias o semanas) y se pueden expandir hasta enormes distancias (cientos o miles de kilometros).

En efecto, el material fino derivado de algunas grandes erupciones ha dado la vuelta al entero globo terrestre a

grandes alturas en la atmosfera y ha producido efectos significativos en el clima mundial.

En las zonas circundantes a un volcan en erupcion, la caida de grandes cantidades de cenizas puede recubrir tierras cultivadas destruyendo las cosechas e inutilizandolas temporalmente.

Las cenizas que se acumulan sobre los techos de las casas pueden romperlos y tambien cuando la mayor parte del material fragmentado es enfriado y solidificado, antes de caer al suelo, pequenas particulas pueden todavia permanecer suficientemente calientes y provocar incendios.

El polvo en el aire puede provocar problemas respiratorios tanto en el hombre como en los animales y puede contener sustancias toxicas (entre las cuales, fluor) que pueden contaminar agua y alimentos.

A pesar de que la caida de cenizas causa danos sobre grandes areas, nunca en tiempos historicos ha sido directamente responsable de perdidas de vida, representando una amenaza mucho menos grave que otros fenomenos eruptivos. De lo antes expuesto, se recava que los efectos principales de la caida de cenizas son:

- obscuridad completa
- enterramiento de estructuras bajas
- sobrecarga de los techos
- recubrimiento de vegetacion y cosechas.

La caida de grandes cantidades de ceniza en erupciones de gran energia puede portar en la proximidad del volcan, a una obscuridad completa y a una reduccion de la visibilidad de tal forma que una luz intensa no se puede ver a unos pocos metros de distancia.

Muy frecuentemente, instalaciones indispensables como por ejemplo hidrantes pueden permanecer enterrados por las espesas cubiertas de cenizas, de tal forma que resulta dificil encontrarlos cuando se los necesita para apagar incendios causados accidentalmente o por caida directa de material incandescente. Este problema puede superarse solo manteniendo durante el fenomeno eruptivo los tubos conectados bajo presion constante y convenientemente alejados del suelo.

La causa principal de los danos, se debe todavia a la acumulacion de ceniza sobre los techos de los edificios que se rompen a causa de la sobrecarga especialmente si esta se encuentra humeda.

En areas expuestas a los fenomenos de caida (San Salvador y sobre todo Santa Tecla pueden ser afectadas por caida de cenizas del Boqueron) es necesario tener preparado, un programa de trabajo y equipos para la remocion de las cenizas; se debe ademas hacer un inventario sobre la resistencia de los techos de las casas de la zona y calcular los maximos espesores de materiales que pueden soportar considerando que la ceniza volcanica seca tiene un peso especifico de 0.5 a 0.7 ton/m³, pero que cuando esta humeda tal valor puede llegar a 1 ton/m³. Tambien se debe tener en cuenta que los techos con fuerte inclinacion costruidos con lamina no tienen la ceniza y no se inflaman con los fragmentos incandescentes. En las zonas alrededor del volcan S.Salvador, especialmente Santa Tecla donde los fenomenos de caida son una amenaza importante, la puesta en vigor de codices de construccion adecuados, puede reducir considerablemente el riesgo de danos. La caida de cenizas puede tener ademas otros efectos indirectos importantes; la ceniza puede contener componentes volatiles (como el fluor) altamente toxicos y tambien en las nubes se pueden generar fuertes campos electricos con consecuentes descargas y relampagos que interfieren con las ondas de radio danando, algunas veces, instalaciones electricas y provocando incendios en edificios o sobre la vegetacion.

Estos efectos deben ser considerados en la planificacion de las operaciones de ayuda.

Cuando se tienen fuertes caidas de ceniza es posible que en areas densamente pobladas como San Salvador se encuentre dificultad en ayudar a todos los habitantes; un programa de informacion masiva puede, en este caso ser un factor importante para ayudar a las personas a tomar decisiones en momentos de emergencia.

Las transmisiones de radio pueden informar: sobre las rutas mas aconsejables para evacuar un area interesada de caida de ceniza (por ejemplo indicando una via perpendicular al

viento); sobre como se puede evitar la respiracion de polvo utilizando filtros de tela humedos en la boca o en la nariz, o como protegerse la cabeza y los hombros utilizando sombreros y capas gruesas; ademas pueden avisar a la poblacion sobre la acumulacion de cenizas en los techos.

Consejos de proteccion muy utiles en una situacion de emergencia son ademas:

- el personal dedicado al rescate y socorro ubicado en areas de fuerte caida de cenizas deben protegerse con cascos provistos de viseras y capas resistente al calor que protejan al cuello y los hombros.

Son necesarias tambien, mascararas antigas en caso de que se detecten gases toxicos;

- la ceniza en los techos puede ser removida por medio de palas o rastrillos manuales. En grandes edificios con techos planos se pueden utilizar palas mecanicas siempre que se tenga en cuenta que tales palas deben ser transportadas sobre los techos utilizando gruas o helicopteros;

- cuando se bota una gran cantidad de ceniza por los bordes de un techo, esta puede acumularse en los lados del edificio y ejercer presion sobre sus paredes. Se requieren por lo tanto, bulldoceros para despejar la calle de las cenizas dejandola limpia, o por lo menos plana;

- durante la caida de grandes cantidades de ceniza se necesita considerar que las lineas de corriente electrica pueden representar una amenaza para los peatones, especialmente cuando la visibilidad es escasa y su altura respecto al suelo reducida;

- en la proximidad inmediata al lugar de la erupcion, como se ha mencionado anteriormente, la caida de cenizas puede causar incendios y si los fragmentos son suficientemente grandes, pueden romper los vidrios de las ventanas e incendiar cortinas y muebles en el interior de las casas. Para prevenir esto es suficiente poner en la ventana, del lado expuesto al volcan, hojas metalicas;

- los depositos de combustible pueden ser protegidos colocando finas mallas de hierro sobre los tubos de ventilacion.

8.3 "Surges" piroclasticos

Los "surges" piroclasticos son los fenomenos volcanicos mas destructivos y letales: estos destruyen cualquier objeto que se encuentre en su camino. La posibilidad de que cualquier forma de vida sobreviva al impacto de un "surge" piroclastico es practicamente nula; los efectos del impacto son: los golpes con el material solido en suspension, sofocamiento y alta temperatura; solos o combinados, son mortales.

Es posible, por otra parte que se tenga supervivencia en las zonas laterales.

Los efectos sobre edificios y estructuras son igualmente devastantes; aquellos que se encuentren en la trayectoria directa del "surge" son destruidos o seriamente danados; los localizados en las zonas laterales o frontales son corroidos o seriamente lesionados.

Los "surges" piroclasticos, descendiendo a altisima velocidad a lo largo de los flancos del volcan, pueden remover completamente la cobertura vegetal destruyendo ramas, troncos (a veces tambien arboles de gran dimension) y arrastrandolos hacia abajo.

Los "surges" piroclasticos son bastante comunes en la actividad de los volcanes en la America Central, y como se ha visto, tambien el Boqueron y la caldera del Ilopango presentan depositos recientes asociables a tales fenomenos; las zonas subyacentes a este tipo de erupcion estan sujetas a una destruccion casi total de los edificio normales.

La unica estructura capaz de proveer proteccion es un refugio subterraneo con paredes y techo reforzados, puertas y ventanas acorazadas y hermeticamente selladas, parecidos a los refugios antiatomicos. Sin embargo el costo de tales refugios hace que sus adopcion sea muy rara aun en paises con posibilidades economicas bien superiores a las de El Salvador.

La construccion de estos refugios podria ser aconsejable en el caso de observatorios vulcanologicos, centros de policia y otros organismos encargados de los servicios esenciales en una zona de posible evacuacion.

Instalaciones importantes y de gran inversion economica, como centrales electricas, centros de comunicacion (como los sistemas del Picacho), archivos importantes etc. justifican el uso de refugios subterraneos.

Mediante el uso de cemento armado se pueden proteger con simples modificaciones puertas, ventanas, garages subterraneos, etc. haciendolos convertibles inmediatamente en refugios contra erupciones explosivas tipo "surges".

A un menor nivel de proteccion, a veces pero suficiente, se puede programar, para los edificios de interes publico (y especialmente en los futuros proyectos de construccion), la adaptacion a las puertas y ventanas de una cerradura hermetica que resista a las nubes de alta temperatura asociadas a los "surges", los cuales, en muchas erupciones, penetran en las casas, asfixiando a los ocupantes aun cuando las estructuras no hayan sufrido danos.

8.4 Flujos de lodo ("lahar")

A parte de las coladas lavicas y los "surges" piroclasticos, los flujos de lodo o "lahares" como vienen llamados en Indonesia, son los fenomenos volcanicos mas peligrosos. Sus alta densidad combinada con la extrema fluidez los dan capacidad de arrastrar y destruir virtualmente todo lo que se encuentra en su camino.

Al detenerse, pueden depositar materiales por decenas de metros de espesor, y en varios casos (como Armero, Colombia 1985) han enterrado pueblos enteros y desviado el curso de los rios.

Los "lahares" representan un gran peligro para la vida no solo porque descendiendo sobre los valles pueden arrastrar a las personas, si no que, una vez detenidos, los depositos a veces son demasiado profundos, incoherentes y calientes para ser atravesados. Las personas pueden por eso, permanecer en zonas vulnerables por un otro tipo de riesgo volcanico ("surge", coladas, etc).

Los sistemas de seguridad contra los flujos de lodo de pequenas dimensiones son barreras o canales artificiales de desviacion par la proteccion de terrenos o propiedades; se

necesita por otra parte subrayar como el volumen y la fuerza de tales flujos es tal que dificilmente pueden ser controlados. En general no se debe construir estructuras permanentes en las zonas que pueden ser afectadas por estos flujos. La unica proteccion de las urbanizaciones ubicadas a la base oriental del S. Salvador es la evacuacion inmediata cuando una erupcion esta' por ocurrir o es comenzada ya que los "lahares" son siempre mas probables sobre todo en las estaciones de lluvia.

Todas las veces que el S.Salvador entre en erupcion produciendo grandes acumulaciones de ceniza sobre sus flancos, todas las zonas habitadas ubicadas en los valles orientales y meridionales del volcan deben ser evacuadas como medida de precaucion.

En el caso, de que se espera un flujo de lodo, se puede permitir el acceso a la zona peligrosa solo cuando exista un adecuado sistema de alarma que permita la evacuacion a tiempo.

Tales sistemas de alarma deben ser programados con extremo cuidado ya que la alta velocidad de los "lahares" esperados sobre S.Salvador (dada la pendiente de los flancos del volcan) implica que las personas tienen poco tiempo (minutos) para alcanzar lugares seguros mas altos.

8.5 Erupciones cataclismicas

Muy raramente ocurren erupciones volcanicas explosivas de una magnitud que va mas alla de la experiencia del hombre moderno.

La frecuencia de tal tipo de erupcion es del orden de 1-2 cada mil anos. En los ultimos diez mil anos se conocen las de Crater Lake, Santorino, Taupo, Tambora, Kikai y hace 1700 anos, la del Ilopango (TBJ).

Los vulcanologos no tienen experiencia directa de los sintomas precursores a las erupciones cataclismica, a parte de un concepto general de caracter teorico.

Una erupcion de tales dimensiones produciria riesgos volcanicos espantosos en una zona muy poblada como el area de S. Salvador y podria crear problemas de evacuacion a una

escala hasta ahora no intentada o perdidas humanas terribles.

Medidas de proteccion en el caso de una erupcion catastrorica como la de la TBJ que esta fuera de la experiencia practica, no pueden ser aconsejadas.

La unica esperanza es que con el tiempo, la investigacion vulcanologica pueda permitir un conocimiento, lo mas detallado posible, a cerca de las caracteristicas de tales erupciones.

9. PROGRAMA DE INVESTIGACIONES VULCANOLOGICAS
COMPLEMENTARIAS Y DE PUESTA EN MARCHA DE
UN SISTEMA DE VIGILANCIA INSTRUMENTAL

9.1 Investigacion vulcanologica complementaria

Como se ha senalado anteriormente, el estudio de riesgo volcanico ha estado necesariamente limitado en funcion del caracter de urgencia del actual proyecto y de los recursos y tiempos de ejecucion extremadamente limitados.

Para una evaluacion global y definitiva del riesgo volcanico que interesa al area metropolitana de San Salvador es necesario un trabajo de campo y de laboratorio mucho mas extenso como integracion del presente estudio.

En particular se deben realizar las siguientes investigaciones vulcanologicas complementarias:

A - Trabajo de campo.

Para la implementacion de un programa de estudio mas extenso es necesaria una reconstruccion de la secuencia estratigrafica de los productos piroclasticos que afloran en la zona de San Salvador y sobre los volcanes. Deben ser estudiados todos los afloramientos presentes en la zona (y en el caso que sea necesario tambien fuera de la zona de estudio) considerando para cada uno los siguientes parametros:

- tipo de depositos y relativa modalidad eruptiva;
- espesores de cada deposito;
- dimensiones maximas de los liticos y de las pomez (o escorias pomiceas).

Tales datos serviran para la reconstruccion completa de la distribucion areal de los productos y para la preparacion de mapas de las isopacas necesarios para una evaluacion mas correcta de las zonas de riesgo.

Ademas, debera ser efectuado un muestreo detallado del piroclastico por sucesivos analisis granulometricos y petroquimicos.

Para una reconstruccion exacta de la historia eruptiva de cada aparato y para recavar una cierta relacion magnitud-

frecuencia de las erupciones particular atencion debera ser puesta en el muestreo de los productos magmaticos, carbon y paleosuelos por sucesivas dataciones K/Ar y Cl4; este puede permitir estimar un cierto indicativo periodo de retorno de las varias erupciones.

Un muestreo completo (de cada aparato) de lavas y material piroclastico representante los principales productos emitidos en los distintos periodos de actividad, sera necesario para el estudio petrologico, quimico y geoquimico.

Tal estudio debera portar a:

- la elaboracion de un modelo de comportamiento eruptivo para cada aparato;
- la definicion de los sistemas de alimentacion profunda y/o camaras magmaticas superficiales;
- la definicion del tiempo de residencia del magma a nivel de la corteza antes de la erupcion;
- la definicion de la eventual correlacion entre energia eruptiva, grado de evolucion de los magmas y duracion de los periodos de reposo.

El trabajo de campo debera ser acompanado por un ulterior estudio de fotointerpretacion que individualize las principales lineas de debilidad tectonica (en particular para y la caldera del Ilopango).

Por lo que respecta a la caldera del Ilopango deberan ser definidos los siguientes problemas:

1) Caldera del Ilopango.

- Definicion exacta de la cronologia eruptiva y del tipo de actividad.
- Estudio detallado de las erupciones mas recientes, de sus caracteristicas (erupcion freatica, freatomagmatica y magmatica), de su distribucion areal y de la relativa zona de emision.

B - Estudios analiticos y determinaciones de laboratorio.

En el ambito de tales estudios deberan ser efectuados:

- estudios petrograficos de laminas delgadas;
- analisis quimico de elementos mayores;
- analisis quimicos de elementos menores;

- analisis mineralogicos a la microsonda;
- dataciones absolutas K/Ar;
- dataciones absolutas Cl4;
- analisis granulometricos .

9.2 Sistema de vigilancia instrumental

La vigilancia volcanica consiste en la aplicacion de tecnicas geo-fisicas (sobretudo control de la sismmicidad y de las deformaciones del suelo) y geoquimicas (control de fumarolas y fuentes termales). Estas tienen como objetivo detectar la aproximacion de condiciones eruptivas con un anticipo suficiente para consentir la puesta en marcha de planes de preteccion civil de la poblacion. Estos planes seran establecidos preventivamente en base a los resultados de los estudios de evaluacion de riesgo.

No obstante la presencia, en las cercanias de la ciudad, de tres sistemas volcanicos potencialmente activos, no existe de hecho ninguna organizacion de vigilancia volcanica en El Salvador, porque hay solo una estacion sismografica instalada sobre los dos volcanes de San Salvador y de San Jacinto.

El programa es estudiado de manera tal de asegurar la puesta en marcha de un sistema de vigilancia de dimensiones adecuadas en el area metropolitana y de proveer un sistema movil para situaciones de emergencia volcanica. Esto prevee las siguientes operaciones.

9.2.1 Vigilancia sismica

- Instalacion de estaciones con tres componentes para la vigilancia volcanica permanente del area metropolitana (sobre el volcan de San Salvador y sobre el sistema volcanico San Jacinto - Ilopango), todas con teletrasmision automatica de los datos por radio al centro de San Salvador.
- Suministro de una red movil con estaciones sismicas a 3 componentes para la intervencion de emergencia sea en el

area metropolitana que en otras zonas de El Salvador con riesgo particularmente elevado (diques, instalaciones electricas, otros volcanes activos).

- Integraciones de la red sismica regional existente con nuevas estaciones telemetradas al centro de recoleccion de datos de San Salvador.

9.2.2 Control de las deformaciones del suelo

El programa prevee:

- Instalacion de estaciones clinometricas sobre el volcan de San Salvador con teletransmision de los datos al centro de vigilancia.
- Instalacion de estaciones clinometricas sobre el complejo de Ilopango con teletransmisiones de los datos al centro de vigilancia.
- Instalacion de un limnografo en el lago Ilopango.

9.2.3 Elaboraciones de datos

El Departamento de Sismologia del Centro de Investigaciones Geotermica de San Salvador cuenta actualmente con dos computadoras: una PS-T5 con plotter automatico y una Digital Professional 350, faltando para ambos la mesa de digitation y para il DF 350 tambien el plotter.

Para los objetivos de una vigilancia sismica y volcanica que debe proveer datos seguros en tiempo real o casi real, este sistema de elaboracion de datos necesita un notable mejoramiento. Se sugiere de instalar un doble sistema: uno "on-line" para la elaboracion automatica de las datos sismicos y un segundo "off-line" para ulteriores elaboraciones. Tales sistemas tendran que permitir:

- 1 - el adquisicion de los datos y el monitoraje de los eventos sismicos;
- 2 - la elaboracion de estos datos.

Las elaboraciones principales preveen el calculo de las coordenadas ipocentrales del evento, la magnitud, el mecanismo focal, los parametros de surgiente.

9.2.4 Vigilancia geoquimica

Las tecnologias geoquimicas utilizadas en la vigilancia de los volcanes proximos al area metropolitana de San Salvador tendran que ser aplicadas segun el siguiente esquema:

(1) Estudio de la geoquimica de los fluidos circulantes en los aparatos y en sus cercanias inmediatas; esta primera fase es a la vez subdividida en tres partes:

- (a) Terreno: muestreo de los fluidos y analisis de campo de las especies inestables;
- (b) Laboratorio: analisis de las aguas y de los gases;
- (c) Interpretacion de los datos geoquimicos y seleccion de los sitios de vigilancia periodica.

9.2.4.1 Estudio de la geoquimica de los fluidos circulantes en los aparatos y en sus inmediatas cercanias

Particular enfasis se le dara al estudio de las distribuciones de las sustancias gaseosas o que presenten una cierta afinidad con la fase gaseosa.

La importancia de los volatiles es su movilidad, propiedad que permite de:

- individualizar estructuras permeables, posiblemente afectadas por la actividad tectonica;
- recibir informaciones relativa a las condiciones termodinamicas presentes en profundidad;
- reconocer modificaciones de tales condiciones, posiblemente causadas por variaciones del flujo de calor, a la vez determinadas por fenomenos volcanicos activos (subida del magma).

- (a) Terreno: muestreo de los fluidos y analisis de campo de las especies inestables.

La primera operacion de esta fase tendra que ser una completa revision de la informacion existente para facilitar la programacion del muestro. Este ultimo comprendera no solamente fuentes termales, sino tambien aguas frias (surgientes, pozos, aguas superficiales). En efecto el estudio de las caracteristicas de las fuentes termales, alimentadas por circuitos hidrogeologicos mas profundos y/o mas calientes, no puede prescindir del conocimiento de aquellos mas superficiales y/o mas frios.

Durante la fase de terreno se efectuarian las siguientes operaciones:

- 1) Ubicacion del punto de muestreo, sea computando las coordenadas geograficas que dibujando un esquema topografico de acceso; esto es muy importante para poder remuestrear exactamente el mismo punto en el curso de los futuros controles.
- 2) Descripcion de las caracteristicas hidrologicas y geologicas de los puntos de aguas, estimacion del flujo de la surgiente; recoleccion de los datos estratigraficos, profundidad, nivel estatico y/o dinamico de eventuales pozos.
- 3) Determinacion de la temperatura, del pH, del Eh, de la conductividad electrica especifica y de las concentraciones de las especies quimicas inestables (bicarbonato+carbonato y silice) y recoleccion de las muestras de agua y gas.
- 4) Determinacion del amoniaco, en un laboratorio de terreno, o en el laboratorio central en San Salvador (CEL).

Se ejecutara ademas un esmerado programa de muestreo de las aguas del lago Ilopango para la determinacion de las distintas especies gaseosa (en particular gas de origen magmatico).

(b) Analisis de las aguas y de los gases.

En los laboratorios quimicos italianos tendran que desarrollarse las siguientes determinaciones:

- sobre cada muestra de H_2O : Ca, Mg, Na, K, Li, HCO_3+CO_3 , SO_4 , Cl, F, NO_3 , SiO_2 e H_3BO_3 .

- Sobre cada muestra de gas: N_2 , O_2+Ar , CO_2 , CO , CH_4 , H_2 , H_2S y SO_2 .

(c) Interpretacion de los datos geoquimicos y seleccion de los sitios de vigilancia.

El objetivo principal del levantamiento geoquimico es la definicion de un modelo sobre el origen y sobre la circulacion del fluido en los aparatos volcanicos y en sus inmediatas cercanias.

En la fase de interpretacion de los datos geoquimicos, la definicion de los tipos hidroquimicos representa el trabajo basilar para la identificacion de los circuitos hidricos presentes y de sus profundidades y termalidad relativa.

La utilizacion de tecnicas geotermometricas (Na/K , Ca/K , Ca/Na , SiO_2) en las aguas termales, eventualmente modelizando fenomenos de mezcla con aguas freaticas, puede dar informaciones sobre la temperatura existente en profundidad almenos entre los limites de la hipotesis de equilibrio agua-paragenesis hidrotermales especifica de los geotermometros mismos.

El estudio de la distribucion en las aguas freaticas de las sustancias volatiles o relativamente volatiles (CO_2 , NH_3 e H_3BO_3) tiene como objetivo la individualizacion de la estructuras permeables, posiblemente coincidentes con estructuras tectonicas activas, que posibilita la subida de tales sustancias, de cuerpos hidricos mas o menos profundos, hacia la superficie.

Tales modelos permitiran la seleccion de las manifestaciones que, por la actividad de ellas y tipo de alimentacion, representan los mayores puntos de monitoraje del sistema hidrotermal-volcanico y que deberian ser periodicamente muestreados por los tecnicos locales.

Todas las informaciones recogidas seran utilizadas por la definicion del programa de control periodico: puntos de muestreo, routine de prelievos y de analisis, criterios interpretativos a los fines de la vigilancia volcanica.

10. BIBLIOGRAFIA

AMAROLI P. - 1987: "Un sitio Preclasico Medio en la ciudad de Antiguo Cuscatlan, dept. de La Libertad". Informe archivado en el Museo Nacional Davide J. Guzman.

ARMIENTI P. & PARESCHI M.T. - 1987: "Automatic reconstruction of surge deposit thicknesses. Application to some italian volcanoes". Jour. Volc. and Geoth. Res., Vol. 31, pag. 313-320.

ARMIENTI P., MACEDONIO G., PARESCHI M.T. - 1987: "A numerical model for the simulation of tephra transport and deposition: application to the May 18, 1980 Mt. St. Helens eruption" in press on the Journ. of Geoph. Res.

BARBERI F., INNOCENTI F., LUONGO G., ROSI M., SANTACROCE R., SCANDONE R. - 1984: "Il rischio vulcanico nei Campi Flegrei". Consiglio Nazionale delle Ricerche, Gruppo Nazionale per la Vulcanologia.

BAXTER S., DIAZ O., AMAYA A., FLORES DE S.- 1986: "Estudio gravimetrico a lo largo de las rutas Acajutla - Anguiatu, La Libertad - El Poy, Barra de Santiago - Mizata". Comision Ejecutiva Hidroelectrica del Rio Lempa. El Salvador.

BAXTER S., DIAZ O., AMAYA A., FLORES DE, S. - 1986: "Estudio gravimetrico a lo largo de las rutas Acajutla - Anguiatu, La Libertad - El Poy, Barra De Santiago - Mizata" Comision Ejecutiva Hidroelectrica del Rio Lempa. El Salvador.

COX K.G., BELL, J.D., PANKHURST R.J. - 1978: "The interpretation of igneous rocks". George Allen & Unwin.

DENGO G. - 1968: "Estructura geologica historia tectonica y morfologia del America Central" Centro Regional Del Ayuda Tecnica (A.I.D.).