

UBICACION GEOLOGICA DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR Y EL TERREMOTO DEL 10 DE OCTUBRE DE 1986

LIC DINA A LARIOS DE LOPEZ

INTRODUCCION

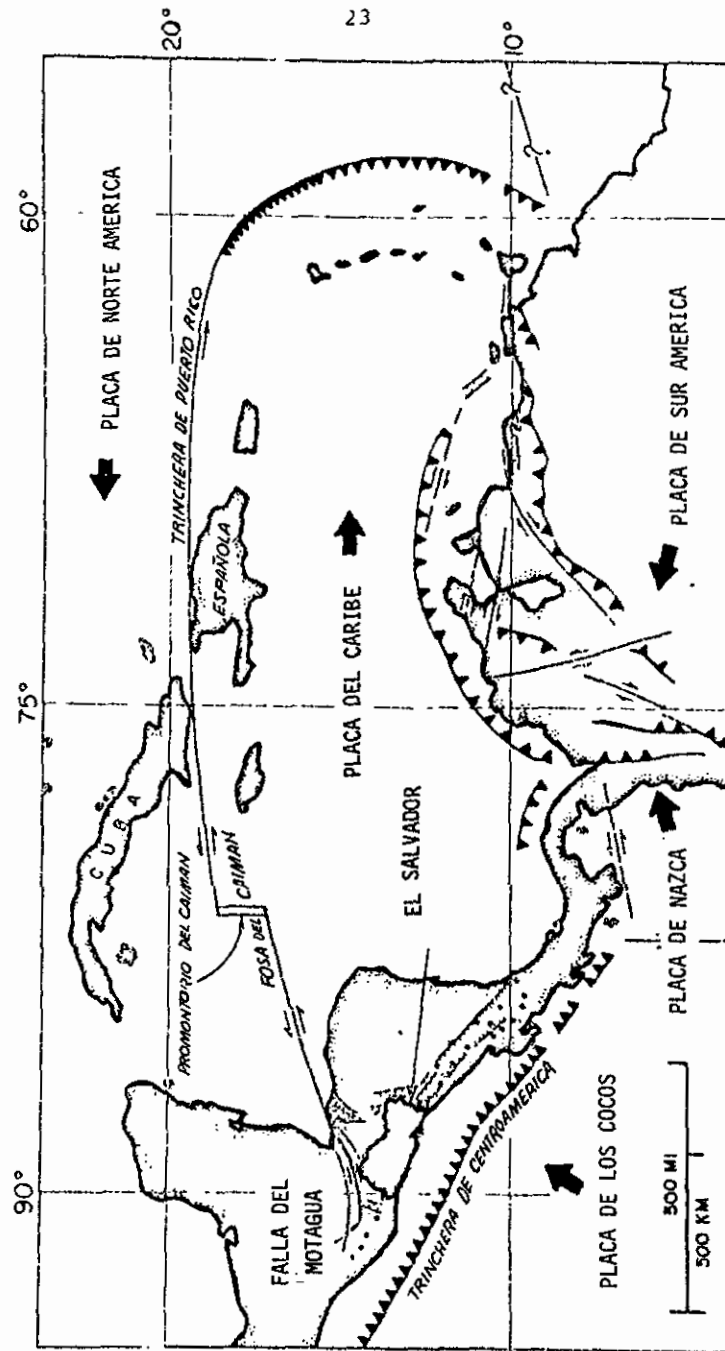
El terremoto del 10 de octubre de 1986, marcó un hecho crucial en la historia de la ciudad de San Salvador, tanto desde el punto de vista geocientífico como económico y social. En este trabajo se pretende analizar el fenómeno desde el aspecto puramente geocientífico estableciendo primero el marco geológico regional en que se ubica el área metropolitana a fin de comprender el porqué de la ocurrencia de esta clase de eventos en ella, luego se analizan las características físicas que acompañan el fenómeno interpretándolas de acuerdo a lo que el autor conoce hasta el momento y finalmente se aportan algunos criterios que se consideran importantes para disminuir en el futuro los efectos de este tipo de fenómenos.

TECTONISMO DE EL SALVADOR

De acuerdo a la teoría tectónica de placas de la corteza terrestre, los movimientos tectónicos en El Salvador son principalmente consecuencia del movimiento hacia el Nor-Este de la placa del Cocos con respecto a la placa del Caribe.

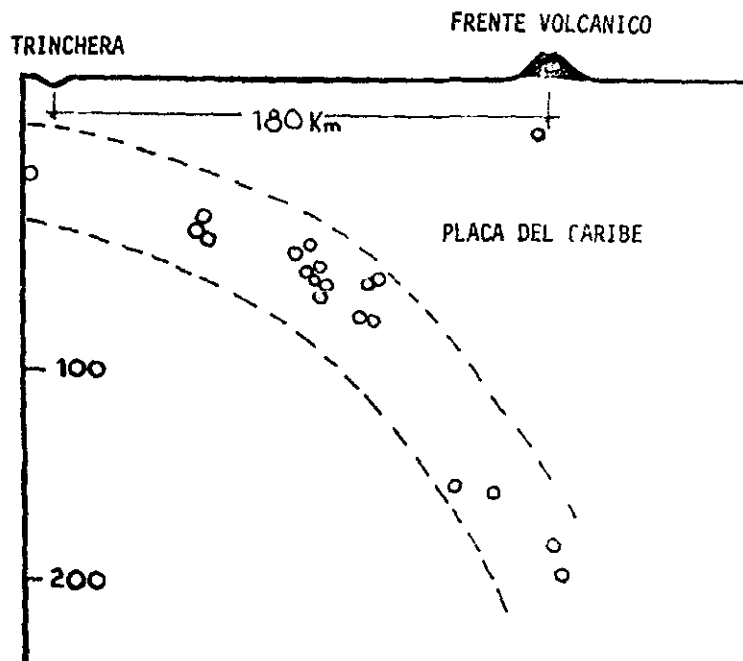
La rapidez relativa de los movimientos de las placas del Caribe y las adyacentes son (Spence y Person, 1976) Cocos-Caribe, 7.47 cm/año NNE, Norte América-Caribe 2.08 cm/año OSO y Cocos Norte América, 9.01 cm/año NNE.

El movimiento de estas placas se muestra en la figura 1 (Malfait y Dinkelman, 1972).



PLACA DEL CARIBE Y MOVIMIENTO RELATIVO DE LAS PLACAS ADYACENTES (Modificado de Malfait y Dinkelmann, 1972)

FIG. 1



ZONA DE SUBDUCCION DEFINIDA POR LOS HIPOCENTROS SISMICOS
(Modificado de Carr, 1979)

FIG. 2

Este movimiento produce una zona de subducción en la que la placa del Coco se introduce bajo la del Caribe, la cual se define claramente al estudiar la proyección de los hipocentros sísmicos en un perfil perpendicular en la trinchera de Centro América que define en la superficie la frontera entre ambas placas, como puede observarse en la figura 2 (Carr y otros, 1979)

Además de los sismos originados en la zona de Benioff o de subducción, El Salvador se ve afectado también por los efectos de los movimientos que se originan en la frontera de las placas de Norte América y El Caribe y que definen el sistema de fallas conocido como la falla del Motagua

Como puede observarse en la figura 3 (Wiesemann, 1975), el país puede considerarse como un área de intersección de dos sistemas de fallas un sistema Nor-Oeste Sur-Este asociado con la falla del Motagua y su sistema subordinado Nor-Este Sur-Oeste y un sistema Este-Oeste que se considera una continuación de la depresión de Nicaragua y que tiene un sistema como NS como subordinado

El sistema Este-Oeste constituye el graben central que atraviesa todo el país y que determina en su parte hundida regiones topográficas de gran importancia como son el Valle de Zapotitán al Occidente, el Valle de las Hamacas, en el Centro, y el Valle del Jiboa en Oriente

Este graben central Este-Oeste junto con las fallas de dirección Noroeste-Sudeste determinan además la distribución de los volcanes recientes como puede observarse en la Fig 3 en que se han graficado los centros volcánicos más importantes

FRENTE VOLCANICO DE EL SALVADOR

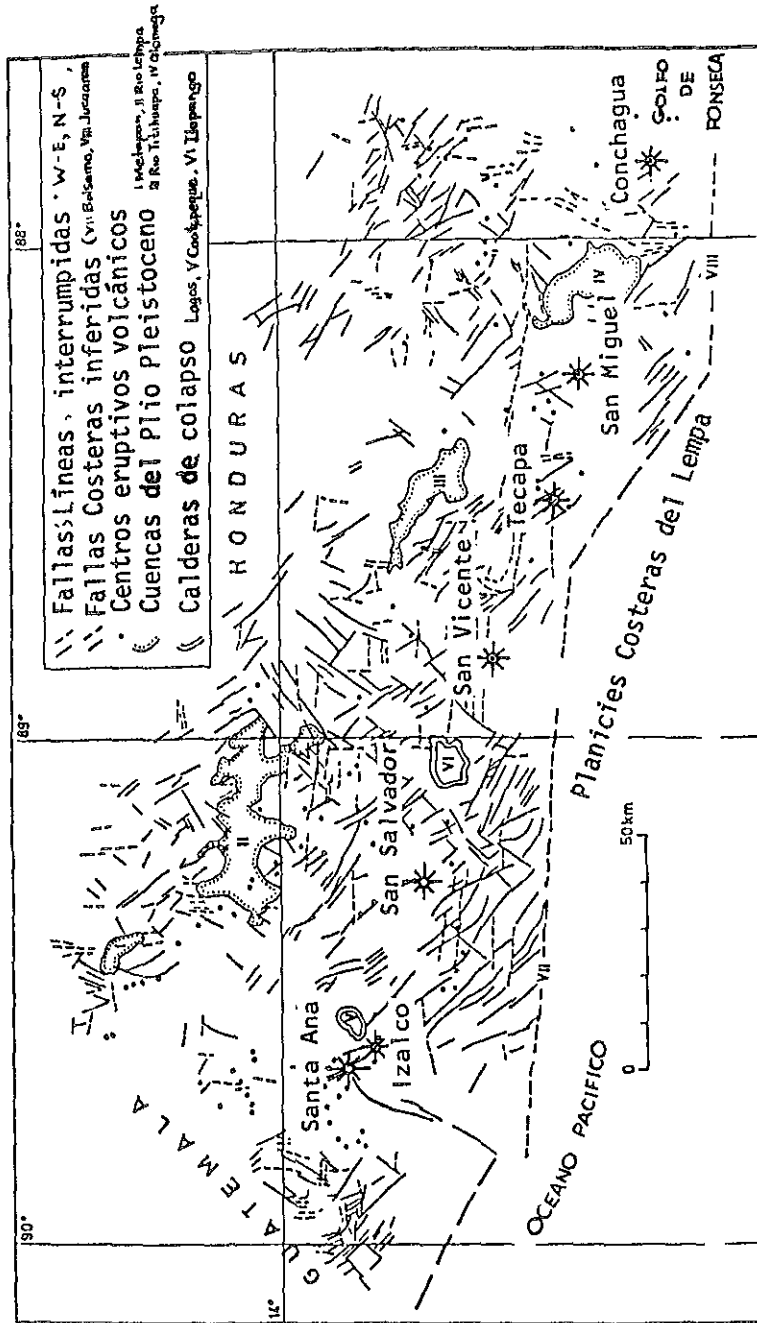
El frente volcánico de El Salvador constituye uno de los ocho segmentos en que se encuentra dividida la cadena volcánica centroamericana (Carr, 1983), coincidiendo sorprendentemente los límites de este segmento con los centros volcánicos de Apaneca al Oeste y Conchagua al Este, en los extremos del país. La segmentación volcánica en Centro América se debe a los cambios de rumbo que tiene la zona de subducción la cual es aproximadamente paralela a la línea costera

El decrecimiento gradual en elevación de los centros volcánicos desde Guatemala hasta el Golfo de Fonseca junto con el incremento gradual en anomalía gravimétrica de Bouguer en la misma dirección sugieren que la corteza terrestre es más espesa en Guatemala y decrece hacia Nicaragua (Carr y otros, 1981)

El frente volcánico centroamericano es particularmente importante debido a que sus centros eruptivos se encuentran más próximos entre sí (~ 25 Km) que en el resto de frentes volcánicos en el mundo ($\sim 40-70$ Km de separación)(Carr, 1976)

En El Salvador existen nueve centros eruptivos principales Apaneca, Santa Ana, Izalco y Coatepeque, Boquerón, Ilopango, San Vicente, Tecapa, San Miguel, Conchagua, y Golfo de Fonseca. De éstos los que han presentado mayor actividad histórica (Jordan, 1979) son Santa Ana e Izalco, Boquerón, Ilopango y San Miguel. De particular interés en este estudio son el Boquerón e Ilopango que se encuentran adyacentes al área metropolitana de San Salvador, hacia el Noroeste y Este de la capital respectivamente (figura 4)

El Boquerón es la parte más joven del viejo volcán de San Salvador o Quezaltepeque, el cual tuvo un colapso de caldera (Williams y Meyer-Abich, 1955) dentro de la cual se formó y creció el nuevo volcán hasta llenar casi completamente la caldera (como se ilustra en la figura 5). El Picacho constituye un resto del antiguo volcán. Evidencias de este proceso se han encontrado al hacer un estudio fotogeológico del área (Walter Hernández, comunicación verbal) y mediante el estudio de la variación en composición química de las lavas del volcán (Fairbrothers y otros, 1978). Es importante hacer notar que las erupciones más recientes de este



MAPA TECTONICO GENERALIZADO DE EL SALVADOR
 Y PRINCIPALES CENTROS VOLCANICOS (Weisemann, 1975)

FIG. 3

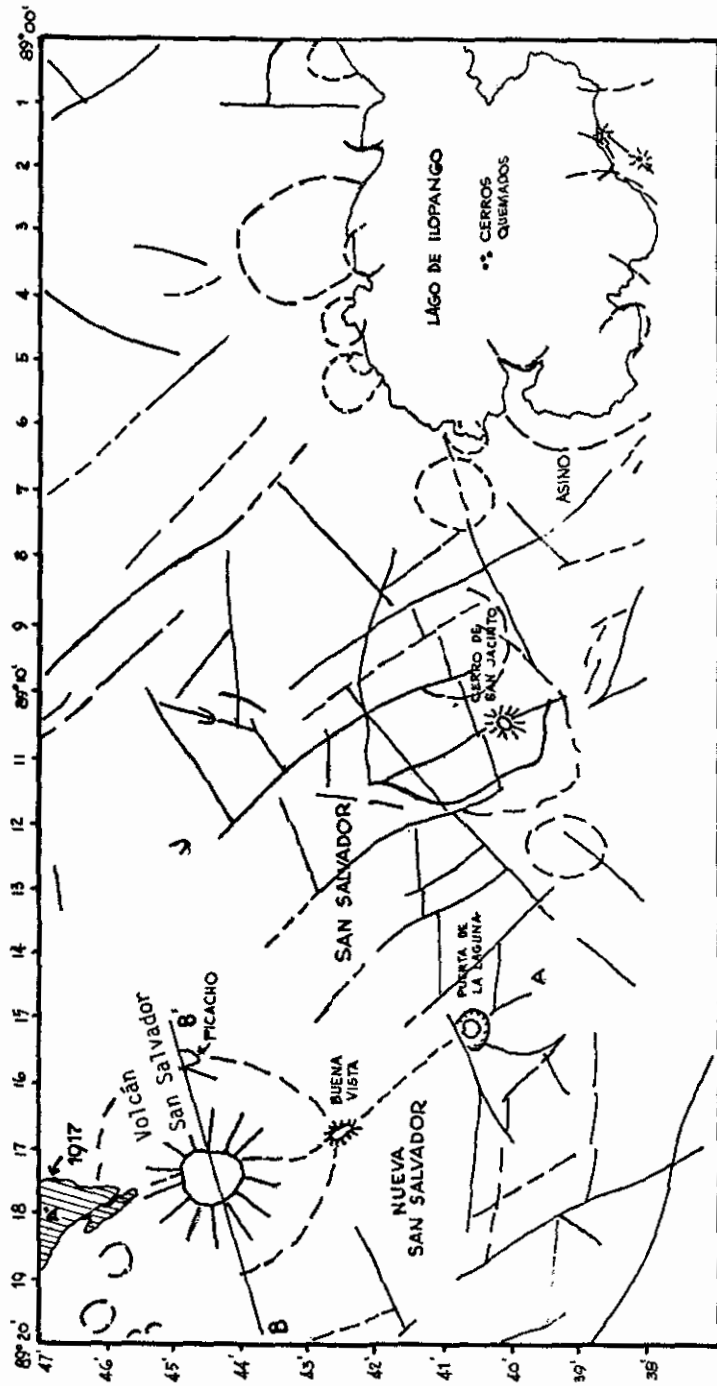
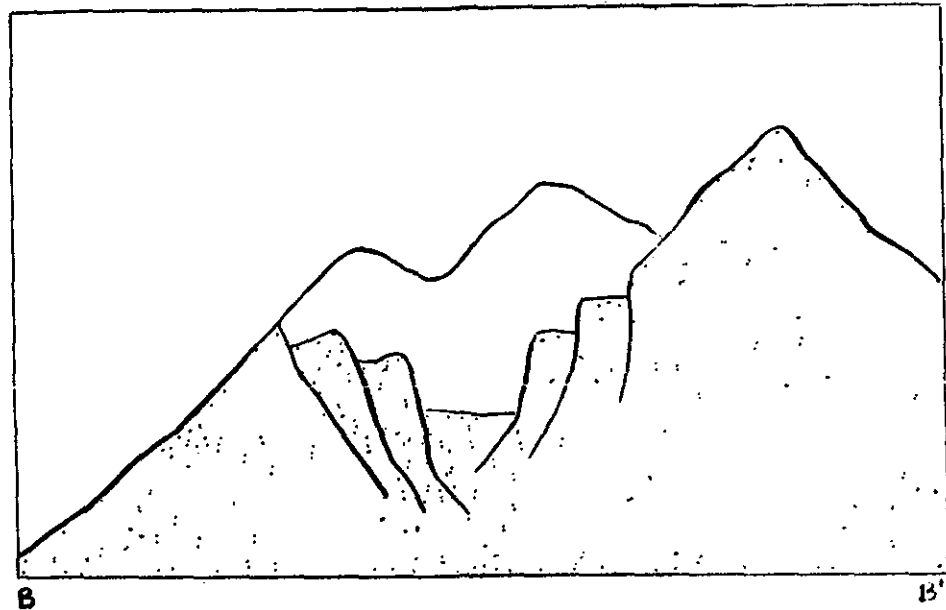


FIG. 4 : AREA DE SAN SALVADOR Y PRINCIPALES FALLAS Y CENTROS ERUPTIVOS



SECCION ESQUEMATICA BB' DEL VOLCAN BOQUERON
DE LA FIG. 4 (Fairbrothers y Otros, 1978)

FIG. 5

volcán se han llevado a cabo a través de la falla señalada como AA' en la figura 4, tal como la de 1659 y la de 1917 que aparece sombreada en la figura. Se aprecian además los conos de Buena Vista y la Puerta de la Laguna sobre esta falla, lo que indica que es una ruta preferencial para el flujo de magma.

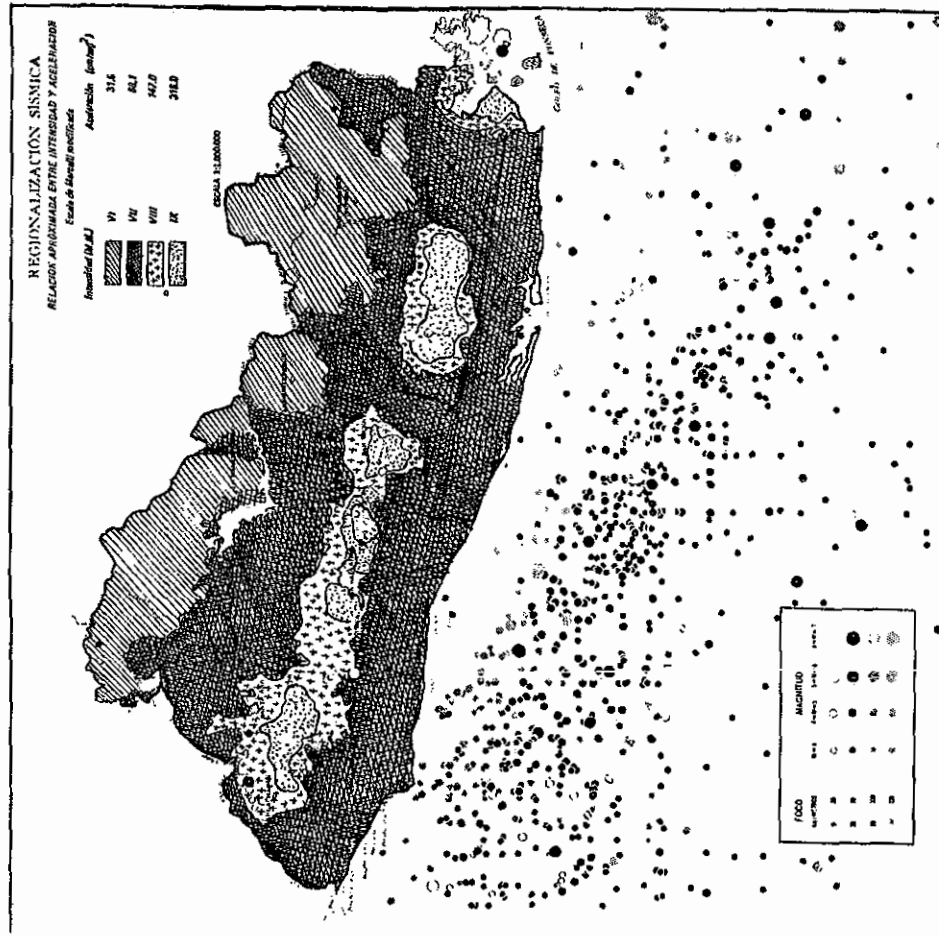
El Lago de Ilopango, por otra parte, es una caldera de colapso cuya última erupción ocurrió en 1880 cuando se formaron los Cerros Quemados (Goodyear, 1880). El Cerro de San Jacinto parece ser parte del sistema volcánico de Ilopango.

Al considerar la sismicidad del país, se encuentra que es el frente volcánico el área que representa mayor riesgo sísmico, encerrando las áreas de mayor riesgo a los centros volcánicos más activos como se ilustra en la figura 6 (Atlas de la República de El Salvador, 1979). Esto se debe a que los sismos en estas zonas tienen generalmente una profundidad menor que 20 Km, por lo tanto el cono de destrucción es reducido afectando un área limitada, aunque esto último depende de la magnitud del sismo. Los sismos destructivos en esta zona tienen generalmente una magnitud moderada entre 4 y 7 grados en la escala Richter (Carr y Stoiber, 1977).

REGIONALIZACION
SISMICA DE EL SALVADOR

(Atlas de la República
de El Salvador, 1979)

FIG. 6



EL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR

El área metropolitana de San Salvador se encuentra ubicada aproximadamente en la zona central del país, en el Valle de las Hamacas y está asentada principalmente sobre suelo constituido por pómez fluvial (tierra blanca) cuyo espesor varía de alrededor de 10 m hacia el Norte y Sur-Oeste hasta 200 m cerca del Lago de Ilopango al Este (Shakal y otros, 1986) En la figura 7 pueden observarse los tipos de formaciones geológicas que se encuentran en el área lavas de la formación Bálsamo y Cuscatlán hacia el Sur y Norte, lavas de la formación San Salvador hacia Noroeste en el Volcán de San Salvador y pómez fluvial de la formación San Salvador en la parte central y Este de la ciudad La tierra blanca presenta propiedades elásticas tales que amplifica el movimiento sísmico como pudo apreciarse en el terremoto del 3 de mayo de 1965 (Lomnitz y Schultz, 1966)

Adicionalmente, la ciudad se encuentra densamente poblada de fallas como se observa en la figura 4, especialmente hacia el Sur y Sureste en los alrededores del Cerro de San Jacinto

Los registros históricos indican que la ciudad ha sido destruida al menos 9 veces siguiendo el mismo patrón de destrucción del Sureste al Noroeste (Jordan, 1979), lo que indica la importancia del sistema de fallas Sureste-Noroeste como generadoras de movimientos violentos Históricamente también, la ciudad ha sufrido por las erupciones del Volcán de San Salvador de 1659 y 1917, así como la del Lago de Ilopango en 1880

EL TERREMOTO DEL 10 DE OCTUBRE DE 1986

El día 10 de octubre de 1986, a las 11 49 hora local (17 49 GMT), la ciudad de San Salvador y sus alrededores se vio sacudida por un fuerte movimiento originado por la ruptura y desplazamiento vertical de al menos una de las fallas con rumbo N20W (Harlow y otros, 1986), causando una destrucción sin precedentes debido a que la ciudad fue prácticamente la región epicentral El Departamento de Sismología del Centro de Investigaciones Geotécnicas ha determinado las coordenadas del sismo como 13°40'N de latitud, 89°11 5'W de longitud y una profundidad focal de 8 Km

La magnitud del mismo se ha calculado en 5 4 grados en la escala de Richter, lo que indica una cantidad liberada de energía moderada y explica la existencia de un área de destrucción relativamente pequeña como puede observarse en la distribución de intensidades dada en la figura 8 (Harlow y otros, 1986) El número de víctimas ocasionadas fue del orden de 2,000 y el número que quedó sin hogar es indeterminado

Como ya se ha indicado, los lugares que presentan un mayor espesor de tierra

PRINCIPALES FORMACIONES
GEOLOGICAS DEL AREA DE
SAN SALVADOR

Formacion Balama:

- EPISODIOS BASICOS INTERMEDIAS
- EPICLASTICAS
- VOLCANICOS y ASOCIADAS

Formacion Tacatalán

- PIROCLASTICAS ACIDAS
- EPICLASTICAS VOLCANICAS

Formacion San Salvador

- EPISODIOS BASICOS INTERMEDIAS
- EPISODIOS BASICOS INTERMEDIAS
- PIROCLASTICAS ACIDAS EPICLASTICAS VOLCANICAS (TODAS SON LAS CERCAS y DEMARCAZONES)

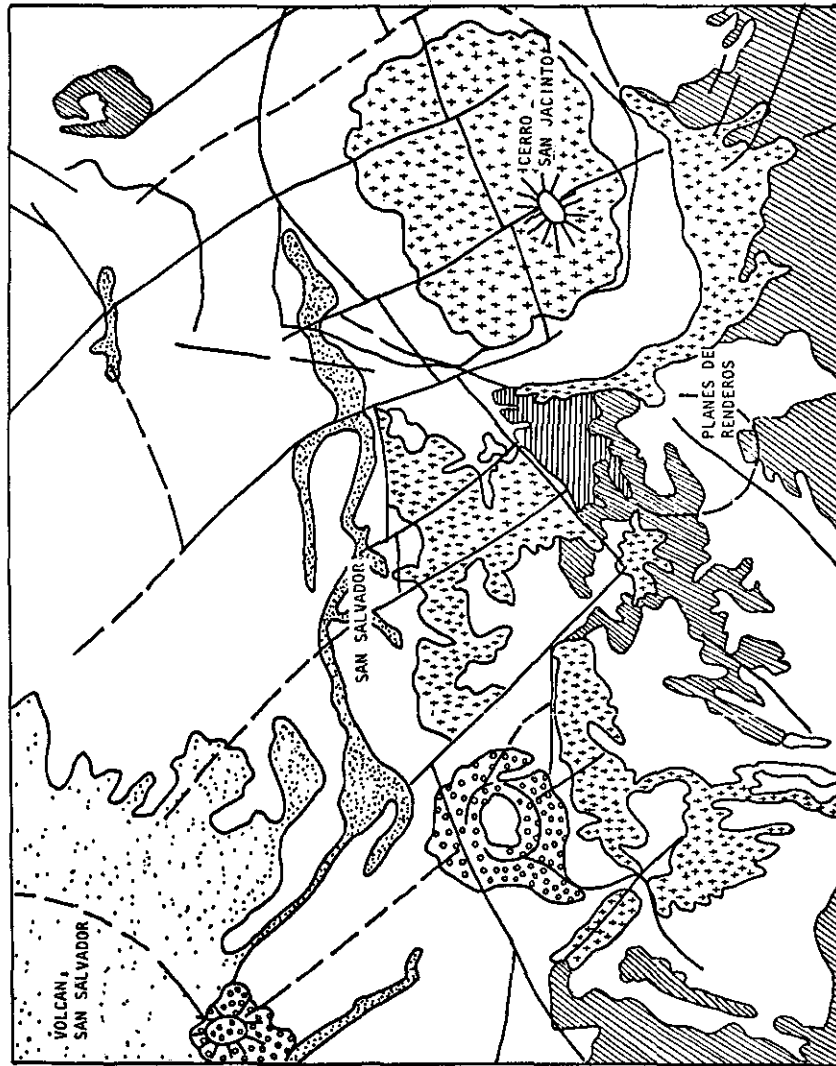


FIG. 7



© 2001, DERECHOS RESERVADOS

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento,
sin la autorización escrita de la Universidad de El Salvador

SISTEMA BIBLIOTECARIO, UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

blanca tienden a presentar una sacudida mayor debido al efecto de amplificación que ésta produce. Esto se ve claramente evidenciado en la figura 8 en donde el área de mayor intensidad se extiende hacia el centro de la ciudad que constituye también el centro del valle y por lo tanto se encuentra un espesor mayor de tierra blanca que hacia el Sur, Norte y Oeste. Además en la figura se puede apreciar el efecto estructural de las fallas AA', BB' y CC' adicionado al del sistema de fallas Noroeste que definen la forma de los límites de áreas con igual intensidad, evidenciando que no fue únicamente la falla sobre la que cae el epicentro instrumental la que se movió, sino que también otras de las fallas que atraviesan el área. Esto explica el comportamiento lineal de destrucción que se observa en la ciudad, alineado con algunas de las fallas.

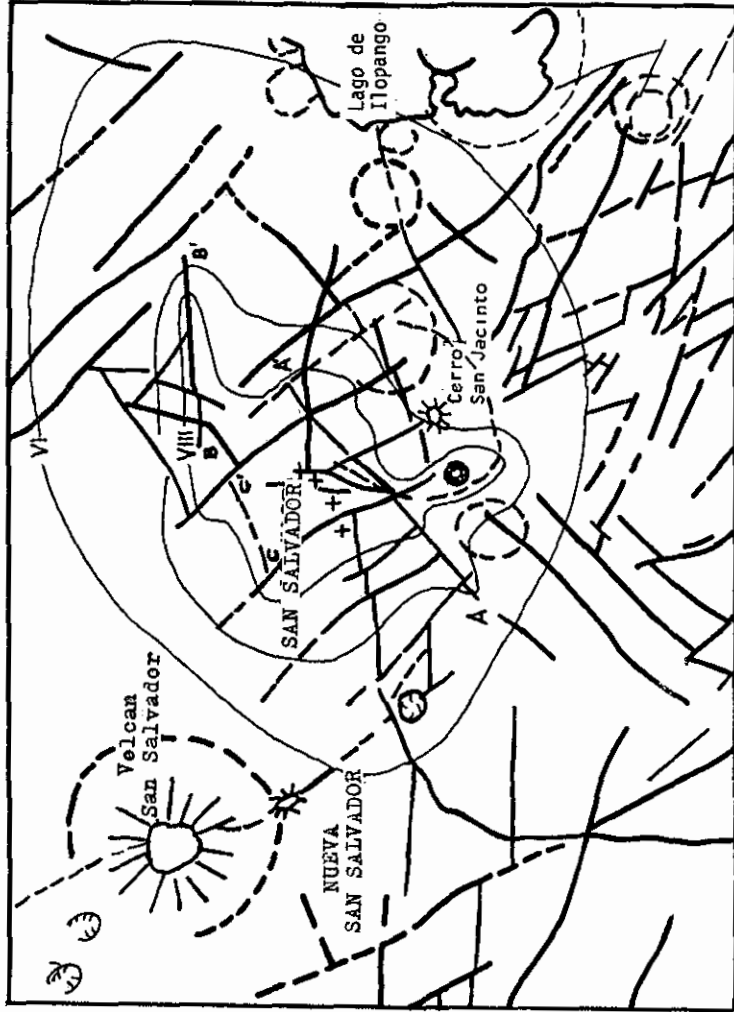
La alta destrucción ocasionada en el área epicentral se puede comprender mejor si se considera que esa zona se encuentra ubicada entre el cerro de San Jacinto, un domo dacítico de gran densidad, y los Planes de Renderos en donde tenemos rocas de la cordillera del Bálsamo, también de alta densidad (figuras 7 y 8). En estos dos macizos rocosos de mucha mayor densidad que la tierra blanca del área epicentral, la energía de las ondas superficiales tenderá a ser reflejada en una mayor proporción y por lo tanto sacudirá con mayor intensidad la zona.

Debido a la moderada magnitud del sismo no se produjo ruptura superficial a todo lo largo de la falla (Raymer, 1986) aunque observaciones en el Noroeste de la ciudad muestran evidencias superficiales en puntos discretos de que el lado Noreste de la falla se movió hacia abajo con respecto al lado Suroeste unos 30 cms.

Para los estudios de Ingeniería Sísmica este evento es de particular importancia ya que se obtuvo registros en nueve estaciones acelerográficas de la ciudad de San Salvador que han permitido obtener registros sin precedente histórico debido a la cercanía del epicentro, habiéndose obtenido aceleraciones tan altas como el 72% de la gravedad en la dirección horizontal (estación del Instituto de Vivienda Urbana IVU) y el 46% de gravedad en la dirección vertical (estación del Instituto Geográfico Nacional) (Shakal y otros, 1986).

Al establecer una comparación entre el sismo del 10 de octubre y el del 3 de mayo de 1965 (magnitud 6.0, 13°39'N, 89°9'W y 10 Km de profundidad) (Lomnitz y Schultz, 1966), puede apreciarse que la magnitud de este último así como su profundidad fue mayor, lo que explica que el área de destrucción haya sido mucho más extensa (Santa Tecla a Cojutepeque) aunque el área metropolitana, por estar más alejada del epicentro, sufrió daños menores que con el sismo del 10 de octubre.

Al analizar la distribución espacial de los hipocentros de los eventos posteriores al sismo del 10 de octubre (réplicas) se obtienen las figuras 9a a 9f para diferentes intervalos de tiempo y considerando únicamente aquellos sismos cuyo error en la ubicación horizontal y vertical no pasa de 2 Kms. Se han incluido aquí solamente



MAPA DE INTENSIDADES
 (mercalli modificada)
 DEL SISMO DEL 10 DE OCTUBRE DE 1986

VI ———— Limites de areas con la misma intensidad.
 + Maximo intensidad de IX (M.M.)
 * Epicentro del sismo del 10 de Octubre de 1986
 - - - - - FALLA

FIG. 8
 (Cabrera, 1985)

Sismicidad de San Salvador del 10 de Octubre de 1986

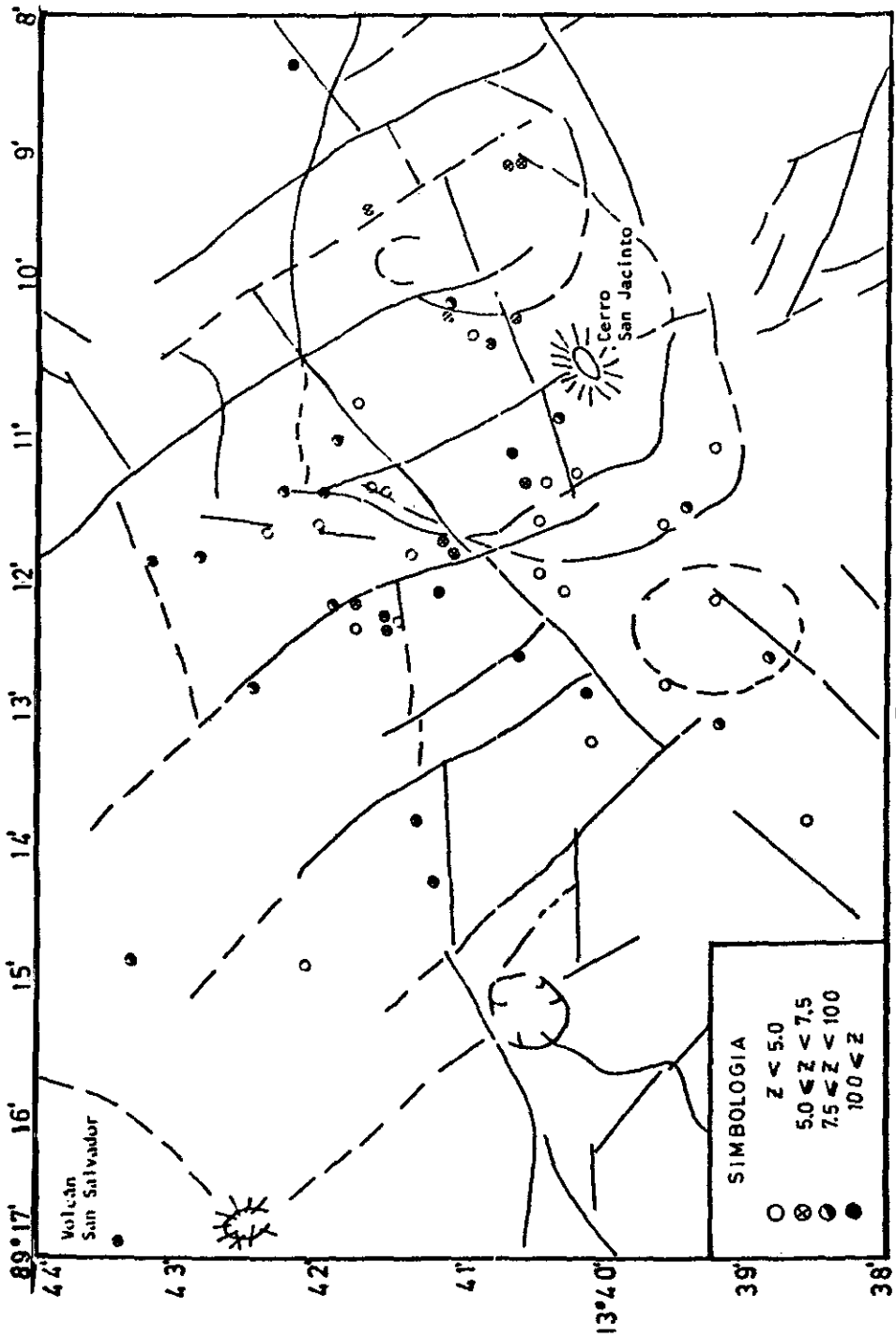


FIG. 9a

BIBLIOTECA CENTRAL
 INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS
 MINISTERIO DE ECONOMÍA Y FINANZAS

Sismicidad de San Salvador del 18-24 de Octubre de 1988

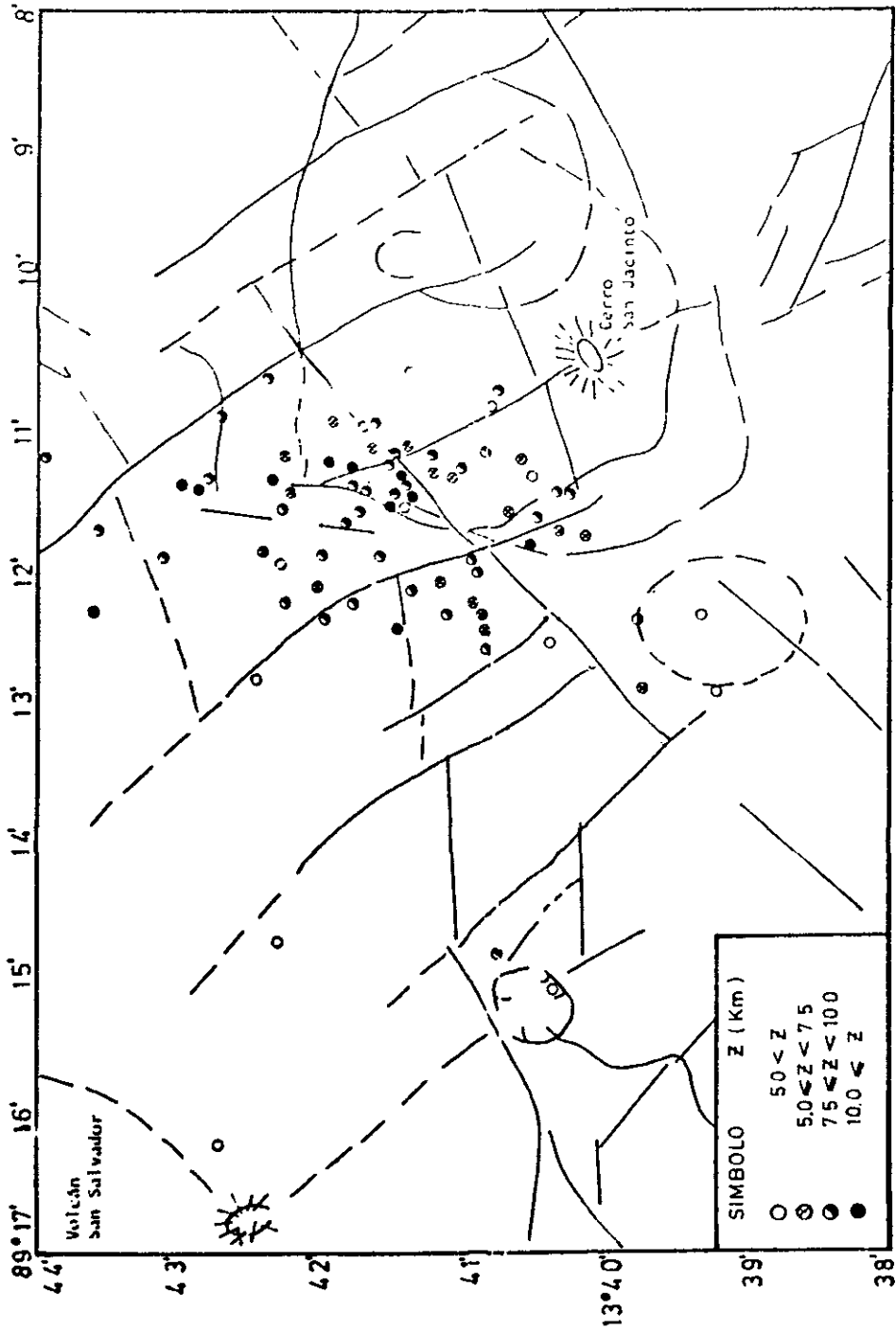


FIG. 9b

Sismicidad de San Salvador del 29, 30, 31, de Oct, 1º de Nov de 1986

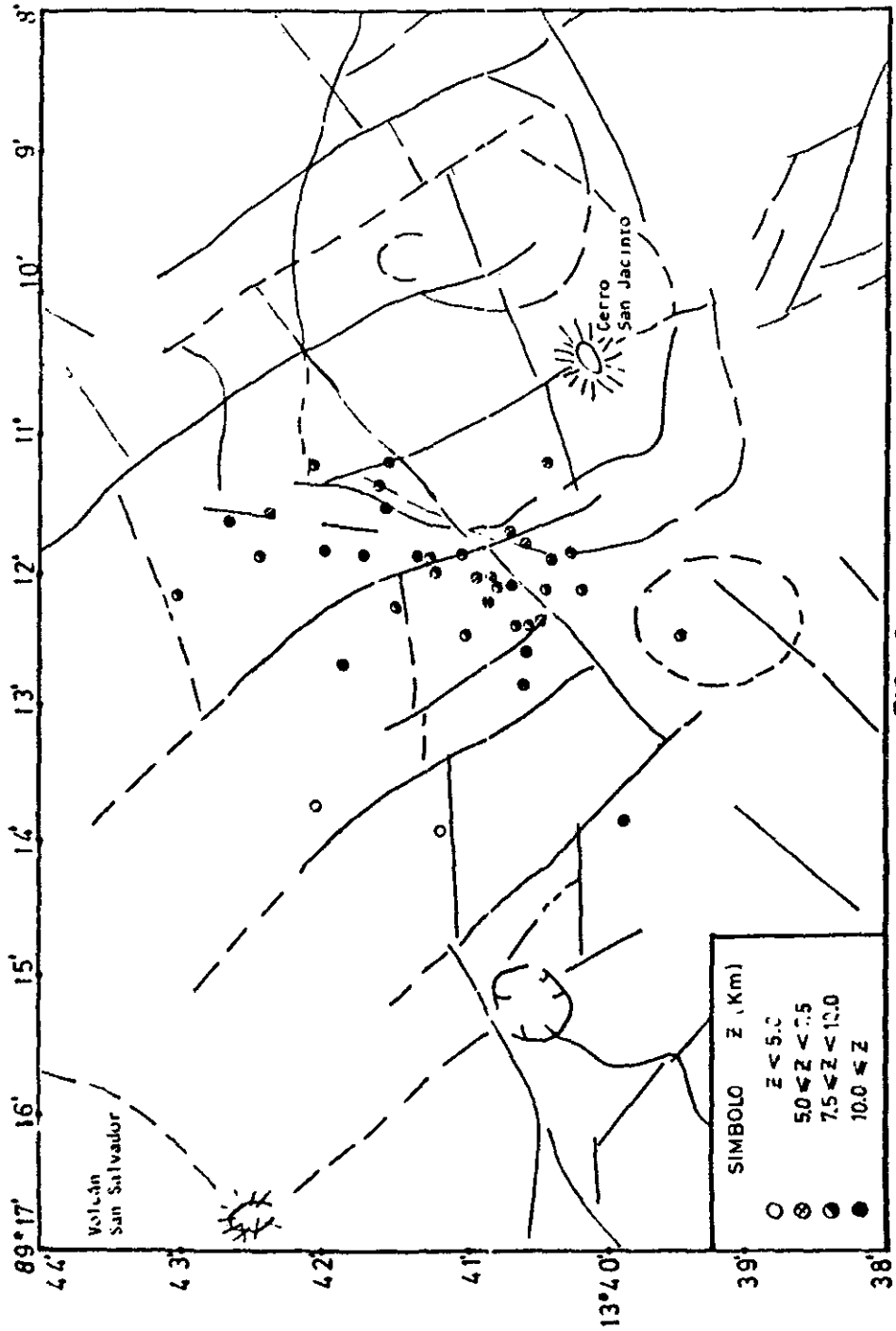


FIG. 9c

Volcan San Salvador del 1 al 11 NOV. de 1986

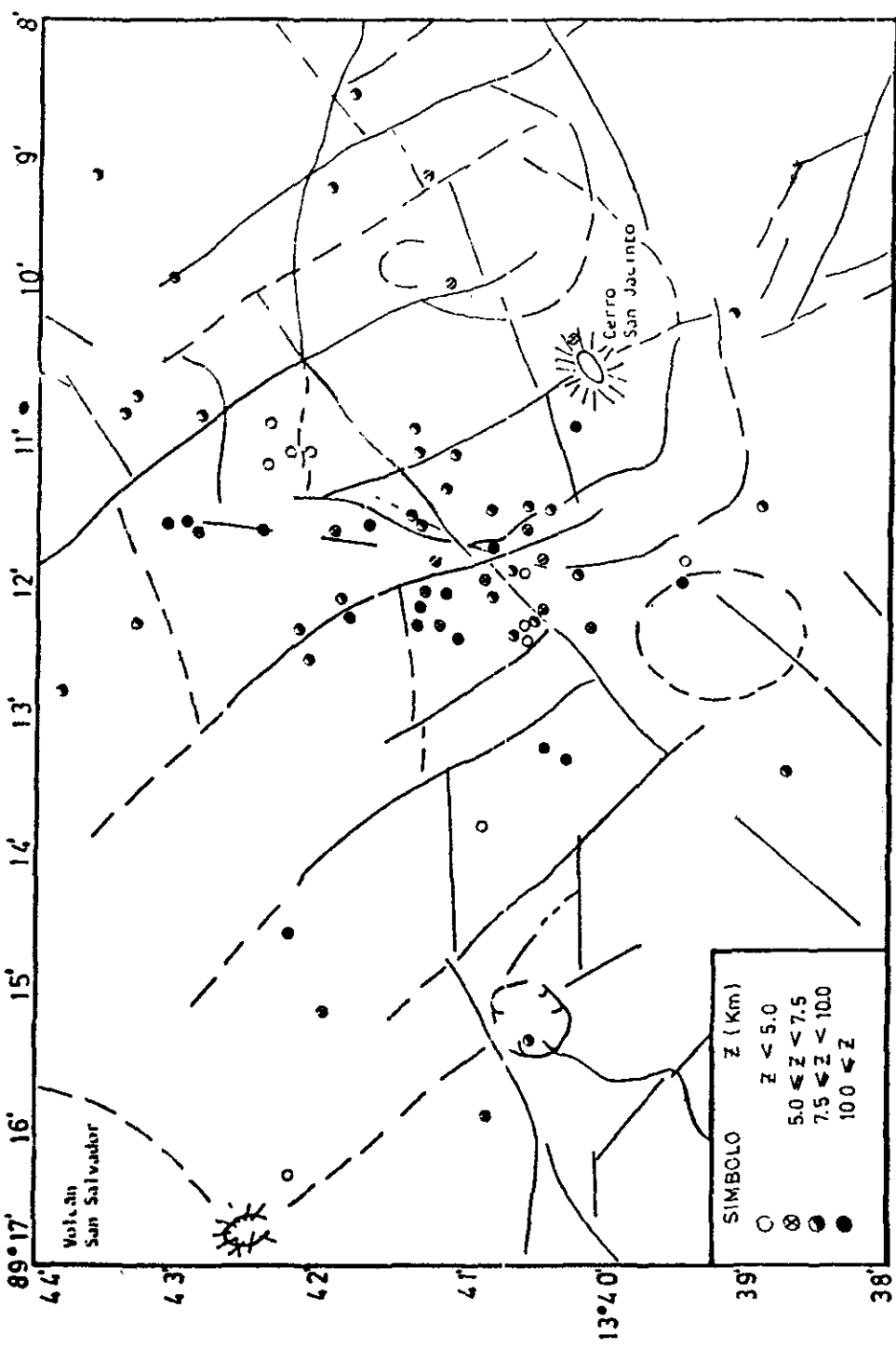


FIG. 9d

Sismicidad de San Salvador del 11 AL 21 DE NOVIEMBRE DE 1966

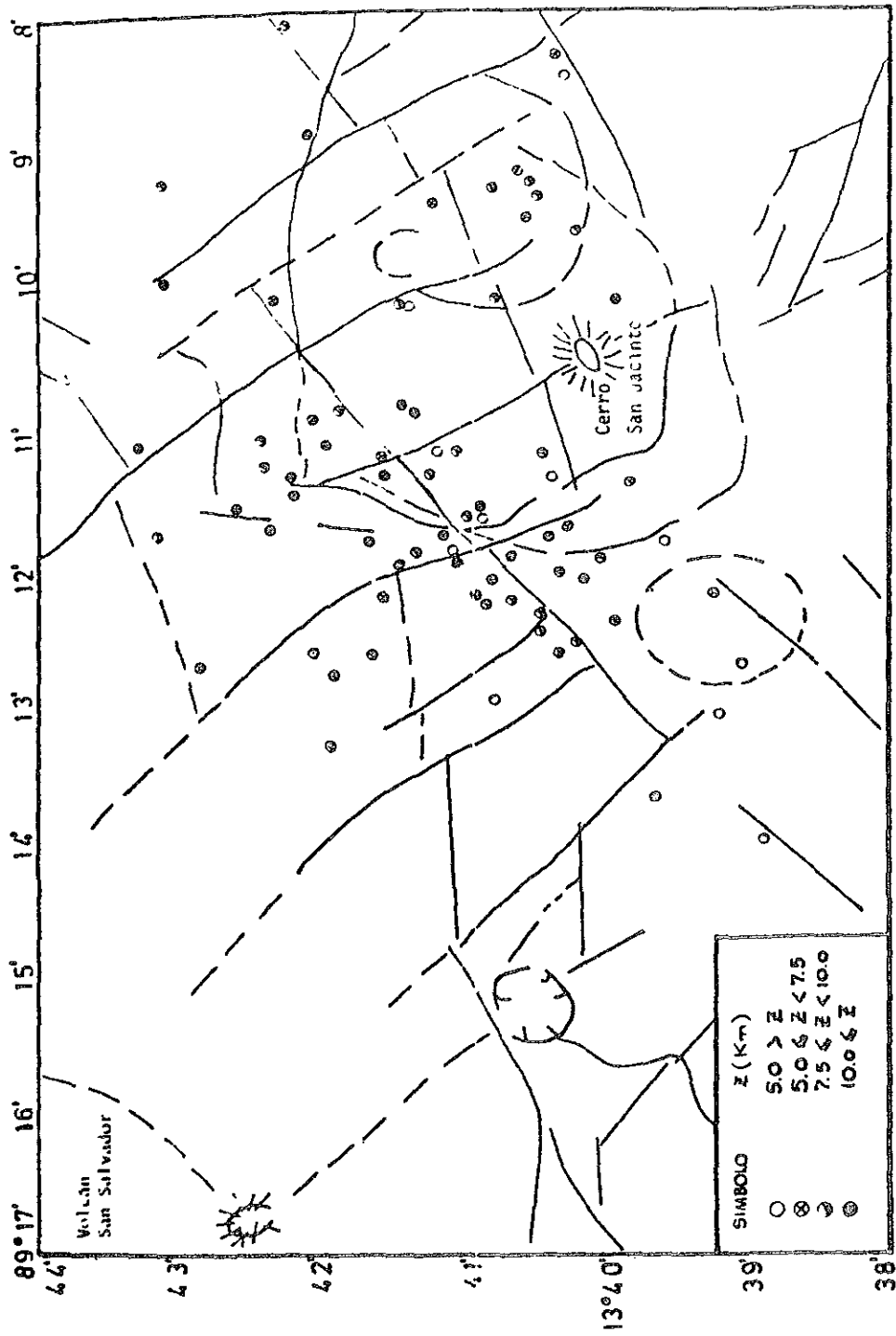


FIG. 9e

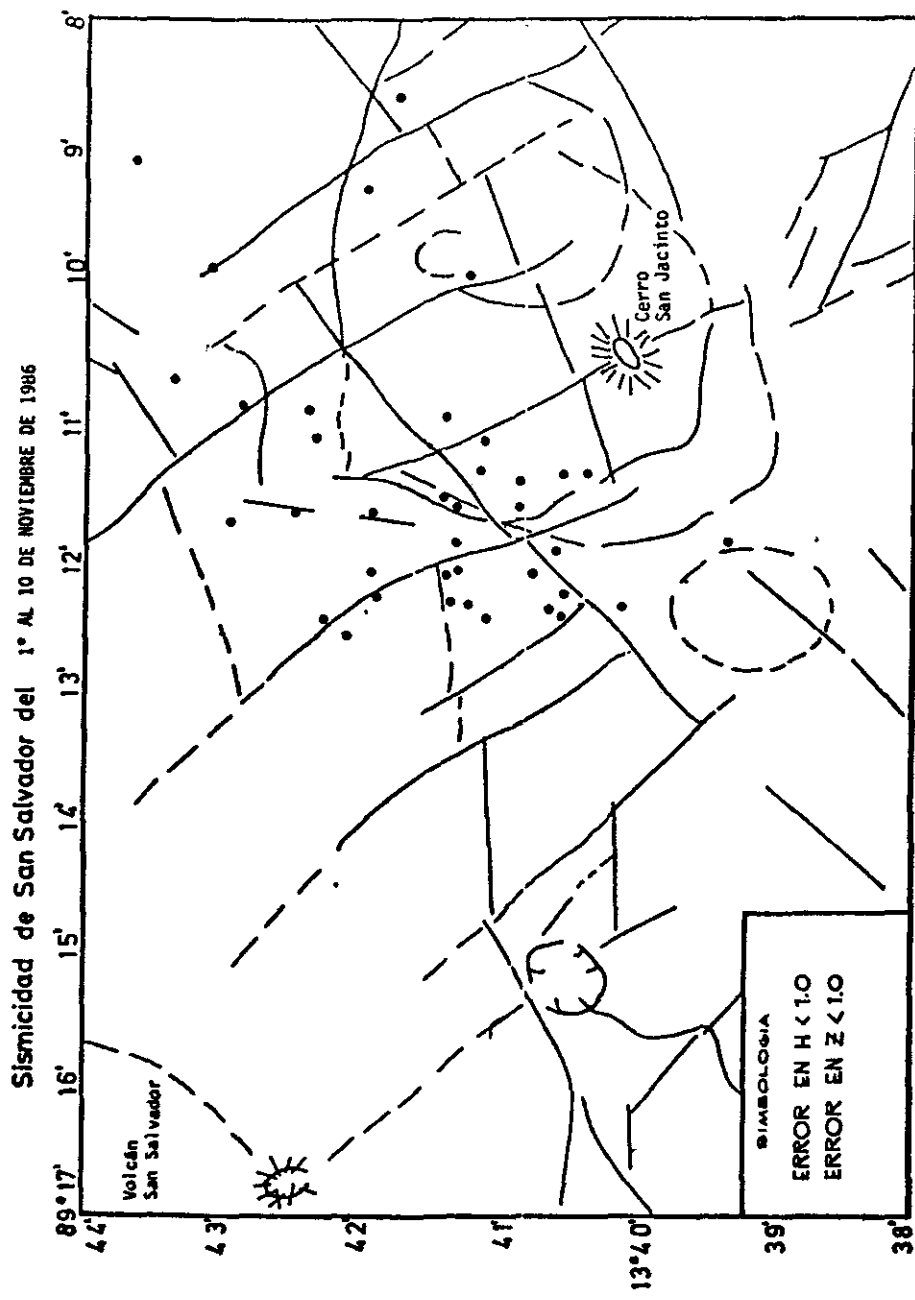


FIG. 9f

los eventos que a la fecha de ejecución de este trabajo habían sido localizados. Puede observarse que la sismicidad se ve concentrada en el área ubicada al Noroeste del Cerro de San Jacinto, en la zona de intersección de las fallas Noroeste, Noreste, Norte Sur y la falla circular del cerro. Este comportamiento no parece cambiar con el tiempo y se explica al considerar la alta inestabilidad tectónica de un área tan densamente fracturada. Inicialmente se pensó que la distribución azarosa de las profundidades en el área mencionada podría deberse a los errores de localización. Sin embargo, al graficar únicamente aquellos eventos con error en localización horizontal y vertical menor que 1.0 Km en vez de 2.0 Km, se encontró que la distribución espacial básicamente era la misma (figura 9f).

Al iniciarse la actividad sísmica en estudio, una de las principales preocupaciones era la posibilidad de reactivación de la falla del Volcán de San Salvador (AA en la figura 4) que podría dar origen a una erupción del mismo. Afortunadamente, las figuras 9a a 9f indican que esta falla ha permanecido tranquila ya que no se ha concentrado sismicidad en ella y por lo tanto parece que la cámara magmática del volcán de San Salvador no se ha reactivado.

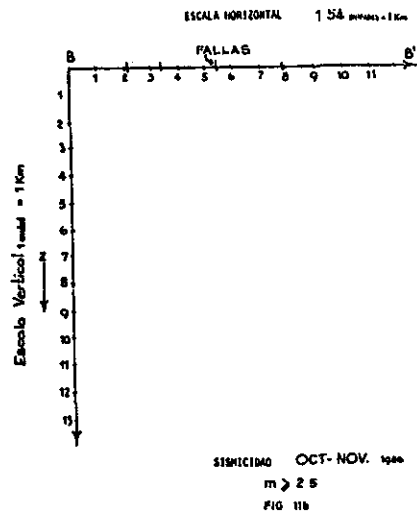
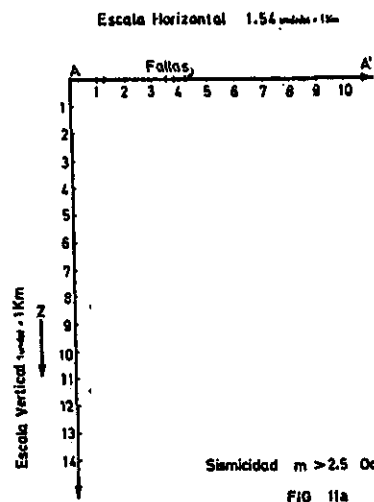
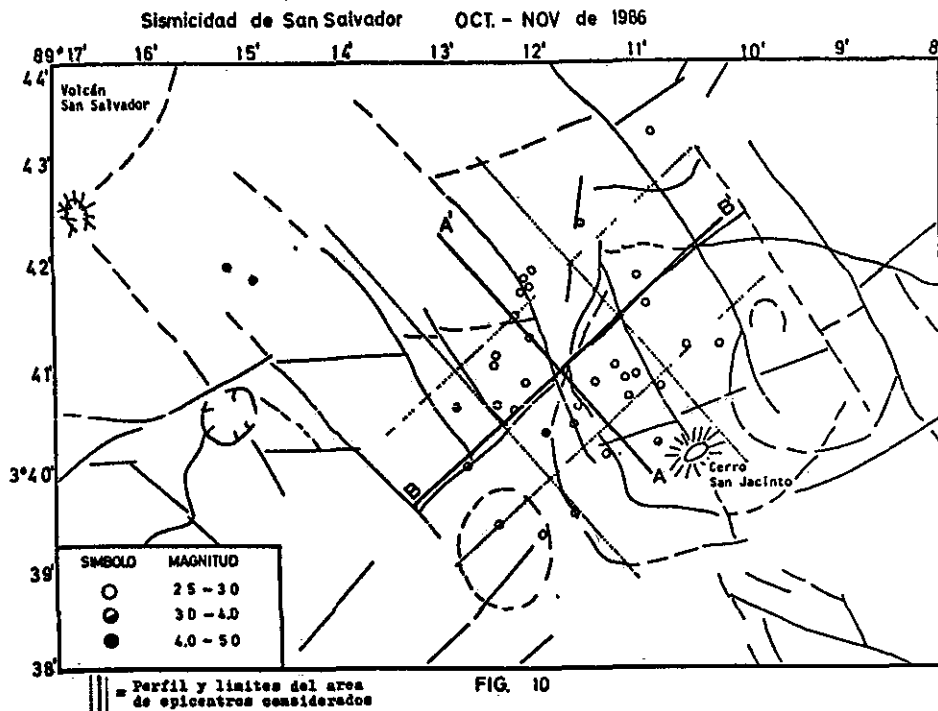
En la figura 10 se han considerado únicamente los eventos de magnitud mayor que 2.5 de las figuras 9, a fin de estudiar la proyección de los eventos en los planos verticales AA' y BB'. La sección AA' se ilustra en la figura 11a y muestra claramente el buzamiento hacia el Noroeste de las fallas de rumbo Noreste, ya que el perfil es perpendicular a ellas. La figura 11b, muestra el buzamiento hacia el Noreste del sistema de fallas con rumbo Noroeste, ya que la sección es perpendicular a ese sistema.

De estas dos secciones puede concluirse que, al menos, estos dos sistemas de fallas se encuentran activos.

CONCLUSIONES

Estudios históricos realizados en el área indican que existe 1/3 de probabilidad de que ocurra un sismo semejante al del 10 de octubre en un intervalo de tiempo de 0 a 2 años (Harlow, 1986) y que el período de retorno para la sismicidad del área es entre 20-25 años. Este período de tiempo tan corto y el hecho de que las fuentes sismogénicas principales se encuentran muy cerca de la ciudad, hacia el Sureste, hacen necesario que se tomen medidas encaminadas a disminuir el riesgo a que se encuentra sometida la población de San Salvador, como son:

- Ejecución de un estudio geológico de la zona, de mayor precisión que los efectuados hasta ahora a fin de determinar mejor la ubicación de las fallas.
- Incentivar los estudios geocientíficos en el área, sobre todo los sísmicos y



volcánicos (Volcán de San Salvador y Lago de Ilopango), manteniendo una vigilancia científica continua con el objeto de tomar las medidas pertinentes en caso de alerta. Debe señalarse aquí que actualmente existen estudios geoquímicos y geofísicos que dan indicios de la actividad volcánica y que en muchos casos, como en el terremoto del 3 de mayo de 1965, un terremoto mayor es precedido por eventos premonitores que permiten dar la voz de alerta. La instalación de más estaciones al Norte y Sur del Lago de Ilopango, permitiría además, conocer mejor la naturaleza del fenómeno, aunque en regiones como ésta, no es posible discriminar totalmente entre eventos puramente tectónicos o puramente volcánicos y se califican normalmente como volcanotectónicos.

- Realizar un estudio de riesgo sísmico del área metropolitana. La información geológica y sísmica junto con la obtenida de los acelerogramas del terremoto del 10 de octubre, permitirían la realización de un estudio de riesgo y zonificación del área que garantice una mayor seguridad a la población mediante una reglamentación conveniente. Paralelamente debería realizarse un estudio de riesgo para todo el país ya que el período de retorno de terremotos destructivos para éste es de 15 años (Larios de López, 1979). Cualquier decisión que se tome sobre la ciudad de San Salvador, que no se fundamente en un estudio científico de la situación, será una solución parcial que podrá generar otros problemas en campos como la hidrología, ecología y otros.

AGRADECIMIENTOS

La ejecución de este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración del Departamento de Sismología del Centro de Investigaciones Geotécnicas, quienes nos han proporcionado los listados de los sismos ubicados por ellos hasta los primeros días de diciembre. La dedicación y esfuerzo con que el personal de esa Dependencia ha venido desarrollando su labor, ha hecho posible que el enjambre sísmico que actualmente experimenta San Salvador sea uno de los mejores registrados históricamente.

Enero de 1987

REFERENCIAS

- CARR, M J, ROSE W I, Y MAYFIELD, D G, 1979, *Potassium Content of Lavas and Depth to the Seismic Zone in Central America* J Volcanol Geotherm Res, 5 387-401
- CARR, M J, Y STOIBER, R E, 1977 *Geologic Setting of Some Destructive Earthquakes in Central American*, Geol Soc America Bull, 88 151-156



- CARR, M J 1983, *Symmetrical and Segmented Variation of Physical and Geochemical Characteristics of Central American Volcanic Front*, J Volcanol Geotherm Res , (May)
- FAIRBROTHERS, G E ,CARR, M J Y MAYFIELD, D G ,1978 *Temporal Magmatic Variation at Boqueron Volcano, El Salvador*, Contrib Mineral Petrol 67 1-9
- GOODYEAR, W A ,1880 *Earthquake and Volcanic Phenomena* December 1879 and January 1880, in the Republic of El Salvador, Central America Star and Herald, Panamá, 56 pp
- HARLOW, D H , RYMER, M J y WHITE, R A , 1986 *The San Salvador Earthquake of October 10, 1986 and Implications of The Regional Earthquake History* Preliminary Report, U S Geological Survey, 12 pp
- JORDAN, J Y MARTINEZ, M , 1979 *Seismic History of El Salvador* En publicación del Seminario de Ingeniería Antisísmica, enero 1979, San Salvador, Tomo II Editor John de Cortina
- LARIOS DE LOPEZ, D A , 1979 *Seismicity and Focal Mechanisms of El Salvador Earthquakes*, M Sc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va
- LOMNITZ, C Y SHULTZ, R 1966 *The San Salvador Earthquake of May 3, 1965* Seismol Soc America Bull , 56 561-575
- MALFAIT, B T Y DINKELMAN, M G , 1972, *Circum-Caribbean Tectonic and Igneous Activity and the Evolution of the Caribbean Plate* Bull Geol Soc Am , 83 251-272
- RYMER, M J , 1986 *Geologic Effects of the San Salvador, El Salvador Earthquake of October 10, 1986* In *San Salvador Earthquake Briefing Notes*, Earthquake Engineering Research Institute, 22 pp
- SHAKAL, A F , HUANG, M J , PARKE, D L Y LINARES, R , 1986 *Processed Strong Motion Data from the San Salvador Earthquake of October 10, 1986*, Report No OSMS 86-07 California Strong Motion Instrumentation Program, 113 pp
- SPENCE, W Y PERSON, W , 1976 *The Guatemalan Earthquake of February 4, 1976 A Preliminary Report* U S Geol Surv Profess Paper 1002, 4-11
- WIESEMANN, G , 1975 *Remarks on the Geologic Structure of the Republic of El Salvador, Central America* Mitt Geol Paläontol Inst Univ Hamburg, 44 557-574
- WILLIAMS, H Y MEYER- ABICH, H 1955 *Volcanism in the Southern part of El Salvador*, Univ Calif Publ Geol Sci 32 1-64