

## **ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD SISMICA DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL, ECUADOR**

**Por: Otton Lara**

**Profesor de Ingeniería. Escuela Superior Politécnica del Litoral.  
Director del Proyecto UNDRD/DHA ECU 004-92**

**INTRODUCCION.** Es evidente que el suelo induce comportamientos diferentes de las ondas generadas por un sismo y en consecuencia de las estructuras soportadas por dichos suelos. Los casos mas dramáticos de esta afirmación se los pudo observar durante el sismo de México de 1985 donde el suelo suave del antiguo lago de Texcoco, en el centro de la ciudad, amplificó las ondas producidas en la zona epicentral, 400 Km al Oeste de la ciudad de México, haciéndolas alcanzar una amplitud casi similar a aquella registrada cerca del epicentro, mientras que, en la misma ciudad pero hacia el Sur donde prácticamente aflora la roca en la superficie, se registraron intensidades 4 veces menores a aquellas obtenidas en el centro antes mencionado. La evidencia está registrada en los acelerogramas obtenidos en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), caso del centro de la ciudad donde la máxima aceleración fué de 0.18g, y en la ciudad universitaria, caso del sector sur, donde se alcanzó 0.04g. Figuras 1 y 2

Pero aparte del hecho de que la intensidad del sismo se amplificó, es necesario remarcar otro aspecto de igual o quizá mayor significado y que es el cambio en el contenido de frecuencias de la señal captada en el litoral del Pacífico mexicano con respecto a aquellas captadas en la ciudad de México [1]. Efectivamente, un análisis de las frecuencias, vía Transformada de Fourier, de los registros acelerográficos horizontales obtenidos en la región costera, cercana al epicentro, indica la presencia de una amplia zona donde se acumula la mayor cantidad de energía del sismo y que está localizada entre los 0.5 segundos, valor similar al período calculado del suelo en el sitio del registro, y los 2 segundos, (Fig. 3), mientras que, en los registros de la SCT la acumulación de energía se presenta en una sola región que es la de los 2 segundos de período (Fig. 4), valor que coincide con el período calculado y medido del suelo en ese sitio. Por otro lado, el estudio de otros registros cercanos a, o en, la ciudad de México indica que la concentración de energía está entre los 2 segundos y el período correspondiente al tipo de suelo en ese sitio. Por ejemplo, el registro CUMV, junto a la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la Ciudad Universitaria, indica claramente una concentración de energía entre los 2 segundos de período y los 0.3 segundos, valor este último que es cercano al período calculado y medido del suelo rocoso en ese sitio. (Fig. 5). La Tabla 1 indica los sitios a los que corresponden las siglas anotadas para las transformadas de los registros y el tipo de suelo.

Estos hechos observados permiten llegar a la conclusión de que los registros de los terremotos contienen la respuesta del suelo en sus

frecuencias fundamentales y que además contienen las características dinámicas de las ondas que se propagan por la corteza terrestre y que fueron producidas durante el rompimiento de la falla. En consecuencia, es importante conocer las frecuencias fundamentales de los suelos de zonas proclives a terremotos ya que a la primera frecuencia de ellos corresponderá uno de los lugares de mayor acumulación de energía en el espectro de frecuencias. Obviamente, las estructuras con frecuencias parecidas a las de los suelos o a las de las ondas, podrían ser las más afectadas durante la ocurrencia del temblor, mas aún cuando la frecuencia principal de las ondas coincida con la del suelo como es el caso de SCT.

Los análisis antes mencionados, el interés demostrado por los directivos de la Oficina de Mitigación de Desastres de Naciones Unidas en Ginebra (UNDRO/DHA) y los resultados de un estudio de peligro sísmico [2] que indica que cada 100 años se puede esperar un sismo de magnitud Richter mayor o igual a 8 a lo largo del borde de placas, en la costa ecuatoriana, permitieron al autor preparar un proyecto que trata de evaluar el potencial de daños en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, si ocurriera un sismo severo, con fines de prevención de desastres [3] y que fué aprobado por UNDRO/DHA.

**JUSTIFICACION DEL ESTUDIO.** La ciudad de Guayaquil, coordenadas 2 grados Sur y 80 grados Oeste, aproximadamente, está localizada en el Golfo de Guayaquil sobre la placa Suramericana bajo la cual se subducta la placa Nazca, fenómeno tectónico que ha producido los mas grandes terremotos que han afectado al país. Ejemplos, por mencionar solo 2, son el temblor de Esmeraldas, al Norte de la costa ecuatoriana, ocurrido en Enero de 1906 y registrado en la red mundial con magnitud 8.6, y el de 1942, magnitud 8.0. Este último, localizado en el Océano Pacífico a 30 Km de la costa central del país y a 300 Km. de Guayaquil, indujo el colapso de 3 edificios de entre 4 a 6 pisos, daños severos a otro de 7 pisos y daños importantes a 15 edificios de 3 pisos, todo esto considerando que al momento del sismo existían en Guayaquil 62 edificios de Concreto reforzado de los cuales la mayoría eran edificios de menos de 3 pisos y el de mayor altura el antes mencionado de 7 pisos. [4]. El 90% de la ciudad está asentado sobre un suelo arcilloso muy compresible capaz de amplificar las señales provenientes de un temblor.

**OBJETIVOS.** Los objetivos del proyecto son:

1. Determinar las frecuencias naturales del suelo de Guayaquil, con fines de regionalización y control de uso del suelo.
2. Determinar las frecuencias fundamentales de los edificios típicos y de los puentes existentes en la ciudad.
3. Presentar los períodos de suelo en un mapa de la ciudad y resumir los

períodos de estructuras y puentes en una expresión empírica.

4. Entregar los resultados a la Defensa Civil, Municipio de Guayaquil y al Instituto Ecuatoriano de Normalización para que hagan entrar en vigencia los resultados de la investigación. También se hará entrega a la Defensa Civil y a UNDRO/DHA un diagnóstico del comportamiento dinámico y la relación estructura-suelo de edificios de hospitales, escuelas, asilos, etc.

5. Divulgar los resultados del proyecto a través de un informe final que será entregado a UNDRO/DHA y de conferencias ofrecidas en el Colegio de Ingenieros Civiles, Cámara de la Construcción y Universidades.

**ALCANCE.** Para cumplir con los objetivos descritos se decidió seguir la metodología que a continuación se indica.

1. Obtener y clasificar una gran cantidad de datos sobre el suelo de Guayaquil y que está disponible en varios laboratorios de Mecánica de Suelos de la ciudad. Estos datos permitirán estimar, analíticamente, el período de los depósitos de suelos de la ciudad y compararlos con los medidos. La mayor parte de la ciudad está sobre un suelo arcilloso de origen marino de alta compresibilidad y con profundidades variables que van desde los 16 a los 50 m

2. Usando los resultados de un estudio sobre el sismo de Guayaquil de 1980 [4] que muestra la distribución de daños en edificios, se definen las áreas de medición de vibraciones ambientales del suelo de la ciudad. El número total de puntos donde se efectuará la medición es de 550. Las mediciones serán contrastadas con los estudios analíticos antes mencionados y con pruebas de campo. Las mediciones serán tratadas con principios de vibraciones aleatorias.

3. Los períodos fundamentales del suelo, así obtenidos, serán traspasados a mapas de la ciudad con la indicación de que el período indicado para cada región de la ciudad será una de las regiones de mayor concentración de energía en el espectro de frecuencias.

4. Los períodos de los edificios y puentes se los obtendrá midiendo la vibración de la planta baja y del último piso, en el caso de edificios, y en la pila y en la plataforma, en el caso de puentes, para determinar la función de transferencia que es la expresión matemática de la estructura. Puesto que la vibración es aleatoria, se calculará la función de coherencia y si esta es adecuada, la autocorrelación y la densidad espectral de la función de transferencia. Esta última dará las regiones de concentración de energía y el rango de frecuencias correspondiente.

5. Los valores obtenidos para edificios serán tratados estadísticamente con el fin de definir una formulación empírica que permita calcular el período de una estructura en forma simple y rápida.

6. Se proporcionará a la Defensa Civil un diagnóstico del comportamiento sísmico de ciertos edificios importantes: Hospitales, Escuelas, Asilos, y de gobierno.

7. Se escribirá un informe final con la metodología seguida y con los resultados obtenidos.

Es importante mencionar que se podrá cumplir con los objetivos descritos, gracias a la colaboración y apoyo de UNDRO/DHA que entregó a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL (ESPOL), un equipo moderno de medición de vibraciones ambientales con 3 sismógrafos de alta sensibilidad y los programas de computación correspondientes para la interpretación de los datos registrados en el campo.

## **RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS.**

**ASPECTOS ESTADISTICOS.** Usando la distribución de daños observados en estructuras luego del sismo de Guayaquil de 1980, se procedió a iniciar la medición de vibraciones ambientales en varios puntos ubicados dentro de la zonificación que corresponde a las diferentes intensidades Mercalli obtenidas para ese temblor, como se muestra en la figura 6.

Evidentemente cada registro de vibración ambiental tomado en un sitio es impredecible y todos ellos son diferentes entre sí, por lo que los movimientos registrados se dice que son aleatorios.

El estudio de las vibraciones aleatorias está relacionado con encontrar cómo las características estadísticas de la amplitud y contenido de frecuencia de un sistema excitado aleatoriamente dependen de las estadísticas de la excitación y de las propiedades dinámicas del sistema excitado.

En general, las mediciones de vibraciones ambientales se hacen tomando varias historias de tiempo, simultáneamente, y luego otras también simultáneas pero a diferentes instantes, para obtener una muestra representativa del sitio o de la estructura. Como todas las muestras de cada experimento son diferentes entre sí, es necesario estudiar las características estadísticas de ellas a fin de inferir uno o más parámetros que permitan caracterizar el experimento. Al grupo de registros se lo denomina ensamblaje y al tratamiento estadístico de la colección de muestras se lo denomina Proceso Estocástico.

Cuando se necesita estudiar cuál es la amplitud característica de varios registros se busca calcular el valor medio esperado de la amplitud de entre todos los registros del ensamblaje, pero como para el presente estudio el parámetro que se busca es el período del suelo o de la estructura, el ensamblaje de muestras aleatorias requiere de una descomposición de todas las frecuencias contenidas en ellas a fin de

encontrar una frecuencia media que es caracterizada por la Densidad Espectral.

Ya que matemáticamente la Densidad Espectral es la Transformada de Fourier de la Función de Autocorrelación o de la Función de Correlación Cruzada, siendo cualquiera de ellas un promedio estadístico, la Densidad Espectral puede ser también considerada como un promedio estadístico de la descomposición en frecuencias, via transformada de Fourier, de las historias en el tiempo de los registros obtenidos.

Es claro que no es posible trabajar con un número infinito de muestras, pero si se considera que las características dinámicas del suelo o de una estructura no cambian drásticamente durante las mediciones de vibraciones ambientales, un número pequeño de mediciones será suficiente como para que el experimento sea apropiado desde el punto de vista de ingeniería. Por esta razón se ha tomado 3 mediciones independientes cada vez, con los 3 sismómetros, de manera que se tienen 6 registros de vibración horizontal y 3 de movimiento vertical para cada punto.

La figuras 7 a 12 muestran los registros de varios sitios del suelo de Guayaquil.

**OBTENCION DE PERIODOS DE SUELO.** Una vez obtenidos los registros, usando el software entregado con el equipo para medir vibraciones ambientales, denominado MAC-RAN [5], es posible calcular valores estadísticos de cada medición. El primer paso es obtener la Función de Coherencia la cual compara las características dinámicas de los registros para un mismo sitio y permite comprobar si existe o no una buena correlación entre los registros obtenidos para ese sitio en particular. Luego, se obtiene la Función de Autocorrelación y la de Correlación cruzada, entre 2 muestras, las cuales permiten obtener el promedio, en el ensamblaje, del producto de 2 valores de los registros correspondientes a los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ . Al variar  $t_1$  y  $t_2$ , la Función depende de esos tiempos o de la diferencia  $t_1-t_2$ . La Autocorrelación y la Correlación cruzada permiten observar la distribución de frecuencias.

A continuación se obtiene la Función de Transferencia entre los registros obtenidos para un mismo sitio, la cual representa la función del suelo o de la estructura, y la Autocorrelación y Correlación Cruzada de dicha de Transferencia. Finalmente, la Transformada de Fourier de la Función de Autocorrelación o de la de Correlación Cruzada de la Función de Transferencia, que es la Densidad Espectral, da una buena medida del período del suelo.

La figura 13 muestra la Función de Coherencia calculada para los registros horizontales del sitio denominado BENED SUR los cuales están indicados en la figura 7. La figura 14 muestra la Función de Autocorrelación Cruzada de los registros horizontales del mismo sitio y la figura 15, la Densidad espectral de esos registros. Las figuras 16 a 20

permiten observar las densidades espectrales de los registros horizontales de los sitios indicados en las figuras 8 a 12.

El contraste de los valores obtenidos se lo ha realizado usando procedimientos analíticos basados en la recolección de algunos cientos de estudios de suelos llevados a cabo en la ciudad. El procedimiento usado se basa en la estimación del módulo elástico del suelo partiendo de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en laboratorios durante la prueba de compresión axial no confinada. Luego, asumiendo un valor para el módulo de Poisson, que por tratarse de una arcilla de alta compresibilidad, con humedades del orden del 100% y de alta plasticidad, se lo estimó en 0.45, se calculó el Módulo cortante del suelo con lo que es posible, conociendo el peso específico del suelo y la estratigrafía del sitio, calcular la velocidad de onda del depósito de suelo y posteriormente el período.

**ZONIFICACION DE LA CIUDAD.** Hasta Diciembre de 1993 se obtuvieron 200 registros de los cuales, usando las estadísticas antes mencionados, se obtuvieron los periodos de los suelos para diferentes sectores de Guayaquil. La contrastación de los valores, usando el procedimiento antes indicado, dá un 90% de confianza. La figura 21 permite observar la distribución de los períodos en diferentes partes de la ciudad

La zona Nor-Este, incluyendo el casco central donde se levanta la mayoría de los edificios altos, presenta períodos de suelo que varían entre los 0.8 y 1.2 segundos, con una tendencia hacia el período de 1.0 segundos. Estos valores corresponden al suelo suave arcilloso de esa zona. El estrato compresible de arcilla varía entre los 15 y 20 m de profundidad, seguido de arena que se va densificando con respecto a la profundidad.

La zona Sur-Oeste tiene características similares a la anterior, aunque la arcilla tiene una mayor profundidad. Esta zona, en su mayor parte corresponde a estuarios que fueron rellenados con material grueso. La tendencia de la zona es a la de período de 1.2 segundos.

Por otro lado, la zona Nor-Oeste presenta períodos entre 0.6 y 0.8 segundos, tendiendo más hacia los 0.6 segundos. El suelo de este sector de la ciudad está constituido por una arcilla dura de 8 a 10 m de profundidad, seguida de una roca débil.

**APLICACION.** Resulta importante combinar los resultados antes presentados con la medición de períodos de un edificio importante como es el de un hospital. Para ello se tomaron varias mediciones del edificio del Hospital Guayaquil ubicado en el sector Sur con 9 pisos de altura y una estructura conformada por columnas y losas planas (Foto 1)

La medición de las vibraciones ambientales del edificio y el tratamiento estadístico antes mencionado permitieron definir un período de 1.0 segundos, valor que coincide con el período del suelo en el sitio que es de 1.0 segundos. Como ya se lo expresó antes, con toda seguridad el espectro de Fourier de algún registro acelerográfico que se obtenga en un sitio cercano al Hospital presentará una acumulación de energía en la región del período del suelo de 1.0 segundos, en este caso, valor que, desafortunadamente, coincide con el período de la estructura, de manera que se esperaría una respuesta muy importante de la estructura en el período antes mencionado. Al momento se está tratando de conseguir los planos del edificio para estudiar su resistencia y poder ofrecer soluciones a este problema.

En forma similar, se procederá con los otros hospitales de la ciudad, así como con Escuelas y Colegios hasta finalizar con el proyecto cuya fecha previamente definida es Diciembre de 1994.

**CONCLUSIONES.** La medición de vibraciones ambientales en suelos, luego del tratamiento estadístico necesario, permite obtener el rango de frecuencias principales del sitio. Ya que las ondas provenientes de un sismo tendrán una acumulación de energía precisamente en la zona de la frecuencia fundamental del suelo, el fenómeno dará como resultado una amplificación de las ondas con el consecuente incremento de las fuerzas de inercia en las estructuras ubicadas en ese sitio. Obviamente, si la estructura tiene una frecuencia parecida a la del sitio, los efectos del sismo serán mayores por efecto de la resonancia.

Del análisis de los sismos de México de 1985, resulta claro que además de la concentración de energía antes mencionada, podría haber otra localizada en la frecuencia predominante de las ondas que arriban al sitio de medición.

En forma similar a la medición de vibraciones ambientales en suelos, es posible obtener las frecuencias fundamentales de edificios. El estudio de ambas características, esto es, frecuencias de suelos y de estructuras, dá una información importantísima en cuanto al comportamiento esperado de las estructuras bajo la acción de un sismo.

El caso del Hospital Guayaquil resulta ser un caso muy especial ya que el período de la estructura es de 1.0 segundos y el del suelo también es de 1.0 segundos. Esto implica que el registro acelerográfico que se podría obtener en el sitio, durante un sismo, tendrá una concentración de energía en 1.0 segundos induciendo grandes fuerzas de inercia y desplazamientos importantes en la estructura.

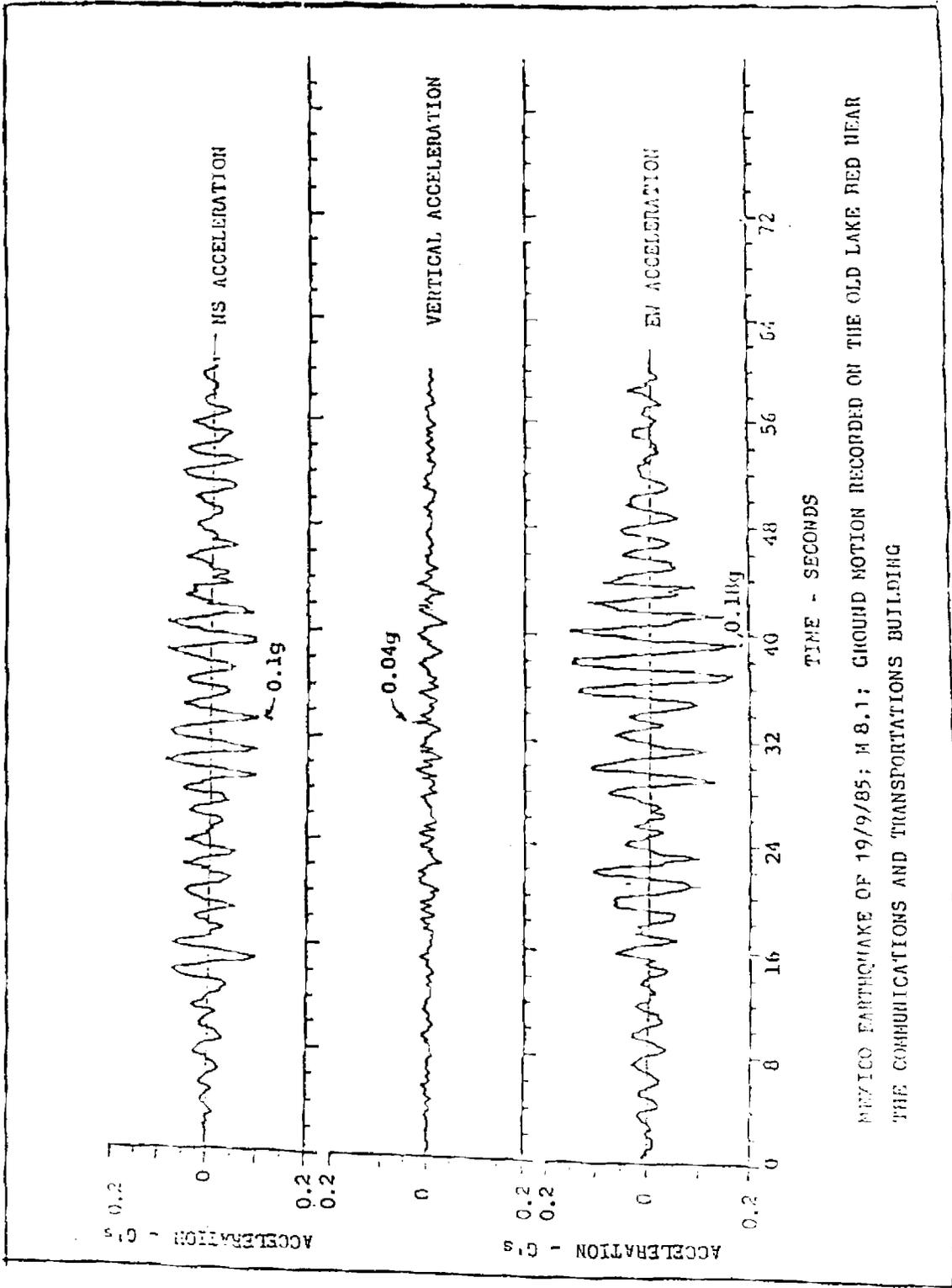
En consecuencia, la medición de períodos en suelos y estructuras abre una línea de extraordinaria significación en el estudio de la mitigación científica de los desastres, pues casos como el Hospital Guayaquil pueden ser solucionados antes de que ocurra un sismo que pudiera provocar daños que imposibilitaran que el edificio cumpla el destino para

el cual fué diseñado.

El Autor agradece a los directivos de UNDRO/DHA, Dr John Tomblin, Sres. Dussan Zupka, José Briceño y Ricardo Mena, por toda la colaboración recibida y en particular por la donación del equipo de vibraciones ambientales a la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) con el que se realiza el proyecto ECU/004/92 para la ciudad de Guayaquil.

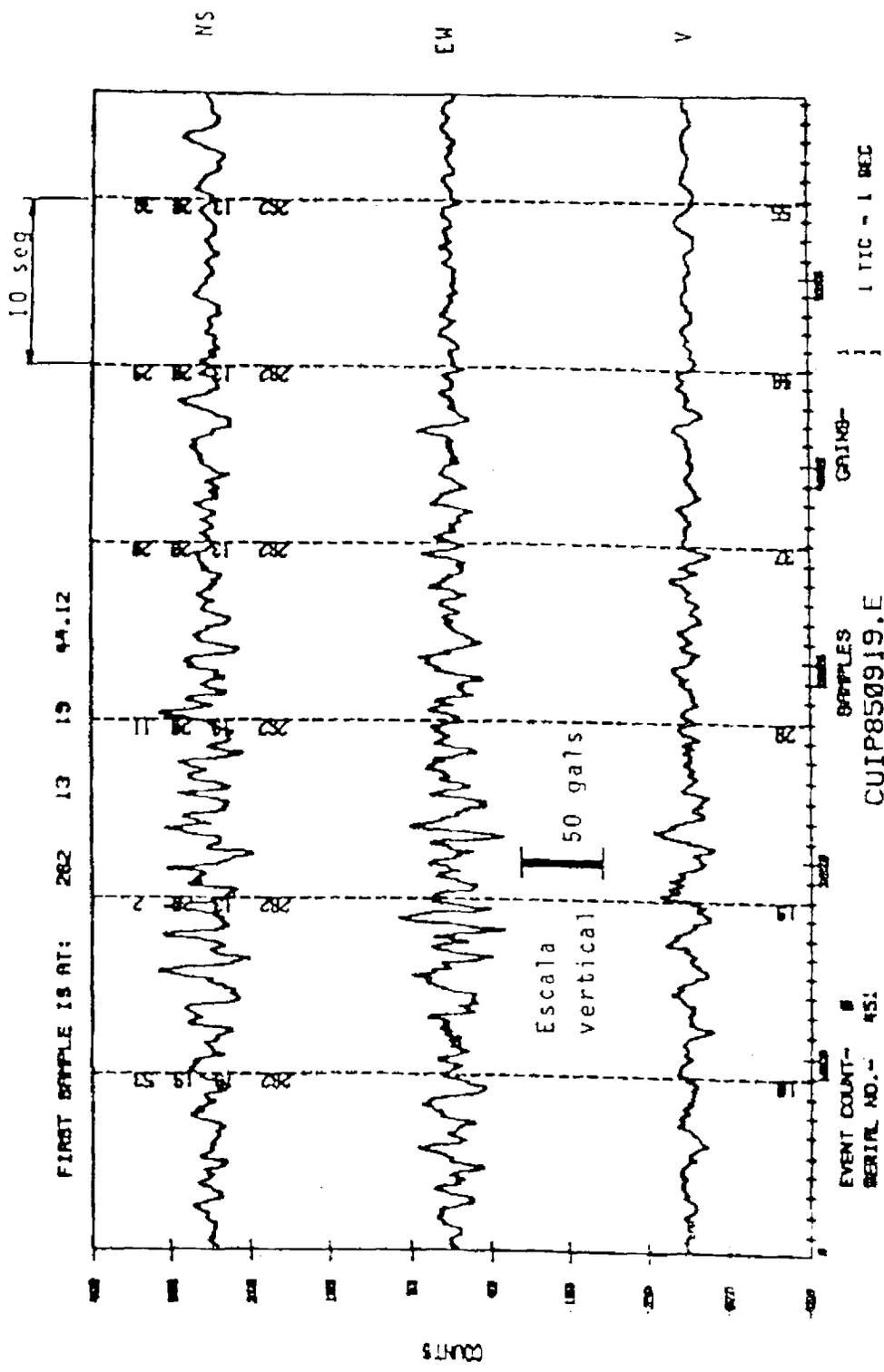
## **REFERENCIAS.**

1. SING, S.K., MENA, E., CASTRO, R. "Some aspects of source characteristics of the September 19, 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico city from strong motion data". Instituto de Ingenieria e Instituto de Geofísica UNAM. ciudad Universitaria 04510 Mexico, D.F.
2. LARA, OTTON, et. al. "Riesgo Sísmico de auna Central Hidroeléctrica en el Ecuador". Memorias de la Tercera Conferencia Latinoamericana de Ingeniería Sismo-Resistente. ESPOL-OEA 1984.
3. LARA, OTTON "Estimación del Potencial de daño en estructuras en la ciudad de Guayaquil durante sismos severos" Proyecto de investigación para la mitigación de desastres presentado UNDRO/DHA.
4. RUFFILLI, ARNALDO Estudios del sismo de 1942. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil. 1943.
5. LARA, OTTON. "The 1980 Guayaquil earthquake: Seismological an engineering aspects". 8th. World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, Cal. 1984 Vol.5.
6. UNIVERSITY SOFTWARE SYSTEMS. "Mac/Ran IV. Time Series Data Analysis Systems". Revision 2.0. January 1990.



MEXICO EARTHQUAKE OF 19/9/85; M 8.1; GROUND MOTION RECORDED ON THE OLD LAKE RED NEAR THE COMMUNICATIONS AND TRANSPORTATIONS BUILDING

Fig. 1



Acelerograma del sismo del 19 de septiembre de 1985, obtenido en el Jardín del Instituto de Ingeniería de la UNAM en Ciudad Universitaria

Fig. 2

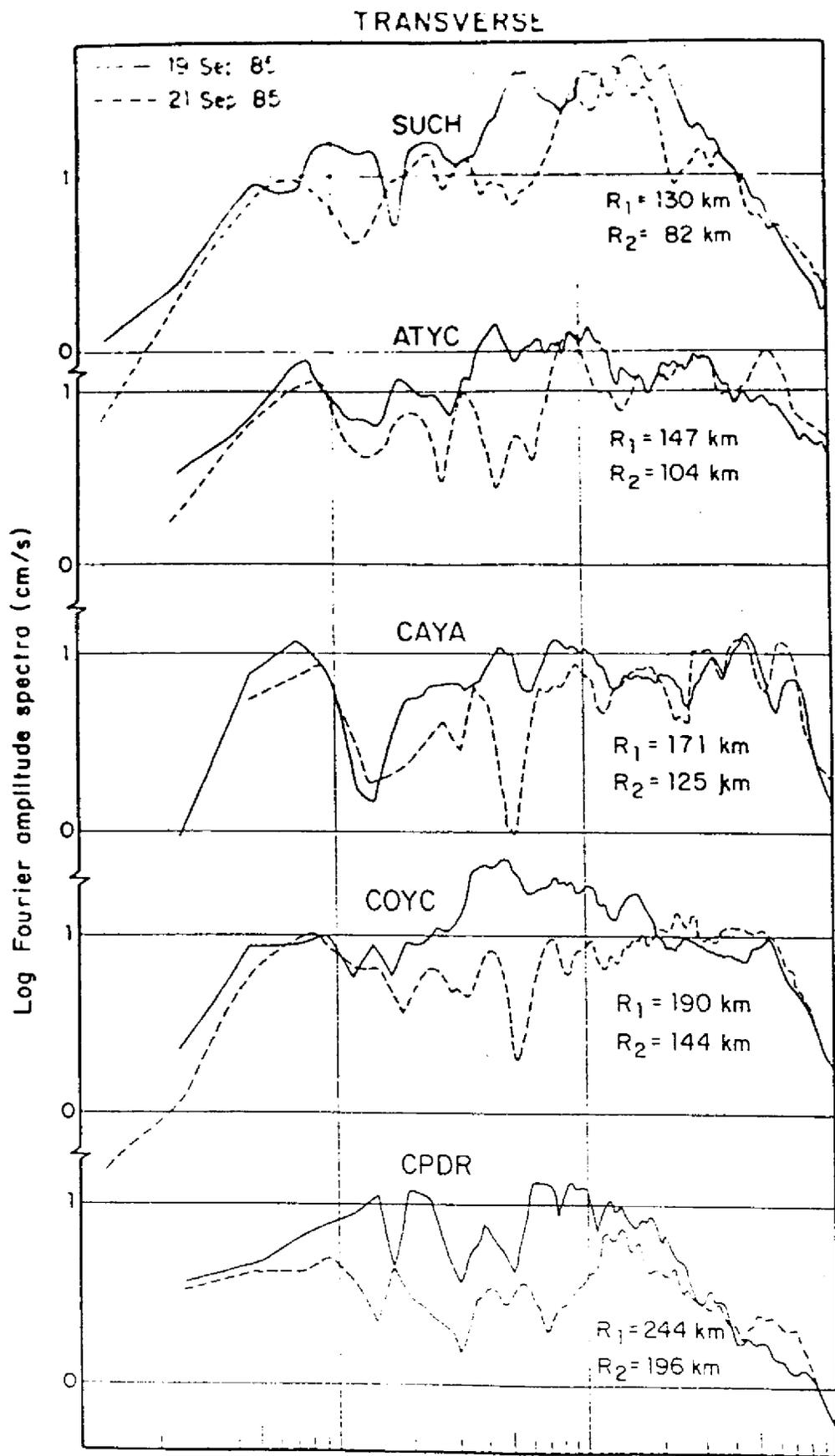


Fig. 3

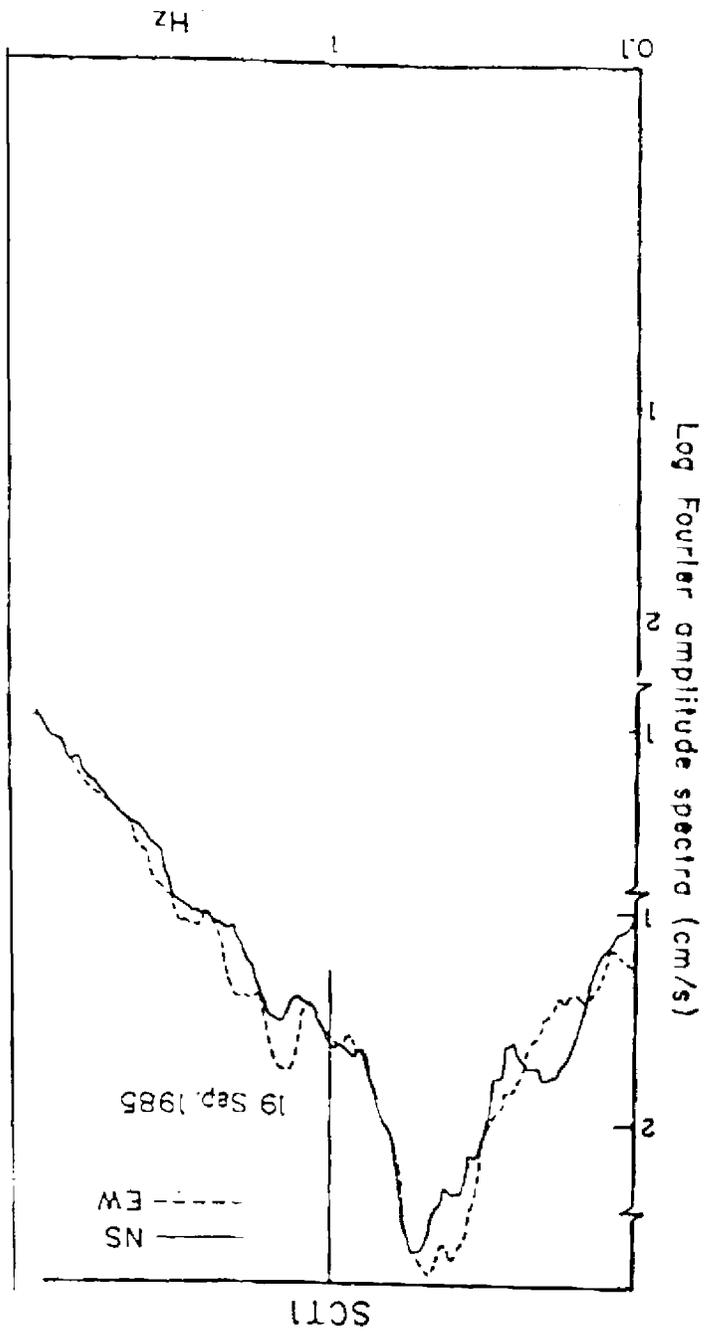


Fig. 4

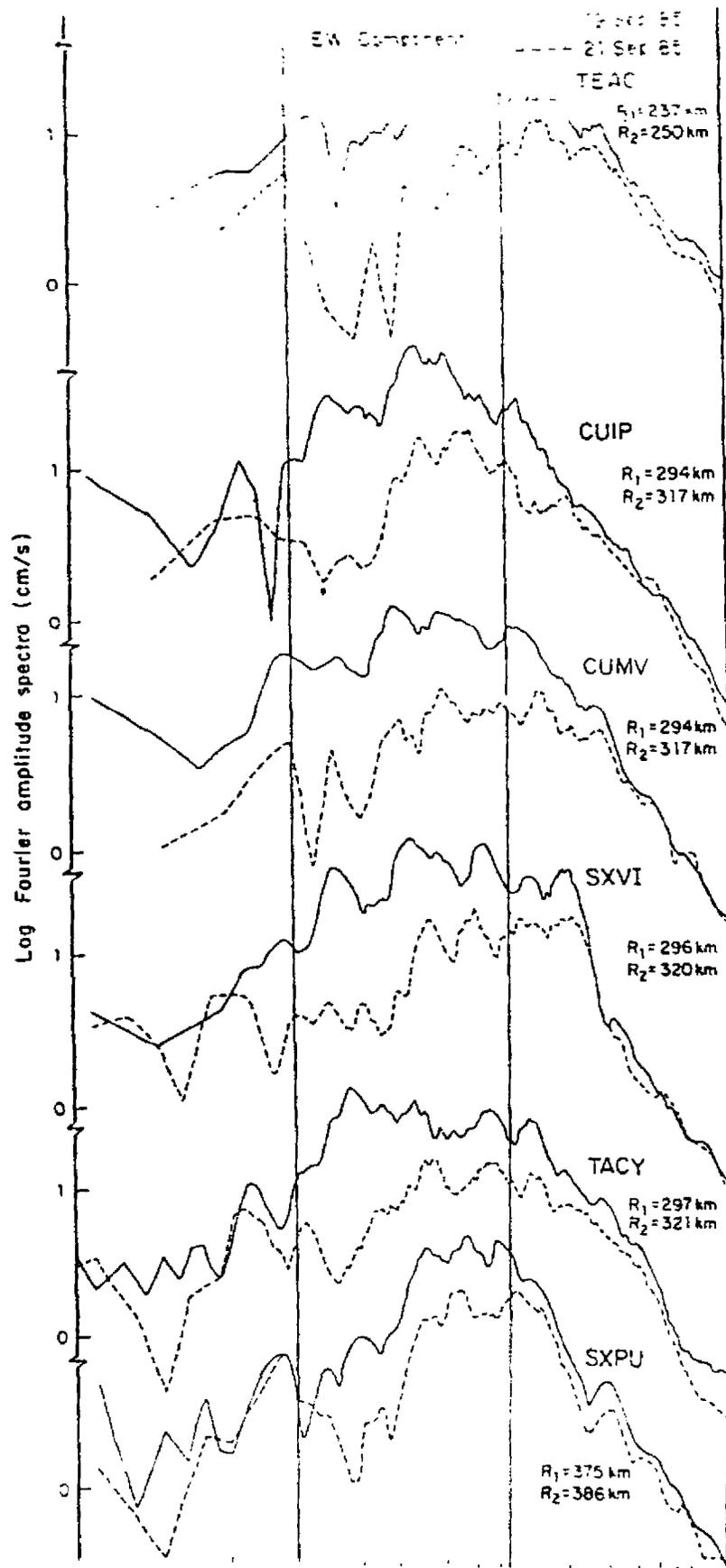
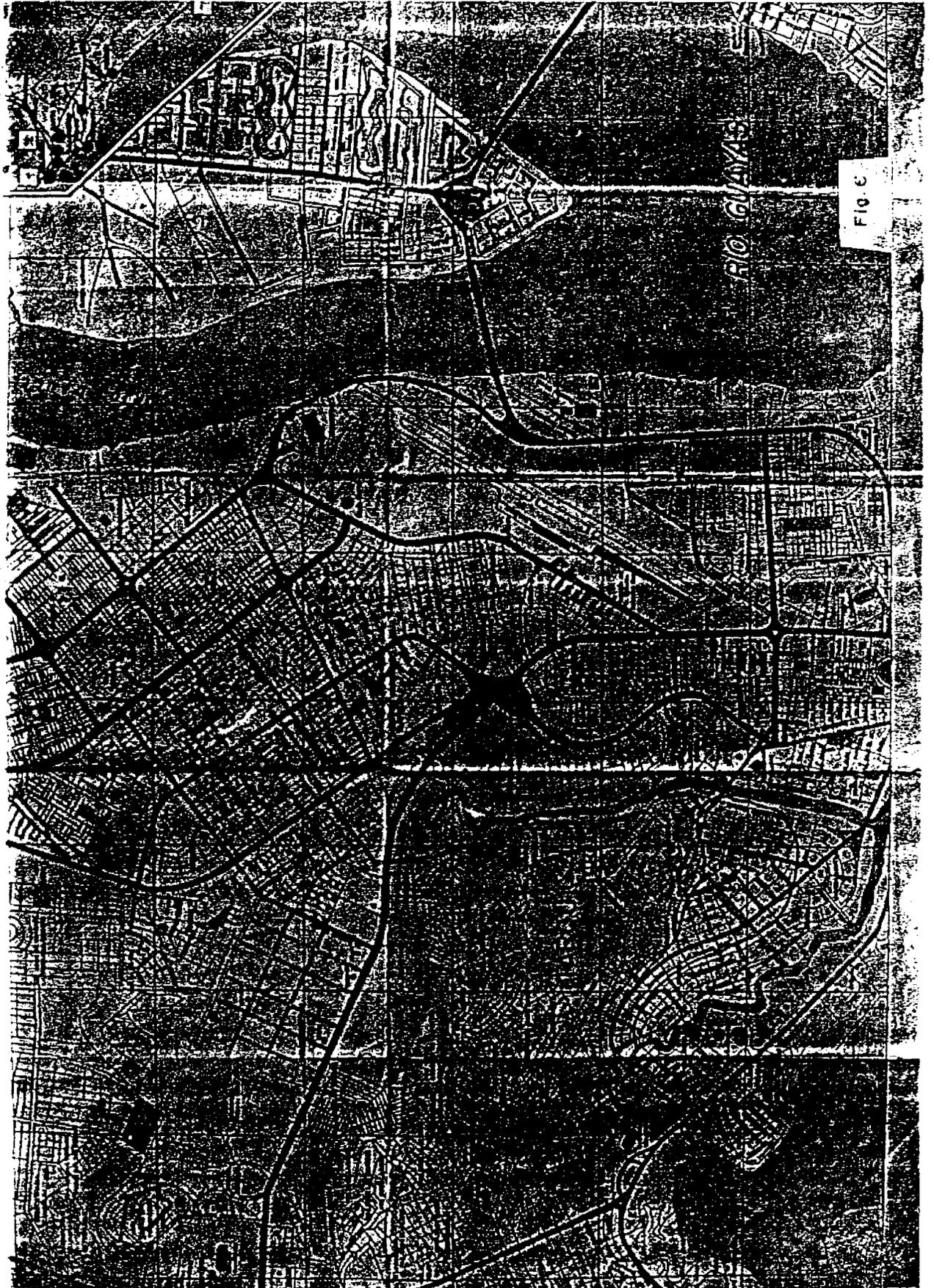
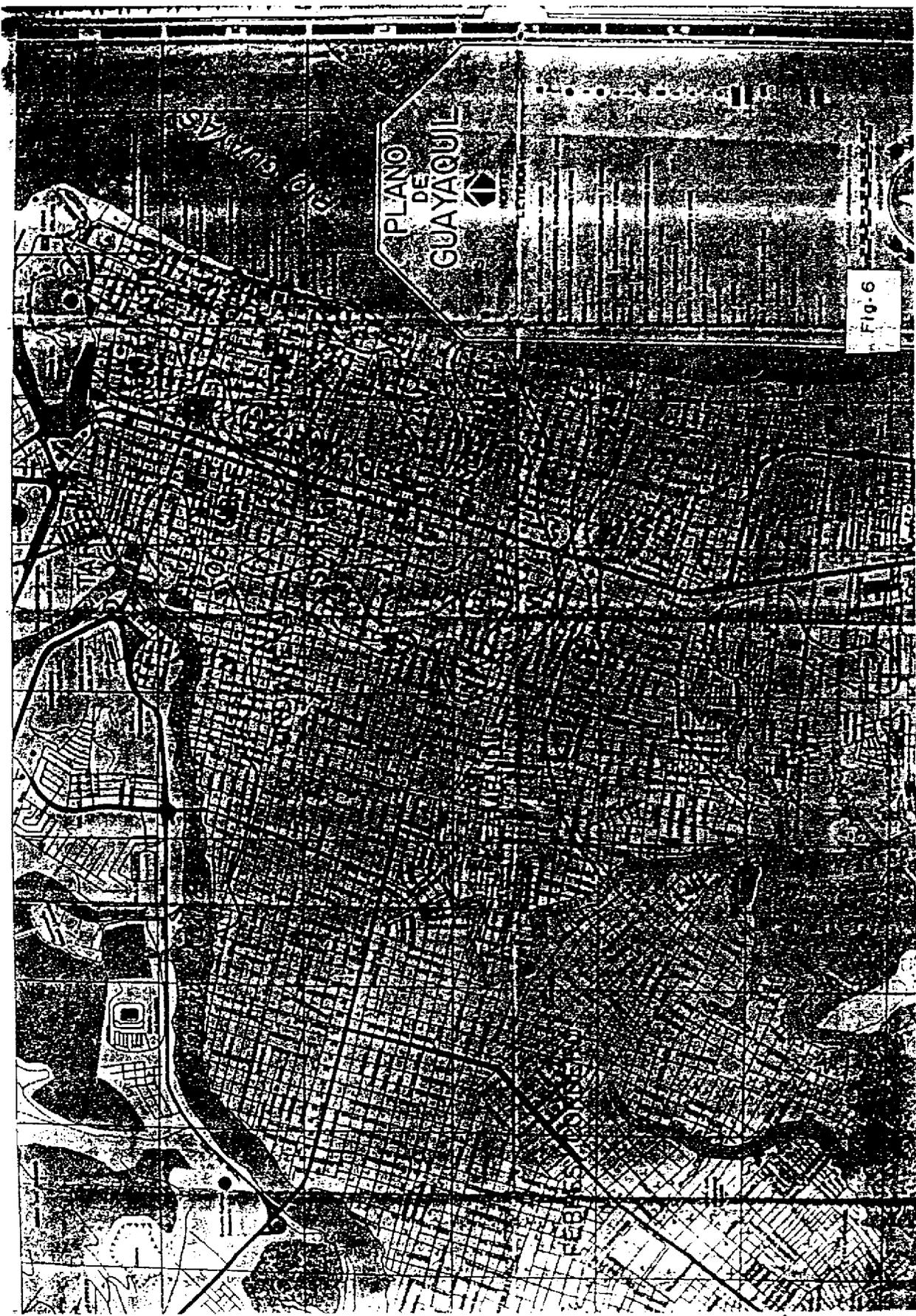


Fig. 5





PLANO DE GUAYAQUIL

Fig. 6

RIO GUAYAS

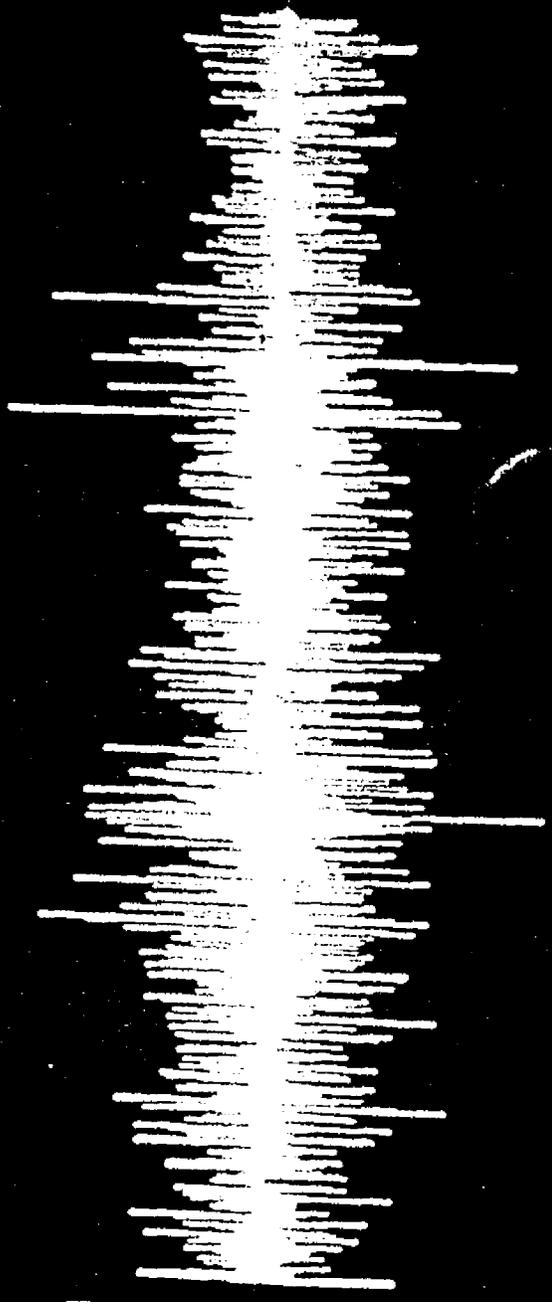
GENERAL SURVEY

3.0

883-1 8/11 3:00

(1172)

2.0



1.0

0.0

-1.0

-2.0

-3.0

0.0

12.5

25.0

37.5

50.0

62.5

75.0

87.5

100.0

3.0000