

14/10

ESTUDIO DE REPLICAS DEL SISMO DE
HUAJUAPAN DE LEON DEL
24 DE OCTUBRE DE 1980

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

VICTOR RICARDO TOLEDO REYES



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección
60-I-143

Señor TOLEDO REYES VICTOR RICARDO.
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Prof. Dr. - Fidencio A. Nava Pichardo, para que lo desarrolle como tesis - - para su Examen Profesional de la carrera de INGENIERO GEOFISICO.

"ESTUDIO DE REPLICAS DEL SISMO DE HUAJUAPAN DE LEON DEL 24 DE OCTUBRE DE 1980"

RESUMEN.
I INTRODUCCION.
II RELOCALIZACION DE HIPOCENTROS.
III ANALISIS DE LAS ONDAS DE PLACA.
IV DETERMINACION DE PARAMETROS DE FUENTE.
V DISCUSION Y CONCLUSIONES.
APENDICE.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar -- Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como -- requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así -- como de la disposición de la Coordinación de la Administración -- Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F., 29 de noviembre de 1982,

EL DIRECTOR

Ing. Javier Jiménez

I N D I C E

R E S U M E N	vi
1. Introducción	1
2. Relocalización de hipocentros	9
2.1 Introducción	9
2.1.1 El método de evento maestro	10
2.2 Obtención de eventos y residuos maestros	11
2.3 Las réplicas: Relocalización de hipocentros	13
2.4 El sismo principal	22
2.4.1 Relocalización	22
2.4.2 Mecanismo focal	28
3. Análisis de las ondas de placa	31
3.1 El análisis espectral	31
3.2 Identificación de ondas de placa	32
3.3 El modelo de la corteza y la excitación de las ondas de placa	34
4. Determinación de parámetros de fuente	43
4.1 Parámetros de fuente del sismo principal	43
4.2 Parámetros de fuente obtenidos del análisis espectral de las réplicas	47
5. Discusión y conclusiones	59
Apéndice A	66
El sistema RESMAC, obtención y procesamiento de datos sísmicos	

RESUMEN

En este trabajo se han estudiado algunos aspectos del sismo de Huajuapán de León ($m_p=7.0$, $H=72$ km; Oaxaca, 24 de octubre de 1980) y 77 réplicas ($2.0 \leq M_L \leq 4.3$), utilizando datos de la red de estaciones RESMAC (Red Sismológica Mexicana de Apertura Continental).

Los hipocentros de las réplicas fueron localizados mediante el método de evento maestro, obteniéndose epicentros que difieren por menos de 8 km de epicentros obtenidos con datos de una red portátil de estaciones, operada por el Instituto de Geofísica en la región de ocurrencia del sismo principal. La distribución de los hipocentros de las réplicas concuerda con uno de los planos del mecanismo focal determinado para el sismo principal por Jiménez (1981), definiendo el plano de ruptura.

Las réplicas del sismo de Huajuapán de León se caracterizan por presentar en sus registros fases sísmicas que fueron interpretadas por Lomnitz (1981-1982), como fases refractadas en una interfase (placa de cocos-manto), siendo denominadas "fases de placa".

El análisis espectral de las fases de placa y fases identificadas como P_g y S_g red denominadas como P_t y S_t permitió esclarecer su origen como P ó S (fases P ó S refractadas en la interfase placa de cocos-manto).

Dos modelos estructurales de velocidades, que consideran a la placa de Cocos en subducción, son propuestos en base a la posición de los hipocentros. Ambos modelos presentan un canal de baja velocidad, que puede actuar como trampa de energía. En base a estos modelos se proponen explicaciones cualitativas, para las siguientes características de las fases de placa. En los sismogramas sus amplitudes son mayores de lo esperado de ondas refractadas, y en sus espectros en diferentes estaciones se observa una variación de la frecuencia de esquina (f_c); en particular, los espectros en la estación ACX presentan un "máximo de amplitudes" para frecuencias altas, (≈ 6 Hz) cercanas usualmente a la frecuencia de esquina, no observado en las otras estaciones.

Debido a las variaciones de f_c en los espectros de las fases de placa, en cada estación los parámetros de fuente resultan en valores erróneos, diferentes para un mismo evento. Valores aproximados para los parámetros de fuente de las réplicas son obtenidos de fases identificadas como S_g en MEX. Resultando en valores de $4.7 \text{ E}20 - 9.2 \text{ E}22$ dinas-cm para el momento de $0.2 - 0.6$ km para el radio, y de $1.0 - 6.0$ bares para la caída de esfuerzo $\Delta\sigma$.

Los parámetros de fuente para el sismo principal, obtenidos del análisis espectral de estaciones a distancias telesísmicas, dan valores de $M_0=2.1 \text{ E}26$ dinas-cm, $r=22.6$ km, y $\Delta\sigma = 5.4$

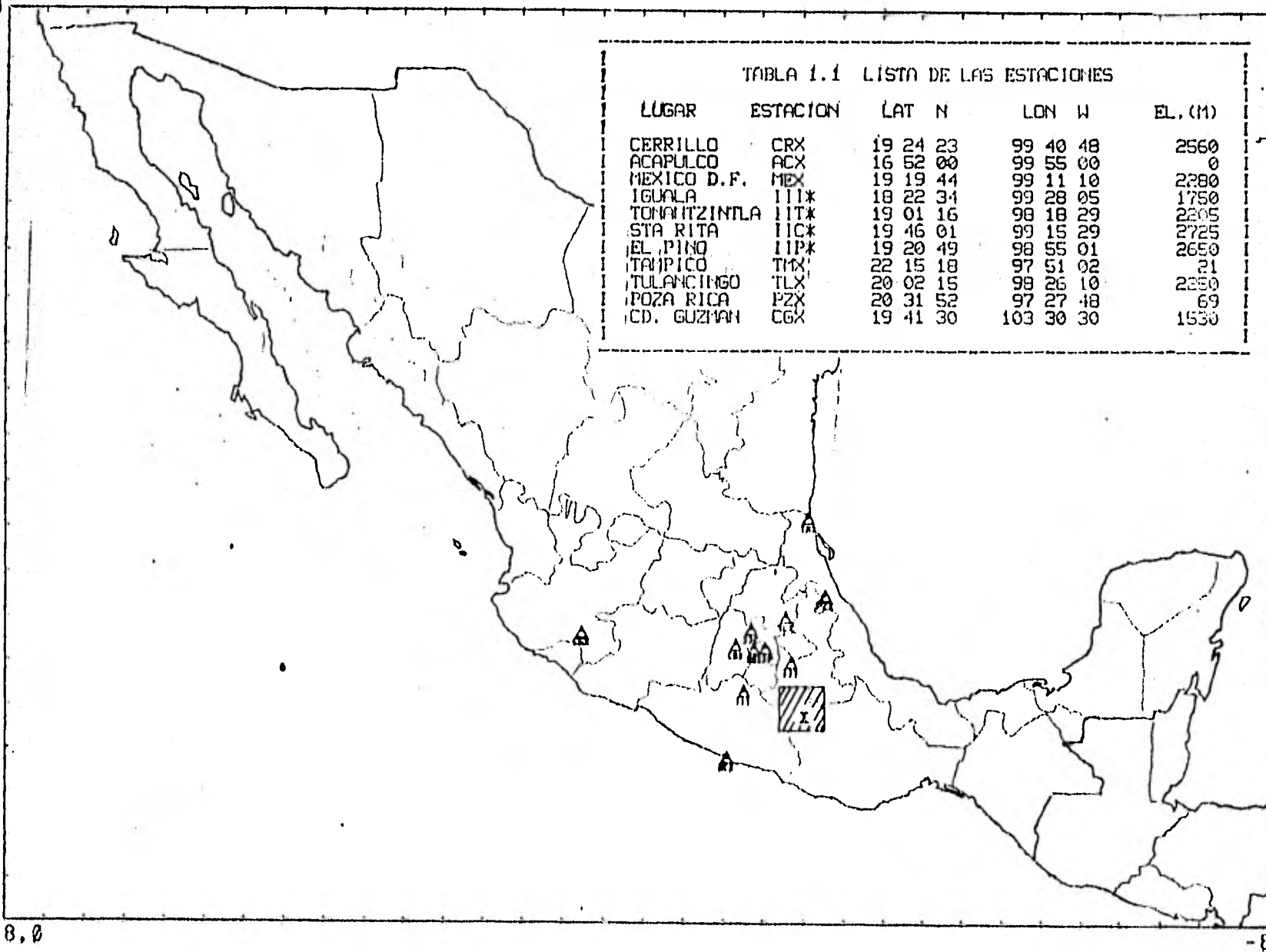
bar. El valor de r concuerda con el tamaño del área de réplicas y el valor de $\Delta\sigma$ para el sismo principal es del orden de los obtenidos por otros autores para sismos grandes en la región.

1. INTRODUCCION

El 24 de octubre de 1980 a las 14:53 horas UCT (8:53, hora local), cerca del lugar en que coinciden los estados de Puebla, Oaxaca y Guerrero, ocurrió un fuerte sismo ($m_b = 7.0$, $H = 72$ km) que causó daños considerables en unas 300 poblaciones de la región de la Mixteca Alta (ver figura 1.1). Los mayores daños observados ocurrieron en un radio de aproximadamente 120 kms. La Ciudad de Huajuapán de León, a una distancia aproximada de 40 kms del epicentro fué dañada en un 80% (Príncipe, 1980; Mota, 1981). Por los daños causados a ésta Ciudad, éste sismo fué denominado "Sismo de Huajuapán de León". En esta región de la Mixteca Alta, no se había producido un sismo fuerte ($m_b > 7.0$) desde el ocurrido el 19 de Julio de 1882 (Sánchez, 1982).

El sismo de Huajuapán de León se produjo en la zona de alta sismicidad del sur y suroeste de México. Como causa de esta alta sismicidad, la teoría de la tectónica de placas propone los movimientos de interacción de las placas del Pacífico: la placa Americana y la de Cocos (Figura 1,2), cuyos movimientos relativos son convergentes en la zona y han dado lugar a la Sierra Madre Occidental y a la trinchera mesoamericana, en donde la placa de Cocos es subducida bajo la placa Americana (Molnar & Sykes, 1969; Dewey & Bird, 1970). La subducción de la Placa de Cocos, ha dado lugar a una zona de Benioff que

33.0

13.0
118.0

-86.0

FIGURA 1.1 Localización de la región de ocurrencia (area sombreada) y epicentro del sismo de Huajuapán de León. Y ubicación geográfica de las estaciones sísmicas de RESMAC.

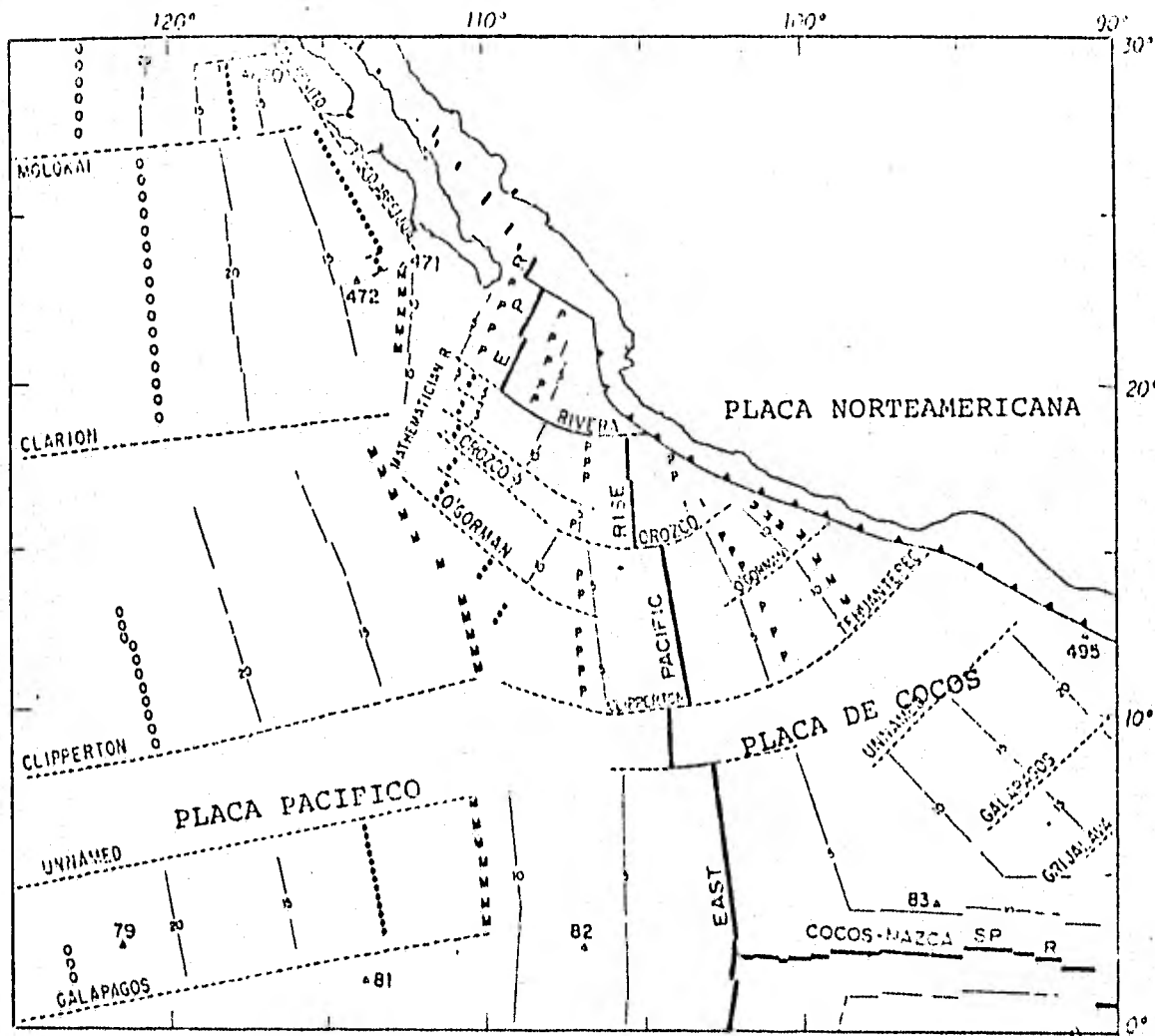


FIGURA 1.2 Tectónica regional (tomado de Mammerickx & Klitgord, 1982). Las líneas gruesas delimitan a la placa de Cocos de la placa de Nazca y la del Pacífico. La trinchera mesoamericana es representada con la línea con triángulos. Las líneas discontinuas representan fallas de transformación.

presenta sismicidad a profundidades somera e intermedia principalmente (Benioff, 1954).

Unas horas después de la ocurrencia del sismo principal, el Instituto de Geofísica de la UNAM (IGF) comenzó a operar una red de 4 sismógrafos portátiles en el área epicentral, con objeto de registrar la actividad sísmica de réplicas de Hualajuapán de León. Esta red registró aproximadamente 600 réplicas en 7 días de operación (Mota, 1981). Cerca de 200 de estas réplicas fueron localizadas por el IGF, encontrándose profundidades hipocentrales de 30 a 55 km y un área de réplicas de aproximadamente 35 km de largo (Mota, 1981).

Las redes de estaciones sísmicas que operan permanentemente en el país, registraron relativamente pocas réplicas de las reportadas por el IGF; RESMAC (Red Sismológica Mexicana de Apertura Continental), registró 77 réplicas localizables con magnitudes M_L de 2.0 a 4.3, en el período del 24 de octubre de 1980 al 1° de Febrero de 1981. Los datos de estas 77 réplicas fueron empleados en este trabajo, complementándose con datos de la red portátil del IGF.

El sismo principal fué localizado por varios centros sísmológicos, los cuales reportan del epicentro fuera del área de réplicas (determinada por el IGF) y distintos valores para la profundidad del foco. Este último parámetro fué el más discutido de los reportados del sismo principal (Prince, 1980; Jiménez, 1981; USGS PDE, Octubre, 1980). Jiménez (1981) determinó un mecanismo de falla normal para el sismo principal, para una profundidad de 72 km,

Del análisis de los registros de las réplicas, en estaciones a distancias regionales, Lomnitz (1981, 1982) identificó la presencia de fases sísmicas, cuyos tiempos de arribo no pueden ser explicados en base a modelos estructurales de velocidades de capas horizontales, denominándolas fases de placa. Estas fases sísmicas fueron interpretadas por el mencionado autor, como una evidencia directa de la posición estructural de la placa de Cocos en subducción bajo la placa americana, correspondiendo a fases refractadas en un horizonte identificado como la interfase placa de Cocos-manto. La interpretación fue basada en los siguientes puntos:

- a) Velocidades aparentes de 8.0 km/seg para las fases de placa (señaladas con la nomenclatura P_tP , P_tS y S_tS , en la Figura 1.3) fueron calculadas, siendo éstas mayores que las esperadas en los modelos de capas horizontales para fases conocidas (P_g , S_g , P_n , S_n).
- b) Los arribos P_tS y S_tS no pueden ser identificados como fases S_g pues éste arribo es esperado con 10 o más seg. de retraso. Tampoco pueden ser interpretados como conversiones de fases P a S, pues ésta conversión requiere de un espesor de la corteza de 100 km y es conocido un espesor probable de ~40 km de la corteza en la zona,

- c) Arribos P_n y S_n (reflexiones o refracciones en la base de la corteza) no pueden presentarse, ya que según los datos de estaciones de campo, los focos se encuentran bajo la corteza (asumiendo el espesor de ~40 km).
- d) La introducción de un horizonte inclinado (identificado tentativamente como la base de la placa de Cocos en subducción), en el modelo de capas horizontales, permite explicar los tiempos de arribo de las fases de placa, correspondiendo a refracciones de las ondas sísmicas en dicho horizonte.

La nomenclatura empleada por Lomnitz (1982) para designar a las fases de placa indica: La primera letra el tipo de origen de la onda (P o S), la t significa refracción y la segunda letra el modo de propagación (como P o S) de la onda hacia la superficie. La interpretación hecha por el mencionado autor, sobre las ondas de placa, puede verse en la figura 1.3, y los esquemas de la modificación de los modelos de capas horizontales, por la placa de cocos pueden verse en las figuras 1.4.

El presente trabajo estudia la distribución hipocentral de las réplicas y sus implicaciones respecto al modelo estructural, y a la localización y mecanismo focal del sismo principal. Estudia también el contenido espectral de distintas fases sísmicas de las réplicas, que ayuda a la correcta interpretación de aquellas, y tiene implicaciones estructurales. Aplica al análisis espectral de ondas de cuerpo

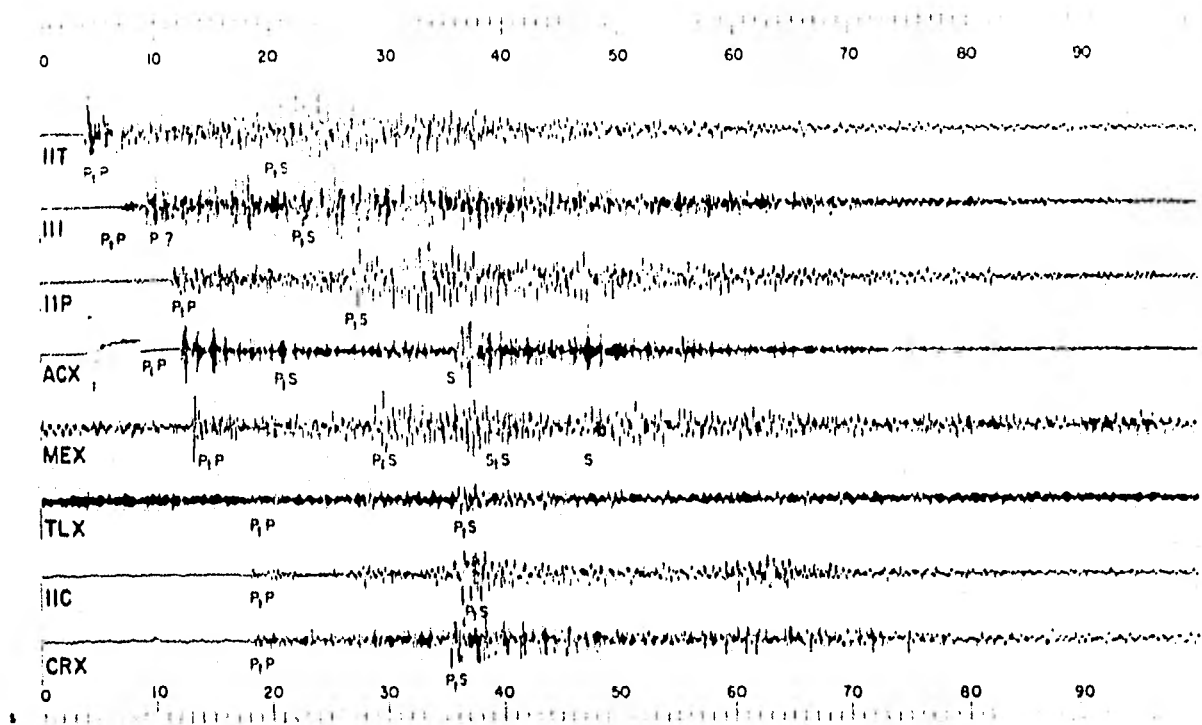


FIGURA 1.3 Interpretación de los arribos sísmicos observados en una de las réplicas (15:76, ver tabla 2.4) hecha por Lomnitz (1982). La nomenclatura P_tP , P_tS , S_tS es usada para indicar las fases de placa.

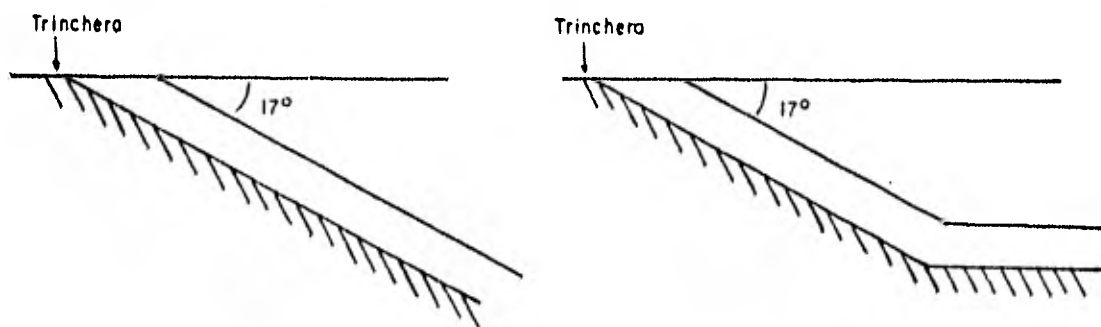


FIGURA 1.4 Esquemas de los modelos estructurales de velocidades que consideran a la placa de Cocos (sección inclinada), propuestos por Lomnitz (1982).

para la obtención aproximada de parámetros de fuente de las réplicas y del sismo principal (registrado éste en estaciones telesísmicas). Los resultados obtenidos son comparados con los obtenidos por otros autores.

Los resultados de este trabajo fueron obtenidos usando los procesamientos de datos sísmicos de RESMAC y programas específicos de cómputo (mencionados sin autor en este trabajo elaborados por A. Nava para RESMAC), en el sistema de cómputo del proyecto (ver apéndice A).

2. RELOCALIZACION DE HIPOCENTROS

2.1. Introducción

Los métodos de localización de hipocentros basados en modelos de velocidades de capas horizontales, no dan resoluciones confiables cuando el modelo no representa adecuadamente a la estructura real de velocidades; o cuando las fases sísmicas no son correctamente interpretadas.

Para el caso del sur y sureste de México la presencia de la zona de Benioff asociada con la trinchera del Pacífico (Molnar & Sykes, 1969; Dewey & Bird, 1970) hace que los modelos de capas horizontales paralelas, utilizados actualmente en la localización de sismos con datos de estaciones a distancias regionales, no sean una buena aproximación a la estructura real (sugerida por la tectónica de placas de la región). Sin embargo, si se cuenta con uno o más sismos bien localizados (por ejemplo, mediante redes locales de campo), es posible disminuir los errores provocados por los inconvenientes arriba mencionados, en la localización de sismos cercanos a los bien localizados, empleando a éstos como evento maestro,

Diferencias de 18 a 45 kms fueron observados entre los epicentros de las réplicas obtenidos por Mota (1981), con datos de la red local del IGF (mencionada en la sección 1.) y los epicentros preliminares obtenidos rutinariamente por RESMAC. Estas diferencias (ver localizaciones en tabla 2,1) ilustran la necesidad de relocalizar los eventos, con un mé-

todo como el de evento maestro.

2.1.1. El método de Evento Maestro

Este procedimiento consiste en obtener los residuos de localización (R_i) de un evento bien localizado (denominado evento maestro) para determinadas fases sísmicas observadas, definidos como: $R_i = t_i^R - T_i$; $i = 1, N$, donde t_i^R son los arribos observados, T_i los tiempos teóricos de viaje del hipocentro a las estaciones, y N es el número de estaciones empleadas. Mediante los residuos R_i (llamados residuos maestros) se modifican los tiempos de arribo de las fases sísmicas, de los sismos por localizar, correspondientes a las observadas para el evento maestro; obteniéndose los tiempos modificados: $t_i^m = t_i - R_i$; donde t_i son los tiempos de arribo observados en los sismos por localizar. Los sismos son localizados empleando los tiempos t_i^m , en vez de los tiempos observados t_i ; de esta manera los hipocentros son determinados en base a los residuos del evento maestro, minimizándose la expresión:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i - R_i)^2$$

en donde: ρ_i es el residuo de localización del sismo, y R_i el del evento maestro,

Para implementar el método arriba mencionado, se utilizó un programa de cómputo (MAESLO) que utiliza una versión modificada del programa de localización CAPAS (ver apéndice A, sección A,2) como subrutina,

2.2. Obtención de eventos y residuos maestros

Los hipocentros de 10 réplicas fueron calculados usando datos de la red de estaciones temporales del IGF mediante tres programas de cómputo diferentes, comparándose los parámetros de localización obtenidos de los diferentes programas, principalmente la profundidad; con objeto de contar con eventos de localización confiable, para ser utilizados como eventos maestros. Por las distancias relativamente pequeñas de los epicentros a las estaciones del IGF ($9 < \Delta < 90$ km), en los registros se observan fases sísmicas claras, identificadas como P_g y S_g (Mota, comunicación personal; 1981), apropiadas para el empleo de modelos de velocidades de capas paralelas. Las lecturas de los tiempos de arribo de las fases mencionadas fueron proporcionadas por el IGF.

Los programas usados para la localización fueron: el programa CAPAS, un programa que utiliza como modelo un semi-espacio (LOCA), y el programa HYPO 71 (Lee & Larr, 1971). El modelo de velocidades que se empleó para los programas CAPAS e HYPO 71 fué el modelo MEX-01, utilizado en RESMAC para localizaciones rutinarias (figura 2.1). Los resultados de la localización obtenidos con los diferentes programas, fueron semejantes entre sí para cada evento, y se muestran para algunos eventos en la tabla 2.2.

Los hipocentros y el tiempo origen calculados con el programa HYPO 71, se emplearon en el cálculo de los residuos maestros (R_1) de los 10 eventos, para las estaciones de RESMAC

TABLA 2.1 COMPARACION DE LOCALIZACIONES HECHAS CON DATOS DE ESTACIONES PORTATILES (IGF) Y CON DATOS DE ESTACIONES DE RESMAC.

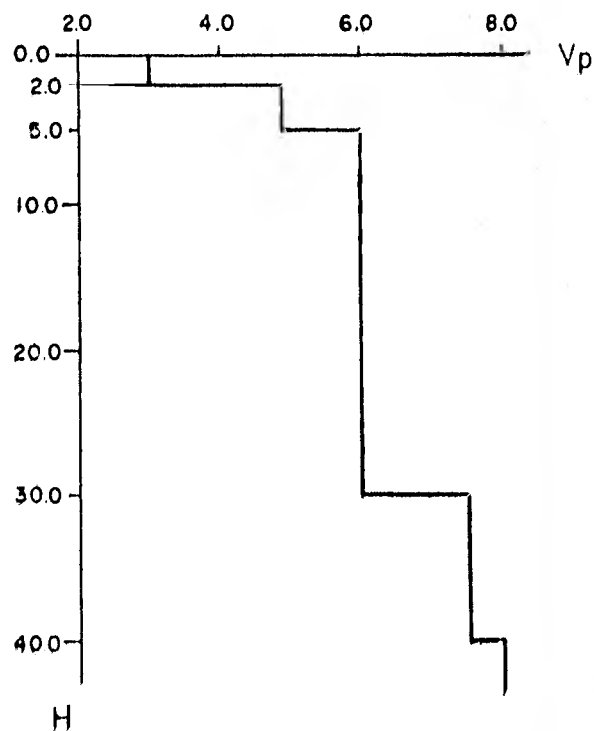
LOC.	LAT N	LOH W	HORA ORIGEN	H	D(KM)
EVENTO 15:62					
IGF	17.96	98.24	03 13 34.6	35.1	
RESMAC	17.8	98.2	03 13 29.3	70 R	18.2
EVENTO 15:95					
IGF	17.89	98.11	12 02 43.5	44.6	
RESMAC	17.7	98.2	12 02 41.4	70 R	23.1
EVENTO 15:96					
IGF	17.97	98.19	15 54 16.1	50.7	
RESMAC	18.1	98.4	15 54 17.3	70 R	26.5
EVENTO 15:97					
IGF	17.91	98.12	18 42 59.2	34.5	
RESMAC	17.7	98.1	18 42 54.0	70 R	23.3
EVENTO 15:101					
IGF	17.92	98.18	02 27 49.8	41.5	
RESMAC	17.6	98.0	02 27 44.6	70 R	40.2
EVENTO 15:111					
IGF	17.94	98.08	10 40 26.3	51.9	
RESMAC	17.6	98.0	10 40 21.6	70 R	38.5

LOC. • LOCALIZACION
H • PROFUNDIDAD (EN KM)
D • DISTANCIA ENTRE EPICENTROS (EN KM)
R • PROFUNDIDAD RESTRINGIDA

TABLA DE VEL DEL MODELO

VEL.P (KM/SEG)	H (PROF. KM)
3.0	0.0 - 2.0
4.9	2.0 - 5.0
6.1	5.0 - 30.0
7.6	30.0 - 40.0
8.1	40.0 -

FIGURA 2.1 El modelo de velocidades MEX-01, empleado en las localizaciones rutinarias de RESMAC.



(figura 1.1). Los residuos ($R_i = t_i^F - T_i$) se calcularon para los arribos señalados con la nomenclatura P_t y S_t en los sismogramas (ver figuras 2.2, 2.3, 2.4). Los tiempos teóricos de viaje (T_i) de los hipocentros a las estaciones (P_g y S_g teóricos), se calcularon utilizando el modelo de velocidades MEX-01, mediante un programa modificado de CAPAS (CAFI); el cual obtiene estos tiempos y los residuos R_i a partir de un hipocentro y tiempo origen, proporcionados como datos. Estos tiempos teóricos fueron llamados T_p y T_s ; por consiguiente los residuos maestros están dados por: $P_t - T_p$ y $S_t - T_s$.

En los sismogramas de las figuras 2.2, 2.3, 2.4 se señalan los tiempos teóricos T_p y T_s , y en la Tabla 2.3 se muestran las diferencias en segundos entre estos tiempos y los arribos P_t y S_t para el evento 15:111 de la figura 2.2. Nótese que éstas diferencias no son lineales con la distancia, lo cual concuerda con frentes de onda elípticos en superficie (con su semieje mayor perpendicular a la trinchera mesoamericana) para las fases P_t y S_t , debidos a la inclinación del horizonte refractor (Lomnitz, 1982).

2.3. Las réplicas: Relocalización de hipocentros

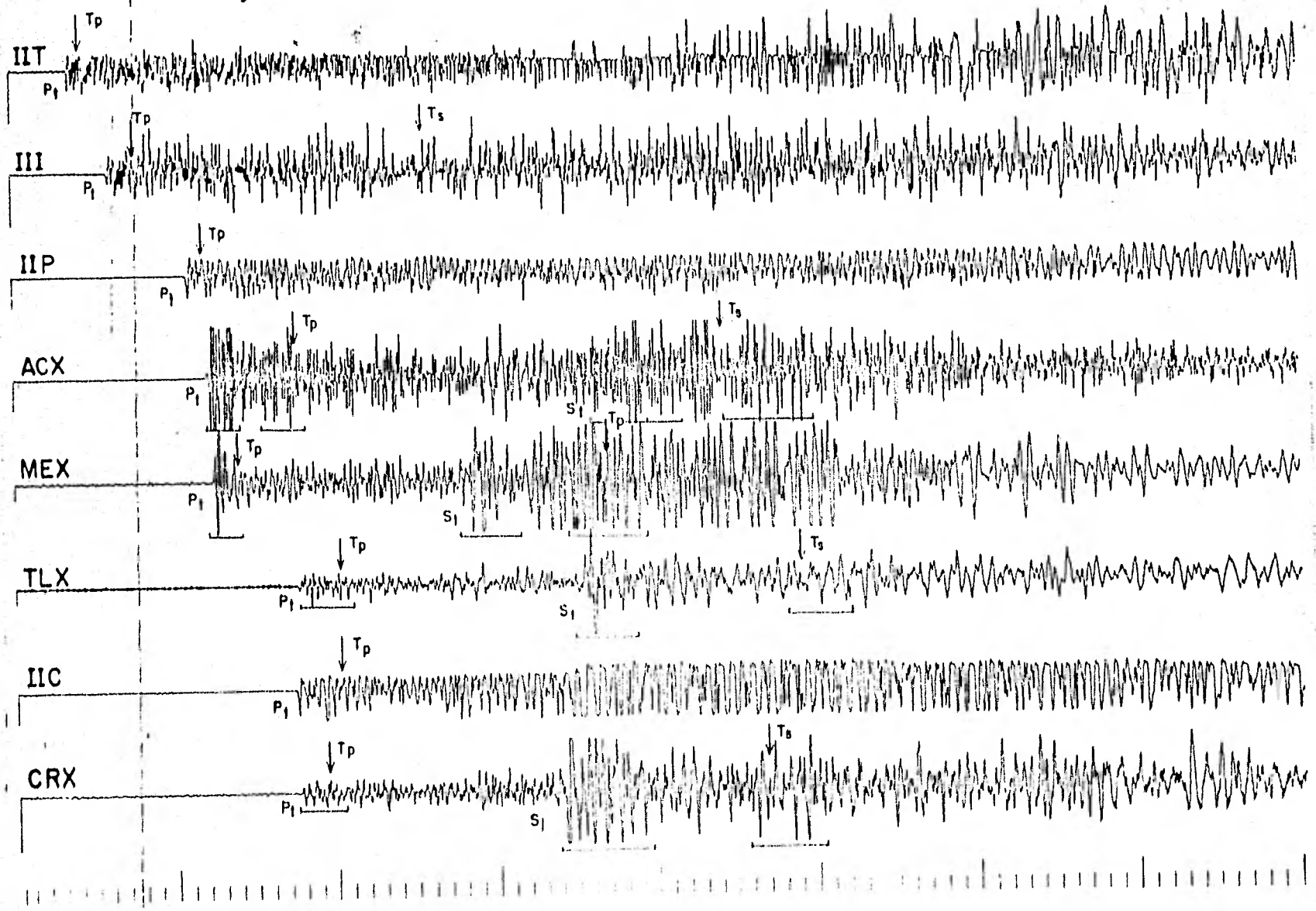
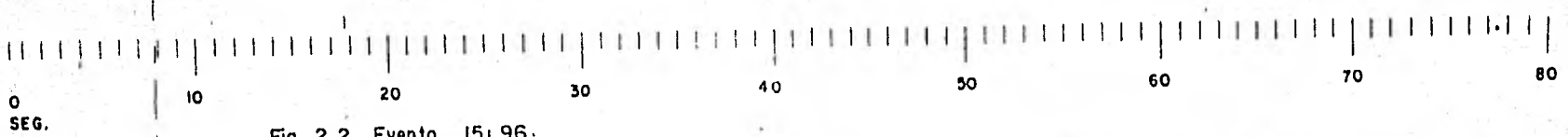
Fueron hechas tres localizaciones de cada una de 15 réplicas, utilizando como eventos maestros a los eventos mejor localizados a partir de los datos de campo (eventos 15:111, 15:96, 15:115; ver tabla 2.4), siendo éstos los eventos que tuvieron mayor magnitud. Las distancias entre epicentros obtenidos

TABLA 2.2 HYPOCENTRO Y HORA ORIGEN DE 3 EVENTOS
OBTENIDOS CON DISTINTOS PROGRAMAS EMPLEANDO DATOS
DE ESTACIONES DE CAMPO

PROGRAMA	LAT	LOX	H	M	S	PROF. KM
EVENTO 15-96						
INS. GEOF.	17.97	-98.19	15	54	16.1	50.7
CAPAS	17.95	-98.19	15	54	15.1	50 R
LOCA	17.93	-98.16	15	54	16.0	49.5
HYPO 71	17.94	-98.17	15	54	16.5	48
EVENTO 15-111						
INS. GEOF	17.94	-98.08	10	40	26.3	51.9
CAPAS	18.07	-98.06	10	40	26.1	55 R
LOCA	17.90	-98.07	10	40	25.7	51
HYPO 71	17.93	-98.07	10	40	26.1	54.5
EVENTO 15-97						
INS. GEOF	17.91	-98.12	18	42	59.5	34.5
CAPAS	17.95	-98.03	18	42	58.5	50 R
LOCA	17.90	-98.08	18	42	57.8	49
HYPO 71	17.92	-98.09	18	42	58.5	49.7

TABLA 2.3 DIFERENCIAS (EN SEG) ENTRE LOS
TIEMPOS DE ARRIBO DE LAS FASES DE PLACA
(PT, ST) Y LOS ARRIBOS TEORICOS (TP, TS),
PARA EL EVENTO 15-111 (VER FIG. 2.3).

ESTACION	DISTANCIA (KM.)	TP - PT (SEG)	TS - ST (SEG)
III	120.0	0.3	4.1
III	145.0	1.1	3.2
IIP	174.4	0.8	7.0
MEX	187.3	0.9	8.5
ACX	220.2	5.4	9.4
CRX	227.2	1.7	13.5
IIC	232.4	2.7	14.3
TLX	233.7	2.5	13.8



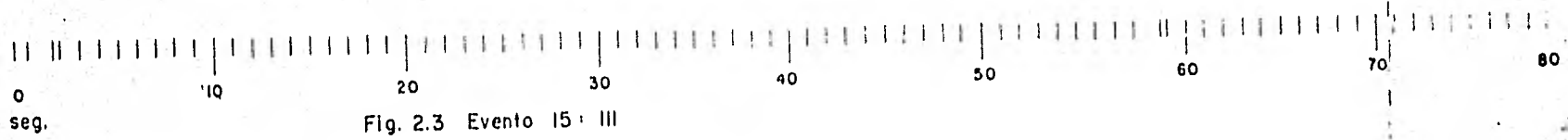
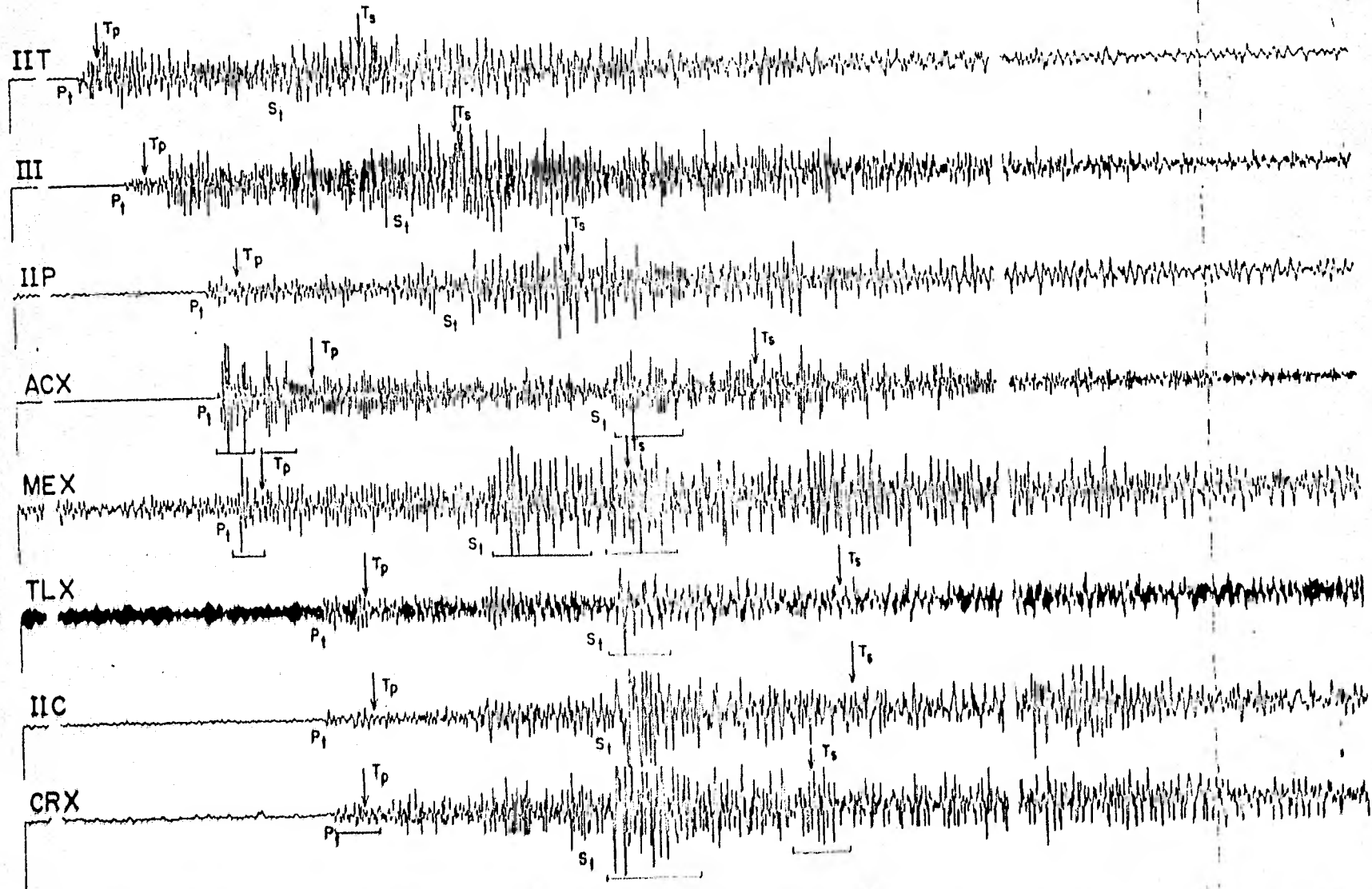


Fig. 2.3 Evento 15: III



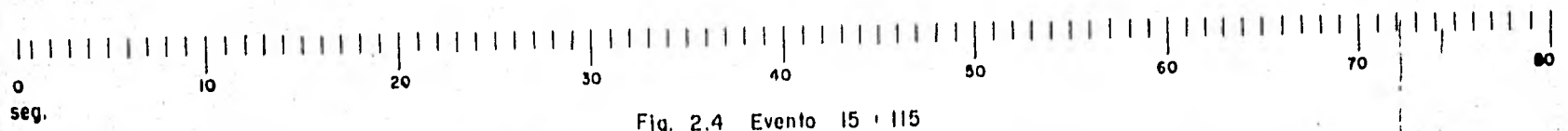
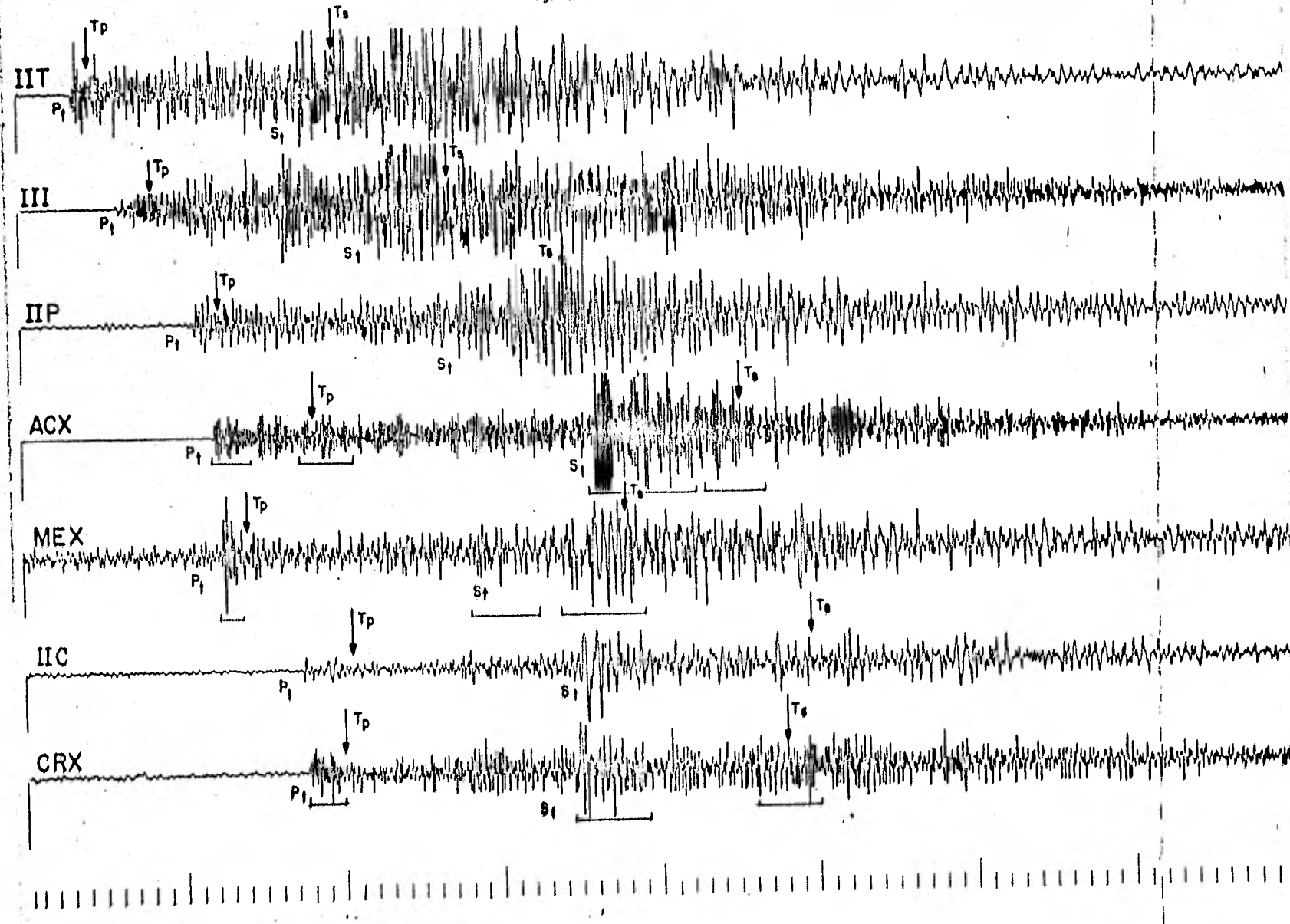


Fig. 2.4 Evento 15 - 115



FIGURAS 2.2, 2.3, 2.4 Sismogramas de las réplicas 15:96, 15:111, 15:115 (ver tabla 2.4). Las fases de la placa se señalan con la nomenclatura P_t y S_t (fases p y s refractadas en la interfase placa de cocos-manto, ver sec. 3.2). Los tiempos teóricos de viaje (P_g y S_g) de los hipocentros obtenidos (obtenidos con datos de estaciones IGF) a las estaciones, calculados mediante el modelo MEX-01 (fig. 2.1) son señalados con la nomenclatura T_p y T_s . Nótese las amplitudes de las fases P_t y S_t en algunas estaciones, y el retraso de los tiempos T_p y T_s con respecto a los arribos P_t y S_t .

con los tres eventos maestros distintos, fueron no mayores a 10 km entre sí. El evento que proporcionó el menor error (Xi-cuadrado) en la localización de las réplicas fué el 15:111, por lo que fué utilizado para la localización definitiva de éstas.

En la tabla 2.4 son mostrados los valores (x, y, h, to) latitud, longitud, profundidad y tiempo origen obtenidos para las 77 réplicas analizadas. El error de localización Xi-cuadrado fué de 0.0 a 0.3 segundos. Este error no variaba al modificar la profundidad determinada en el cálculo por ± 2.0 a 4.0 km; siendo este el error aproximado en la profundidad. Las profundidades fueron calculadas por el programa partiendo de la profundidad del evento maestro.

La ubicación de los epicentros es mostrada en las figuras 2.5; a, b y c. El tamaño del área de réplicas de aproximadamente 680 km^2 , es congruente con la magnitud del sismo principal ($m_b = 7.0$, USGS). El área muestra una orientación relativamente paralela (azimut $\sim 110^\circ$) a la orientación de la trinchera mesoamericana (ver figura 2.5c).

Las profundidades focales determinadas fueron de 45 a 71 km. Las figuras 2.6 muestran la distribución hipocentral de los eventos estudiados, graficados en proyección estereográfica, para direcciones diferentes de observación. Un corte perpendicular a una dirección de 110° de azimut (ver figura 2.6c), presenta la menor dispersión de los hipocentros; y muestra una distribución inclinada de éstos a aproximadamente 55° .

TABLA 2.1 HIPOCENTRO, HORA ORIGEN Y MAGNITUD ML DE LAS REPLICAS

NO.	FECHA	HORA ORIGEN	LAT	LOA	H	ERROR	ML	IDENT.
1	80/10/24	15:29:46.1	17.81,	-98.20	56	0.2	3.1	15- 60
2	80/10/24	16:25:48.2	17.93,	-98.13	55	0.1	3.3	15- 62
3	80/10/24	18:45:33.6	17.93,	-98.17	65	0.1	2.9	15- 63
4	80/10/24	20:35:25.1	17.97,	-98.15	63	0.3	2.0	15- 64
5	80/10/24	20:47:49.7	17.93,	-98.28	49	0.3	2.8	15- 65
6	80/10/24	21:12:17.0	17.88,	-98.03	54	0.2	2.6	15- 66
7	80/10/24	21:14:58.4	17.99,	-98.25	52	0.3	2.3	15- 67
8	80/10/24	22:17: 7.4	17.91,	-98.07	51	0.0	2.7	15- 68
9	80/10/24	23: 0:20.2	17.89,	-98.00	64	0.1	2.6	15- 69
10	80/10/24	23:33:57.4	17.96,	-98.25	53	0.2	2.9	15- 70
11	80/10/24	23:44:48.7	17.94,	-98.23	51	0.3	2.3	15- 71
12	80/10/25	0:20:34.6	17.96,	-98.22	54	0.2	2.9	15- 72
13	80/10/25	0:24:45.9	17.90,	-98.21	56	0.2	2.7	15- 73
14	80/10/25	0:27:17.7	17.83,	-98.21	56	0.3	2.4	15- 74
15	80/10/25	9:54:42.2	17.91,	-98.11	55	0.1	2.4	15- 76
16	80/10/25	10:41:37.6	17.95,	-98.24	54	0.2	2.5	15- 77
17	80/10/25	11:00:44.2	17.87,	-98.06	63	0.1	2.0	15- 78
18	80/10/25	12: 3:21.8	17.97,	-98.24	48	0.2	2.9	15- 79
19	80/10/25	12:48:13.8	17.88,	-98.05	59	0.2	2.9	15- 80
20	80/10/25	14: 5:53.8	17.93,	-98.04	60	0.1	2.0	15- 81
21	80/10/25	14:54:53.2	17.96,	-98.19	50	0.3	2.4	15- 82
22	80/10/25	15: 1: 8.9	17.93,	-98.20	53	0.2	2.7	15- 83
23	80/10/25	22:14: 2.8	17.85,	-98.07	46	0.2	2.2	15- 85
24	80/10/26	0:14:58.9	17.79,	-98.25	45	0.2	2.6	15- 86
25	80/10/26	2:56:42.8	17.97,	-98.21	48	0.2	2.9	15- 87
26	80/10/26	3:13:32.6	17.95,	-98.24	47	0.1	2.0	15- 88
27	80/10/26	3:23:12.4	17.92,	-98.16	53	0.3	2.6	15- 89
28	80/10/26	4:19: 4.6	17.93,	-98.23	51	0.2	2.0	15- 90
29	80/10/26	8:37:46.1	17.89,	-98.07	55	0.1	2.5	15- 92
30	80/10/26	9: 0: 2.6	17.85,	-98.25	49	0.3	2.4	15- 93
31	80/10/26	9:55:46.8	17.92,	-98.20	63	0.3	2.7	15- 94
32	80/10/26	12: 2:43.2	17.94,	-98.04	69	0.3	2.1	15- 95
33	80/10/26	15:54:15.4	17.93,	-98.15	51	0.0	2.3	15- 95
34	80/10/26	18:42:57.8	17.91,	-98.12	49	0.1	2.4	15- 97
35	80/10/26	19: 9:31.3	17.92,	-98.17	46	0.2	2.6	15- 98
36	80/10/26	19:35:49.1	17.87,	-98.14	48	0.2	2.4	15- 99
37	80/10/27	2: 6:41.0	17.90,	-98.18	47	0.1	2.9	15-100
38	80/10/27	2:27:58.1	17.90,	-98.10	51	0.1	2.1	15-101
39	80/10/27	3: 3:35.0	17.99,	-98.18	60	0.2	2.4	15-102
40	80/10/27	5: 3:45.1	17.93,	-98.05	67	0.1	2.7	15-103
41	80/10/27	8: 1:24.9	17.96,	-98.17	61	0.2	2.0	15-104
42	80/10/27	13:49:32.7	17.91,	-98.17	50	0.3	2.8	15-106
43	80/10/27	18:39:33.1	17.90,	-98.20	55	0.2	2.5	15-107
44	80/10/27	20:10:46.0	17.97,	-98.25	48	0.0	2.6	15-108
45	80/10/28	5:53:46.0	17.97,	-98.21	62	0.4	2.2	15-109
46	80/10/28	10:40:25.6	17.90,	-98.10	68	0.1	2.7	15-111
47	80/10/28	16:05:31.0	17.94,	-98.06	60	0.1	2.7	15-112
48	80/10/29	20: 2: 7.9	17.88,	-98.06	55	0.1	2.7	15-113
49	80/10/30	5:11:15.6	17.92,	-98.19	48	0.3	2.3	15-114
50	80/10/30	11: 0: 7.6	17.94,	-98.11	49	0.1	2.5	15-115
51	80/10/31	10:48:24.0	17.95,	-98.23	54	0.2	2.8	15-117
52	80/11/ 2	15:59:10.8	17.90,	-97.97	55	0.1	2.8	15-122
53	80/11/ 2	17:35: 9.2	17.94,	-98.26	48	0.3	2.6	15-123
54	80/11/ 2	20:33: 5.1	18.03,	-98.20	61	0.1	2.1	15-124
55	80/11/ 3	0:51:52.1	17.95,	-98.16	51	0.2	2.9	15-125
56	80/11/ 3	13:22:12.3	17.94,	-98.13	57	0.1	2.5	16- 2
57	80/11/ 3	13:50:25.9	17.93,	-98.18	51	0.3	2.5	16- 3
58	80/11/ 4	15:16:25.5	18.01,	-98.22	53	0.2	2.4	16- 6
59	80/11/ 7	7:57:21.2	17.98,	-98.26	51	0.2	2.6	16- 11
60	80/11/ 9	1:25:37.4	17.99,	-98.25	56	0.3	2.3	16- 14
61	80/11/11	3:39: 3.9	17.90,	-98.19	48	0.1	2.7	16- 17
62	80/11/17	9:57:49.5	17.94,	-98.18	51	0.3	2.6	16- 26

TABLA 2.3 CONTINUACION

NO.	FECHA	HORA ORIGEN	LAT	LON	H	ERROR	ML	IDENT.
63	80/11/18	1:13:39.2	17.92,	-98.17	55	0.1	3.1	16- 28
64	80/11/18	6: 0:35.4	17.93,	-98.12	58	0.2	2.6	16- 30
65	80/11/26	1:34:55.6	17.93,	-98.15	62	0.3	2.6	16- 52
66	80/11/30	0:54:39.0	17.93,	-98.13	58	0.2	2.8	16- 59
67	80/11/30	2:19:34.5	17.92,	-98.16	53	0.1	3.2	16- 60
68	80/12/ 3	3:11:51.2	17.87,	-98.14	71	0.2	2.9	16- 67
69	80/12/ 3	13:18:20.0	17.95,	-98.15	52	0.2	3.2	16- 69
70	80/12/ 3	17: 2:36.4	17.97,	-98.28	46	0.1	3.3	16- 71
71	80/12/11	20:23:35.3	17.94,	-98.16	64	0.3	2.4	16- 83
72	80/12/12	0:59:59.0	17.94,	-98.29	57	0.1	3.7	16- 84
73	80/12/14	14:36:42.6	17.96,	-98.29	52	0.1	3.5	16- 89
74	80/12/21	14:34: 3.9	17.92,	-98.18	51	0.2	3.3	17- 2
75	80/12/22	9:30:34.1	17.91,	-98.21	49	0.2	2.7	17- 4
76	81/ 1/ 8	20:13:45.2	17.86,	-98.17	53	0.1	3.0	17- 39
77	81/ 2/ 2	1:43:13.1	17.97,	-98.28	46	0.2	2.9	17- 81

NO. = NUMERACION SEGUN OCURRENCIA CRONOLOGICA
 HORA ORIGEN = TIEMPO UNIVERSAL (TU) DE OCURRENCIA
 H = PROFUNDIDAD EN KILOMETROS
 ERROR = ERROR XI-CUADRADO
 ML = MAGNITUD ML
 IDENT. = NUMERO DE IDENTIFICACION EN EL CATALOGO
 DE RESMAC DE EVENTOS GRABADOS

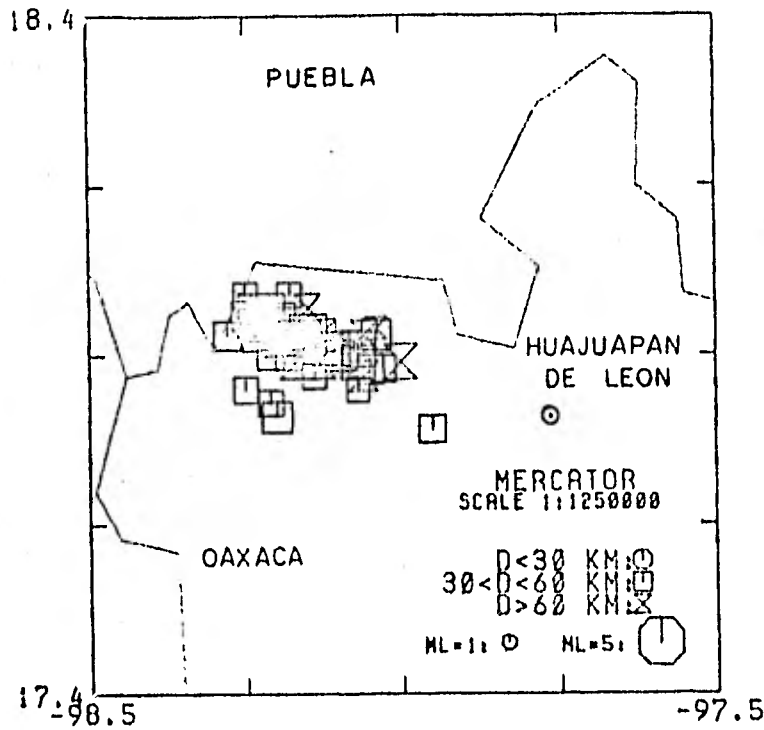


FIGURA 2.5a Localización de epicentros de las réplicas ocurridas del 24 al 27 de oct. de 1980 (réplicas 1-40, tabla 2.4). Y el sismo principal.

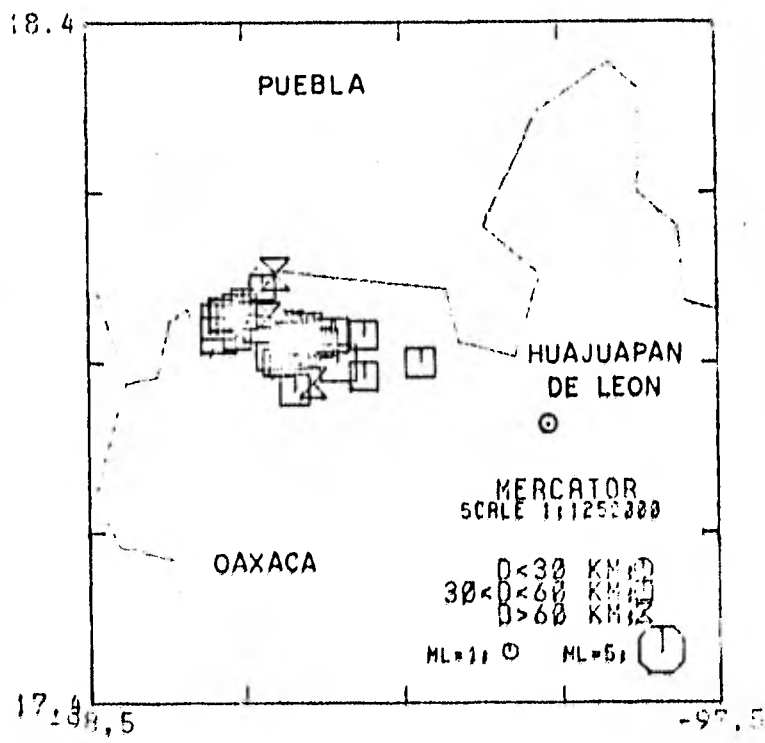


FIGURA 2.5b Localización de epicentros de réplicas ocurridas del 27 de oct, de 1980 al 10, de febrero de 1982 (réplicas 41-77, tabla 2.4)

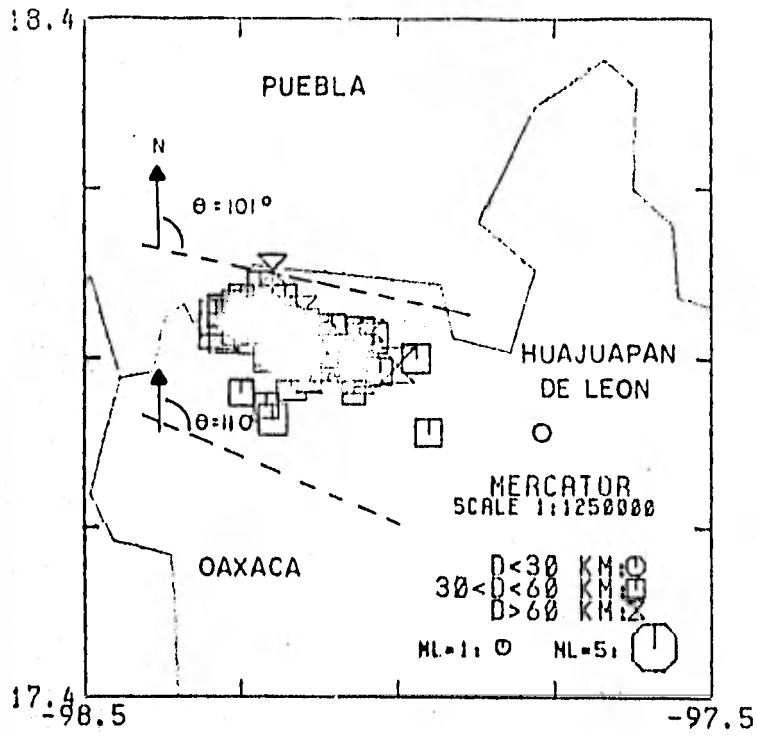


FIGURA 2.5c Localización de lo epicentros de las 77 réplicas. Se señala el rumbo de 101° del plano A del mecanismo focal (sec. - 2.2.4) y el rumbo de 110° que presenta la menor dispersión de los epicentros.

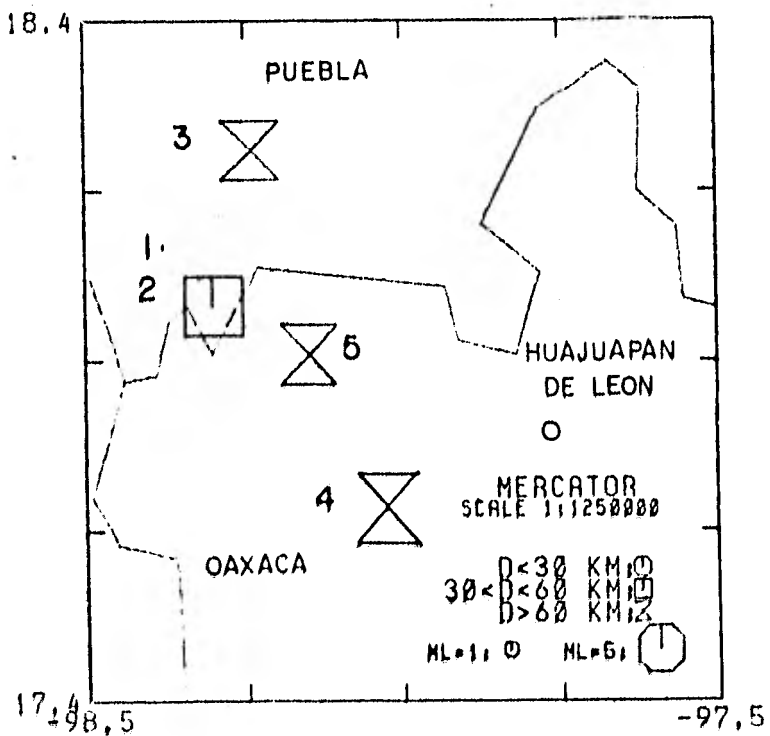


FIGURA 2.5d Localización de epicentros determinados para el sismo principal por los Inst. de Ing. y Geofísica de la UNAM (1,2), USGS (3), RESNAC (4), y este trabajo (5).

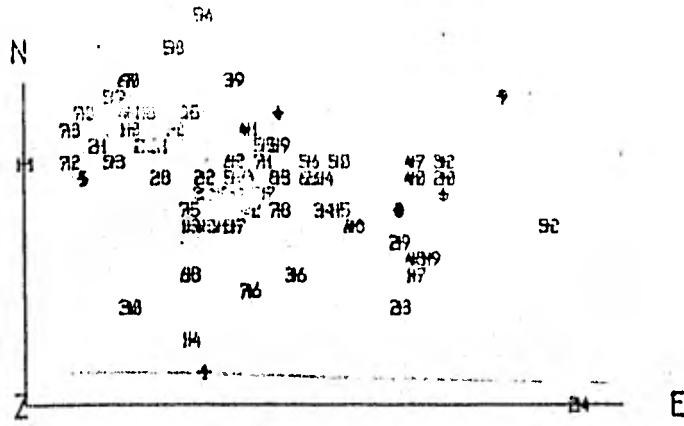


FIGURA 2.6a

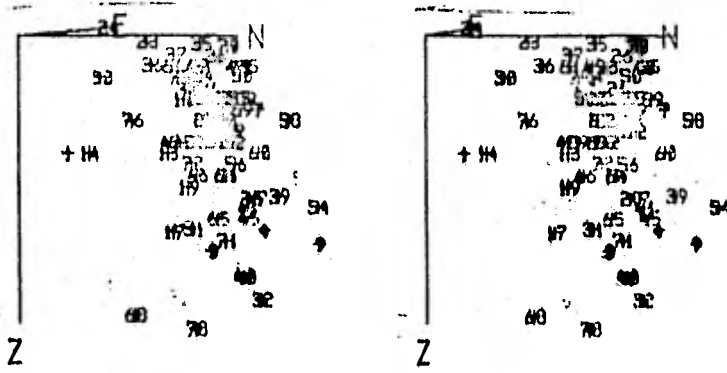


FIGURA 2.6b

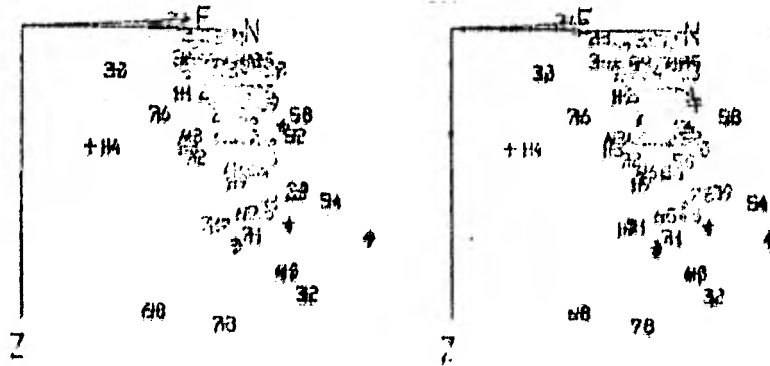


FIGURA 2.6c

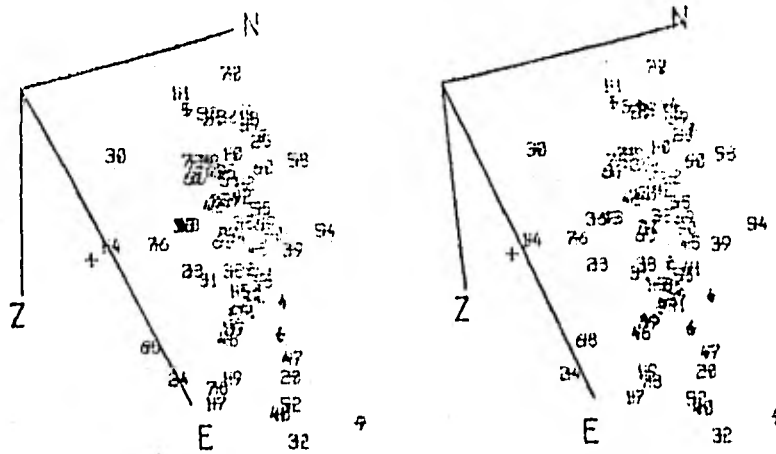


FIGURA 2.6d

FIGURAS 2.6 Observación de la distribución de los hipocentros en proyección estereográfica (excepto fig. 2.6a). A distancia de ± 30 cm puede observarse la posición de los hipocentros en el espacio. La escala de graficación es 0.18 cm/Km - siendo las longitudes de los ejes de $0.2^\circ(\text{N})$, $0.4^\circ(\text{E})$ $0.2^\circ(\text{Z})$. En la fig. 2.6a se observan los hipocentros en la dirección positiva del eje Z. En la fig. 2.6b, la dirección de observación es de 101° de azimut (azimut del plano de falla A, sec. - 2.4.2). En la fig. 2.6c, los hipocentros se observan en una dirección de 110° de azimut, nótese una menor dispersión de los hipocentros que en la fig. anterior, inclinados en un ángulo de aproximadamente 55° . En la fig. 2.6d, la dirección de observación tiene dos componentes, 110° de azimut de componente horizontal y $+45^\circ$ de componente vertical.

2.4 El sismo principal

2.4.1. Relocalización

La localización del sismo principal fué reportada por varios centros sismológicos. A continuación se presentan cuatro localizaciones:

		<u>Lat N</u>	<u>Lon W</u>	<u>Prof.</u> <u>Km</u>	
1.	Ins. de Ing.	17.98	98.32	50	(Prince, 1980)
2.	Ins. de Geof.	18.03	98.29	72	(Jiménez, 1981)
3.	USGS	18.21	98.24	72	(PDE, Oct. 1980)
4.	RESMAC	17.70	98.10	85R	(Boletín Oct. 1980)

Estos epicentros obtenidos se encuentran fuera del área de réplicas, como puede observarse en la figura 2.5d; y la localización del Instituto de Ingeniería (Prince, 1980) reporta una profundidad no mayor a 50 km.

El sismo principal fué relocalizado usando el programa de evento maestro, obteniéndose el epicentro dentro del área de réplicas. Esta localización fué hecha en base a que se consideró que éste sismo presentó fases semejantes a las réplicas (P_t y S_t); una velocidad aparente de 7.8 km/seg fué calculada para los primeros arribos (Prince, 1980), semejante a la calculada por Lomnitz (1982) de 8.0 km/seg para los arribos P_t en las réplicas. En la estación CRX fué observada una

fase semejante a la fase S_t de las réplicas. Sin embargo, por la saturación de las demás estaciones no fué posible el análisis de los sismogramas. Las localizaciones 1, 2 y 4 pueden tener, por consiguiente, errores de localización semejantes a los mencionados para las localizaciones preliminares de las réplicas; Por otra parte, fueron hechas sin incluir datos de la estación ACX, ya que no se encontraba en funcionamiento cuando ocurrió el sismo principal. Esta estación presentó un arribo P_t aproximadamente simultáneo al arribo P_t en la estación MEX, en todas las réplicas.

Fueron hechas localizaciones empleando diferentes profundidades en el cálculo, y utilizando un tiempo supuesto (aproximado por el de la estación MEX) en la estación ACX, para poder ser corregido por el residuo maestro. El epicentro no varió significativamente al aumentar la profundidad, sin embargo, el error de localización aumentó con la profundidad: 0.1 para h libre (51 km), 0.3 para $h=72$, y 0.7 para $h=90.0$.

En este trabajo proponemos como localización del sismo principal la obtenida para una profundidad restringida de 72 km, en base a que ésta profundidad fué obtenida a partir de fases de profundidad (Jiménez, Comunicación personal, 1981), y determinada así mismo por USGS. Resultados preliminares del modelado de las ondas de cuerpo observadas a distancias telesísmicas sugieren una profundidad parecida de ~60 km (J. González, Comunicación personal; 1982). La localización obtenida es la siguiente (ver figuras 2.5c y 2.5d):

<u>Lat N</u>	<u>Lon W</u>	<u>to</u>	<u>H km</u>
17.90	98.15	14 53 32	72

Este epicentro dista 39 kms del determinado por el USGS.

2.4.2. Mecanismo Focal

Una solución de mecanismo focal del sismo principal fué determinada por Jiménez (1981), para una profundidad focal de 72 km, la cual muestra una representación de falla típicamente normal (ver figura 2.7a). Los valores obtenidos de la posición de los planos principales son:

<u>Plano A</u>	<u>Plano B</u>
$\theta = 101^\circ$	$\theta = 272^\circ$
$\delta = 63^\circ$	$\delta = 26^\circ$
$\lambda = -94^\circ$	$\lambda = 82^\circ$

En donde θ es el azimut de orientación del plano, δ el echado del plano, y λ la dirección del vector de desplazamiento sobre el plano de falla (ver plano A en figura 2.7b).

Como se vió en la sección 2.4, la figura 2.6c presenta la menor dispersión de los hipocentros para un azimut de 110° y se observa una distribución inclinada a 55° (de echado), de los hipocentros. Estos valores son cercanos a los del Plano A, indicando que es éste el plano de falla del sismo principal. A este plano corresponde un desplazamiento de falla normal ($\lambda = -94$) prácticamente vertical.

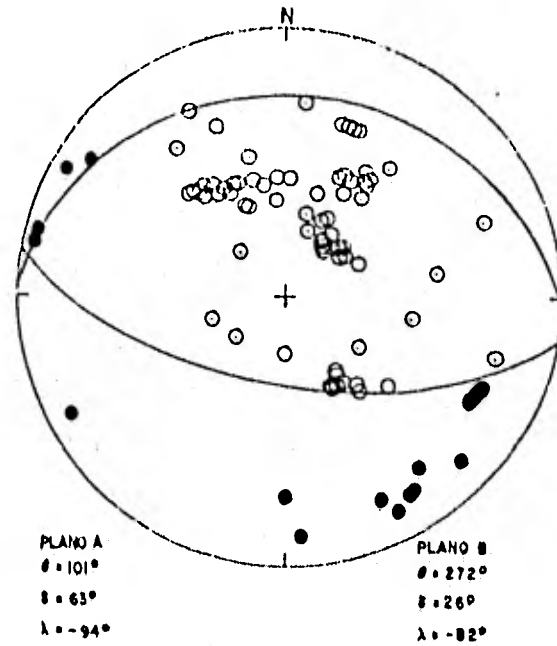


FIGURA 2.7a Solución compuesta del mecanismo focal determinado por Jiménez (1981). Los círculos llenos son compresiones y los blancos son dilataciones.

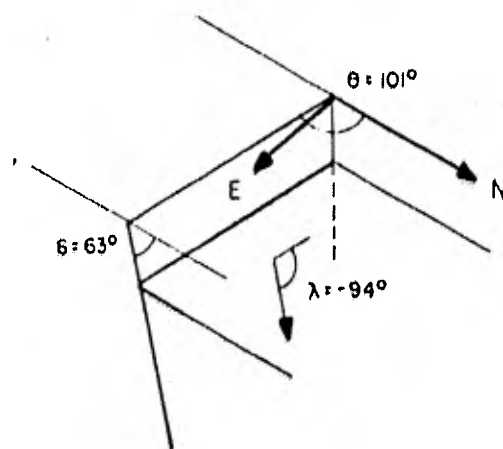


FIGURA 2.7b Representación de los parámetros del plano de falla A determinado como el plano de falla del sismo principal,

Mecanismos de falla normal para sismos de profundidad intermedia, han sido encontrados en la zona de subducción del sur de México, mientras que para sismos de profundidad somera, las fallas son generalmente inversas (Dean & Drakes, 1978; ^{Mc-}Mac Nally, 1981).

3. ANALISIS DE LAS ONDAS DE PLACA

3.1 El análisis espectral

Una herramienta poderosa que complementa el análisis de las señales sísmicas en el dominio del tiempo, es el estudio de sus espectros obtenidos mediante transformadas digitales de Fourier o Laplace. Este método es particularmente fácil de aplicar a los registros digitales de RESMAC.

Espectros calculados mediante la transformada discreta de Fourier, fueron obtenidos para las fases sísmicas señaladas como P_t y S_t en los sismogramas de las figuras 2.2, 2.3, y 2.4 y para algunas fases identificadas como P_g y S_g (de acuerdo a los tiempos teóricos, ver sección 2.2), con el objeto de analizar éstas fases en el dominio de las frecuencias y obtener algunos parámetros de fuente de las réplicas. La comparación de espectros de las fases de placa nos permite identificar su origen.

Los espectros fueron obtenidos de los registros de las estaciones ACX y MEX principalmente (ver figuras 4.1). La relación señal-ruido en las estaciones TLX y CRX, permitió obtener espectros de sus registros únicamente para las réplicas de mayor magnitud. El cálculo y graficación de los espectros fué hecha mediante programas específicos de RESMAC. Estos programas permiten efectuar la corrección por efectos de atenuación para factor de calidad Q independiente de la frecuencia (Knopoff, 1964) como $\exp(-\pi fx/cQ)$ donde f es la frecuencia, x la distancia y c la velocidad de fase,

El espectro de la serie de tiempo S_j ; $j=1,2,\dots,N$; N es el número de elementos; es obtenido usando el algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) para la transformada discreta de Fourier (Kanasewich, 1973):

$$\hat{S}_k = \left| \sum_{j=0}^N S_j \exp(-i 2\pi k/N) dt \right|$$

$$K = 0, \dots, N/2+1$$

en donde:

dt = Intervalo de muestreo (36/seg)

\hat{S}_k = Valor absoluto de la serie de tiempo transformada.

Para obtener el espectro del movimiento del terreno (\hat{A}_k) se corrige por el efecto del instrumento, deconvolucionando la respuesta de éste \hat{F}_k , del espectro de la señal registrada \hat{S}_k , mediante:

$$\hat{A}_k = \hat{S}_k / \hat{F}_k$$

La respuesta \hat{F}_k para los instrumentos de RESMAC se muestra en la figura A.2 del Apéndice A.

Debido a que la respuesta de los instrumentos de SISMEX no se conoce, no fué posible utilizar registros de éstas estaciones para la obtención de espectros.

3.2 Identificación de ondas de placa

Como fué mencionado en la sección 1, Lomnitz (1982) propuso 2 modelos estructurales para explicar los tiempos de recorrido de las ondas denominadas de placa, identificándolas como fases P_tP , P_tS y S_tS . El significado de ésta nomenclatura fué explicado en la sección 1.

Una observación importante de los tiempos de arribo en las estaciones ACX y MEX, es explicada por éstos modelos. Los primeros arribos en éstas estaciones son aproximadamente simultáneos, mientras que las distancias epicentrales hacia ACX (obtenidas de las localizaciones con datos de campo) son mayores (~30 km promedio) que las distancias a MEX.

De la observación de los espectros obtenidos, se encontró que las frecuencias de esquina (f_c) para las fases de placa (señaladas en los sismogramas de las figuras 2.2, 2.3, 2.4, como P_t y S_t) son similares a las de las fases P y S (ver tabla 4.1) (identificadas mediante los tiempos T_p y T_s) respectivamente. Indicando que las ondas P_t se originan como P, y las ondas S_t (identificadas como P_tS por Lomnitz, 1980) se originan como S.

De las observaciones hechas del análisis espectral no es posible determinar cambios en el modo de propagación de éstas fases, y el conocimiento no preciso de la estructura de la corteza no permite cuantizar con precisión dichos cambios, por lo que supondremos un solo modo a lo largo de toda la trayectoria, optandose por identificar a las fases de placa únicamente P_t y S_t (fases P y S refractadas en la interfase placa de cocos-manto).

Los valores de f_c observados en los espectros fueron calculados inicialmente sin corrección por factor de calidad Q, debido al desconocimiento del origen P ó S de las fases, necesario para aplicar ésta corrección. Los valores de f_c pro-

medio determinados fueron de 7.4 Hz en ACX y 4.0 Hz en MEX para las fases S_t (ver tabla 4.1). Estos valores resultan en cocientes de f_c (f_c^P / f_c^S) de 1.4 en ACX y 1.5 en MEX. Estos resultados concuerdan aproximadamente con observaciones hechas por algunos autores (ej: Hanks & Wiss, 1972; Thatcher & Hanks, 1973; Molnar et al., 1973) para ondas directas, de que las f_c para ondas P son mayores que para las ondas S. Y el cociente de frecuencias de esquina es cercano a la razón de Poisson (1.78).

3.3 El modelo de la corteza y la excitación de las ondas de placa

El mecanismo de afallamiento normal inferido para el sismo de Huajuapán de León (ver sección 2.4.2.), concuerda con los mecanismos observados (de falla normal), para sismos de profundidad intermedia en la zona de Benioff del sur de México y en otras zonas de subducción (Dean & Drakes, 1978; Isaks & Molnar, 1971). Estos afallamientos normales, son debidos a esfuerzos de tensión actuando a lo largo de la placa subducida, ocurriendo la ruptura en ésta a lo largo de uno de los ejes de máxima tensión cortante.

El hecho de que las réplicas hayan generado ondas refractadas en una interfase, identificada como la interfase placa-manto (Lomnitz, 1982), indica que ocurrieron sobre la interfase; por otro lado sus profundidades y el nivel de excitación de ondas de placa (como se verá mas abajo) sugieren que las réplicas ocurrieron en la placa subducida, El area de ruptura del sismo principal, inferida de la distribución

hipocentral de las réplicas (que concuerda con observaciones del campo lejano, ver sección 4.1), puede corresponder al espesor de la placa de Cocos; aunque algunas réplicas (como las situadas en los extremos de la zona) pueden haber ocurrido fuera de la placa. Por consiguiente podemos suponer, en ausencia de mejores datos, que el espesor de la zona de réplicas corresponde al espesor de la placa subducida.

La figura 3.1 muestra dos modelos de capas planas y paralelas para el sur de México, modificados por la presencia de la placa subducida. La posición de la superficie superior de la placa fué determinada por la ubicación de la trinchera y el límite superior del área de réplicas, la superficie inferior es paralela a la superior, siendo determinada por el límite inferior del área de réplicas.

Estos modelos indican un echado de la placa subducida de $\sim 13^\circ$, este echado es somero comparado con valores de echado de $\sim 38^\circ$ para el área de Bonin-Honshu (Japón), o de $\sim 22^\circ$ para sudamérica (Benioff, 1954); pero concuerda con observaciones de echados de $12-15^\circ$ del plano de falla para sismos en el área de Petatlán (Zúñiga y Valdés, 1980) y de $12-20^\circ$ para sismos de profundidad somera, desde Colima a Chiapas (McNally, 1981). Por otro lado el espesor de la placa ~ 24 km es razonable e indica, junto con el echado obtenido, que el uso del área de réplicas para la determinación de la posición y el grosor de la placa, es una aproximación razonable.

El modelo de capas paralelas de la figura 3.1a es el modelo MEX-01 (mencionado en la sección 2) y el modelo de la

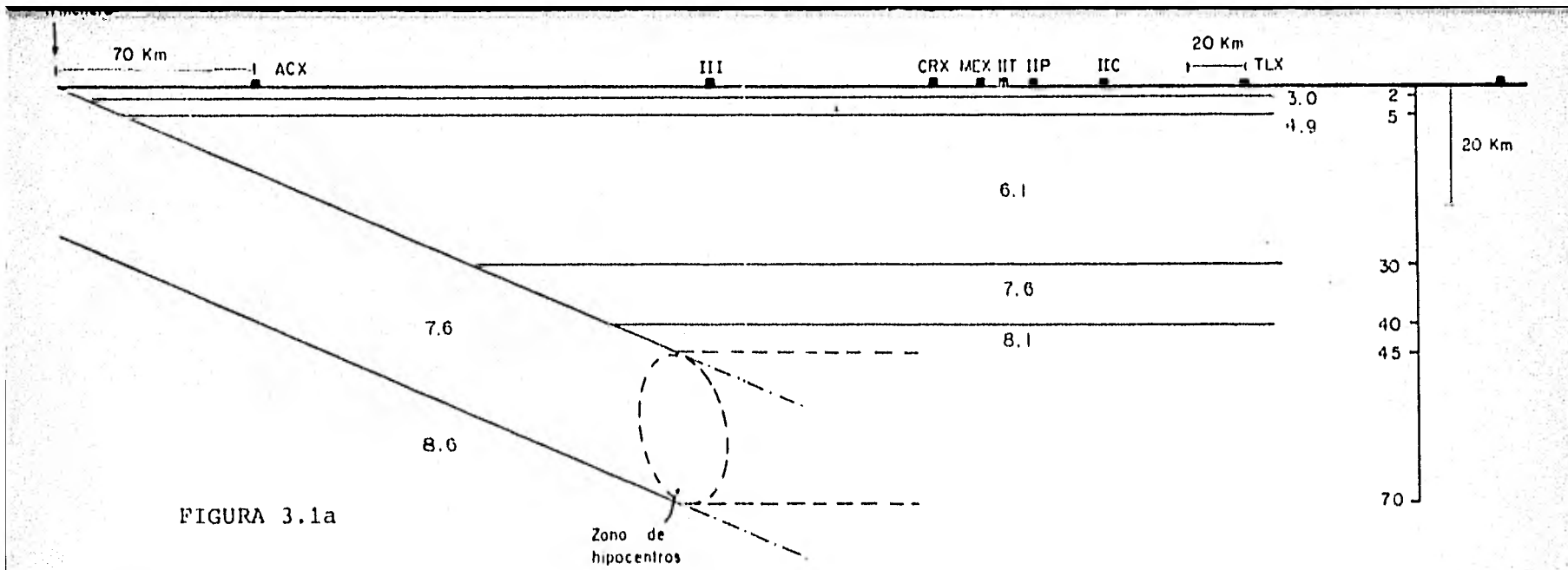


FIGURA 3.1a

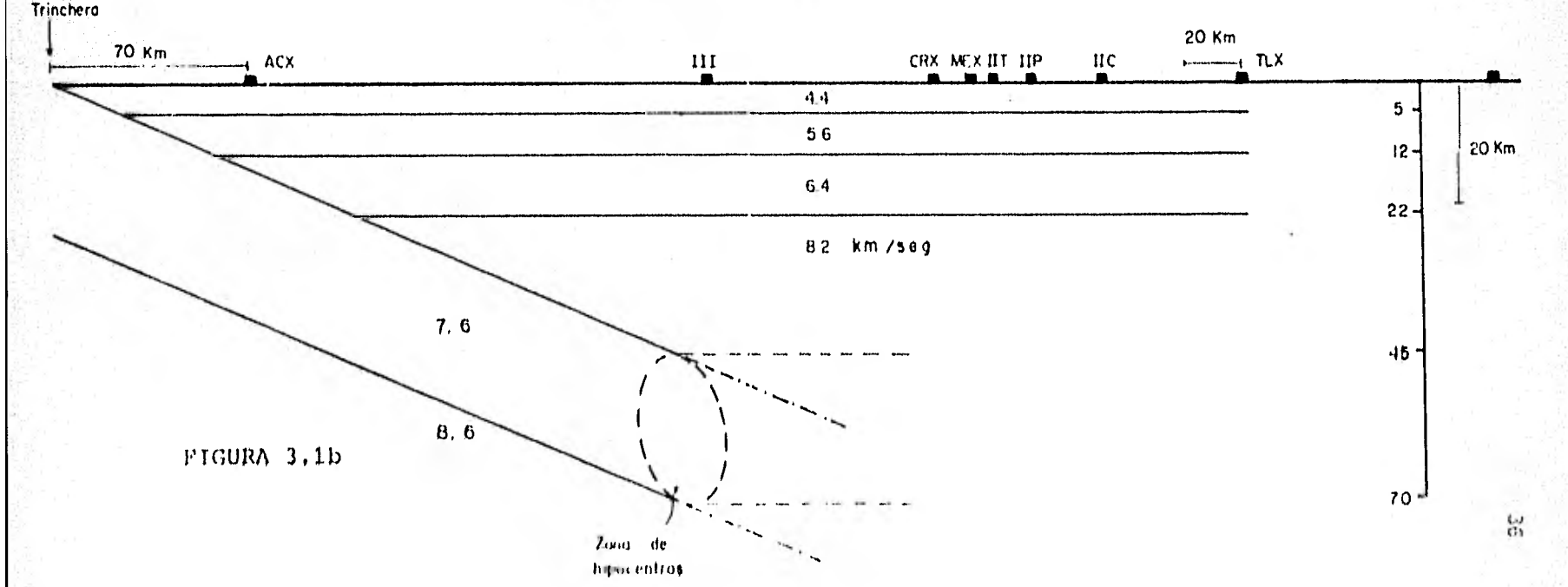


FIGURA 3.1b

FIGURA 3.1 Modelos estructurales de velocidades que consideran a la placa de cocos como una unidad estructural. La escala vertical esta exagerada al doble de la horizontal. Fig. 3.1a Modificación del modelo MEX-01 (fig. 2.1), Fig. 3.1b Modificación del modelo utilizado por Nava et. en la Costa Chica. El espesor de la parte inclinada es 24 km en los dos modelos. Nótese el canal de baja velocidad que forma la placa de cocos en ambos modelos. La continuación de la placa, continente adentro, es sugerida de dos maneras. Lomnitz (1982) encontró que la continuación horizontal de la placa explica mejor los tiempos de arribo de las fases de placa.

figura 3.1b ha sido utilizado por Nava et. al. (1982) para la localización de sismos en el área de la Costa Chica (Guerrero-Oaxaca), el cual resulta en localizaciones más estables en el área mencionada, que el modelo MEX-01. La diferencia entre los dos modelos de capas es grande y es evidente que son necesarios muchos más datos para poder elaborar un modelo confiable.

En base a las características geométricas de los modelos propuestos, fueron calculados tiempos teóricos de viaje de ondas refractadas, de los hipocentros calculados a la estación ACX, empleando velocidades diferentes para la placa y el manto bajo ésta. Velocidades V_p de 7.0-8.0 km/seg y de 8.2-9.0 km/seg respectivamente, fueron empleadas; y una velocidad promedio V_p de 5.0 km/seg fué utilizada para la corteza continental. Mediante un programa de cómputo se calcularon éstos tiempos teóricos (T_r) y fueron comparados con los tiempos $P_t - t_0$ de ACX para 10 eventos, calculándose un error cuadrático medio rms, dado por:

$$\text{rms} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_r - P_t + t_0)_i^2$$

en donde N es el número de eventos.

Las velocidades para las cuales se obtuvo el mínimo error (rms) fueron de 7.5-7.8 km/seg y 8.4-8.7 km/seg para la placa, y para el manto bajo ésta respectivamente (ver tabla 3.1). Fueron calculados también tiempos de viaje teóricos para ondas S refractadas (mediante $T_r(P)/1.78$); nótese (tabla 3.1) que los tiempos $T_r(s)$ corresponden a los tiempos de viaje $S_t - t_0$,

TABLA 3.1 COMPARACION DE LOS TIEMPOS OBSERVADOS Y CALCULADOS.
 $TO(P) = PT - t_0$, $TO(S) = ST - t_0$ Y $TI(P)$ Y $TI(S)$ SON LOS TIEM-
 POS DE VIAJE CALCULADOS. ESP. ES EL ESPESOR DE LA PLACA, -
 VEL 1 ES LA VELOCIDAD (P) DE LA CORTEZA, VEL 2 LA VELOCIDAD
 EN LA PLACA, VEL 3 LA VELOCIDAD DEL MANTO, INCL LA INCLINA-
 CION DE LA PLACA.

ESP	VEL 1	VEL 2	VEL 3	INCL	ERROR
24.0	5.00	7.60	8.60	13.0	0.92

TO(P)	TI(P)	TO(S)	TI(S)	EVENTO
27.90	27.63	52.20	51.16	15-111
28.10	28.62	51.90	50.95	15-960
28.70	28.06	53.00	49.95	15-101
26.00	27.05	52.90	50.15	15-115
27.90	29.59	53.10	52.66	15-124
26.70	26.10	50.10	48.46	16-280
29.60	28.28	52.00	51.34	16-60
27.70	26.43	51.80	50.04	16-69
28.50	28.75	52.50	51.10	16-89
29.90	28.81	52.50	51.29	16-71

ESP	VEL 1	VEL 2	VEL 3	INCL	ERROR
25.0	5.0	7.70	8.60	15.0	0.85

TO(P)	TI(P)	TO(S)	TI(S)	EVENTO
27.90	28.01	52.20	52.85	15-111
28.10	28.97	51.90	51.47	15-960
28.70	28.40	53.00	50.46	15-101
26.00	27.45	52.90	51.05	15-115
27.90	29.93	53.10	53.27	15-124
26.70	26.55	50.10	49.25	16-280
29.60	28.63	52.00	50.96	16-60
27.70	26.86	51.80	52.81	16-69
28.50	29.10	52.50	51.80	16-89
29.90	29.15	52.50	51.80	16-71

Las correspondientes velocidades propuestas por Lomnitz (1982) son de 7.5 km/seg y de 8.5 km/seg, respectivamente.

Según los dos modelos de velocidades propuestos, los focos sísmicos de los eventos estudiados ocurren en un medio en el cual la velocidad de propagación de las ondas sísmicas es menor que las de los medios superior e inferior. Este tipo de estructura, conocido como "guía de ondas" (Ewing & Jardetzky, 1957), atrapa gran parte de la energía que se propaga en forma de ondas sísmicas. Algunas características observadas, que se presentan a continuación, apoyan la existencia del efecto de guía de ondas.

Usualmente las amplitudes de las ondas críticamente refractadas son menores que las de las ondas directas (excepto en casos en que la trayectoria de éstas coincide con un nodo del patrón de radiación y la de las ondas refractadas no), debido al bajo acoplamiento de la energía para la refracción crítica. En el caso de las ondas de placa, éstas presentan amplitudes bastante mayores que las de las ondas directas, concordando esto con el efecto de guía de ondas por la alimentación de energía a las ondas de placa por las ondas atrapadas en la guía.

Para ondas propagándose paralelamente a la trinchera o continente adentro, la guía de ondas se extiende indefinidamente (sin contar con los efectos de la presencia del eje neovolcánico, o de cambios en la inclinación de subducción que modifican la estructura; ver figura 3.1), mientras que para ondas propagándose hacia la costa la guía de ondas se inte-

rumpe al entrar en contacto la parte superior de la placa subducida, con la corteza continental; para la cual la velocidad de propagación sísmica es menor que para ésta. Esto último tiene dos efectos: el primero es que la energía puede escapar de la guía de ondas y alcanzar la superficie, y el segundo es que no todas las longitudes de onda serán atrapadas, ya que el efecto de guía de ondas es mayor para longitudes de onda cortas.

Esta alimentación selectiva de energía a las ondas de placa puede ser claramente apreciada en los espectros de amplitudes obtenidos en ACX, que muestran mayores amplitudes a altas frecuencias que a bajas, hasta alcanzar la frecuencia de esquina f_c (ver figuras 4.1); observándose un "máximo de amplitudes".

El efecto de guía de ondas que produce en los espectros de ACX un máximo de amplitudes, por la amplificación de altas frecuencias, produce en el dominio del tiempo una señal de aspecto casi monocromático fácilmente apreciable en los sismogramas (ver figuras 2.2, 2.3, 2.4).

El efecto de la guía de ondas para trayectorias paralelas a la trinchera o tierra adentro es doble; por un lado debe amplificar todas las frecuencias (al menos las frecuencias relativamente altas aquí estudiadas), lo cual debe resultar en mayores niveles de amplitud espectral (Ω_0) a bajas frecuencias, y la obtención del momento sísmico (M_0) en base a éste nivel de amplitud, según el modelo de Brune (1971, 1972), al que denominaremos "seudo-momento", debe ser proporcional al obtenido en base a ondas directas. Por otro lado no permite que las ondas escapen y lleguen a la superficie para ser regis-

tradas, lo cual resulta naturalmente en menores amplitudes de los registros y por ende menores pseudomomentos.

Las proposiciones arriba mencionadas son discutidas en la sección 4.2.

Se observó que la corrección de los espectros mediante valores de Q (Knopoff, 1964) requiere de valores altos (800 a 1500) que proporcionen pendientes cercanas a -2, para las amplitudes de las altas frecuencias. Los valores de f_c y Ω_0 no se modificaron significativamente al aplicar la corrección (ver figuras 4.1). Estos valores altos de Q pueden deberse a los efectos de guía de ondas propuestos arriba.

4. DETERMINACION DE PARAMETROS DE FUENTE

4.1 Parámetros de fuente del sismo principal

Los valores de los parámetros de fuente para el sismo principal: M_0 , $\Delta\sigma$, y r (momento sísmico, caída de esfuerzo y dimensión del área de ruptura) fueron obtenidos a partir de espectros de estaciones lejanas de la red mundial WWSSN, empleando la formulación de Brune (1970, 1971) para el cálculo.

Las magnitudes determinadas para el sismo principal fueron: $m_b=7.0$ ($m_b=6.6$ BRK, $m_b=7.0$ PAS) y $M_s=7.0$ BRK (USGS, PDE Octubre, 1980). Usando la relocalización del sismo principal encontrada en la sección 2.4.1, fue calculada una magnitud $M_L=6.5$ para la estación CRX.

En base a estas magnitudes reportadas, el M_0 aproximado fue calculado mediante la fórmula: $\log M_0 = 1.5 M + 16.0$; donde M es la magnitud (Hanks & Kanamori, 1979), resultando los valores:

$$M_0(m_b=6.6) = 7.9 \text{ E } 25 \text{ (dynas-cm) y}$$

$$M_0(m_b=7.0) = 3.2 \text{ E } 26 \text{ (dynas-cm)}$$

La fase S de sismogramas de período largo de las estaciones de la red mundial ESK ($55^\circ 19' \text{ N}$, $3^\circ 12' 18'' \text{ W}$) y SHK ($34^\circ 31' 56'' \text{ N}$, $132^\circ 40' 39'' \text{ E}$), situadas a distancias de 78, 24° y 108.91° respectivamente del epicentro; fueron digitizadas (de microfilm) y remuestreadas numéricamente para obtener sus espectros. La serie de tiempo sin remuestrear y el espectro de amplitud, corregido por la amplificación de los instru-

mentos, se muestran en las figuras 4.1.

Ambos espectros muestran una frecuencia de esquina $f_c \sim .07$ Hz. El nivel de amplitud a bajas frecuencias Ω_0 no puede apreciarse bien para SHK; para ESK $\Omega_0 = .06$ cm seg.

El modelo de Brune (1970, 1971) relaciona los valores de f_c y Ω_0 (densidad espectral) observados en el campo lejano con parámetros de la fuente sísmica. Este modelo ha sido ampliamente usado (por ej: Hanks & Wyss; 1972, Thatcher & Hanks, 1973; Molnar et al., 1973) y sus resultados concuerdan aceptablemente con determinaciones independientes. Las fórmulas que se usaron para el cálculo de los parámetros de fuente mencionados son:

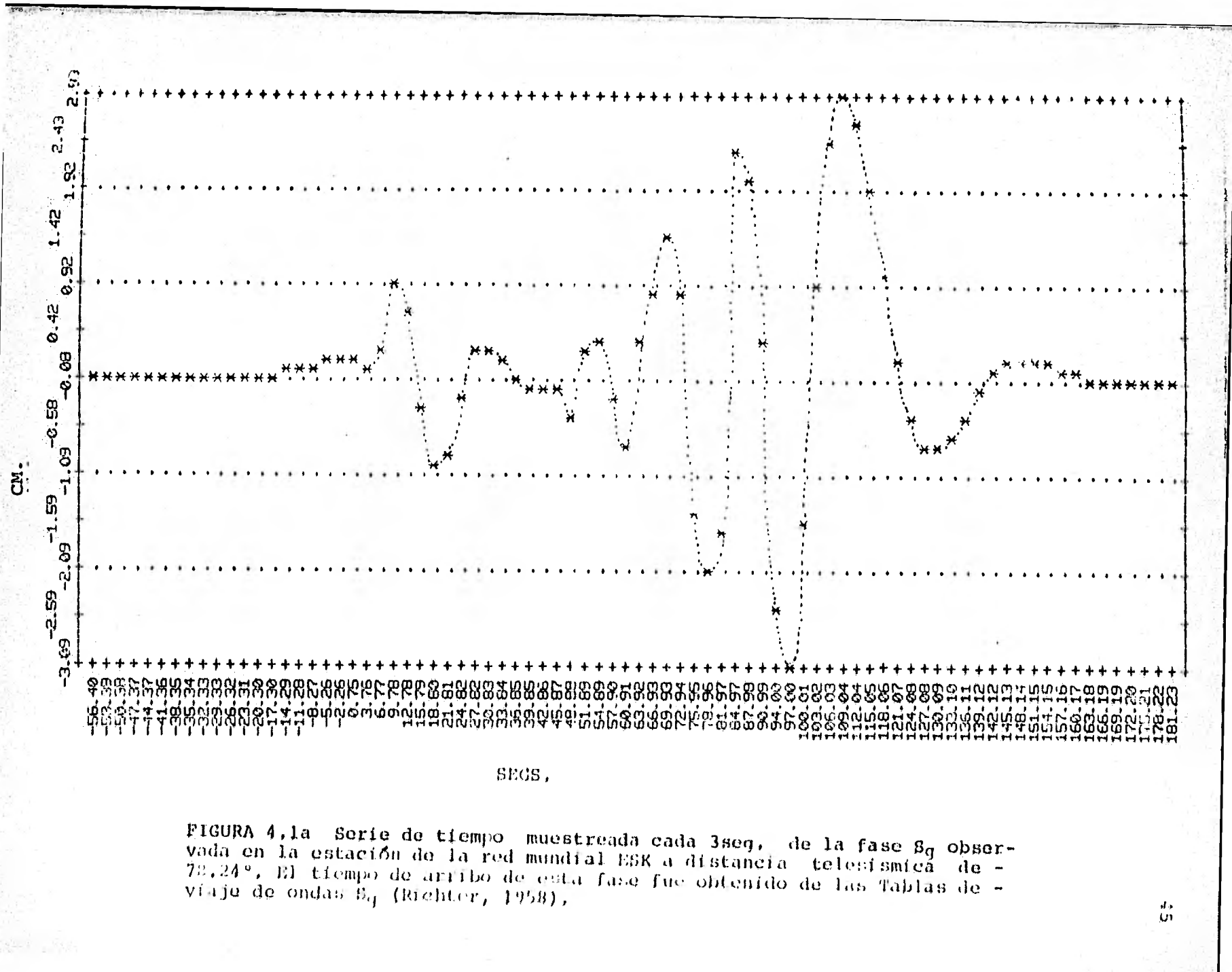
$$M_0 = 4\pi\rho\beta^3\Omega_0R/R\phi\phi \quad (\text{dynas-cm}) \quad \text{ec. 4.1}$$

$$r = 2.346/2\pi f_c \quad (\text{km}) \quad \text{ec. 4.2}$$

$$\Delta\sigma = (7/16)M_0/r^3 10^6 \quad (\text{bares}) \quad \text{ec. 4.3}$$

Donde ρ es la densidad del medio (supuesto homogéneo), un valor promedio de 3.3 gr/cm^3 fué usado, β es la velocidad de la onda s en la fuente (4.3 km/seg), R es la distancia hipocentral en km al punto de observación; $R\phi\phi$ corrige por el efecto del patrón de radiación, r es el radio (en km) del área de ruptura supuesta circular, y $\Delta\sigma$ es la caída de esfuerzos.

En base a los resultados del mecanismo focal y a la posición de la estación ESK, fué obtenido un patrón de radiación de 0.37 . Valores de $f_c = 0.07$ Hz ($\log - 1.15$) y $\Omega_0 = 0.06$ cm-seg ($\log - 1.22$) se observaron en el espectro de ESK (figura 4.1b), resultando en valores de $M_0 = 2.1 \text{ E } 26$, dinas-cm, $r = 22.6$ km, y $\Delta\sigma = 5.4$ bares. El valor del momento sísmico



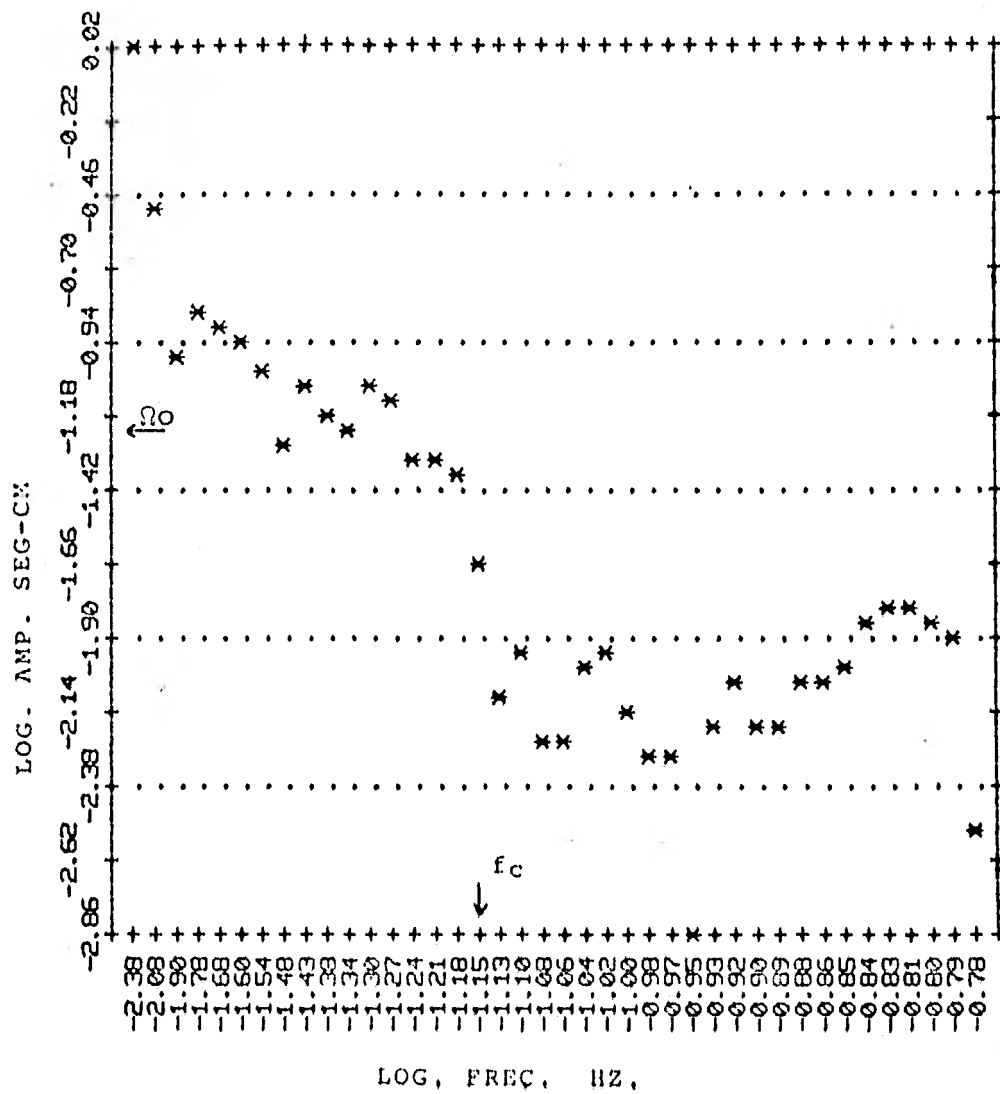


FIGURA 4.1b Espectro de amplitud de las series de tiempo de la fig. 4.1a que presenta una frecuencia de esquina de 0.07 hz (log-1.15) y densidad espectral de 0.06 (log-1.18).

concuerta con los valores obtenidos de las magnitudes; la magnitud de momento calculada, a partir del valor obtenido para M_0 usando la ec (4.1), es $M(M_0)=6.9$. Así mismo el radio del área de ruptura calculado, concuerda casi exactamente con la mitad de la longitud del área de réplicas (~45 km). Y el valor de la caída de esfuerzos, es del orden de los valores determinados para sismos grandes ($M_b > 7.0$) desde Colima al Sur de Chiapas, de $\Delta\sigma \sim 10$ bares (McNally, 1981).

El desplazamiento promedio a lo largo de la falla, puede ser determinado de la fórmula $M_0 = \mu \bar{D} \bar{S}$ (Aki, 1968); en donde μ es el módulo de rigidez (se utilizó un valor de 3.3×10^{11} dinas/cm²), \bar{D} es el desplazamiento promedio y \bar{S} el área de ruptura. Utilizando el valor del M_0 sísmico calculado y un valor del área de ruptura de 1157 km² (obtenida del tamaño del área de réplicas y la inclinación de 63° del plano de falla) se determinó un desplazamiento promedio de 55 cm.

4.2 Parámetros de fuente obtenidos del análisis espectral de las réplicas

En la Tabla 2.4 se muestran las magnitudes M_L ($2.0 < M_L < 4.3$) calculadas para las 77 réplicas estudiadas. Estas magnitudes fueron obtenidas empleando el procedimiento rutinario utilizado en RESMAC, que consiste en simular la salida de un instrumento Wood-Anderson a partir de los registros de las estaciones de la red, para aplicar la fórmula de Richter (1958). En base a estas magnitudes fueron calculados valores de M_0 para las réplicas, con objeto de compararlos con los obtenidos del análisis espectral,

Los parámetros de fuente; M_0 , $\Delta\sigma$, r fueron calculados para todas las fases sísmicas de las que se obtuvieron espectros (ver tabla 4.1), mediante la formulación de Brune (1970, 1971), expuesta en la sección anterior; utilizando los mismos valores ya mencionados para las constantes. En el cálculo de los parámetros en base a espectros de fases P_t y P , la velocidad β es modificada por el factor $\sqrt{3}$. Para el cálculo del patrón de radiación ($R_{\theta\phi}$), necesario para el cálculo del M_0 , fué asumido el mecanismo focal del sismo principal para todas las réplicas, y ángulos de salida apropiados para las distintas fases; de fases refractadas para las fases de placa y ángulos de salida de ondas directas para las otras fases (P y S).

Los registros de la estación MEX presentan una fase identificable como S directa, cuyo tiempo de arribo concuerda con el tiempo teórico de arribo (T_g) para la fase S_g según el modelo MEX-01. Como ya ha sido mencionado, la identificación de fases S directas requeridas para el cálculo de los parámetros de fuente es ambigua en los registros de las estaciones. Por consiguiente consideramos como valores aproximados de los parámetros de fuente para las réplicas, los obtenidos en la estación ACX de las fases identificadas como S_g . Los espectros que se emplearon para el cálculo fueron corregidos por atenuación (ver 3.1). Estos parámetros resultan en valores para el M_0 de $4.7 E20 - 9.2 E22$ dinas-cm, para r de $0.2 - 0.6$ km, y para $\Delta\sigma$ de $1.0 - 6.0$ bares aproximadamente. Los valores de M_0 concuerdan con los calculados en función de las magnitudes M_L de las réplicas (ver tabla 4.1),

En la sección 3.3 se denominó como pseudomomentos a los valores que se obtendrían de los espectros de las fases de placa. A este parámetro de fuente y los restantes ($\Delta\sigma$ y r) obtenidos de espectros de las fases de placa, los denominaremos "seudoparámetros" en virtud de que no pueden tomarse como los parámetros reales, debido a que son calculados a partir de espectros de fases distintas para las que fué formulado el modelo de Brune (1970, 1971) (fases S directas). Sin embargo, fueron calculados con objeto de analizar los resultados obtenidos, en relación a las proposiciones hechas en la sección 3.3.

Los valores promedio del M_0 obtenidos de la estación MEX son más altos que los obtenidos de las otras estaciones, siendo mayores por un factor de 3.0 que los de la estación ACX. Los valores obtenidos de ésta última estación son aproximadamente iguales a los de las estaciones TLX y CRX. Los valores de r son diferentes en cada estación, previsiblemente debido a la ya mencionada variación de las f_c de esquina (sección 3.2); siendo siempre menores por un factor de 2.5-2.8 en la estación ACX, que presenta las f_c mayores (ver fórmulas de cálculo en la sección 4.1). En consecuencia los valores de caídas de esfuerzo ($\Delta\sigma$) resultan muy altos en ésta estación (ver tabla 4.1), no concordando con los valores de $\Delta\sigma$ característicos de la región. Una consecuencia de éstas observaciones, es que la obtención de parámetros de fuente en base a ondas sísmicas de placa, identificadas erróneamente como fases directas resulta en determinaciones erróneas de los parámetros de fuente,

En la sección 3.3 fué propuesto que los pseudo-momentos calculados de las estaciones tierra adentro (CRX, MEX y TLX) deben ser muy parecidos entre sí, particularmente entre las estaciones CRX y MEX, por ser muy cercanas entre sí. Los resultados arriba mencionados no concuerdan con lo esperado (los valores en MEX resultan mayores que los obtenidos en las otras estaciones por un factor de 3.0); sin embargo, éstas diferencias pueden deberse a efectos causados por el eje volcánico mexicano, que hace suponer que la guía de ondas (ver sección 3.3) puede interrumpirse por la presencia de éste, y cuyos efectos sobre las ondas sísmicas son actualmente imposibles de evaluar; y a la influencia de los efectos locales o de la corteza en la estación MEX.

Tabla 4.1. VALORES DE MOMENTO SISMICO EN FUNCION DE ML, Y VALORES DE FRECUENCIA DE RESONANCIA (GR) PARA Z, DISEÑO ESPECTRAL (DE), FACTOR DE RADICACION (P.R.), MOMENTO SISMICO (M), DIMENSION DE LA FUENTE (R), CAIDA DE ESFUERZO (C.E.), Y ML EN FUNCION DEL NO.

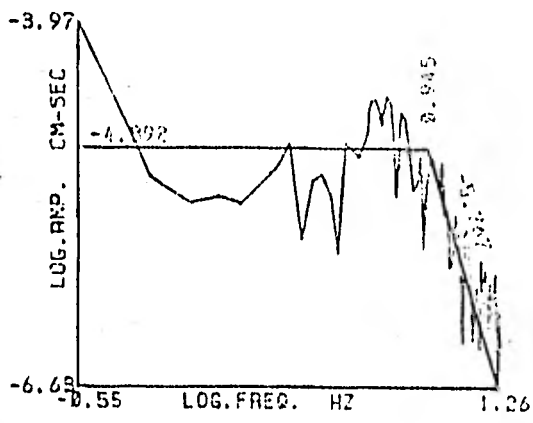
EST	FALE	FC(HZ)	LOG . Z	P.R.	M	R	C.E.	ML(M)
EVENTO 15: 62 ML: 3.1 M0(L) = 0.14E+22								
MEX	S	2.51	-4.60	-0.24	0.32E+22	0.64	3.63	3.67
	PT	3.98	-5.00	0.15	0.11E+23	0.70	9.27	4.02
ACX	PT	7.94	-5.00	0.15	0.12E+23	0.35	83.65	4.05
	ST	6.31	-5.60	-0.24	0.41E+21	0.25	8.24	3.11
TLX	ST	2.51	-5.00	-0.24	0.10E+22	0.64	1.75	3.46
EVENTO 15: 63 ML: 2.9 M0(L) = 0.71E+21								
ACX	PT	6.31	-5.75	0.15	0.21E+22	0.44	7.31	3.55
EVENTO 15: 69 ML: 3.7 M0(L) = 0.11E+23								
MEX	PT	4.47	-4.50	0.15	0.33E+23	0.62	40.56	4.35
	ST	2.51	-4.60	-0.24	0.32E+22	0.64	3.55	3.67
	S	2.51	-4.40	-0.24	0.50E+22	0.64	5.64	3.80
ACX	ST	6.31	-5.20	-0.24	0.91E+21	0.25	16.27	3.31
EVENTO 15: 69 ML: 3.6 M0(L) = 0.79E+22								
MEX	PT	3.16	-4.60	0.15	0.28E+23	0.68	12.05	4.30
	S	2.00	-4.40	-0.24	0.53E+22	0.60	2.98	3.82
	ST	2.51	-4.50	-0.24	0.42E+23	0.64	4.73	3.75
ACX	PT	8.91	-5.70	0.15	0.35E+22	0.31	24.43	3.80
	ST	6.03	-5.40	-0.24	0.60E+21	0.27	9.36	3.19
TLX	ST	3.16	-5.00	-0.24	0.16E+22	0.51	3.52	3.46
EVENTO 15: 76 ML: 3.4 M0(L) = 0.40E+22								
MEX	PT	3.16	-5.00	0.15	0.10E+23	0.68	4.49	4.01
	ST	2.29	-4.70	-0.24	0.25E+22	0.70	2.12	3.60
	S	3.00	-4.75	-0.24	0.20E+22	0.40	9.90	3.56
ACX	PT	6.31	-5.10	0.15	0.92E+22	0.44	32.67	3.99
	ST	5.01	-5.00	-0.24	0.14E+22	0.32	12.81	3.44
	S?	7.08	-5.50	-0.24	0.45E+21	0.23	11.41	5.10
EVENTO 15: 80 ML: 2.9 M0(L) = 0.71E+21								
ACX	S?	6.31	-5.70	-0.24	0.30E+21	0.25	5.27	2.98
	ST?	6.31	-5.30	-0.24	0.74E+21	0.25	13.25	3.25
EVENTO 15: 87 ML: 2.9 M0(L) = 0.71E+21								
ACX	PT	7.08	-5.60	0.15	0.19E+22	0.39	9.16	3.52
	P?	5.62	-5.90	0.15	0.19E+22	0.49	4.69	3.52
	ST	5.01	-5.25	-0.24	0.00E+21	0.32	7.17	3.27
EVENTO 15: 88 ML: 3.0 M0(L) = 0.10E+22								
ACX	PT	6.31	-5.70	0.15	0.23E+22	0.44	7.89	3.59
	P?	6.31	-5.80	0.15	0.10E+22	0.44	6.54	3.51
	ST	10.00	-5.60	-0.24	0.22E+21	0.16	15.69	2.90
EVENTO 15: 92 ML: 3.5 M0(L) = 0.56E+22								
MEX	PT	3.16	-5.00	0.15	0.11E+23	0.63	4.70	4.02
	ST	3.16	-4.80	-0.24	0.41E+22	0.51	9.34	3.74
	S	2.00	-4.80	-0.24	0.70E+22	0.60	3.83	3.73
ACX	P?	7.94	-5.00	0.15	0.60E+22	0.35	47.48	3.80
	PT	5.00	-5.00	0.15	0.10E+23	0.49	29.96	4.05
	ST	4.47	-4.80	-0.24	0.57E+22	0.35	13.43	3.71
EVENTO 15: 95 ML: 3.1 M0(L) = 0.40E+22								
ACX	PT	6.31	-5.70	0.15	0.10E+22	0.44	5.89	3.51
	ST	7.08	-6.25	-0.24	0.70E+21	0.23	2.00	2.80

TABLA 4.1 CONTINUACION.

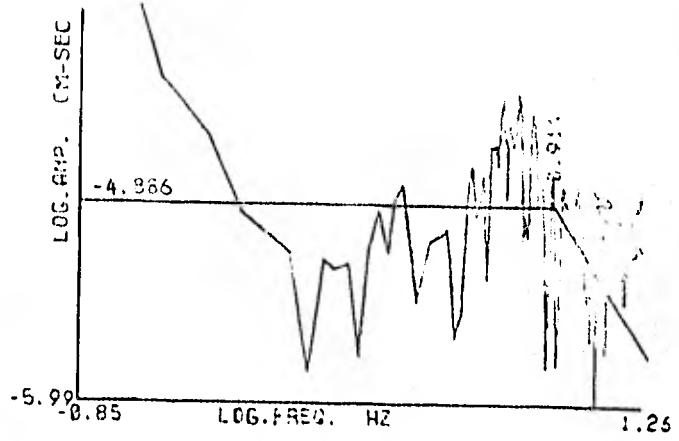
EST	FASE	P	Q	LOG DEL	P.	NO	R	C.E.	ML(11)
EVENTO 151 95 ML: 4.3 M0(ML): 0.89E+23									
MEX	PT	3.15	-3.25	0.15	0.59E+24	0.68	254.10	5.18	
	ST	2.51	-3.50	-0.24	0.47E+23	0.74	34.93	4.40	
	S	2.83	-3.50	-0.24	0.47E+23	0.61	51.03	4.43	
MEX	PT	6.31	-3.60	0.15	0.30E+24	0.44	1040.93	4.99	
	ST	3.62	-3.50	-0.24	0.57E+23	0.63	72.72	4.51	
TLX	PT	5.62	-4.00	0.15	0.13E+24	0.53	319.35	4.74	
	ST	2.24	-3.50	-0.24	0.24E+23	0.72	19.28	4.26	
	S	2.24	-4.00	-0.24	0.17E+23	0.72	12.16	4.12	
CRX	ST	2.24	-3.50	-0.24	0.94E+22	0.72	7.51	3.99	
	S	2.51	-4.00	-0.24	0.15E+23	0.64	16.60	4.12	
EVENTO 151 97 ML: 3.4 M0(ML): 0.40E+22									
ACX	PT	7.08	-5.20	0.15	0.77E+22	0.33	37.17	3.92	
	ST	5.01	-5.20	-0.24	0.92E+21	0.32	8.19	3.31	
MEX	ST	3.16	-4.70	-0.24	0.25E+22	0.51	5.70	3.60	
	S	3.16	-4.75	-0.24	0.23E+22	0.51	5.08	3.57	
EVENTO 151100 ML: 2.9 M0(ML): 0.71E+21									
ACX	ST	7.08	-5.70	-0.24	0.28E+21	0.23	7.12	2.97	
EVENTO 151101 ML: 3.1 M0(ML): 0.14E+22									
ACX	PT	7.08	-5.70	0.15	0.24E+22	0.39	11.82	3.59	
	ST	5.01	-5.50	-0.24	0.46E+21	0.32	4.13	3.11	
MEX	ST	3.55	-5.30	-0.24	0.64E+21	0.45	2.04	3.21	
	S	3.16	-5.50	-0.24	0.41E+21	0.51	0.91	3.07	
EVENTO 151111 ML: 3.7 M0(ML): 0.11E+23									
ACX	PT	7.94	-5.00	0.15	0.12E+23	0.35	83.66	4.06	
	ST	6.31	-5.50	-0.24	0.46E+21	0.25	8.24	3.11	
	S	6.31	-5.20	-0.24	0.92E+21	0.25	16.44	3.31	
MEX	PT	3.98	-5.20	0.15	0.68E+22	0.70	5.65	3.89	
	ST	2.51	-4.50	-0.24	0.41E+22	0.64	4.57	3.74	
	S	2.51	-4.50	-0.24	0.41E+22	0.64	4.57	3.74	
TLX	ST	2.00	-4.70	-0.24	0.31E+22	0.60	1.75	3.66	
CRX	ST	2.02	-4.70	-0.24	0.31E+22	0.57	4.85	3.66	
EVENTO 151113 ML: 2.7 M0(ML): 0.35E+21									
ACX	ST	6.61	-6.00	-0.24	0.15E+21	0.24	3.02	2.78	
EVENTO 151115 ML: 3.5 M0(ML): 0.56E+22									
ACX	PT	7.59	-6.00	0.15	0.12E+22	0.37	7.33	3.39	
	ST	7.08	-5.00	-0.24	0.15E+22	0.23	37.01	3.44	
MEX	PT	5.01	-5.00	0.15	0.11E+23	0.55	18.12	4.02	
	ST	3.99	-5.20	-0.24	0.72E+21	0.40	3.55	3.27	
	S	3.99	-4.50	-0.24	0.40E+22	0.57	6.33	3.73	
CPX	ST	2.02	-6.00	-0.24	0.15E+21	0.57	0.24	2.79	
EVENTO 151122 ML: 2.8 M0(ML): 0.60E+21									
ACX	PT	10.00	-6.30	0.15	0.64E+21	0.28	8.78	3.21	
EVENTO 151125 ML: 2.9 M0(ML): 0.71E+21									
AXP	PT	10.00	-6.20	0.15	0.76E+21	0.28	10.42	3.25	
	ST	7.94	-5.00	-0.24	0.23E+21	0.20	8.15	2.91	
EVENTO 151 2 ML: 3.5 M0(ML): 0.56E+22									
ACX	PT	10.00	-5.70	0.15	0.24E+22	0.39	33.25	3.59	
	ST	7.94	-5.00	-0.24	0.15E+22	0.20	51.89	3.44	
MEX	PT	3.55	-5.20	0.15	0.68E+22	0.70	4.03	3.80	
	ST	2.51	-5.00	-0.24	0.15E+22	0.64	1.41	3.40	
	S	2.51	-5.00	-0.24	0.15E+22	0.64	1.41	3.40	
TLX	ST	2.00	-4.70	-0.24	0.31E+22	0.60	1.75	3.66	
CRX	ST	2.02	-4.70	-0.24	0.31E+22	0.57	4.85	3.66	
EVENTO 151 29 ML: 3.1 M0(ML): 0.14E+22									
MEX	PT	10.00	-5.70	0.15	0.24E+22	0.39	33.25	3.59	
	ST	7.94	-5.00	-0.24	0.15E+21	0.20	16.44	3.31	
TLX	ST	2.00	-4.70	-0.24	0.31E+21	0.60	1.75	3.66	

TABLA 4.1 CONTINUACION.

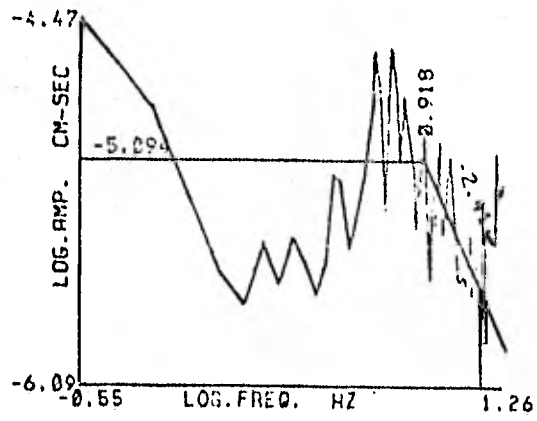
EST	FASE	FC(HZ)	LOG DE	P.R.	M0	R	C.E.	ML(M0)
EVENTO 16: 60 ML: 3.2 M0(ML)= 0.20E+22								
ACX	PT	10.00	-6.00	0.15	0.12E+22	0.20	16.09	3.33
	ST	7.08	-5.70	-0.24	0.29E+21	0.23	7.21	2.97
EVENTO 16: 67 ML: 2.9 M0(ML)= 0.71E+21								
ACX	PT	6.31	-6.00	0.15	0.12E+22	0.44	4.10	3.38
EVENTO 16: 69 ML: 3.2 M0(ML)= 0.20E+22								
ACX	PT	7.94	-6.00	0.15	0.12E+22	0.35	8.31	3.39
	ST	7.08	-5.80	-0.24	0.23E+21	0.23	5.79	2.91
EVENTO 16: 71 ML: 3.3 M0(ML)= 0.28E+22								
ACX	PT	10.00	-6.00	0.15	0.12E+22	0.28	15.87	3.38
	ST	7.00	-5.50	-0.24	0.44E+21	0.23	11.06	3.09
TLX	ST	2.82	-5.50	-0.24	0.47E+21	0.57	0.75	3.12
CRX	ST	3.02	-6.50	-0.24	0.45E+20	0.53	0.09	2.43
EVENTO 16: 84 ML: 3.7 M0(ML)= 0.11E+23								
ACX	PT	10.00	-6.20	0.15	0.72E+21	0.28	9.89	3.24
	ST	7.94	-6.40	-0.24	0.55E+20	0.20	1.94	2.49
EVENTO 16: 89 ML: 3.5 M0(ML)= 0.56E+22								
ACX	ST	6.31	-5.40	-0.24	0.55E+21	0.25	9.80	3.16
MEX	PT	5.62	-5.30	0.15	0.50E+22	0.49	12.07	3.50
	S	3.16	-5.00	-0.24	0.12E+22	0.51	2.66	3.38
	F7	3.55	-5.00	-0.24	0.12E+22	0.45	3.76	3.38
EVENTO 17: 2 ML: 3.3 M0(ML)= 0.28E+22								
ACX	PT	7.94	-5.20	0.15	0.75E+22	0.35	51.45	3.92
MEX	ST	3.55	-5.20	-0.24	0.79E+21	0.45	2.49	3.26
	S	2.82	-5.20	-0.24	0.79E+21	0.57	1.25	3.26
EVENTO 17: 39 ML: 3.0 M0(ML)= 0.10E+22								
ACX	PT	7.94	-6.30	0.15	0.59E+21	0.35	4.04	3.18



15-111 ACX P_t No Q

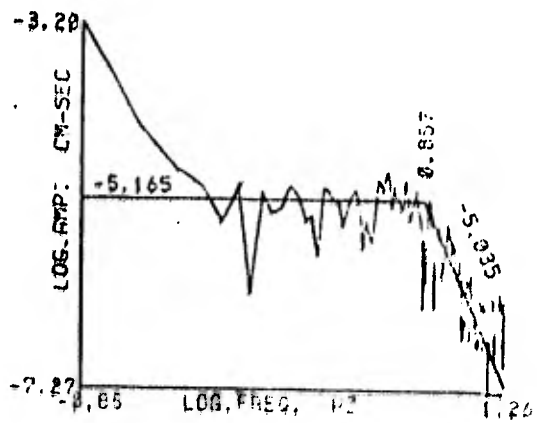


15-111 ACX P_t Q=1000

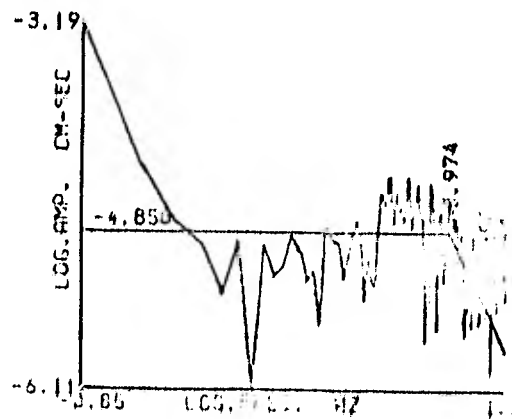


15-111 ACX $P?$ Q=1000

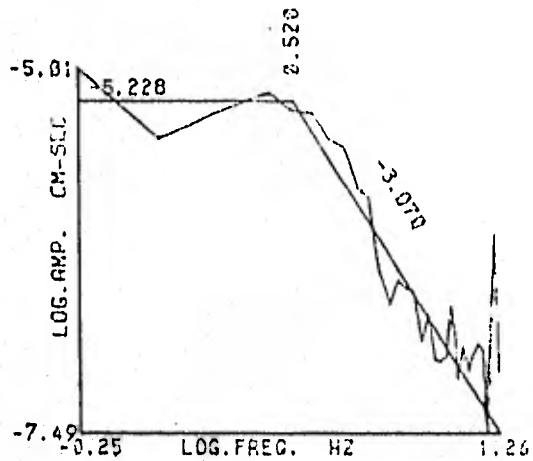
FIGURAS 4.1



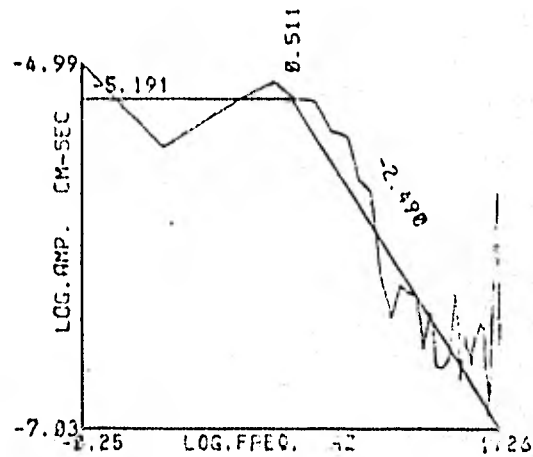
15-111 ACX S_t No Q



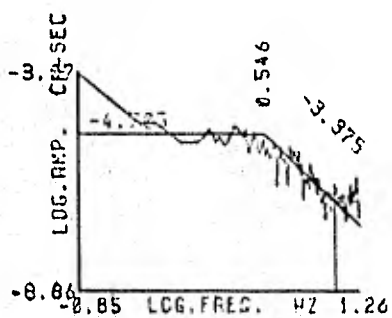
15-111 ACX S_t Q=1000



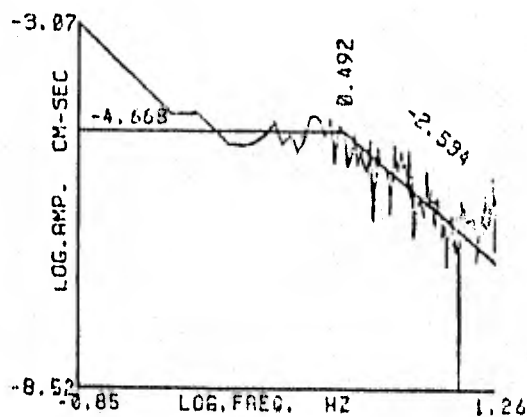
15-111 MEX P_t No Q



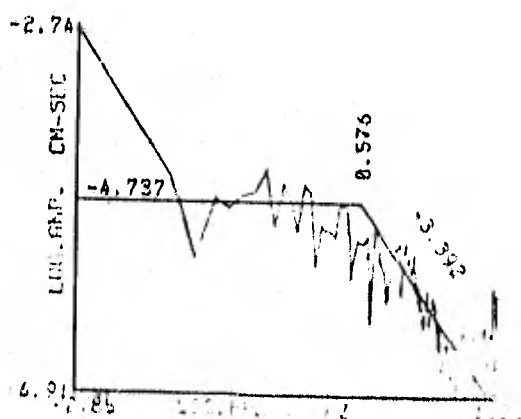
15-111 MEX P_t Q=1500



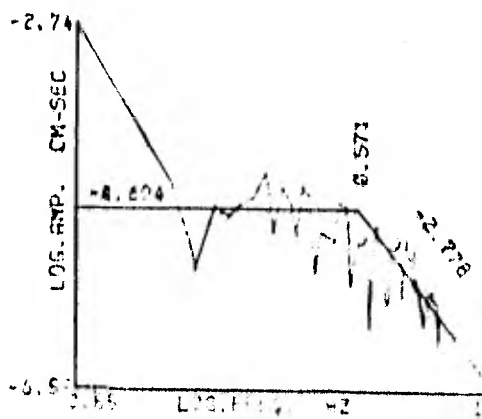
15-111 MEX S_t No Q



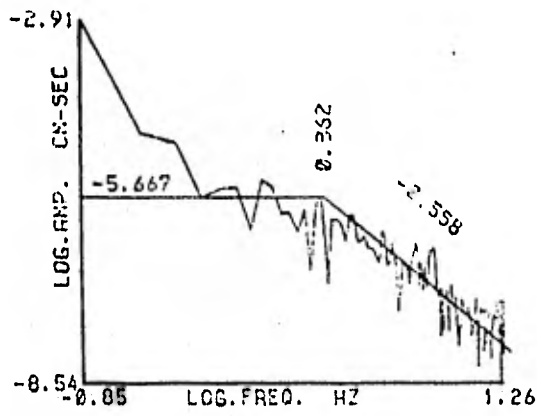
15-111 MEX S_t Q=1000



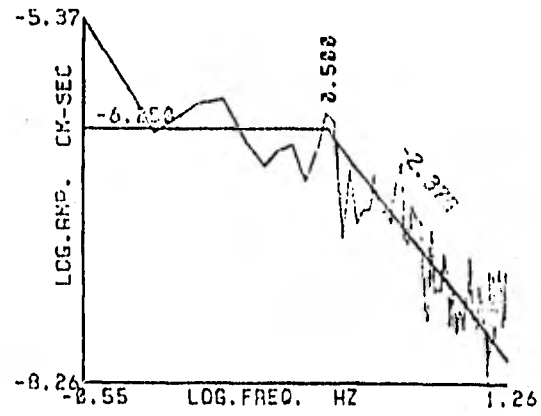
15-111 MEX S No Q



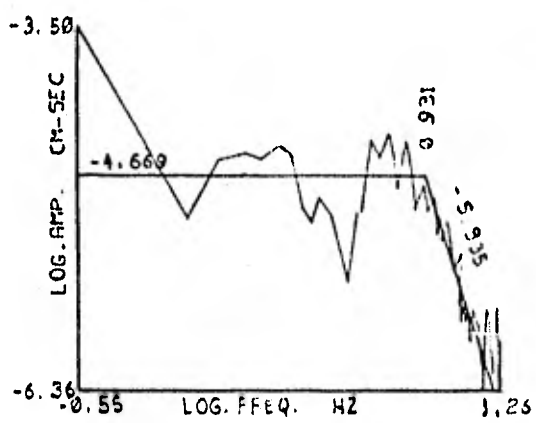
15-111 MEX S Q=1000



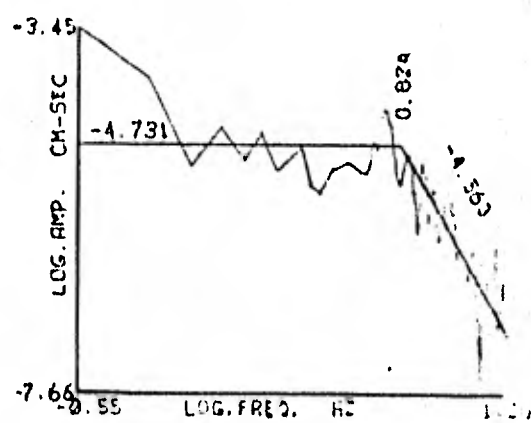
15-111 CRX S_t $Q=1000$



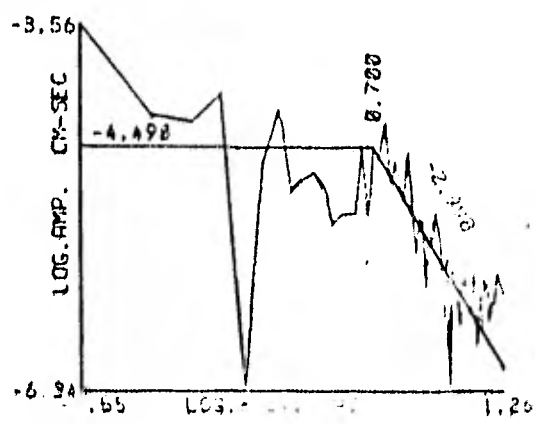
15-111 CRX S $Q=1000$



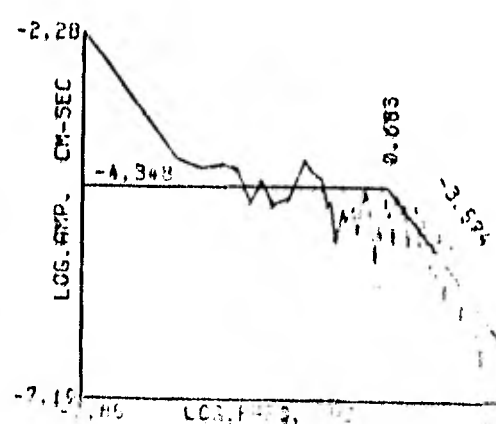
15-96 ACX P_t No Q



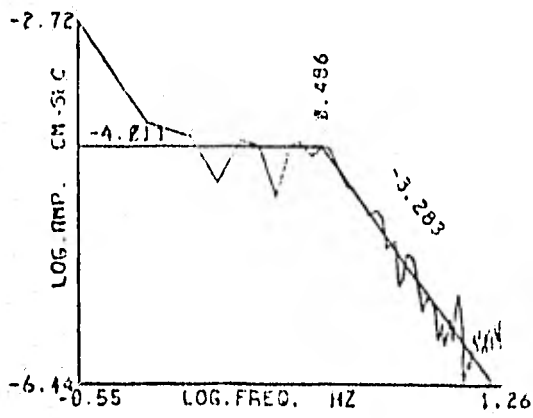
15-96 ACX $P?$ No Q



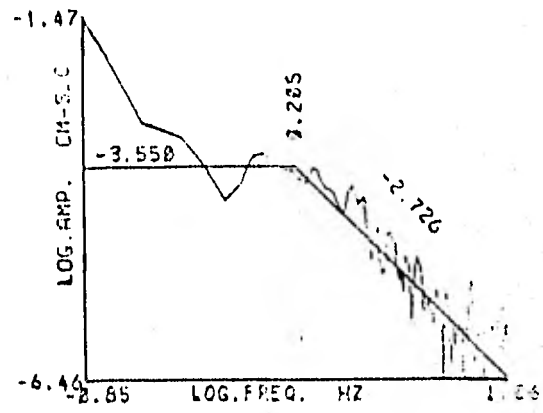
15-96 ACX S_t $Q=1000$



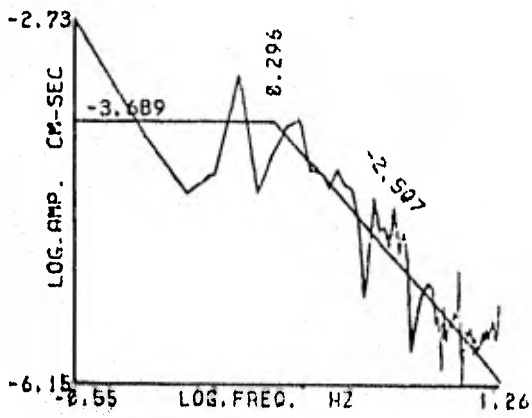
15-96 S $Q=1000$



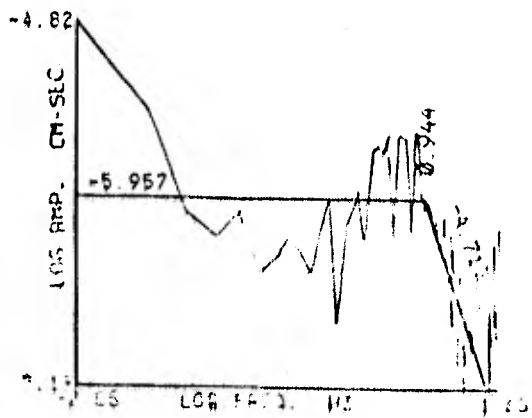
15-96 MEX P_t No Q



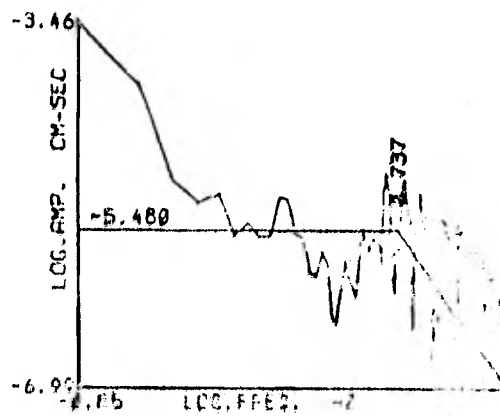
15-96 MEX S_t $Q=1000$



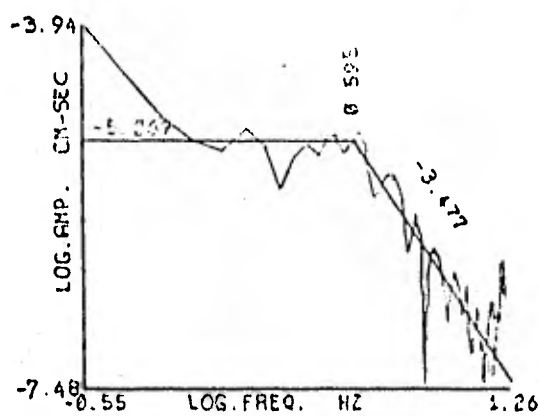
15-96 MEX S $Q=1000$



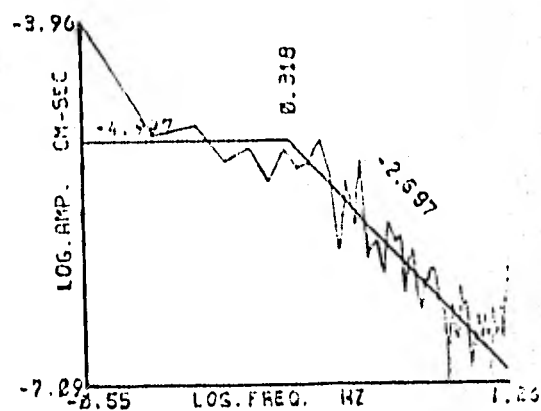
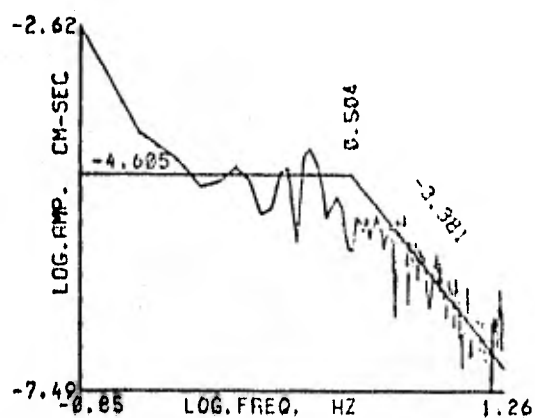
15-115 ACX P_t No Q



15-115 ACX P_t $Q=1000$



15-115 ACX P No Q

15-115 MEX S_t Q=1000

15-115 MEX S Q=1000

Figuras 4.1 Espectros de amplitudes de faces sísmicas observadas en los eventos 15-96, 15-111, 15-115. Las ventanas de tiempo utilizadas son señaladas en los sismogramas de las Figs. 2,2, 2,3, 2,4. Cada espectro se identifica con el número de evento, la estación, la fase y el valor de Q utilizado. El valor de la amplitud espectral (Ω_0) y la frecuencia de esquina (f_c) son obtenidos automáticamente por el programa de cálculo de espectros de RESMAC y se muestran en cada gráfica. Nótese el "máximo de amplitudes" observado en los espectros de ACX cerca a frecuencia de esquina. Se muestran los espectros obtenidos sin corrección por Q y los obtenidos utilizando esta corrección,

5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

La relocalización de hipocentros mediante la técnica de evento maestro de 77 de las réplicas del sismo de Huajuapán de León, resultó en determinaciones de epicentros que difieren en distancias no mayores de 8 km de los epicentros determinados con datos de estaciones de campo (del IGF). Considerando que la distribución actual de las estaciones de RESMAC es poco apropiada para la localización de sismos en el área estudiada (distancias hipocentrales de 120-240 kms y azimuths de 225° a 360°), las localizaciones obtenidas pueden considerarse muy buenas y superiores a las obtenidas por el método usual de localización. Por lo que recomendamos la utilización rutinaria del método de evento maestro para la obtención de localizaciones más confiables. La distribución hipocentral de las réplicas permitió definir cual de los dos planos principales del mecanismo focal obtenido para este sismo es el plano de ruptura para el sismo principal. El mecanismo resultante de falla normal, concuerda con la tectónica del área,

El sismo principal fue relocalizado dentro del área de réplicas; el error de localización del USGS (asumiendo que nuestra localización es correcta) es de 39 km,

La suposición de que el área de réplicas (y el área de ruptura) abarcan la sección vertical de la placa subducida, permitió

elaborar dos modelos tentativos para la estructura de velocidades de la región. Estos modelos de la región al sur del eje volcánico mexicano, aunque poco confiables, son más representativos de la estructura regional (sugerida por la tectónica de placas de la zona) que los modelos de capas planos y paralelos actualmente empleados, y son una base para futuros estudios del área.

El análisis espectral de las ondas de placa presentadas en los registros de las réplicas, permitió identificar el origen de las fases denominadas en este trabajo como P_t y S_t ; como fases P y S respectivamente, en base a la concordancia de las frecuencias de esquina respectivas.

Algunas otras características de los espectros de las fases de placa de las réplicas, como el "máximo de amplitudes" observado en los espectros de ACX, y la variación de las frecuencias de esquina, concuerdan cualitativamente con efectos debidos a la guía de ondas que presentan los modelos propuestos.

La identificación errónea de ondas de placa como ondas directas para el cálculo de parámetros de fuente en base al análisis espectral de éstas, puede resultar en valores erróneos para los parámetros y una gran variación de éstos. La amplitud grande de éstas fases hacen probable la identificación errónea como ondas directas.

La determinación espectral de parámetros de fuente, indican que tanto el evento principal como las réplicas presentaron caídas de esfuerzo, bajas del orden de unidades de bar,

lo cual concuerda con las caídas de esfuerzo determinadas para otros sismos someros en la región. La dimensión de la zona de ruptura para el sismo principal concuerda con la dimensión de la zona de réplicas, y el momento sísmico concuerda con los obtenidos a partir de la magnitud.

La información con que se contó para la realización de éste trabajo, sin embargo, no fué óptima; la red de estaciones de RESMAC no cuenta con estaciones en los estados del sur del país (Guerrero, Oaxaca y Chiapas), cuyos datos hubieran permitido un estudio más completo de la localización de hipocentros y de las ondas de placa. La ampliación de la red actual de estaciones de RESMAC, es necesaria para la realización de estudios sísmológicos más completos del país, por lo que es deseable contar cuanto antes con un mayor número de estaciones, primordialmente en la región mencionada.

REFERENCIAS

- Aki, K., 1966, Generation and Propagation of G Waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964. Estimation of earthquake moment, released energy and stress-strain drop from G-wave spectrum. Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo University 44, 73-88, 1966.
- Benioff, H., 1954, Orogenesis and deep crustal structure: Additional evidence from seismology. Geol. Soc. Amer., Bull. V. 65, P. 385-400.
- Brune, J., 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J. Geophys. Res., 75, 26, 4997 - 5009.
- Brune, J., 1971, Correction to Brune. J. Geophys. Res., 76, 20, 5002.
- Dean, B.W., and Drake, Ch. H., 1978, Focal Mechanism solutions and tectonics of middle America Arc. J. Geol. V. 86, III - 128.
- Dewey, J.F., and Bird, F.M., 1970, Mountain belts and the new global tectonics. J. Geophys. Res., V. 75, P. 2625-2647.
- Ewing, M., Jardetzky, W. and Press, F., 1957, Elastic Waves in layered media, McGraw Hill, pp 380.
- Garza, T., Gil, J., Lomnitz, C., Tubilla, A., 1978, Estado de avance de la red sísmológica mexicana de apertura continental RESMAC, Ing, Vol. XLVIII, Num, 2 UNAM, Abril-Junio, México,

Hanks, T.C. and Wyss, M., 1972. The use of body-wave spectra in the determination of seismic source parameters. Bull. Seis. Soc. Amer. V. 62, 561-590.

Herrin, E., 1968, Seismological tables for p phases. BSSA 58 No. 4, P. 1196 - 1222.

Isaks, B., and Molnar, P., 1971, Distribution of Stress in the descending lithosphere from a global survey of focal mechanism solutions of mantle earthquakes. Rev. Geophys. Space Phys. V. 9, 102-174.

Jiménez, Z. 1981, Informes internos, Instituto de Geofísica, UNAM, Depto. de Sismología.

Kanasewich, E.R., 1973, Time sequence analysis in Geophysics. The University of Alberta Press.

Knopoff, L., 1964, Q. Rev. Geophys. Space Phys. V. 2, 625-660.

Lee, W.H.K., and Lahr, J.C., 1978, HYPO 71 (revised 1978). A program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey, open file report 15 - 311.

Lomnitz, C., and Gil., J., 1976, RESMAC: The new Mexican seismic array, EOS Trans. Amer. Geophys. Union 57: 68-69.

Lomnitz, C. 1981, Refracted phases of subducted oceanic plate from Mexican intermediate depth earthquake, Comunicaciones técnicas IIMAS, UNAM, Serie Naranja, No. 276, 13 pp.

Lomnitz, C., 1982, Direct evidence of a subducted plate under southern México. Nature V. 296, 235-238.

Mammerickx, J., and Klitgord, K. 1982, Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 M.Y. B.P. to the present. *J. Geophys. Res.*, 87, 67, 6751-6759.

McNally, K., 1981, Plate subduction and the prediction of earthquakes along the Middle America trench. *Earthquakes Prediction*, Maurice Ewing Ser., 4, A.G.U. Washington, D.C. 63-72.

Molnar, P., and Sykes, L.R., 1969, Tectonics of the Caribbean and middle america regions from focal mechanisms and seismicity. *Bull. seism. Soc. Amer.* V. 80, p. 1639-1684.

Molnar, P., Tucker, B.E., and Brune, J.N., 1973, Corner Frequencies of P and S waves and models of earthquake sources. *Bull. Seism. Soc. Amer.* V. 63, 2091-2104.

Mota, R., 1981, Informes internos, Instituto de Geofísica, UNAM, Depto. de Sismología.

Nava, F., Beroza, G., and McNally, K., 1982, Microseismicity of the Acapulco quiescent zone, A.G.U. Sn. Fco., EOS, 63 No. 45, 1040.

Prince, J., (ed), 1980, Rep. IPS-8 Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Richter, C.F., 1958, *Elementary Seismology*, Freeman and Co.

Sánchez, E., 1982, Lista cronológica de sismos históricos mexicanos. *Comunicaciones técnicas IIMAS, UNAM, Serie naranja*.

Thatcher, W., and Hanks, T.C., 1973, Source Parameters of southern California earthquakes. *J. of Geophysical Res.*, V. 78, 8547 - 8576.

Vargas, C., Lomnitz, C., 1969, Una nueva ecuación de regresión cuadrática para determinación de epicentros de temblores. Anuario del Instituto de Geofísica 14, p. 71-73.

Zúñiga, F.R., y Valdéz, C.M., 1980, Análisis de las réplicas del temblor de Petatlán del 14 de marzo de 1979. Tesis Profesional, Fac. de Ingeniería, UNAM, 1980.

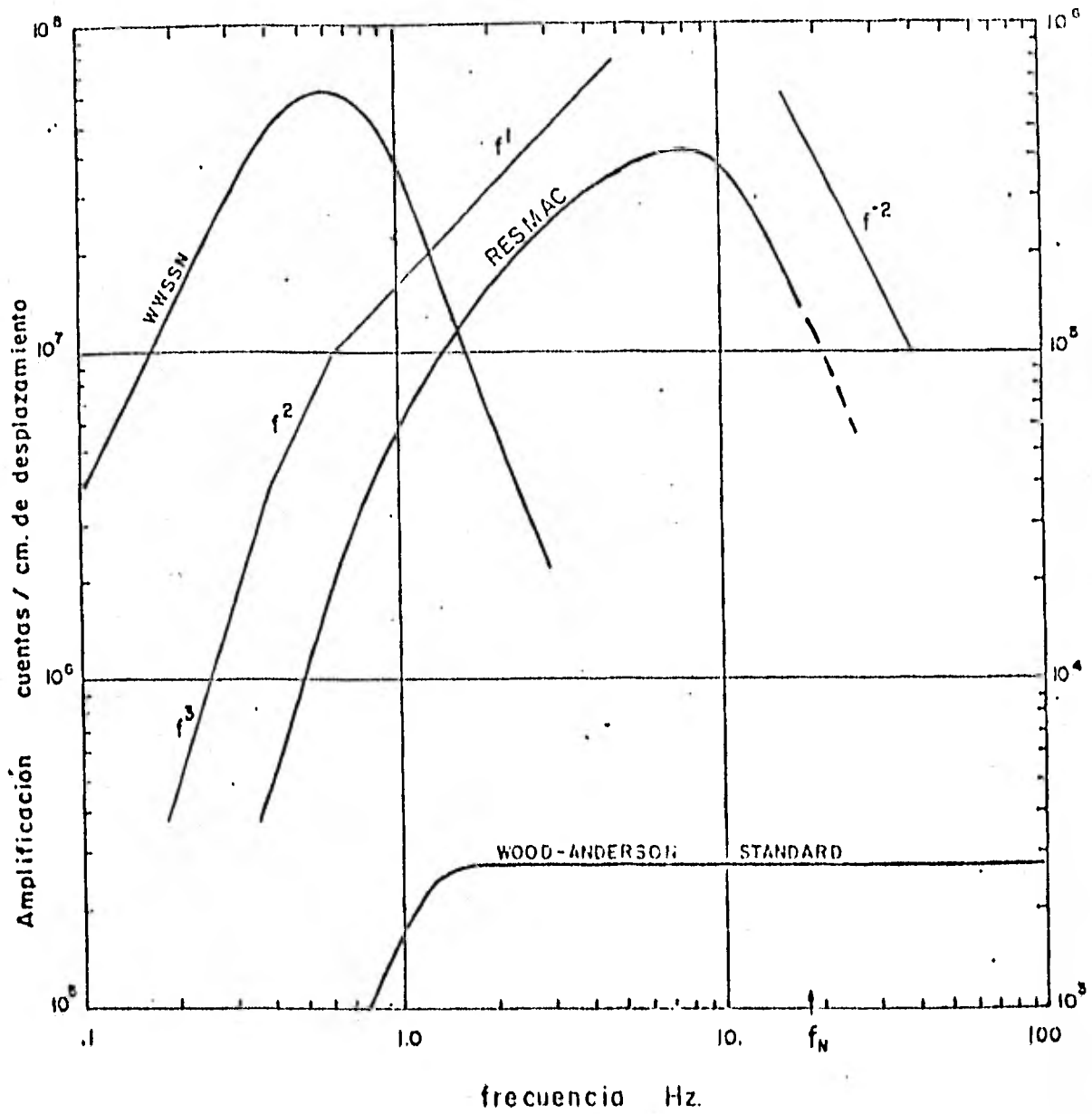


FIGURA A.1 Respuesta de las estaciones de periodo corto y sensor vertical de RESMAC

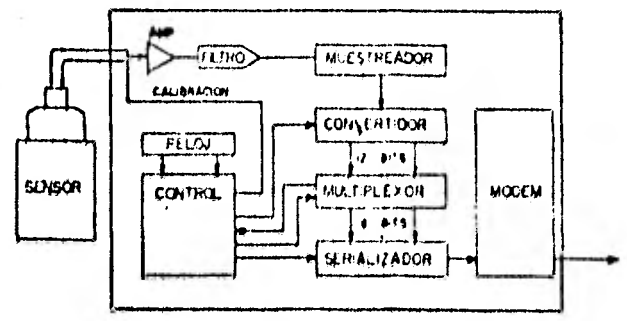


FIGURA A.2 Componentes de la estación de periodo corto y sensor vertical de RESMAC,

A P E N D I C E A

EL SISTEMA RESMAC

Obtención y Procesamiento de Datos SísmicosA.1 Descripción del Sistema

RESMAC (Red Sismológica Mexicana de Apertura Continental) es una red de telemetría de estaciones sísmicas, que cubre actualmente el centro de la república Mexicana, y es operada por el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS), de la UNAM. Las señales sísmicas son digitalizadas en las estaciones sísmicas y transmitidas al IIMAS mediante la Red Nacional de Microondas, donde son procesadas en un equipo de cómputo en formato digital.

A.1.1 La red de estaciones sísmicas

La red actual consta de 12 estaciones de período corto de componente vertical, y una estación de período largo de tres componentes. Los nombres, lugar de ubicación, coordenadas y altitudes de las estaciones se muestran en la tabla 1.1, y la posición geográfica de las estaciones es mostrada en la figura 1.1, (ver sección 1.). Cuatro de las 12 estaciones de la red (ver tabla 1.1) pertenecen a la red SISMEX del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La estación MAZ (que no se muestra en la tabla y figura mencionadas) se encuentra en etapa de prueba, en Mazatlán.

Las estaciones de RESMAC consisten en: un sismómetro Mark con período natural de 1 seg y amortiguamiento crítico de 0.7, un amplificador con dos filtros Butterworth en cascada (la respuesta del instrumento es mostrada en la figura A.1), con un convertidor analógico digital (A-D), y un modulador. El convertidor A-D muestrea la señal a razón de 36 muestras/seg. correspondiente a una frecuencia de Nyquist de 18 Hz. Estas estaciones están situadas cerca de las estaciones repetidoras de la Red Nacional de Microondas; la señal una vez muestreada y digitizada es transmitida por medio de éstas a una razón de 1200 baudios. Un esquema de ésta estación se muestra en la figura A.2.

Las señales de las estaciones de SISMEEX, que llegan al Instituto de Ingeniería por transmisión analógica, son retransmitidas al IIMAS para ser digitizadas.

A.1.2. El equipo de cómputo y procesamiento de las señales

El equipo de cómputo consiste actualmente en dos computadoras PDP 11/40, con memoria de 25K palabras cada una, unidad adicional de memoria de 30K palabras, discos RK05 de 2.4 mega/bytes y RK07 de 28 mega/bytes, pantalla de graficación Tektronix 4014, impresor electrostático GOULD 5200, dos unidades de cinta de 9 canales y 3 terminales.

Una de las computadoras (computadora en línea) efectúa en tiempo real la recepción de señales provenientes de las estaciones, almacenando en disco las señales de interés sísmico, mediante un reloj sincronizado por radio a la estación WWV (de Fort Collins, Colorado, USA) controla el tiempo de las señales sísmicas y supervisa el estado de las estaciones

y la transmisión.

Los sismos grabados por la computadora de captura son transportados en disco a la otra computadora para su procesamiento fuera de línea. En esta computadora se realizan estudios rutinarios de los sismos grabados, editándose boletines con información de la actividad sísmica registrada. Los sismos de interés sismológico son almacenados en cintas magnéticas, creándose un archivo de datos sísmicos para investigaciones específicas. La graficación de las señales sísmicas puede hacerse en papel o en pantalla simultáneamente para varias estaciones, siendo variables las escalas de graficación vertical y horizontal. Tiempos de arribo de fases sísmicas y ventanas de tiempo de las señales pueden ser almacenados en disco, seleccionándose mediante cursores móviles en pantalla para ser empleados por programas específicos; como programas para el cálculo de hipocentros y magnitudes, transformadas numéricas de las series de tiempo, filtrado de las señales y otros. Programas para estudios específicos también se elaboran en esta computadora. Esta computadora toma las funciones de la computadora en línea en caso de fallas en aquella.

A.2 El programa de localización de hipocentros "CAPAS"

A continuación se describe el programa CAPAS elaborado por C. Lomnitz, usado actualmente para la localización rutinaria de hipocentros en RESMAC. Una modificación de este programa fué empleada como subrutina en el programa de localización por evento maestro, usado en este trabajo,

CAPAS obtiene los parámetros de localización de un hipocentro (x, y, h, t_0): longitud, latitud, profundidad y tiempo origen, partiendo de un hipocentro inicial y mejorando la localización iterativamente. Presenta algunas diferencias básicas con los programas que se basan en ecs. de regresión: los parámetros convergen por separado sin utilizar un sistema de ecuaciones en el cálculo, lo cual ahorra tiempo de cómputo y no emplea tablas de tiempo-recorrido almacenadas en memoria.

La descripción básica del programa es como sigue:

- a) La variable a minimizar es la suma del cuadrado de los residuos:

$$\sum_{i=1}^N (\rho_i)^2$$

siendo $\rho_i = t_i - t_i^*$, donde t_i son los tiempos observados y t_i^* los tiempos teóricos. El error de localización llamado Xi-Cuadrado viene dado

por:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i)^2$$

donde N es el número de estaciones utilizado.

- b) El orden de determinación de los parámetros en cada iteración es: epicentro, profundidad (en caso de no ser dada como dato), y tiempo origen.
- c) Como epicentro inicial utiliza coordenadas cercanas a la estación que primero registró el sismo. Y como tiempo inicial (t_0) utiliza el tiempo de arribo P en

esta estación, restándole un tiempo arbitrario (20 seg). La profundidad (h) es determinada mediante incrementos sucesivos que minimicen la variable.

- d) Los tiempos teóricos (t_1^*) para distancias < 300 km, son obtenidos de curvas de tiempo-distancia que calcula el programa para profundidades dadas, en base al modelo de velocidades utilizado. Para distancias > 300 km se utilizan gráficas ajustadas a las tablas de Herrin (1968) por Vargas y Lomnitz (1969).

- e) El tiempo origen en la iteración (n+1) es encontrado por la relación:

$$t_0(N+1) = t_0(N) + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^2}{N}$$

- f) El epicentro en la iteración (n+1) es determinado por el vector: $\vec{V} = \sum_{i=1}^N \vec{I}_i$, con origen en el epicentro n. Los vectores \vec{I}_i tienen dirección epicentro n a estación i, y su longitud y sentido se obtienen en base al residuo ρ_i . El epicentro converge cuando la longitud del vector $\vec{V} < 0.001^\circ$.