



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

"ZONIFICACION SISMICA PARA LA ZONA URBANA DE  
GUADALAJARA"

FALLA DE ORIGEN

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOFISICO

PRESENTA:  
MARCO ANTONIO DELGADO VAZQUEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA D.F.

1995

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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.

***A mis Padres:***

*Leobardo Delgado Ramírez  
María Luisa Vázquez Rojas*

***A mi Esposa:***

*Lucía Valdés Jiménez*

***A mis Hijos:***

*Marco Vinicio  
Joel Antonio*

***A mis Hermanos:***

*Rosaura  
Raymundo  
Leobardo  
Jesús*

***EL AUTOR AGRADECE A COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, EN ESPECIAL  
A LA GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERIA CIVIL, LAS FACILIDADES QUE LE  
DIERON PARA LA ELABORACION DE ESTA TESIS PROFESIONAL.***



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-024

**SR. MARCO ANTONIO DELGADO VAZQUEZ**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.C. Javier Francisco Lermo Samaniego, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**ZONIFICACION SISMICA PARA LA ZONA URBANA DE GUADALAJARA**

<b>I</b>	<b>INTRODUCCION</b>
<b>II</b>	<b>GEOLOGIA</b>
<b>III</b>	<b>TECTONICA</b>
<b>IV</b>	<b>SISMICIDAD</b>
<b>V</b>	<b>INTEGRACION DE DATOS</b>
<b>VI</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

A t e n t a m e n t e

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Ciudad Universitaria, a 9 de Marzo de 1995

EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\*EGLM\*tjh

## **CONTENIDO**

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>I. INTRODUCCION</b> .....	2
<b>II. GEOLOGIA REGIONAL Y LOCAL</b> .....	6
<b>II.1 ESTRATIGRAFIA</b> .....	6
<b>III. TECTONICA</b> .....	14
<b>IV. SISMICIDAD</b> .....	22
<b>IV.1 SISMICIDAD HISTORICA</b> .....	22
<b>IV.2 INSTRUMENTACION SISMICA</b> .....	35
<b>IV.3 TEORIA DE LA PROPAGACION DE LAS ONDAS SISMICAS</b> .....	36
<b>IV.4 PROCESADO DE LA INFORMACION</b> .....	61
<b>V. INTEGRACION DE DATOS</b> .....	79
<b>VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	89
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	91

## FIGURAS

	<i>Página</i>
1 PLANO DE LOCALIZACION DE LA CIUDAD DE GUADALAJARA .....	3
2 ELEMENTOS ESTRUCTURALES TECTONICOS REGIONALES DEL CENTRO-OCCIDENTE .....	15
3 MARCO TECTONICO REGIONAL .....	16
4 PRINCIPALES FAMILIAS DE FALLAS .....	16
5 PROYECCIONES DE SCHMIDT, HEMISFERIO INFERIOR DE PLANOS DE FALLA MEDIDOS EN LOS SITIOS NOMBRADOS EN LA FIGURA No. 4 .....	19
6 LOCALIZACION DE EPICENTROS Y ESTACIONES SISMICAS DE LOS ESTADOS DE JALISCO, NAYARIT Y COLIMA, REGISTRADOS CON LA RED DE C.F.E. EN EL PERIODO DE 1900 A 1993 .....	23
7 CARTA SISMICA DEL ESTADO DE JALISCO. DATOS REUNIDOS HASTA JUNIO DE 1979 (J. Figueroa A., I de I, UNAM) .....	34
8 FUERZAS Y ESFUERZOS ACTUANDO EN UN MEDIO ELASTICO Y LIMITADO POR UNA SUPERFICIE S .....	37
9 GEOMETRIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LAS ONDAS P Y S EN UN PUNTO CON RESPECTO A UN SISTEMA DE EJES TRIRECTANGULAR ( $x_1, x_2, x_3$ ) .....	43
10 RAYOS TRANSMITIDOS Y REFLEJADOS: A) EN DOS SOLIDOS; B) EN DOS LIQUIDOS .....	44
11 TRAYECTORIA DE RAYOS EN UN MEDIO CON VELOCIDAD QUE AUMENTA CON LA PROFUNDIDAD: A) CON FOCO EN LA SUPERFICIE, Y B) A PROFUNDIDAD Z. H ES LA PROFUNDIDAD MAXIMA DEL RAYO Y X LA DISTANCIA HORIZONTAL QUE APARENTEMENTE RECORRE LA ONDA .....	47
12 RAYOS DIRECTOS: 1) REFLEJADO; 2) REFRACTADO; 3) Y LAS DROMOCRONICAS CORRESPONDIENTES EN UN MODELO DE UNA CAPA SOBRE UN MEDIO, AMBOS DE VELOCIDAD CONSTANTE ( $v_1 < v_2$ ); $x_c$ DISTANCIA CRITICA Y $t_c$ TIEMPO DE INTERSECCION DEL REFRACTADO CRITICO .....	48

13	<i>DROMOCRONICAS DE LA ONDA REFLEJADA EN EL DIAGRAMA (<math>t^2, x^2</math>)</i> .....	50
14	<i>DROMOCRONICA REDUCIDA PARA EL MODELO DE LA FIGURA (12), CON VELOCIDAD DE REDUCCION <math>V_1</math></i> .....	50
15	<i>TRAYECTORIAS DE LOS RAYOS Y DROMOCRONICAS DE MEDIOS ESTRATIFICADOS: A) PARA <math>V_1 &lt; V_2 &lt; V_3 &lt; V_4</math>; B) PARA <math>V_1 &lt; V_2 &gt; V_3 &lt; V_4</math> (<math>V_3</math> CAPA DE BAJA VELOCIDAD)</i> .....	52
16	<i>TRAYECTORIA DE UN RAYO EN UN MEDIO CUYA VELOCIDAD AUMENTA DE FORMA CONTINUA CON LA PROFUNDIDAD</i> .....	53
17	<i>TRAYECTORIA DE RAYOS EN UN MEDIO DE VELOCIDAD QUE AUMENTA CON LA PROFUNDIDAD, DROMOCRONICA (<math>t, x</math>) Y CURVA (<math>p, x</math>) CORRESPONDIENTES</i> .....	54
18	<i>RAYOS EN UN MEDIO ESFERICO DE VELOCIDAD CONSTANTE Y DROMOCRONICA (<math>t, \Delta</math>) CORRESPONDIENTE</i> .....	55
19	<i>TRAYECTORIA DE UN RAYO EN REGIONES ESFERICAS DE VELOCIDAD CONSTANTE (<math>V_1 &lt; V_2 &lt; V_3</math>)</i> .....	56
20	<i>TRAYECTORIA DE UN RAYO EN UN MEDIO ESFERICO DE VELOCIDAD QUE AUMENTA DE FORMA CONTINUA CON LA PROFUNDIDAD A LO LARGO DEL RADIO</i> .....	57
21	<i>ELEMENTOS DE LA TRAYECTORIA DE UN RAYO EN UN MEDIO ESFERICO DE VELOCIDAD VARIABLE</i> .....	58
22	<i>RAYOS, DROMOCRONICA Y DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD CON EL RADIO. APLICACION DE LA FORMULA DE HERGLOTZ-WIECHERT</i> .....	60
23	<i>FASES DE TERREMOTOS LEJANOS Y FASES DE TERREMOTOS PROXIMOS</i> .....	62
24	<i>LOCALIZACION DE EPICENTROS ENTRE LAS COORDENADAS GEOGRAFICAS 20.0 A 21.5 DE LATITUD NORTE Y 102.5 A 104.0 DE LONGITUD OESTE Y ESTACIONES SISMOLOGICAS TEMPORALES QUE SE INSTALARON EN LOS DIFERENTES ESTUDIOS DE LA C.F.E. EN EL PERIODO DE 1987 A 1993</i> .....	67
25	<i>AFALLAMIENTO DE DOS BLOQUES (A), ZONAS DE COMPRESION Y DILATACION (B)</i> .....	71



26	<i>ESQUEMA DE LA ESFERA FOCAL Y LOS RAYOS QUE LLEGAN A LA SUPERFICIE CON SU MOVIMIENTO CORRESPONDIENTE (COMPRESION Y DILATACION) . . . . .</i>	71
27	<i>CORRESPONDENCIA ENTRE EL MOVIMIENTO DE TRES TIPOS DE FALLAS Y SU REPRESENTACION EN LA ESFERA FOCAL (SECCION VERTICAL Y PROYECCION ESTEREOGRAFICA DEL HEMISFERIO INFERIOR) . . . . .</i>	72
28	<i>ESFERA FOCAL. (A) UN PLANO QUE ATRAVIESA A LA ESFERA. (B) LOS RAYOS SISMICOS QUE SALEN DE LA ESFERA. (C) LA REPRESENTACION DEL PLANO EN LA RED . . . . .</i>	74
29	<i>MECANISMO FOCAL. LA ZONA SOMBREADA CORRESPONDE A LA ZONA DE COMPRESIONES (POLARIDADES U) Y LA BLANCA A LAS DILATACIONES. C Y T SON LOS EJES DE MAXIMA COMPRESION Y MAXIMA TENSION RESPECTIVAMENTE . . . . .</i>	75
30	<i>MECANISMO FOCAL DE LOS EVENTOS DE LA ZONA SISMOGENETICA SUR DE CHAPALA . . . . .</i>	77
31	<i>MECANISMO FOCAL DE LOS EVENTOS DE LA ZONA SISMOGENETICA RIO SANTIAGO . . . . .</i>	78
32	<i>PLANO GEOLOGICO-ESTRUCTURAL SIMPLIFICADO . . . . .</i>	81
33	<i>ISOSISTA DEL MACROSISMO DEL 11 DE FEBRERO DE 1875 . . . . .</i>	82
34	<i>ISOSISTA DEL MACROSISMO DEL 7 DE JUNIO DE 1911 . . . . .</i>	83
35	<i>ESTRUCTURAS GEOLOGICAS ASOCIADAS CON LAS ZONAS SISMOGENETICAS EN BASE A LA DISTRIBUCION DE EPICENTROS Y SOLUCION DE SU MECANISMO FOCAL Y ACELERACIONES TEORICAS, SIN TOMAR EN CUENTA EL FACTOR DE SITIO . . . . .</i>	86
36	<i>ZONIFICACION SISMICA DE LA ZONA URBANA DE GUADALAJARA . . . . .</i>	87
37	<i>LOCALIZACION DE BLOQUES SISMICAMENTE ESTABLES QUE SE PROPONEN PARA EL DESARROLLO DE LA ZONA URBANA DE GUADALAJARA . . . . .</i>	88

## T A B L A S

	<b>Página</b>
1	<i>APENDICE A Y B. MACROSISMOS QUE HAN AFECTADO AL ESTADO DE JALISCO. DATOS DE 1568 A 1910</i> . . . . . 24
2	<i>REDES SISMOLOGICAS EN LOS ESTADOS DE JALISCO, NAYARIT Y COLIMA</i> . . . . . 35
3	<i>COORDENADAS GEOGRAFICAS Y PARAMETROS DE OPERACION DE LAS ESTACIONES SISMOLOGICAS</i> . . . . . 36
4	<i>ARCHIVO DE ENTRADA, DATOS DE CONTROL DEL PROGRAMA HYPO71</i> . . . . . 65
5	<i>ARCHIVO DE SALIDA, EVENTOS LOCALIZADOS CON EL PROGRAMA HYPO71</i> . . . . . 66
6	<i>ARCHIVO DE SALIDA DE LOS EVENTOS SISMICOS ASOCIADOS CON LA ZONA SIMOGENETICA RIO SANTIAGO</i> . . . . . 68
7	<i>ARCHIVO DE SALIDA DE LOS EVENTOS SISMICOS ASOCIADOS CON LA ZONA SIMOGENETICA CHAPALA</i> . . . . . 69
8	<i>CORRELACION ENTRE ESTRUCTURAS GEOLOGICAS Y MECANISMO FOCAL</i> . . . . . 84
9	<i>ALGUNOS MACROSISMOS HISTORICOS OCURRIDOS EN EL ESTADO DE JALISCO ASOCIADOS A LAS ZONAS SIMOGENETICAS</i> . . . . . 84

## P L A N O S

	<b>Ubicación</b>
PT-01-95	<i>PLANO GEOLOGICO PRELIMINAR DEL CENTRO-ESTE DE JALISCO</i> . . . . . En bolsa al final del texto

## **RESUMEN**

---

*Desde el inicio de operación de la red sísmológica de la Comisión Federal de Electricidad en el área de la cuenca alta del Río Santiago, ha sido evidente que esta región es sísmicamente activa, con base en los registros obtenidos en las diferentes estaciones sísmológicas instaladas desde el año de 1987.*

*El análisis de la actividad sísmica registrada instrumentalmente con la red sísmológica de C.F.E., permitió determinar zonas que se definieron como sismogénicas, es decir, zonas donde la ocurrencia de eventos sísmicos es recurrente.*

*En la vecindad de la zona urbana de Guadalajara, se determinaron dos zonas sismogénicas que son potencialmente peligrosas por sus características y distancia a que se encuentran de los asentamientos humanos.*

*Integrando los datos aportados por la red sísmológica de C.F.E., con las dimensiones geométricas de las estructuras geológicas involucradas en las zonas sismogénicas, determinadas mediante la localización de epicentros, se plantea la hipótesis de que algunos de los macrosismos percibidos en la ciudad de Guadalajara, tienen origen en esas zonas, reflexionando que si en el pasado han ocurrido dichos fenómenos, éstos pueden presentarse en cualquier tiempo futuro con resultados incalculables, debido a que la ciudad se ha extendido sin control urbano.*

*Se delimitaron zonas de mayor riesgo en el área urbana de la ciudad, considerando su cercanía a las estructuras geológicas y tipo de material donde están cimentadas las obras civiles, concluyendo que la ciudad debe crecer en bloques sísmicamente estables, que se localizan en la margen derecha del Río Santiago.*

## **I. INTRODUCCION**

---

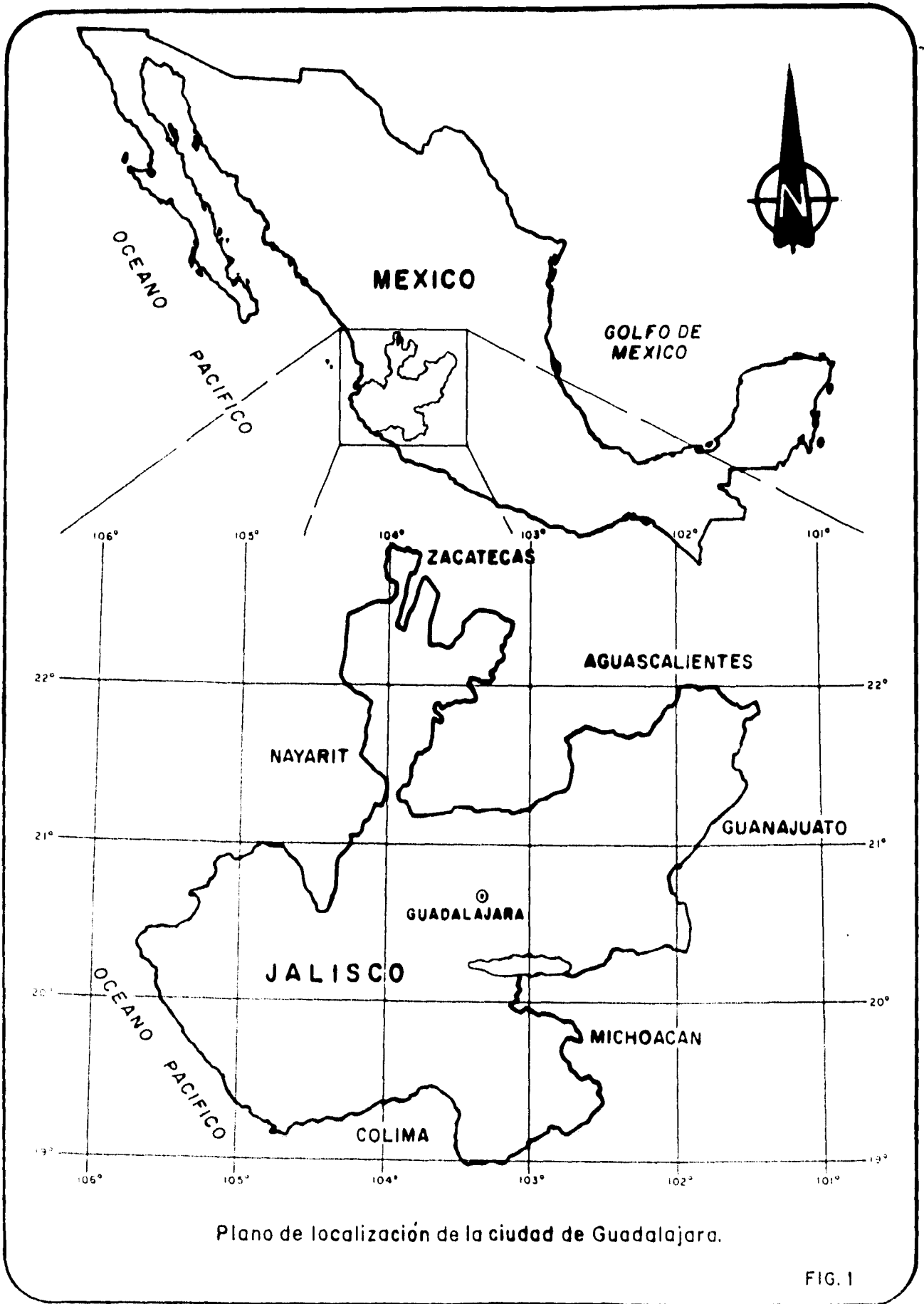
*Uno de los fenómenos naturales más espectaculares y peligrosos para la población civil, son los terremotos. Los efectos destructivos son familiares casi en todo el mundo, ocurren en general muy rápidamente, de tal manera, que el tiempo para tomar medidas de precaución es poco a partir de que se conoce que se ha generado; la incertidumbre en la estimación, tanto de las características de movimientos sísmicos, como del comportamiento y capacidad de las estructuras civiles ante ellos, ha hecho que en algunas ciudades se instituyan criterios de diseño que atenuen y resistan los daños, además de preservar la vida humana, aun en los casos más severos. En la presente tesis los estudios han sido encaminados a:*

- a) Conocer las características sismológicas de la región.*
- b) Definir el patrón sísmico de la zona.*
- c) Evaluar el potencial sísmico de las estructuras geológicas locales detectadas, con la finalidad de establecer la zonificación sísmica de Guadalajara, para proponer el desarrollo de un óptimo crecimiento urbano a futuro.*

*La zona urbana de la ciudad de Guadalajara, se localiza en el estado de Jalisco, que se encuentra situado en la porción media occidental del país, colindando al norte con los estados de Durango y Zacatecas, al noreste con Aguascalientes y San Luis Potosí, al este con Guanajuato, al sur con Michoacán y Colima, al oeste con el Océano Pacífico y al noroeste con Nayarit (Figura 1).*

*El contexto geológico regional donde se ubican las zonas sismogénicas estudiadas, es complejo desde el punto de vista tectónico y estructural.*

*Desde el punto de vista tectónico, existen tres macroestructuras convergentes, que corresponden al Graben Tepic-Chapala, Chapala-Colima y Chapala, de orientaciones noroeste, norte-sur y este-oeste, respectivamente. Estos lineamientos a su vez, aislan una microplaca tectónica que corresponde al bloque Jalisco.*



Plano de localización de la ciudad de Guadalajara.

FIG. 1

*Las fronteras del bloque Jalisco corresponden a tres tipos, uno de subducción en la costa (Singh et al 1985, Eissler and Mc Nally 1984 y Pardo and Suarez 1993), otro de tipo extensional en el Graben de Colima (Garduño et al 1991) y otro tensional con una componente de desplazamiento lateral a lo largo del Graben de Tepic (Barrier et al 1990, Nieto Obregón et al 1985, Allan 1991, Luhr et al 1985, Demant 1981 y Quintero et al 1992).*

*Los efectos de esta interacción tectónica en el área, se traducen en sismos de gran magnitud y profundos en el margen convergente, corrimientos laterales continuos con liberación de energía moderada y gran magnitud a lo largo de la margen de corrimiento y zona de expansión, con creación de corteza oceánica en el borde de Colima, como lo evidencian los catálogos sísmicos compilados.*

*El marco estructural regional del área, corresponde al traslape de dos provincias geológicas (arcos volcánicos anozoicos), la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y la Sierra Madre Occidental (SMO), la primera, con orientación noroeste-sureste de costa a costa del país y la segunda, norte-sur a partir de la porción noroccidental de la FVT y hasta el límite septentrional de México.*

*Relacionados a estas provincias geológicas y lineamientos tectónicos, existen patrones de discontinuidades corticales bien definidos en la región, que se pueden resumir en las siguientes familias por orden de importancia:*

<b>FAMILIA</b>	<b>ORIENTACION</b>
<i>I</i>	<i>N30°-40°W</i>
<i>II</i>	<i>N25°-35°E</i>
<i>III</i>	<i>N-S</i>
<i>IV</i>	<i>E-W</i>

*El curso de los ríos Verde y Santiago, son un ejemplo claro de la expresión estructural de las masas rocosas del área sujetas a estados de esfuerzos tectónicos, con un curso estructuralmente controlado, de direcciones NW y NE predominantemente, con un desarrollo general noroeste.*

*Con base en el análisis de la sismicidad registrada instrumentalmente con la red sismológica de la Comisión Federal de Electricidad, en la cuenca del Río Santiago se determinaron zonas que se definieron como sismogénicas, es decir, zonas donde la ocurrencia de eventos sísmicos es constante, se tiene conocimiento de dos zonas sismogénicas en el área conurbada de la ciudad de Guadalajara, potencialmente peligrosas por sus características y distancia a que se encuentran de los asentamientos humanos. Para ratificar lo antes dicho, se consultó el catálogo de la sismicidad histórica en el estado de Jalisco (Figueroa, 1982), donde se cuenta con datos desde el año de 1568 hasta el año de 1978.*

*Dada la importancia de salvaguardar la integridad de la población civil ante la acción de un sismo de magnitud moderada o grande, procedente de estructuras geológicas activas, en este trabajo se discuten los resultados obtenidos mediante el monitoreo sísmico y se confrontan con los eventos históricos reportados en el estudio sobre sismicidad en el estado de Jalisco, estableciendo una estimación en los valores de magnitud y aceleraciones que pueden generarse en las estructuras geológicas detectadas.*

*Para evaluar la magnitud máxima que pueden generar las estructuras geológicas asociadas a las zonas sismogénicas, se involucran los valores de la longitud, espesor y profundidad estimada de la falla.*

*Con base en los sismos contemporáneos registrados en el área estudiada, puede verse una clara correlación entre los eventos sísmicos, focos térmicos, estructuras orogénicas y la tectónica moderna de la región, la relación intrínseca que existe entre estos aspectos involucra procesos geodinámicos con actividad volcánica asociada.*

*Los estudios estadísticos de la microsismicidad pueden no ser espectaculares, pero diagnostican los sitios donde en algún tiempo, dadas las condiciones de acumulación de esfuerzos, se genere un gran sismo, o bien, uno moderado que se conjugue con otro fenómeno natural como la precipitación pluvial y produzca efectos de consecuencias mayores.*

*La profundidad de los eventos registrados en la zona sismogénica Río Santiago con la red de la Comisión Federal de Electricidad, es menor de 15 km, lo que sugiere que si ocurre un sismo de una magnitud moderada, es decir, entre 4.5 a 5.5 grados, los efectos generados por la energía liberada será suficiente para ocasionar daños a la población, razón por la cual es importante proponer que el crecimiento urbano se desarrolle sobre "bloques" sísmicamente estables.*

## **II. GEOLOGIA REGIONAL Y LOCAL**

---

### **II.1 ESTRATIGRAFIA**

*La columna litológica expuesta en la región estudiada, está formada por rocas volcánicas de composición ácida hasta básica pertenecientes a los Erazemas Mesozoico y Cenozoico. La base de la columna detectada en la región está representada por un paquete de rocas metavolcánicas asignadas tentativamente al Periodo Jurásico; las cuales a su vez subyacen bajo un potente apilamiento de sedimentos marinos interestratificados con productos volcánicos de composición intermedia a ácida, que componen el Sistema Cretácico de esta parte del país. Toda la secuencia anterior se halla coronada por rocas volcánicas terciarias de composición ácida a básica y finalmente clásticos continentales recientes, suelos residuales y depósitos de talud. La sucesión estratigráfica se expone a continuación en orden ascendente en edad, es decir, de la más antigua a la más reciente (Vázquez R., 1994), Plano PT-01-95:*

#### **Rocas Metamórficas**

Jurásico ?- Metavolcánico, J?-mv.

*Este nombre se emplea para describir una secuencia volcánica andesítica a basáltica afectada por metamorfismo regional de bajo grado; consisten de metabasitas de color gris claro a oscuro, localmente pardo grisáceo a verdoso, en ellas no se observan marcados cambios en textura, ya que conservan las de las rocas madre, desde afáníticas hasta porfídicas y brechoides, sin embargo son de alta densidad, muy duras y compactas, tampoco se observaron minerales de neoformación, dado que su cercanía con el complejo intrusivo de la sierra El Tigre, de naturaleza granítica, no alcanzó a recrystalizar las rocas puesto que éstas son de menor temperatura.*

*La unidad se encuentra expuesta en la porción sur-central del área mapeada, dentro de la cuenca del arroyo Contla, en las inmediaciones del poblado de Apatzingán, Jal.*



### ***Rocas Igneas Intrusivas***

#### ***Terciario Inferior - Intrusivo Acido, (Ti-ia).***

*Rocas de color gris rosado a pardusco que intemperiza en pardo claro; son de textura equigranular alotriomórfica y estructura masiva, compacta; mineralógicamente están compuestas por feldespato potásico, oligoclasa-andesina y cuarzo como minerales esenciales; hornblenda y muscovita como accesorios; clorita, sericita y óxidos de hierro como secundarios.*

*La roca fue observada como granito con variaciones a granodiorita y localmente tonalita; se encuentra afectando a rocas sedimentarias marinas del Cretácico, por lo que su edad le fue asignada como perteneciente al Terciario Inferior, aunque se le han reconocido edades desde el Cretácico Superior hasta el Terciario Inferior. Esta unidad aflora en la porción suroeste del área estudiada, al suroeste de los poblados de Chiquilistlán y San Martín Hidalgo, sobre el denominado Bloque Jalisco.*

#### ***Terciario Inferior - Intrusivo Básico, (Ti-ib).***

*Roca de textura holocristalina, inequigranular hipidiomórfica; de estructura compacta, masiva; de color gris oscuro a negro, ligeramente verdoso que intemperiza en pardo rojizo.*

*En muestra de mano, está formada por plagioclasa cálcica (labradorita), hornblenda verde, augita, clorita, epidota, calcita y óxidos de hierro; es una roca de alta densidad, de alta dureza y muy tenaz.*

*En el área estudiada, solo se reconoció un afloramiento de esta roca al NW de Chiquilistlán, donde se encuentra afectando a rocas sedimentarias marinas del Cretácico Inferior y Superior, por lo que se consideró como de edad Terciario Inferior.*

#### ***Terciario Inferior? -Intrusivo Intermedio, (Ti? ii).***

*Rocas de composición diorítica con variaciones a monzonítica, de textura holocristalina, equigranular alotriomórfica y estructura masiva, compacta; compuestas por plagioclasas sódico-cálcicas, hornblenda, aegirina-augita, clorita, epidota y óxidos de hierro, no contiene cuarzo normativo, razón por la cual se clasificó de esa forma.*

*Aflora al occidente del poblado La Vega y sur de Ahualulco del Mercado formando topografía de montaña con altos escarpes, se observó cortada por numerosos diques diabásicos de tendencia estructural errática e intrusionando a una secuencia de andesitas y brechas volcánicas de composición equivalente, a las cuales metamorfizó y un poco fuera del área mineralizó (Mina El Teochiteco).*

### ***Rocas Igneas Extrusivas***

***Terciario, Oligoceno-Mioceno; Andesita-Toba Andesítica, (Tom-ata).***

*Unidad constituida por una potente sucesión de coladas intercaladas con productos piroclásticos de andesita basáltica, tobas y brechas de composición equivalente con alternancias de tobas ácidas (ignimbríticas y pumicíticas) y esporádicos sedimentos lacustres; esta unidad aflora en la base y parte media del cañón del Río Santiago desde el área de la presa Colimilla, hasta aguas abajo de la presa Santa Rosa.*

*Se sabe por perforaciones profundas efectuadas con fines geotérmicos, que su espesor sobrepasa los 1200 m.*

***Terciario, Oligoceno-Mioceno; Volcánico Intermedio, (Tom-vi).***

*Esta unidad se compone principalmente por una potente serie de brechas volcánicas intermedias de color gris pardusco a violáceo y rojizo, que intemperizan en ocre, pardo oscuro y gris violáceo; están formadas por litoclastos angulosos y subangulosos de diversos tipos de rocas andesíticas contenidos en una matriz afanítica de carácter volcánico y composición andesítica bien litificada, aflora al sur y suroeste de la zona estudiada formando topografía de montaña escarpada; por posición estratigráfica es correlacionable con la unidad anterior, ya que cubre discordantemente a sedimentos marinos mesozoicos sobre el llamado Bloque Jalisco.*

***Terciario Mioceno-Volcánico Acido, (Tm-va).***

*Con este nombre se han agrupado las rocas que componen el equivalente litológico de la Sierra Madre Occidental dentro del área estudiada.*

*La sucesión volcánica ácida consta de riolitas, ignimbritas riolíticas y riodacíticas, tobas pumicíticas y vítreas, aglomerados, etc. dispuestos en horizontes mezclados, en sucesión no repetitiva desde delgados hasta masivos.*

*Las emisiones riolíticas con frecuencia se manifiestan en estructuras dómicas (cerros Pelón, El Chicharrón, Saavedra, etc.) que se encuentran expuestas al norte y noroeste de Guadalajara, sur de Magdalena, etc.*

*La unidad aflora en forma moderadamente extensa en la porción noroccidental del área, al sur de Ahuisculco y al sur de Cocula y Estipac, además del fondo del cañón del río Verde al norte de Acatic; forma cerros de topografía abrupta o laderas escarpadas en los cañones donde está expuesta.*

Terciario Plioceno-Volcánico Intermedio, (Tpl-vi).

*Roca de tipo pórvido andesítico de color pardo grisáceo a rosado, que intemperiza en ocre a pardo oscuro; de textura inequigranular alotriomórfica, porfídica; estructura compacta, masiva, compuesta por oligoclasa-andesina y escaso cuarzo anhedral intersticial como minerales esenciales; hornblenda como accesorio principal, óxidos de hierro y calcita como secundarios.*

*En el área estudiada, solamente se detectó esta unidad en los alrededores de Tlajomulco de Zúñiga, donde forma una estructura volcánica afectada por una falla normal de rumbo NW-SE, con el bloque desplazado hacia el SW.*

Terciario Plioceno-Cuaternario-Volcánico Básico, (TpQ-vb).

*Unidad compuesta por basalto y productos piroclásticos asociados (tobas de ceniza, lapilli, bombas, bloques, etc.). El basalto generalmente es de textura merocristalina y pilotaxítica, de estructura compacta a masiva y vesicular, está compuesto por plagioclasa principalmente cálcica, augita, olivino, iddingsita, calcita, clorita, sericita, magnetita y óxidos de hierro, contenidos en una matriz afanítica compuesta por plagioclasa y piroxena; en general forman coladas sucesivas de amplia distribución; los productos piroclásticos asociados, se originaron a partir de volcanes monogenéticos, conos cineríticos y volcanes escudo (Tequila). La unidad es la de mayor distribución espacial en el área estudiada y se encuentra expuesta en prácticamente todos los elementos tectónicos involucrados en el área cubierta por el estudio.*

*La edad le ha sido asignada en base a posición estratigráfica, dado que las manifestaciones volcánicas están asociadas al masivo vulcanismo que conforma la Faja Volcánica Transmexicana, de edad Plio-Pleistoceno principalmente.*

Cuaternario-Toba Vítreo, (Qtv).

*Estas rocas están constituidas por tobas de obsidiana y vitrófidos de color pardo oscuro a negro de aspecto fluidal, con variaciones a vidrios perlíticos y retínicos, localmente presentan devitrificación constituyendo riolitas esferulíticas.*

*Afloran en forma extensa al suroeste de Guadalajara, en el núcleo de la sierra La Primavera, donde forman las estructuras dómicas de los cerros Alto, El Colli, El Viejo y La Venta, además de la Mesa El Nejahuete.*

*Cubren discordantemente a derrames riolíticos y son cubiertos por arenas pumicíticas.*

#### Cuaternario-Vulcanoclástico, (Qvc).

*Con este nombre se designó una potente serie de arenas de diversa granulometría y gravillas de color blanco amarillento a crema y pardo claro, de composición pumicítica, dispuestas en horizontes de delgados hasta masivos, derivados de la actividad volcánica del complejo dómico de La Primavera, localmente le ha sido aplicado el nombre informal de Toba Tala.*

*Por perforaciones realizadas, se sabe que su espesor varía desde unos 3 m en la zona de Tonalá, hasta alrededor de 100 m en las inmediaciones de la sierra La Primavera; esta unidad posee una alta permeabilidad y constituye el principal acuífero de la ciudad de Guadalajara; estos materiales se encuentran poco compactados y sin cementante entre sus granos.*

#### **Rocas Sedimentarias**

##### Cretácico Inferior-Caliza, (Ki-c).

*Con este nombre, se agrupan los sedimentos carbonatados de facies de plataforma abierta del sur y oeste de Jalisco y del estado de Colima; en general son rocas de color gris claro a ligeramente pardusco y blanquecino por efectos de metamorfismo de bajo grado, que incluso deformaron y/o dolomitizaron éstas rocas; texturalmente, las rocas son desde boundstone de rudistas y bivalvos, hasta dolomía cristalina fina, la roca generalmente se encuentra dispuesta en bancos arrecifales masivos de tipo biostromal; algunos autores las han denominado como formaciones Tepalcatepec, Morena y Madrid, en base a su posición estratigráfica y contenido faunístico, como pertenecientes a los pisos Albiano- Cenomaniano, sin embargo se encontró un cefalópodo en el área de Tapalpa, identificado como Parahoplites, sp. que corresponde al Aptiano Superior, por lo que se considera que el rango estratigráfico de esta unidad es de mayor alcance (Vázquez, R., 1993).*

*Estas unidades afloran en forma moderadamente extensa al oeste del poblado de Chiquilistlán, donde forman estructuras anticlinales ligeramente recumbentes hacia el oriente, en las cercanías de Tonaya, donde el estilo de deformación es totalmente distinto, y se ha interpretado un sobrecorrimiento estructural para estas unidades, correlacionable con la estructura denominada Napa de Zapotiltic, aflora también en las inmediaciones de los poblados de El Cortijo y La Presa, cerca del límite sur del área donde se explota con fines comerciales para la fabricación de hidrato de cal.*

##### Cretácico Inferior-Caliza-Evaporita, (Ki-ce).

*Este nombre se le aplica a una sucesión compuesta por cuerpos de yeso y anhidrita que conforman un miembro inferior y otro superior compuesto por caliza y dolomía dispuestas en bancos arrecifales de carácter masivo, en algunas localidades, la unidad conjunta tiene un espesor de alrededor de 1300 m.*

*Por su contenido microfaunístico, Petróleos Mexicanos, la ha considerado como depositada en un ambiente de plataforma marginal para las evaporitas y de plataforma abierta para los carbonatos. La unidad aflora en forma relativamente extensa hacia el cuadrángulo suroeste del área, al suroeste de Chiquilistlán y oeste de Tapalpa, donde el desarrollo de dolinas y estructuras de colapso por disolución de evaporitas es extenso. Le ha sido aplicado el nombre de formación Morelos.*

*Cretácico Inferior-Caliza-Lutita, (Ki-cl).*

*Secuencia sedimentaria marina compuesta por una alternancia de carbonatos y terrígenos de grano fino; la caliza está dispuesta en bancos delgados de coloración gris oscura a negra, su color de intemperismo es gris claro, contienen fauna de cefalópodos mal conservados debido a lo intenso del fracturamiento que afecta la roca. La lutita es calcárea y localmente contiene terrígenos de grano medio (arenosa), son de color gris rojizo, muy fisiles y deleznales; afloran en forma restringida al suroeste del área, en los alrededores de Tapalpa, Jal., su edad le fue asignada por posición estratigráfica.*

*Cretácico Superior-Lutita-Arenisca, (Ks-la).*

*Secuencia de sedimentos terrígenos compuestos por una alternancia de lutita, arenisca, marga, caliza y algunos conglomerados; la sucesión fue depositada en un ambiente marino de plataforma marginal.*

*La textura predominante es la pelítica, propia de las lutitas que ocurren tanto compactas como fisiles, su color es negro a verdoso e intemperizan en pardo amarillento, se encuentran dispuestos en horizontes medianos con estructura laminar. La textura psamítica en las areniscas, que son de grano medio a grueso, de tipo litarenita feldespática, dispuestas en estratos delgados a medianos, la roca es de color gris claro a oscuro con tonos amarillentos y rosados. Los conglomerados son de textura rudácea, de tipo polimíctico, compuestos por litoclastos subredondeados y bien redondeados de caliza, cuarzo y rocas volcánicas, de moderada a bien cementados por calcita espática. Las calizas son de tipo bioespática a pelespática, de color gris pardusco, dispuestas en horizontes delgados.*

*La unidad se asigna en edad al Cretácico Superior en base a su contenido de gasterópodos y turritellas sp., aflora al oeste de Atemajac de Brizuela, norte y noroeste de Chiquilistlán y al sur de Tapalpa, sobre el elemento tectónico denominado Bloque Jalisco.*

Terciario Inferior - Brecha Sedimentaria, (Ti-bs).

*Roca compuesta por fragmentos angulosos y subangulosos de caliza, granito, andesita y riolita hasta de 20 cm  $\phi$ , contenidos en una matriz areno-limosa con cementante calcáreo, se encuentra dispuesta en estratos medianos a gruesos en parte mal definidos.*

*Aflora formando lomas al suroeste de la carta, en los alrededores de los poblados de Tonaya y Venustiano Carranza, Jal.*

Terciario Inferior - Arenisca-Toba, (Ti-at).

*Unidad constituida por una sucesión arrítmica de areniscas arcólicas de grano medio a grueso de color pardo claro a crema, que intemperizan en pardo rojizo y gris; se encuentra dispuesta en horizontes de delgados hasta gruesos; la matriz es de carácter tobáceo; aflora al sur-centro del área en pequeñas zonas, la mayoría de las cuales no son cartografiables, sin embargo, localmente se observa con ligero plegamiento.*

Terciario Mioceno - Lacustre, (Tm-l).

*Esta unidad está compuesta por una sucesión de limolitas, areniscas de grano fino y lutita tobácea que en conjunto son de color pardo claro, crema amarillento y gris pardusco que intemperizan en gris y pardo rojizo; dispuestos en horizontes laminares a delgados, son rocas de baja densidad y dureza, originadas por la obturación del drenaje natural del área, que formaron cuencas endorréicas relacionadas con las extensas emisiones riolíticas que conforman la Sierra Madre Occidental.*

*Afloran en el cañón del Río Santiago, hacia ambas márgenes del vaso de la Presa Santa Rosa, formando lomas de moderada elevación y en algunas partes cantiles principalmente en el área ubicada al norte del rancho La Villa de Cuerámuro.*

Terciario Plioceno - Lutita-Toba, (Tp-lt).

*Secuencia constituida por una alternancia de toba de color crema a pardo claro dispuesta en horizontes delgados a medianos con lutita tobácea de color amarillento a blanquecino; ambas intemperizan en ocre a pardo rojizo; ocasionalmente presentan intercalaciones de tobas piroclásticas de composición intermedia a básica; esta unidad se encuentra expuesta irregularmente al norte y noreste del lago de Chapala, donde no aflora su base y subyace a potentes emisiones de rocas volcánicas básicas del Plio-Cuaternario.*

Terciario Plioceno - Diatomita, (Tp-d).

*Esta unidad se encuentra formada por diatomita de color blanco a gris claro que intemperiza en gris pardusco, se encuentra dispuesta en estratos desde laminares hasta gruesos y en ocasiones masivos; es una roca de muy baja densidad, sin competencia mecánica que aflora al sur y suroeste de Atotonilco El Bajo, en las inmediaciones occidentales de la junta triple de Zacoalco, donde forma lomeríos de baja altitud y escasa pendiente topográfica y donde es explotada con fines industriales a gran escala.*

Cuaternario Lacustre, (Ql).

*Unidad constituida por limolitas, lutitas tobáceas y areniscas de grano fino con matriz de carácter tobáceo, que afloran en forma restringida por estar cubiertas por una delgada capa de material aluvial en el valle de Ahualulco del Mercado - La Vega; se encuentran poco consolidadas, son deleznable y sin competencia mecánica, estos sedimentos se acumularon probablemente como resultado de la obturación de la red de drenaje local por actividad volcánica reciente.*

**Suelos**

Cuaternario-Aluvial, (Qal).

*Estos materiales están constituidos por sedimentos granulares sueltos, sin compactación ni cementación; están compuestos por materiales clásticos de granulometría y litología heterogéneas, con predominio de las rocas fuente, generalmente son subredondeados a bien redondeados y acumulados en las planicies intermontanas o en los cauces fluviales, los cuales rellenan con espesores de diversa potencia.*

Cuaternario-Residual, (Qre).

*Este nombre se aplica a suelos de color generalmente rojizo y derivados de la descomposición in situ de rocas volcánicas básicas, su granulometría predominante es arcillosa, aunque también contienen limos y arenas. Se distribuyen ampliamente en la zona de Los Altos de Jalisco, sobre el Bloque de Mazamitla y el de Jalisco, además de la Mesa de Santa Rosa.*

Cuaternario-Talud, (Qt).

*El término se aplica a materiales aluviales y coluviales depositados al pie de fuertes pendientes y generados por desprendimientos provocados por efectos de la gravedad; en general su granulometría es variable desde arcillas hasta bloques, acumulados en forma caótica y con espesores variables, se acumulan como depósitos de pie de monte y no se encuentran compactados ni cementados.*

### **III. TECTONICA**

---

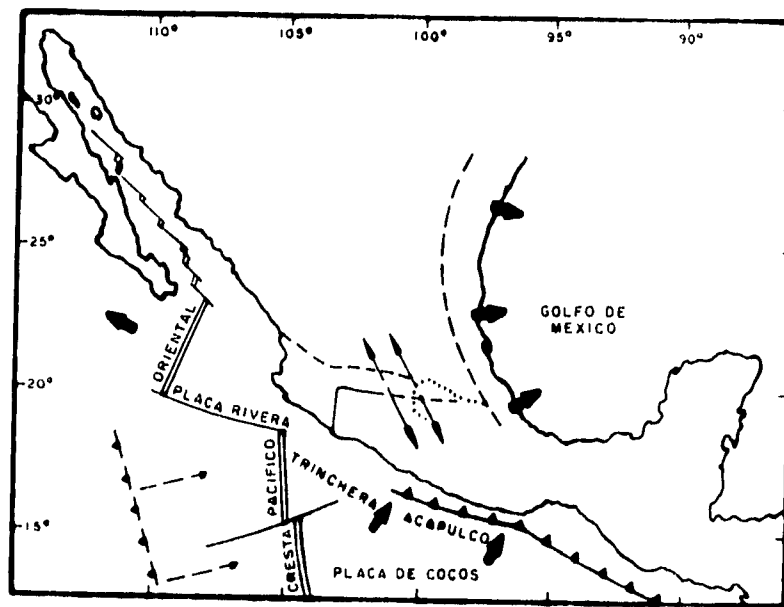
*La región comprendida por los estados de Nayarit y Jalisco, forma parte de la Placa Tectónica Norteamericana, en esta región se han reconocido varios elementos tectónicos importantes en su porción continental, como son: El Geobloque Jalisco, la Sierra Madre Occidental y el bloque de Mazamitla, como elementos positivos; los que están limitados por fosas de naturaleza distensiva donde ha imperado una intensa actividad volcánica, estas estructuras son conocidas como los grabens de Tepic-Chapala, Chapala-Colima y Chapala, además de algunas otras menos importantes, entre las que figuran: las fosetas de Mascota, El Grullo y Tuxpan; las megaestructuras principales, confluyen en una zona denominada en este reporte como de Zacoalco, se ubica dentro del Cinturón Volcánico Mexicano, en donde se ha localizado actividad sísmica tipo enjambre registrada en la red sísmológica de la cuenca del Río Santiago de la CFE (Figura 2).*

*La tectónica que rige en la región a nivel de placas involucra las placas Pacífico, Cocos y Rivera, las que están divididas por varios rasgos estructurales definidos por diferentes relaciones dinámicas; la Dorsal del Pacífico Oriental, de carácter divergente; las fracturas de Rivera y Tamayo, definidas como fallas transformes y límites conservativos y el sistema del Golfo de California; además de la importante zona de subducción denominada Trinchera Mesoamericana como límite convergente (Figura 3).*

*Las investigaciones tectónicas que se han realizado en continente (Luhr, et al., 1985; Allan, 1986; Barrier, et al., 1990; Allan, et al., 1991) y en el mar (Bourgeois, et al., 1988 a 1988b), indican que está ocurriendo una reorganización geodinámica regional. Este modelo propone la separación del bloque Jalisco de la masa principal de la porción continental de la Placa Norteamericana, siguiendo una trayectoria similar hacia el NW de la Península de Baja California, la cual inició su migración desde hace aproximadamente cuatro millones de años (Larson, et al., 1968), según la longitud ha tenido una velocidad promedio del orden de 12 cm/año.*

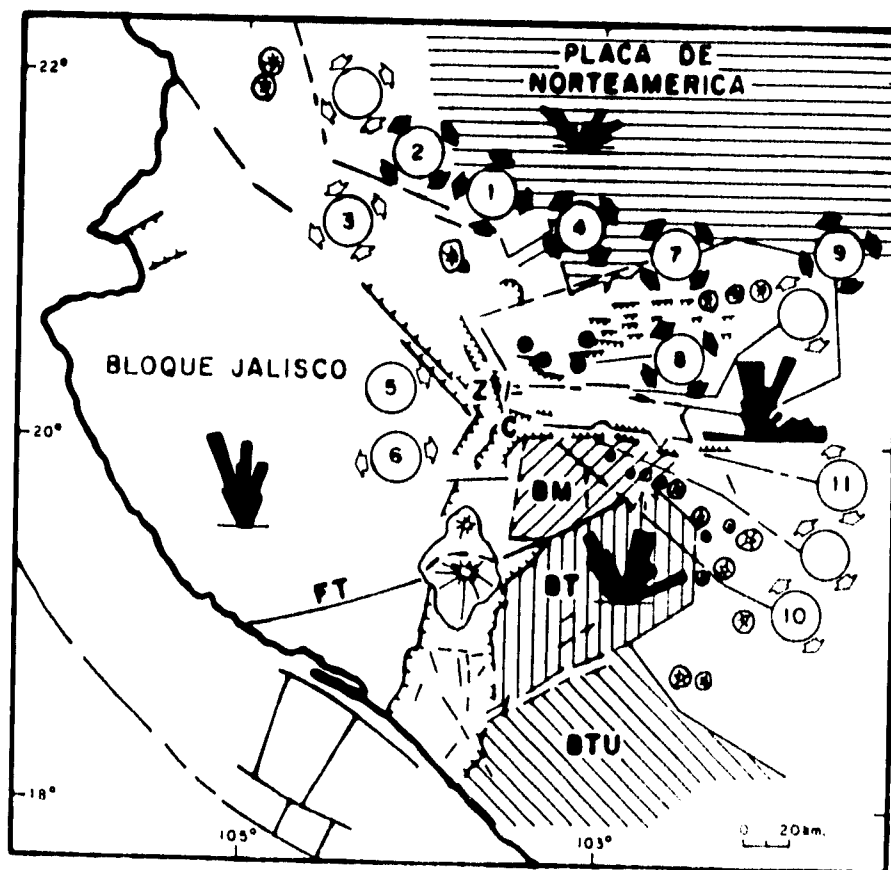






Marco tectónico regional.

FIG. 3



Z = Depresión de Zacoalco    C = Depresión de Citlala    FT = Fallo Tamozula  
 BM = Bloque Mazamitla    BT = Bloque Tuxpan    BTU = Bloque Tumbiscatio

Principales familias de fallas.

FIG. 4

*El análisis de las diferentes familias de fallas ubicadas a lo largo de la región, ha mostrado que la distensión se lleva a cabo siguiendo una dirección perpendicular a la tendencia general de los grabens involucrados (Barrier, et al., 1990). Lo anterior implica un movimiento relativo del Geobloque Jalisco en relación con el continente, y la existencia de una frontera al NW de la zona de extensión Tepic-Zacoalco.*

*Se han acuñado varias interpretaciones en relación con la localización, vector del desplazamiento, velocidad del mismo y el significado geodinámico de la frontera septentrional del Geobloque Jalisco (Nieto Obregón, et al., 1985; Allan, 1986; Allan, et al., 1991). Esta frontera ha sido designada en la literatura con el nombre de Graben Tepic-Chapala (Demant, 1981; Nieto-Obregón, et al, 1985); sin embargo Allan, et al, 1991 la designan como Rift de Tepic-Zacoalco.*

*El lineamiento estructural que controla el curso del Río Santiago, se ha presentado como la traza de esa frontera. Evidencias de una deformación debida a desplazamiento lateral, fueron señaladas en el sector de la presa de Santa Rosa por Nieto-Obregón, et al, 1985, además de Allan, et al, 1991. Aunque las mediciones geodésicas realizadas muestran que no existe actualmente una deformación de dirección NE-SW, debida a la inestabilidad de bloques de roca en la margen izquierda, donde podrían existir desplazamientos a lo largo de discontinuidades preexistentes (Ibarra-Maycotte, 1984).*

*Los análisis estratigráficos y microtectónicos efectuados por Quintero et al, 1992, señalan que un régimen de compresión lateral (sigma 1 y sigma 3, de componente principal horizontal), afectó a la serie ignimbrítica de 17 m.a., terminó en el Mioceno Tardío, aspecto que discrepa con lo señalado en el sentido de que el Río Santiago está situado en una zona de falla activa de desplazamiento lateral dextral.*

*En el área de la presa Santa Rosa, existe un cono volcánico de 0.37 y 0.9 m.a. según Quintero, et al., 1992 respectivamente, el cual no ha sido afectado por esfuerzos cortantes laterales ni tensionales y el escarpe de más de 100 m que corta a ese cono de escoria basáltica y que domina el lecho del río, corresponde al trabajo mecánico de erosión fluvial y no a un escarpe originado por fallamiento normal, por lo anterior, se infiere que la frontera septentrional activa del Geobloque Jalisco debe encontrarse más hacia el sur, probablemente a lo largo del lineamiento formado por las cadenas de volcanes activos entre Tepic y Guadalajara.*

*Investigaciones paleomagnéticas indican que los batolitos del mesozoico localizados en la margen occidental de Norteamérica, originalmente se encontraban al sur de sus localidades presentes (M.E. Beck, Jr. et al, 1981), explicando que el transporte tectónico de esta migración tiene dos contribuciones, el tipo California, en el cual los batolitos son separados de la masa continental a través de fallas transformes, y el tipo Sunda, en el cual un fragmento de litósfera incluyendo a los batolitos, es trasladado a lo largo del margen continental en respuesta a procesos de subducción oblicua. Como por ejemplo la corteza oceánica de la Placa de Cocos subduce hacia el SE bajo la Placa Norteamericana con un ángulo de 9 grados (Eissler y Mc. Nally, 1984), sin embargo, para la zona situada entre las fracturas de Rivera y Tamayo hasta la actualidad no*

*está explicado su mecanismo, como tampoco está bien comprendido si existe relación entre la Dorsal del Pacífico Oriental y el Sistema Transforme Meso Golfo de California, es poco probable que la Trinchera Mesoamericana continúe al norte de Bahía de Banderas, ya que las Islas Mariás de composición siálica presentan un alineamiento al NW, acorde con la deriva de la Península de Baja California como remanentes que se desplazan a menor velocidad que la masa principal de la península.*

*La morfología de la Placa Rivera que subduce bajo el Bloque Jalisco la estudió Pardo M. and Suárez G., 1993 mediante localización de hipocentros de microtemblores y sismos con magnitudes  $M_b > 4.5$  relocalizados. La zona de Wadati-Benioff la infirieron de estos datos indicando que inicia con una inmersión de  $10^\circ$  a una profundidad de 20 km y se incrementa gradualmente a una inclinación de  $50^\circ$  debajo de una profundidad de 40 km.*

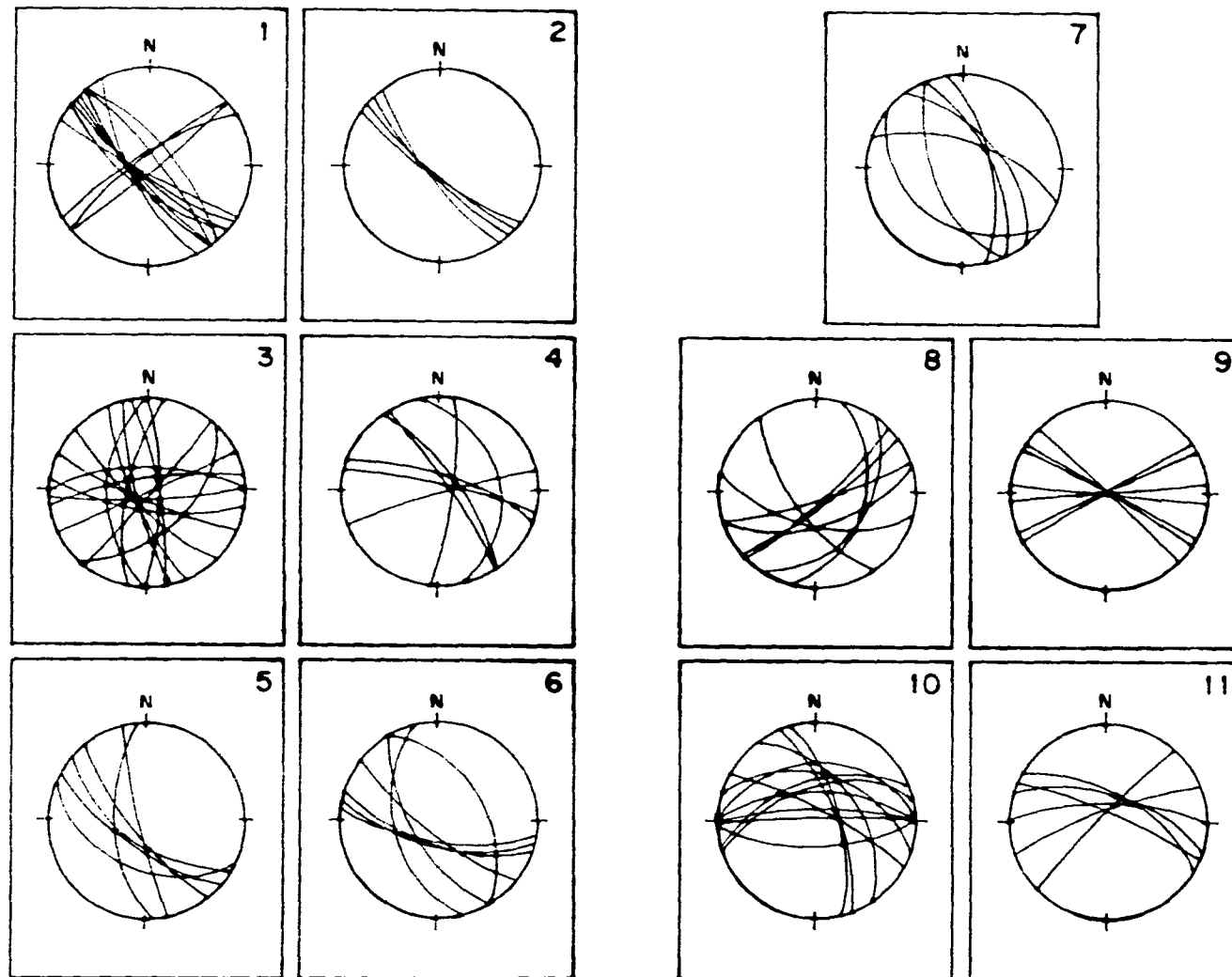
*En la frontera entre la Placa Tectónica de Rivera y el Bloque Jalisco, se localiza el macrosismo más grande registrado instrumentalmente en el país (Singh, et al., 1985; Eissler and Mc Nally, 1984).*

*En la porción continental no ha sido establecida la génesis del Eje Neovolcánico Transmexicano (el cual se estableció anteriormente), está caracterizado por la presencia de uno de los pocos puntos triples conocidos en el mundo, delimitado por el Graben de Tepic-Chapala al NW-SE como una zona de transcurrencia, caracterizada por fallamiento de tipo extensional a lo largo de estructuras NW-SE. Esto concuerda con la presencia de lavas alcalinas, así como productos calcoalcalinos, expuestos en esta área (Garduño, et al, 1991).*

*La prolongación de este graben hacia el Pacífico no es clara, aunque pudiera ser la prolongación del Sistema Transforme del Golfo de California. En el Río Santiago se realizaron investigaciones microtectónicas, donde se observaron dos familias de fallas afectando rocas del Mioceno; las fallas de orientación NE  $40-75^\circ$  SW con inclinación mayor de 70 grados y las fallas de orientación NW  $20^\circ$  a  $25^\circ$  SE con inclinaciones menores de 30 grados, encontrando que el 80% de las fallas transcurrentes son de tipo lateral derecho, y el 20% restante de tipo lateral izquierdo, los tensores de esfuerzos muestran que las dos familias se caracterizan porque los principales esfuerzos máximos ( $\sigma_1$ ) y mínimos ( $\sigma_3$ ) son horizontales (Garduño, et al, 1991), Figuras 4 y 5.*

*La actividad volcánica que ha tenido lugar en la parte sur del estado de Nayarit, ha sido intensa durante el Plioceno y Cuaternario. Hay actividad volcánica en la actualidad. Los sismos que afectaron a los poblados de San Pedro Lagunillas y Las Guásimas los días 4 y 16 de septiembre de 1987, estuvieron asociados, al parecer, con movimientos de magma justo bajo el domo riolítico Los Ocotes, ubicado entre ambos poblados y que a la vez constituyen el aparato volcánico más reciente de la zona (D. Castillo y De la Cruz, M., 1992).*

*En el mes de febrero de 1992 se registró un enjambre sísmico en la estación sismológica Colomo, localizada en el estado de Nayarit, el cual coincidió con la repentina muerte de peces en la laguna de Santa María del Oro, asociándose con emisiones geotérmicas o volcánicas*



Proyecciones de Schmidt, hemisferio inferior de planos de falla  
medidos en los sitios nombrados en la figura No. 4.

FIG. 5

*(Delgado V. et al, 1992). En el periodo de marzo a noviembre de 1994, se localizaron alrededor de 50 eventos sísmicos en un radio de 5 km con centro en la laguna de Santa María del Oro, con profundidades menores a 19 km.*

*Durante los primeros meses de 1994 se han registrado en todas las estaciones sismológicas de la cuenca del Río Santiago varios tipos de eventos sísmicos, el más notorio, tanto por su amplitud como por su duración es el clasificado por su forma como tipo b, de baja frecuencia (J. Lermo, et al, 1993) que pudiera estar asociado con emisiones de gases volcánicos; (González, et al, 1992 y Havskov, et al, 1983) proponen un posible mecanismo como resultado de las intrusiones magmáticas y liberación de gases a una profundidad de 2 km. Este tipo de evento no genera onda transversal y se le ubica por los arribos de la onda longitudinal.*

*A 20 km al oeste del Volcán Ceboruco (único aparato con actividad histórica en la región), se encuentra el Domo San Pedro, que es el edificio volcánico ácido más importante de la zona, con 700 m de altura, cuya base de 4 km está ligeramente elongada en sentido NW-SE.*

*Los rasgos lineales interpretados a partir de imágenes de satélite, reflejan dos sistemas estructurales para esta zona y sus alrededores: NW-SE y NE-SW.*

*Al sistema NW-SE pertenece el graben Tepic-Chapala, que es la estructura tectónica más importante en esta región y se encuentra colmado por rocas volcánicas del Plio-Cuaternario y Reciente, cuyos centros de emisión, grandes y pequeños, se caracterizan por presentarse alineados paralelamente en dicha dirección NW-SE, lo cual refleja zonas de debilidad cortical, sugiriendo un efectivo control tectónico en el subsuelo. Ejemplos de estos lineamientos se observan a partir de la Caldera de la Primavera, igualmente en los volcanes de Tequila, Ceboruco, Tepetitlic, Sangangüey, San Juan, así como en la zona de estudio.*

*El fracturamiento NE-SW conjugado al anterior, se refleja principalmente en los alineamientos de cauces de ríos, el cual no es tan conspicuo como el NW-SE, sin embargo, en imágenes de satélite sus rasgos son evidentes y numerosos. Este fracturamiento se corrobora con los datos aereomagnéticos interpretados de la carta magnética Hoja Tepic, que proporciona información acerca de la distribución y carácter de rocas cubiertas por materiales o rocas no magnéticas, así como estructuras, fracturas y lineamientos profundos ocultos, en base al contraste de propiedades magnéticas de los materiales del subsuelo.*

*El graben Chapala tiene una orientación E-W, todas las rocas presentan una inclinación hacia el norte o sur con ángulos que varían de 15 a 40 grados. En el sector oeste se localiza la falla normal de Zacoalco y la depresión de Citala. Relacionando las altitudes del Lago de Chapala (1520 m), con respecto a la de Citala (1360 m) y la depresión de Zacoalco (1350 m), y la inclinación promedio (5 a 7 grados en Citala y Zacoalco y 15 a 40 grados en Chapala), muestra que sólo la parte oeste de este sector fue activa en tiempos recientes, que se corrobora con la aportación de los datos sísmicos registrados en la red sismológica de la cuenca del Río Santiago. La tectónica reciente del oeste del graben de Chapala, está asociada con esfuerzos N-S sigma 3 (Garduño, et al, 1991).*

*El graben de Colima está limitado por un tren de fallas normales a lo largo de una orientación NNE extendiéndose al norte del Océano Pacífico, los bloques fallados fueron inclinados hacia el este y oeste con una inclinación superior a los 20 grados, el graben ha sido afectado por algunas fallas transversas como la de Tamazula. El graben se ensancha en correspondencia de esta falla que cruza bajo el Volcán de Colima y separa el bloque de Mazamitla del de Tuxpan, donde resalta el alineamiento de manantiales termales a lo largo de la falla; más al sur otra falla NE-SW separa el bloque de Tuxpan del de Tumbiscatio.*

*El carácter alcalino dominante del vulcanismo Cuaternario del graben de Colima, es coherente con el proceso de apertura de un rift.*

*Las estructuras que tienen influencia en la zona urbana de Guadalajara, se identificaron a través de fotografías aéreas 1:50 000, (Informe Inédito, C.F.E.) .*

*La zona urbana de la ciudad de Guadalajara, es por tanto susceptible a la acción de fenómenos tectónicos regionales, locales y de tipo volcánico, dada la evolución tectónica del Bloque Jalisco, sin embargo, el estudio de las características sísmicas de la región permite la construcción de cualquier obra civil, siempre y cuando sean considerados tales requerimientos.*

## **IV. SISMICIDAD**

---

### **IV.1 SISMICIDAD HISTORICA**

*Se analiza en este escrito la información instrumental del año de 1900 a 1993, recopilada principalmente del Catálogo Sísmico Nacional y del Catálogo Sísmico de Comisión Federal de Electricidad, entre las coordenadas geográficas 18° 00' a 22° 00' de Latitud Norte y 103° 00' a 106° 00' de Longitud Oeste (Figura 6), donde puede verse que la distribución de los epicentros dentro del continente está asociada principalmente con las fosas tectónicas Tepic-Chapala, Chapala-Colima, Chapala y fosetas Tuxpan, El Grullo y Mascota, en la parte marina la principal zona sísmica actual es la conocida como circumpacífica, la cual se considera primordialmente de carácter tectónico, concretamente la zona de Benioff.*

*También se analizan los macrosismos que han afectado al estado de Jalisco, desde el año de 1568 al año de 1910, tomados de la publicación "Sismicidad en Jalisco" de Figueroa, 1982, donde describe las intensidades registradas y las magnitudes tentativas, así como las observaciones de los daños causados en diversas poblaciones considerando que los macrosismos que han afectado la zona media y norte del estado de Jalisco en el periodo de 1568 a 1910, se originaron en los grabens Tepic-Chapala y Chapala; de acuerdo con las poblaciones afectadas según relatos de la Tabla No. 1, Apéndice A y concuerdan con las zonas sismogénicas determinadas mediante el monitoreo sísmico de la red de Comisión Federal de Electricidad (Aguilar, V., et al, 1990), Figura 7.*

*El análisis estadístico de la microsismicidad registrada instrumentalmente con la red sísmológica de la Comisión Federal de Electricidad, ha permitido determinar zonas que se definieron como sismogénicas (Aguilar, V., et al, 1990), desde el inicio de operación de esta red ha sido evidente que en el área estudiada, la porción continental más activa se concentra en los grabens de Colima y Chapala, como lo demuestra la actividad sísmica en la porción de Zacoalco donde se han registrado eventos hasta de 3.8 grados de magnitud de coda con la característica de ser tipo enjambre. Asimismo, al observar la Tabla No. 1 donde se tiene la crónica de los eventos ocurridos desde 1568 a 1910, también se evidencia que la zona continental donde han tenido su origen los macrosismos que han afectado al estado de Jalisco, se concentran en los grabens de Colima y Chapala como los narrados del 8 de mayo de 1912 con una magnitud de 6.0 grados,*



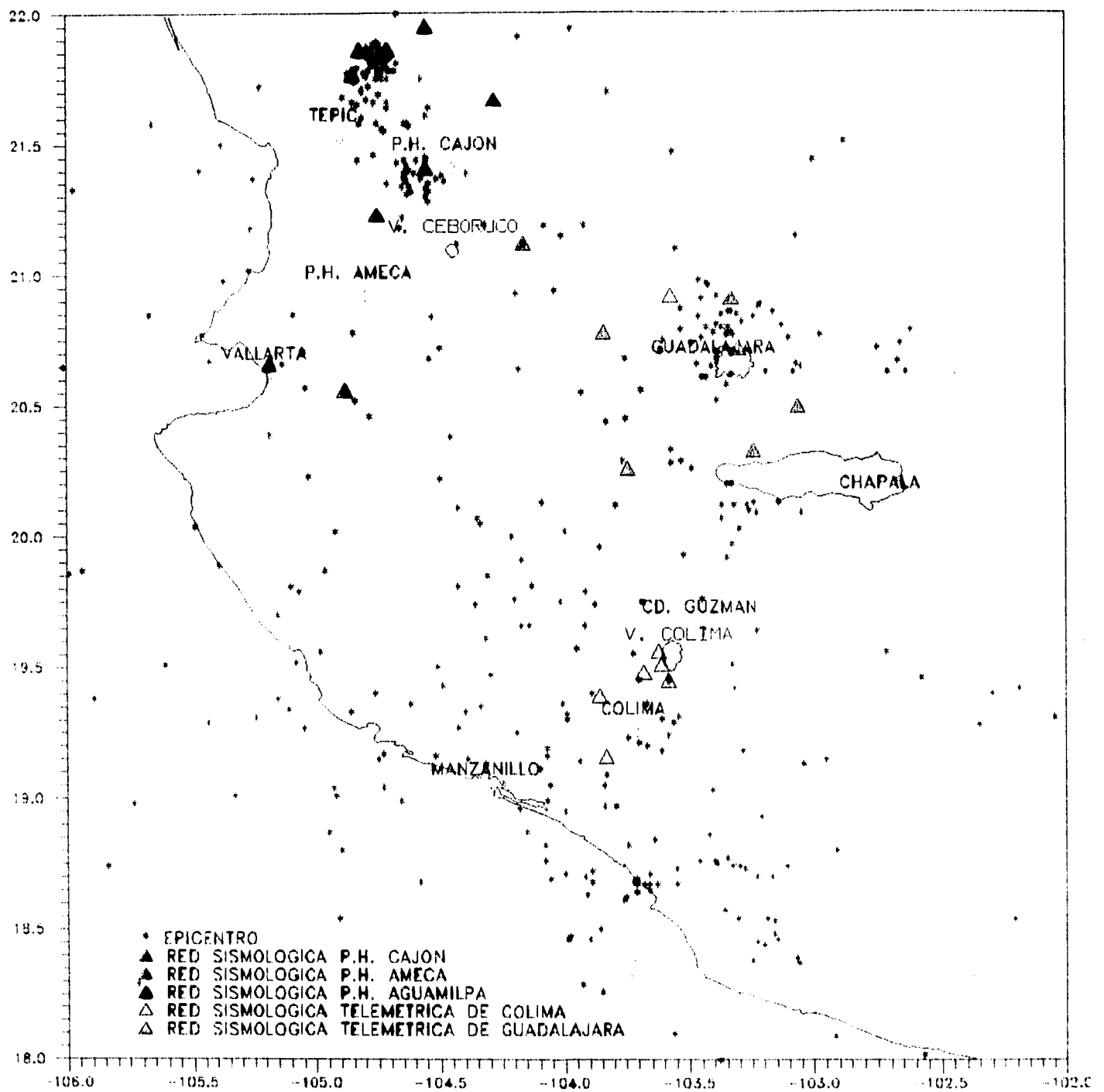


FIG 6.-LOCALIZACION DE EPICENTROS Y ESTACIONES SISMICAS DE LOS ESTADOS DE JALISCO, NAYARIT Y COLIMA, REGISTRADOS CON LA RED DE C.F.E. Y COLIMA EN EL PERIODO DE 1900 A 1993

TABLA No. 1.- APENDICE A. MACROSISMOS QUE HAN AFECTADO AL ESTADO DE JALISCO. DATOS DE 1568 A 1910.

Día	Mes	Año	Magnitud tentativamente considerada	Intensidad M M 1931	Observaciones
27	12	1568	7 a 7.6	IX-X°	Destructor. En Cocula, Jal. cayó la iglesia pereciendo su fundador, el padre Fr. Esteban de la Fuente Ovejuna. 60 indios y con ellos el padre Hernando Pobre; muertos en Zacoalco.
15	04	1611			El volcán de Colima arrojó cenizas a más de 40 leguas
26 31	08	1611	5.5	?	Muy fuertes movimientos en Jalisco y Colima
16	08	1711	7.5	IX-10	Gran destrucción en Amacueca y Sayula. Dañadas Zapotlán, Guadalajara y otras poblaciones. Varios muertos.
25 26	06	1739	5.6 a 6	VII-VIII	Muy fuerte en Guadalajara; otras poblaciones de Jalisco, Colima y México.
?	?	1749 1750	7	IX	Fortísimos temblores sentidos desde Guadalajara a Colima causaron muerte de muchas personas y destrucción de poblaciones entre ellas: Sayula, Amacueca y Zapotlán el Grande.
10	03	1771	6.5	VIII-IX	Muy fuerte en Guadalajara, Colima y estados de Guerrero, Michoacán y México.
?	?	1777	6	VIII	Fuerte temblor en Jalisco que causó grandes daños a los edificios.
?	?	1805	5.6	VII	Fuerte en Guadalajara.
25	03	1806	7.5	X	Causó desgracias en Zapotlán el Grande donde cayó la iglesia, al tiempo que se estaba predicando un sermón, causando la muerte de muchas personas. Fue fuerte en Guadalajara, Sayula, Lagos, La Barca, Zapotlanejo y muchos otros lugares.
22	03	1878	6.5	VIII	En San Cristóbal y Zapotlán varias casas dañadas, grietas en el suelo, cambios en cantidad y color del agua de dos manantiales. Fuerte en Guadalajara.
02	03	1896	6.5	VIII-IX	Sayula: la iglesia parroquial, el teatro Alfaro y la cárcel pública dañados. En San Gabriel, Jal., la parroquia y el seminario quedaron con grandes cuarteaduras. En Colima, algunos daños en los edificios.
19	01	1900	7.8	X	Fuerte en Guadalajara y en otras partes de Jalisco, como Sayula, San Gabriel y Mascota. Hubo algunos derrumbes y en Ejulla brotó un manantial. En Colima los edificios sufrieron mucho daño, especialmente la catedral.
23	09	1905	5.5-6	VII	Muy fuerte en Amulán donde algunas casas quedaron cuarteadas. Se extendió a Guadalajara, Ocotlán, Ameca, Cocula, Zapotlán, Mascota, Juchitlán, Atenguillo y otras poblaciones de Jalisco.
23	10	1909	5.6	VI	Sentido en Guadalajara sin consecuencias.

REFERENCIA

A.1 Orozco y Berra "Sismología. Efemérides Sísmicas Mexicanas", Memoria Sociedad Alzate, Tomos I y II, México (1887-1889).

APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PROXIMOS A SUS LIMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

Zona I	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof. km	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W			
Coordenadas	<4	4-4.9	5-6	6.1-7	>7.1													
18.70-20.00 N 101.50-105.60 W																		
<b>Región A</b> 18.70-20.00 N 101.50-102.00 W																		
								19	01	22	03	43	56	18.92	101.72	70	4.0	Jilotlán de los Dolores VI. Tecalitlán V. Menores intensidades en otras poblaciones de esta región en Jalisco. Daños en Michoacán. Daños en Michoacán.
							07	08	25	07	47	48	19.00	102.00	100	6.8		
							24	01	33	15	39	55	18.92	101.72	70	6.2		
							20	06	42	10	02	44	18.92	101.72	70	6.7		
	1			3			24	07	51	17	45	41	19.50	101.50		3.5		
							19	02	54	23	36	06	18.92	101.72	70	6.0		
							13	02	60	00	28	27	18.92	101.72	100	4.9		
							22	11	69	20	11	55	18.92	101.72	100	4.6		
							26	09	65	20	36	20	18.92	101.72	100	4.8		
			2				19	10	65	05	12	40	18.92	101.72	100	4.5		
		8					22	01	66	07	47	45	18.92	101.72	100	4.1		
							03	07	73	03	59	36	19.10	101.83	125	5.6		
							08	12	74	02	49	26	18.83	101.63		4.0		
<b>Suma:</b>	1	8	2	3		14	5											
<b>Región B</b> 18.70-20.00 N 102.00-103.00 W								20	01	20	09	35	03	19.08	102.58	100	6.0	Jilotlán de los Dolores y Tecalitlán VI. Tamacula de Gordiano V. Limites de Jalisco y Michoacán.
							19	01	27	01	17	41	19.38	102.88	100	6.0		
							10	10	33	13	35	35	19.08	102.58		5.3		
							27	05	34	18	49	52	19.08	102.58		6.0		
							05	04	52	02	15	26	19.65	102.18		4.0		
							11	04	52	14	32	42	19.65	102.18		4.2		
							18	07	52	23	02	05	19.05	102.58	100	5.0		
							18	07	52	23	01	50	19.00	102.50		4.0		
							29	06	55	07	50	57	19.08	102.58	100	4.0		

APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PRÓXIMOS A SUS LIMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

Zona I	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof. km	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W			
Coordenadas	< 4	4-4.9	5-6	6.1-7	> 7.1													
Región B 18.70-20.00 N 102.00-103.00 W								13	12	57	04	05	51	19.65	102.18		4.6	
								13	12	57	06	19	11	19.65	102.18		4.2	
								25	12	57	08	47	07	19.08	102.58	100	4.8	
								22	04	59	00	22	16	19.08	102.58		4.0	
								16	09	62	03	05	43	19.38	102.88	100	5.7	
								06	06	65	05	07	57	19.00	102.90	146	4.1	
								27	02	66	20	44	59	18.90	102.60	93	5.8	
								27	03	66	05	30	08	19.10	103.00	101	3.5	
								21	11	66	11	12	03	19.08	102.58	100	5.0	
								04	11	67	11	58	58	19.22	102.67		4.1	
								10	03	68	23	36	05	18.80	102.10	121	4.0	
								11	02	72	14	50	20	19.13	102.31	145	4.0	
								16	07	77	09	40	13	19.25	102.34		3.5	
								21	07	77	06	11	04	18.84	102.60		5.0	
								09	03	78	04	15	11	19.34	103.00		4.0	
	Suma:	2	14	9			25	12										
Región C 18.70-20.00 N 103.00-104.00 W								07	06	11	10	26	48	19.67	103.65	100	8.0	Macrosismo del 7 de junio de 1911; destructor en Cd. Guzmán, Jal. uno de los más fuertes de la República. Daños materiales de consideración no solo en la región epicentral sino en otros lugares. En México, D.F. hubo 45 muertos y 22 heridos. Los rieles del tranvía de la línea "Azucares", se levantaron, la vía de los trenes eléctricos sufrió fuerte flexión frente a la estación del ferrocarril central. A este macrosismo la gente le llamó "temblor de Madero". Es el más fuerte registrado instrumentalmente hasta la fecha.
								29	02	28	13	53	09	19.25	103.10		4.5	

APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PROXIMOS A SUS LIMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

Zona I	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof. km	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W			
Coordenadas	<4	4-4.9	5-6	6.1-7	>7.1													
Región C 18.70-20.00 N 103.01-104.00 W					2			18	06	32	10	13	17	18.77	103.50	100	7.8	<p>Muy fuerte en Jalisco, particularmente en Cd. Guzmán. Daños en Manzanillo donde penetró el mar. Destructor en Coahuayana y otras poblaciones de Michoacán.</p> <p>Muy fuerte en Jalisco. Destructor en Colima. Un tsunami invadió a Cuautlán. Inundaciones en Tecomán, Manzanillo y otros lugares de la costa. Daños en Zaponitlán, Cd. Guzmán y otras poblaciones de Jalisco. En Guadalajara VI°. Muy fuerte en Colima y Michoacán.</p> <p>Sentido en poblaciones de Jalisco, limítrofes con Colima, lo mismo que en Michoacán.</p> <p>Muy fuerte en Jalisco. Daños en Aguililla, Michoacán y Colima.</p>
							18	06	32	22	00	25	19.05	103.90	50	7.0		
							17	11	32	06	02	58	19.50	103.75		6.2		
							10	07	33	03	22	04	19.00	103.50		6.2		
				4			04	01	39	12	57	59	19.25	103.10		4.0		
							15	04	41	19	10	58	18.78	103.32		7.0		
							11	06	41	03	13	01	19.67	103.65	100	4.0		
							03	02	49	01	34	36	19.05	103.90		4.0		
							23	12	56	22	05	30	19.05	103.90		4.0		
							18	03	61	15	27	54	18.77	103.50	100	4.2		
							21	03	64	15	08	12	18.77	103.52	100	5.2		
							28	10	64	01	35	13	18.77	103.50		4.6		
							03	04	66	19	28	34	18.70	103.10	96	4.1		
							04	04	66	18	23	30	18.77	103.50	100	4.7		
							08	08	66	23	10	47	19.05	103.90		5.1		
							31	08	66	02	44	13	19.05	103.90		4.1		
							08	02	68	15	21	28	19.12	103.42	100	4.1		
							30	03	68	06	04	33	19.18	103.50		4.4		
							26	04	68	17	48	02	18.70	103.30	65	5.5		
							08	08	68	23	07	51	18.74	103.46	33	4.2		
							26	01	71	18	58	59	18.78	103.05	86	4.9		
							31	01	73	22	25	52	18.94	103.38	33	4.6		
							10	02	73	11	53	27	18.89	103.55	33	5.4		
							23	05	73	11	27	17	18.77	103.16	33	4.2		
				5			29	07	73	16	16	28	19.58	103.58	130	5.1		
																		<p>Moderado en Jalisco y en el estado de Colima.</p> <p>Ligero en Jalisco, Tecomán y otros lugares del estado de Colima.</p> <p>Ligero en Jalisco, fuerte en todo el estado de Colima.</p> <p>Ligero en Jalisco, fuerte en Colima y Michoacán.</p>

APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PROXIMOS A SUS LIMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

Zona I	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof. km	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W			
Coordenadas	<4	4-4.9	5-6	6.1-7	>7.1													
Región C 18.70-20.00 N 103.01-104.00 W								14	06	74	15	20	10	19.13	103.24	153	4.1	Ligero en Cd. Guzmán, Jal.
							12	07	75	13	49	35	19.82	103.82	4.0			
		19					11	01	77	18	09	50	19.64	103.77	4.0			
							26	05	77	08	44	05	18.77	103.23	4.0			
Suma:		19	5	4	2		30	19										
Región D 18.70-20.00 N 104.00-105.00 W					1			30	04	21	11	03	41	19.70	104.28		7.8	<p>Daños en Aullán de Navarro, Unión de Tula y Tuxcacuesco. Fuerte en Ameca, Zacoalco y otras poblaciones de Jalisco.</p> <p>Fuerte en las poblaciones de Jalisco limítrofes con Colima. Daños en Manzanillo.</p> <p>Fuerte en las costas de Jalisco, Michoacán y Colima. Fuerte en Jalisco. Muy fuerte en Michoacán. Daños en Manzanillo.</p> <p>En Guadalajara V°. Mayor intensidad en poblaciones de Jalisco limítrofes con el estado de Colima donde fue destructor tanto en la ciudad de Colima como en Manzanillo.</p> <p>Sentido en Jalisco y Michoacán. Muy fuerte en el estado de Colima.</p> <p>Guadalajara VI°. Fuerte en otros lugares de Jalisco y Michoacán. Muy fuerte en Manzanillo y otros lugares de la costa e interior del estado.</p> <p>Temacuito y otros lugares de la costa de Jalisco con algunos daños.</p> <p>Purificación y Aullán VI°. Guadalajara V°. Fuerte en el estado de Colima.</p>
							15	10	28	02	08	15	19.70	104.28		5.5		
							03	06	32	17	39	54	18.90	104.50		6.0		
							03	06	32	14	57	45	18.83	104.72		4.0		
							03	06	32	16	29	30	19.05	104.62		4.0		
							05	06	32	09	04	37	19.50	105.00		6.3		
							22	06	32	13	00	38	18.90	104.50		7.0		
							25	07	32	09	14	04	18.90	104.50		6.9		
							08	09	32	14	13	10	18.90	104.50		6.2		
							07	12	32	16	23	33	18.90	104.50		6.2		
							14	02	33	09	37	40	19.30	104.92		4.0		
							09	04	33	03	58	17	19.50	105.00		6.5		

APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PRÓXIMOS A SUS LÍMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

Zona I	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof. km	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W			
Coordenadas	<4	4-4.9	5-6	6.1-7	>7.1													
<b>Región D</b>																		
18.70-20.00 N 104.00-105.00 W				7														
								29	11	33	05	49	35	19.40	104.58		6.0	Costas de Jalisco y Colima.
								14	06	34	21	30	33	18.83	104.77		4.0	
								20	03	35	10	52	39	19.40	104.58		5.5	
								29	06	35	06	50	06	19.70	104.28		6.9	Región Tuxcacuesco. Aulán.
								22	02	37	01	19	59	19.05	104.90		5.0	Tequisquiltán, Jalisco.
								07	04	38	08	57	55	19.35	104.05		4.0	
								20	05	38	19	35	10	19.35	104.05		4.0	
								13	07	39	03	37	44	18.83	104.77		4.0	
								07	07	40	05	32	12	19.82	104.45		4.0	
								10	06	41	10	42	04	18.90	104.58		5.0	
								05	07	41	07	01	57	19.35	104.07		4.0	
								16	12	55	05	30	43	19.40	104.58		5.0	
								07	02	60	03	22	21	18.90	104.50		4.2	
								09	02	60	09	27	59	18.90	104.50		4.9	
								22	03	60	13	19	52	19.50	105.00	150	5.6	
								01	08	61	14	30	39	18.90	104.50		5.1	
								27	02	64	11	35	29	18.90	104.50		5.5	
								25	05	64	02	22	56	19.80	104.80	33	3.4	
								03	07	64	05	05	24	18.85	104.50		4.6	
								03	07	64	05	05	33	19.40	104.30		4.4	
								04	11	64	05	46	23	19.40	104.58		4.2	
								27	10	65	07	00	35	18.70	104.80	33	3.9	
								10	08	66	12	56	53	19.35	104.07		4.1	
	3							09	09	66	15	14	52	20.00	104.90	33	3.7	
								30	04	69	15	04	35	19.10	104.30	36	4.6	
								08	05	69	07	48	30	19.40	104.40	33	4.1	
								04	11	69	02	45	49	19.30	104.90	33	4.1	
								07	09	70	18	08	29	19.67	104.82	33	4.8	Próximo a las costas de Jalisco.
								05	02	71	05	29	02	18.92	104.95	33	4.7	Próximo costas de Jalisco.
								02	01	72	03	03	46	18.92	104.13	33	4.6	Fuerte costas de Jalisco
								09	03	73	06	04	58	18.85	104.84	33	4.5	Ligero en Jalisco. Fuente en
								10	05	73	17	50	53	19.01	104.76	33	5.0	Manzanillo.
								18	10	73	10	49	37	19.38	104.97	45	6.0	
								19	10	73	00	49	44	19.34	104.91	33	5.0	Ligero en Jalisco. Fuente en
								23	07	74	15	28	34	19.52	104.29	109	4.1	Manzanillo.
																		Fuerte en costas de Colima. Sendido en Jalisco.
																		Costas de Colima. Sendido en Jalisco.

APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PRÓXIMOS A SUS LÍMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

Zona I	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof. km	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W			
Coordenadas	<4	4-4.9	5-6	6.1-7	>7.1													
<b>Región D</b> 18.70-20.00 N 104.00-105.00 W		25	15					31	07	76	10	22	55	19.63	104.05	40	5.0	Próximo a Aulán, Jalisco.
							12	01	77	23	25	42	19.45	104.60	4.0			
							21	01	78	22	40	13	20.00	104.43	4.0			
							25	03	78	12	56	01	18.80	104.28	5.7			
<b>Suma:</b>	3	25	15	7	1	51	35											
<b>Región E</b> 18.70-20.00 N 105.00-105.60 W					1			21	02	31	22	51	39	19.88	105.28		6.5	Daños en Jalisco, Colima y Michoacán. Muy fuerte en Ahualulco, San Marcos, Acahán, Abreguillo, San Martín Hidalgo, Zacualco, Talpa, Tequila, Guachimango, Cd. Guzmán. Los rieles del ferrocarril rotos entre Guadalajara y Colima. Algunos timales mostraron cuarteaduras. Derrumbes en las montañas. En Guadalajara cruzieron los edificios. Se escucharon ruidos subterráneos. Los postes se balancearon en Atemajac, Zapopan, San Andrés, Tlaquepaque, Tonalá. Hubo derrumbes y cuarteaduras lo mismo que en Islas Marias. Muy fuerte en las costas de Jalisco, Colima y Michoacán.  Costas de Jalisco y Colima.  Fuerte en poblaciones de la costa de Jalisco y Colima.
							03	06	32	10	38	20	19.27	105.30	7.8			
							13	12	33	21	25	10	19.02	105.08	6.5			
							14	12	33	07	17	43	19.02	105.08	6.0			
							02	01	37	22	35	11	19.02	105.08	5.5			
							26	12	43	04	58	50	18.93	105.28	4.0			
							02	10	48	16	00	03	19.27	105.30	5.8			
							25	12	49	22	27	07	19.02	105.08	6.0			
							24	11	50	03	12	36	19.02	105.08	5.5			
							15	02	51	05	20	24	19.02	105.08	5.3			



APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PROXIMOS A SUS LIMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

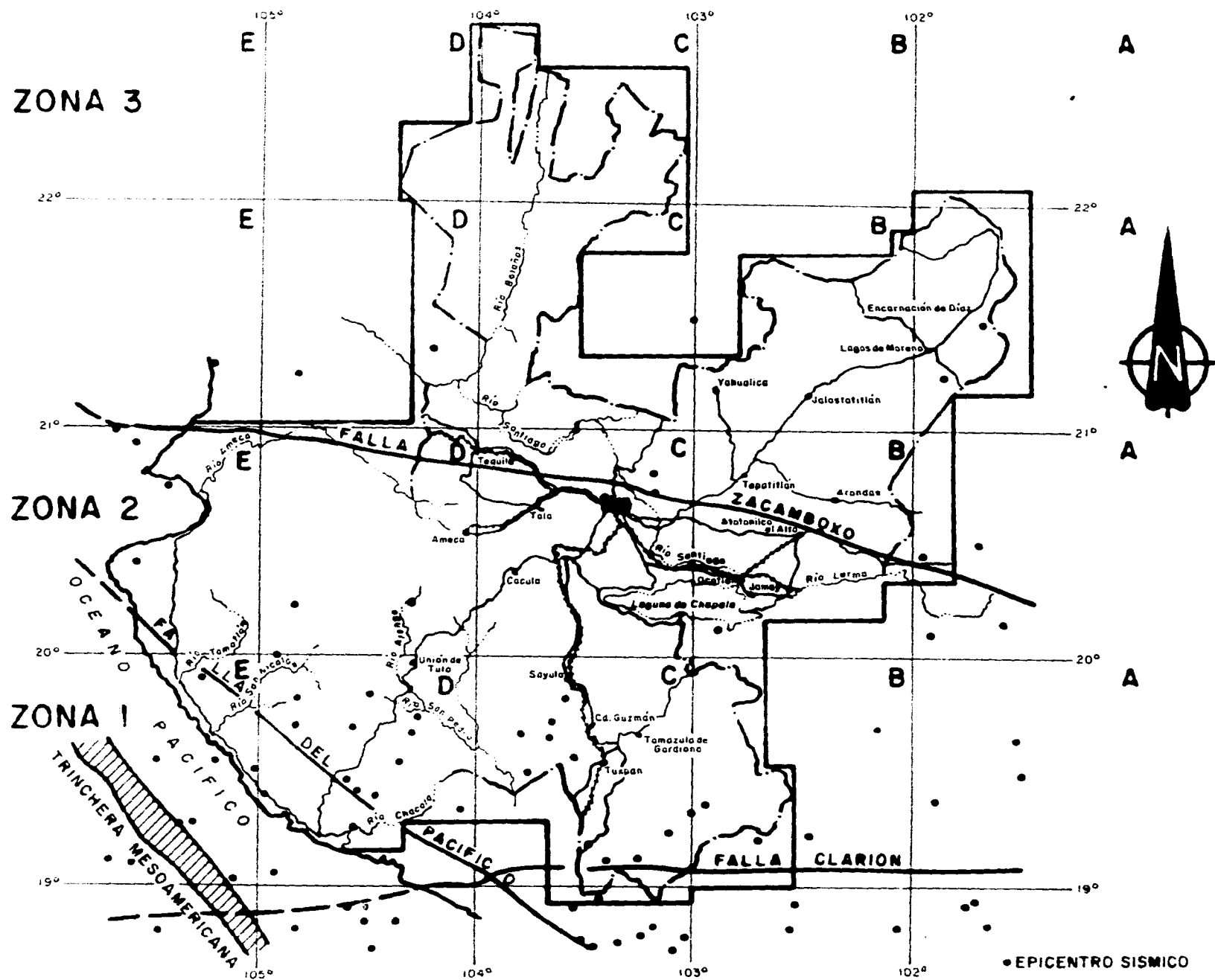
Zona I	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof.	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W	km		
Coordenadas	<4	4-4.9	5-6	6.1-7	>7.1													
<b>Región E</b> 18.70-20.00 N 105.00-105.60 W																		
								06	08	51	16	55	46	19.55	105.48		5.5	
								06	05	52	22	26	45	18.70	105.20		4.0	
								28	07	52	02	29	31	19.02	105.08		4.0	
								17	05	53	16	40	57	19.02	105.08		5.5	
								17	02	54	03	42	30	19.02	105.08		5.2	
								25	05	55	15	11	10	19.88	105.28		4.5	
								15	10	59	04	22	34	19.02	105.08		5.3	
								27	03	60	20	15	43	19.50	105.50	60	6.1	Fuerte en costas de Jalisco. En Purificación IV°.
				3				17	04	60	07	25	59	19.02	105.08		4.7	
								04	06	60	02	26	53	19.55	105.48		6.4	
								16	07	60	16	48	24	19.27	105.30		4.2	
								23	07	61	00	05	32	19.27	105.30		5.1	
								27	09	61	01	55	31	19.02	105.08		4.9	
								20	06	64	19	35	27	18.80	105.40		4.5	
								04	12	64	07	33	32	18.70	105.10	33	4.0	
		12						02	01	65	19	23	54	19.02	105.08	33	4.0	
								23	04	68	09	08	10	19.18	105.33		4.1	
			13					23	07	74	15	28	12	19.55	105.48		5.0	
								21	10	76	04	59	06	19.55	105.15		6.0	Sentido en Colima y Jalisco. Sentido en Guadalajara IV°. Manzanillo V°.
<b>Suma:</b>		12	13	3	1	29	11											
<b>Z O N A II</b>																		
<b>Región A</b> 20.00-21.00 N 101.50-105.60 W																		
								10	12	26	20	24	56	20.42	101.93		4.0	
								08	12	53	12	51	10	20.50	101.67		4.0	
			1					08	12	53	13	06	25	20.50	101.67		5.2	
		3						19	08	57	19	01	17	20.14	101.58		4.0	
<b>Suma:</b>		3	1			4	3											

APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PROXIMOS A SUS LIMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

Zona II	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof. km	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W			
Coordenadas	<4	4-4.9	5-6	6.1-7	>7.1													
Región B 20.00-21.00 N 102.00-103.00 W		1						06	03	31	09	10	51	20.12	102.88		4.0	
Suma:		1				1	1											
Región C 20.00-21.00 N 103.00-104.00 W								08	05	12	-	-	-	20.82	103.38		6.0	Muy fuerte en Guadalajara. Ixtlahuacán del Río. En Guadalajara en esta fecha se inició un notable enjambre de movimientos locales. Causaron daños en catedral, iglesia del Carmen, Instituto Colón, teatro principal. Muchos derrumbes en casas humildes en los suburbios. Entre los más fuertes el temblor del 9 de mayo acompañado de ruidos subterráneos, provocó cuarteaduras en la Escuela Normal de Profesores, en la penitenciaria, en el Teatro Degollado, Palacio de Gobierno, centro mercantil, Casino Jalisciense, oficina telegráfica y Hotel Francis. Se habló de grietas en el suelo, derrumbes en Tlajomulco. Se obstruyeron vías de ferrocarril. Los movimientos siguieron sintiéndose y alarmando a la población de Guadalajara hasta el 15 de mayo de 1912.
		2						12 31	05 10	66 76	11 12	39 20	56 13	20.77 20.85	103.38 103.16		4.0 4.0	
Suma:		2	1			3	3											
Región D 20.00-21.00 N 104.00-105.00 W			1					15 11	09 11	34 76	06 14	58 05	21 06	20.23 20.24	104.85 104.27		5.0 4.5	Tecolotlán V°, Guadalajara IV°.
Suma:		1	1			2	2											

APENDICE B. RELACION DE MOVIMIENTOS INSTRUMENTALMENTE REGISTRADOS, DE 1911 A JUNIO DE 1979, CUYOS FOCOS SE LOCALIZARON EN JALISCO, PROXIMOS A SUS LIMITES CON OTROS ESTADOS Y FRENTE A SUS COSTAS.

Zona II	Número de temblores y grados en magnitudes escala Richter					Total		Fecha			Hora TMG			Coordenadas		Prof.	Mag	Observaciones
						Sismo	Foco	Día	Mes	Año	h	m	s	N	W	km		
Coordenadas	< 4	4-4.9	5-6	6.1-7	> 7.1													
Región E 20.00-21.00 N 105.00-105.60 W			1		1			30	11	34	20	64	60	20.12	105.07		7.0	Muy fuerte en las costas de Jalisco. Sentido en Puerto Vallarta, Mascota y Autlán, Guadalajara V*.
								27	09	50	03	37	05	20.70	105.38		5.2	
								08	03	64	19	12	25	20.92	105.57		4.4	
								08	03	64	19	44	44	20.92	105.57		4.5	
			3					26	09	65	19	28	27	20.40	105.60	33	4.0	
Suma:		3	1		1	5	4											
Z O N A III																		
Región A 21.00-22.10 N 101.50-102.00 W								17	01	47	12	24	55	21.25	101.83		4.0	Daños materiales en Lagos de Moreno, Jalisco
			2					23	11	58	05	13	12	21.47	101.67		4.8	
Suma:		2				2	2											



Carta sísmica del Estado de Jalisco. Datos reunidos hasta Junio de 1979 (J. Figueroa A, I de I, UNAM)

FIG. 7

cuya fuente se asocia a la zona sismogénica Río Santiago; el macrosismo del 7 de junio de 1911 de 8.0 grados, el de mayor magnitud registrado en esta área, cuyas coordenadas geográficas son 19.667N y 103.650W, se ubicó en el graben de Colima, donde en julio de 1990 se registró en la red de C.F.E. un enjambre donde el evento principal tuvo una magnitud de coda de 3.8 grados en la zona sismogénica Chapala y probablemente tengan el mismo origen. En la Tabla No. 1, Apéndice B, se listan los eventos sísmicos tomados de Figueroa, 1982, donde se pueden ver sus características principales como la fecha de ocurrencia, coordenadas geográficas, magnitud y profundidad.

#### IV.2 INSTRUMENTACION SISMICA

Dentro de la zona de estudio, se cuenta con varias redes sismológicas que en conjunto conforman una red sismológica regional capaz de localizar cualquier evento sísmico con magnitud mayor o igual a 2.5 grados de magnitud de coda (Delgado, V., et al, 1992), ver Figura 6.

En la Tabla No. 2, se describe el nombre con que se conoce cada red, así como la cantidad de estaciones sismológicas y el estado donde se ubica.

TABLA No. 2.- REDES SISMOLOGICAS EN LOS ESTADOS DE JALISCO, NAYARIT Y COLIMA.		
RED SISMOLOGICA	No. DE ESTACIONES	ESTADO
Cuenca alta del Río Santiago	2	Jal.
Cuenca baja del Río Santiago	4	Jal.
Cuenca de los ríos Ameca y Mascota	3	Jal.-Nav.
Telemétrica de Colima	6	Colima
Red P.H. Cajón	3	Jal.-Nav.

Todas las redes están equipadas con sismógrafos MEQ-800 y sensores L4-C, de componente vertical con registro en papel ahumado y tinta, la red del P.H. Cajón cuenta con equipo digital con sensor de aceleración.

En la Tabla No. 3, se muestran las coordenadas geográficas y los parámetros de operación de las estaciones sismológicas con que localizaron los epicentros que se discuten en la presente tesis, la localización gráfica de estas estaciones (ver Figura 24) y las que actualmente se encuentran funcionando pueden verse en el plano de localización de epicentros y estaciones sísmicas (ver Figura 6).

<b>TABLA No. 3.- COORDENADAS GEOGRAFICAS Y PARAMETROS DE OPERACION DE LAS ESTACIONES SISMOLOGICAS</b>						
<b>ESTACION</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>PARAMETROS DE OPERACION</b>			
			<b>Ganancia</b>	<b>Filtro I.</b>	<b>Filtro II</b>	<b>Máx. Deflex.</b>
AGP	20 44.17	103 22.13	78	5	10	25
CAP	20 33.04	103 34.36	78	5	10	25
COL	18 35.43	103 42.14	72	5	10	25
SUS	21 10.36	103 26.00	78	5	10	25
PLN	20 43.24	103 18.32	72	5	10	25
AHN	20 57.17	103 33.59	78	5	10	25
TAO	21 10.08	103 33.08	72	5	10	25

### **IV.3 TEORIA DE LA PROPAGACION DE LAS ONDAS SISMICAS**

#### **Mecánica de un medio elástico. Ondas internas**

*El estudio de la propagación de las ondas producidas por los terremotos, nos descubre la estructura del interior de la Tierra, las regiones que la forman y la distribución en ellas de la densidad y las constantes elásticas. La ocurrencia de los terremotos, su distribución espacio-temporal, mecanismo y liberación de energía, ponen de manifiesto los procesos dinámicos activos en la Tierra.*

*Los fundamentos teóricos de la sismología, se basan en los principios de la mecánica de medios continuos y más en concreto en la teoría de la elasticidad.*

#### **Ecuaciones de un medio elástico**

*La energía producida por un terremoto se propaga en el interior de la Tierra en todas las direcciones en forma de ondas elásticas. La segunda ley de Newton de la mecánica para un medio continuo se puede expresar de acuerdo con Euler considerando un medio elástico infinito isotrópico y homogéneo y usando la notación de subíndices:*

$$\int_v \mathbf{F} dV + \int_s \mathbf{T} dS = \frac{d}{dt} \int_v \rho \mathbf{u} dV$$

(1)

$$\int_v F_i dV + \int_s T_i dS = \frac{d}{dt} \int_v \rho u_i dV$$

donde  $\mathbf{F}$  son las fuerzas por unidad de volumen,  $\mathbf{T}$  el vector de esfuerzos por elemento de superficie  $dS$  cuya normal es  $\mathbf{v}$  (Fig. 8). El vector  $\mathbf{T}$  se puede expresar en función del tensor de esfuerzos  $\tau_{ij}$  de acuerdo con la ecuación de Cauchy:

$$T_i = \tau_{ij} v_j \quad (2)$$

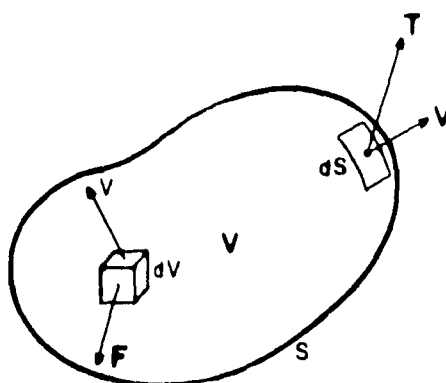


Fig. 8.- Fuerzas y esfuerzos actuando en un medio elástico  $V$  limitado por una superficie  $S$ .

Sustituyendo en la ecuación (1), aplicando el teorema de Gauss y considerando la densidad constante, resulta en forma diferencial:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i = \rho \frac{dv_i}{dt} = \rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

Para expresar esta ecuación en términos de los desplazamientos  $u_i$ , se tiene que conocer primero la relación entre esfuerzos  $\tau_{ij}$  y deformaciones  $e_{ij}$  para el medio que se trate, llamada ecuación constitutiva. A su vez, el tensor  $e_{ij}$  para deformaciones infinitesimales viene dado por:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Para un medio elástico perfecto, la ley de Hooke establece que las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos y en forma tensorial es:

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad (5)$$

La constante de proporcionalidad es un tensor de cuarto rango que en el caso general, debido a la simetría de  $\tau_{ij}$  y  $e_{ij}$ , tienen 21 elementos distintos. Si el medio es isótropo, sólo dos son independientes y la relación se reduce a:

$$\tau_{ij} = \delta_{ij} \lambda e_{kk} + 2\mu e_{ij} \quad (6)$$

donde  $\lambda$  y  $\mu$  son los coeficientes de Lamé, que para el caso homogéneo son constantes. En esta ecuación  $\mu$  es el módulo de cizalla o rigidez que relaciona los esfuerzos y deformaciones cortantes o de cizalla, por ejemplo, para la dirección  $x_1$  sobre una superficie normal a  $x_2$ :

$$\mu = \frac{\tau_{12}}{2e_{12}} \quad (7)$$

$\lambda$  está relacionado con  $K$ , el coeficiente volumétrico o de compresibilidad, por la relación:

$$\lambda = K - \frac{2}{3}\mu \quad (8)$$

$K$  viene dado por la presión dividida por el cambio de volumen que produce por unidad de volumen:

$$K = \frac{-P}{\theta} \quad (9)$$

donde  $\theta = \frac{\delta V}{V}$ , la dilatación cúbica, igual a la divergencia de  $u$

$$\theta = e_{11} + e_{22} + e_{33} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \quad (10)$$



La relación entre las elongaciones y contracciones en dos direcciones perpendiculares viene dada por el cociente de Poisson  $\sigma = -e_{22}/e_{11}$ . En función de  $\lambda$  y  $\mu$  resulta:

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (11)$$

Para los materiales de la Tierra aproximadamente  $\sigma = 0,25$ , lo que implica  $\lambda = \mu$ . Sustituyendo (6) y (4) en la ecuación (3) y poniendo  $F = 0$ , es decir, en ausencia de fuerzas exteriores, se obtiene la ecuación de Navier en función de los desplazamientos

$$(\lambda + \mu) \nabla (\nabla u) + \mu \nabla^2 u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (12)$$

y en notación tensorial

$$(\lambda + \mu) u_{kkl} + \mu u_{ikk} = \rho \ddot{u}_l \quad (12)$$

donde se ha despreciado el término  $v_j \frac{\partial v_l}{\partial x_j}$  en la derivada  $\frac{dv_l}{dt}$

Aplicando el operador divergencia en la ecuación (12) se obtiene, sustituyendo la dilatación cúbica  $\theta$ :

$$\nabla^2 \theta = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (13)$$

donde

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (14)$$

Si aplicamos el rotacional en la ecuación (12) y se sustituye  $\omega = \nabla \times u$  se obtiene:

$$\nabla^2 \omega = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} \quad (15)$$

siendo

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (16)$$

Las dos expresiones (13) y (15) son ecuaciones de onda. Sus soluciones representan dos tipos de ondas que se propagan con distinta velocidad. Las representadas por  $\theta$  corresponden a perturbaciones elásticas de cambios de volumen sin cambios de forma, son ondas longitudinales y se propagan con velocidad  $\alpha$ . Estas ondas son las primeras en llegar ( $\alpha > \beta$ ) y en sismología reciben el nombre de ondas **P** (onda prima). Las soluciones para  $\omega$  de la ecuación (15) representan cambios de forma sin cambio de volumen, son ondas transversales, su velocidad es  $\beta$  y reciben el nombre de ondas **S** (onda secunda). Ambas ondas reciben el nombre de ondas internas. La existencia en un medio elástico de estos dos tipos de ondas fue propuesta por primera vez por Poisson en 1830, y más tarde por Stokes en 1849.

### Ondas planas

Una de las soluciones más sencillas de las ecuaciones (13) y (15) es la que se expresa con dependencia armónica del tiempo y frentes de onda planos. Para una onda **P** que se propaga en la dirección de  $x$ , tiene la forma de:

$$\theta = A \cos [k_\alpha(x - \alpha t) + \varepsilon] = A \cos [k_\alpha x - \omega t + \varepsilon] \quad (17)$$

Cuando la onda se propaga en una dirección arbitraria, definida por los cosenos directores  $v_i$ , la ecuación toma la forma

$$\theta = A \cos [k_\alpha (v_1 x_1 + v_2 x_2 + v_3 x_3 - \alpha t) + \varepsilon] = A \cos [k_\alpha (x_i v_i - \alpha t) + \varepsilon] \quad (18)$$

El vector  $v_i$  es normal al frente de onda y define la dirección del rayo o de propagación. Los parámetros que aparecen en estas soluciones son  $A$  la amplitud de la onda.

El número de onda:

$$k_\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_\alpha} = \frac{\omega}{\alpha}$$

$\omega$  la frecuencia angular:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

donde  $T$  es el periodo y  $\varepsilon$  la fase en el origen. No confundir  $\omega$  la frecuencia angular, con  $\omega$  o  $\omega_i$ , el vector de rotación. La costumbre establecida utiliza la misma letra en ambos casos.

El argumento del coseno es la fase de la onda. Si ponemos, por ejemplo, la fase cero, ésta se propaga en la dirección de  $v_i$  con velocidad  $\alpha$ , por lo que  $\alpha$  es la velocidad de fase. Lo mismo se puede decir de la solución para la onda  $S$ :

$$\omega_i = \mathbf{B}_i \cos [\mathbf{k}_\beta (v_i x_i - \beta t) + \eta] \quad (19)$$

Este tipo de soluciones es el más sencillo y corresponde a ondas monocromáticas ( $\omega = \text{constante}$ ) planas. En las observaciones, las ondas no son trenes de infinita duración, sino impulsos cortos que pueden aproximarse por un ciclo de una onda sinusoidal y de esta forma se puede considerar su amplitud y periodo. Más correctamente un impulso se representa por la superposición de trenes de ondas de distintas frecuencias.

### Desplazamientos de las ondas P y S

Los componentes de los desplazamientos de las ondas P y S se pueden expresar también en forma de ondas planas que en forma exponencial vienen dadas por:

$$u_k^P = A_k \exp i [\mathbf{k}_\alpha (v_i x_i - \alpha t) + \varepsilon] \quad (20)$$

$$u_k^S = B_k \exp i [\mathbf{k}_\beta (v_i x_i - \beta t) + \eta] \quad (21)$$

Estos desplazamientos se pueden expresar en función de dos potenciales, uno escalar  $\phi$  y otro vectorial  $\psi$  en la forma:

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \psi \quad (22)$$

cumpléndose que

$$\nabla \cdot \psi = 0$$

Esta partición es una aplicación del teorema de Helmholtz, válido para cualquier campo vectorial. Estos potenciales son también soluciones de la ecuación de onda en la forma:

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} ; \quad \nabla^2 \psi = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (23)$$

como puede demostrarse sustituyendo (22) en (11).

Si se supone que tanto  $\phi$  como  $\psi$  tienen dependencia armónica del tiempo,  $\phi(x_i, t) = \phi(x_i) \exp i\omega t$ , al sustituir en la ecuación (23) se obtiene:

$$(\nabla^2 + k_\alpha^2) \phi = 0 \quad ; \quad (\nabla^2 + k_\beta^2) \psi = 0 \quad (24)$$

Estas ecuaciones se conocen como las ecuaciones de Helmholtz y en ellas se ha eliminado la dependencia del tiempo.

Las expresiones de  $\phi$  y  $\psi$  para una solución en la forma de ondas planas que se propagan en la dirección definida por los cosenos directores  $(v_1, v_2, v_3)$  son:

$$\phi = A \exp i \{ k_\alpha (v_j x_j - \alpha t) + \varepsilon \} \quad (25)$$

$$(\psi_1, \psi_2, \psi_3) = (B_1, B_2, B_3) \exp i \{ k_\beta (v_j x_j - \beta t) + \eta \} \quad (26)$$

El potencial  $\phi$  nos representa la onda **P** y el potencial  $\psi$  la onda **S**. De esta forma se puede escribir:

$$u = u^P + u^S$$

donde:

$$u^P = \nabla \phi \quad (27)$$

$$u^S = \nabla \times \psi \quad (28)$$

A partir de las ecuaciones (25) y (26) por un lado, y (27) y (28) por otro, se puede fácilmente deducir que los desplazamientos de la onda **P** son longitudinales, coincidentes con la dirección de propagación, y los de la onda **S** están en un plano normal a esta dirección.

Como en sismología las observaciones de las ondas sísmicas se realizan en la superficie de la Tierra, se acostumbra a referir los componentes de los desplazamientos de las ondas **P** y **S** con respecto al sistema de ejes geográficos  $(x_1, x_2, x_3)$  en la dirección norte, oeste y zenit.

El plano  $(x_1, x_2)$  es el plano horizontal, el plano que contiene el eje  $x_3$  y la dirección de propagación  $v_i$  es el plano de incidencia o vertical. El plano normal al rayo que contiene al vector  $u^s$  es el plano de la onda  $S$ . Las intersecciones de este plano con los planos de incidencia y horizontal definen las direcciones llamadas  $SV$  y  $SH$  ( $S$  vertical y  $S$  horizontal), Fig. 9.

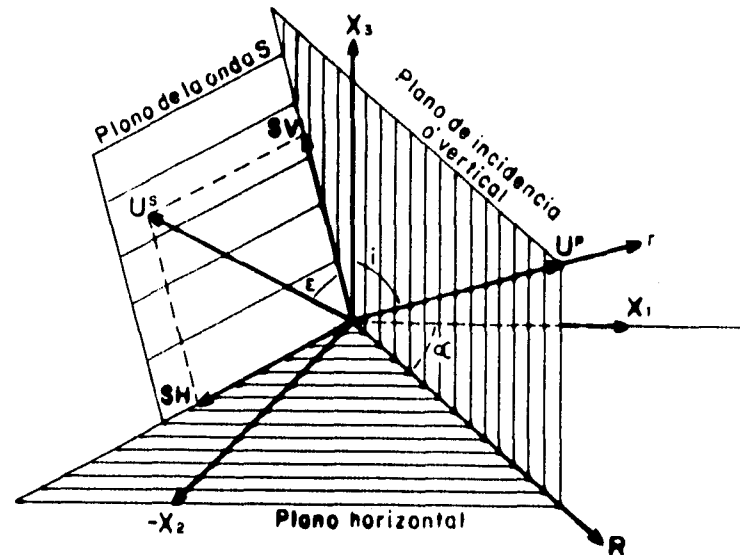


Fig. 9.- Geometría de los desplazamientos de las ondas  $P$  y  $S$  en un punto con respecto a un sistema de ejes trirectangular  $(x_1, x_2, x_3)$ .

Si se descompone el vector de desplazamiento  $u^s$  en sus dos componentes en estas dos direcciones, se obtienen los componentes  $SV$  y  $SH$  de la onda  $S$ . El ángulo entre la dirección de la onda  $S$  y el eje  $SV$  es el ángulo de polarización  $\epsilon$ .

$$\operatorname{tg} \epsilon = \frac{SH}{SV} \quad (29)$$

El ángulo entre la dirección del rayo  $v_i$  (dirección de la onda  $P$ ) y la vertical es el de incidencia  $i$ , y entre el eje  $x_1$  y la proyección de la dirección de propagación en el plano horizontal es el azimut  $\alpha$  del rayo. Su relación con los cosenos directores del rayo es:

$$\begin{aligned} v_1 &= \operatorname{sen} i \cos \alpha \\ v_2 &= \operatorname{sen} i \operatorname{sen} \alpha \\ v_3 &= \cos i \end{aligned}$$

Conviene destacar que el movimiento del desplazamiento de las ondas  $P$  y la componente  $SV$  de las ondas  $S$  está en el plano de incidencia y el de la componente  $SH$  es normal a éste en el plano horizontal.

### Reflexión y refracción

El problema de la refracción y reflexión de ondas es muy importante en Sismología, ya que la Tierra está formada por capas de material de distinta composición.

Si suponemos dos medios en los que las velocidades de las ondas **P** y **S** son distintas, al incidir una onda **P** se producirán ondas reflejadas y refractadas **P** y **S**, cumpliéndose la ley de Snell (Fig. 10).

$$\frac{\cos e}{\alpha} = \frac{\cos f}{\beta} = \frac{\cos e'}{\alpha'} = \frac{\cos f'}{\beta'} \quad (30)$$

La partición de la energía incidente entre las ondas reflejadas y refractadas se puede deducir escribiendo las soluciones de la ecuación de onda para los potenciales  $\phi$  y  $\psi$ , y aplicando las condiciones de continuidad de esfuerzos y desplazamientos en la superficie de contacto.

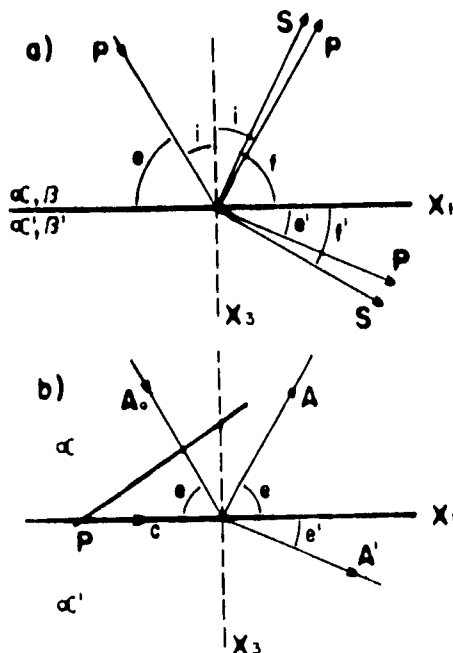


Fig. 10.- Rayos transmitidos y reflejados: a) en dos sólidos; b) en dos líquidos.

El caso más sencillo es cuando los medios son líquidos, ya que sólo existen ondas **P** (Fig. 10b). Consideremos dos medios **M** y **M'** de velocidades  $\alpha$  y  $\alpha'$  y densidades  $p$  y  $p'$ . El potencial en el medio **M** es la suma de los potenciales de las ondas incidente y reflejada:

$$\phi = A_0 \exp ik_{\alpha} (\cos e x_1 + \sin e x_3 - \alpha t) + A \exp ik_{\alpha} (\cos e x_1 - \sin e x_3 - \alpha t) \quad (31)$$

En el medio  $M'$  el potencial de la onda refractada es:

$$\phi' = A' \exp ik_{\alpha} (\cos e' x_1 + \operatorname{sen} e' x_3 - \alpha t) \quad (32)$$

De acuerdo con la ley de Snell, los potenciales se pueden escribir en la forma:

$$\phi = A_0 \exp ik (\operatorname{tg} e x_3 + x_1 - ct) + A \exp ik (-\operatorname{tg} e x_3 + x_1 - ct) \quad (33)$$

$$\phi' = A' \exp ik ( \operatorname{tge}' x_3 + x_1 - ct ) \quad (34)$$

siendo:

$$c = \frac{\alpha}{\cos e} = \frac{\alpha'}{\cos e'} \quad (35)$$

$$k = k_{\alpha} \cos e = k_{\alpha} \cos e' \quad (36)$$

donde  $c$  representa la velocidad aparente de la intersección del frente de onda con la superficie de separación de los dos medios, o la componente de la velocidad en la dirección de  $x_1$ , y  $k$  el número de onda correspondiente a dicha velocidad.

Para obtener la relación entre las amplitudes incidente, reflejada y refractada, se aplican las condiciones de contorno en la superficie de separación: es decir, continuidad de la componente normal de esfuerzos y desplazamientos.

$$\tau_{33} = \tau'_{33}$$

$$u_3 = u'_3$$

Poniendo los esfuerzos en función de las deformaciones, éstas de los desplazamientos y estos últimos en función de los potenciales  $\phi$  y  $\phi'$  (33) y (34) se obtiene finalmente:

$$A_0 + A = \frac{\rho'}{\rho} A' \quad (37)$$

$$A_0 - A = \frac{\operatorname{tg} e'}{\operatorname{tg} e} A' \quad (38)$$

donde se ha hecho uso de que  $\alpha^2 = \lambda/p$  y  $\alpha'^2 = \lambda'/p'$ . Si definimos los coeficientes de reflexión  $V = A/A_0$  y de transmisión  $W = A'/A_0$  obtenemos para ellos las siguientes expresiones:

$$V = \frac{\rho' \operatorname{tge} - \rho \operatorname{tge}'}{\rho \operatorname{tge}' + \rho' \operatorname{tge}} \quad (39)$$

$$W = \frac{2\rho \operatorname{tge}}{\rho \operatorname{tge}' + \rho' \operatorname{tge}} \quad (40)$$

Para una incidencia normal, es decir, cuando  $e = \pi/2$  estos coeficientes toman la forma:

$$V = \frac{\alpha' \rho' - \alpha \rho}{\alpha' \rho' + \alpha \rho} \quad (41)$$

$$W = \frac{2\alpha' \rho}{\alpha' \rho' + \alpha \rho} \quad (42)$$

Se puede fácilmente ver que si el contraste de densidades y velocidades entre los medios es pequeño,  $V$  tiende a cero y  $W$  a la unidad, es decir, casi toda la energía se transmite. Al contrario, si el contraste es muy grande, casi toda la energía se refleja.

Si  $\alpha' > \alpha$  existe un ángulo límite para los rayos transmitidos  $e_c$ , llamado ángulo crítico, al que corresponde  $e' = 0$  ( $\cos e' = 1$ ) y para el que se cumple que

$$\cos e_c = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

Para ángulos  $e < e_c$ , toda la energía se refleja y no existen rayos transmitidos al medio  $M'$

### **Trayectorias y tiempos de llegada**

Las trayectorias y tiempos de llegada de las ondas internas **P** y **S** desde su foco, o punto de emisión, al punto de observación pueden estudiarse de una manera sencilla desde el punto de vista de la dirección del rayo, o normal al frente de onda. La ecuación fundamental que regula la trayectoria de un rayo sísmico se deduce aplicando el principio de Fermat de la condición de



tiempo mínimo al camino recorrido, y resulta en la ley de Snell, que se puede expresar ahora en la forma:

$$\frac{\text{sen } i}{v} = p \quad (43)$$

Donde  $i$  es el ángulo que forma el rayo con la vertical en un punto;  $v$ , la velocidad de la onda en dicho punto, y  $p$ , el parámetro del rayo, constante a lo largo de cada rayo.

Si  $v$  es constante,  $i$  será constante; si  $v$  cambia,  $i$  debe cambiar también, curvándose el rayo, bien hacia arriba o hacia abajo. En el caso en que  $v$  varíe sólo con la vertical, las ondas aumentarán o disminuirán de velocidad en esa dirección.

El caso más comúnmente considerado en sismología es el cambio de velocidad con la profundidad y generalmente, en el caso de la Tierra, ésta aumenta con la profundidad. El rayo entonces es de trayectoria curva. Si el foco y el punto de observación están en la superficie, la trayectoria será un arco cóncavo hacia la superficie (Fig. 11). Para distancias cortas se puede considerar la Tierra plana, siendo  $x$  la distancia del foco  $F$  al punto de observación  $S$ . Si se conoce la distribución de velocidades  $v(z)$  para cada punto y conocida  $x$  (distancia horizontal que aparentemente recorre la onda), podemos calcular la distancia recorrida a lo largo del rayo  $S$ , la profundidad máxima  $h$  que alcanza y el tiempo  $t$  que tarda en llegar la onda.

Si el foco no está en la superficie,  $x$  es la distancia del epicentro  $E$ , o proyección del foco sobre la superficie, a la estación  $S$  (distancia epicentral). Si calculamos  $t$  para cada  $x$  obtenemos la curva  $(t, x)$ , que se denomina curva dromocrónica.

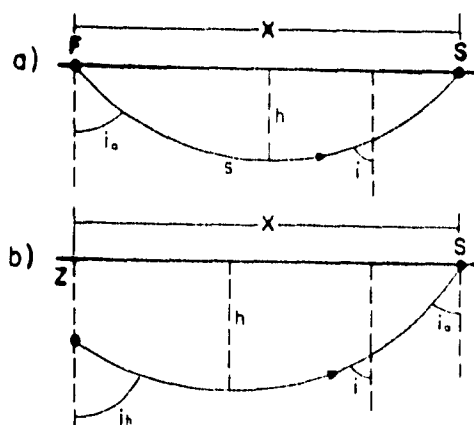


Fig. 11.- Trayectoria de rayos en un medio con velocidad que aumenta con la profundidad: a) con foco en la superficie, y b) a profundidad  $Z$ .  $h$  es la profundidad máxima del rayo y  $X$  la distancia horizontal que aparentemente recorre la onda.

### Capas planas de velocidad constante

Para distancias epicentrales menores de 500 km, los rayos sísmicos penetran sólo en la corteza y parte superior del manto. En una primera aproximación para efectos de propagación de ondas, se puede considerar la corteza formada por capas planas de velocidad de propagación constante. Para estudiar este caso, consideramos primero el caso más sencillo, de una capa de velocidad  $v_1$  sobre un medio de velocidad  $v_2$ , con la condición  $v_2 > v_1$  (Fig. 12).

Los tres rayos posibles que saliendo de  $F$  llegan a  $E$ , son:

1. El rayo directo
2. El rayo reflejado en la base de la capa
3. El rayo refractado crítico a lo largo de la superficie superior del medio.

Los tiempos de recorrido de los dos primeros se pueden fácilmente escribir en la forma:

$$t_1 = \frac{x}{v_1} \quad (44)$$

$$t_2 = 2 \sqrt{H^2 + \frac{x^2}{4}} \quad (45)$$

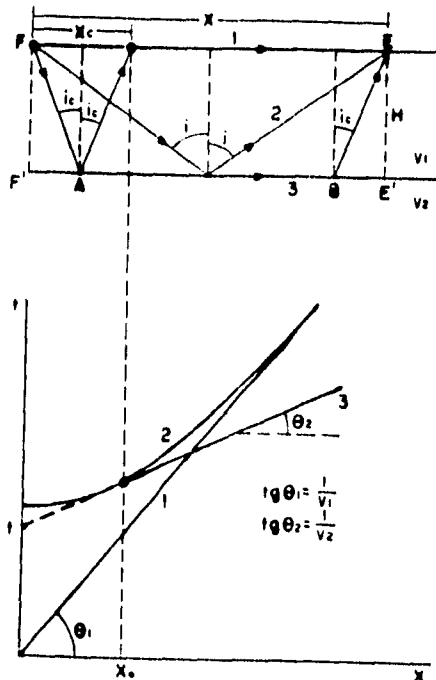


Fig. 12.- Rayos directos: 1) reflejado; 2) refractado; 3) y las dromocrónicas correspondientes en un modelo de una capa sobre un medio, ambos de velocidad constante ( $v_1 < v_2$ );  $x_c$  distancia crítica y  $t_i$  tiempo de intersección del refractado crítico.

La onda refractada crítica es la que incide en el medio de velocidad  $v_2$  con el ángulo crítico,  $i_c = \text{sen}^{-1} v_1/v_2$ , se transmite a lo largo de la superficie de separación con velocidad  $v_2$  y vuelve a refractarse a la capa de velocidad  $v_1$  con el mismo ángulo. La expresión para el tiempo de recorrido es:

$$t_3 = \frac{2H}{v_1 \cos i_c} + \frac{x - 2H \text{tg } i_c}{v_2} \quad (46)$$

que también se puede escribir en la forma:

$$t_3 = \frac{x}{v_2} + \frac{2H \cos i_c}{v_1} = \frac{x}{v_2} + 2H \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \quad (47)$$

En la última forma se ha sustituido  $\cos i_c$  por su valor en función de las velocidades. El segundo término de esta expresión se denomina tiempo de retraso y corresponde a la diferencia entre el tiempo que la onda tarda en ir de  $F$  a  $A$  con velocidad  $v_1$  y de  $F'$  a  $A$  con  $v_2$ .

Las dromocrónicas de las ondas directa y refractada crítica son rectas de pendientes  $1/v_1$  y  $1/v_2$ , respectivamente, y la de la reflejada es una rama de hipérbola con vértice en el eje  $t$  (Fig. 12). La distancia  $x_c$  es la crítica, es decir, aquella a partir de la cual existe la refractada crítica y que coincide con la onda reflejada con ángulo crítico. De este modo las reflexiones para  $x < x_c$  se llaman subcríticas y para  $x > x_c$  supercríticas; estas últimas corresponden a reflexiones totales. El tiempo  $t_1$  es el de intersección de la onda refractada crítica. Los valores de las pendientes  $\theta_1$  y  $\theta_2$ ,  $t_1$  y  $x_c$  sirven para obtener los parámetros del modelo  $v_1$ ,  $v_2$  y  $H$  conocida la dromocrónica. Las expresiones empleadas para obtener  $H$  son:

$$H = \frac{x_c \sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{2v_1} \quad (48)$$

$$H = \frac{t_1 v_1 v_2}{2 \sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (49)$$

A partir de los tiempos de llegada de las ondas reflejadas, también pueden obtenerse estos parámetros. Elevando al cuadrado la expresión (45) y despejando  $t^2$  se obtiene:

$$t^2 = \frac{x^2}{v_1^2} + \frac{4H^2}{v_1^2} \quad (50)$$

Si se representan tiempos y distancias en un diagrama ( $t^2$ ,  $x^2$ ) se obtiene una recta de pendiente  $1/v_1^2$ , pudiéndose obtener el valor de  $H$  de la ordenada en el origen (Fig. 13).

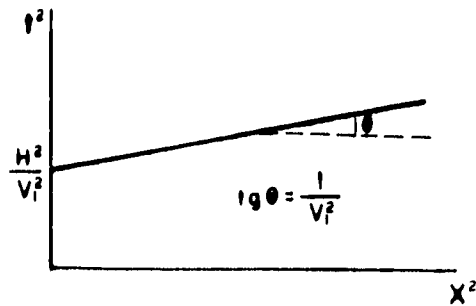


Fig. 13.- Dromocrónicas de la onda reflejada en el diagrama ( $t^2$ ,  $x^2$ ).

Si el foco en lugar de estar en la superficie está a profundidad  $h$  las ecuaciones son:

$$t_1 = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{v_1} \quad (51)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{(2H - h)^2 + x^2}}{v_1} \quad (52)$$

$$t_3 = \frac{x}{v_2} + \frac{(2H - h)\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_2 v_1} \quad (53)$$

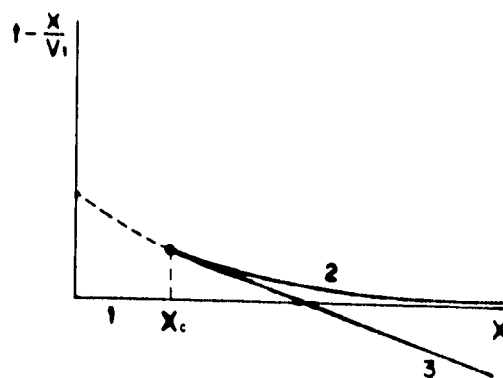


Fig. 14.- Dromocrónica reducida para el modelo de la figura (12), con velocidad de reducción  $V_1$ .

Una representación muy empleada en estudios de refracción sísmica es la dromocrónica reducida.

Esta consiste en representar

$$\left( t - \frac{x}{v_R}, x \right)$$

donde  $v_R$  se llama velocidad de reducción. En el caso estudiado anteriormente, si se toma  $v_R = v_1$  las dromocrónicas están representadas en la figura (14), y la primera rama es paralela al eje  $x$ . En el caso de varias capas, esta representación exagera la diferencia entre las pendientes correspondientes a las velocidades de las diversas capas. Las velocidades menores que  $v_R$  tienen pendientes positivas y las mayores negativas.

La generalización para  $n$  capas planas horizontales superpuestas en las que la velocidad de cada capa aumenta con la profundidad, no impone ninguna dificultad. La expresión para los tiempos de recorrido de las ondas refractadas críticas en la capa  $n$  viene dada por:

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2H_i \sqrt{v_n^2 - v_i^2}}{v_n v_i} \quad (54)$$

Las dromocrónicas resultantes son una serie de rectas de pendiente cada vez menor (Fig. 15a). Para las ondas reflejadas en cada capa no existe una expresión equivalente. El cálculo más sencillo, en este caso, es el de determinar los tiempos de recorrido y las distancias en función del ángulo de salida del rayo en el foco.

Si una capa tiene velocidad menor que la inmediata superior, en esta interfaz no se pueden propagar ondas refractadas críticas. Este caso, común en la corteza y manto superior terrestres, recibe el nombre de capa de baja velocidad. La onda refractada crítica en la capa siguiente se ve afectada por un retraso debido a la presencia de la capa anterior (Fig. 15b).

El problema de capas no horizontales es relativamente sencillo cuando se trata de una única capa. En el caso general de  $n$  capas, las expresiones son más complicadas. En estos modelos de capas no horizontales se ha de especificar, además de las velocidades y espesores de las capas, los ángulos de buzamiento de las mismas.

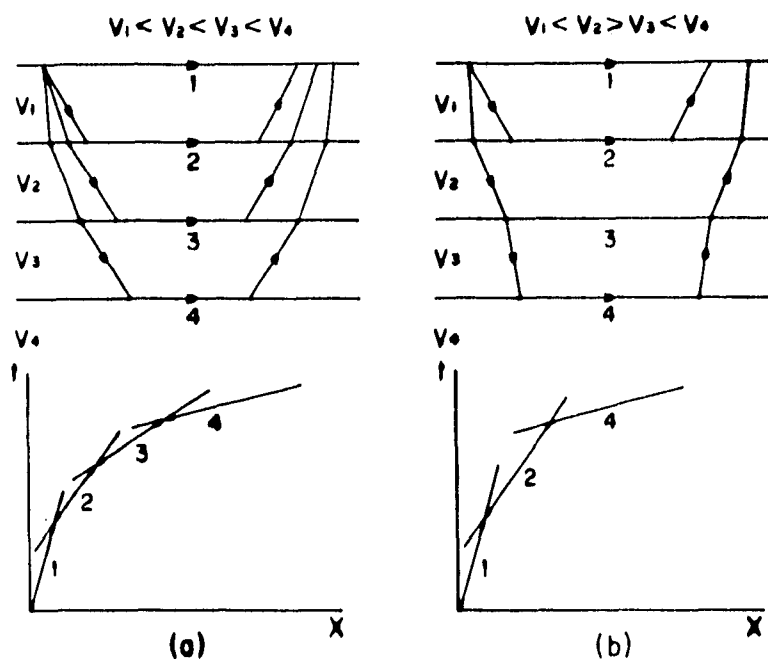


Fig. 15.- Trayectorias de los rayos y dromocrónicas de medios estratificados: a) para  $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$ ; b) para  $V_1 < V_2 > V_3 < V_4$  ( $V_3$  capa de baja velocidad).

**Variación continua de la velocidad con la profundidad**

En el interior de la Tierra, en especial en el manto, la velocidad varía de forma continua con la profundidad. Esta variación toma la forma de un aumento gradual de la velocidad con la profundidad. Para un medio limitado por una superficie plana y con el foco en la superficie, la distancia a lo largo del rayo en este caso, viene dada por:

$$S = \int_0^h \frac{dz}{\cos i} \tag{55}$$

Si se llama  $h$  a la profundidad máxima a la que llega un rayo, es decir, para  $i = 90^\circ$ , los tiempos y distancias de un rayo que parte y llega a la superficie se pueden expresar, según la figura (16), en la forma:

$$x = 2 \int_0^h \operatorname{tg} i \, dz \tag{56}$$

$$t = 2 \int_0^h \frac{dz}{v \cos i} \tag{57}$$

Utilizando la ley de Snell en la que  $\text{sen } i = pv$ , estas expresiones se pueden escribir en función de  $p$  y  $\eta$ , donde este último parámetro es el inverso de la velocidad  $\eta = 1/v$ :

$$x = 2 \int_0^h \frac{p dz}{\sqrt{\eta^2 - p^2}} \quad (58)$$

$$t = 2 \int_0^h \frac{\eta dz}{\sqrt{\eta^2 - p^2}} \quad (59)$$

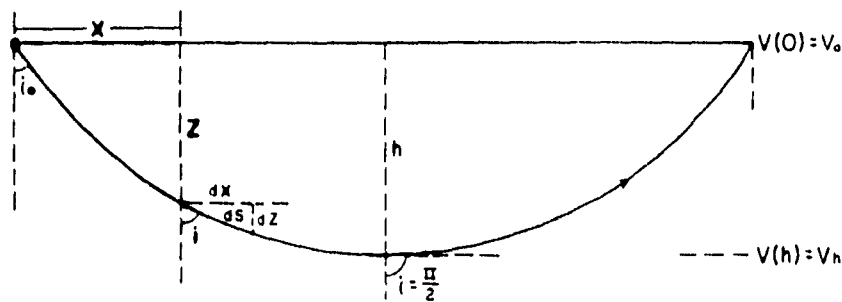


Fig. 16.- Trayectoria de un rayo en un medio cuya velocidad aumenta de forma continua con la profundidad.

Consideremos dos rayos contiguos de parámetros  $p$ ,  $p + dp$ , que llegan a distancia  $x$  y  $x - dx$ , si el recorrido del frente de onda a lo largo del rayo de parámetro  $p$ , en un incremento de tiempo  $dt$ , es  $ds = v dt$ , de acuerdo con la figura (17) se puede escribir:

$$\text{sen } i = \frac{ds}{dx} = v \frac{dt}{dx} \quad (60)$$

y, por tanto:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\text{sen } i}{v} = p \quad (61)$$

Esta expresión es muy importante, ya que relaciona el parámetro del rayo  $p$  con la pendiente de la curva dromocrónica en la distancia a la que llega el rayo. En el punto de la trayectoria del rayo en el que  $i = 90^\circ$  se obtiene:

$$\frac{dt}{dx} = p = \frac{1}{v_h} \quad (62)$$

donde  $v_h$  es la velocidad en el punto más profundo del rayo. Según esta relación, la pendiente de la dromocrónica para una distancia dada, es la inversa de la velocidad máxima que alcanza el rayo, es decir, la correspondiente al punto de mayor profundidad. Si la velocidad aumenta con la profundidad, el valor de  $p$  disminuye para rayos que lleguen a mayor distancia, y la curva dromocrónica será de forma convexa y de pendiente cada vez menor (Fig. 17). A una distancia  $x$ , la onda tarda en llegar  $t$  y la pendiente de la dromocrónica en dicho punto nos da el valor del parámetro del rayo  $p$ , que es igual a la inversa de la velocidad ( $v_h$ ) en su punto más profundo, coincidente con la velocidad del medio en ese punto.

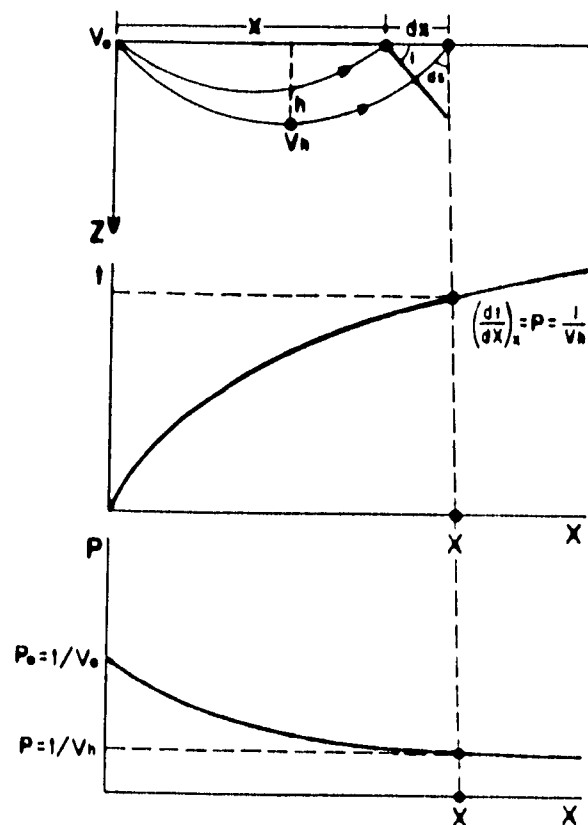


Fig. 17.- Trayectoria de rayos en un medio de velocidad que aumenta con la profundidad, dromocrónica  $(t, x)$  y curva  $(p, x)$  correspondientes.

La relación entre la forma de la cromocrónica, el parámetro del rayo y distribución de la velocidad permite utilizar estas curvas para determinar la dependencia de la velocidad con la profundidad. Una distribución utilizada muy comúnmente por su sencillez, para representar la situación en la corteza o el manto de la Tierra, es la de aumento lineal con la profundidad,



$v = v_0 + kz$ . Para esta distribución, la trayectoria de los rayos es circular con radio igual a  $h + v_0/k$  y la expresión para los tiempos en función de la distancia es:

$$t = \frac{2}{k} Sh + \frac{kx}{2v_0} \quad (63)$$

Esta distribución de gradiente constante es muy útil para aproximar otras situaciones más complicadas, por combinación de capas de distinto gradiente.

En el caso de existir una capa en la que la velocidad disminuye con la profundidad, en ella la curvatura del rayo es hacia abajo. Naturalmente en esta zona ningún rayo puede girar hacia la superficie.

### Propagación en un medio esférico

Para estudiar el comportamiento de las ondas sísmicas en el interior de la Tierra, se tiene que considerar la propagación de ondas en un medio esférico. Al introducir la forma esférica en el problema de la trayectoria de los rayos y los tiempos de recorrido, hay que introducir algunas modificaciones en las ideas expuestas anteriormente. La primera es que la distancia entre dos puntos se toma como la distancia angular  $\Delta$  y las curvas dromocrónicas son ahora  $(t, \Delta)$ .

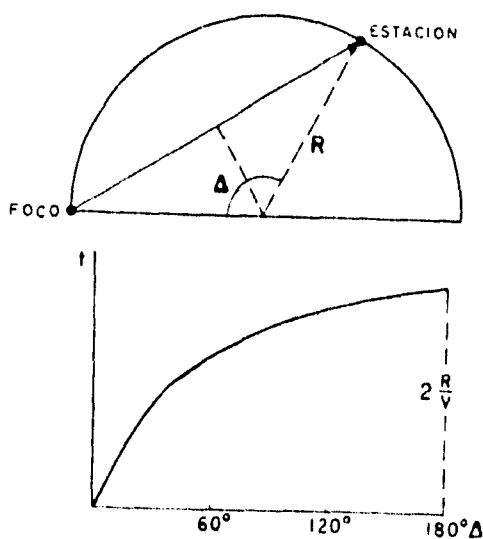


Fig. 18.- Rayos en un medio esférico de velocidad constante y dromocrónica  $(t, \Delta)$  correspondiente.

Para una esfera homogénea de radio  $R$  y velocidad constante  $v$ , el tiempo de recorrido en función de  $\Delta$  viene dado por:

$$t = \frac{2R}{v} \operatorname{sen} \frac{\Delta}{2} \quad (64)$$

La dromocrónica correspondiente  $(t, \Delta)$  es una curva, a pesar de la velocidad constante, y limitada al intervalo  $0 < \Delta < \pi$  (Fig. 18).

Si se considera el caso de capas concéntricas de velocidad constante (Fig. 19), de acuerdo con la ley de Snell

$$\frac{\operatorname{sen} i_1}{v_1} = \frac{\operatorname{sen} f}{v_2} \quad (65)$$

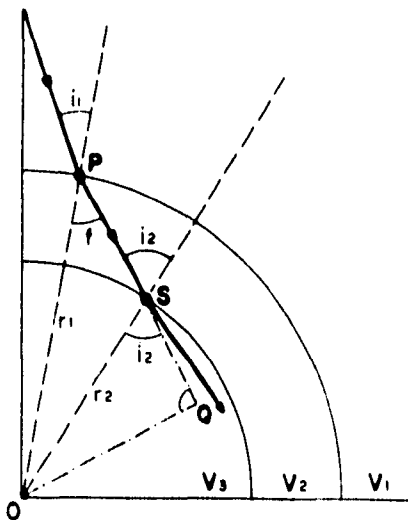


Fig. 19.- Trayectoria de un rayo en regiones esféricas de velocidad constante ( $v_1 < v_2 < v_3$ ).

Si se consideran los triángulos  $PQO$  y  $SQO$  se tiene que:

$$r_2 \operatorname{sen} i_2 = r_1 \operatorname{sen} f \quad (66)$$

Sustituyendo  $\operatorname{sen} f$  en la ecuación (65) se obtiene:

$$\frac{r_1 \operatorname{sen} i_1}{v_1} = \frac{r_2 \operatorname{sen} i_2}{v_2} \quad (67)$$

Por tanto, la ley de Snell se expresa, en general, para medios esféricos en la forma:

$$\frac{r \operatorname{sen} i}{v} = p \quad (68)$$

donde  $r$ ,  $i$  y  $v$  están referidos a la misma capa y  $p$  es el parámetro del rayo.

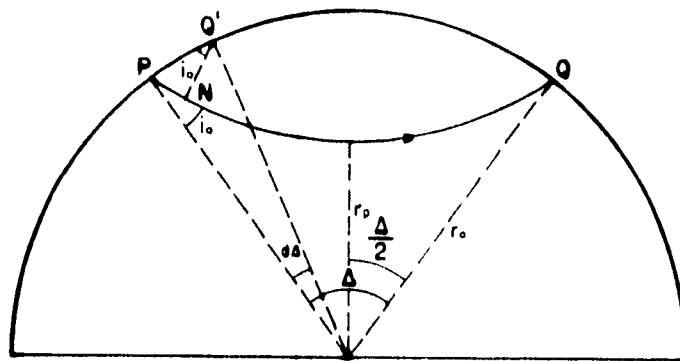


Fig. 20.- Trayectoria de un rayo en un medio esférico de velocidad que aumenta de forma continua con la profundidad a lo largo del radio.

Si la velocidad aumenta de forma continua con la profundidad se puede escribir la velocidad en función del radio,  $v(r)$ . Consideremos el rayo que va de  $P$  a  $Q$  correspondiente a una distancia angular  $\Delta$ . El elemento de arco  $PQ'$  correspondiente a un elemento de distancia angular  $d\Delta$  es:

$$PQ' = r_0 d\Delta \quad (69)$$

El segmento  $NQ'$  es normal al rayo y representa un frente de onda que tarda  $dt$  en llegar de  $P$  a  $N$ ; si la velocidad en la superficie es  $v(r_0) = v_0$ :

$$PN = v_0 dt \quad (70)$$

De acuerdo con el triángulo  $PQ'N$  se tiene:

$$\operatorname{sen} i_0 = \frac{PN}{PQ'} \quad (71)$$

y sustituyendo las ecuaciones (69) y (70) se obtiene:

$$\text{sen } i_0 = \frac{v_0}{r_0} \frac{dt}{d\Delta} \quad (72)$$

De acuerdo con la ley de Snell, para cada rayo

$$\frac{r \text{ sen } i}{v} = p = \frac{dt}{d\Delta} \quad (73)$$

Por tanto, también en este caso el parámetro del rayo  $p$  viene dado por la pendiente de la curva  $(t, \Delta)$  o dromocrónica. Este resultado, conocido como ley de Benndorf, es muy importante para poder obtener la distribución de velocidades  $v(r)$  a partir de la curva  $t(\Delta)$ . Considerando la trayectoria del rayo representado en la figura 21, se pueden escribir las siguientes relaciones:

$$ds^2 = dr^2 + (r d\Delta)^2 \quad (74)$$

$$\text{sen } i = r \frac{d\Delta}{ds} \quad (75)$$

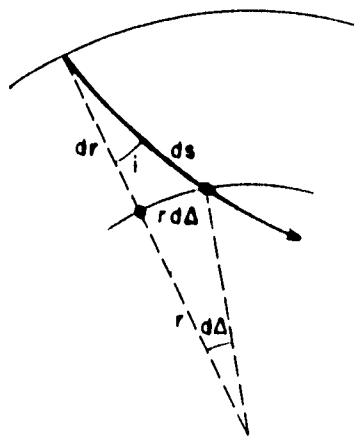


Fig. 21.- Elementos de la trayectoria de un rayo en un medio esférico de velocidad variable.

Sustituyendo el valor del  $\text{sen } i$  en la ley de Snell, se obtiene:

$$\frac{r^2}{v} \frac{d\Delta}{ds} = p \quad (76)$$

En la ecuación (74) dividiendo primero por  $ds^2$  y en segundo lugar por  $dr^2$ , se obtienen las siguientes relaciones, en las que hemos sustituido

$$\eta = \frac{r}{v} \text{ y } d\Delta/ds = pv/r^2$$

$$\frac{ds}{dr} = \frac{\eta}{\sqrt{\eta^2 - p^2}} \quad (77)$$

$$\frac{d\Delta}{dr} = \frac{p}{r} \frac{1}{\sqrt{\eta^2 - p^2}} \quad (78)$$

De estas dos expresiones se deduce, integrando a lo largo del rayo desde la superficie ( $r_0$ ) al punto más profundo ( $r_p$ ) (Fig. 22):

$$\Delta = 2 \int_{r_p}^{r_0} \frac{p}{r} \frac{dr}{\sqrt{\eta^2 - p^2}} \quad (79)$$

$$S = 2 \int_{r_p}^{r_0} \frac{\eta dr}{\sqrt{\eta^2 - p^2}} \quad (80)$$

$$t = 2 \int_{r_p}^{r_0} \frac{\eta dr}{v \sqrt{\eta^2 - p^2}} \quad (81)$$

En estas ecuaciones  $\Delta$  es la distancia angular a la que aflora el rayo cuyo punto más profundo está a  $r = r_p$  del centro,  $t$  es el tiempo de recorrido y  $S$  la distancia recorrida, medida a lo largo del rayo.

Como la distancia  $r_p$  corresponde al punto del rayo donde  $i = 90^\circ$ :

$$\frac{r_p}{v_p} = p = \eta_p = \frac{dt}{d\Delta} \quad (82)$$

Para una distancia determinada  $\Delta$ , la pendiente de la curva dromocrónica da el valor de  $\eta_p$ . Utilizando esta relación, se obtiene una expresión que permite determinar la distribución de velocidades con la profundidad a partir de la curva dromocrónica, en el caso de que  $v$  sea una función monótonamente creciente con la profundidad.

$$\int_0^{\Delta_1} \text{Ch}^{-1} \left( \frac{P}{\eta_1} \right) d\Delta = \pi \ln \left( \frac{r_0}{r_1} \right) \quad (83)$$

Esta expresión cuya deducción se puede encontrar en los textos de Sismología, se conoce con el nombre de fórmula de Herglotz-Wiechert y fue propuesta por estos dos autores en 1910. En ella  $\eta_1 = (dt/d\Delta)$  es la pendiente de la curva dromocrónica para la distancia  $\Delta_1$ , y la integral se puede efectuar numéricamente, ya que se conoce

$$p = \frac{dt}{d\Delta}$$

para cada valor de  $\Delta$  entre 0 y  $\Delta_1$  (Fig. 22). Obtenido el valor de la integral se determina el valor de  $r_1$ , distancia del centro al punto más profundo del rayo que llega a la distancia  $\Delta_1$ . Conocido  $r_1$  se puede obtener  $v_1$  de la relación:

$$v_1 = \frac{r_1}{\left( \frac{dt}{d\Delta} \right)_{\Delta_1}} \quad (84)$$

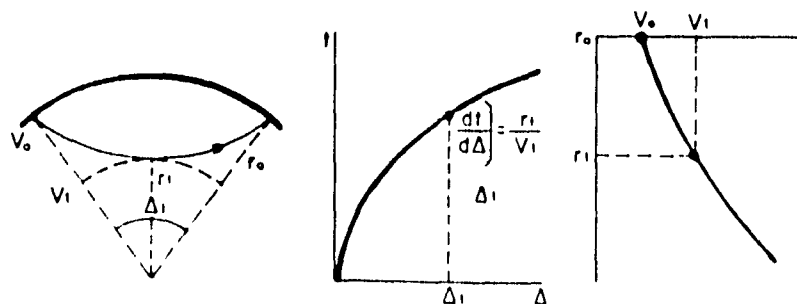


Fig. 22.- Rayos, dromocrónica y distribución de la velocidad con el radio. Aplicación de la fórmula de Herglotz-Wiechert.

La fórmula (83) puede utilizarse para obtener la distribución de velocidad de las ondas sísmicas en el manto, bajo la hipótesis de que ésta es sólo función del radio y que aumenta monótonamente con la profundidad. La determinación de la distribución de velocidades en el interior de la Tierra, a partir de los tiempos de llegada de las ondas en la superficie, es un caso particular del problema general conocido con el nombre de inversión.

#### **IV.4 PROCESADO DE LA INFORMACION**

##### ***Tipos de onda***

*Un sismograma es un registro de velocidad, los registros pueden tener varias ampliaciones y varias escalas dependiendo de la velocidad del motor de translación, el propósito inicial de interpretar sismogramas es determinar la distancia y dirección de un sismo.*

*Existen varias teorías acerca de la causa de un terremoto, actualmente se acepta como la ruptura de grandes volúmenes de roca provocada por los esfuerzos a que están sometidos cuando sobrepasa el límite de su elasticidad. Dicha ruptura genera ondas que se propagan por todo el interior de la tierra.*

*Las ondas generadas por un terremoto se pueden clasificar en dos grandes grupos:*

*Ondas internas y ondas superficiales, las primeras viajan por todo el interior de la tierra y por la forma en que se propagan son de dos tipos:*

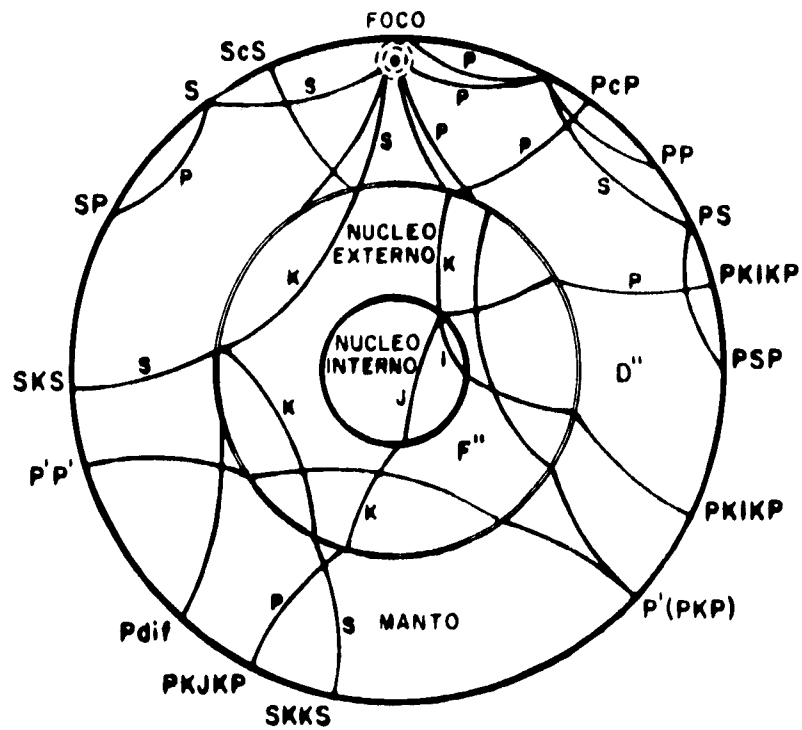
- a) Longitudinales, también llamadas primarias "P" o de compresión, son las primeras en registrarse en cualquier estación por ser las más rápidas, se propagan desplazando las partículas del medio en la misma dirección del movimiento.*
- b) Transversales, también llamadas secundarias "S" o de cizalla, llegan después que las "P", se propagan desplazando las partículas del medio en dirección perpendicular a la trayectoria que siguen, por lo cual también se les conoce como transversales.*

*El modelo de velocidades de la tierra, está gobernado por una serie de zonas esferoidales concéntricas, en cada una de las cuales la velocidad de la onda está internamente graduada. Como consecuencia de esta estructura de velocidades, las trayectorias de los rayos son curvados dentro de cada zona y desarrolla varias ramas cuando ocurren reflexiones y refracciones en las fronteras de las zonas, en la Figura 23 se muestran estas trayectorias.*

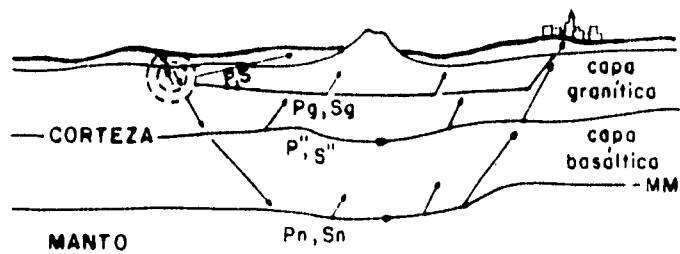
*Las ondas superficiales por otro lado, están restringidas a existir solo en las capas más superficiales de la tierra (corteza y manto superior), ya que su amplitud decrece exponencialmente con la profundidad, también se pueden clasificar en dos tipos.*

- a) Rayleigh compuestas de una onda de compresión y otra de cizalla, por lo que el movimiento resultante de la partícula describe una trayectoria elíptica y retrógrada.*
- b) Love son ondas de cizalla polarizadas, que solo pueden identificar en registro de componentes horizontales.*

## FASES DE TERREMOTOS LEJANOS.



## FASES DE TERREMOTOS PROXIMOS.



En la parte superior se muestra un esquema del interior de la Tierra, donde se ha dibujado las trayectorias de los rayos sísmicos más significativos y su nomenclatura. En la parte inferior se hace lo mismo en relación con los rayos que se propagan por la corteza terrestre.

Figura tomada de Payo G. (1986)

FIG. 23



### **Localización epicentral**

*El problema en la localización de un sismo es encontrar las coordenadas hipocentrales y el tiempo de origen  $(x, y, z, t)$  del evento, minimizando las diferencias de tiempo  $t_i$  entre los  $N$  arribos de tiempo de las ondas  $P$  y  $S$  observadas y calculadas de un conjunto de estaciones sismológicas. Esto es, resolver un conjunto de  $N$  ecuaciones teniendo la forma.*

$$t_i = G_{ij} X_j$$

donde  $X_j = (x, y, z, t)$

y  $G_{ij} = t_i / X_j$

*Con la ayuda de una computadora se puede mejorar mucho más la localización, ya que se puede proponer un modelo más complicado que un medio homogéneo por el que viajen las ondas desde el hipocentro hasta la estación (por ejemplo un medio estratificado), y calcular en este medio las distancias y tiempos requeridos en cada una de las regiones del modelo para cada una de las estaciones. Estos hipocentros se pueden hacer converger a uno solo por medio de algún método numérico, por ejemplo mínimos cuadrados. Existen algunos programas que hacen estos cálculos, entre los más populares está el llamado Hypo71 (Lee y Valdés, 1985), que se puede correr en cualquier computadora personal. Este paquete se utilizó para localizar los epicentros de esta tesis.*

### **Magnitud**

*La magnitud es la medida del tamaño relativo de un sismo, la primera aproximación a este problema fue la magnitud local  $M_L$  designada por Richter (1935), para la clasificación de sismos locales en el sur de California definida como:*

$$M_L = \log(a) - (a_0)$$

*donde "a" es la máxima amplitud del trazo registrada por un sismómetro de torsión standar Wood-Anderson ( $T_0 = 0.8$  s, amortiguamiento  $h = 0.8$ , ganancia  $v_0 = 2800$ ), a una distancia dada y  $a_0$  es aquella para un sismo de magnitud 0 a la misma distancia. Un sismo de magnitud cero es aquel que produciría una amplitud de 0.01 mm a una distancia de 100 km del epicentro. Existen varios tipos de magnitud que se basan en la medida de diferentes características de los sismos como son, ondas internas, ondas superficiales, duración de la señal y momento sísmico.*

*Para calcular la magnitud de los sismos de esta tesis, se utilizó la magnitud de coda (duración de la señal) Lee and Lahr 1978, Havskov and Macías 1982; las constantes que se utilizaron son las propuestas en el manual del programa diseñado para computadoras personales Hypo 71 (Lee and Lahr 1978).*

## **Localización de epicentros**

*Descripción de los parámetros utilizados en el proceso de datos mediante el paquete Hypo71.*

*El paquete requiere de dos archivos de entrada uno que incluye tres tarjetas de datos de control, en la Tabla 4 se muestran los datos de control de entrada utilizados en la presente tesis.*

*El modelo de velocidades y profundidades de la corteza terrestre en esta zona se obtuvo como resultado del análisis de las trayectorias de tiempo de la señal generada por la explosión del 22 de abril de 1992 en el centro de la ciudad de Guadalajara, que se registró en 12 estaciones sismológicas de los estados de Jalisco, Nayarit y Colima, (Informe Inédito de Comisión Federal de Electricidad, 1992).*

*El segundo archivo de entrada requiere los datos de la estación, forma del primer arribo de la onda P, peso de la onda P, año, mes, día, minuto, segundo del arribo P, arribo de la onda S, peso de la onda S, amplitud de la onda S y la duración de la señal.*

*La información a que se tuvo acceso, se recabó de las estaciones sismológicas de la Comisión Federal de Electricidad, del mes de marzo de 1989 al mes de mayo de 1994.*

*El resultado del procesamiento de datos mediante el programa Hypo71 puede verse en la Tabla 5 donde se describe las características principales de estos eventos, como son: la fecha de ocurrencia, latitud, longitud, magnitud y profundidad, y su localización gráfica puede verse en la Figura 24.*

*En la presente tesis, se analizan únicamente los eventos sísmicos que se localizan dentro de las coordenadas geográficas 20° 00' a 21° 30' de latitud norte y 102° 30' a 104° 00' de longitud oeste.*

*Para diferenciar los sismos de cada zona, se clasificaron considerando su forma y diferencias de tiempo de las fases S-P, de donde se clasificaron 6 tipos, los cuales se reagruparon en 2 que corresponden a las zonas sismogénicas Río Santiago y Chapala (ver tablas 6 y 7).*

*Para determinar la orientación de la fuente y los esfuerzos de los eventos sísmicos clasificados como Río Santiago y Chapala, se utilizó el mecanismo focal, que es un método para determinar la orientación del tipo de ruptura de un terremoto, es decir, la orientación del plano de falla y el estado de esfuerzos de un área. En base a ellos, es que se ha dado evidencia a las teorías de Tectónica de Placas y esfuerzos en la zona de subducción, su uso esencial es para determinar el efecto de propagación de una señal sísmica, a partir de la determinación del efecto de mecanismo de la fuente.*

TABLA No.4.- ARCHIVO DE ENTRADA, DATOS DE CONTROL DEL PROGRAMA HYPO71

5

HEAD

RESET TEST( 1)= 0.2  
 RESET TEST( 2)= 10.0  
 RESET TEST( 3)= 2.0  
 RESET TEST( 4)= 0.05  
 RESET TEST( 5)= 2.5  
 RESET TEST( 6)= 0.05  
 RESET TEST( 7)= -0.87  
 RESET TEST( 8)= 2.00  
 RESET TEST( 9)= 0.0035  
 RESET TEST(10)= 50.0  
 RESET TEST(11)= 50.0  
 RESET TEST(12)= 0.5  
 RESET TEST(13)= 2.5

1

MIX +19	54.50N	96	52.20W	420	2	0.08	0.14
EMC +19	58.23N	96	36.63W	80	2	0.02	0.03
FAR +19	38.09N	96	24.55W	43			
SOM1+19	35.50N	96	25.05W				
JMT +19	51.70N	96	36.34W	830	2	0.16	0.27
SOM +20	39.73N	105	11.14W				
SMO +21	21.20N	104	30.13W				
SOR +21	47.74N	104	54.26				
HYM +21	55.25N	104	30.48				
BUR +21	24.80N	104	33.32W				
GUI +21	51.75N	104	49.37W				
CAS +21	46.35N	104	51.20W				
ARR +22	05.74N	105	06.95W				
CAP +20	55.04N	103	34.36W				
COL +18	35.43N	103	42.14W				
TAO +21	10.08N	103	33.08W				
SUS +21	10.36N	103	26.00W				
AGP +20	44.17N	103	22.13W				
SAB +21	57.29N	104	33.31W				
EMB +20	33.85N	104	52.61W				
PLN +20	43.24N	103	18.32W				
PAL +21	51.46N	104	43.28W				
TER +21	39.96N	104	16.80W				
CAR +21	07.50N	104	09.75W				
TGY +19	35.23N	96	36.98W	700	2	0.17	0.28
JAL +19	21.27N	96	47.77W	450	2	0.08	0.14
MAN +19	35.40N	96	25.00W	195	2	0.03	0.06
JIL +19	37.84N	96	56.26W	1330	2	0.26	0.46
PIN +19	26.67N	96	45.29W	800	2	0.16	0.27

3.5 0.0  
 5.0 6.5  
 6.1 15.0  
 8.1 40.0

10 45. 250. 1.78 4 0 0 1 1 0 1 0010 0 0.00

TABLA No.5.- ARCHIVO DE SALIDA, EVENTOS LOCALIZADOS CON EL PROGRAMA HYPO71

DATE	ORIGIN	LAT N	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM
900321	1030	13.82	20-55.27	103-24.95	12.02	2.40	6 194	16.3	0.03	0.5	1.3	C
900406	2341	2.15	20-52.48	103-28.42	6.56	2.03	5 150	11.3	0.02	0.2	37.1	D
900905	2321	13.56	20-47.22	103-20.02	14.88	2.18	5 227	6.7	0.04	0.2	0.2	C
900929	1043	32.01	20-47.39	103-20.96	6.26	1.89	6 211	6.3	0.02	0.4	0.3	C
920307	823	41.04	20-49.66	103-28.10	7.61	2.25	5 178	14.5	0.01	0.4	0.5	C
920327	129	8.05	20-48.16	103-23.60	6.95	1.96	4 191	7.8	0.05			C
920518	1618	1.65	20-51.03	103-20.23	18.13	2.22	6 240	13.1	0.02	2.0	2.2	C
930325	17 7	23.34	20-47.65	103-25.37	5.99	2.01	6 172	8.5	0.01	0.5	0.1	B
900406	2321	35.49	20-50.73	103- 5.13	7.65	1.94	5 293	31.9	0.02	0.4	8.1	D
900407	038	6.49	20-44.74	103- 6.35	14.75	1.79	5 304	27.4	0.02	0.2	0.3	C
900509	010	1.77	20-45.92	103- 6.37	14.19	2.04	6 300	27.5	0.02	0.3	0.2	C
900915	614	15.26	20-57.27	103-23.55	6.66	2.00	6 184	19.2	0.06	0.4	96.2	D
900915	916	12.35	20-56.67	103-21.94	6.76	1.80	6 196	21.7	0.05	0.4	88.7	D
920323	1643	8.63	20-52.40	103-13.20	12.22	1.94	6 290	19.1	0.02	0.7	1.7	C
920501	2252	32.89	20-49.35	103-17.32	6.55	2.08	5 259	11.4	0.01	0.1	8.7	D
920506	2336	0.80	20-51.13	103-22.49	7.54	1.84	5 224	12.9	0.02	2.3	11.3	D
920512	2012	31.00	20-51.25	103- 9.50	14.39	1.69	6 307	21.3	0.01	0.3	0.2	C
920526	2237	48.94	20-50.84	103-13.96	11.04	1.64	6 286	15.9	0.01	0.2	0.4	C
920623	1824	29.30	20-43.72	103- 6.35	11.82	1.79	6 334	20.8	0.01	1.2	0.5	C
920709	2033	34.57	20-49.05	103-19.49	14.08	1.99	5 236	10.1	0.05	1.0	1.1	C
921126	2328	12.34	20-48.91	103- 8.02	10.00	2.20	6 316	20.7	0.03	0.9	3.4	C
930105	2058	8.14	20-51.39	103-20.14	23.54	1.75	6 243	13.8	0.01	0.8	0.6	C
920908	1954	7.57	20-52.48	103-12.83	12.50	1.86	6 292	19.5	0.08	1.9	1.6	C
921111	035	19.55	21-10.47	103- 2.08	14.09	2.34	5 326	57.6	0.03	2.5	3.4	D
930111	1538	28.15	20-57.41	103-13.51	14.30	1.79	5 295	27.4	0.02	1.3	1.8	C
901108	1821	27.12	20-44.76	103-22.94	28.80	2.03	6 186	1.8	0.04	0.6	0.5	C
901109	2050	35.31	20-42.65	103-23.39	29.07	1.89	6 282	3.6	0.03	0.5	0.3	C
901207	1934	55.98	20-45.68	104-10.09	15.90	3.37	8 252	64.3	0.09	1.5	3.5	C
901213	050	58.37	20-46.06	103-28.18	6.47	3.40	10 296	19.7	0.13	1.8	9.6	C
910313	1856	21.78	20-53.20	103-24.61	0.06	2.31	6 286	17.2	0.77	7.8	4.4	D
910314	1741	12.46	20-25.98	103-32.07	0.07	3.35	6 308	53.8	0.90	4.0	10.5	D
910314	18 9	53.36	20-24.61	103-32.74	0.06	2.62	6 308	56.2	0.81	9.3	6.4	D
900705	2026	1.54	20-16.40	103-28.94	36.90	3.07	8 174	52.6	0.02	0.7	0.2	C
900705	2033	9.58	20-10.58	103-30.77	23.35	3.11	7 173	63.8	0.04	0.5	0.6	C
900705	2038	8.27	20- 9.59	103-31.25	10.33	3.05	5 178	65.7	0.04	2.0	0.3	C
900705	21 5	0.50	20-12.14	103-32.32	34.49	3.69	7 172	61.7	0.02	0.5	0.1	C
900705	22 6	8.50	20-14.68	103-27.42	7.89	3.22	6 178	55.2	0.02	0.6	0.3	C
900705	22 7	15.67	20-11.77	103-36.45	36.40	3.21	7 179	64.8	0.04	1.7	0.5	C
900705	2218	57.04	20-10.50	103-28.49	35.17	3.09	8 178	63.1	0.04	1.8	0.4	C
900705	2250	13.85	20-11.17	103-27.71	32.47	3.68	8 179	61.7	0.04	0.8	0.2	C
900705	2351	59.77	20-10.40	103-19.66	37.52	2.87	8 197	62.5	0.04	1.4	0.2	C
900706	138	59.52	20-18.49	103-26.44	35.46	3.68	6 179	48.0	0.05	1.9	0.4	C
900706	139	54.37	20-17.46	103-31.78	34.14	2.97	7 171	52.1	0.05	1.0	0.3	C
900707	2215	54.49	20- 9.37	103-23.57	30.37	3.37	8 188	64.3	0.02	0.5	0.1	C

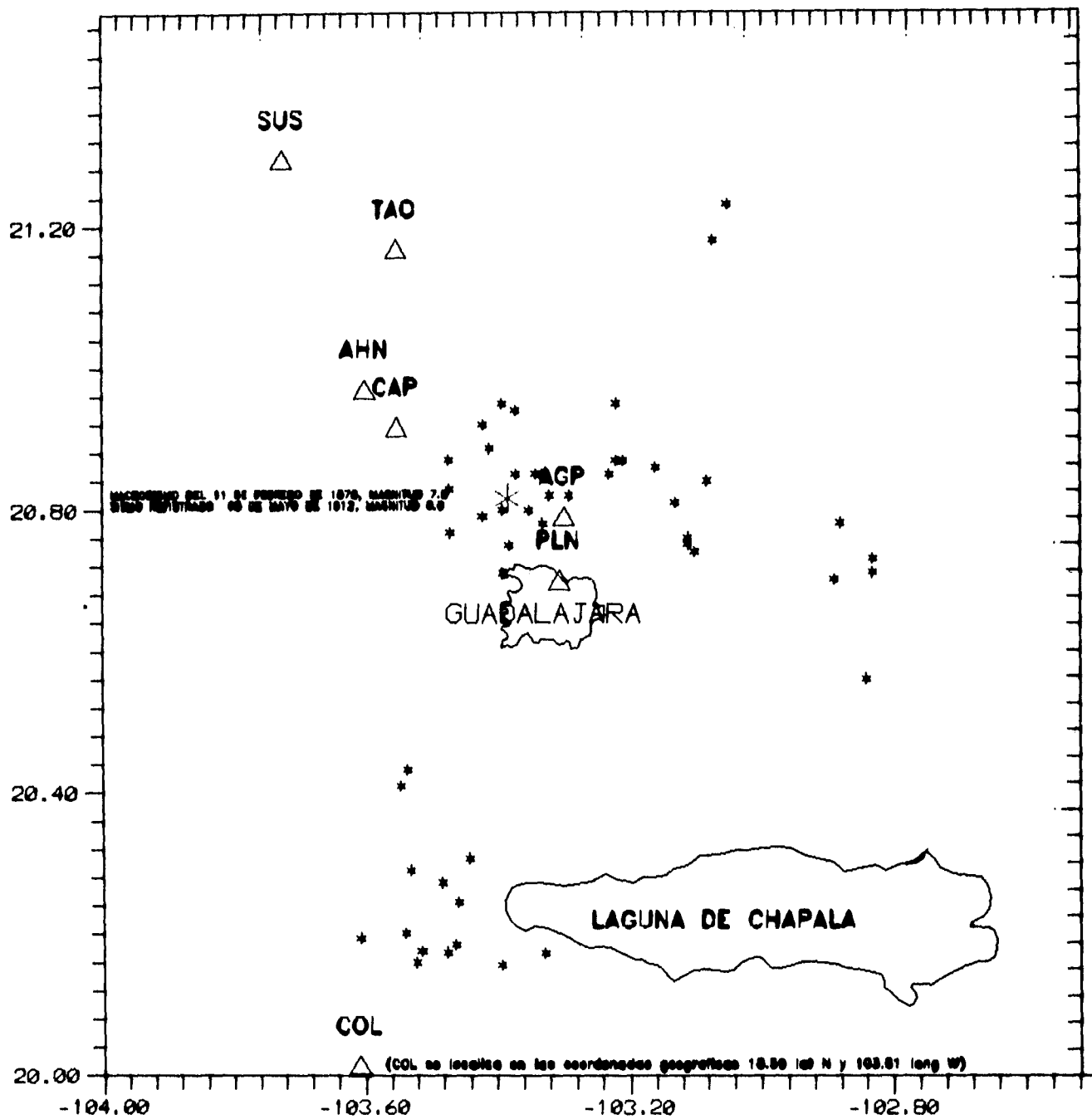


FIG 24.- LOCALIZACION DE EPICENTROS ENTRE LAS COORDENADAS GEOGRAFICAS 20.0 A 21.5 DE LATITUD NORTE Y 102.5 A 104.0 DE LONGITUD OESTE Y ESTACIONES SISMOLOGICAS TEMPORALES QUE SE INSTALARON EN LOS DIFERENTES ESTUDIOS DE LA C.F.E. EN EL PERIODO DE 1987 A 1993.

TABLA No.6.- ARCHIVO DE SALIDA DE LOS EVENTOS SISMICOS ASOCIADOS CON LA ZONA  
SISMOGENETICA RIO SANTIAGO.

DATE	ORIGIN	LAT N	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM	
900321	1030	13.82	20-55.27	103-24.95	12.02	2.40	6	194	16.3	0.03	0.5	1.3	C
900406	2341	2.15	20-52.48	103-28.42	6.56	2.03	5	150	11.3	0.02	0.2	37.1	D
900905	2321	13.56	20-47.22	103-20.02	14.88	2.18	5	227	6.7	0.04	0.2	0.2	C
900929	1043	32.01	20-47.39	103-20.96	6.26	1.89	6	211	6.3	0.02	0.4	0.3	C
920307	823	41.04	20-49.66	103-28.10	7.61	2.25	5	178	14.5	0.01	0.4	0.5	C
920327	129	8.05	20-48.16	103-23.60	6.95	1.96	4	191	7.8	0.05			C
920518	1618	1.65	20-51.03	103-20.23	18.13	2.22	6	240	13.1	0.02	2.0	2.2	C
930325	17 7	23.34	20-47.65	103-25.37	5.99	2.01	6	172	8.5	0.01	0.5	0.1	B
900406	2321	35.49	20-50.73	103- 5.13	7.65	1.94	5	293	31.9	0.02	0.4	8.1	D
900407	038	6.49	20-44.74	103- 6.35	14.75	1.79	5	304	27.4	0.02	0.2	0.3	C
900509	010	1.77	20-45.92	103- 6.37	14.19	2.04	6	300	27.5	0.02	0.3	0.2	C
900915	614	15.26	20-57.27	103-23.55	6.66	2.00	6	184	19.2	0.06	0.4	96.2	D
900915	916	12.35	20-56.67	103-21.94	6.76	1.80	6	196	21.7	0.05	0.4	88.7	D
920323	1643	8.63	20-52.40	103-13.20	12.22	1.94	6	290	19.1	0.02	0.7	1.7	C
920501	2252	32.89	20-49.35	103-17.32	6.55	2.08	5	259	11.4	0.01	0.1	8.7	D
920506	2336	0.80	20-51.13	103-22.49	7.54	1.84	5	224	12.9	0.02	2.3	11.3	D
920512	2012	31.00	20-51.25	103- 9.50	14.39	1.69	6	307	21.3	0.01	0.3	0.2	C
920526	2237	48.94	20-50.84	103-13.96	11.04	1.64	6	286	15.9	0.01	0.2	0.4	C
920623	1824	29.30	20-43.72	103- 6.35	11.82	1.79	6	334	20.8	0.01	1.2	0.5	C
920709	2033	34.57	20-49.05	103-19.49	14.08	1.99	5	236	10.1	0.05	1.0	1.1	C
921126	2328	12.34	20-48.91	103- 8.02	10.00	2.20	6	316	20.7	0.03	0.9	3.4	C
930105	2058	8.14	20-51.39	103-20.14	23.54	1.75	6	243	13.8	0.01	0.8	0.6	C
920908	1954	7.57	20-52.48	103-12.83	12.50	1.86	6	292	19.5	0.08	1.9	1.6	C
921111	035	19.55	21-10.47	103- 2.08	14.09	2.34	5	326	57.6	0.03	2.5	3.4	D
930111	1538	28.15	20-57.41	103-13.51	14.30	1.79	5	295	27.4	0.02	1.3	1.8	C
901108	1821	27.12	20-44.76	103-22.94	28.80	2.03	6	186	1.8	0.04	0.6	0.5	C
901109	2050	35.31	20-42.65	103-23.39	29.07	1.89	6	282	3.6	0.03	0.5	0.3	C
901207	1934	55.98	20-45.68	104-10.09	15.90	3.37	8	252	64.3	0.09	1.5	3.5	C
901213	050	58.37	20-46.06	103-28.18	6.47	3.40	10	296	19.7	0.13	1.8	9.6	C
910313	1856	21.78	20-53.20	103-24.61	0.06	2.31	6	286	17.2	0.77	7.8	4.4	D
910314	1741	12.46	20-25.98	103-32.07	0.07	3.35	6	308	53.8	0.90	4.0	10.5	D
910314	18 9	53.36	20-24.61	103-32.74	0.06	2.62	6	308	56.2	0.81	9.3	6.4	D

**TABLA No.7.- ARCHIVO DE SALIDA DE LOS EVENTOS SISMICOS ASOCIADOS CON LA ZONA SISMOGENETICA CHAPALA.**

DATE	ORIGIN	LAT N	LONG W	DEPTH	MAG	NO	GAP	DMIN	RMS	ERH	ERZ	QM	
900705	2026	1.54	20-16.40	103-28.94	36.90	3.07	8	174	52.6	0.02	0.7	0.2	C
900705	2033	9.58	20-10.58	103-30.77	23.35	3.11	7	173	63.8	0.04	0.5	0.6	C
900705	2038	8.27	20- 9.59	103-31.25	10.33	3.05	5	178	65.7	0.04	2.0	0.3	C
900705	21 5	0.50	20-12.14	103-32.32	34.49	3.69	7	172	61.7	0.02	0.5	0.1	C
900705	22 6	8.50	20-14.68	103-27.42	7.89	3.22	6	178	55.2	0.02	0.6	0.3	C
900705	22 7	15.67	20-11.77	103-36.45	36.40	3.21	7	179	64.8	0.04	1.7	0.5	C
900705	2218	57.04	20-10.50	103-28.49	35.17	3.09	8	178	63.1	0.04	1.8	0.4	C
900705	2250	13.85	20-11.17	103-27.71	32.47	3.68	8	179	61.7	0.04	0.8	0.2	C
900705	2351	59.77	20-10.40	103-19.66	37.52	2.87	8	197	62.5	0.04	1.4	0.2	C
900706	138	59.52	20-18.49	103-26.44	35.46	3.68	6	179	48.0	0.05	1.9	0.4	C
900706	139	54.37	20-17.46	103-31.78	34.14	2.97	7	171	52.1	0.05	1.0	0.3	C
900707	2215	54.49	20- 9.37	103-23.57	30.37	3.37	8	188	64.3	0.02	0.5	0.1	C

*Supongamos que tenemos un plano vertical de falla, sobre el cual se desplazaron los bloques A y B como se muestra en la Figura 25. La onda P generada, aparecerá inicialmente como una compresión al observador X y como una dilatación al observador Y. De hecho si trazamos una línea perpendicular al plano (Figura 26), tendremos 2 cuadrantes en los que los arribos de P sean compresiones (C) y 2 en los que sean dilataciones (D). Las líneas que separan estos cuadrantes se conocen como líneas nodales, que en la práctica marcan la proyección en la superficie de los dos posibles planos de falla, uno de ellos es el verdadero y el otro, ortogonal a él, es el llamado plano auxiliar. Para eliminar esta ambigüedad que arroja la solución del mecanismo focal, es necesario recurrir a evidencias físicas.*

*La totalidad de los esfuerzos en un punto, pueden ser representados por tres esfuerzos principales mutuamente ortogonales (Figura 27).*

*La dirección en la que se encuentran los mayores, es la llamada dirección o eje de máxima compresión, eje P ó  $\sigma_3$ . La dirección en la que se encuentran los menores, es llamada dirección de mínima compresión, eje de tensión, eje T ó  $\sigma_1$ . La tercera dirección la ocupan los esfuerzos intermedios.*

*Si sometemos una roca a esfuerzos en estas tres direcciones sufrirá una fractura cuando la diferencia entre los valores en las direcciones P y T alcancen un nivel crítico, el valor de los esfuerzos intermedios tiene en realidad poco efecto en como se desarrolla la fractura.*

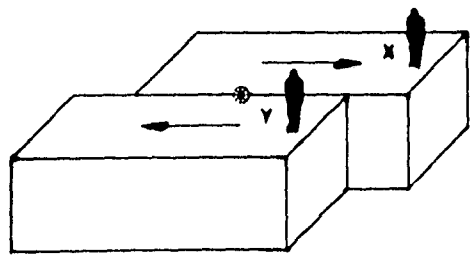
*En la Figura 27 se muestran los tres tipos de fallamiento que pueden ocurrir según la disposición de los esfuerzos, a saber: falla normal, (Figura 27a), falla inversa (Figura 27b), o falla de rumbo (Figura 27c), en la práctica las fallas que se observan son composición de las tres anteriores.*

*La forma como se representan estas fallas en un papel es a través del plano de falla graficado en una red estereográfica, que es una proyección bidimensional de una superficie hemisférica. Existen varios tipos de estas redes, una de ellas es la red de igual área o de Schmidt. Esta red se obtiene rotando cada punto del hemisferio sur hasta un plano tangente a la esfera en el polo sur a lo largo de un arco centrado alrededor del polo sur. Tiene la propiedad de que las áreas en la esfera original se mantienen en la proyección. Se usa esta red para obtener las soluciones de mecanismos focales porque la distribución de estaciones sobre la superficie de la tierra tiene la "correcta" distribución en la proyección.*

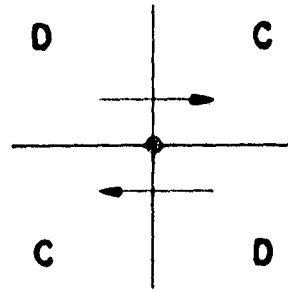
*Las coordenadas dibujadas en la red representan "Grandes círculos" y "Pequeños círculos" construidos usando un eje horizontal. En la práctica, la red no representa el hemisferio sur de la tierra, sino la parte inferior de una esfera centrada alrededor de la fuente sísmica.*

*Todos los posibles planos de falla pasan por el centro de la esfera y forman un gran círculo cuando intersectan a la esfera, el rumbo de cada plano y el azimut de cada rayo que parte de la fuente puede ser medido alrededor del círculo mayor (del perímetro) de la esfera y la*





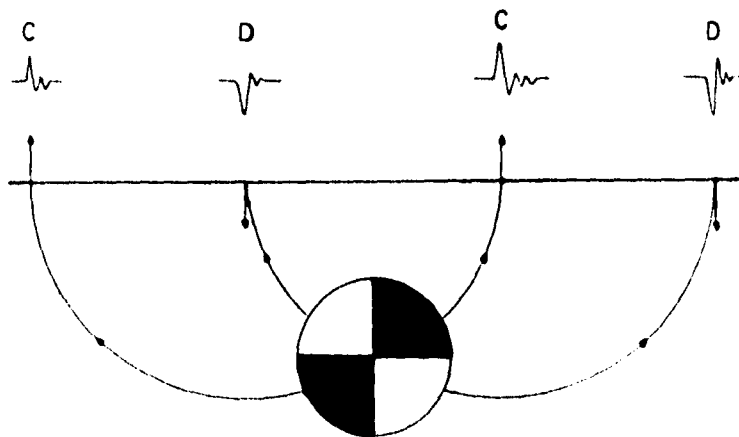
A



B

Afallamiento de dos bloques (A), zonas de compresión y dilatación (B).

FIG. 25



Esquema de la esfera focal y los rayos que llegan a la superficie con su movimiento correspondiente (compresión o dilatación).

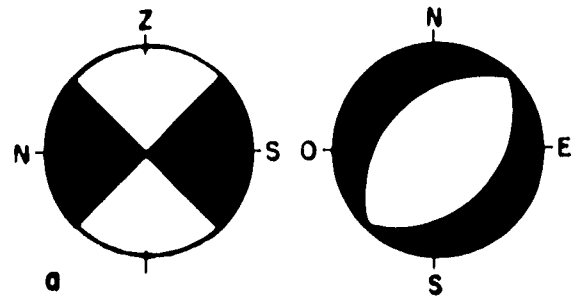
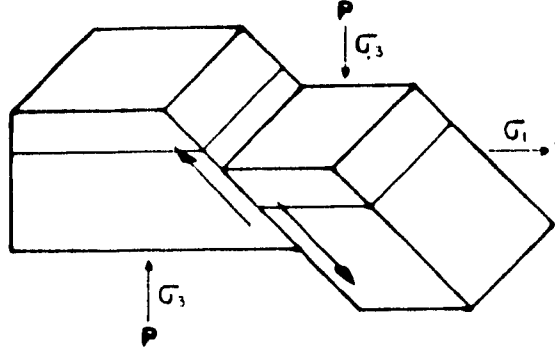
FIG. 26

### FALLA

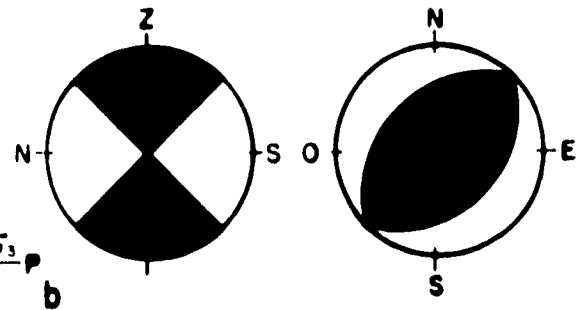
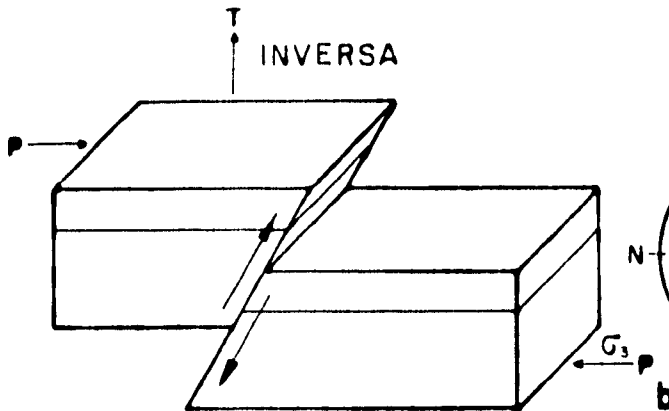
### ESFERA FOCAL

NORMAL

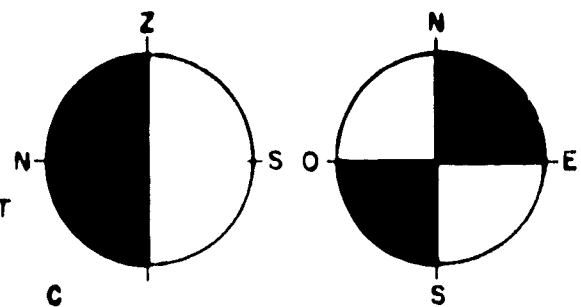
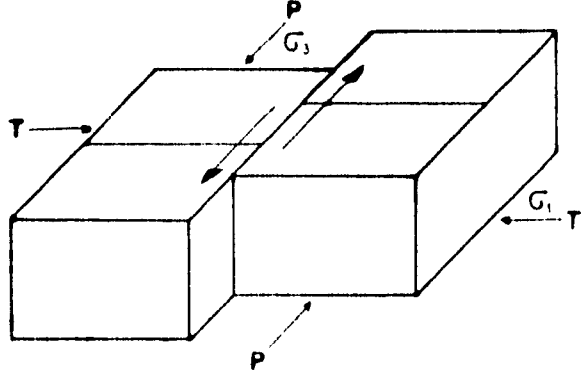
SECCION VERTICAL ESTEREOGRAFICA



INVERSA



DE RUMBO



Correspondencia entre el movimiento de tres tipos de fallas y su representación en la esfera focal (sección vertical y proyección estereográfica del hemisferio inferior).

FIG. 27

*inclinación puede medirse del exterior hacia el centro, cortando el número de grandes círculos que representan grados de inclinación (Figura 28).*

*Para todas las estaciones posibles, el primer arribo determina la polaridad (C o D) en la componente vertical, después se determina el azimut entre el epicentro y la estación y el ángulo de emergencia con el que sale el rayo de la fuente a cada estación. Este ángulo es el que se forma entre el rayo en el momento que sale de la fuente y la vertical (Figura 29) .*

*Este ángulo puede ser obtenido mediante la relación,*

$$\text{sen } \theta = \frac{dT_v}{d\Delta}$$

*donde*  $v$  *= distancia del centro de la tierra a la estación*

$r$  *= distancia del centro de la tierra al foco*

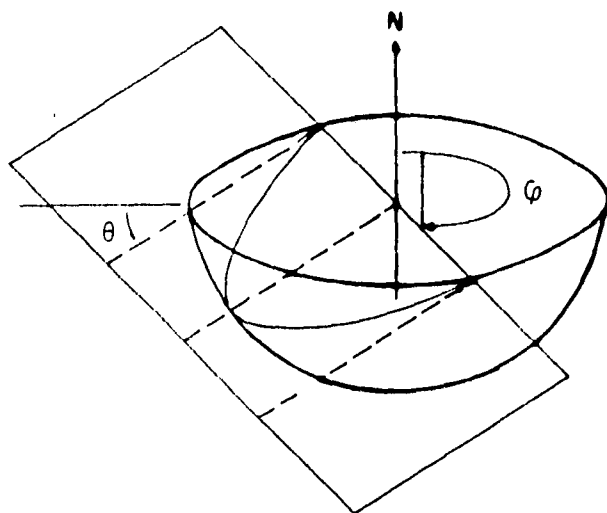
$T$  *= tiempo de viaje*

$\Delta$  *= distancia epicentral en grados*

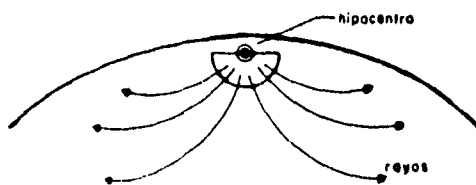
*Actualmente, existen tablas de ángulos de emergencia de ondas P para diversas distancias y profundidades por lo que es fácil encontrar  $\theta$  sin necesidad de hacer ningún cálculo. Una vez que se tienen conocidos la polaridad, el azimut epicentro de la estación y el ángulo de salida  $i$  se sigue el siguiente procedimiento:*

*Se inserta un alfiler en el centro de la red y se coloca encima un papel semitransparente para que pueda girar sobre el centro de la red, se marca en la posición inicial el norte sin mover el papel y se pueden marcar el azimut de la primera estación, para marcar el echado se gira el papel hasta que la marca del azimut coincida con el ecuador y el echado se marca contando los grados desde afuera hacia el centro, en este punto, se marca U o D según la polaridad que se muestre en el sismograma. Se repite el proceso para todas las estaciones, una vez que se tienen graficadas todas las compresiones y dilataciones en el papel, se separan en cuatro grupos (dilataciones y compresiones) mediante dos arcos de la red, con la única condición de que sean ortogonales entre sí (Figura 29).*

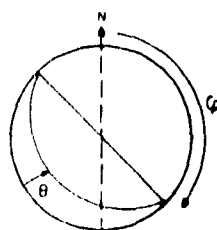
*Los ejes P y T se obtienen bisectando los cuadrantes, si los puntos normales a cada plano nodal se colocan sobre el mismo arco, uno de los ejes intersecta a la esfera en un punto sobre ese mismo arco situado a la mitad de la apertura que separa a los dos planos nodales (a 45°), el otro eje intersecta a la esfera en un punto a 90° del primero sobre el mismo arco.*



A



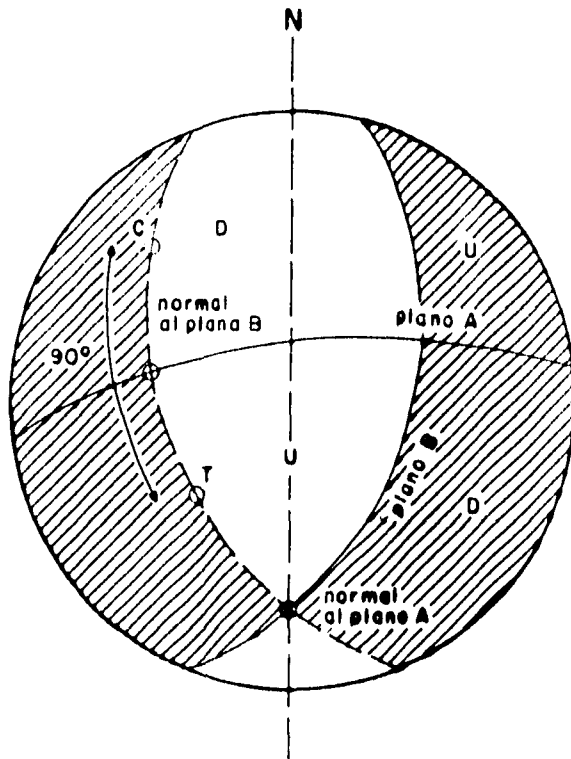
B



C

Esfera focal. (A) un plano que atraviesa a la esfera. (B) los rayos sísmicos que salen de la esfera. (C) la representación del plano en la red.

FIG. 28



**Mecanismo focal. La zona sombreada corresponde a la zona de compresiones (polaridades U) y la blanca a las dilataciones. C y T son los ejes de máxima compresión y máxima tensión respectivamente.**

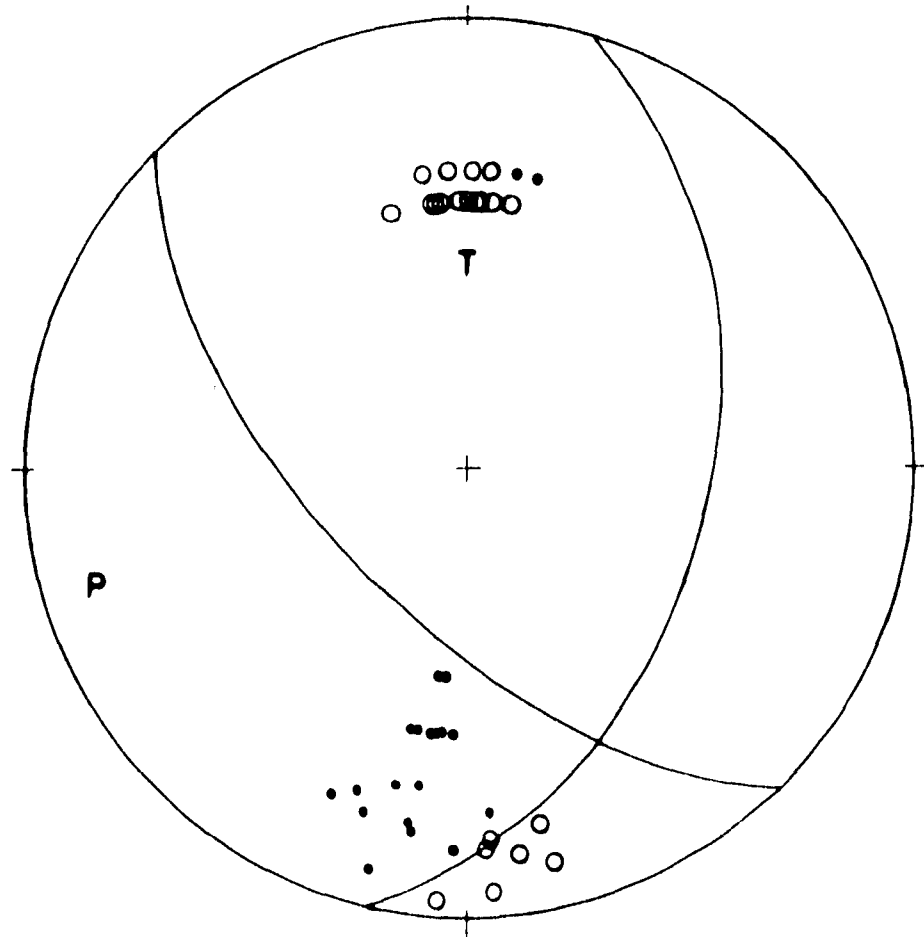
FIG. 29

*Actualmente existen programas de computación que grafican las estaciones en la red estereográfica, de tal manera, que uno solo tiene que escoger los diferentes arcos para separar los grupos de polaridades, con el uso de estos programas, se acorta significativamente el tiempo de construcción de mecanismos focales y se pueden hacer análisis estadísticos de conjuntos de mecanismos en lugar de trabajar con mecanismos aislados para determinar el estado de esfuerzos en una área.*

*En el caso particular de esta tesis, se utilizó el programa de Foco ver 2.0 del Instituto de Geofísica ( Sansores L. 1990 ), para calcular el mecanismo focal de los eventos clasificados como Chapala y Río Santiago, que se han asociado con las estructuras continentales más grandes que afectan a la ciudad de Guadalajara.*

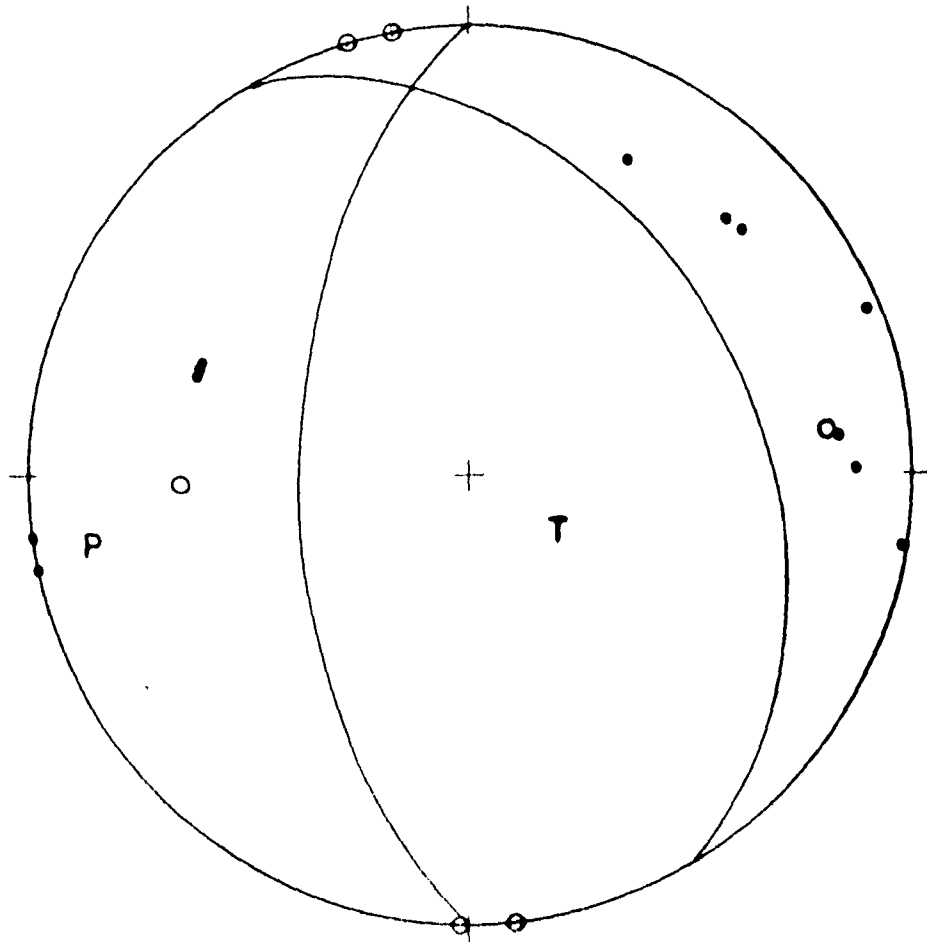
*Del análisis del mecanismo focal de los eventos sísmicos de la zona sismogénica Chapala, se determinó que están asociados con estructuras geológicas de orientación N15°E (Figura 30).*

*Del análisis del mecanismo focal de los eventos sísmicos de la zona sismogénica Río Santiago, se determinó que están asociados con estructuras geológicas de orientación N31°W (Figura 31).*



Mecanismo focal de los eventos de la zona  
sismogénica sur de Chapala.

FIG. 30



Mecanismo focal de los eventos de la zona  
sismogénica Río Santiago.

FIG. 31



## **V. INTEGRACION DE DATOS**

---

*Desde la instalación de los primeros tres sismógrafos en el año de 1987 en la cuenca del Río Santiago, se observó que esta área es sísmicamente activa, y que la mayor cantidad de eventos se concentran en la parte alta del Río Santiago. Hasta la fecha se tiene conocimiento de 11 zonas sismogénicas, de las cuales solo se discutirán en la presente tesis las dos que se localizan próximas a la ciudad de Guadalajara. Algunos datos relevantes ocurridos en esta área son:*

*Durante los días 12 al 15 de diciembre de 1988, se detectó un enjambre sísmico con un rango de magnitudes pequeñas variando de 0.9 a 2.5 grados que fue registrado por dos estaciones, se le asignó una localización probable en función de sus diferencias de S - P, correlacionándose con la apertura de una grieta en el poblado Santa Lucía.*

*En el mes de enero de 1990 se reubicaron los sismógrafos que componen la red sismológica de la cuenca alta del Río Santiago, con este nuevo arreglo de registro el primer evento sísmico en tres o más estaciones en el área estudiada, obteniendo una localización hipocentral cuyas coordenadas geográficas son: 20° 51.73' de Latitud Norte y 103° 26.09' de Longitud Oeste (Delgado V., 1990. Inédito, CFE).*

*En el mes de julio de 1991 se registró un sismo de 3.6 grados de magnitud de coda, obteniendo una localización hipocentral cuyas coordenadas geográficas son: 20° 49.49' de Latitud Norte y 103° 22.58' de Longitud Oeste (Delgado V. y Aguirre B., 1991. Inédito, CFE).*

*En la primera semana de marzo de 1992 se registraron 26 eventos sísmicos en un radio menor a 40 km de la estación sismológica Agua Prieta, el evento de mayor magnitud fue de 3.4 grados y ocurrió el día 01 de este mes (Delgado V., 1992. Inédito, CFE).*

*La geometría de la red sismológica de la cuenca del Río Santiago se modificó de 1987 a 1993, conforme a los programas de trabajo de investigación de los proyectos hidroeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (Delgado V., 1994. Inédito, CFE).*

*Los epicentros clasificados en las dos zonas sismogénicas que se analizan en este escrito, se graficaron en un plano geológico estructural simplificado, donde sólo se consideran las estructuras geológicas principales de carácter regional, así como la distribución de materiales*

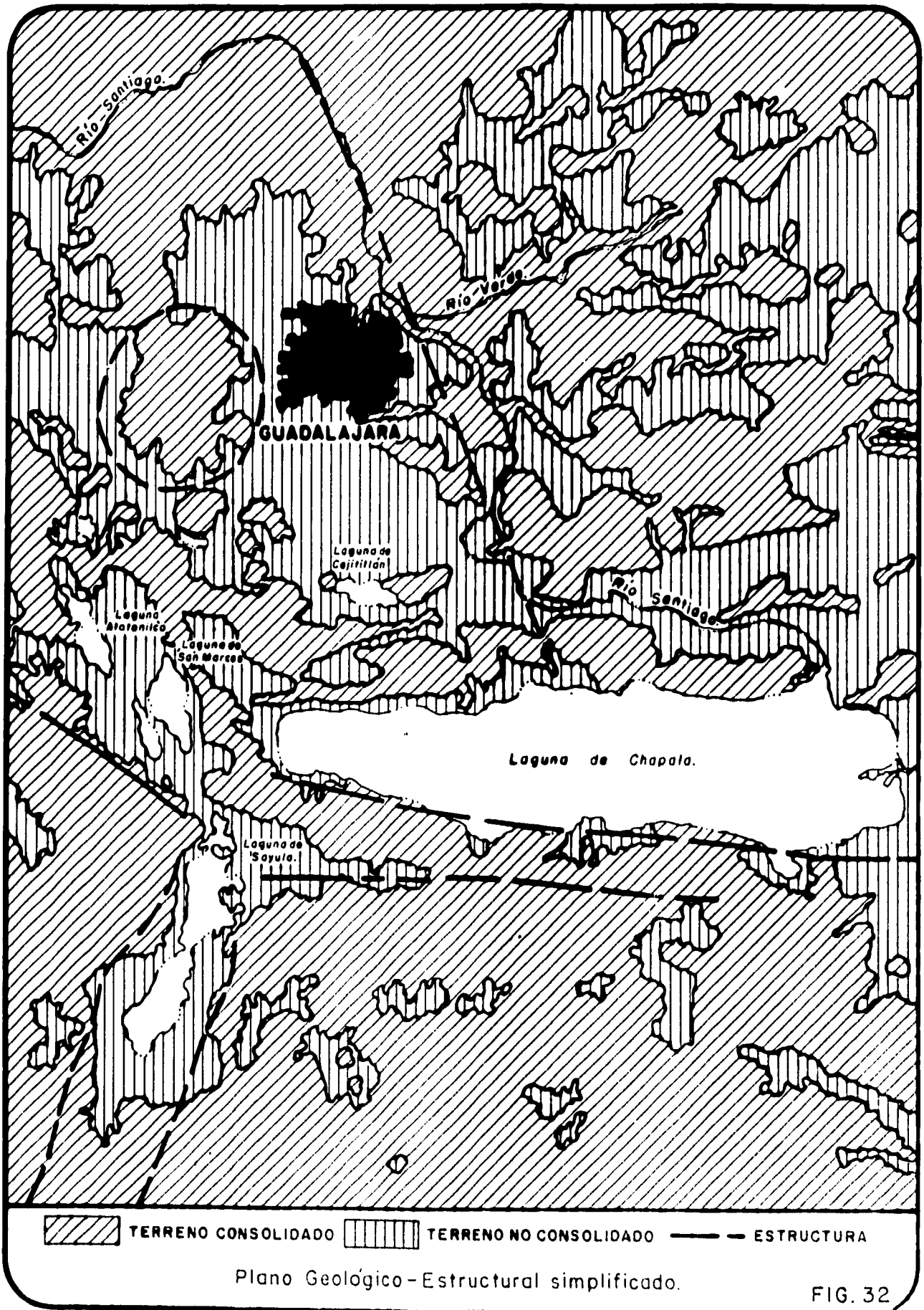
*no consolidados y roca, con la finalidad de correlacionar la actividad sísmica registrada en base al análisis de la solución del mecanismo focal compuesto, obtenido a partir de las agrupaciones epicentrales localizadas mediante la red sismológica de Comisión Federal de Electricidad con las estructuras geológicas del área, considerando la orientación de la traza de la falla en cuestión (Figura 32).*

*Del análisis de los datos recabados en la presente tesis que son:*

- a).- Distribución de eventos sísmicos*
- b).- Mecanismo focal compuesto*
- c).- Sismicidad histórica narrativa e instrumental*
- d).- Orientación de la traza de estructuras*

*Se determinó que la zona sismogénica Río Santiago, se correlaciona con la estructura geológica Tonalli que da origen al cauce del Río Santiago, precisamente que parte de la ciudad de Guadalajara hacia el río el Cuiztla y sustenta ser responsable del temblor ocurrido el 11 de febrero de 1875, el cual tuvo una intensidad máxima en la ciudad de Guadalajara de X en el escala de Mercalli Modificada (Figueroa, 1982) y localizó en las coordenadas geográficas 20° 49' de Latitud Norte y 103° 23' de Longitud Oeste, estimando una magnitud de 7.8 grados (Figura 33). Asimismo, el que se localizó instrumentalmente el 08 de mayo de 1912, con una magnitud de 6.0 grados localizado instrumentalmente en las coordenadas geográficas 20° 49.20 de Latitud Norte y 103° 22.8 de Longitud Oeste, el cual causó daños en la Catedral, Iglesia del Carmen, Instituto Colón, Teatro Principal; muchos derrumbes en casas humildes en los suburbios, provocó cuarteaduras en la Escuela Normal de Profesores, en la Penitenciaría, en el Teatro Degollado, Palacio de Gobierno, Centro Mercantil, Casino Jalisciense, Oficina de Telégrafos y Hotel Francis. Los movimientos siguieron sintiéndose y alarmando a la población de Guadalajara hasta el 15 de mayo.*

*La zona sismogénica Chapala se determinó, que se correlaciona con la estructura conocida como graben de Chapala-Colima aproximadamente a 35 km de la ciudad de Guadalajara, precisamente en la zona conocida como Punto Triple de Zacoalco donde se postula la unión de tres megaestructuras. La sismicidad registrada en esa zona se caracteriza por ser tipo enjambre esporádica, que concierne con procesos tectónicos asociados con vulcanismo, lo que sustenta ser responsable de los temblores ocurridos el 27 de diciembre de 1568, 16 de agosto de 1771, 1749, 25 de marzo de 1806 y 19 de enero de 1900 entre otros, con intensidades de IX a X, así como el temblor registrado instrumentalmente el 07 de junio de 1911 con una magnitud de 8.0 grados, destructor de Ciudad Guzmán, uno de los más fuertes de la República, el cual causó daños materiales de consideración, no solo en la región epicentral, sino en otros lugares. En México hubo 45 muertos y 22 heridos. A este sismo se le llamó Temblor de Madero. Es uno de los más fuertes registrado instrumentalmente en el país, en la Figura 34, se muestra el plano de isosistas (Figueroa, 1982).*



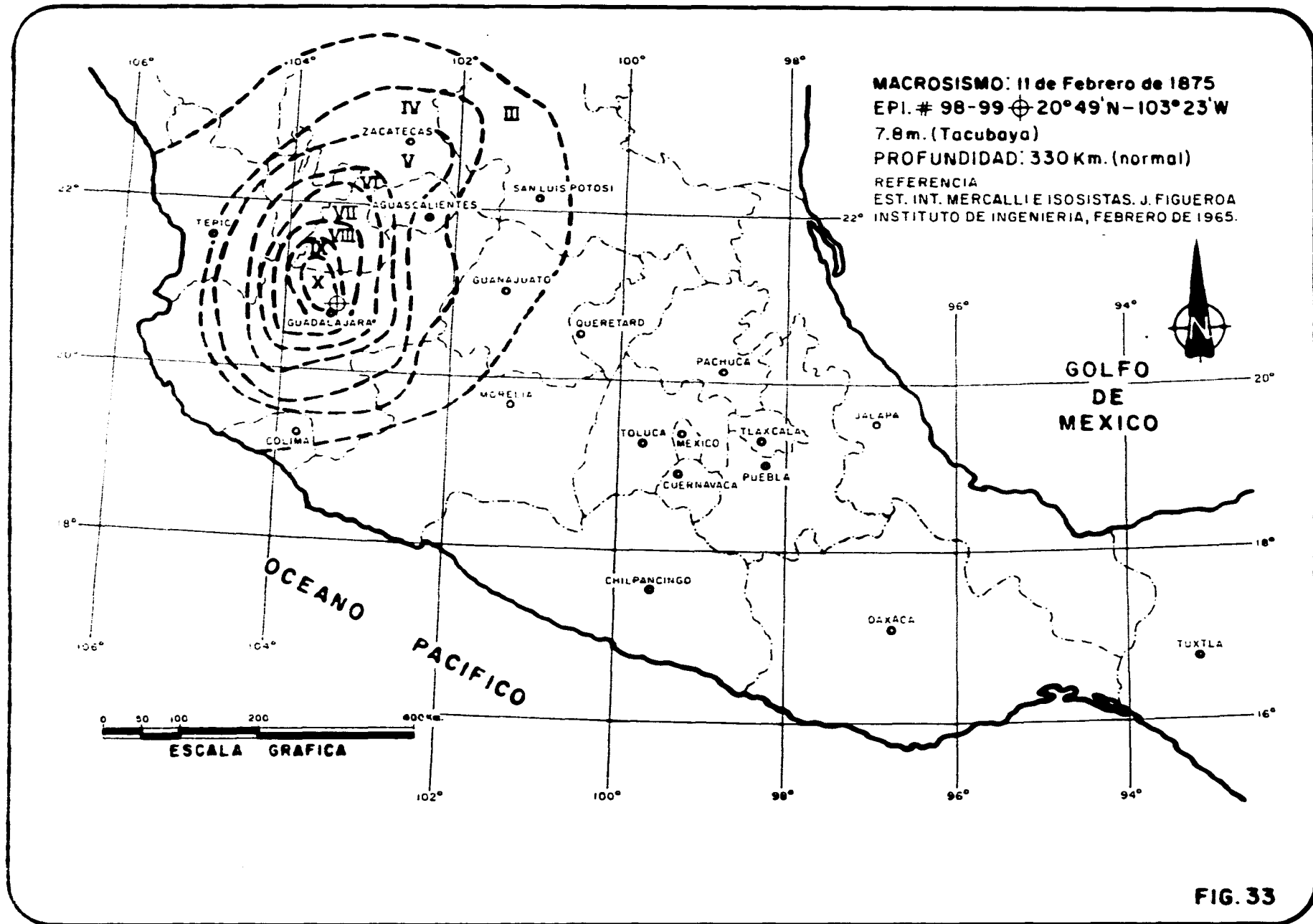
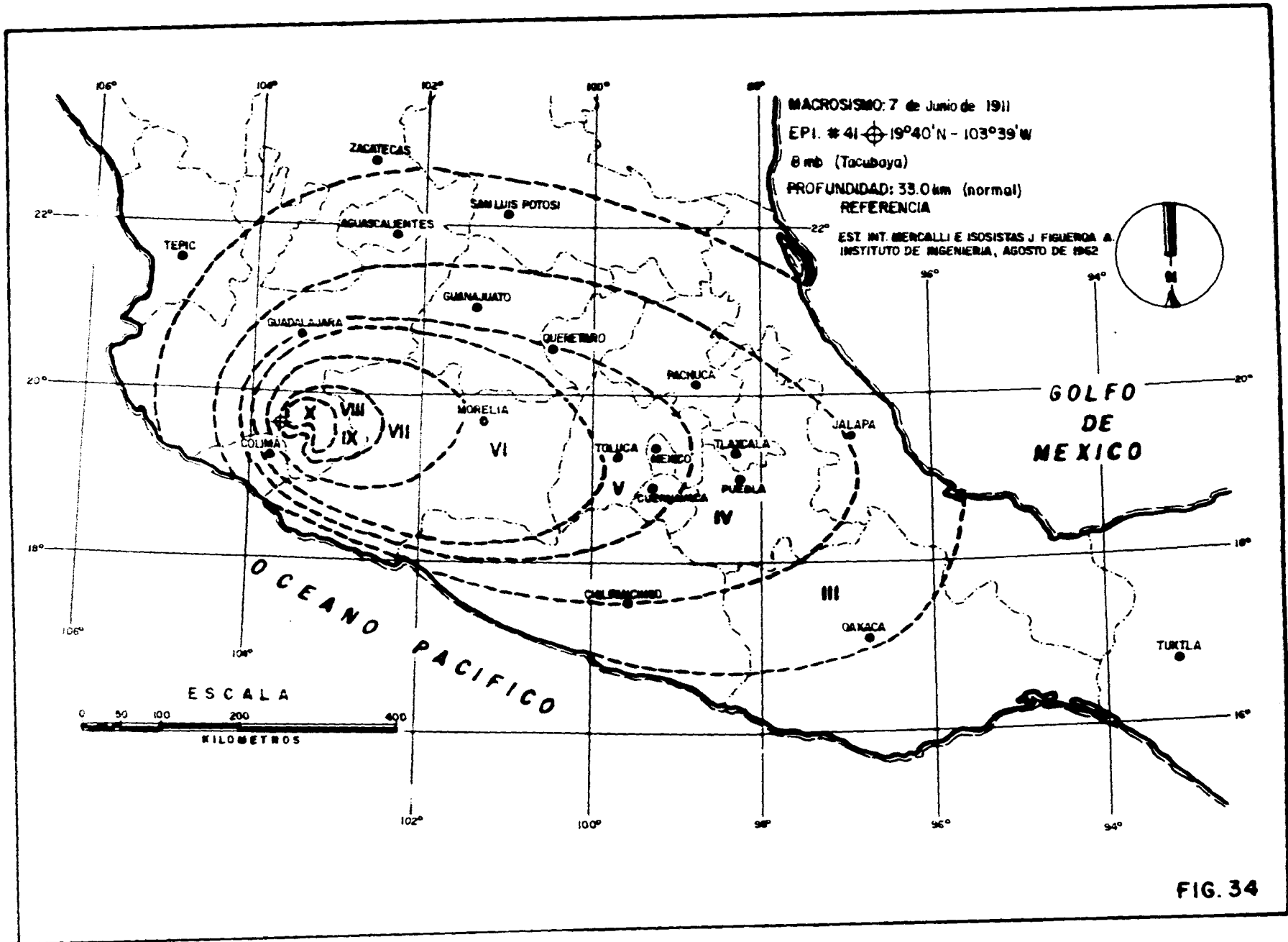


FIG. 33



En la Tabla No. 8, se muestra la correlación entre las estructuras geológicas y la orientación preferencial del mecanismo focal.

<b>TABLA No. 8.- CORRELACION ENTRE ESTRUCTURAS GEOLOGICAS Y MECANISMO FOCAL.</b>				
<b>ZONA SISMOGENETICA</b>	<b>ORIENTACION DEL MECANISMO FOCAL</b>	<b>TIPO DE FALLA</b>	<b>ESTRUCTURA GEOLOGICA ASOCIADA</b>	<b>ORIENTACION ESTRUCTURA</b>
<i>Río Santiago</i>	<i>N31°W</i>	<i>Normal</i>	<i>Tonalli</i>	<i>N30°W</i>
<i>Chapala</i>	<i>N15°E</i>	<i>Normal</i>	<i>Graben Chapala-Colima</i>	<i>N18°E</i>

En la Tabla No. 9, se presentan los macrosismos que se estima tienen origen en las zonas sismogénicas analizadas.

<b>TABLA No. 9.- ALGUNOS MACROSISMOS HISTORICOS OCURRIDOS EN EL ESTADO DE JALISCO ASOCIADOS A LAS ZONAS SISMOGENETICAS.</b>			
<b>FECHA</b>	<b>INTENSIDAD</b>	<b>MAGNITUD TENTATIVA</b>	<b>ZONA SISMOGENETICA</b>
<i>27 de dic. de 1568</i>	<i>IX-X</i>	<i>7 a 7.6</i>	<i>Chapala</i>
<i>16 de ags. de 1711</i>	<i>IX-X</i>	<i>7.5</i>	<i>Chapala</i>
<i>? de ? de 1749</i>	<i>IX</i>	<i>7.0</i>	<i>Chapala</i>
<i>25 de mar. de 1806</i>	<i>X</i>	<i>7.5</i>	<i>Chapala</i>
<i>11 de feb. de 1875</i>	<i>X</i>	<i>7.8</i>	<i>Río Santiago</i>
<i>22 de mar. de 1878</i>	<i>VIII</i>	<i>6.5</i>	<i>Río Santiago</i>
<i>02 de mar. de 1896</i>	<i>VIII-IX</i>	<i>6.5</i>	<i>Chapala</i>
<i>19 de ene. de 1900</i>	<i>X</i>	<i>7.8</i>	<i>Chapala</i>
<i>08 de may. de 1912</i>	<i>VII</i>	<i>6.0</i>	<i>Río Santiago</i>

Conociendo las estructuras que se estima son las que generaron los macrosismos y la magnitud que se puede esperar de su ruptura, de acuerdo con la sismicidad histórica, se analiza la distribución de la aceleración en función de la magnitud y la distancia al hipocentro según Campbell, 1981, que utilizó 229 componentes horizontales de registros de aceleración de 27 terremotos dentro de un radio de 50 km de la zona de ruptura, concluyendo que para sismos de 5.0 a 7.7 la relación que involucra estos aspectos es

$$PGA = 0.0159 \text{ EXP } (0.868) /R + 0.0606 \text{ EXP } (0.70 M) - 1.09]$$

donde:  $PGA =$  *Máxima Aceleración Horizontal.*  
 $M =$  *Magnitud Richter*  
 $R =$  *Distancia desde la zona de ruptura*

*Los coeficientes los determinaron estadísticamente basados en distribuciones empíricas.*

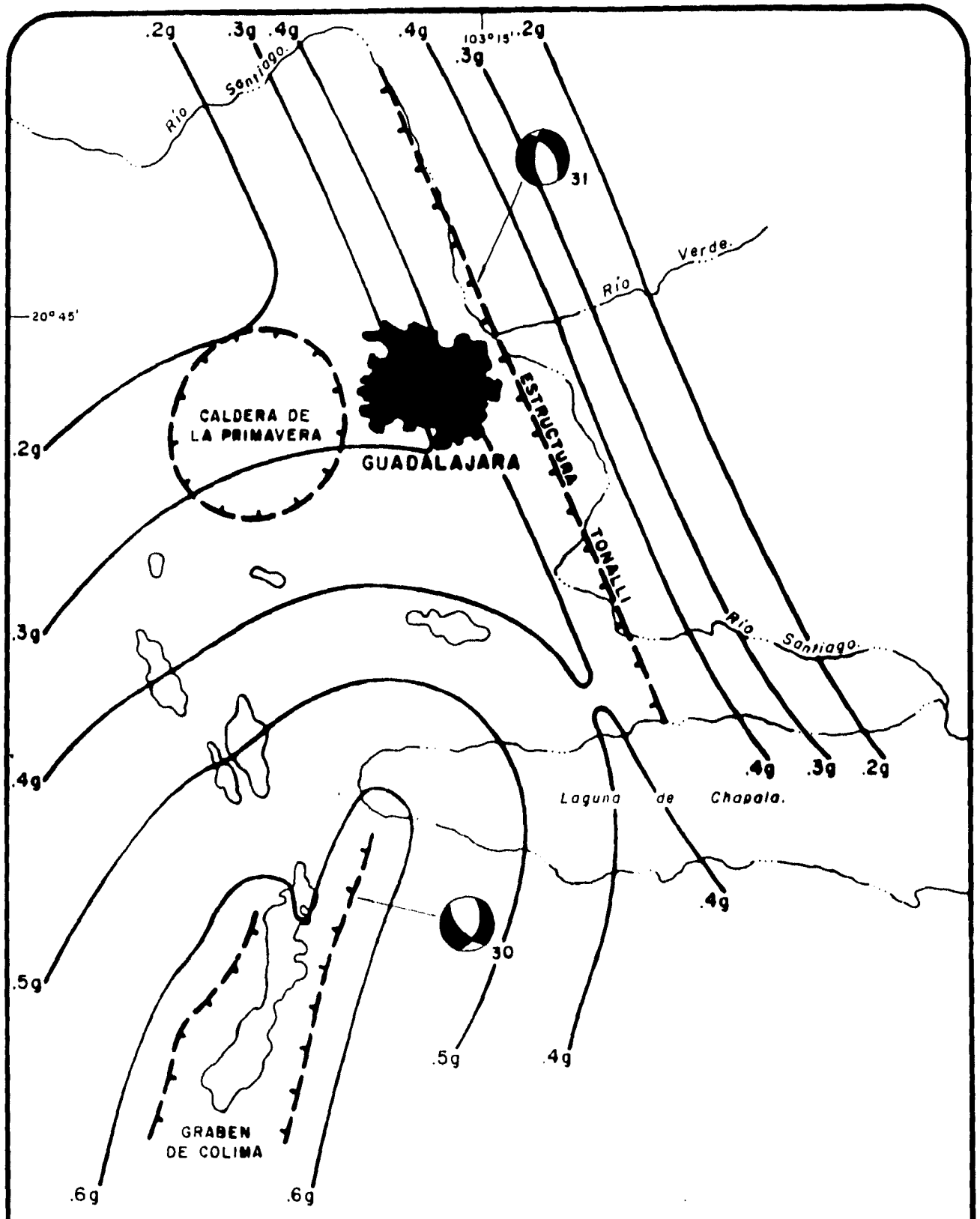
*De tal manera se tiene para la estructura Tonalli magnitudes máximas de 7.8 grados, según el sismo de 1875 y de 6.0 grados el del 8 de mayo de 1911. Se debe considerar que la magnitud reportada en 1875 se estimó de acuerdo a los daños reportados y supusieron una profundidad de 33.0 km, por lo que se considera que este sismo fue de menor magnitud pero más somero, ya que en esta estructura todas las profundidades reportadas de los sismos registrados son menores de 10 km. Para los cálculos de aceleración de la zonificación sísmica en la zona urbana de Guadalajara, se utilizará este último resultado.*

*Para la estructura del graben de Chapala se tienen magnitudes tanto teórica como reportada instrumentalmente similares 7.9 y 8.0 grados, respectivamente, se utilizará la magnitud de 8.0 grados para efectos de zonificación.*

*La clasificación y agrupación de diferentes tipos de suelos y rocas presentes en la región que se observan en el plano geológico, se simplificó a materiales no consolidados y consolidados, debido a que los materiales no consolidados tienen respuesta natural a las bajas frecuencias y los materiales consolidados tienen respuesta natural a las altas frecuencias; la importancia de tomar en cuenta el tipo de material donde se desplantan las construcciones radica en que los temblores locales tienen un alto contenido de altas frecuencias, mientras que los sismos lejanos (telesismo) llegan con un contenido de bajas frecuencias y grandes amplitudes, así el efecto de sitio depende del tipo de material y este factor modifica el resultado del efecto en el sitio producto del temblor. En la Figura 35 se muestran las aceleraciones teóricas para la zona urbana de la ciudad de Guadalajara, sin tomar en cuenta el efecto de sitio.*

*Con el cálculo de las aceleraciones con respecto a la distancia, se elaboró el plano de zonificación sísmica donde se delimitaron las zonas de alto, mediano y bajo riesgo (Figura 36), donde se puede ver que la zona próxima al cauce del Río Santiago donde se propuso la Estructura Tonalli es la de mayor riesgo para la zona urbana de la ciudad de Guadalajara, empero pueden existir otras zonas sismogénicas de menor tamaño que tengan mayor influencia en una zona determinada, siendo necesario el monitoreo sísmico permanente de la red local de la ciudad de Guadalajara, así como de la red acelerográfica.*

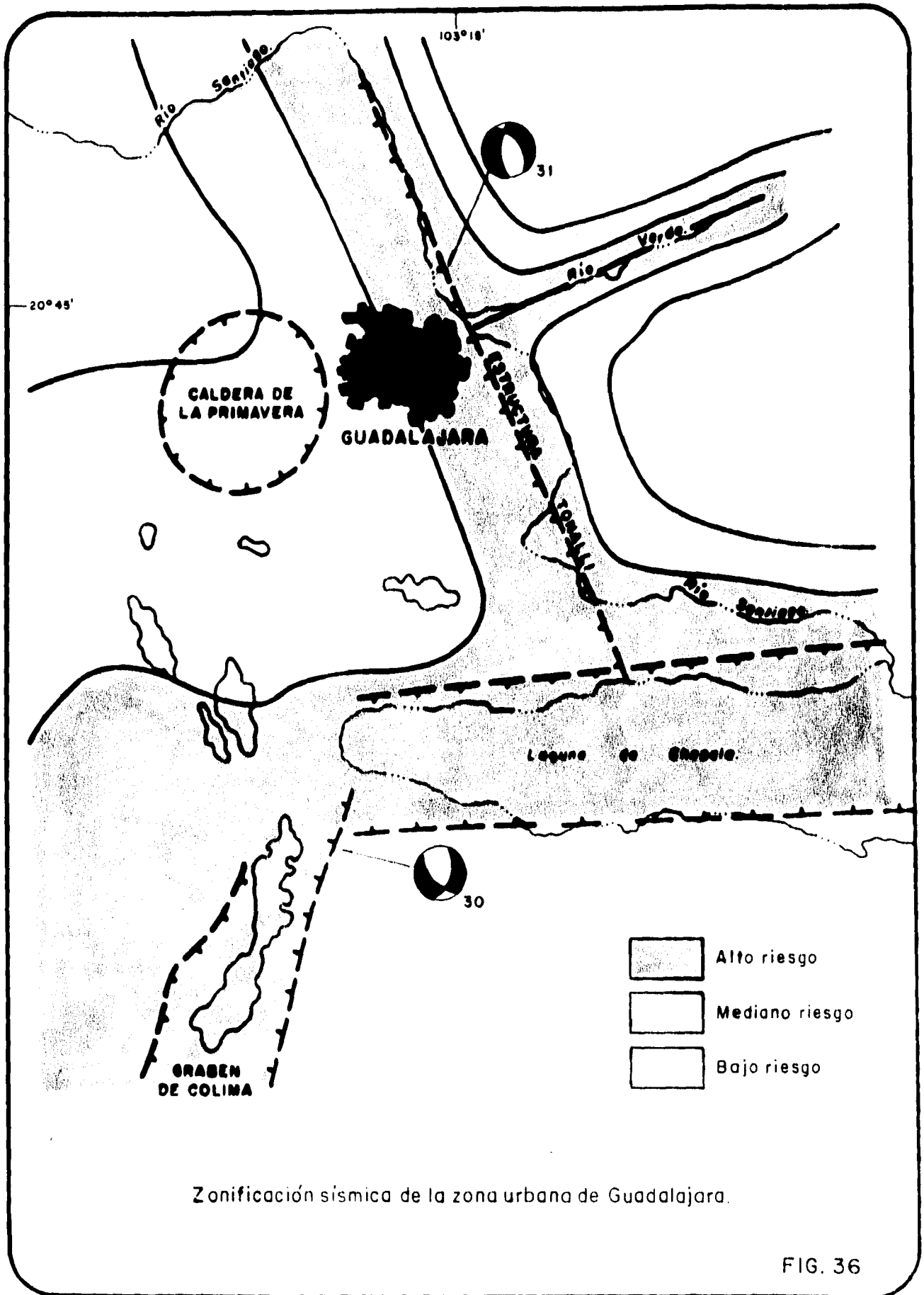
*Analizando la distribución epicentral de la figura 6 y las zonas de riesgo de la figura 36, se determina que los bloques limitados por los ríos Santiago-Verde-Juchipila, Santiago-Cuiztla-Bolaños y Santiago-Cuiztla-Juchipila son sísmicamente más estables que el bloque donde se construyó la ciudad de Guadalajara, concluyendo que el crecimiento urbano debe desarrollarse sobre el bloque limitado por los ríos Santiago-Verde-Juchipila (Figura 37).*



Estructuras geológicas asociadas con las zonas sismogénicas en base a la distribución de epicentros y solución de su mecanismo focal y aceleraciones teóricas, sin tomar en cuenta el factor de sitio.

FIG. 35





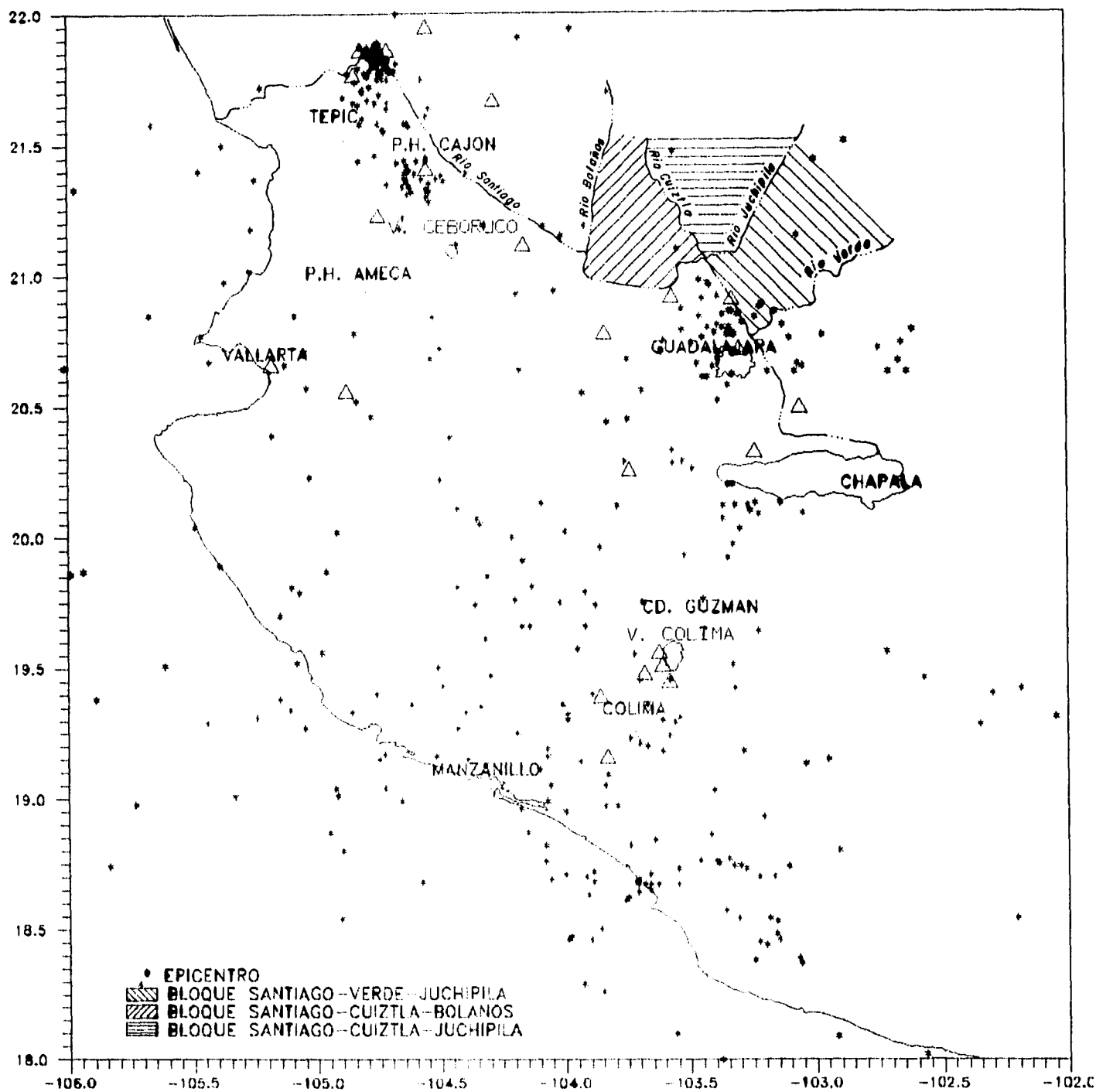


FIG 37.- LOCALIZACION DE BLOQUES SISMICAMENTE ESTABLES QUE SE PROPONEN PARA EL DESARROLLO DE LA ZONA URBANA DE GUADALAJARA

## **VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

- *La zona urbana de la ciudad de Guadalajara está cimentada y edificada casi en su totalidad en roca vulcanoclástica del Cuaternario.*
- *Tectónicamente el área donde se ubica la zona urbana de Guadalajara, está afectada por sistemas de fracturamientos regionales con orientaciones NE-SW y NW-SE principalmente.*
- *En base a investigaciones de diferentes autores, el llamado bloque Jalisco se determinó que tiende a migrar en la misma dirección de la Península de Baja California, aunque con menor velocidad, la zona urbana de la ciudad de Guadalajara se localiza en el borde NE.*
- *El área donde se ubica la zona urbana de Guadalajara es sísmicamente activa como lo evidencia la historia sísmica de la región y la registrada con las estaciones de la Comisión Federal de Electricidad en el periodo de 1987 a 1994.*
- *Se tiene conocimiento de dos zonas sismogénicas potencialmente peligrosas en la vecindad de la ciudad de Guadalajara, a éstas se les asignó el nombre de Río Santiago y Chapala.*
- *El sismo histórico de mayor magnitud para esta área ocurrió el 11 de febrero de 1875, con una intensidad entre IX y X grados en la escala de Mercalli Modificada estimando una magnitud de 7.8 grados, cuyas coordenadas geográficas son: 20° 49' de Latitud Norte y 103° 23' de Longitud Oeste.*
- *El sismo registrado instrumentalmente de mayor magnitud para esta zona ocurrió el 8 de mayo de 1912, con una magnitud de 6.0 grados y se localizó en las coordenadas geográficas 20° 49' de Latitud Norte y 103° 23' de Longitud Oeste.*
- *Se determinó que las zonas sismogénicas Río Santiago y Chapala se correlacionan con las estructuras geológicas Tonalli, Graben de Chapala-Colima y Caldera de la Primavera, respectivamente en base a la distribución de los epicentros, mecanismo focal y orientación de las estructuras geológicas.*

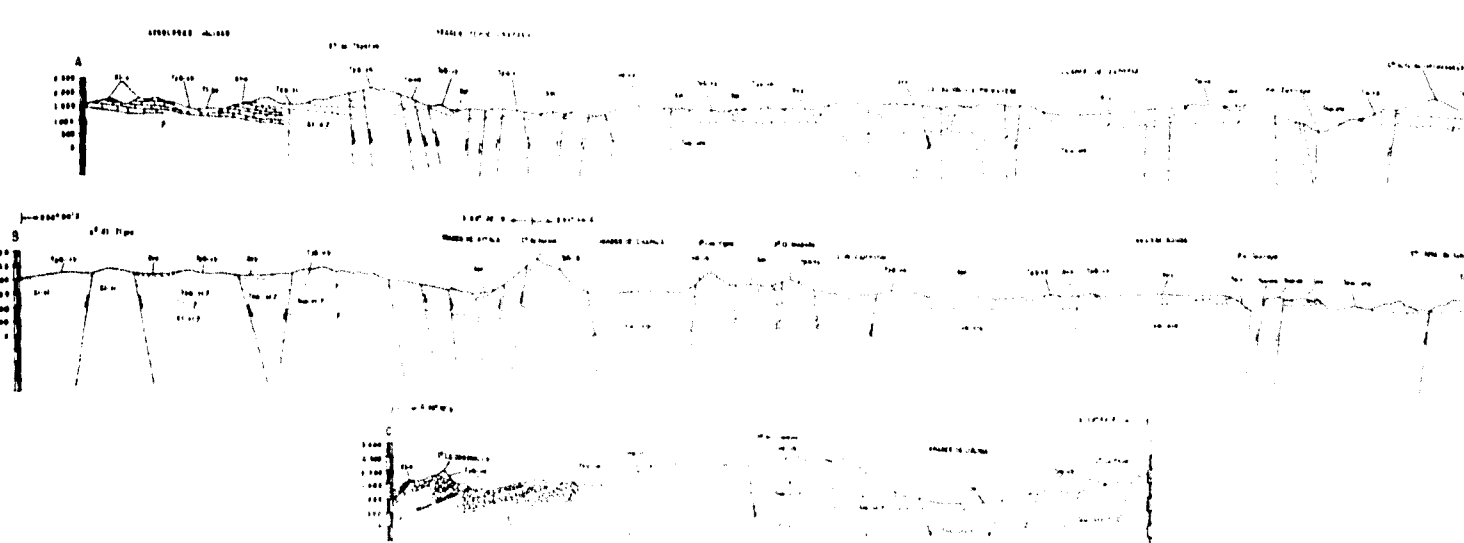
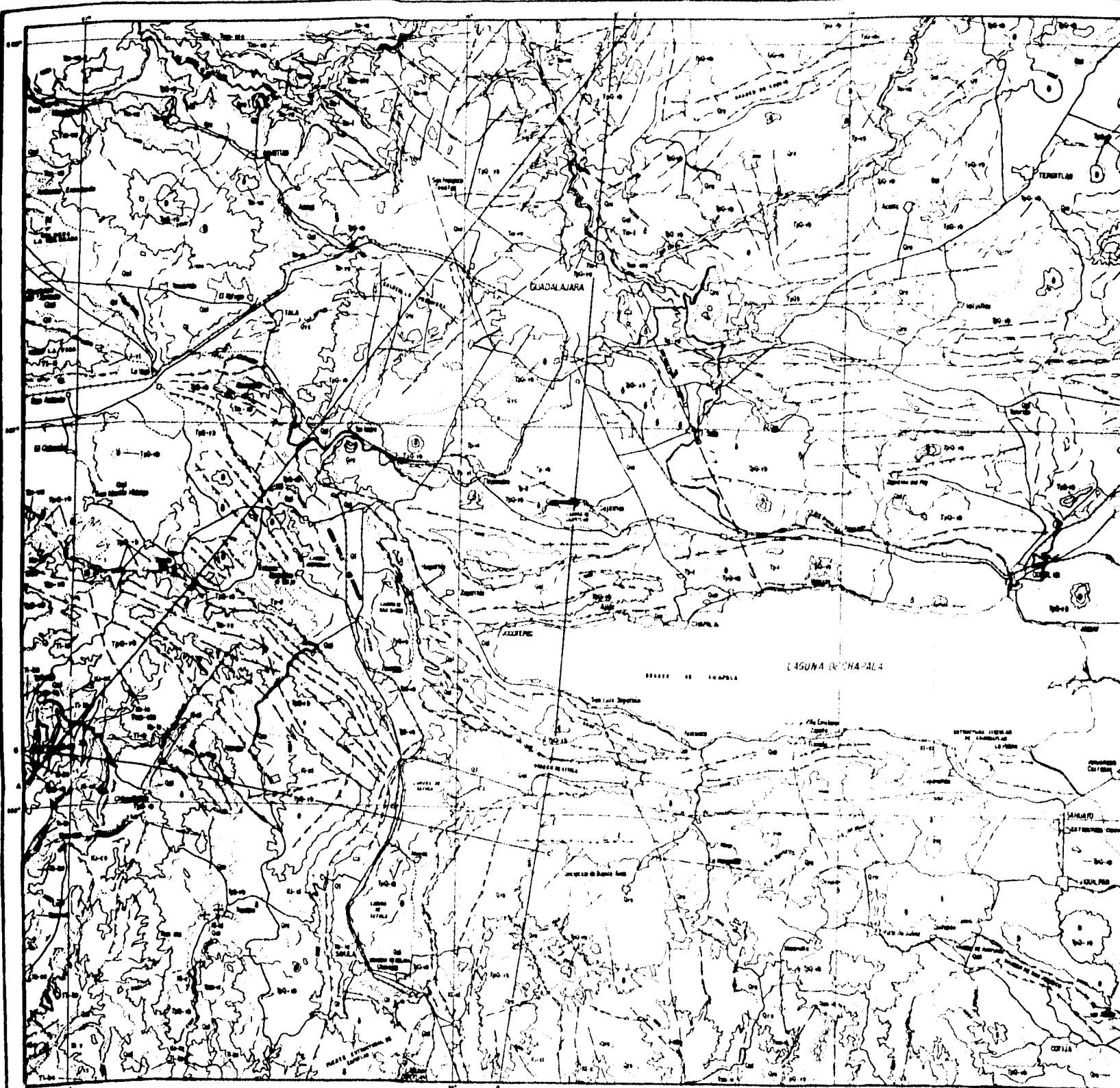
- *El área dentro de la zona urbana de Guadalajara con más riesgo sísmico local es la que se encuentra más cerca de la estructura Tonalli.*
- *Es conveniente aclarar que no se está tomando en cuenta en la presente tesis el riesgo que implica sismos de fuentes lejanas como la Trinchera.*
- *Se consideró necesario instrumentar una red local permanente, con el fin de determinar con más precisión si existen otras zonas sismogénicas en el área.*
- *Es necesario realizar un estudio geológico a detalle en las zonas sismogénicas investigadas, para determinar con mayor certeza la geometría de estas estructuras como longitud y espesor, así como microzonificar más a detalle el tipo de suelo donde se construyó la ciudad.*
- *Es necesario continuar con el monitoreo de la red acelerográfica.*
- *Es importante recordar que si en el pasado han ocurrido macrosismos, en un futuro próximo puede ocurrir otro similar, por lo que es imprescindible motivar a la población civil y autoridades a tener una cultura sísmica que incluya aspectos constructivos, así como áreas diseñadas para contingencias.*
- *Los bloques limitados por los ríos Santiago-Verde-Juchipila, Santiago-Cuiztla-Juchipila y Santiago-Cuiztla-Bolaños son sísmicamente más estables que el bloque donde se construyó la ciudad de Guadalajara.*
- *El crecimiento urbano debe desarrollarse sobre el bloque Santiago-Verde-Juchipila.*

## BIBLIOGRAFIA

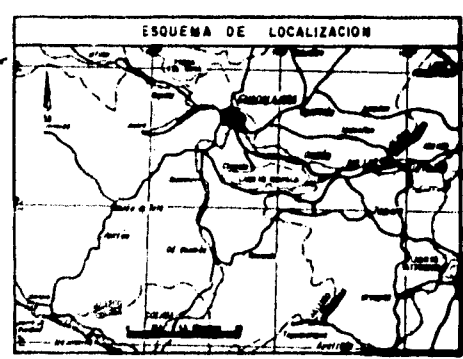
- AGUILAR V.F., DELGADO V.M.A., 1990.** 4° informe técnico, monitoreo sísmico en el río Santiago. Inédito CFE.
- ALLAN, J.F., 1986.** *Geology of the northern Colima and Zacoalco grabens, southwest Mexico-late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt: Geological Society of America Bulletin*, v. 97, p. 473-475.
- ALLAN, J.F., NELSON, S.A., LUHR, J.F., CARMICHAEL, I.S.E., y WOPAT, M.A., 1991.** *Pliocene-Holocene rifting and associated volcanism in south-west Mexico-an exotic terrane in the making*, in Dauphin, J.P., y Bernd, R., eds., *The Gulf and Peninsular Province of the Californias: American Association of Petroleum Geologist Memoir* 47.
- BARRIER, ERIC; BOURGOIS, JACQUES; y MICHAUD, FRANCOIS, 1990.** *Le système de rifts actifs du point triple de Jalisco-vers un proto-golfe de Jalisco: Comptes rendus de l'Academie des Sciences (Paris)*, v. 307, ser. 2, p 1513-1520.
- BECK M. E. BURMESTER R. F., ENGBRESTSON D. C. and SCHOONOVER R. 1981.** *Northward translation of Mesozoic batholiths, western North America: Paleomagnetic evidence and tectonic significance. Geof. Int. Vol. 20-3, 1981, pp. 143-162.*
- BOURGOIS, JACQUES; RENARD, VINCENT; AUBOIN, JEAN; BANDY, WILLIAMS; BARRIER, ERIC; CALMUS, THIERRY; CARFANTAN, J.C.; GUERRERO, JOSE; MAMMERICKX, JACQUELINE; MERCIER DE LEPINAY, BERNARD; MICHAUD, FRANCOIS; and SOSSON, MARC, 1988a.** *Fragmentation en cours du bord Ouest du Continent Nord American-les frontières sous-marines du Bloc Jalisco (Mexique): Comptes rendus de l'Academie des Sciences (Paris)*, v. 307, ser. 2, p. 1121-1130.
- CAMPBELL K. W., 1981.** *Near source attenuation of peak horizontal acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 71 pag. 2030-2070

- D. CASTILLO H. Y V. DE LA CRUZ, M., 1992.** Reconocimiento estructural y volcanológico en la zona termal del Domo San Pedro Lagunillas, Nayarit, México. *Geofísica Internacional* vol. 31 Núm. 4, pp. 407-415.
- DELGADO V., 1990.** Evento sísmico del 21 de marzo de 1990 en el Valle de Tesistán, Zapopan, Jal. Inédito CFE.
- DELGADO V., 1992.** Evento sísmico del 01 de marzo de 1992. Inédito CFE.
- DELGADO V. y AGUIRRE B., 1991.** Evento sísmico del 02 de Julio de 1991. Inédito CFE.
- DELGADO V., VAZQUEZ R., 1992.** 6° informe técnico sobre monitoreo sísmico del río Santiago. Inédito CFE
- DELGADO V., 1994.** Informe Sismotectónico Preliminar P.H. El Cajón, Nayarit. Inédito CFE.
- DEMANT, ALAIN, 1981.** L'Axe Néovolcanique Transmexican-étude volcanologique et pétrographique: signification géodynamique; Marsella. Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, disertación doctoral, 259 p.
- EISSLER H. y MC NALLY K., 1984.** Seismicity and tectonics of Rivera plate and implications for the 1932 Jalisco, Mexico earthquake. *J. Geophys. Res.*, vol. 89, pp 4520-4530
- FIGUEROA J., 1982.** Sismicidad en Jalisco Series del Instituto de Ingeniería No. 459.
- GARDUÑO V. y TIBALDI A., 1991.** Kinematic evolution of continental active triple junction of the western Mexican Volcanic Belt. *C.R. Acad. Sci. Paris, t. 312, serie II*, pp.135-142
- GONZALEZ G., A. MARTIN DEL POZZO J. PANOIAYA y J. DE GANTE., 1992.** Estudio de la sismicidad y deformación del volcán de Colima durante la crisis de abril de 1991. *Geofis. Int.* 32, 4
- HAVSKOV J. and MACIAS M., 1982.** A coda-length magnitude scale for some mexican stations. *Union Geofísica Mexicana*, Vol. 22, Núm. 3, pp. 205-213.
- HAVSKOV J., S. DE LA CRUZ, S K. SINGH., F. MEDINA y C. GUTIERREZ, 1983.** Seismic activity related to the March-April, 1982 eruption of El Chichon volcano, Chiapas, Mexico. *Geophys. Res. Lett.*, 10, 293-296
- IBARRA MAYCOTTE, JORGE, 1984.** Interpretaciones geotécnicas aplicadas a la estabilidad de taludes: Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas. Simposio La Mecánica de Rocas en México, México, D.F., Memoria, p. 295-359.

- LARSON R. L., H. W. MENARD, and SMITH., 1968.** *Gulf of California: Result of ocean floor spreading and transform faulting, Science* 161, 781-784
- LEE W.H.K. and LAHR J.C., 1978.** *A computer program for determining Hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. Open-File Report 75-311. U.S. Geological Survey.*
- LEE W.H.K. and VALDES C.M., 1985.** *HYPO71PC: A personal computer version of the HYPO71 earthquake location program, Open-File Report 85-749, United States Department of the Interior, Geological Survey.*
- LERMO J., CUENCA J., MONFRET T., HERNANDEZ F. J. y NAVA E., 1993.** *Algunas características espectrales de la sismicidad asociada a la actividad del volcán de Colima. Geofísica Internacional, vol. 32, núm. 4, pp. 683-697*
- LUHR, J.F., NELSON, S.A., ALLAN, J.F., y CARMICHAEL, I.S.E., 1985.** *Active rifting in southwestern México-manifestation of an incipient eastward spreading-ridge jump: Geology, v. 13, p.54-57.*
- NIETO-OBREGON, J.; DELGADO-ARGOTE, L.A. y DAMON, P.E., 1985.** *Geochronologic, petrologic, and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and the Mexican Volcanic Belt: Geofísica Internacional (México), v. 24, p.623-663.*
- PARDO M. and SUAREZ G., 1993.** *Steep subduction geometry of the Rivera Plate beneath the Jalisco block in western Mexico. Geophys. Res. Lett., 20, 2391-2394.*
- QUINTERO O., MICHAUD F., BURGOIS J. y BARRIER E., 1992.** *Evolución de la frontera septentrional del Bloque Jalisco, México, desde hace 17 Ma. Inst. Geol. UNAM, v.10 No. 2 pp. 111-117.*
- SANSORES I., 1991.** *Programa para resolver mecanismos focales. Instituto de Geofísica.*
- SINGH, S. K., PONCE L. and NISHENKO, 1985.** *The great Jalisco, Mexico, earthquake of 1932: Subduction of the Rivera Plate, Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 1301-1313.*
- VAZQUEZ R., 1993.** *Informe geológico preliminar del centro-este de Jalisco. Inédito CFE.*
- VAZQUEZ R., 1994.** *Informe geológico del centro-este de Jalisco. Inédito CFE.*

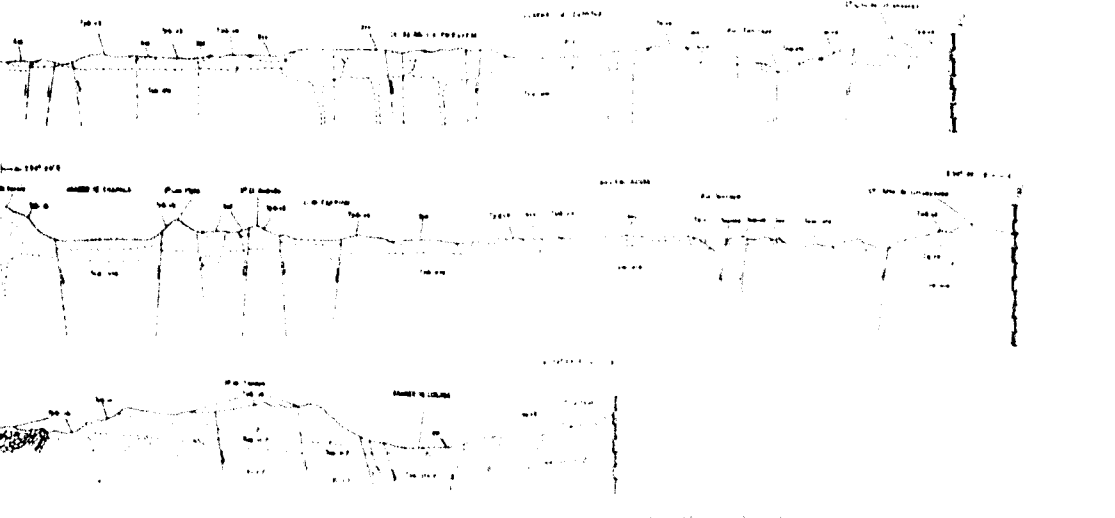
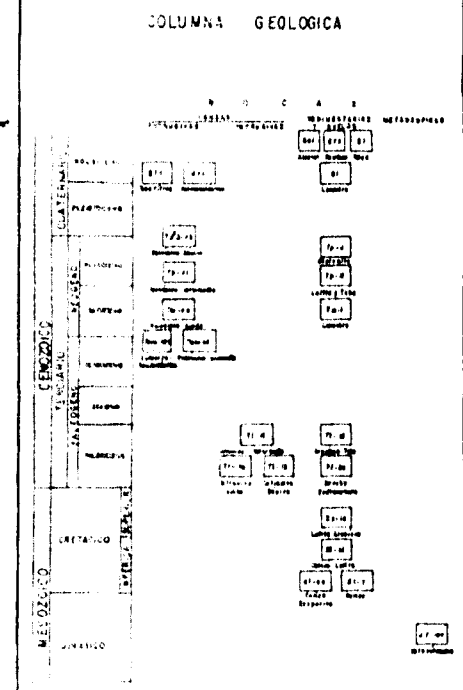






**SIMBOLOGIA**

GEOLOGICOS	TOPOGRAFICOS
—●— Contacto de angito	— Curvo de Nivel
— Fractura	+ Coordenadas
— Fractura lateral	— Rio
— Faja normal	— Arroyo
— Línea de Serranía	— F.F.C.C.
— Faja de Empujamiento	— Carretera
— Acarrete Aluvial	— Puesto
— Límite de Estructura	— Lago
— Rotomarcas	
— Anticlinal	



**PLANO GEOLOGICO  
PRELIMINAR DEL  
CENTRO-ESTE DE  
JALISCO  
(TOMADO DE CFE)**