

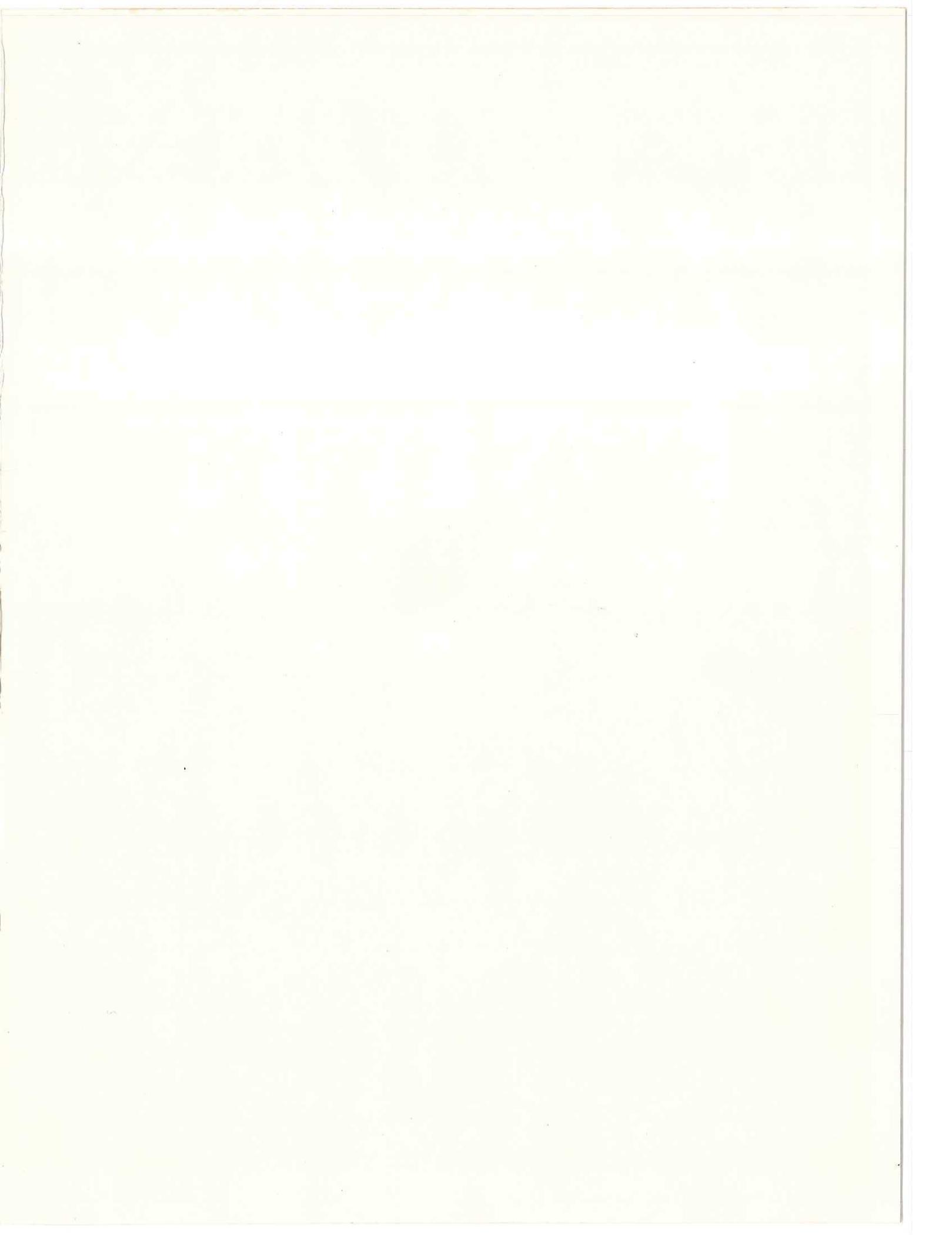
**CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA**

**CONTRIBUCION DE LA GRAVIMETRIA A LA
DETERMINACION DE ESTRUCTURAS QUE CONTROLAN
LA MIGRACION DE FLUIDOS EN LA SIERRA
DE LA PRIMAVERA, JALISCO, MEXICO.**

**T E S I S
MAESTRIA EN CIENCIAS**

MIGUEL ANGEL ALATORRE ZAMORA

Ensenada, Baja California, Junio de 1989.



RESUMEN de la tesis de Miguel Angel Alatorre Zamora presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN GEOFISICA con opción en GEOFISICA APLICADA. Ensenada, Baja California, México. Junio de 1989.

CONTRIBUCION DE LA GRAVIMETRIA A LA DETERMINACION
DE ESTRUCTURAS QUE CONTROLAN LA MIGRACION
DE FLUIDOS EN LA SIERRA DE LA PRIMAVERA,
JALISCO, MEXICO.

Resumen aprobado por:


Dr. Ricardo Fernández Tomé
Director de tesis suplente

Se llevó a cabo un estudio que combina aspectos geohidrológicos con estructuras geológicas en la Sierra de La Primavera, a partir de una base de datos de anomalía gravimétrica de Bouguer. Se utilizaron datos de 300 estaciones, correspondientes a un levantamiento a detalle en el Área de la Sierra, y datos de 456 estaciones abarcando un Área mas extensa que incluye los datos de la Sierra. De la anomalía de Bouguer se extrajeron los valores para el campo residual con superficies de tendencias regionales de primero y segundo orden, usándose por todo el estudio en forma extensa el primero de estos.

Para la obtención de la mayor cantidad de información posible, se realizaron sobre dicho residual una serie de continuaciones analíticas y derivaciones verticales. Las primeras proporcionaron una visión detallada de los mínimos y máximos mas preponderantes. Mientras que los mínimos se relacionan con fuentes profundas y de gran extensión, los máximos parecen pertenecer a estructuras más someras y de menores dimensiones. La segunda derivada vertical muestra una distribución y discernimiento de cuerpos mas detallada, enseñando estructuras compuestas de bloques, de forma alargada y con tendencia NW-SE. Con esta herramienta se postula el comportamiento de alineamientos en la zona asociados a fallas y fracturas.

Dentro de la interpretación cuantitativa se llevaron a cabo dos modelados directos y uno por inversión de datos. Este último proporcionó la base para el modelado bidimensional de 4 secciones mostrando la interfase andesitas-tobas+riolitas. Con el algoritmo de Talwani se modelaron estas cuatro secciones en un conjunto de 3 paquetes litológicos que son, de menor a mayor profundidad: 1)

sedimentos lacustres, Fm. Tala y riolitas vitrofíricas; 2) riolitas y tobas líticas; y 3) andesitas. Estos modelos muestran varios rasgos de interés: (a) el límite N del colapso de la caldera que resultó muy visible, (b) hacia el centro y Oeste de la Sierra se observa una descomposición en bloques levantados que se relacionan con el resurgimiento de la caldera y que poseen una tendencia NW-SE, la misma orientación de las estructuras regionales y (c) el límite Sur del colapso caldérico se pierde y posiblemente se encuentra fuera de la zona de estudio a detalle.

El modelado en 3-D exhibe el comportamiento tectónico del área, apoyado en los numerosos trabajos realizados por la Comisión Federal de Electricidad (GPG-CFE), la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) y Electroconsult (ELC). Se muestran dos zonas tectónicas: una inactiva, representada por la frontera Norte del colapso de la caldera. Esta se postula como barrera que frena al flujo lateral de los posibles fluidos inyectados hacia los acuíferos de Guadalajara y áreas conurbadas; y otra activa, exhibiendo un complejo conjunto de bloques en el centro y Oeste de la zona, mismos que pueden delimitar y controlar la migración de fluidos conduciéndolos con dirección hacia el NW. Esta puede ser la mejor área para la inyección de los fluidos y salmueras desechados durante la explotación de los pozos del campo geotérmico de La Primavera.

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

DIVISION DE CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOFISICA APLICADA

CONTRIBUCION DE LA GRAVIMETRIA A LA DETERMINACION
DE ESTRUCTURAS QUE CONTROLAN LA MIGRACION
DE FLUIDOS EN LA SIERRA DE LA PRIMAVERA,
JALISCO, MEXICO.

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

MIGUEL ANGEL ALATORRE ZAMORA

Ensenada, Baja California, junio de 1989.

TESIS DEFENDIDA POR: MIGUEL ANGEL ALATORRE ZAMORA

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ:



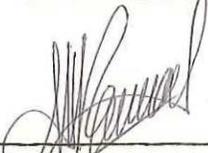
Dr. Ricardo Fernández Tomé, Suplente Director del Comité



Dr. Enrique Gómez Treviño, Miembro del Comité



Dr. Carlos Flores Luna, Miembro del Comité



M.C. José Manuel Romo Jones, Miembro del Comité



M.C. Analía Martínez García, Miembro del Comité



Dr. Enrique Gómez Treviño, Jefe del Departamento de Geofísica Aplicada



M.C. Francisco Suárez Vidal, Director de la División de Ciencias de la Tierra



M.C. Cuauhtémoc Nava Button, Director Académico

Junio 29, 1989

DEDICATORIAS

A mis padres, por su apoyo y comprensión durante toda mi existencia estudiantil.

A mis hermanos, todos ellos felices compañeros de inefable escuela.

A la inquieta y hermosa Luz que de repente ha alumbrado mi camino, con lo que le dió un giro completo a mis sentimientos, mi pensamiento, mi carácter y mi vida entera. Porque con una especial ternura me ayudó a estabilizar todo eso en el último momento de este leve esfuerzo.

A todos los que desinteresadamente contribuyeron en la formación de mi cauce profesional.

AGRADECIMIENTOS

Es muy difícil no dejar de omitir a tanta gente maravillosa que de una forma u otra contribuyó con su grano de arena para la realización de este estudio. En primer lugar debo agradecer a CONACyT y al CICESE por la formación que me dieron y a la CFE por permitirme desarrollar este proyecto en sus instalaciones. Vaya un profundo reconocimiento a mi asesor, el Dr. Oscar Campos Enriquez, quien dirigió todo mi trabajo.

Además estoy en deuda con los inqs. Antonio Kazo, Francisco Arellano, Germán Ramírez, Saul Venegas, Emilio Bigurra, Pablo Reyes y Jesús Arredondo y el Dr. Victor Garduño, quienes me ofrecieron invaluable detalles y puntos de vista para el estudio. En especial a todos los compañeros y colegas del Departamento de Exploración, de la Oficina de Informática y de la Biblioteca IIE-CFE, quienes contribuyeron bastante y de una manera totalmente desinteresada.

Finalmente debo agradecer al Dr. Ricardo Fernández Tomé, cuya dirección terminal produjo un manuscrito de calidad formal, y a los miembros de mi comité de tesis por sus revisiones y correcciones al estilo y redacción del escrito. Específicamente a los Dres. Enrique Gómez I., Carlos Flores y los M. en C. J. Manuel Romo Jones y Amalia Martínez G. Al M. en C. Francisco Suárez V. y al Dr. Mario Martínez G. debo su apoyo final sin el cual no hubiese finalizado el proyecto.

CONTENIDO

	Página
I INTRODUCCION	1
II DESCRIPCION GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO	5
II.1 Geomorfologia	7
II.2 Estratigrafia	7
II.2.1 Terciario	7
II.2.2 Cuaternario	10
II.3 Tectónica	12
II.4 Geologia histórica	16
II.5 Geohidrologia	18
III TRABAJOS PREVIOS	23
IV PROCESADO DE DATOS GRAVIMETRICOS	27
IV.1 Interpolación	28
IV.2 Separación regional-residual	29
IV.3 Continuación analítica de campos	29
IV.4 Derivaciones	30
V INTERPRETACION CUALITATIVA	32
V.1 Anomalia residual local de primer orden	32
V.2 Anomalia residual local de segundo orden	38
V.3 Anomalia residual global de primer orden	38
V.4 Anomalia residual global de segundo orden	39
V.5 Anomalías residuales de primero y segundo orden utilizando diferente interpolador	39
V.6 Interpretación de residuales	42

CONTENIDO (Continuación)

		<u>Página</u>
V.7	Continuación analítica y derivación vertical de residuales locales de primer orden.	45
V.7.1	Continuación descendente a 50 m	45
V.7.2	Continuación descendente a 100 m	46
V.7.3	Continuación descendente a 200 m	49
V.7.4	Continuaciones descendentes a 400 y a 500 m	49
V.7.5	Continuaciones ascendentes a 100 y a 500 m	53
V.7.6	Interpretación de los planos de continuación analítica	56
V.7.7	Derivaciones verticales de primero y segundo orden	57
VI	INTERPRETACION CUANTITATIVA	64
VI.1	Inversión de datos: interfase tobas - andesitas	64
VI.2	Modelado bidimensional	69
VI.2.1	Consideraciones generales	69
VI.2.2	Modelado bidimensional del residual local de primer orden	71
VI.3	Correlación con otros estudios	80
VI.4	Modelado tridimensional	88
VII	CONCLUSIONES	98
	LITERATURA CITADA	102

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1. Plano topográfico, localización de pozos y manifestaciones hidrotermales de La Primavera, Jalisco.	3
2. Localización del área de estudio y esquema estructural (Modificado de ELC, 1982).	6
3. Geología superficial y cronología de La Primavera, Jal. (De acuerdo a Venegas Salgado, 1981, y a Romero González, 1981; modificado de Mahood, 1978).	8
4. Sección geológica en zona de pozos de La Primavera, Jal. (Modificado de R.P.G., 1987).	9
5. Sistema regional de fallas que cruzan en La Primavera, Jalisco (De acuerdo a ELC, 1982).	13
6. Esquema estructural de la zona geotérmica de La Primavera, Jal. (De acuerdo a Romero González, 1981).	15
7. Sección esquemática que muestra el posible flujo subterráneo (De acuerdo a Ramírez Silva, 1987).	20
8. Anomalia de Bouguer residual local de La Primavera, Jalisco, y secciones de modelado.	33
9. Anomalia residual de segundo orden local de La Primavera, Jal. Valores en mgales.	34
10. Anomalia de Bouguer residual global de primer orden, Sierra de La Primavera, Jalisco.	35
11. Anomalia de Bouguer residual global de segundo orden, Sierra de La Primavera.	36
12. Anomalia de Bouguer residual de orden 1, local de La Primavera, Jal. (Interpolación local).	40
13. Anomalia de Bouguer residual de orden 2, local de La Primavera. (Interpolación local).	41
14. Continuación descendente a 50 m del residual local de primer orden.	47

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
15. Continuación descendente a 100 m del residual local de primer orden.	48
16. Continuación descendente a 200 m del residual local de primer orden.	50
17. Continuación descendente a 400 m del residual local de primer orden.	51
18. Continuación descendente a 500 m del residual local de primer orden.	52
19. Continuación ascendente a 100 m del residual de primer orden global.	54
20. Continuación ascendente a 500 m del residual de primer orden global.	55
21. Plano de primera derivada vertical de la anomalía residual local de primer orden.	58
22. Configuración cualitativa de la primera derivada vertical.	60
23. Plano de segunda derivada vertical de la anomalía residual local de primer orden.	62
24. Configuración cualitativa de la segunda derivada vertical del residual de primer orden.	63
25. Perspectiva de la cima de la toba Tala en La Primavera, Jal.	66
26. Perspectiva de la cima de las andesitas en La Primavera, Jal.	67
27. Modelos de interfase obtenidos por inversión de anomalía de gravedad residual, secciones indicadas en la figura 8. Los valores de las curvas son de contraste en densidad.	68
28. Análisis bidimensional de anomalía de gravedad residual, secciones A - A' y B - B' mostradas en la fig. 8.	72
29. Análisis bidimensional de anomalía de gravedad residual, secciones C - C' y D - D' mostradas en la figura 8.	73

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
30. Análisis bidimensional de gravedad, línea A - A' mostrada en la figura 33 (De acuerdo a JICA, 1986).	76
31. Análisis bidimensional de gravedad, línea B - B' mostrada en la figura 33 (De acuerdo a JICA, 1986).	77
32. Análisis bidimensional de gravedad, línea C - C' mostrada en la figura 33 (De acuerdo a JICA, 1986).	78
33. Campo de anomalía de Bouguer, $\sigma = 2.00 \text{ gr/cm}^3$ y líneas de modelado directo (De acuerdo a JICA, 1986).	79
34. Potencial natural (De acuerdo a Romero González, 1981).	81
35. Zonas A y B de la caldera con la mayor ocurrencia de eventos locales tipo enjambre (De acuerdo a Reyes Zamora, 1980).	82
36. Mínimos resistivos (De acuerdo a Romero González, 1981).	84
37. Cima del conductivo en La Primavera, Jal. (De acuerdo a Romero González, 1981).	85
38. Distribución tridimensional de cuerpos en La Primavera, Jal.	89
39. Campo de anomalías de gravedad calculadas del residual de primer orden.	91
40. Perspectiva del basamento, desarrollada a la cima de las andesitas (cuerpos con densidad $\sigma = 2.39$).	94
41. Perspectiva del basamento, base de tobas y riolitas (cuerpos con densidad negativa, $\sigma = -2.165 \text{ gr/cm}^3$).	95
42. Ubicación de principales cuerpos tridimensionales interpretados (De acuerdo a Campos Enriquez, 1986).	97

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>	<u>página</u>
I. Densidades de muestras de rocas (de acuerdo a J.I.C.A., 1986).	70

CONTRIBUCION DE LA GRAVIMETRIA A LA DETERMINACION
DE ESTRUCTURAS QUE CONTROLAN LA MIGRACION
DE FLUIDOS EN LA SIERRA DE LA PRIMAVERA,
JALISCO, MEXICO.

I. INTRODUCCION.

La parte centroccidental de México cuenta con gran cantidad de zonas con manifestaciones geotermales que están siendo estudiadas por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Una de estas zonas es el área de la Sierra de La Primavera, en Jalisco, que reviste un particular interés dada su cercanía con la zona urbana de la ciudad de Guadalajara.

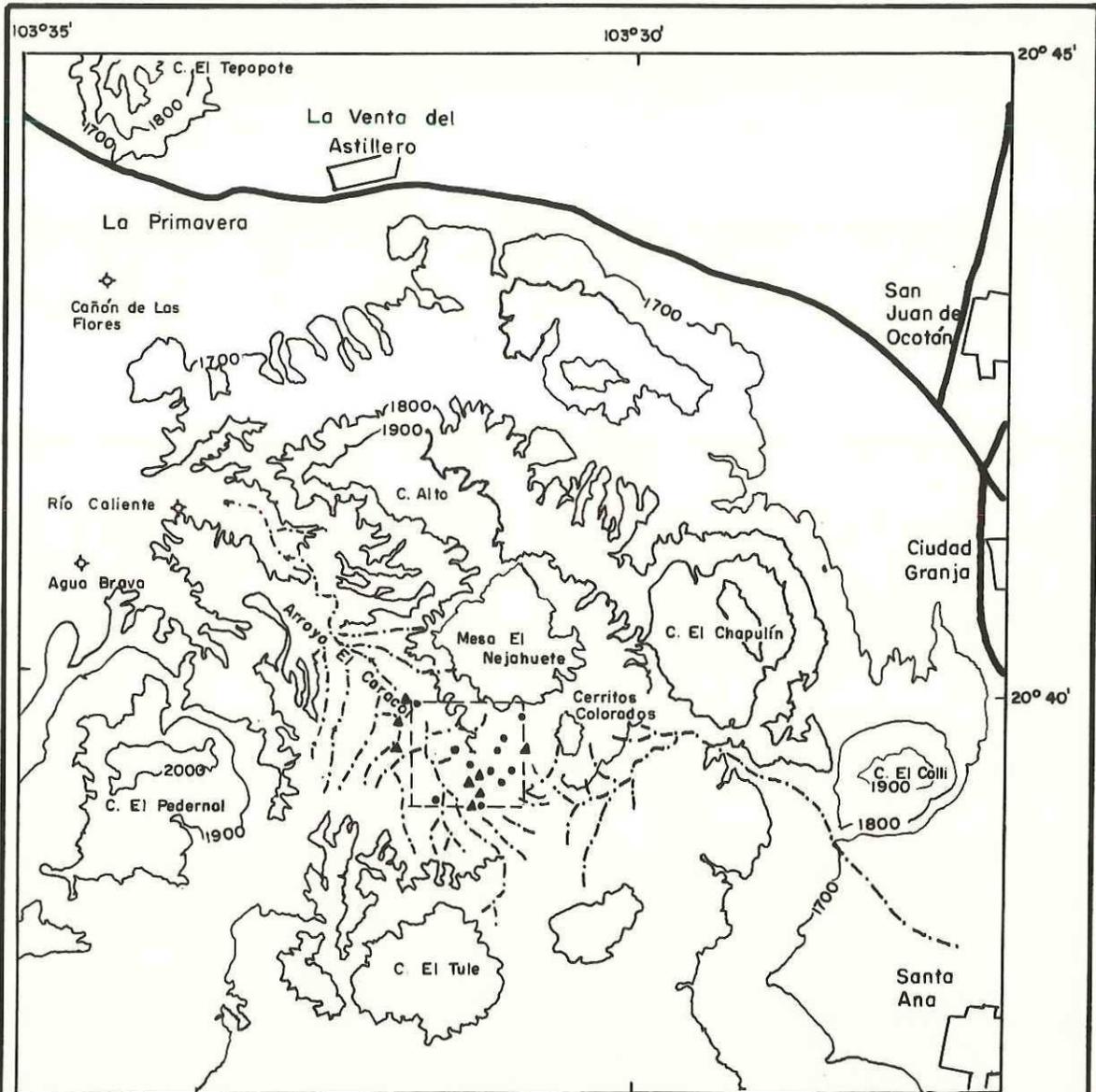
En el aprovechamiento de la energía geotérmica se usan los fluidos que emanan del interior de la Tierra por medio de perforaciones profundas. En un principio estos fluidos se descargaban en las corrientes naturales cercanas a los pozos, pero muy pronto se observó que con esto se ponía en peligro la ecología de la zona, pues algunas sales contenidas en estos fluidos son compuestos nocivos para la vida, ya que contienen derivados de arsénico, mercurio, amonio y boro. Simplemente la alta salinidad de los fluidos produce un efecto grave para la ecología local (Hernández Galán, 1985).

Estas formas de contaminación y otras tales como la

presencia de ácido sulfhídrico, sílice y calor se pueden evitar por medio de una operación de reinyección. Esta operación además hace más eficiente la generación de energía al reciclar tanto agua como calor.

En el desarrollo del campo geotérmico en la Sierra de La Primavera el principal problema que se presenta es el del desecho de las sales contenidas en los fluidos geotérmicos extraídos por los pozos productores profundos. Esta problemática tiene dos aspectos, pues mientras que por un lado se considera a la sierra como una zona de reserva ecológica, por otro es zona de recarga del acuífero superficial que abastece a la población de Guadalajara, ya que forma parte de uno de los principales parteaguas que existen en el área y que separa varias cuencas endorreicas importantes que contienen a los acuíferos superficiales de aguas potables.

La GPG de CFE ha presentado dos alternativas para resolver este problema. Una consiste en construir una presa de evaporación en la parte más amplia del sistema de drenaje El Caracol-Arena Grande (Fig. 1). En la otra se trata de programar varios pozos reinyectores a gran profundidad en la misma sierra, pero fuera de la zona considerada como yacimiento geotérmico. Aprovechando las condiciones geológicas y topográficas, se ha optado por la segunda estrategia, aunque de manera temporal y con perforaciones a poca profundidad. La solución definitiva es reinyectar los



ESC. 1:100,000



SIMBOLOGIA

- ▲ FUMAROLA
- ◆ MANANTIAL
- POZO PROFUNDO
- AREA DE PERSPECTIVAS A LA CIMA DE TOBA TALA Y ANDESITA

FIGURA I. PLANO TOPOGRAFICO, LOCALIZACION DE POZOS Y MANIFESTACIONES HIDROTERMALES DE LA PRIMAVERA, JALISCO.

fluidos geotérmicos a profundidades mayores, para evitar la contaminación del acuífero superficial y procurar una fuente de recarga al yacimiento profundo.

El objetivo principal de este trabajo es determinar tanto la relación existente entre las diferentes unidades estratigráficas como sus rasgos estructurales, para indicar la o las zonas más adecuadas para la reinyección de los fluidos geotérmicos. Para ello se utilizaron los datos gravimétricos obtenidos durante una campaña exploratoria llevada a cabo por la GPG de CFE y la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (J.I.C.A.), apoyándolos en otros datos geofísicos y geológicos disponibles en la zona. Los datos gravimétricos requirieron de un procesamiento que consistió en interpolación, separación del regional, continuaciones analíticas, derivaciones verticales y filtraje.

Con el fin de llevar a cabo una interpretación cuantitativa de la información gravimétrica se calcularon las respuestas de varios modelos bi y tridimensionales y se hizo inversión en una serie de perfiles con un algoritmo sencillo, que permite estimar profundidades al basamento.

Como resultado de estos modelos y de información adicional, se proponen algunas alternativas viables para resolver el problema de reinyección de fluidos geotérmicos en el campo de La Primavera.

II DESCRIPCION GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO.

La zona de estudio se encuentra ubicada aproximadamente a 5 km al oeste de la ciudad de Guadalajara y está delimitada por las coordenadas $20^{\circ} 35.5'$ a $20^{\circ} 42'$ de latitud N y $103^{\circ} 35'$ a $103^{\circ} 25'$ de longitud oeste. Es una región de topografía abrupta, constituida por varios domos y mesetas que forman la sierra La Primavera. Entre los domos y mesetas más prominentes se hallan los cerros El Colli y El Chapulín al Este, El Tule al Sur, El Pedernal al Oeste, Cerritos Colorados en la parte central y Alto en el Norte; y las mesas La Lobera al Norte, el Nejahuete al centro y Tapona al Sur (fig. 2).

En la zona nacen varios arroyos de carácter intermitente, y un río proveniente de manantiales hidrotermales, que toma dos nombres, río Caliente y río Salado, y que fluye de Este a Oeste.

Existen bastantes manifestaciones hidrotermales por las cuales la zona se considera prospecto geotérmico. De entre estas manifestaciones las más importantes son: (a) en Cerritos Colorados, vaporeras con temperaturas de 56°C a 88°C , y azufreras, con temperaturas de 83°C a 92°C , (b) el arroyo el Caballo posee manantiales y fumarolas con temperaturas de 84°C a 90°C , (c) manantiales en Agua Brava con 52°C a 69°C , (d) el manantial de río Caliente, con una temperatura de 65°C , y (e) el manantial de Cañón de las Flores, con 41°C .

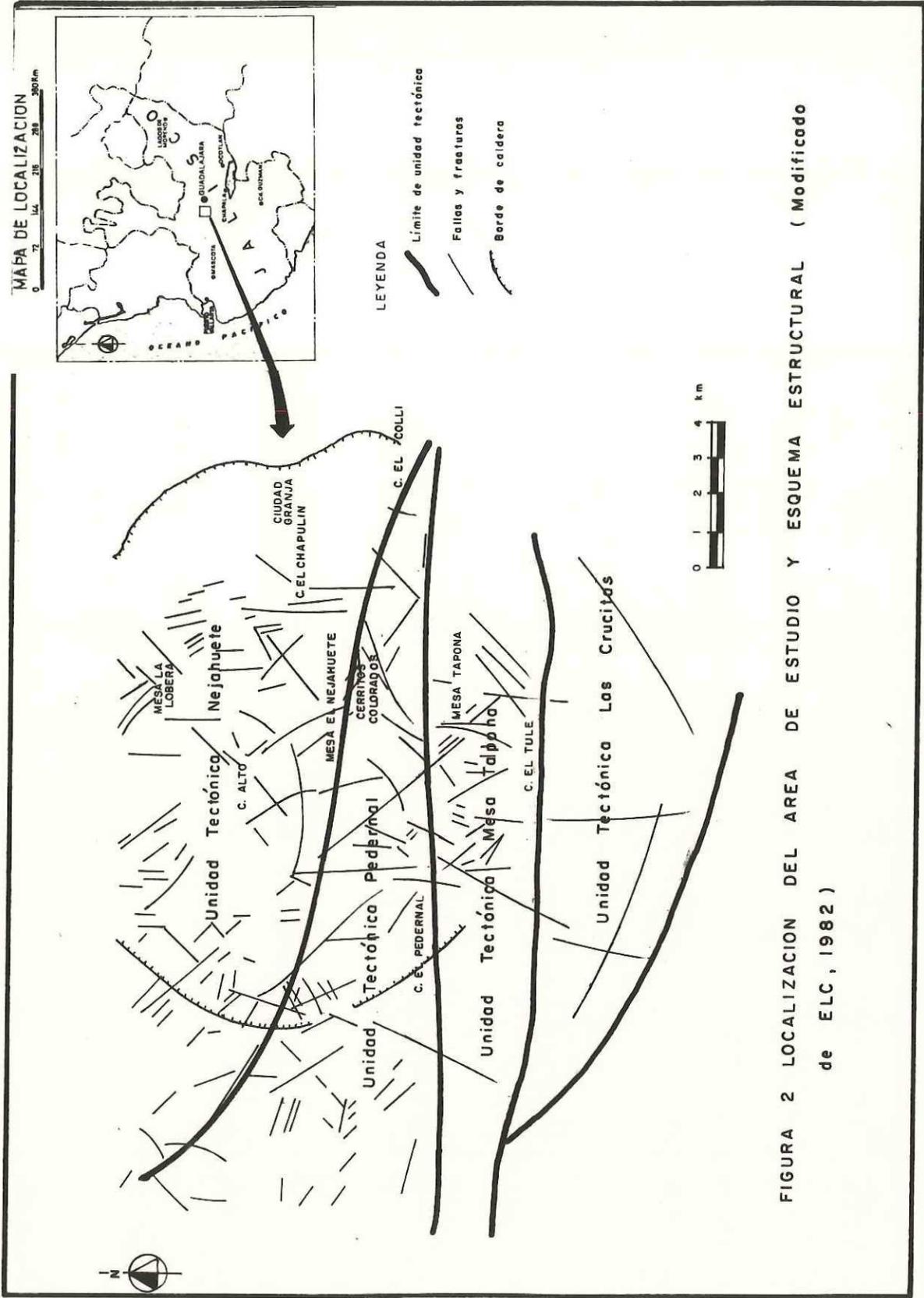


FIGURA 2 LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO Y ESQUEMA ESTRUCTURAL (Modificado de ELC, 1982)

11.1 Geomorfología.

El rasgo geomorfológico predominante en la zona de La Primavera es una estructura semicircular de aproximadamente 15 km de radio, ubicada en la porción central Norte, a la cual se le ha denominado Caldera de La Primavera. En ella se observan numerosos domos vítreos de composición riolítica, las más de las veces yuxtapuestos y distribuidos a lo largo de un arco anular. La altura promedio de estos es de 2000 m.s.n.m., y su elevación disminuye hacia la parte Norte, lo cual es mas notable hacia el Noroeste.

Hacia el sureste de la caldera se localiza la planicie volcánica de Guadalajara, originada por la acumulación de materiales piroclásticos generados por la actividad volcánica de la caldera misma (Ramírez Silva, 1982).

11.2 Estratigrafía.

La mayoría de los afloramientos que ocurren en la zona de estudio y en la región que le circunda son de rocas volcánicas que varían de félsicas a máficas (Fig. 3), con edades del Oligoceno (Terciario) al Reciente. Todos ellos se describen de acuerdo a su edad (Fig. 4):

11.2.1 Terciario

Oligoceno.- Las rocas de esta edad afloran en el cañón del Río Grande de Santiago (que se localiza a aproximadamente 24 km al Este de La Primavera), y son principalmente

LEYENDA Y SIMBOLOGIA

 Qre	Depósitos residuales
 Qto	Tobas pumicíficas
 Qdra	Domos riolíticas 60 mil años
 Qdrb	" " 75 mil años
 Qdrc	" " 95 mil años
 Qdl	Depósitos lacustres
 Qft	Formación Tala
 Tpr	Terciario Plioceno riolítico
 Qrv	Derrames de riolita localmente esterilizada
	Falla
	Cráter
	Contacto geológico

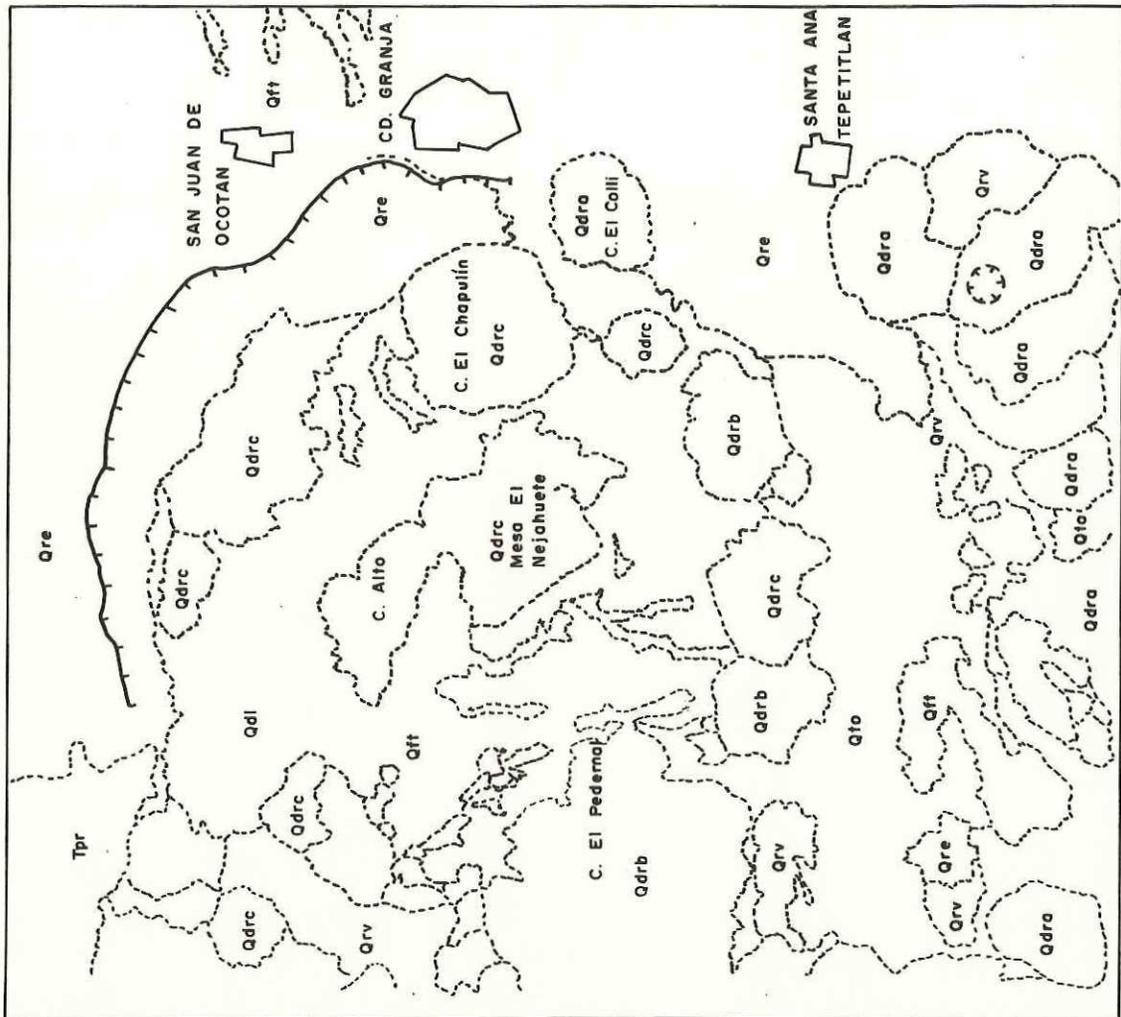


FIGURA 3. GEOLOGIA SUPERFICIAL Y CRONOLOGIA DE LA PRIMA-VERA, JAL. (De acuerdo a Venegas Salgado, 1981 y a Romero Gonzalez, 1981; modificado de Mahood, 1978)

LEYENDA

Qls	Sedimentos Lacustres
Oft	Toba Tola
Tpr	Riolitas
Tpt	Toba Lítica (Pumicítica)
Tpo	Andesita Microlítica
Tmt	Toba Lítica (Riolítica)
Tma	Andesitas
Tmr	Riolitas
Tmb	Andesitas

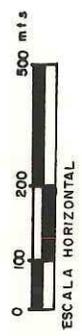
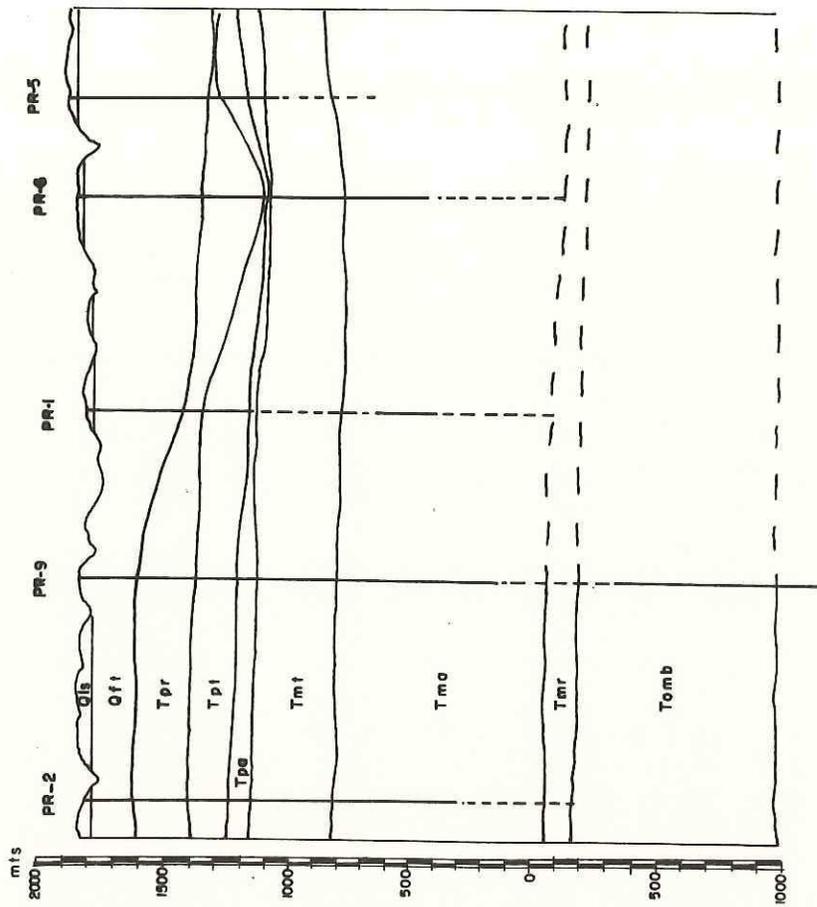


FIGURA 4 SECCION GEOLOGICA EN ZONA DE POZOS DE LA PRIMAVERA, JAL. (Modificado de R.P.G., 1987)

andesitas con alteración hidrotermal, y algunas facies piroclásticas (tobas, brechas y aglomerados).

Mioceno.- Este periodo está representado, por una parte, por derrames, tobas y brechas riolíticas, y por otra, por derrames y brechas andesíticas, andesítico-basálticas y basálticas.

Plioceno tobáceo.- En este periodo se agrupan una serie de tobas pumiciticas, vitreas y liticas de composición intermedia.

Plioceno riolítico.- Este periodo se encuentra representado por riolitas fluidales (con pseudoestratificación).

II.2.2 Cuaternario

Durante el Pleistoceno hubo una gran actividad volcánica, que se manifestó en forma intermitente alternada, de acuerdo a la geocronología con que se cuenta, expulsando material félsico y máfico, para así dar origen a la caldera de La Primavera y al Volcán de Tequila.

Pleistoceno.- Periodo caracterizado por riolitas vitreas esferulíticas, que se exponen en el Sur y Noroeste de la caldera, y que poseen intercalaciones de obsidiana y esférulas.

Derrames piroclásticos.- Hace aproximadamente 95,000 años erupcionaron flujos piroclásticos en el área y se esparcieron en las cuencas circundantes, cubriendo alrededor

de 700 km². Estos depósitos, denominados colectivamente como Toba Tala, son riolitas suavemente peralcalinas con alto contenido de sílice. Esta formación se puede dividir en tres miembros fácilmente reconocibles. El primero contiene pumicita affrica y blanca, y compone más del 95% del volumen de la toba. Se encuentra dentro de la sierra y rellenando las cuencas al Oeste, S y NE. El segundo es un horizonte de aproximadamente 10 m de espesor, caracterizado por pumicita affrica blanca y bloques de pumicita negra. Este horizonte de mezcla pumicitica está cubierto por el miembro final, que posee un grosor aproximado de 10 m y está caracterizado por bloques de pumicita blanca inmersos en una matriz piroclástica rosa. Estos dos últimos miembros solo se encuentran en la parte central de la Sierra (Mahood, 1978).

Domos riolíticas.- Estos constituyen la Sierra de La Primavera; están formados por flujos de riolita fluidal vítrea, con horizontes de obsidiana, perlita, riolita fluidal y esferulítica.

La formación de la caldera de La Primavera permitió el desarrollo de un lago en el cual se depositaron materiales piroclásticos producto de subsecuentes erupciones, dándose origen a depósitos de bentonita, horizontes de diatomita y acumulación de material pumicitico, todo con espesores de 70 a 80 m.

Además en las estribaciones de los cerros de la zona existen acumulaciones de piedemonte.

Al parecer la erupción de la Toba Tala, el colapso de la bóveda de la zona, el relleno del lago, la depositación de los sedimentos lacustres y la erupción de los domos que forman la sierra deben haber ocurrido dentro de un periodo corto de tiempo (Mahood, 1978).

II.3 Tectónica.

El conjunto volcánico de La Primavera se halla exactamente a lo largo del contacto entre el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Occidental, separando a dos regiones de comportamiento estructural diferente. Al sur de esa línea el Eje Neovolcánico presenta una infraestructura de bloques basculados, de acuerdo con la conjugación de dos sistemas de dirección NW-SE (directriz californiana) y E-W (directriz Neovolcánica). Al Norte de la misma línea, la Sierra Madre Occidental muestra una altiplanicie terciaria repartida en grandes bloques verticalmente desnivelados por fallas controladas por dos sistemas: uno NW-SE y otro NE-SW (Fig. 5) (Electroconsult, 1982).

Los elementos tectónicos de superficie que muestran la estructura de La Primavera y en los que está conformada son (Fig. 2) (Electroconsult, 1982):

a) Un elemento hacia el centro de la caldera de La Primavera, compuesto de subunidades volcánicas terciarias y recubierto por productos volcánicos cuaternarios. Posee un gran fracturamiento posiblemente relacionado con la

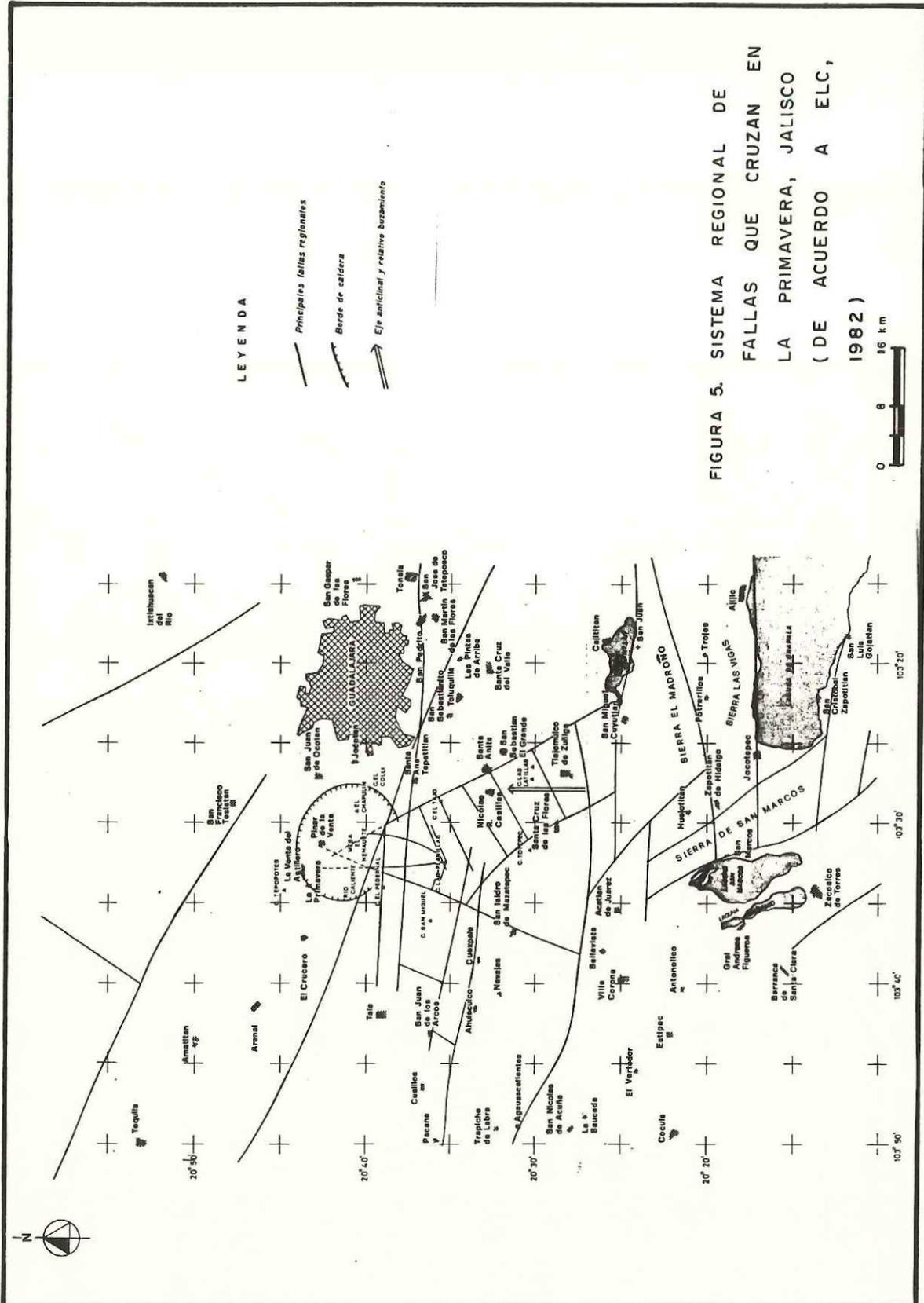


FIGURA 5. SISTEMA REGIONAL DE FALLAS QUE CRUZAN EN LA PRIMAVERA, JALISCO (DE ACUERDO A ELC, 1982)

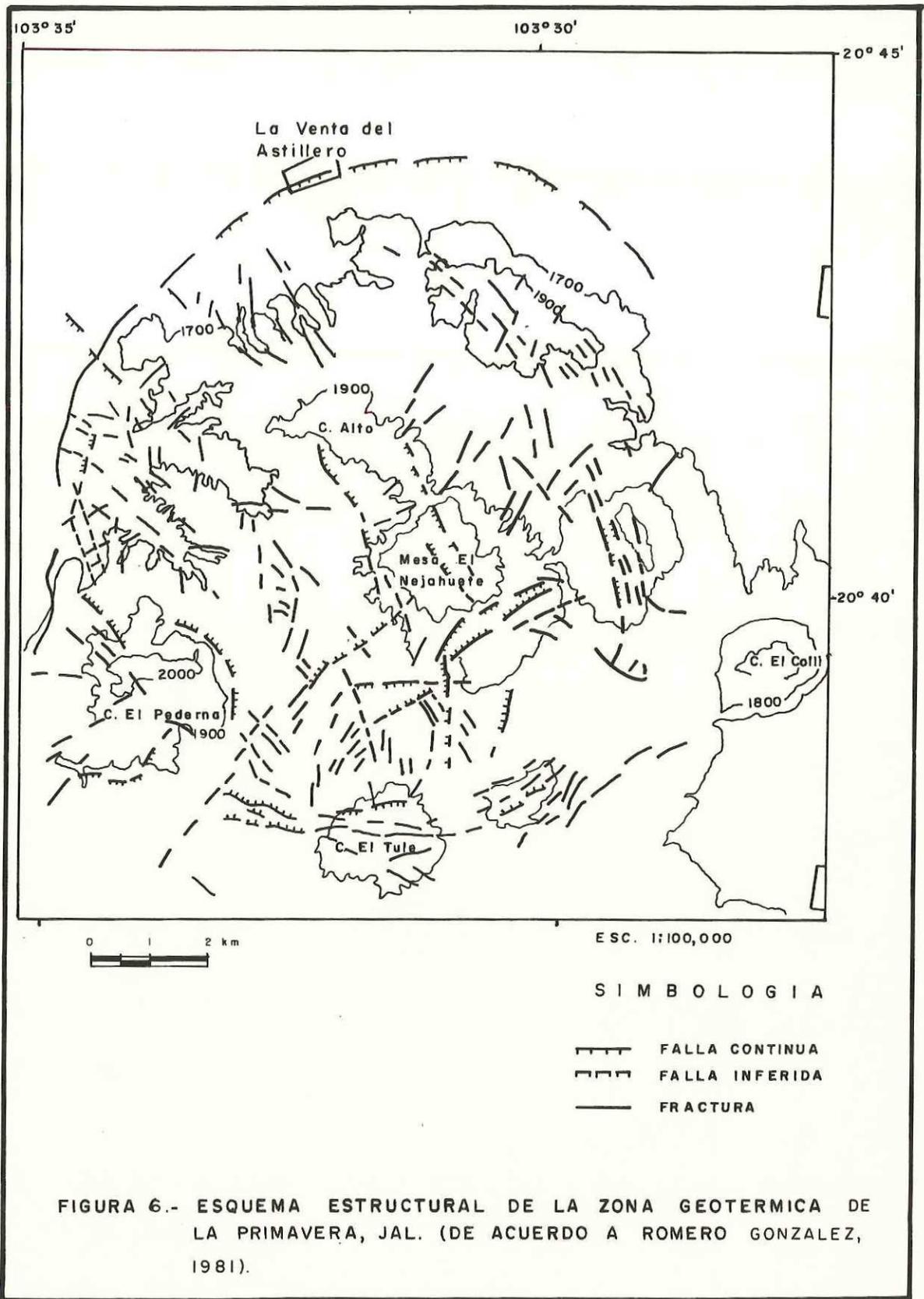
reactivación de algunos movimientos durante el hundimiento de la caldera y del nuevo levantamiento poscalderico del Nejahuete. Este elemento es denominado Unidad Tectónica Nejahuete.

b) Un elemento hundido e intensamente fallado, localizado entre la falla marginal Tequila-Primavera y la falla E-W Pedernal-Caracol. Posiblemente sea el bloque estructural más profundo del área, y es denominado Unidad Tectónica Pedernal.

c) Un elemento hundido ubicado al Sur del anterior, encontrado sobre la margen central de la caldera, delimitado por las fallas E-W Pedernal-Caracol y la Puerta El Tule, y definido como Unidad Tectónica Mesa Taponá.

Todas las unidades tectónicas descritas, con excepción de la primera, están cruzadas por una alineación disyuntiva transversal, posiblemente compuesta por fallas secundarias de direcciones N-S y NNE-SSW. Este lineamiento, entrando en el bloque del Nejahuete, pierde continuidad y se abre en fracturas menores en forma de abanico. El graben de Cerritos Colorados se puede interpretar como el efecto de refracción de una de estas fallas en el punto de intersección con el bloque del Nejahuete (Electroconsult, 1982) (Fig. 6).

Uno de los sistemas de fallas más confusos en la Sierra de La Primavera es el que está trazado por un escarpe irregular en un arco de 13 km de largo, que va desde el cerro el Colli hasta el poblado la Primavera. Este escarpe



forma la frontera NE de una depresión cerrada entre el y los domos porfiríticos del cerro El Chapulín, Mesa La Lobera y Pinar de la Venta (Fig. 6).

Las fallas circulares relacionadas a la formación del colapso de la caldera, aunque tienen poca expresión superficial por estar cubiertas por lavas más jóvenes, posiblemente representan discontinuidades laterales más profundas que muchas de las fallas más jóvenes con expresión topográfica semejante. Existen otras estructuras jóvenes, como aquellas fracturas de orientación E-W que se emplazan en el cerro El Tule, que puede relacionarse con la reactivación del antiguo sistema de fracturas en anillo ocurrida hace 60,000 años (Mahood, 1978).

II.4 Geología histórica.

El evento más antiguo ocurrido en la zona se remonta al Oligoceno, periodo en el que se inicia la actividad volcánica que dió origen a la Sierra Madre Occidental, aprovechando las fallas y fracturas generadas durante la Orogenia Laramide. Entre el Oligoceno y Mioceno cambia la composición de las extravasaciones de andesítica a riolítica; la actividad se torna explosiva por ese cambio, superponiendo las riolitas, tobas e ignimbritas sobre las andesitas.

Entre el Mioceno y el Plioceno ocurren las primeras manifestaciones de la Faja Volcánica Transmexicana, que se presentan como derrames andesítico-basálticos de fisura. Las

Últimas manifestaciones del vulcanismo de la Sierra Madre Occidental se verifican en el Plioceno como tobas, ignimbritas y riolitas.

A fines del Plioceno o en el Pleistoceno Temprano se generaron los grabens Tepic-Chapala (de rumbo NW-SE) y Colima (de rumbo N-S) (Mahood, 1978). El primero fue generado por un sistema de fallas escalonadas que descienden del NE al SW con un basculamiento hacia el NE. Es importante señalar que sirve de control estructural al vulcanismo cuaternario y que actualmente controla la geometría del acuífero relacionado con los sistemas geotérmicos de la zona.

Durante el Pleistoceno ocurre la última fase del vulcanismo de la zona, que se inicia con derrames máficos de fisura, acompañados de actividad explosiva. Luego de un periodo de tranquilidad volcánica, ocurren extravasaciones de composición riolítica originando vidrios volcánicos y riolitas esferulíticas. Esto indica la presencia a profundidad de una cámara magmática en proceso de diferenciación.

Después de estos derrames la actividad félsica se concentra en la zona de estudio, donde se da lugar a derrames tipo "flujo piroclástico". En respuesta a estas expulsiones el techo de la cámara magmática se colapsó originando fallas anulares, a través de las cuales erupcionaron una serie de domos que se superponen unos en otros. Tales erupciones ocurrieron como pulsaciones. Esta actividad estuvo acompañada

de etapas explosivas que originaron depósitos de caída libre cubriendo un área extensa alrededor de la caldera .

II.5 Geohidrología

El movimiento de fluidos en los sistemas geotérmicos es muy complejo, ya que es controlado por muchos parámetros, principalmente por el fallamiento y la porosidad del subsuelo. Como en diferentes campos geotérmicos, también en La Primavera se reconocen tres niveles de circulación de los fluidos geotérmicos (Electroconsult, 1982):

a. Un nivel profundo de circulación esencialmente vertical, a lo largo de grandes fallas regionales,

b. Un nivel intermedio, de circulación esencialmente horizontal y posiblemente convectiva, que forma el depósito de mayor interés económico, y

c. Un nivel superficial de circulación vertical a lo largo de fallas menores de reciente reactivación (Electroconsult, 1982).

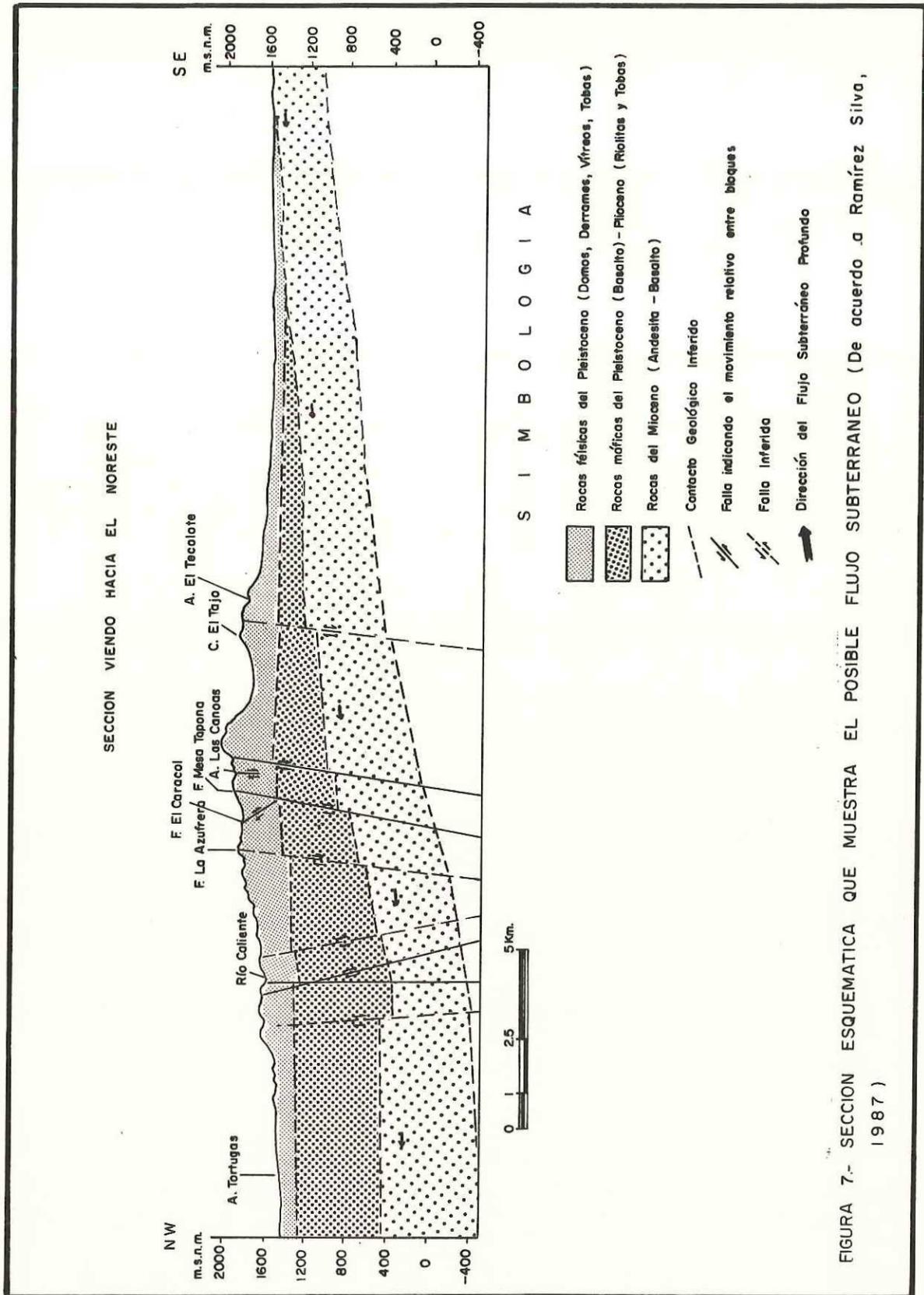
El mayor flujo es probable que ocurra a lo largo de las fallas, y, en particular, por aquellas fallas que debido a su asentamiento profundo pueden alcanzar el reservorio geotérmico (Mahood, 1978).

El agua que aflora en los manantiales termales de la zona manifiesta una dilución con fluidos de otros acuíferos que pueden tener, en gran medida, un origen meteórico por infiltración local y por tanto muy reciente (Romero González,

1981; Ramírez Silva, 1982). Aunque pueden tener un carácter regional muy profundo, de infiltración no tan reciente.

Los manantiales que se observan en la porción NW de La Primavera dan origen al Río Caliente. Debido a que estos manantiales tienen un gasto constante durante todo el año, es válido suponer que deben provenir de un acuífero estable profundo (Ramírez Silva, 1982). Al respecto, la falla cercana a río Caliente ejerce cierto control sobre la migración de los fluidos geotérmicos pues parece ser una respuesta a la reactivación de la antigua falla anular de la caldera, que debe haber alcanzado al reservorio geotérmico en algún punto. De manera análoga, el sistema de fallas que cruza la Mesa el Nejahuete ofrece las mismas perspectivas pues al parecer refleja una fractura a lo largo de la cual el magma fue expulsado como material piroclástico.

Se ha postulado que el acuífero relacionado con el sistema geotérmico de La Primavera está contenido en rocas andesítico-basálticas del Mioceno (Ramírez Silva, 1982). La información geotérmica proporcionada por las perforaciones profundas indica la existencia de dos zonas productoras; la primera localizada en las andesitas que se cortan en promedio de 1000 a 1900 m de profundidad, y la otra se tiene en una secuencia de basalto-andesitas localizadas de 2000 a 2800 m de profundidad, la cual está separada de la primera por un horizonte de riolitas (RPG, 1987). El sistema geotérmico se encuentra limitado por estructuras NW-SE, lo que permitiría



un flujo de SE a NW procedente de Juanacatlán (Fig. 7), lugar situado a aproximadamente 30 km al SE del área de estudio. La zona de recarga para este acuífero se localiza al SE de La Primavera, entre Juanacatlán y Cajititlán, porque allí afloran las andesitas del Mioceno. Además, las cubren depósitos de caída libre que permiten la infiltración hacia niveles más bajos. Por otro lado, la presencia del Rio Grande de Santiago debe estar relacionada con la recarga del acuífero en cuestión en este último sector (Ramírez Silva et al., 1982). Hacia la Sierra de La Primavera es posible que la base de los depósitos ignimbríticos de caída libre y en particular de la Toba Tala, funcionen como una capa de roca impermeable para el sistema geotérmico, al haberse soldado, silicificado o alterado con fases de vapor desde su formación.

La porosidad en los depósitos de caída libre, esencialmente en la parte superior de la Toba Tala, es de tipo secundario, abarcando fracturas, diaclasas y fallas. Esto genera zonas de permeabilidad y flujo preferencial donde es más intenso el fracturamiento; inclusive crea zonas de permeabilidad reducida cuando estas estructuras no están lo suficientemente bien interconectadas.

De hecho, la formación Tala posee zonas con gran permeabilidad, pues en ella ocurren constantes pérdidas de circulación experimentadas durante las perforaciones.

Del análisis de las características geohidrológicas de las rocas que afloran en la zona de La Primavera se desprende

que las rocas volcánicas cuaternarias como son la secuencia piroclástica y los domos riolíticos provenientes de la caldera, son permeables y constituyen tanto zonas de recarga como acuíferos. Las rocas del Terciario volcánico permiten la infiltración del agua meteórica y pueden llegar a formar acuitardos o acuíferos de bajo rendimiento, a excepción de las andesitas del Mioceno-Plioceno que son susceptibles de constituir acuíferos. Cabe mencionar además la posibilidad de que el flujo subterráneo profundo esté controlado por el fracturamiento y no necesariamente asociado a un tipo de roca.

El acuífero somero se recarga en la propia Sierra de La Primavera y sus fluidos parecen tener una tendencia a migrar de E a W y luego al NW, de una manera lateral horizontal, para finalmente surgir en Agua Brava, Río Caliente y Cañón de las Flores.

Este modelo conceptual se ha establecido a pesar de que falta mucho detalle sobre los acuíferos relacionados con el sistema geotérmico (Ramírez Silva, 1982; Ramírez Silva et al., 1982; Ramírez Silva, 1987). En este trabajo se pretende hacer una contribución a dicho modelo conceptual.

III. TRABAJOS PREVIOS.

Los primeros trabajos exploratorios en el área de la Sierra de La Primavera fueron realizados por González Salazar y Razo Montiel (1966) y Banwell (1967). Este último describe el área geotérmica de La Primavera analizándola desde el punto de vista del desarrollo de energía, delineando el trabajo exploratorio necesario para proporcionar una evaluación de su potencial energético.

Posteriormente Mercado González (1969) y Mercado González (1970) describe varias investigaciones que se circunscriben dentro de las disciplinas de geotermometría y geoquímica en las manifestaciones termales de La Primavera. Este es el primer estudio en el que se determina que las zonas de Las Planillas, La Azufrera y Cerritos Colorados corresponden a posibles áreas de producción energética. Del Castillo García et al. (1971) realiza el primer estudio geofísico propiamente dicho en La Primavera.

En 1977 la GPG de la CFE inició los trabajos regionales de geología superficial al NW y SW de Guadalajara debido al interés por las manifestaciones termales ahí existentes; Mahood (1978) elabora la historia geológica de la sierra.

Los trabajos posteriores, realizados con el fin de definir las características del sistema geotérmico de La Primavera y delinear y evaluar su potencial energético, han indicado la presencia de una estructura calderica y de probables resurgimientos, debidos al acercamiento de un

cuerpo magmático a la superficie hacia el centro del área (Razo Montiel et al., 1978; McEvilly et al., 1978; Veneqas Salgado, 1981; Romero González, 1981; Gutiérrez Negrín y López Martínez, 1983).

Durante los años de 1978 a 1982 la bPG de CFE por medio de su Departamento de Exploraciones, y otras instituciones, aplicando diversas disciplinas, realizaron estudios a detalle de las zonas de mayor interés geotérmico, buscando los sitios mas adecuados para la perforación de pozos profundos (Romero González et al., 1979; Veneqas Salgado et al., 1979; Truesdell y Mahood, 1980; Veneqas Salgado y Casarrubias Unzueta, 1980; Reyes Vermot, 1981; Casarrubias Unzueta, 1981; Templos Miranda, 1982; Templos Miranda et al., 1982; Casarrubias Unzueta y Torres Hernández, 1982).

Se han hecho trabajos posteriores a las perforaciones profundas, sobre todo incorporando la información obtenida de éstas, como la mineralogía hidrotermal (Díaz Olivera, 1983) y datos acerca del comportamiento geohidrológico de las formaciones y acuíferos superficiales existentes en el área (Ramírez Silva, 1982; Ramírez Silva et al., 1982; Residencia de Perforación Guadalajara -RPG-, 1987).

Para la definición del basamento regional, Campos Enriquez (1986) realizó un modelado bi y tridimensional a partir de datos de un vuelo aeromagnético llevado a cabo por PEMEX. En este estudio se infiere la presencia de un accidente regional NW-SE que concuerda con estudios previos

de geología de campo. Además define un levantamiento del basamento en el seno de la caldera de La Primavera y una depresión que ocurre entre Planillas y el Sur del cerro Alto. Este estudio puso en evidencia la existencia de dos sistemas de lineamientos, uno NW-SE y otro E-W, relacionados con los grabens Tepic y Chapala, respectivamente.

Hay pocos estudios que analizan el problema de la reinyección de los fluidos y salmueras en general para un campo geotérmico y poco se ha realizado concerniente al campo de La Primavera. En 1979 la GPG de la CFE lleva a cabo un trabajo de geoquímica preliminar en el que se propone la selección de zonas de inyección del desecho geotérmico, para evitar complicaciones ecológicas serias dentro y cerca del área. Después de 1984 la misma institución vuelve a estudiar el caso, cuando prosigue nuevamente con los trabajos de perforación que se habían detenido unos años antes.

En esta nueva etapa, Ramírez Silva (1987) analiza las implicaciones de posibles operaciones de inyección en el horizonte de flujos piroclásticos denominado loba Tala, en base a sus características hidrogeológicas. Con la información que obtiene no recomienda la inyección en dicho horizonte hasta no tenerse información mas detallada de su comportamiento hidrogeológico, indicando que posiblemente esta unidad pueda contener un acuífero de recarga al sistema de arroyos que fluyen hacia el oeste de la zona.

Con el presente estudio se esbozaron las posibles

estructuras geológicas que intervienen en la migración de fluidos dentro de La Primavera, las que podrían canalizar las salmueras de reinyección. Se indica en específico una zona adecuada por debajo de la toba Tala, al Noreste del cerro El Pedernal, entre ese domo y la zona de pozos productores profundos. Esto avala lo expuesto por Ramírez Silva (1987).

IV. PROCESADO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS.

Los datos gravimétricos utilizados para el análisis de la zona, fueron obtenidos en una campaña de estudios exploratorios llevados a cabo bajo un convenio de trabajo entre la GPG de la CFE y la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (J.I.C.A., 1986). Los valores de gravedad fueron obtenidos con un gravímetro Lacoste & Romberg (tipo b) en un total de 306 estaciones. De éstas, 158 se arreglaron a intervalos de 400 m en el área de manifestaciones hidrotermales y el resto se ordenó a intervalos de 800 m dentro y fuera del área de manifestaciones. Además J.I.C.A. (1986) y CFE realizaron un estudio de gravedad regional dentro de un área de 14000 km² donde se establecieron 156 estaciones adicionales.

Los valores de gravedad fueron corregidos por efecto de altitud, mareas, deriva, latitud, Bouguer y topografía. El valor de densidad promedio que se usó en las correcciones fue de 2.0 gr/cm³. La figura 33 muestra el mapa de anomalías de Bouguer con el cual se trabajó en esta tesis.

El procesado digital que se aplicó a los datos para poderlos interpretar en forma apropiada consistió en: (1) interpolación, (2) separación de tendencias regionales y residuales, (3) continuaciones analíticas, (4) derivaciones verticales y (5) filtrajes pasabandas.

IV.1 Interpolación.

Se aplicaron dos técnicas de interpolación a los datos. La que se utilizó primordialmente se basa en la solución de ecuaciones diferenciales equivalentes a un spline bicúbico de tercer orden. En sí, dichas ecuaciones describen el desplazamiento de una placa delgada bajo la influencia de fuerzas puntuales proporcionales a los valores observados en los respectivos puntos. El desplazamiento es proporcional al potencial o a los valores de gravedad, y para resolver las ecuaciones se establecen ciertas condiciones de frontera que simulan al campo de valores como una placa delgada.

La serie de ecuaciones diferenciales que representan a la lámina delgada se resuelven mediante el principio de mínima curvatura utilizando diferencias finitas. Este principio se le aplica al campo de valores de gravedad, en este caso, y representa una técnica implementada por Briggs (1974). Mediante esta técnica se obtuvo una malla regularizada de 32 x 32 puntos con una separación real entre puntos de 500 m.

El otro algoritmo de interpolación utilizado como un apoyo al primero aplica promedios móviles ó ponderados, con lo que produce aproximaciones considerando los valores cercanos a un punto de malla cuyo valor se desea conocer. Así, los valores producidos resultan ser independientes de la orientación y de la distancia entre los puntos de la rejilla interpolada.

IV.2 Separación regional-residual.

La operación que se ha empleado para eliminar de los valores de gravedad la información poco interesante enfatizando la información más atrayente o de mayor interés es el análisis de superficies de tendencias con ajustes basados en la técnica de los mínimos cuadrados. Por una parte, el aislamiento de anomalías locales es de interés primario en aplicaciones de prospección mientras que las anomalías regionales son más importantes para estudios de corteza.

De hecho, el análisis de tendencias es una adaptación del campo estadístico de la regresión múltiple, y la técnica se ha tomado directamente de esa disciplina. La superficie se expresa como un polinomio bidimensional de bajo orden, ya que se considera que superficies de ordenes mayores son menos regionalizadas, menos subjetivas y pueden contener más ruido. La característica principal de esta técnica es que aproxima la tendencia regional para toda el área de investigación.

Las figuras 8 y 9 muestran el comportamiento de los residuales obtenidos con superficies de primero y segundo orden.

IV.3 Continuación analítica de campos.

Las continuaciones analíticas ascendente y descendente fueron realizadas en el dominio de Fourier, con un procesamiento matemático que involucra la aplicación de

operadores a los datos de gravedad. Este procesado tiene diferentes objetivos; por un lado, la continuación ascendente se utiliza como una técnica independiente para resaltar la presencia de anomalías debidas a cuerpos muy grandes y/o profundos. Por otro, la continuación hacia abajo se aplica con el fin de acentuar efectos superpuestos de cuerpos muy juntos y/o cercanos a la superficie. Cuando esta última es llevada a profundidades mayores que la profundidad del cuerpo, el campo continuado tiende a mostrar oscilaciones fuertes. El nivel al cual empieza a oscilar la solución puede dar una indicación directa de la profundidad de la cima del rasgo anómalo, y proporcionar un límite para la profundidad máxima aceptable (Sharma, 1986).

IV.4 Derivaciones.

Las derivadas verticales realizadas a los datos de gravedad se ejecutaron también en el dominio de Fourier. Esta es una herramienta adicional mediante la cual fuertes gradientes producto de cuerpos cercanos entre sí se acentúan considerablemente.

La principal función de estos métodos consiste en indicar la presencia de anomalías bajo circunstancias difíciles, como en los casos donde existe sobrelape de las mismas anomalías.

La segunda derivada vertical es una de las más utilizadas comúnmente, pues sus mapas pueden hacer más

objetivas las interpretaciones (Henderson y Zietz, 1967).

Las figuras 21 y 23 nos muestran los planos de primera y segunda derivada obtenidas sobre el residual de primer orden de la figura 8.

V. INTERPRETACION CUALITATIVA.

Se obtuvieron varios mapas de residuales de acuerdo a dos conjuntos de anomalías: uno utilizando unicamente los datos observados en La Primavera, esto es, a un nivel local, designando a los residuales como locales (figs. 8 y 9); y otro empleando los datos de un área mas extensa, a un nivel regional, designando a los residuales en este caso como globales (figs. 10 y 11).

Las continuaciones hacia abajo y las derivaciones verticales se ejecutaron sobre el residual de primer orden local de la figura 8, mientras que las continuaciones ascendentes se realizaron sobre el residual de primer orden global de la figura 10. Este cambio de usar un residual y después otro se debió a problemas de disponibilidad y acceso a los programas y sistema de cómputo.

V.1 Anomalia residual local de primer orden.

Esta anomalia residual (fig. 8) se obtuvo eliminando al regional de primer orden (superficie polinomial de primer grado) de los datos locales relativos a la Sierra de La Primavera.

El plano de anomalías residuales (figura 8) comprende varios máximos y mínimos locales importantes. Sobre todos, destaca un mínimo de gran amplitud y gran longitud de onda en la parte central del área, con un mínimo mayor a -5 mgals. Este mínimo indica un gran déficit de masa, que domina hacia

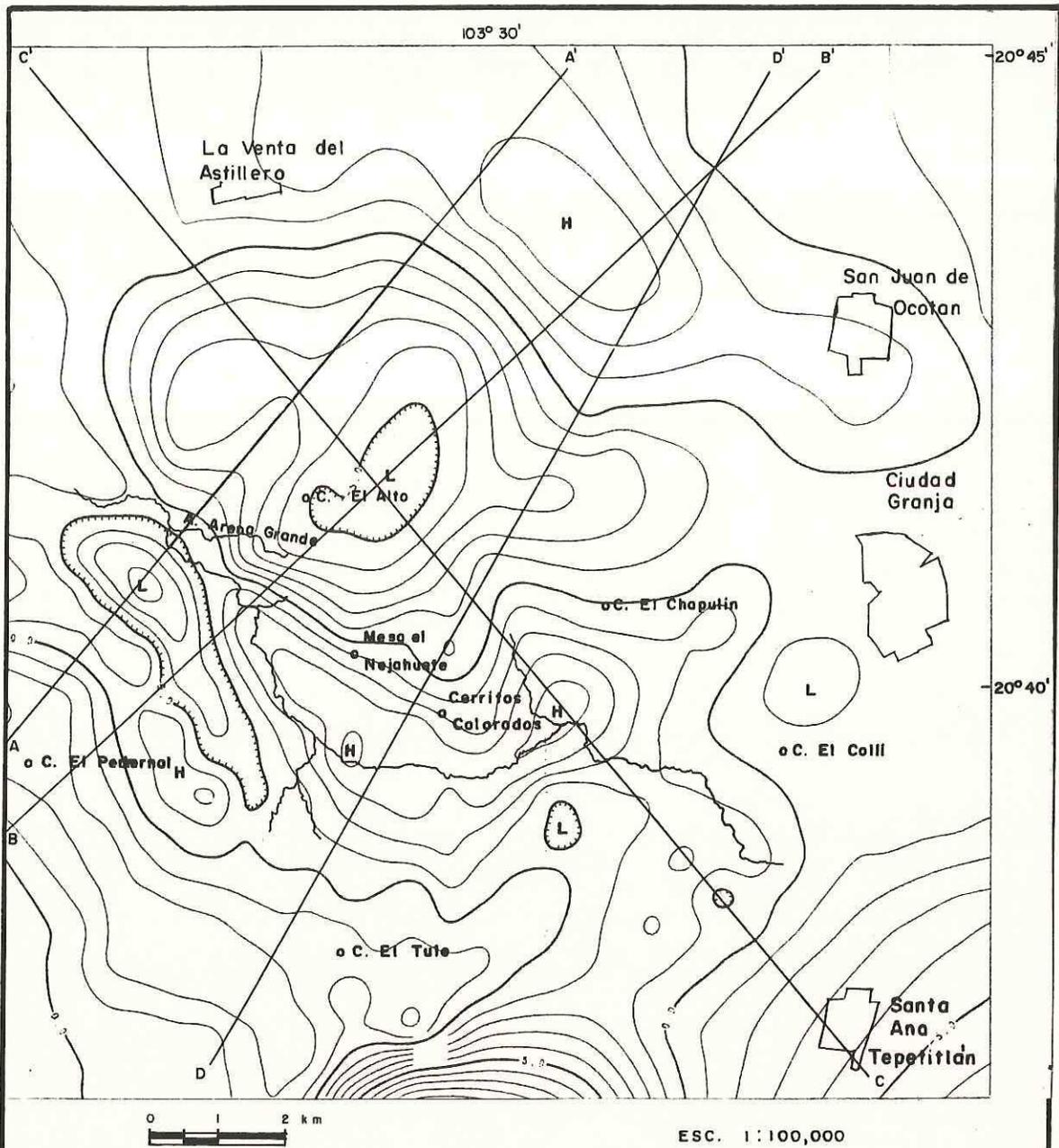


FIGURA 8 - ANOMALIA DE BOUGUER RESIDUAL LOCAL DE LA PRIMAVERA, JALISCO, Y SECCIONES DE MODELADO.

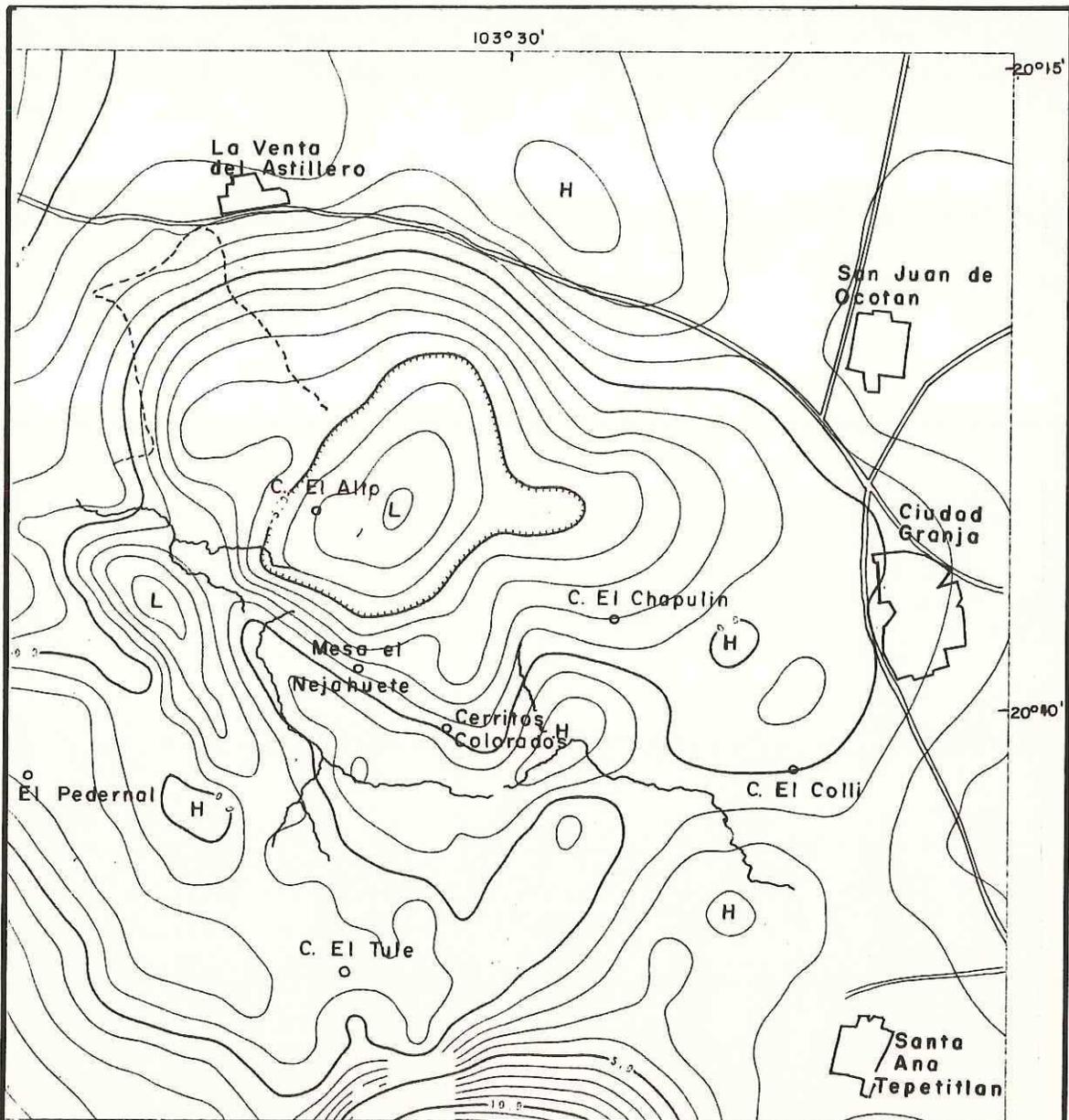


FIGURA 9.- ANOMALIA RESIDUAL DE SEGUNDO ORDEN LOCAL DE LA PRIMAVERA, JAL. VALORES EN mgals.

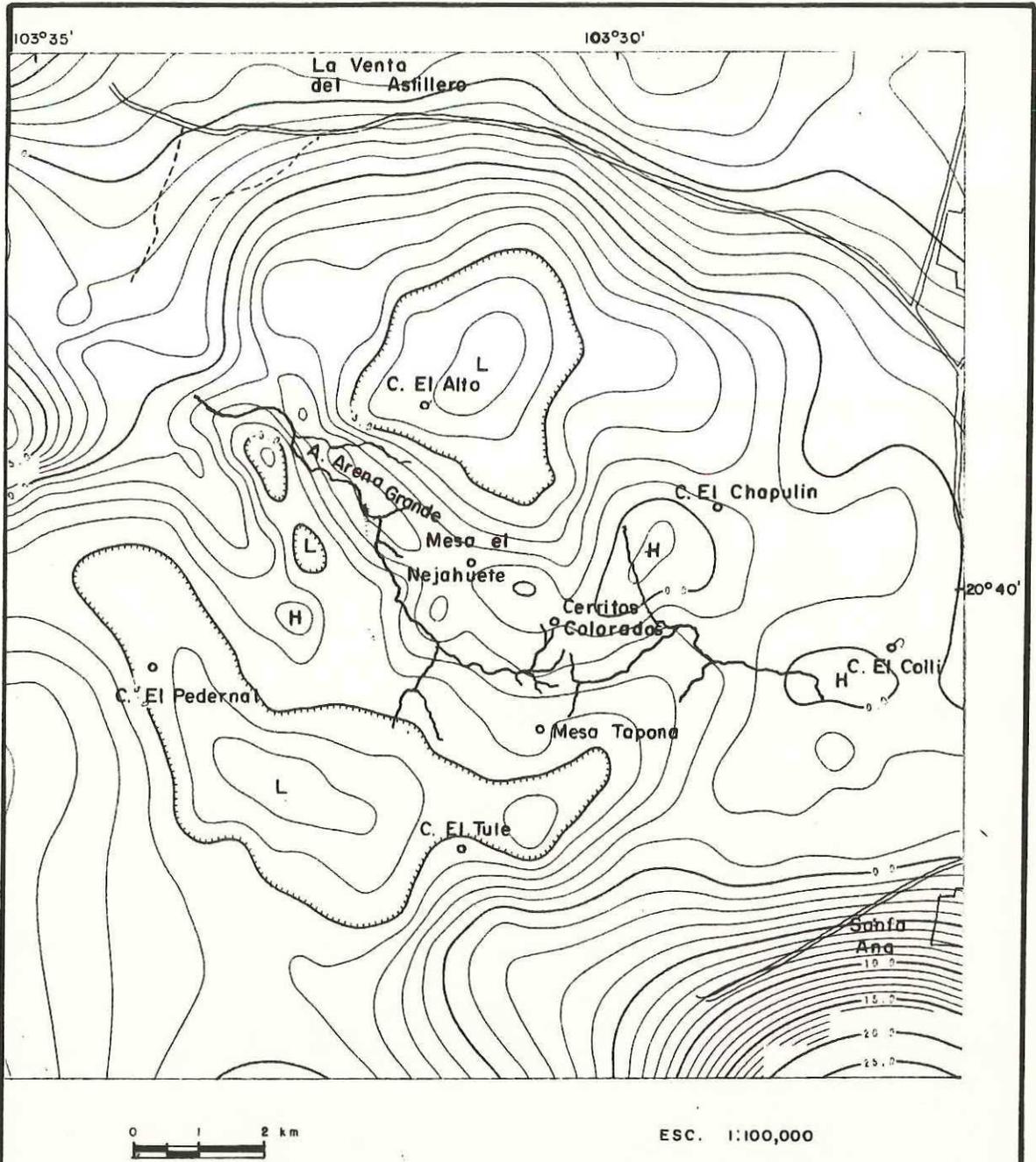


FIGURA 10.- ANOMALIA DE BOUGUER RESIDUAL GLOBAL DE PRIMER ORDEN, SIERRA DE LA PRIMAVERA, JALISCO.

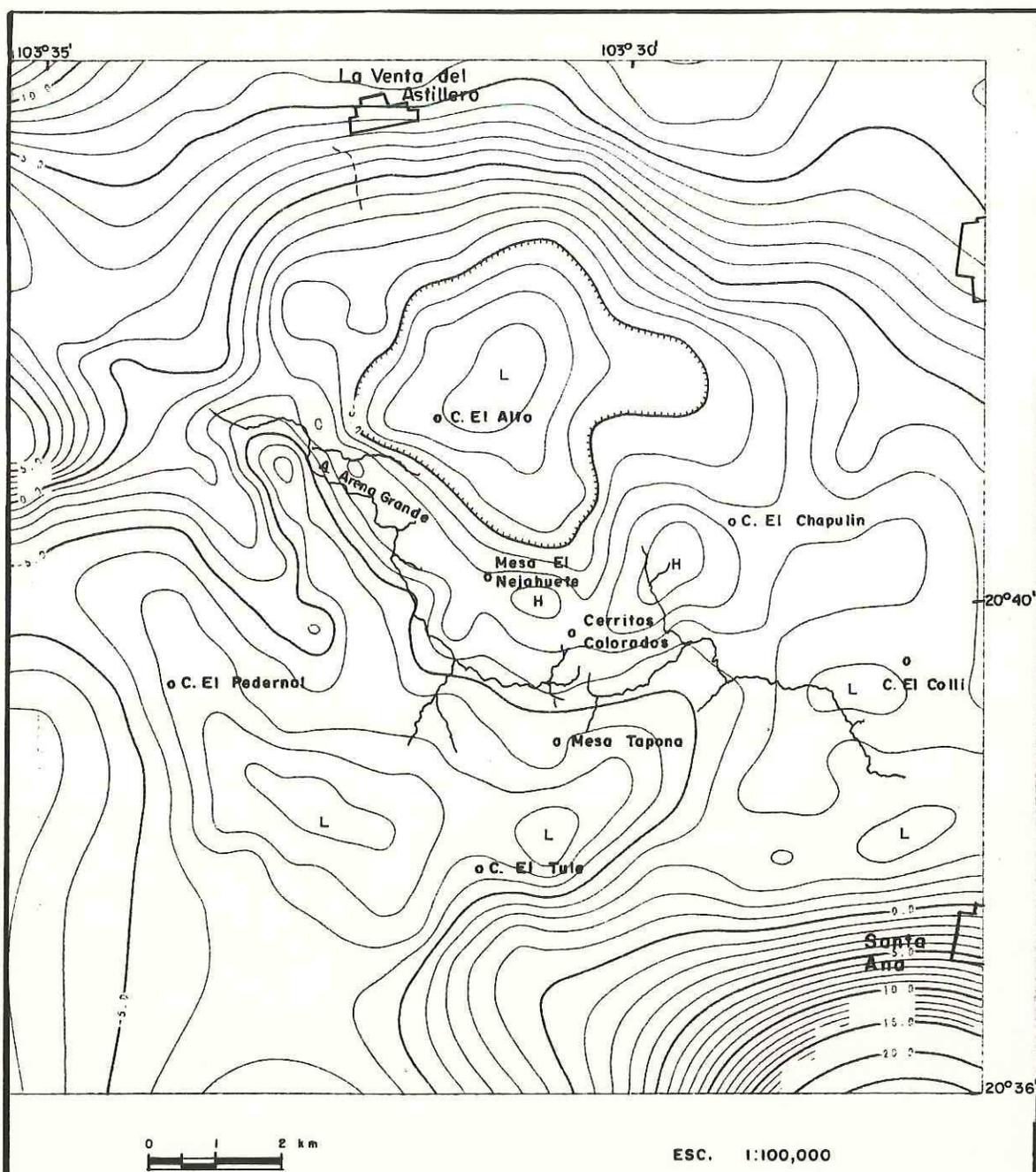


FIGURA 11.- ANOMALIA DE BOUGUER RESIDUAL GLOBAL DE SEGUNDO ORDEN, SIERRA DE LA PRIMAVERA, JALISCO.

el Norte de La Mesa El Nejahuete y el Este del cerro el Alto. Al Norte de este mínimo, entre los poblados La Venta del Astillero y San Juan de Ocotán, se halla un máximo de amplitud considerable, que parece sobrepasar los 3 mgal. Entre este máximo y el mínimo antes mencionado ocurre un gradiente relativamente suave, indicando un contraste de densidades o una pendiente estructural, con un rumbo aproximado NW-SE. Sobre la parte Sur del mínimo central se presenta, en forma envolvente, un máximo con dos altos relativos, y entre éste y el mínimo, se observa un fuerte gradiente que puede indicar un alineamiento o una falla. Dichos máximos sobrepasan los 4 mgal.

El Oeste de toda la zona se encuentra dominado por un mínimo elongado (-3 mgal), de alta frecuencia espacial. La tendencia del eje de esta anomalía es NW-SE, y corre paralela a una sección del arroyo el Caracol. A un costado del arroyo se observan dos máximos alargados, mostrando una tendencia similar.

Los gradientes mayores y mas notorios en este plano de anomalías, ocurren sobre el arroyo Arena Grande, el arroyo el Caracol y al SE de la Venta del Astillero, todos con la misma tendencia. Uno de ellos pasa sobre los puntos mas altos de la Mesa el Nejahuete y Cerritos Colorados, mostrando aparentemente un cambio lateral en densidad.

V.2 Anomalia residual local de segundo orden.

En el mapa del residual obtenido mediante el ajuste via mínimos cuadrados de una superficie polinomial de segundo grado (Fig. 9) se obtuvo un comportamiento similar al caso anterior. Existen leves diferencias en la magnitud o amplitud de las anomalías. En este caso, las anomalías muestran variaciones en sus amplitudes, con el mínimo mayor en la parte central excediendo los -8 mgal y con los pequeños máximos llegando apenas a los 2 mgal. En general las tendencias son las mismas, pero con un aquzamiento mayor en los gradientes que ocurren en el área. Además, ahora se separa un pequeño máximo localizado entre el cerro el Chapulín y Ciudad Granja, mismo que en la Fig. 8 se mostraba como un solo máximo relativo.

V.3 Anomalia residual global de primer orden.

En este caso se aprecian rasgos que no aparecían en los dos planos anteriores, aunque sigue habiendo un comportamiento similar, principalmente con el mapa de la Fig. 8. Por una parte, los pequeños máximos que se agrupan en una unidad y que ocurren con la tendencia de los arroyos El Caracol y Arena Grande, muestran una magnitud menor que los mismos máximos de la Fig. 8. Por otro lado, aparece otro mínimo de gran amplitud sobre los domos el Pedernal y el Iule y que, al igual que el mínimo que se encuentra sobre el cerro el Alto, excede los -7 mgal. También este mínimo es diferente

al obtenido en el mapa residual local de primer orden, donde el mínimo excede solo los -5 mgal. Los dos grandes mínimos de la Fig. 10 deben estar centrados en zonas con gran déficit de masa.

Finalmente, no aparecen los lineamientos que se perciben en la parte SW de la zona en la Fig. 8. Ahora predomina un gran mínimo cuyos comportamiento y tendencia son parecidos a los de la anomalía positiva compuesta por altos gravimétricos y que sigue la tendencia de los arroyos el Caracol y Arena Grande.

Se aprecian varias discontinuidades, resaltando algunas con tendencia NW-SE, ubicadas sobre Cerritos Colorados, entre el domo el Federnal y el arroyo el Caracol, y otras de diferente tendencia, como la ubicada al NE del domo el Chapulín y entre Mesa Taponá y el cerro el Colli.

V.4 Anomalía residual global de segundo orden.

En el plano de la Fig. 11 se presenta un comportamiento similar al del plano de la Fig. 10. Las diferencias que se observan se deben, sin embargo, a las magnitudes de los máximos y los mínimos.

V.5 Anomalías residuales de primero y segundo orden utilizando diferente interpolador.

Los planos de las Figuras 12 y 13 se generaron aplicando el algoritmo de promedios móviles que utiliza nuestro programa de configurado automático. Con el fin de

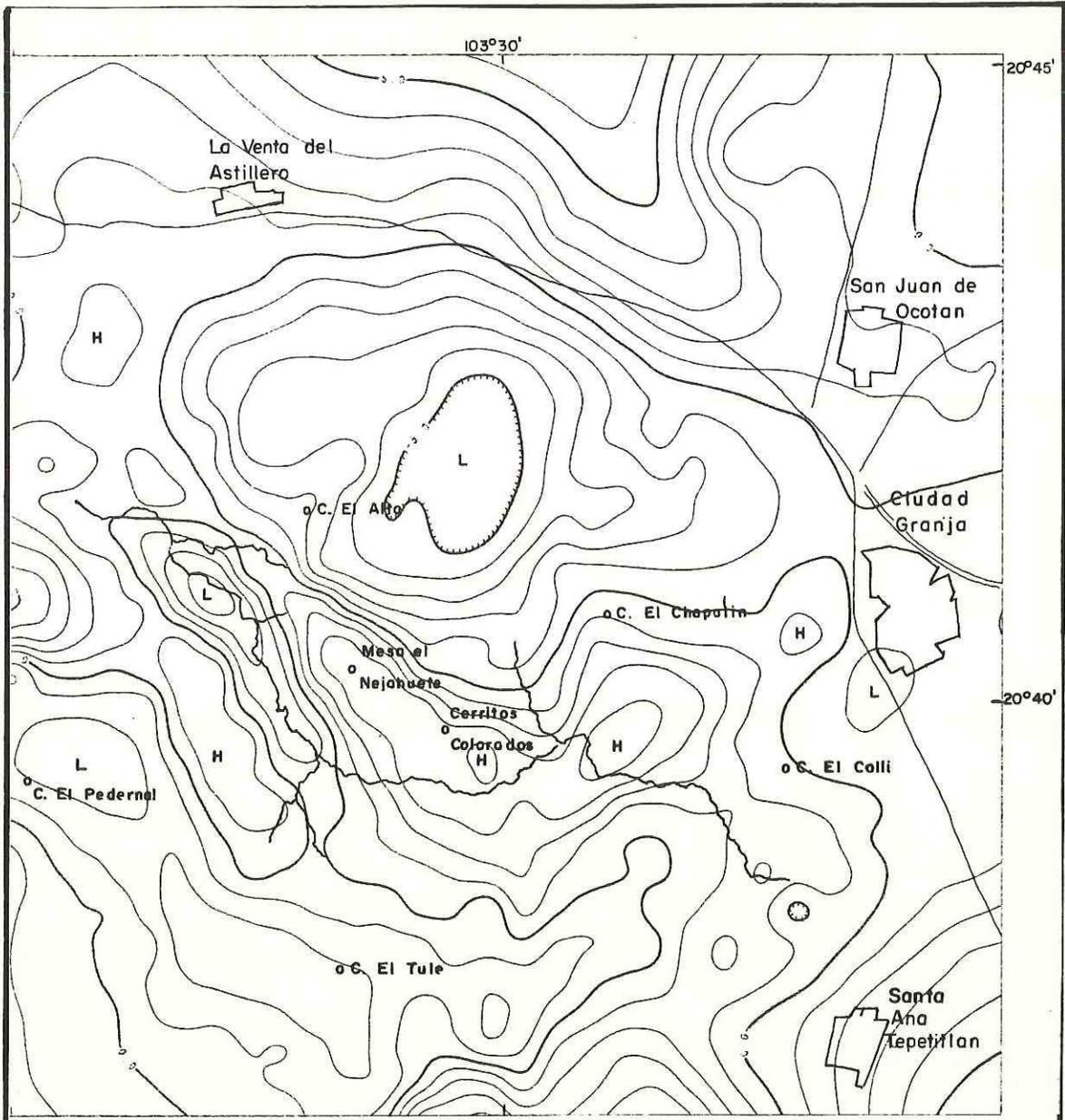


FIGURA 12 .- ANOMALIA DE BOUGUER RESIDUAL DE ORDEN I, LOCAL DE LA PRIMAVERA, JAL. (INTERPOLACION LOCAL).

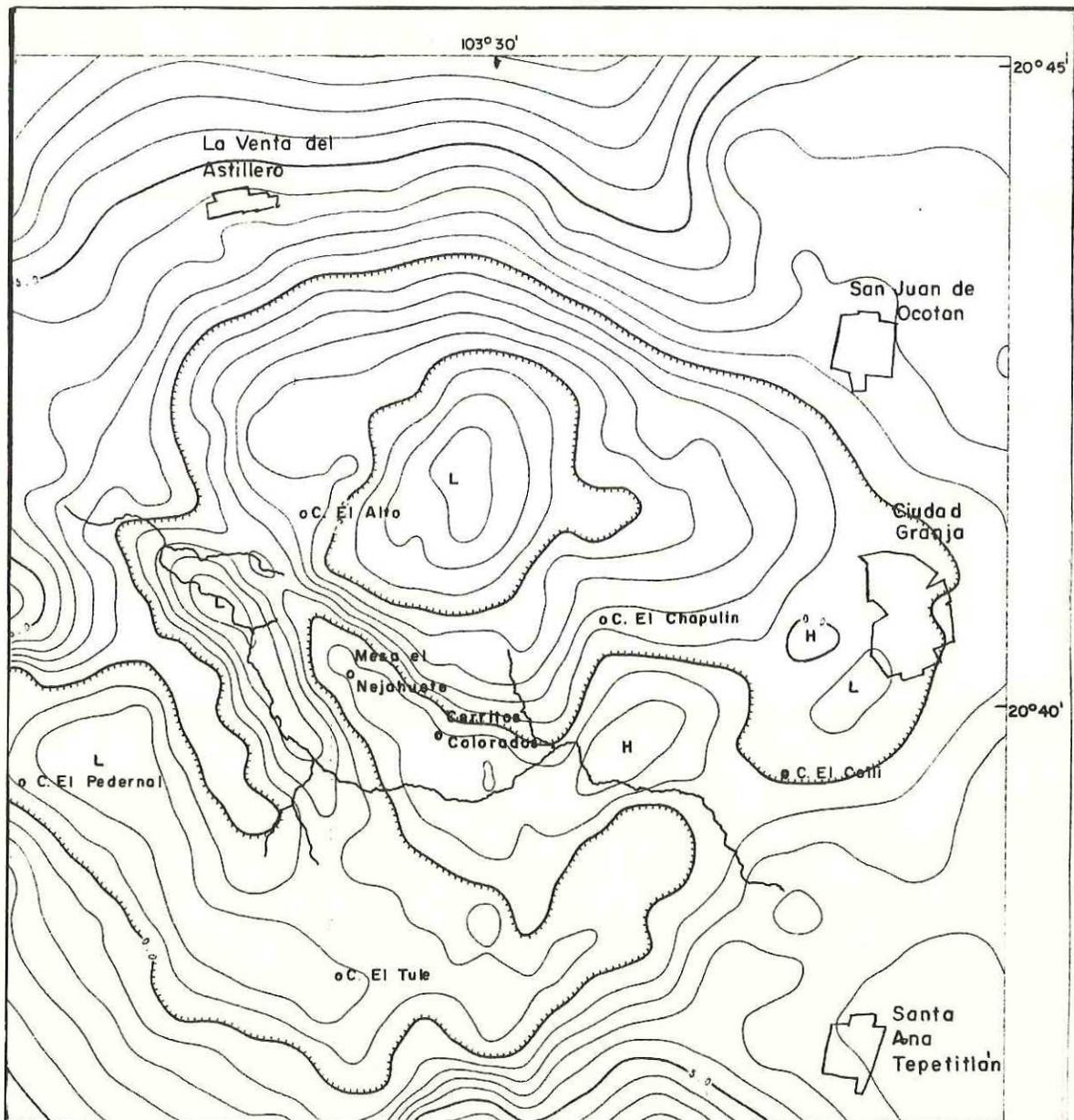


FIGURA 13.- ANOMALIA DE BOUGUER RESIDUAL DE ORDEN 2, LOCAL DE LA PRIMAVERA (INTERPOLACION LOCAL).

observar las diferencias existentes entre este algoritmo y el de interpolación que aplica diferencias finitas, es necesario comparar los mapas de las figuras 12 y 13 con los de las figuras 8, 9, 10 y 11.

En las figuras 8 y 9 las curvas son mas suaves que en las figuras 12 y 13, lo que se debe al efecto de suavizamiento del algoritmo de Briggs (1974). Se presenta menor número de anomalías positivas de alta frecuencia hacia el centro de la zona en las figuras 12 y 13 con respecto a las figuras 10 y 11. En la figura 13, que muestra la anomalía residual de segundo orden, parece existir un alto buzamiento en los contornos en general, con respecto a la figura 12; esto se observa mejor en la parte Norte.

Es necesario hacer la aclaración de que se utilizó el mismo algoritmo de generación de contornos en las seis figuras.

V.6 Interpretación de residuales.

La presencia de domos riolíticos donde ocurren algunos mínimos (por ejemplo, los cerros el Alto, el Tule, el Pedernal y el Colli) parece indicar una relación muy estrecha entre ambas estructuras: domos y mínimos gravimétricos. Es posible que dichos cuerpos discordantes se encuentren en forma de intrusivos en un cuerpo encajonante de mayor densidad. Por otra parte, resulta bastante significativo que en donde se exhibe un grupo de máximos, ocurran varias

manifestaciones hidrotermales superficiales. El arroyo el Caracol fluye con la misma tendencia de esta anomalía positiva, en específico pasando sobre su costado Este. Es precisamente en dicha zona donde la GPU de la CFE ha realizado diversos estudios y perforaciones. Estos estudios sugieren la presencia de un levantamiento, que se ha descrito como un resurgimiento de origen magmático (Mahood, 1978; Venegas Salgado, 1981; JICA, 1986).

Los seis mapas residuales parecen mostrar la existencia de una serie de estructuras alargadas con rumbo NW-SE y paralelas entre sí, localizadas al centro y Oeste de la zona. Al Este del cerro el Pedernal, estas anomalías dan la apariencia de un horst. Precisamente entre los dos máximos de forma alargada que ahí se encuentran, se localiza un mínimo que sugiere un corredor a manera de graben, aunque es difícil asegurar esto último antes de efectuar modelado numérico. Pudiera ser una extensión del hundimiento de la estructura caldérica que discutiremos más adelante y que ha sido inferido en varios estudios previos (Banwell, 1967; Mercado González, 1969; Mahood, 1978; Kazo Montiel et al., 1978; Venegas Salgado, 1981).

Los agudos gradientes que aparecen en los mapas de anomalías residuales parecen indicar la existencia de varias fallas en la zona. Existen varios gradientes que se correlacionan con rasgos estructurales superficiales, como por ejemplo uno que ocurre al NE de Cerritos Colorados, otro

que va del NW de la Mesa el Nejahuete hasta Cerritos Colorados y varios mas con la misma tendencia de este último. Varios autores confirman la existencia de un graben en la zona de Cerritos Colorados en base a la presencia y actitud de varias fallas paralelas escalonadas de rumbo NE-SW, lo que puede correlacionarse perfectamente con el gradiente que, con un rumbo parecido, corre sobre dicha zona, como se muestra en las figuras 8 a 13.

Entre los sistemas de fallas que se infieren se pueden indicar: (a) el sistema en arco que se localiza al N de la zona; (b) un sistema localizado sobre la cuenca del arroyo el Caracol; (c) otro encontrado al Sur del cerro el Tule; (d) otros que se encuentran al Norte del cerro el Pedernal exhibiendo cierto escalonamiento; y (e) una pequeña estructura en forma de graben entre la Mesa el Nejahuete y Cerritos Colorados, mencionada anteriormente. Es posible que los desplazamientos que limitan a dicho graben se encuentren cercanos a la superficie o que sean poco profundos (anomalías de alta frecuencia). Así mismo, los gradientes al N y al S, que en los mapas se exhiben de forma arqueada, pueden ser la respuesta de estructuras muy profundas que se relacionan con el colapso de la caldera ocurrido en los horizontes terciarios profundos (McEvelly et al., 1978); estos gradientes concuerdan con los bordes de la mayor anomalía en la zona.

La amplitud y la magnitud de las anomalías de alta

frecuencia espacial parecen indicar un escalonamiento de los levantamientos denotados por los máximos con un aparente aumento en la profundidad hacia el Oeste. Esto se puede apreciar, por ejemplo, sobre el máximo que se halla al Este del cerro el Pedernal. Definitivamente los planos de residuales gravimétricos reflejan la suma de efectos de altos contrastes de densidad laterales, de los cuales el que parece dar un mayor aporte es el que ocurre entre el paquete de tobas líticas y riolitas y la cima del horizonte andesítico terciario, donde pareció ocurrir el colapso de la caldera.

V.7 Continuación analítica y derivación vertical de residuales de primer orden.

Se aplicaron los algoritmos de continuación analítica y derivación vertical sobre las anomalías residuales de primer orden que se muestran en las figuras 8 y 10. Sobre el primer residual se realizaron varios procesamientos digitales: cinco continuaciones descendentes (a 50, 100, 200, 400 y 500 m) y primera y segunda derivadas verticales. Sobre el residual mostrado en la figura 10 se realizaron dos continuaciones ascendentes llevadas a 100 y a 500 m. Los resultados se describen a continuación.

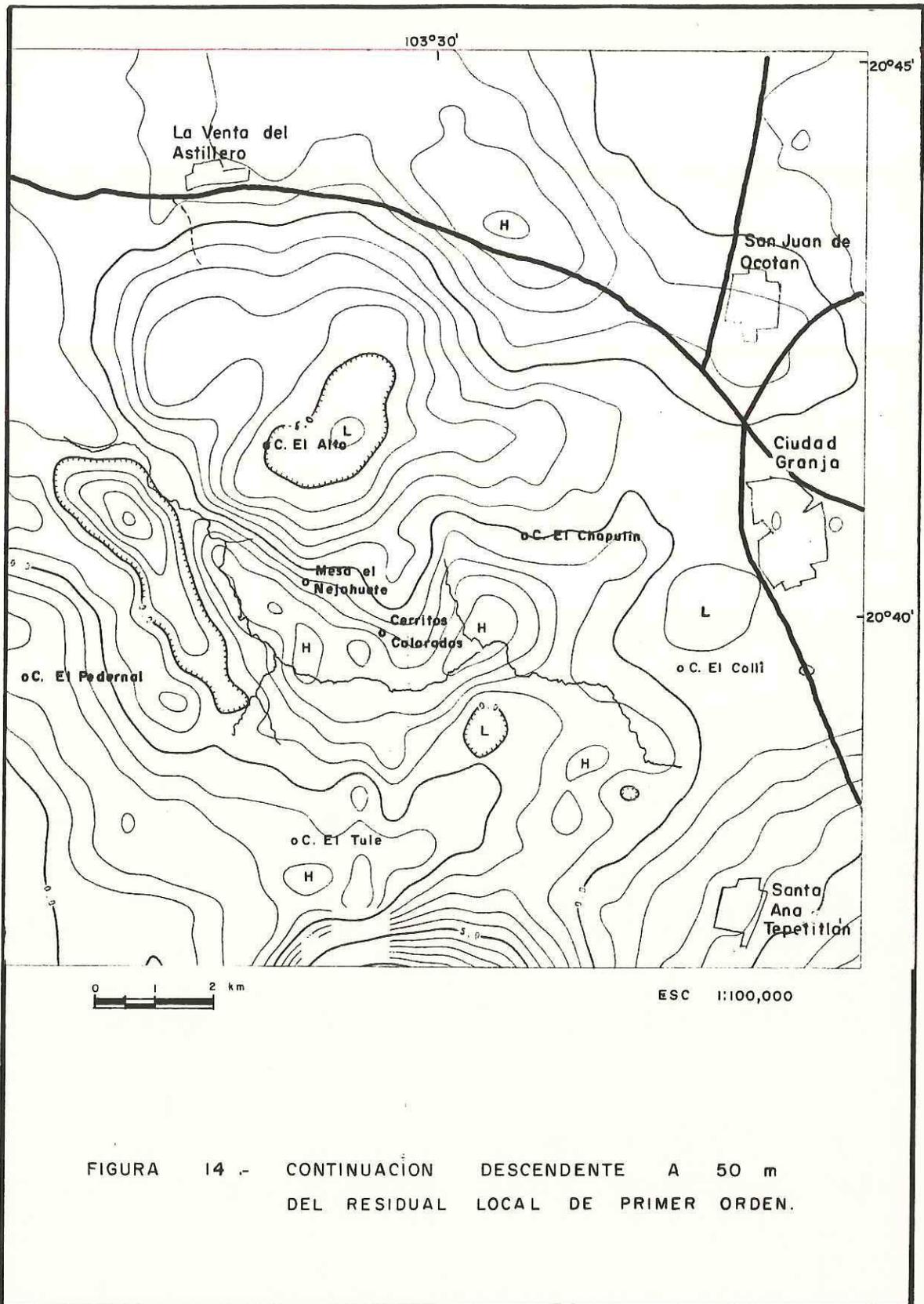
V.7.1 Continuación descendente a 50 m.

Con las continuaciones hacia abajo se busca delimitar los constituyentes de anomalías compuestas. El comportamiento del campo mostrado en el plano continuado a 50 m por debajo

del nivel de referencia es similar al del mapa de la fig. 8, aunque se puede observar que las anomalías inician una descomposición en constituyentes más pequeños. Al respecto, la figura 14 muestra como la gran anomalía negativa del centro de la zona exhibe gradientes que la cortan en anomalías también negativas pero de menor frecuencia espacial, siendo la de mayor magnitud la que se encuentra sobre el cerro el Alto, sobrepasando los -6 mgal. Lo mismo ocurre con el máximo que se localiza sobre la Mesa el Nejahuete y Cerritos Colorados, anomalía que en este plano se descompone en cuatro componentes menores. En general, cabe mencionar que en los planos de anomalías residuales mostrados anteriormente existen gradientes y discontinuidades que permiten apreciar que las anomalías son composiciones de otras anomalías de tallas menores, a diferencia del rasgo positivo que se encuentra al Este, y que en la figura 8 se aprecia como dos anomalías que en la figura 14 se unen en una sola.

V.7.2 Continuación descendente a 100 m.

En el plano de la figura 15 vuelve a ocurrir el mismo comportamiento de los casos anteriores. Sin embargo, el mínimo gravimétrico que se encuentra entre Ciudad Granja y el cerro el Colli no se ha modificado sustancialmente a lo largo de todo el procesamiento; además, el máximo que se muestra al Este del cerro el Pedernal en la figura 14, se discierne



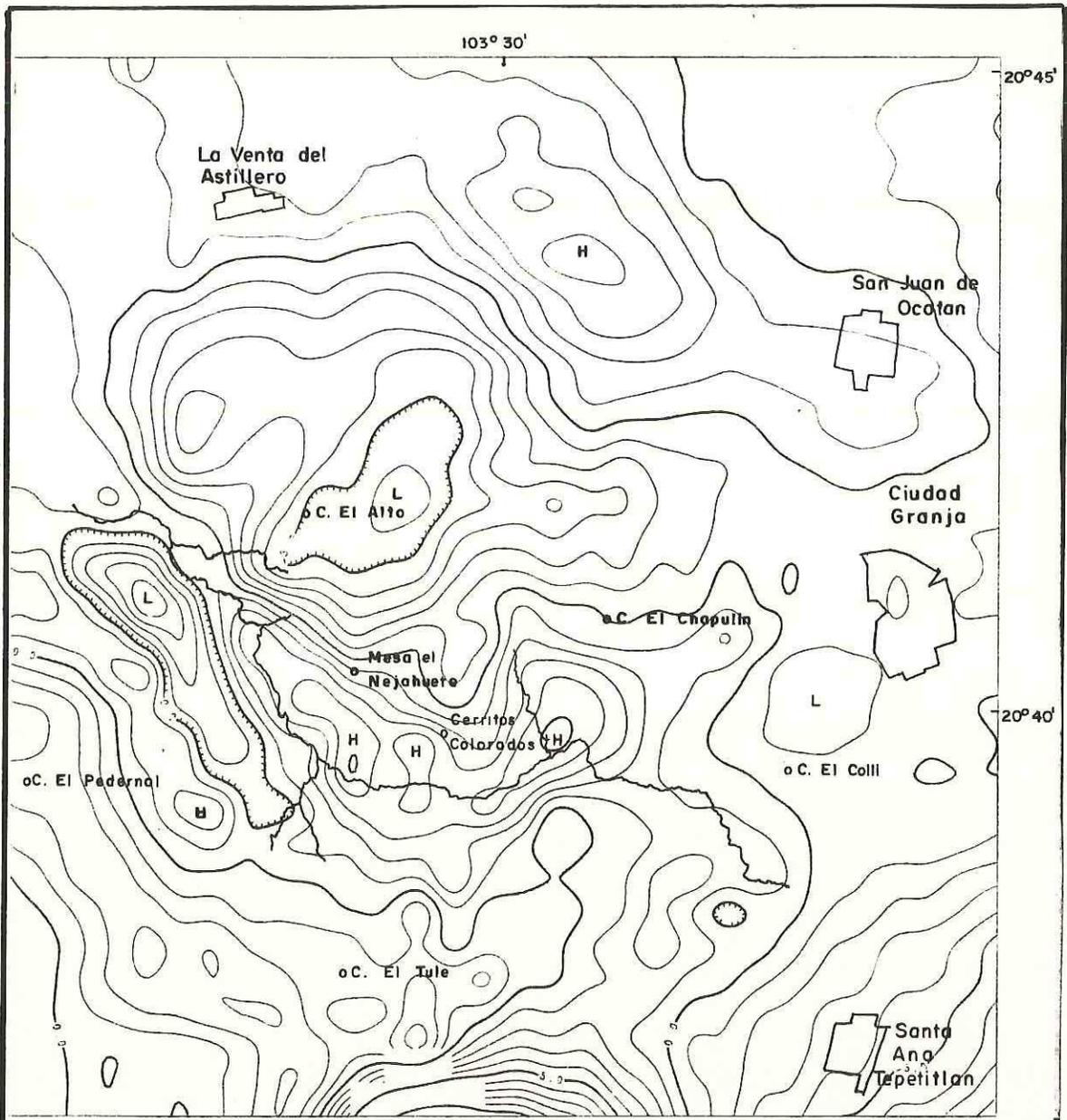


FIGURA 15.- CONTINUACION DESCENDENTE A 100 m DEL RESIDUAL LOCAL DE PRIMER ORDEN.

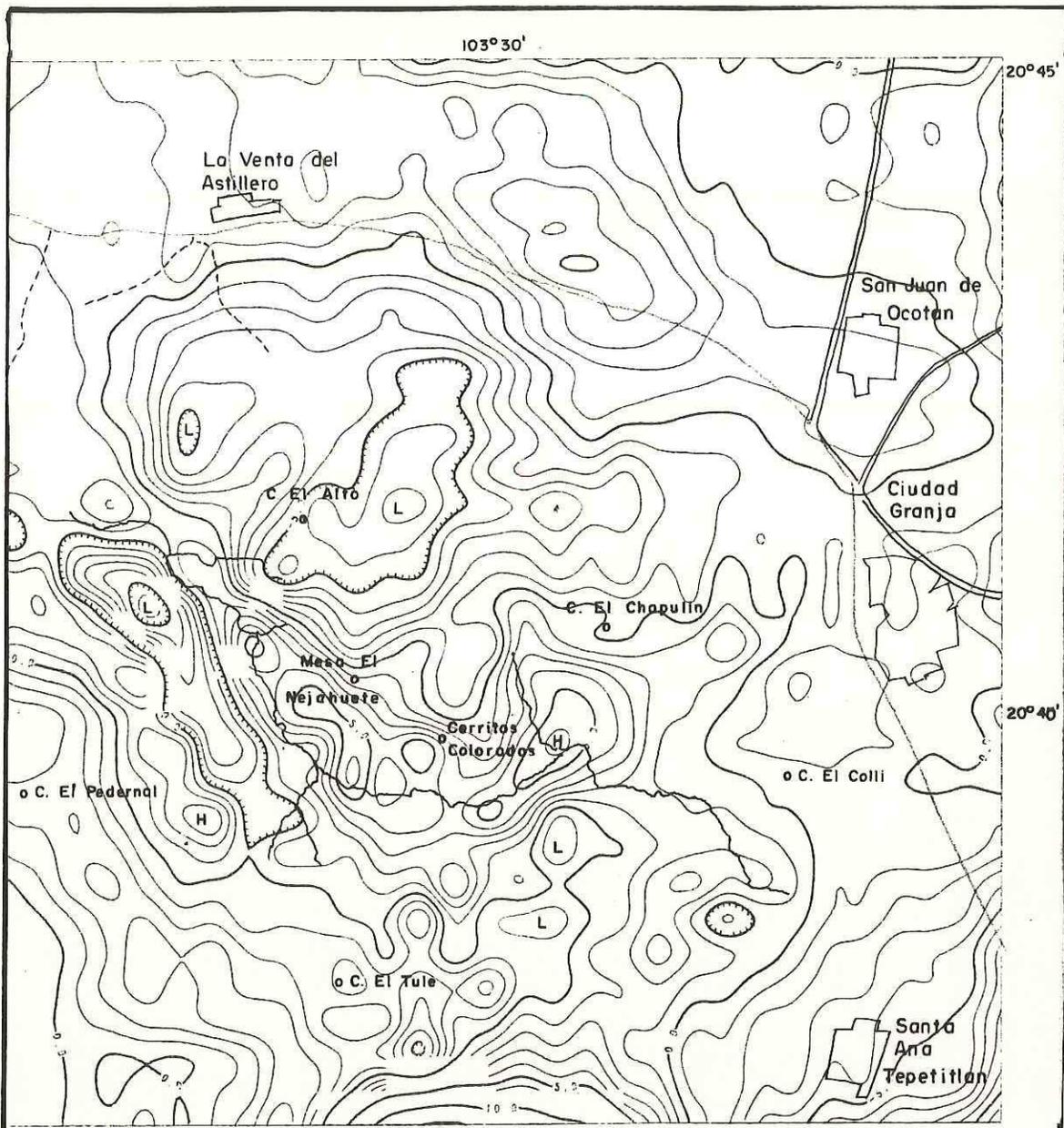
ahora en dos componentes; se exhiben mas discontinuidades en los contornos, y con respecto de la figura 14 hay mas descomposición en anomalías menores hacia el sur del área.

V.7.3 Continuación descendente a 200 m.

Es posible que a este nivel ya se halla tocado la cima de algunos cuerpos fuentes de anomalía, pues en el plano que se muestra en la figura 16 se observan leves oscilaciones al Este del área (E del cerro el Chapulín), precisamente sobre unas anomalías que no se modificaban o discernían en los planos anteriores. En este caso son mas fuertes las discontinuidades en los contornos y la separación de las anomalías en componentes pequeños. Entre las anomalías invariantes, aunque no en los gradientes de sus contornos, se encuentra un mínimo de forma alargada emplazado al Norte del cerro el Pedernal, cuyo eje longitudinal tiene un rumbo NW-SE.

V.7.4 Continuaciones descendentes a 400 y a 500 m.

Aunque han aumentado las oscilaciones tanto en el plano de la figura 17 como en el plano de la figura 18, puede aún notarse que las anomalías continúan con el mismo comportamiento. Es posible que en ambos procesamientos se haya necesitado un filtrado mas severo para eliminar efectos de fuentes ubicadas entre la superficie y los planos de continuación, porque aparentemente las estructuras que antes



ESC 1:100,000

FIGURA 16.- CONTINUACION DESCENDENTE A 200 m DEL RESIDUAL LOCAL DE PRIMER ORDEN.

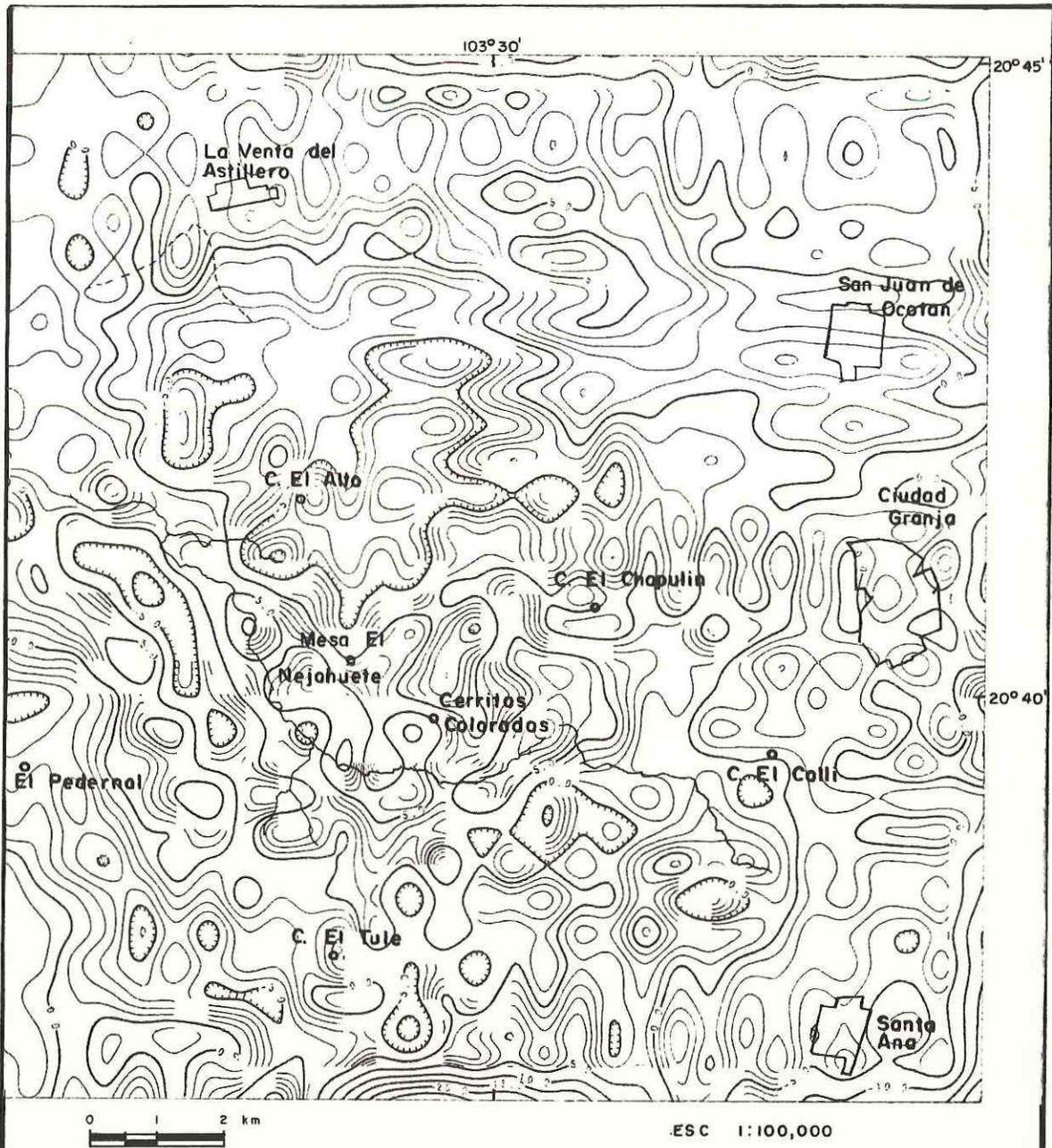


FIGURA 17 .- CONTINUACION DESCENDENTE A 400 m
DEL RESIDUAL LOCAL DE PRIMER ORDEN.

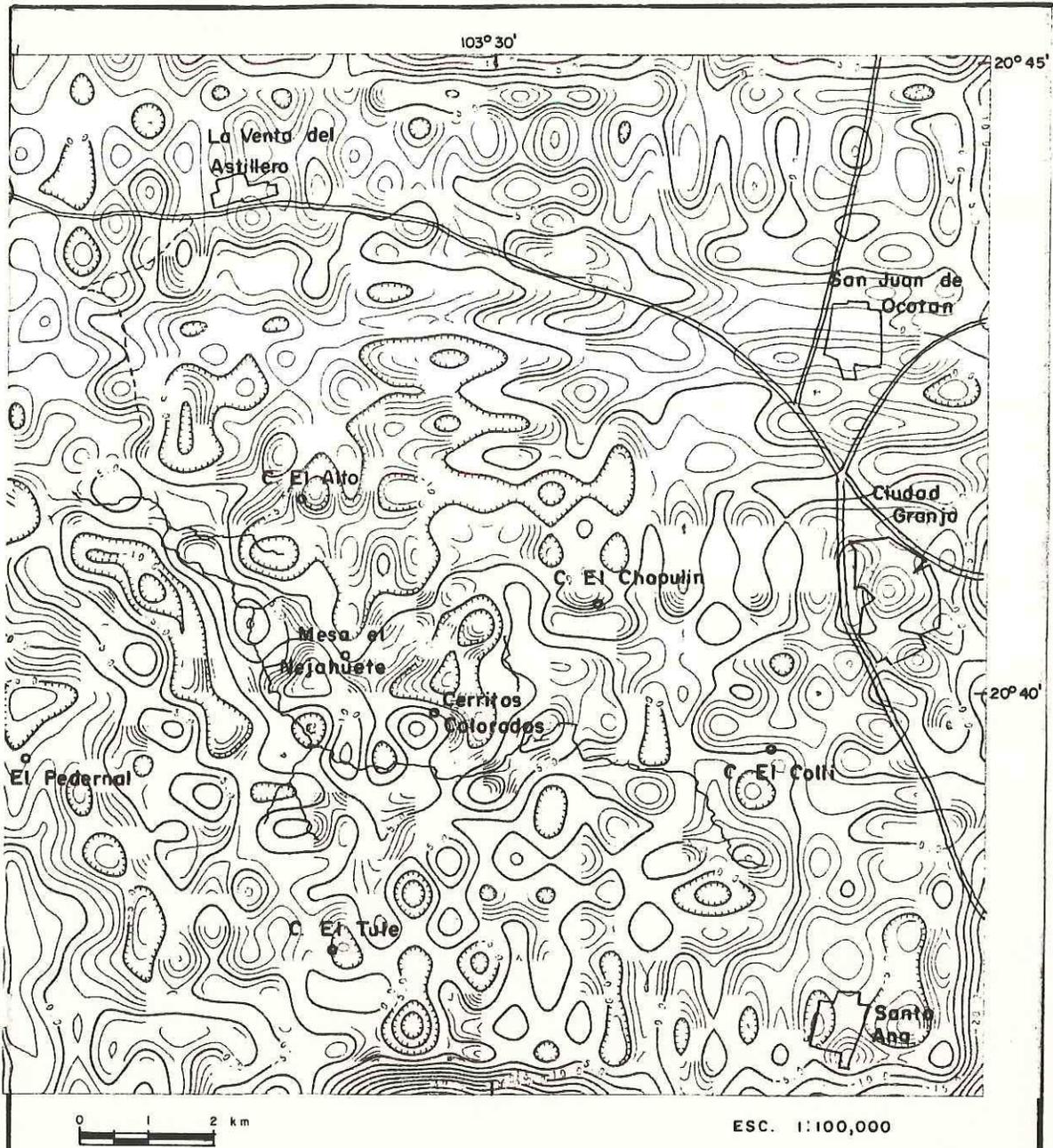


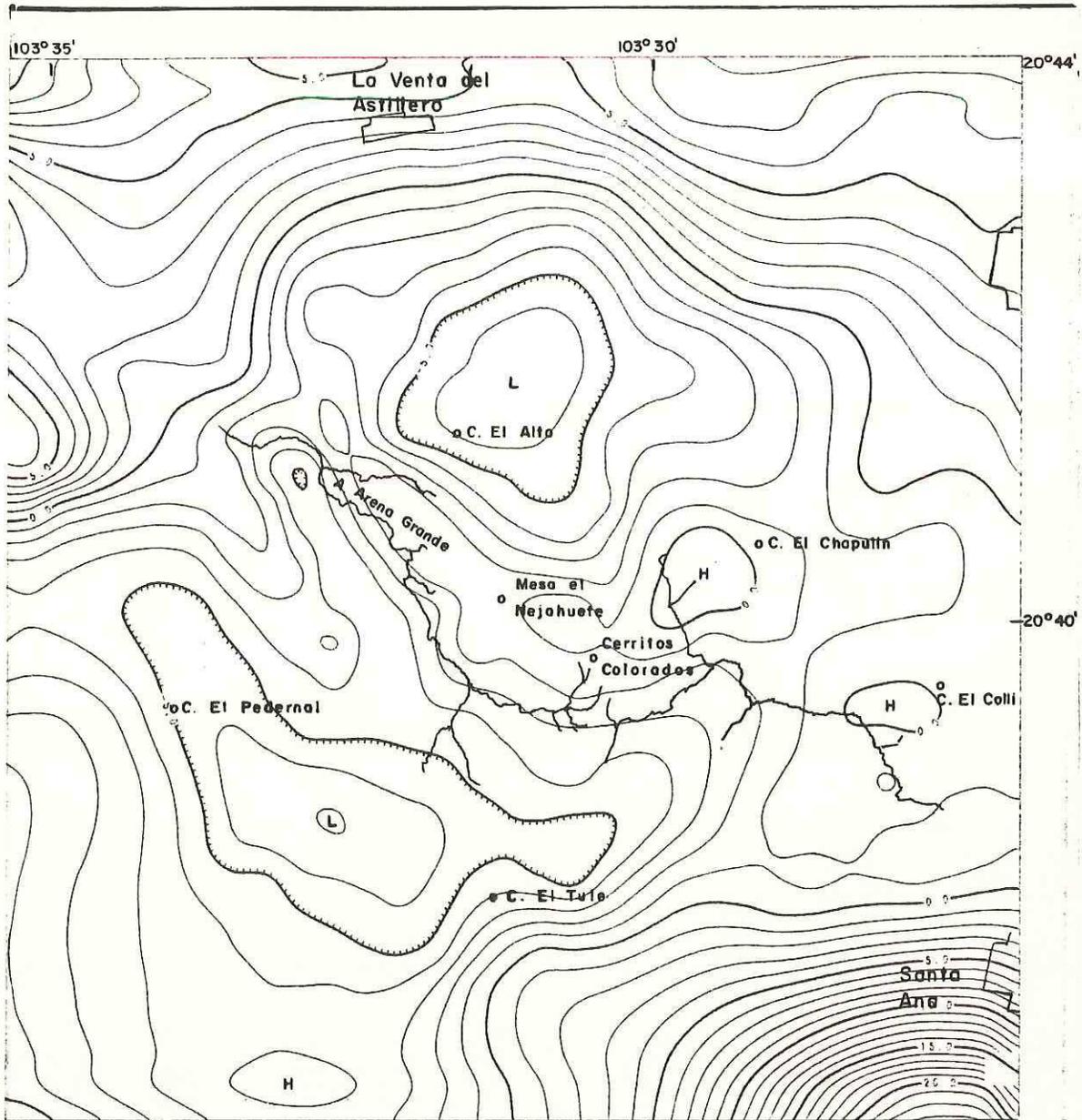
FIGURA 18 . CONTINUACION DESCENDENTE A 500 m
DEL RESIDUAL LOCAL DE PRIMER ORDEN.

se discernían ahora se pierden.

V.7.5 Continuaciones ascendentes a 100 y a 500 m.

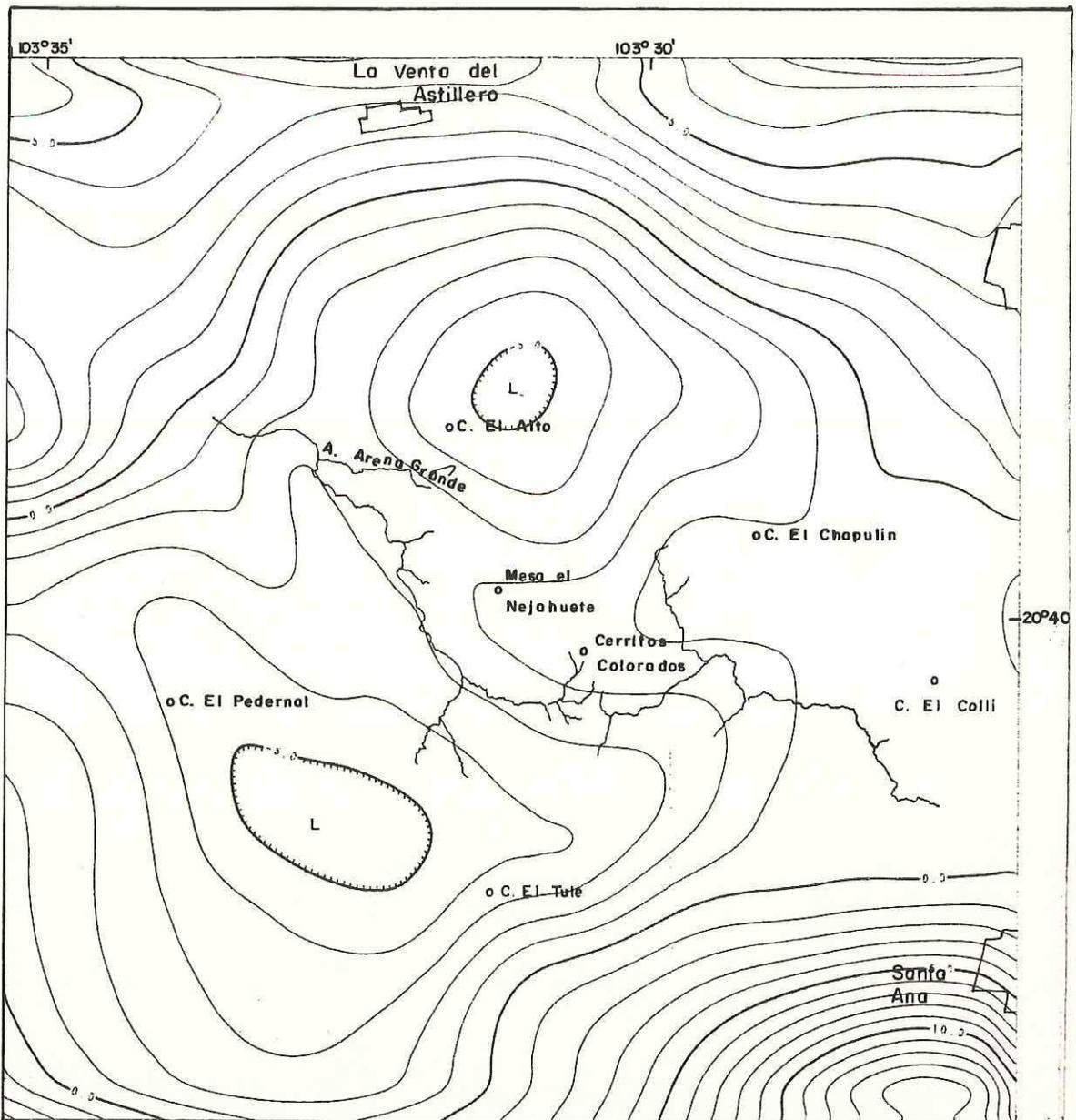
Estas continuaciones analíticas se realizaron sobre el residual de primer orden que se obtuvo de la anomalía de nivel global. En el caso de la figura 19, que muestra la continuación a 100 m sobre el nivel de referencia, se percibe claramente con respecto a su plano relativo (Fig. 10), que ha desaparecido la tendencia de descomposición del alto gravimétrico de Cerritos Colorados-El Nejahuete, aunque dicha anomalía aún persiste. Los mínimos de gran amplitud que se localizan uno al centro y otro al suroeste del área, no han sufrido una modificación apreciable, exceptuando una reducción de su magnitud. Es obvio que con este procesado también cambien un poco los gradientes, pues aumenta la distancia entre las fuentes y el plano de observaciones. A pesar de esto, visto en forma general, la tendencia y el comportamiento siguen siendo similares entre ambos mapas.

En el plano de la figura 20 nos damos cuenta de la existencia de cambios más drásticos. Todo se reduce a dos grandes mínimos de menor magnitud dominando a toda el área, con dos máximos relativos hacia el Este de Cerritos Colorados y sobre los arroyos el Caracol-Arena Grande en su parte NW. Ahora los gradientes son más suaves, y es interesante notar como el arroyo el Caracol imita la tendencia del gradiente suave que separa a los dos mínimos.



ESC 1:100,000

FIGURA 19 - CONTINUACION ASCENDENTE A 100 m DEL RESIDUAL DE PRIMER ORDEN GLOBAL.



0 1 2 km

ESC 1:100,000

FIGURA 20.- CONTINUACION ASCENDENTE A 500 m DEL RESIDUAL DE PRIMER ORDEN GLOBAL.

V.7.6 Interpretación de los planos de continuación analítica

Antes de hacer una interpretación cuantitativa denominaremos como alineamientos, no como fallamientos, a las estructuras elongadas asociadas a los gradientes agudos, hasta no estar seguros de esto último. Así, se pueden apreciar varios rasgos estructurales mayores, como todos esos alineamientos de tendencia NW-SE que, por ocurrir en rasgos anómalos de alto número de onda, pueden ser muy someros. Existen además varias discontinuidades que parecen indicar lineamientos o desplazamientos de rumbo, con excepción de las discontinuidades que, por su carácter oscilatorio, probablemente se deban al filtrado pasabandas ejecutado antes de las continuaciones. Es interesante indicar que el alto gravimétrico, que sigue la tendencia del cauce del arroyo el Caracol, parece representar un levantamiento o exceso de masa, formado por pequeños bloques someros y fallas normales de rumbo casi N-S.

En el mapa de la figura 15 se observa mejor la respuesta gravimétrica de varias estructuras. Parecen definirse algunos altos estructurales en el seno de los máximos localizados en varios puntos a saber: (1) en la parte sur de Cerritos Colorados y la mesa el Nejahuete, (2) al E y NE del cerro el Pedernal, (3) y al SE del cerro el Chapulín. Los mínimos los podemos interpretar como zonas de bajos topográficos del basamento como los que ocurren

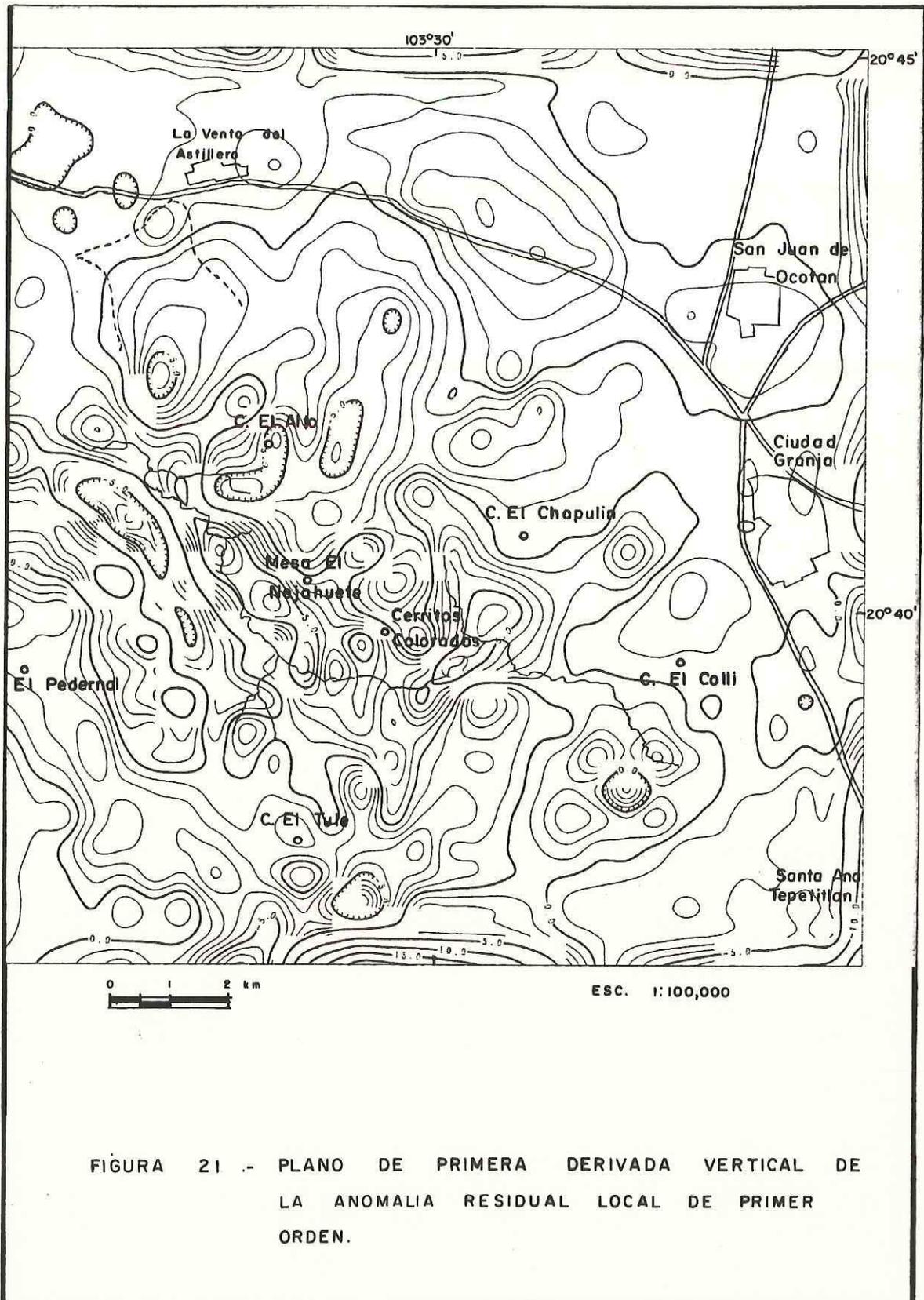
principalmente en la parte central y hacia el SE del area.

En el plano de la figura 16 es mas clara la presencia de un conjunto de bloques levantados, reflejada en las anomalías positivas que se encuentran sobre los arroyos el Caracol y Arena Grande (sur de Cerritos Colorados; sur de la Mesa el Nejahuete y SE del cerro el Chapulín). Además, se clarifican mejor los lineamientos como los que ocurren con tendencia NW-SE, cortados por una serie de discontinuidades que bien pudieran ser los rasgos mas someros de toda el área (como las fallas superficiales escalonadas del graben de Cerritos Colorados, que en este nivel son poco perceptibles). La estructura considerada como levantamiento en la figura 20 se ajusta muy bien con el alto estructural que postulan como resurgencia varios autores, y que en este plano parece continuar hacia el NW, hasta el que sería el extremo Oeste de la estructura caldérica, sugiriendo un decremento en elevación hacia la misma dirección.

El corredor que se encuentra al NE del cerro el Pedernal parece elevarse un poco con respecto a los hundimientos (o déficits de masa) indicados por los mínimos conspicuos, y por apreciarse aun en la figura 20 es posible que se encuentre emplazado en el horizonte profundo que presenta mayor contribución en la anomalía residual.

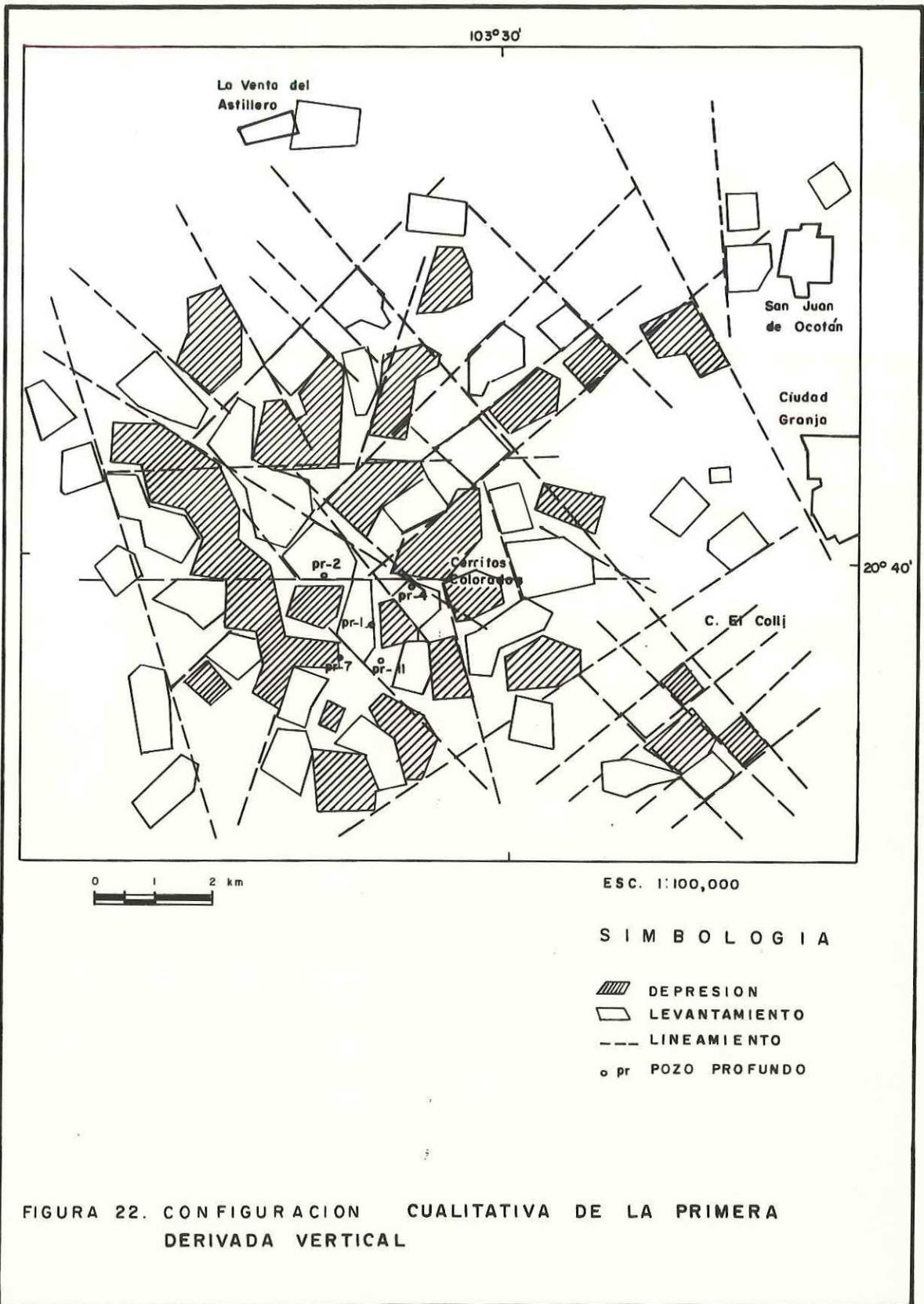
V.7.7 Derivaciones verticales de primero y segundo orden.

El plano de la figura 21 corresponde a la primera



derivada vertical del campo residual de primer orden de la figura 8. La configuración de la figura 22 es una interpretación cualitativa basada en dicha derivada vertical. Al igual que con las continuaciones descendentes, son apreciables varios altos estructurales que por su distribución parecen corresponder a bloques irregulares que se escalonan y elevan en secciones. De esta manera se perciben varios bloques principales, dos de los cuales se localizan hacia el centro de la zona, uno al Este del cerro el Federnal y dos más al Norte y NE, cerca de San Juan de Ocotán. Con base en que las derivaciones dan una mejor separación de rasgos que se encuentran muy juntos, se ha establecido el modelo del plano de la figura 22. En esta fase ya no se aprecia la estructura caldérica, solo los rasgos de alta frecuencia, que se encuentran mas someros. A pesar de eso, existen rasgos que pueden tener relación con estructuras mas profundas.

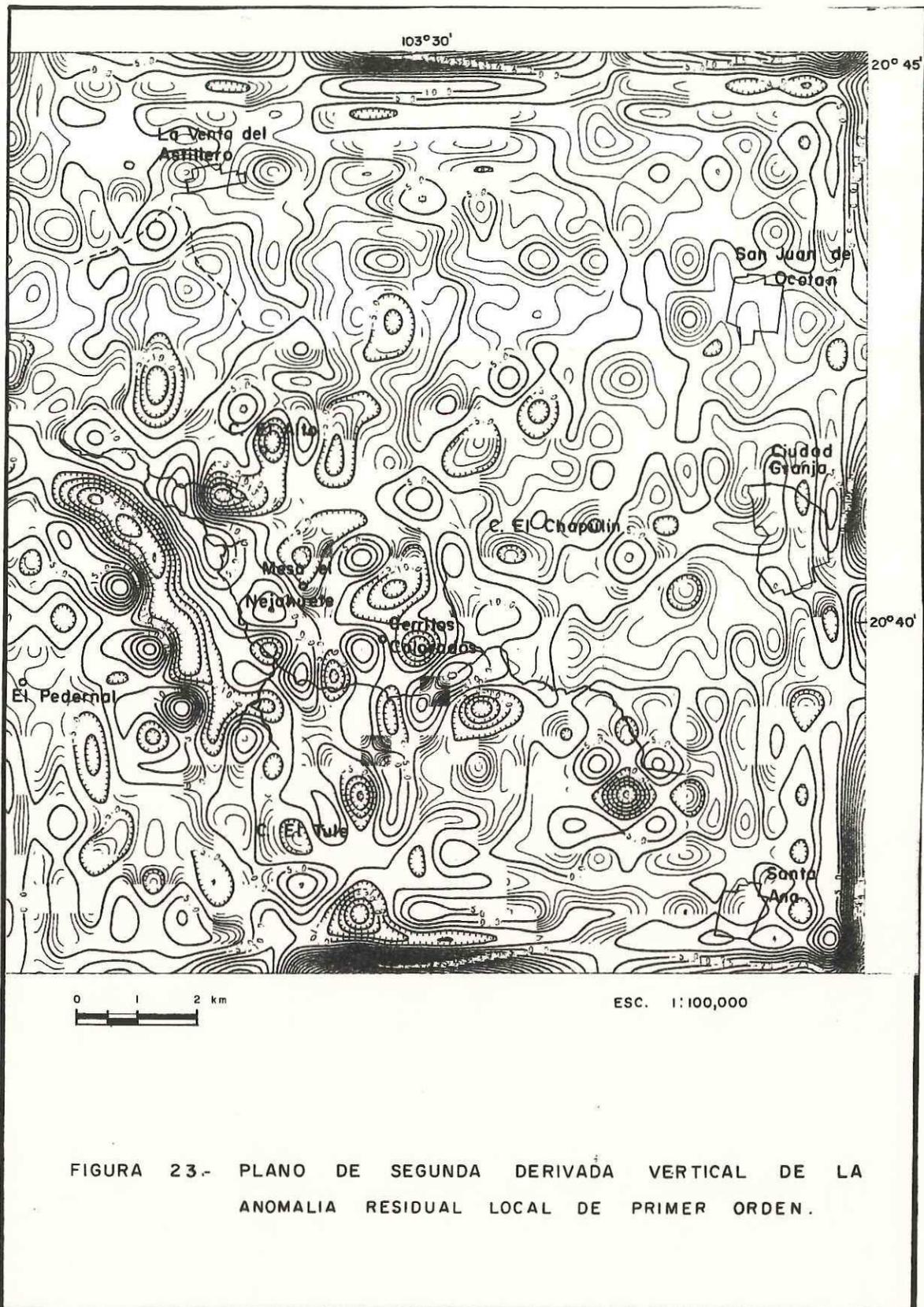
Con estos resultados en particular se fortalece y apoya lo establecido con las continuaciones descendentes. Los levantamientos que ocurren en el centro hacia el oeste de la zona, pueden ser el resultado de un resurgimiento corroborado por la presencia en ese punto de varias anomalías de resistividad, potencial espontáneo (Romero González, 1981), magnetotélúricas (JICA, 1986), de microsismicidad (Keyes Zamora, 1980), y la ocurrencia de la mayoría de las manifestaciones termales (Mahood, 1978; Venegas Saigado,

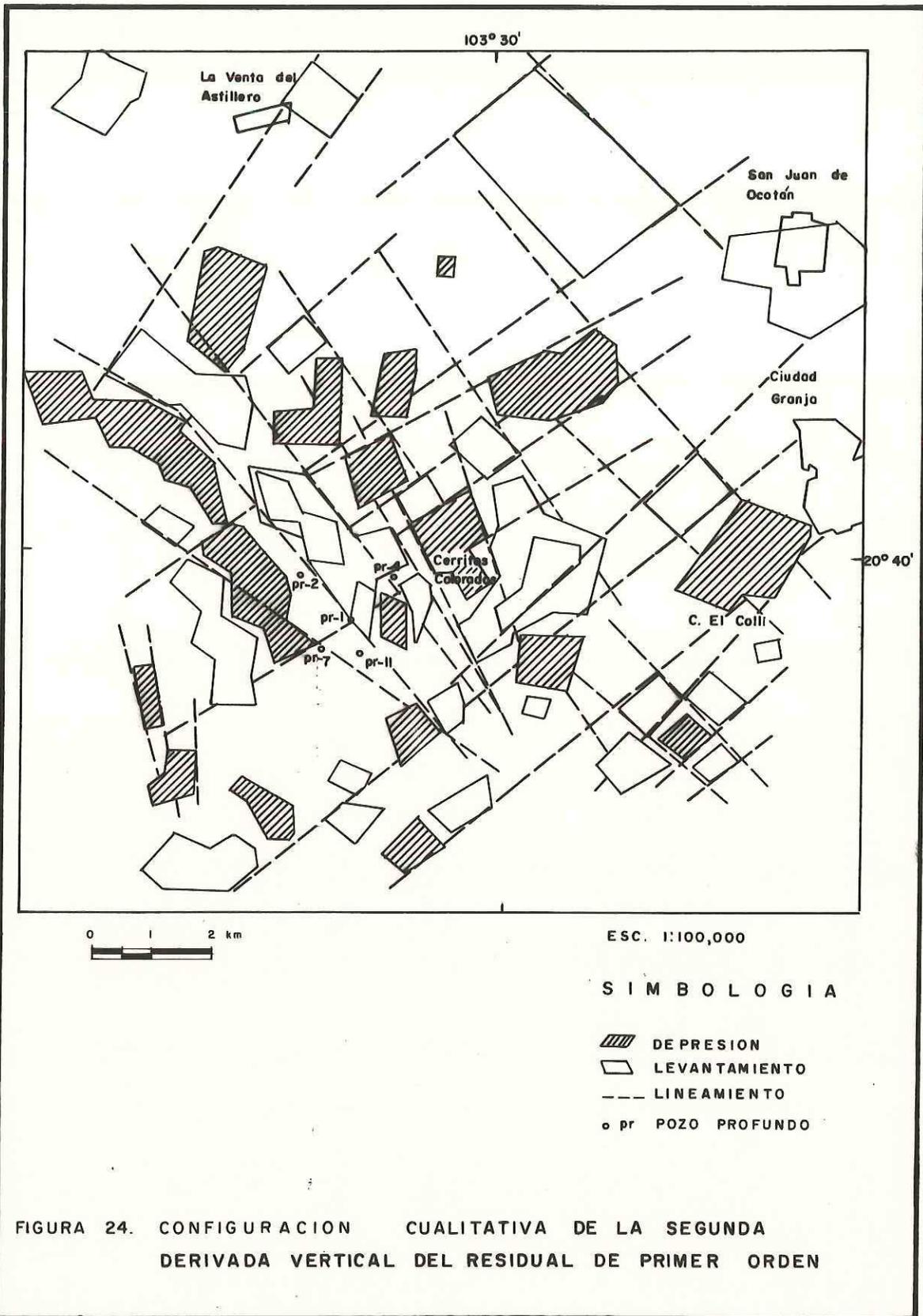


1981). Mas puntos a favor de esta idea emanan de los resultados de las perforaciones hechas en la zona que, aunque locales, pero dan una noción de la disposición de los cuerpos que parecen provocar estas anomalías. El trabajo de Venegas Salgado (1981) muestra los mismos resultados localmente: altos estructurales en los horizontes andesíticos y en la Formación Tala donde ocurren los altos estructurales de acuerdo a nuestro estudio, y un hundimiento de los mismos horizontes donde se muestran mínimos en las diferentes etapas.

Existen dos tendencias generales en los lineamientos esbozados con líneas punteadas en el plano de la figura 22, que atraviesan la zona de NE-SW y de NW-SE. Adicionalmente ocurren otras tendencias de corte local con una actitud E-W principalmente. Es muy probable que los primeros y los últimos rasgos sean mas someros que los de rumbo NW-SE, particularmente los del centro del área, porque ocurren en anomalías de elevado número de onda, que son provocadas por cuerpos y estructuras que se encuentran mas cerca de la superficie.

En la figura 23 se expone el plano de segunda derivada y la figura 24 corresponde a una interpretación cualitativa basada en el plano anterior. A detalle podemos observar algunos rasgos de interés en el plano de la figura 24, como la existencia de lo que se puede interpretar como grabens, en el NW y sobre Cerritos Colorados, sobre la zona en la que se





localizan los pozos PR-10, PR-4, y otro graben muy largo que corre en posición paralela y con el mismo rumbo del arroyo el Caracol.

VI. INTERPRETACION CUANTITATIVA.

VI.1 Inversión de datos: interfase tobas-andesitas.

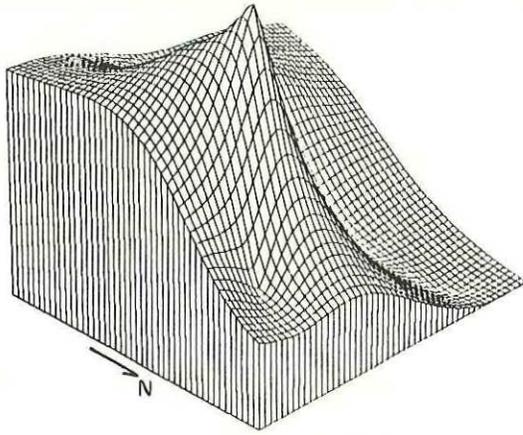
Los métodos de interpretación de datos gravimétricos implementados y usados hoy en día aproximan la geometría del subsuelo con estructuras poligonales simples. Existen algoritmos que calculan el efecto gravimétrico para estructuras de longitud infinita (Talwani et al., 1959) o cuerpos tridimensionales finitos (Talwani y Ewing, 1960; Nagy, 1966; Banerjee y Gupta, 1977). En este estudio se utilizó una técnica sencilla de inversión de datos como paso inicial para una interpretación mas completa. Se trata de un método en 1-D propuesto por Tomoda y Aki (1955) y Tsuboi (1983). Esta técnica aplica series trigonométricas para determinar la profundidad a una interfase entre dos medios con un contraste de densidad conocido, calculando la desviación que tiene dicha interfase de su profundidad media, empleando el exceso de masa. De esta manera proporciona una estructura de dos capas.

Con un programa de computación modificado de Thanassoulas y Tsokas (1985) se interpretaron los cuatro perfiles de la figura 8, tomando como mas conspicua a la

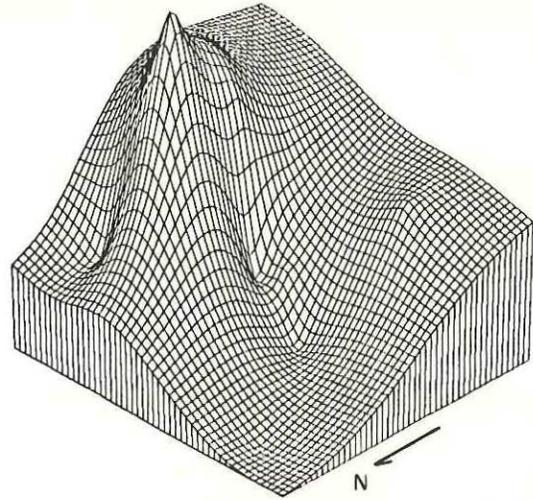
interfase Formación Tala y tobas-andesitas, asignando para el primer paquete una densidad promedio de 2.165 gr/cm^3 y para el segundo una densidad nominal promedio de 2.39 gr/cm^3 . La profundidad propuesta para esta interfase como promedio fue de 1500 m, proporcionada por las perforaciones hechas en la zona productora (figuras 25 y 26 de igual profundidad a la cima de la toba Tala y las andesitas, cuya localización se indica en la figura 1). La diferencia en densidad se varió en tres ocasiones (c.d.=0.185, 0.225 y 0.275) obteniéndose tres pruebas para cada perfil. El esquema de interfase que se traza en los modelos es muy semejante en las secciones D-D' y B-B' (figura 27). En ellas se observa un levantamiento a 1000 m de profundidad en el área de la zona de perforaciones. En el perfil B-B' el levantamiento parece descomponerse en dos bloques, pero localizados a mayor profundidad con respecto al perfil D-D'. En el perfil A-A' se observa mejor la presencia de dos levantamientos, aunque a mayor profundidad que en los dos casos anteriores. De existir unos levantamientos como los que se postulan, deben profundizarse en dirección NW.

En las 4 secciones son muy claros los que pueden ser los límites del colapso de la caldera.

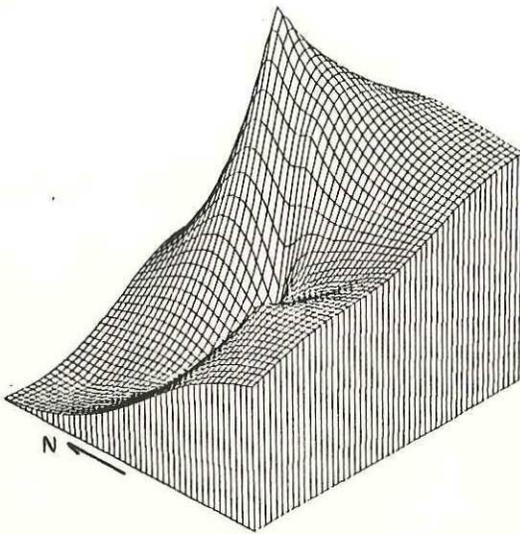
La sección C-C' muestra también dos levantamientos estructurales; de estos el más somero se encuentra a 800 m de profundidad. Este casi concuerda con la zona de Cerritos Colorados y puede estar involucrado con una zona de debilidad por donde el magma está empujando y ha derramado material



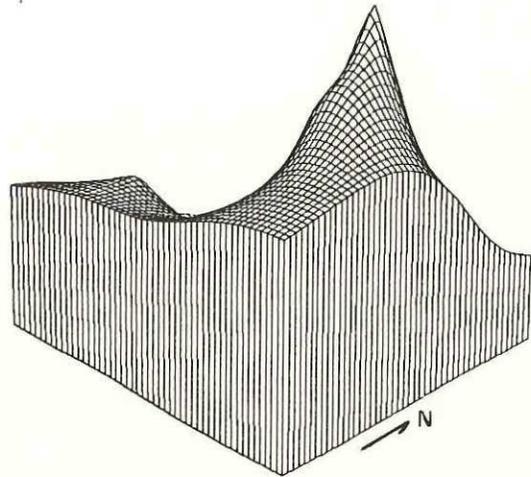
CIMA DE LA TOBA TALA (Q1t) (1)



CIMA DE LA TOBA TALA (Q1t) (2)

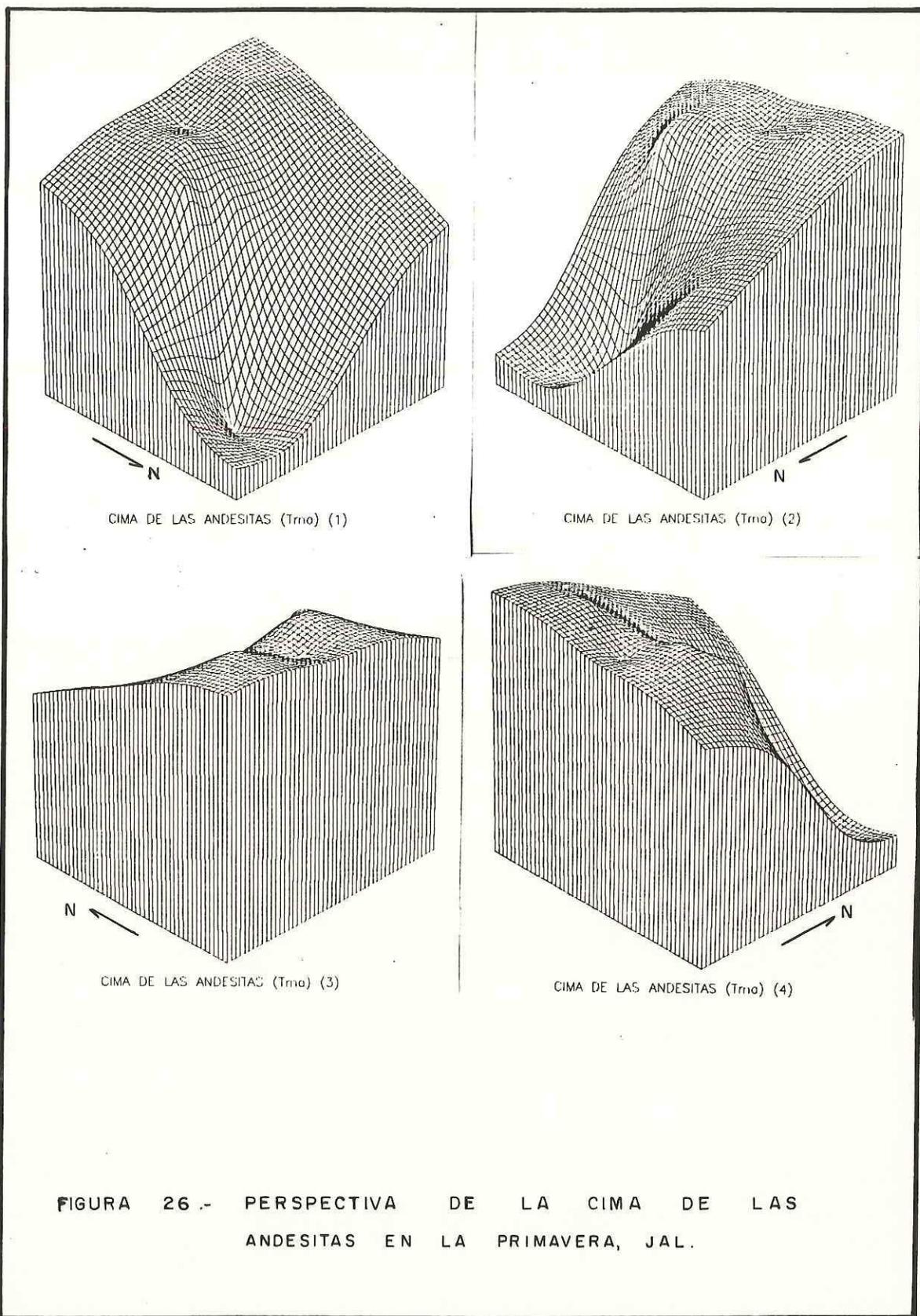


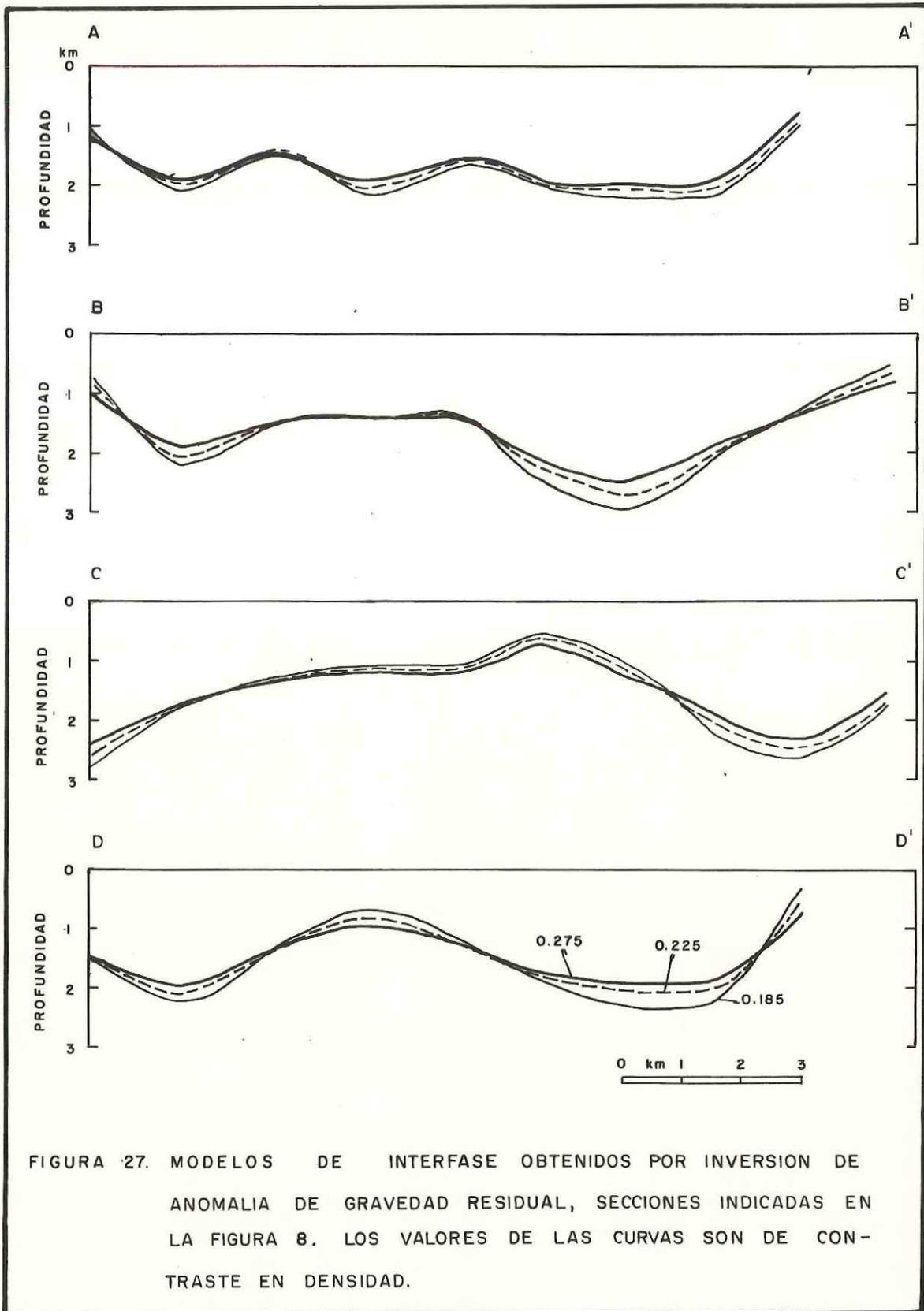
CIMA DE LA TOBA TALA (Q1t) (3)



CIMA DE LA TOBA TALA (Q1t) (4)

FIGURA 25 .- PERSPECTIVA DE LA CIMA DE LA TOBA TALA EN LA PRIMAVERA, JAL.





físico (Veneegas balgado, 1981).

Sobre todo notamos que en los modelos de la figura 27, a mayor contraste en densidad los hundimientos son mas someros y los levantamientos mas profundos.

VI.2 Modelado bidimensional.

VI.2.1 Consideraciones generales.

Todos los modelos bidimensionales se realizaron tomando en cuenta varios aspectos: primero, se esbozaron usando como base, modelos de inversión modificados obtenidos para un contraste en densidad con el programa de Thanassoulas y Tsokas (1985). Sobre de estos modelos, se aplicaron como limitantes iniciales el esquema estratigráfico y los contrastes en densidad reportados por JICA (1986) (tabla I). En particular en el perfil D-D' se utilizan como control además las profundidades a los contactos mas importantes que se reportaron en las perforaciones de los pozos.

La posición de los perfiles (figura 8) se eligió de acuerdo a ciertos criterios de ortogonalidad a los contornos y bidimensionalidad de las respectivas anomalías (Birch, 1982). Los modelos que muestran la solución mas aproximada a la fuente de la anomalía se obtuvieron con el algoritmo de Talwani et al. (1959), a base de ensayos de prueba y error.

Las densidades asignadas a los modelos fueron tomadas de promedios de los valores de densidad presentados en la tabla I (JICA, 1986). Los horizontes que conforman los modelos

TABLA I. DENSIDADES DE MUESTRAS DE ROCAS
 (DE ACUERDO A J.I.C.A., 1986)

GEOLOGIA	DENSIDAD HUMEDA (g/cm ³)	Nº DE MUEST.	DENSIDAD MEDIA (g/cm ³)	
Cuaternario	riolita (domo central)	6	2.21	2.21
	toba soldada (toba Tala)	9	2.06	
Terciario	riolita	10	2.33	2.28
	toba	7	2.22	
	andesita	7	2.39	
	basalto	6	2.60	
roca sedimentaria del Cretácico		2	2.57	

● Muestra superficial ○ Muestra de núcleo

adoptados son los siguientes: a) sedimentos lacustres, Formación tobácea Tala y riolitas vitrofiricas, con una densidad nominal de 2.06 gr/cm^3 , b) riolitas, tobas líticas y delgadas capas andesíticas, con un valor de densidad de 2.165 gr/cm^3 , c) un enorme cuerpo andesítico con una densidad nominal de 2.39 gr/cm^3 . Como se puede apreciar, el mayor contraste ocurre entre los dos últimos cuerpos. Aunque estos valores de densidad pueden exhibir una variación considerable dentro de cualquier secuencia litológica y aún en rocas de la misma edad, es posible asociar dicha serie de densidades con los cuerpos geológicos propuestos, y usarlas como densidades nominales. Durante el análisis directo las densidades se mantuvieron constantes, mientras que la profundidad y geometría de los cuerpos se variaban en todas las pruebas.

VI.2.2 Modelado bidimensional del residual local de primer orden.

En las cuatro secciones bidimensionales (figuras 28 y 29) pueden apreciarse varios aspectos interesantes. Por una parte, resulta factible diferenciar dos zonas tectónicamente disímiles en las estructuras exhibidas: una estable, que recae en la parte Norte del área de La Primavera y que correspondería a lo que parece ser el límite Norte de la caldera; su estabilidad se indica por una relativa ausencia de fallamientos. La zona inestable o con mayor actividad tectónica, está representada por el área con mayor

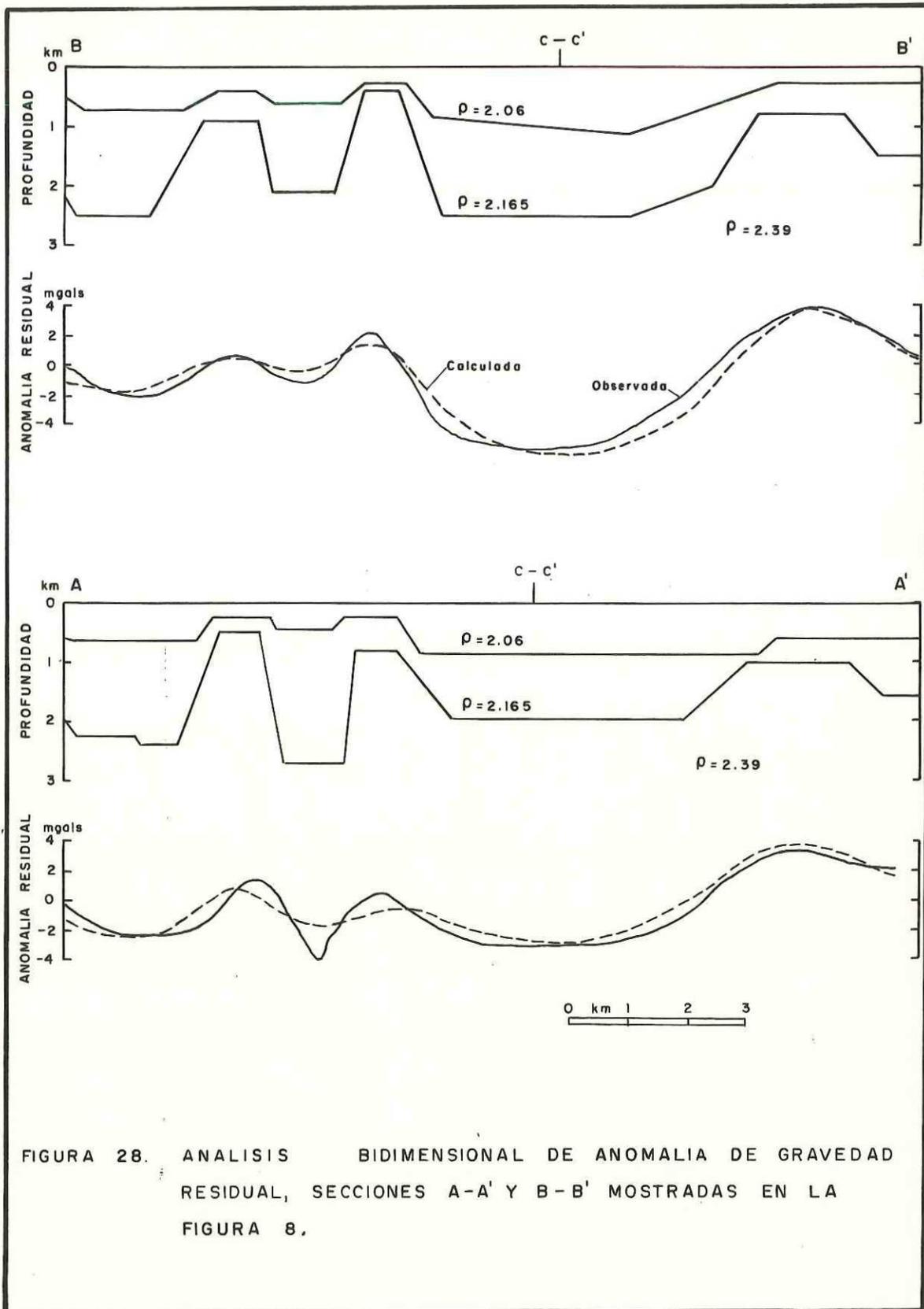


FIGURA 28. ANALISIS BIDIMENSIONAL DE ANOMALIA DE GRAVEDAD RESIDUAL, SECCIONES A-A' Y B-B' MOSTRADAS EN LA FIGURA 8.

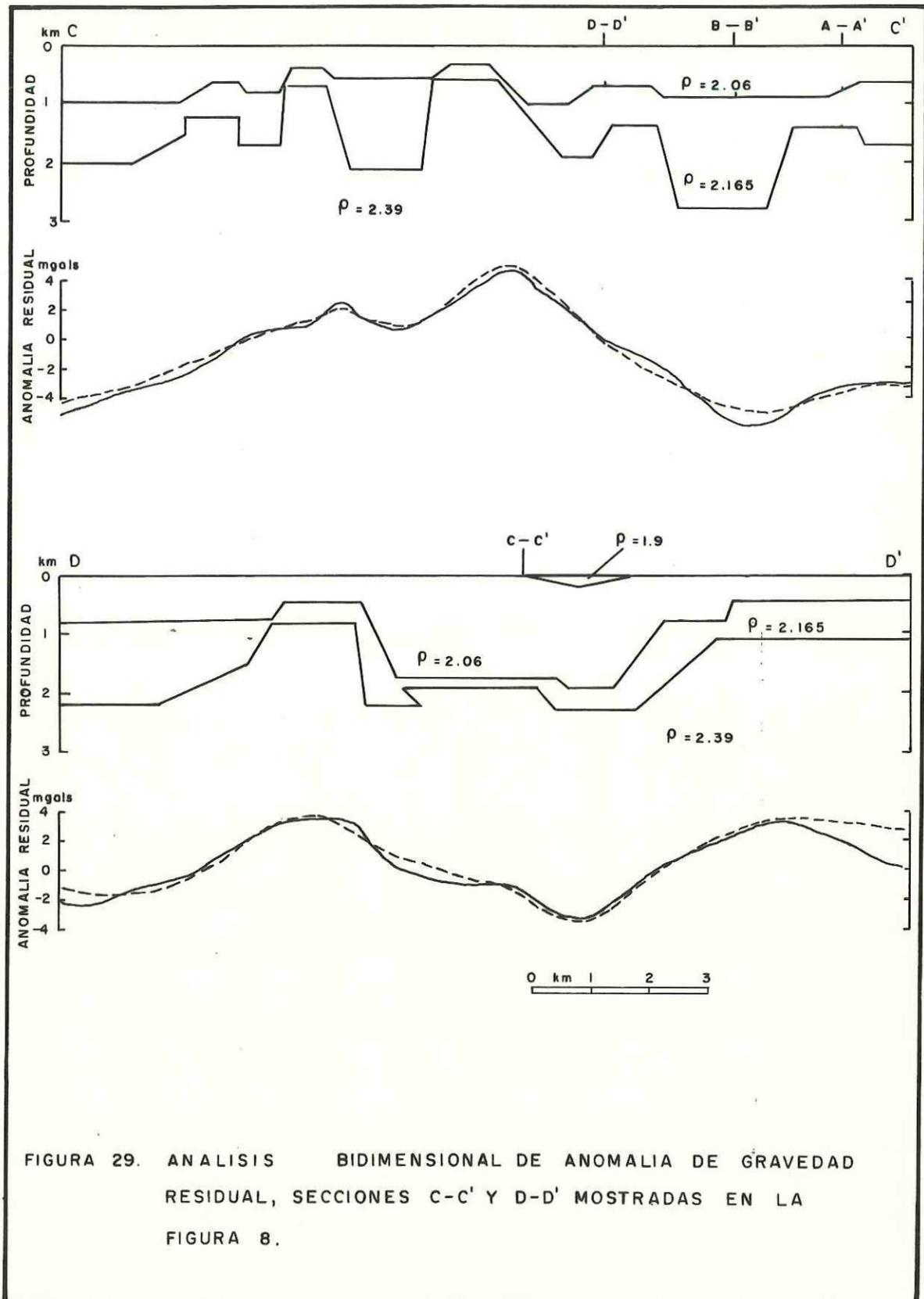


FIGURA 29. ANALISIS BIDIMENSIONAL DE ANOMALIA DE GRAVEDAD RESIDUAL, SECCIONES C-C' Y D-D' MOSTRADAS EN LA FIGURA 8.

descomposición en bloques, que se ubica dentro de una franja que corre aproximadamente de NW a SE, hacia el centro del levantamiento, y que se describe de manera más clara en el perfil C-C' (fig. 29).

Los perfiles gravimétricos observados y calculados se ajustan bastante bien. El perfil que exhibe un ajuste de menor calidad es el A-A', y en menor medida el perfil B-B'. Aún así, su aproximación puede considerarse buena. Entre las características de los cuerpos que conforman los modelos cobra fuerza la idea de resurgencia volcánico-tectónica que varios autores han propuesto (Mahood, 1978; ELC, 1979; Venegas Salgado, 1981). Esta parece ser corroborada por la presencia de conjuntos de bloques que se modelan a manera de horsts y grabens en los sectores SW de los perfiles A, B y D, y en todo el perfil C. En todos los perfiles es posible observar cierta contemporaneidad entre el colapso de la caldera, y la expulsión y posterior asentamiento de los paquetes riolíticos y tobáceos. La complejidad estructural del subsuelo, mostrada principalmente hasta los tres km, es resultado de la actividad de resurgencia. La forma de la estructura caldérica es evidente en los perfiles A, B y D, en los que el límite Norte de esta está bien marcado. Los tres perfiles muestran que el límite Norte de la depresión se localiza un poco al Sur de la Venta del Astillero, con una marcada forma de arco. En cambio, en el perfil C no se percibe claramente la estructura caldérica. Aparentemente, la

actividad de reactivación sucede sobre unas líneas NW-SE y E-W pasando casi por el centro del Área, lo que presupone que dicha actividad se vé influenciada por los fracturamientos mas profundos que conforman los grabens de Tepic y Chapala, y rompe o hace desaparecer los límites de la caldera por donde le atraviesan.

De manera global los perfiles muestran otros aspectos de interés. El angosto graben de aproximadamente 1.5 km de ancho que se localiza hacia el SW de la zona, y al sur en los perfiles A y B (fig. 28) parece profundizarse en dirección NW, mientras que lo contrario ocurre con la depresión mas amplia que se situa un poco mas al norte de los mismos perfiles. La primer depresión angosta acompañada de dos levantamientos estructurales aparece definida en el plano de segunda derivada del campo de anomalías, representando estructuras bidimensionales alargadas y angostas con rumbo aproximado NW-SE. Al respecto, lo que JICA (1986) define como un alto estructural continuo (figuras 30, 31 y 32), en nuestros modelos se percibe como un conjunto de bloques mas complejo. Del Castillo Garcia et al. (1971) y ELU (1979) observan un minimo gravimétrico con el mismo comportamiento.

En algunos puntos en los que se cruzan los perfiles, las profundidades a los horizontes modelados no coinciden exactamente, aunque su comportamiento es bastante aceptable. Esto es claro en donde, por ejemplo, cruzan los perfiles C y D, dentro del triángulo que forman la Mesa El Nejanuete,

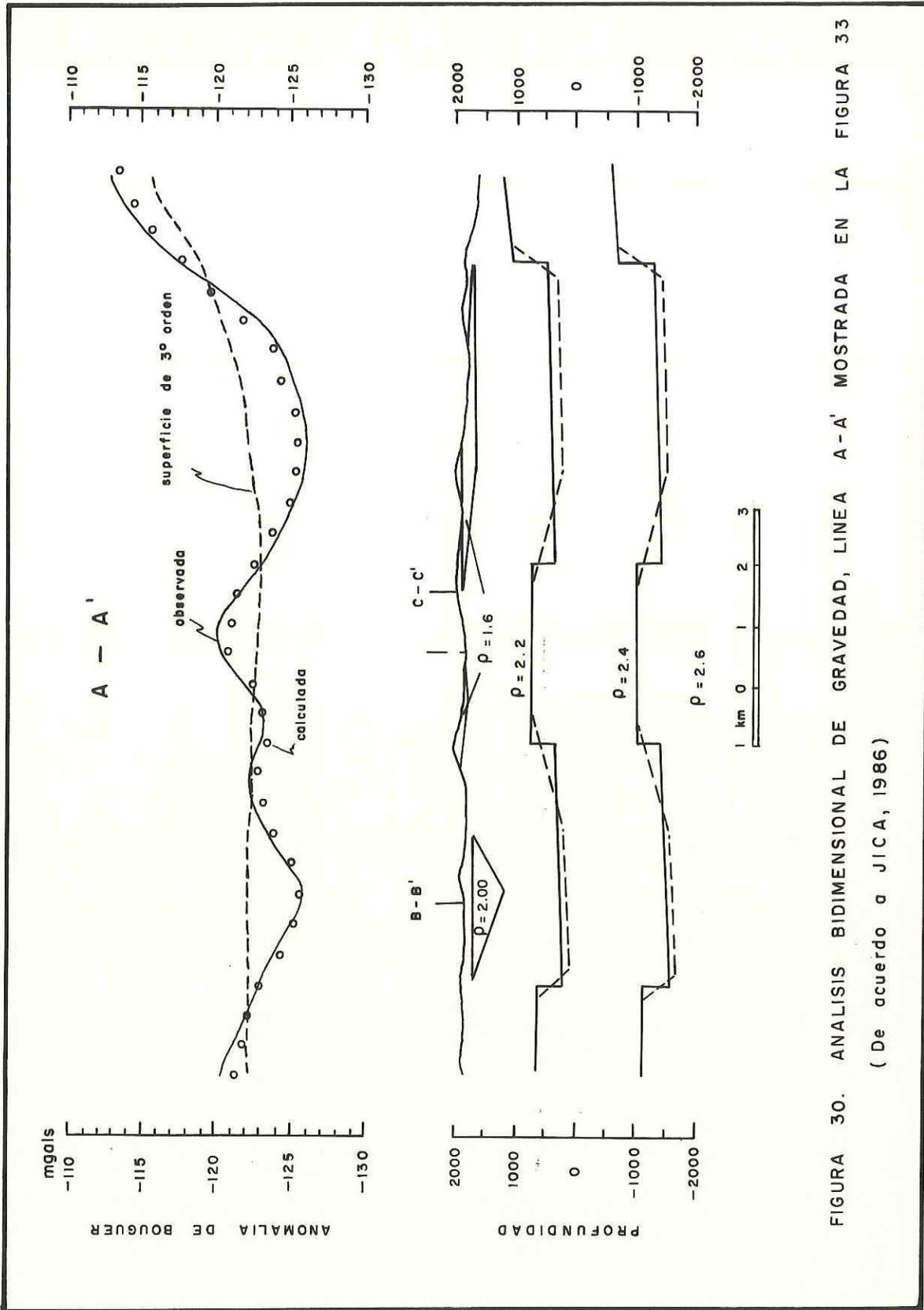


FIGURA 30. ANALISIS BIDIMENSIONAL DE GRAVEDAD, LINEA A-A' MOSTRADA EN LA FIGURA 33
(De acuerdo a JICA, 1986)

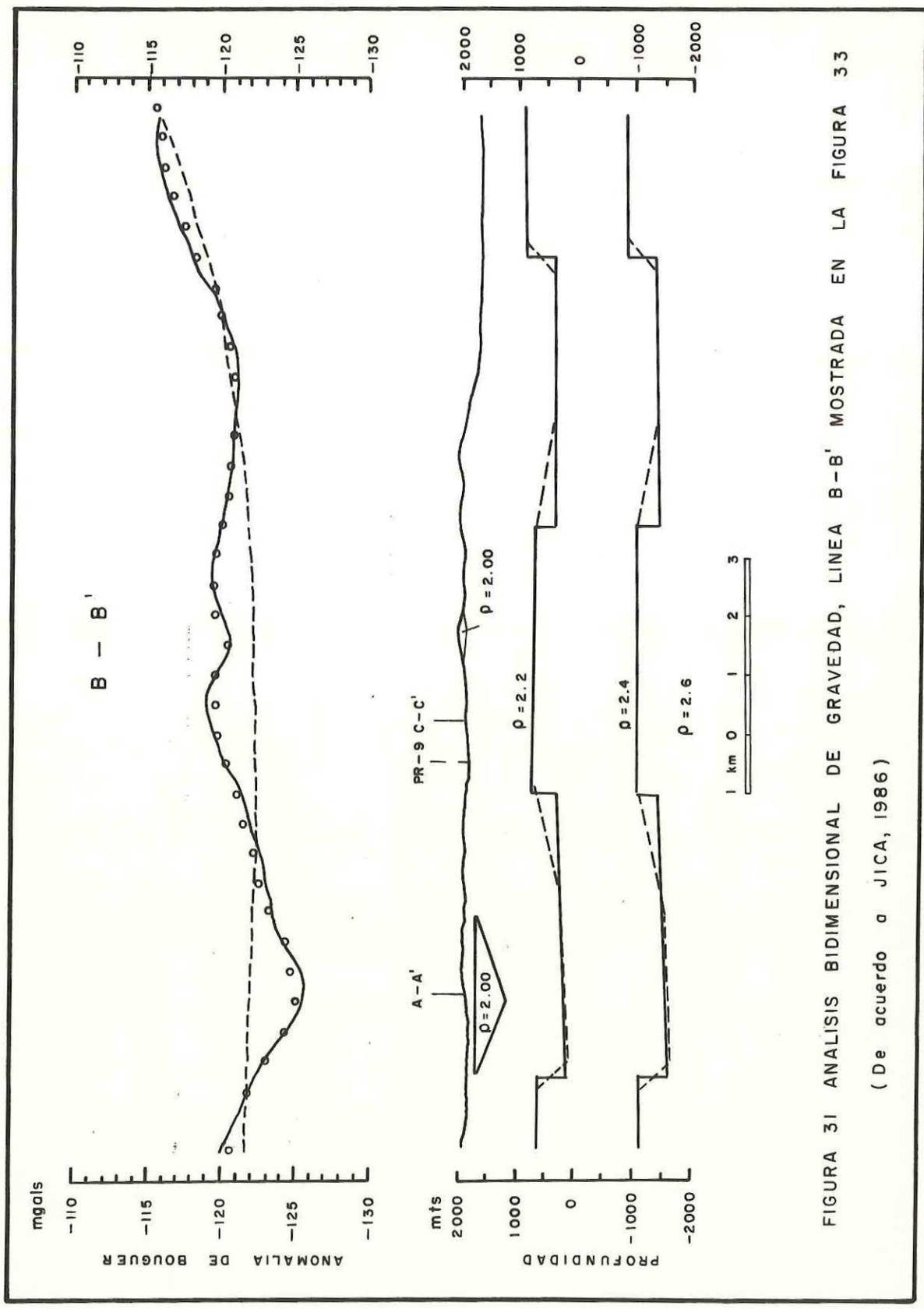


FIGURA 31 ANALISIS BIDIMENSIONAL DE GRAVEDAD, LINEA B-B' MOSTRADA EN LA FIGURA 33

(De acuerdo a JICA, 1986)

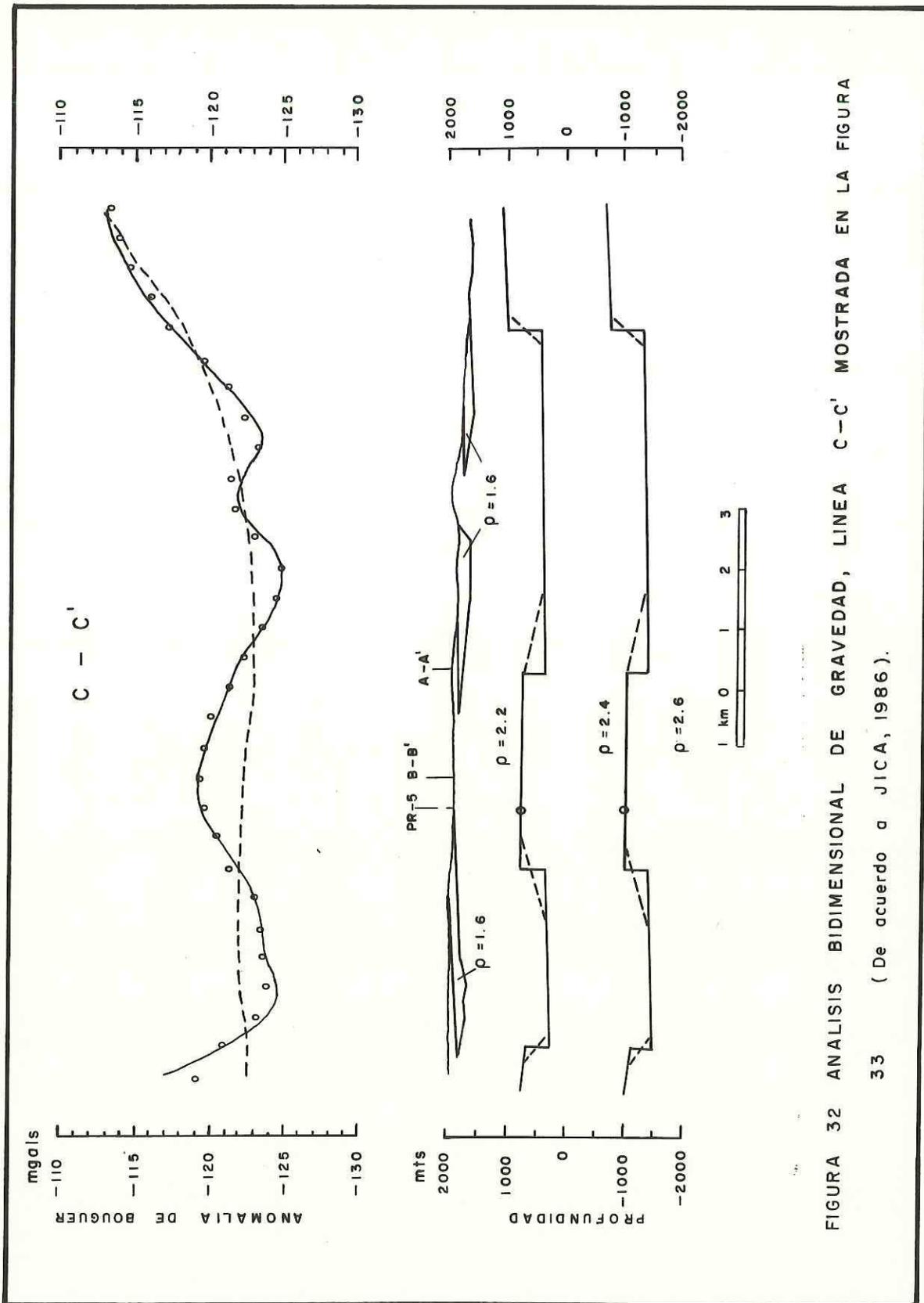
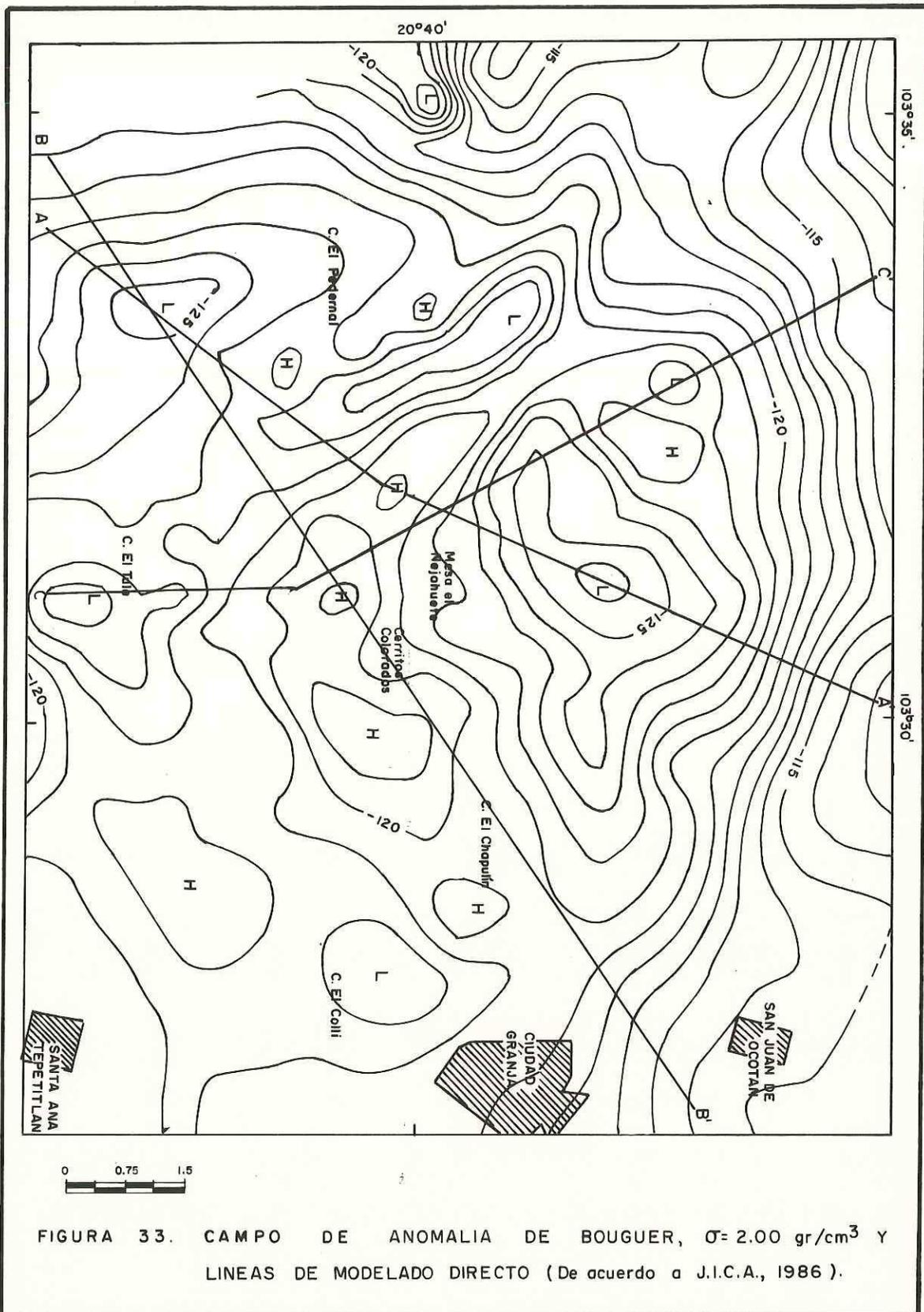


FIGURA 32 ANALISIS BIDIMENSIONAL DE GRAVEDAD, LINEA C-C' MOSTRADA EN LA FIGURA

33 (De acuerdo a JICA, 1986).



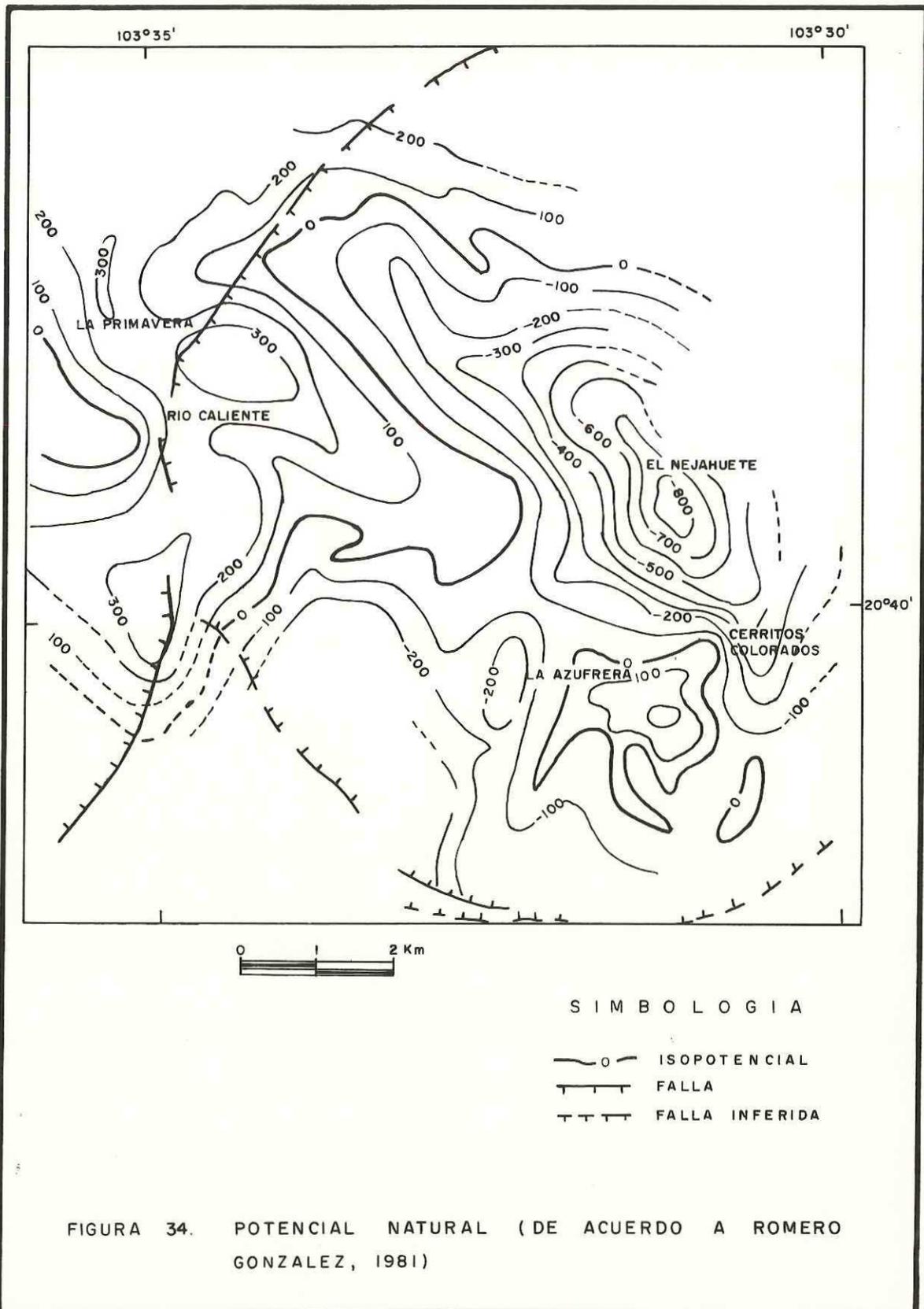
Cerritos Colorados y el cerro El Chapulin.

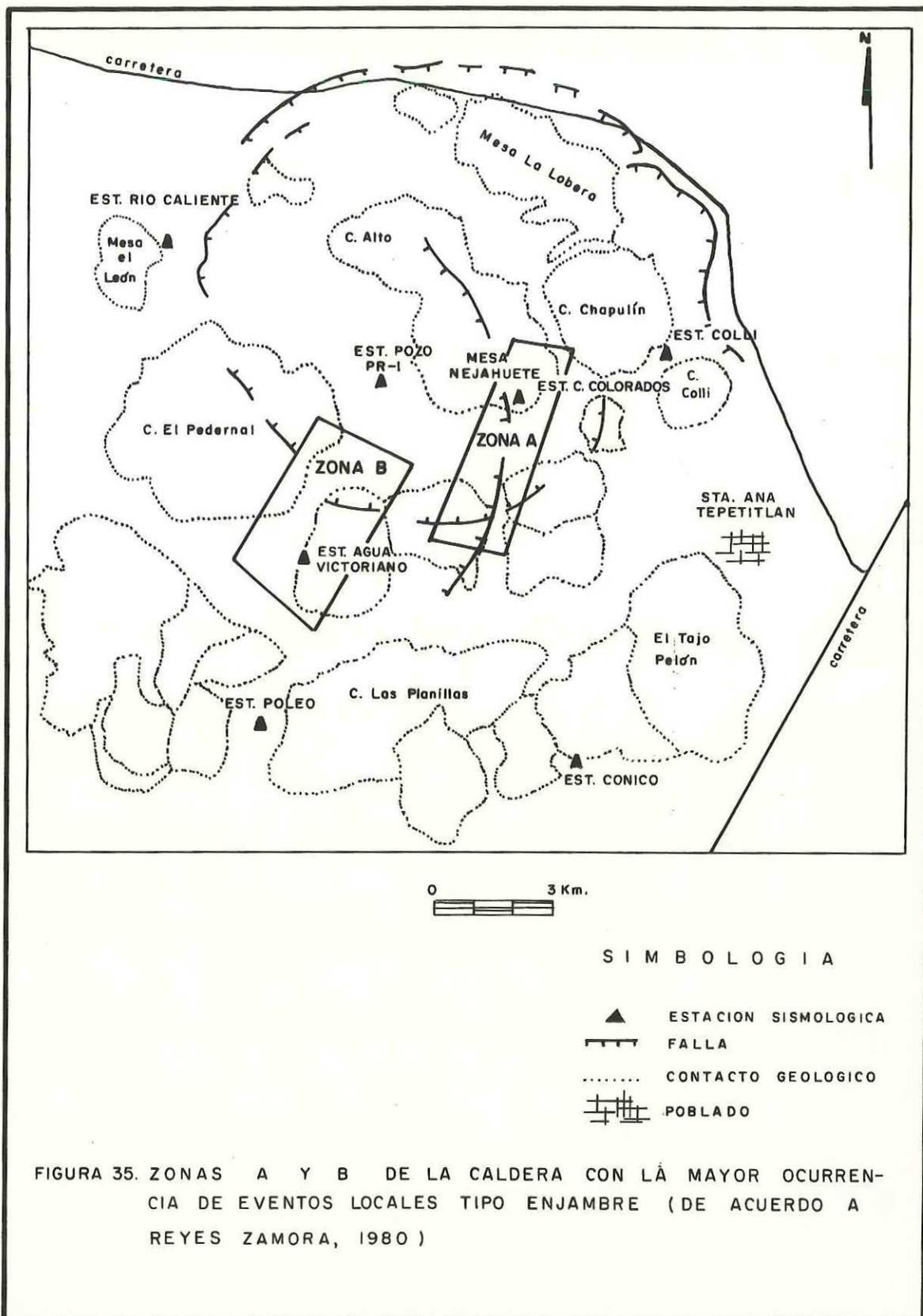
VI.3 Correlación con otros estudios.

Existen varias evidencias geofísicas y geológicas que apoyan a la interpretación de los modelos obtenidos:

(1).- POTENCIAL NATURAL ESPONTANEO.- En el centro del área existen varias anomalías de potencial espontáneo que se localizan sobre la Azufrera y al SW de Cerritos Colorados (figura 34). Estas anomalías se relacionan con el fracturamiento NW-SE y NE-SW, que controla los flujos que las producen. Es evidente una relación entre la anomalía que se localiza al NW del área y las manifestaciones de La Primavera y Río Caliente, donde se encuentra su máximo valor (+320 mv). La extensión y acomodo que esta anomalía presenta en relación al anillo de la caldera sugiere que éste actúa como una barrera impermeable. Esto es, establece una frontera entre los fluidos calientes provenientes de la porción central y los fluidos fríos que llegan del oeste al anillo (Romero González, 1981).

(2) MICROSISMICIDAD.- La microsismicidad que ocurre en La Primavera se presenta con gran intensidad en dos zonas. La de mayor intensidad y frecuencia de microtemblores ocurre sobre la parte S de la Mesa El Nejahuete (figura 35). La segunda zona de importancia microsismica se encuentra en la parte SE del Pedernal, entre ese domo y Agua de Victoriano. Se ha sugerido que dicha actividad microsismica se debe al

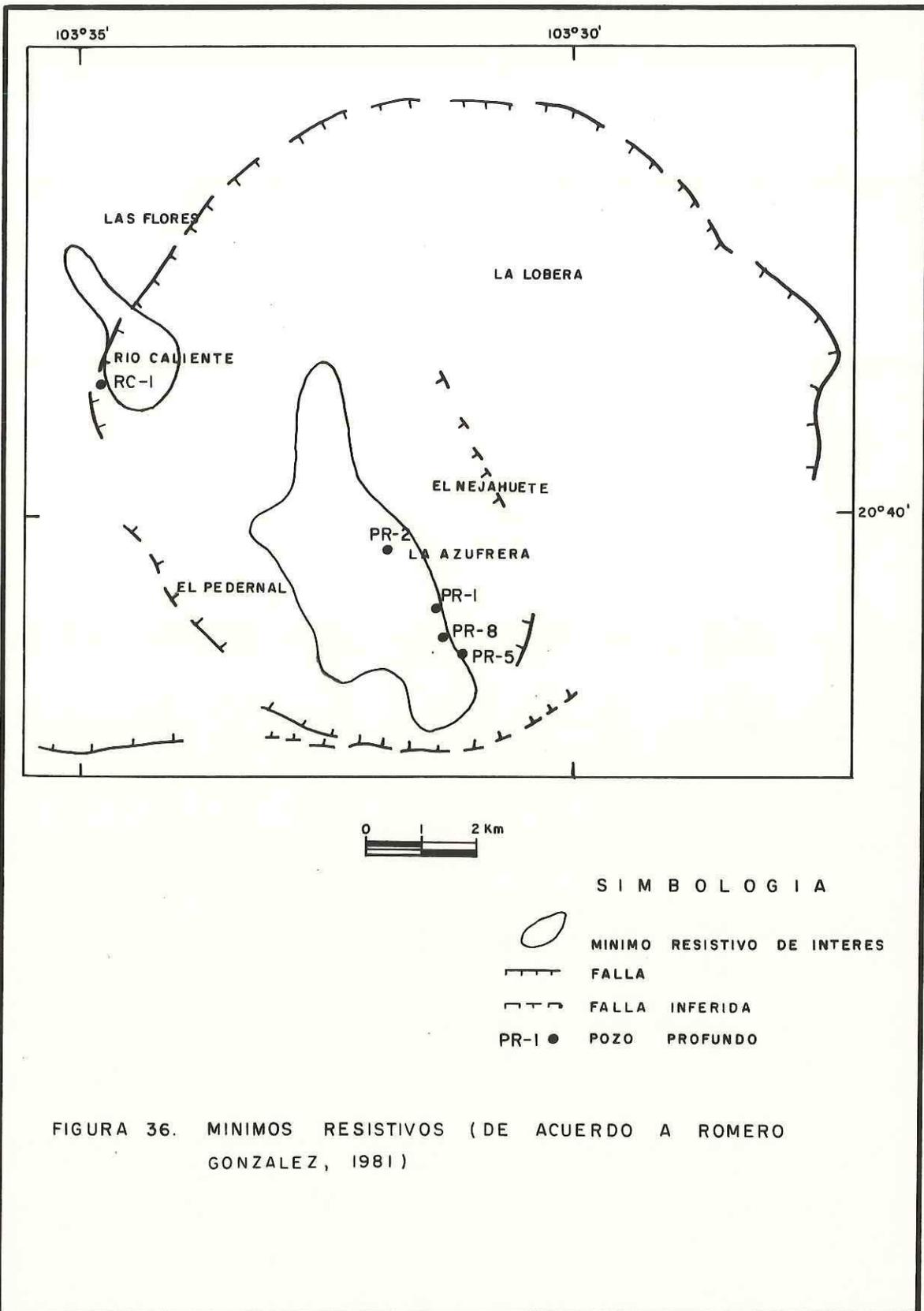


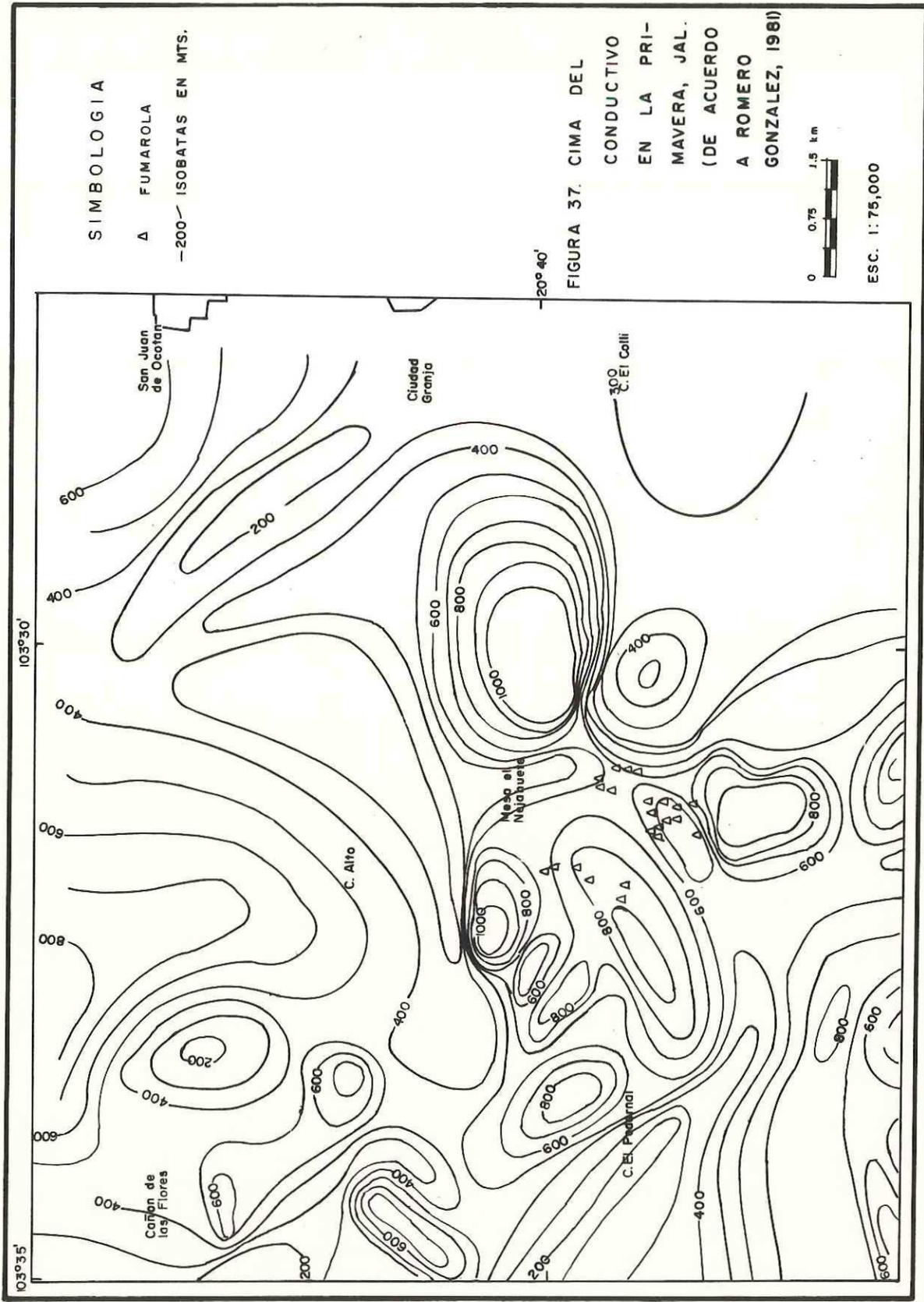


movimiento de los fluidos geotermicos y al asentamiento y fracturamiento superficial (McEvilly et al., 1978; Reyes Zamora, 1980).

(3) RESISTIVIDAD.- Las anomalías de resistividad en el campo de La Primavera se asocian con la actividad térmica superficial y en pocos casos, con los fallamientos y/o fracturamientos y contactos litológicos. En la porción central de la caldera se ubicó un bajo resistivo anómalo, que se relaciona con la reactivación de los sistemas NW-SE y N-S (figura 36) (Romero González, 1981). Debido al asentamiento de la caldera, las fracturas que se presentan donde se localiza el mínimo resistivo, en el centro de La Primavera, son menos intensas, de menor profundidad, mas recientes y sujetas a esfuerzos de compresión (Romero González, 1981). Relacionada a la disminución de resistividades hacia el oeste, parece ser que la dirección de flujo de agua se ha visto favorecida por el sistema de falla NW-SE. Se cree que la cima del conductor se relaciona con la base de la Formación Tala o con la base del paquete tobas-riolitas, y su presencia tan somera en Río Caliente coincide con las condiciones geohidrológicas del Área (figura 37; Romero González, 1981).

(4) MANIFESTACIONES TERMALES.- En los modelos, la zona mas fracturada y constituida por bloques, parece ser la de mayor actividad tectónica en el área. Es donde ocurre la mayor parte de las manifestaciones hidrotermales de La





Primavera, y donde concurren varias anomalías geofísicas y térmicas indicando la presencia de un flujo ascendente de fluidos hidrotermales desde estructuras profundas (JICA, 1986). Esto indica la presencia, próxima a la superficie, de una intrusión magmática, o de una reactivación magmática en la zona aludida.

De acuerdo a toda esta información, postulamos que hacia la parte central del Área existe un considerable aumento en la porosidad secundaria (en consecuencia una alta permeabilidad preferencial), en la transmisión de fluidos, y posiblemente haya una relación directa entre los flujos en los acuíferos predominantes y las características estructurales. La información geoquímica muestra una relación entre la existencia de diversos manantiales calientes hacia el Norte del Área, en el extremo Oeste del arroyo el Caracol (Río Caliente, Agua Brava, Cañón de las Flores) y los fluidos hidrotermales de la zona de producción en el centro del Área, estableciendo un modelo conceptual de flujo preferencial en la dirección NW-SE. Los arroyos dominantes de la zona corren sobre las expresiones superficiales de las fallas normales de dirección NW-SE.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, y en base al modelado gravimétrico, es posible elaborar un primer esquema del flujo de fluidos hidrotermales en el marco del mencionado modelo conceptual. Para esto se toma en cuenta la actividad tectónica ó estabilidad de la zona, relacionada con

la porosidad secundaria ó permeabilidad preferencial por fracturamiento, sellamiento por alteración hidrotermal, barreras consecuentes y oposición a la circulación de fluidos.

En las partes N y E del área, donde tienen expresión superficial las fallas en arco del colapso (Mahood, 1978), se vislumbra una zona estable que presenta una barrera profunda al flujo de elementos hidrotermales hacia los acuíferos de abastecimiento de la ciudad de Guadalajara. Habrá oposición al flujo aunque exista transporte en el horizonte ignimbrítico de la Formación Tala que posee, al parecer, una gran permeabilidad en sus horizontes superiores. Esto se apoya en la existencia de enormes pérdidas de fluidos de perforación, experimentadas durante la realización de las perforaciones en dicho horizonte (Ramírez Silva, 1987). Aunque hacia estos sectores N y E de la zona existen manifestaciones de manantiales termales, es posible que deban su presencia a una circulación horizontal y limitada.

La mayor actividad tectónico-magmática experimentada hacia el centro y el Este del área, que puede entenderse como un producto de la resurgencia de la caldera, implica que la circulación de fluidos ocurre en dirección NW, porque los manantiales termales de Río Caliente, Agua Brava, Arroyo Verde y La Primavera, parecen relacionarse geoquímicamente a un flujo lateral que lleva la misma dirección con los fluidos hidrotermales de la zona de producción (Romero González,

1981).

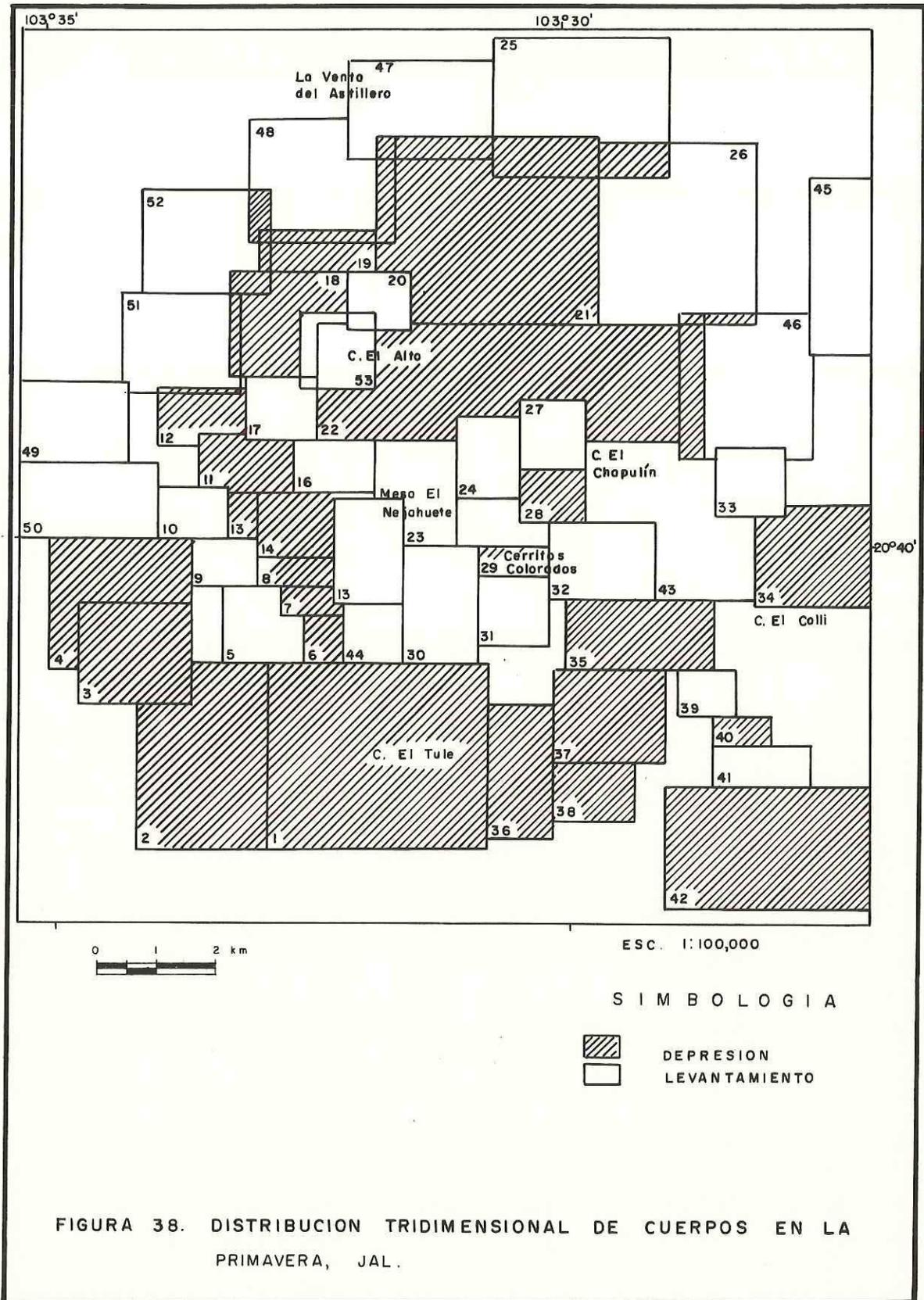
Resumiendo: del análisis anterior pueden restringirse las opciones para la inyección de la salmuera extraída de los pozos profundos en La Primavera. Una opción sería buscar el horizonte andesítico hacia las depresiones rellenas con material volcánico de menor densidad que las andesitas, específicamente hacia el Norte de la Mesa el Nejahuete y Cerritos Colorados. Esto permitiría almacenamiento y recarga eventual del yacimiento al nivel de dicho horizonte.

Otra opción consiste en aprovechar el flujo con dirección NW que, de extenderse a profundidad, permitiría circulación profunda de los fluidos de una manera lateral hacia zonas costeras. Esto último resulta un poco aventurado ya que la información con que se cuenta es de carácter local superficial.

VI.4 Modelado tridimensional.

En el modelado directo tridimensional se usaron prismas rectangulares de dimensiones finitas, con sus límites horizontales orientados en las direcciones N-S y E-W.

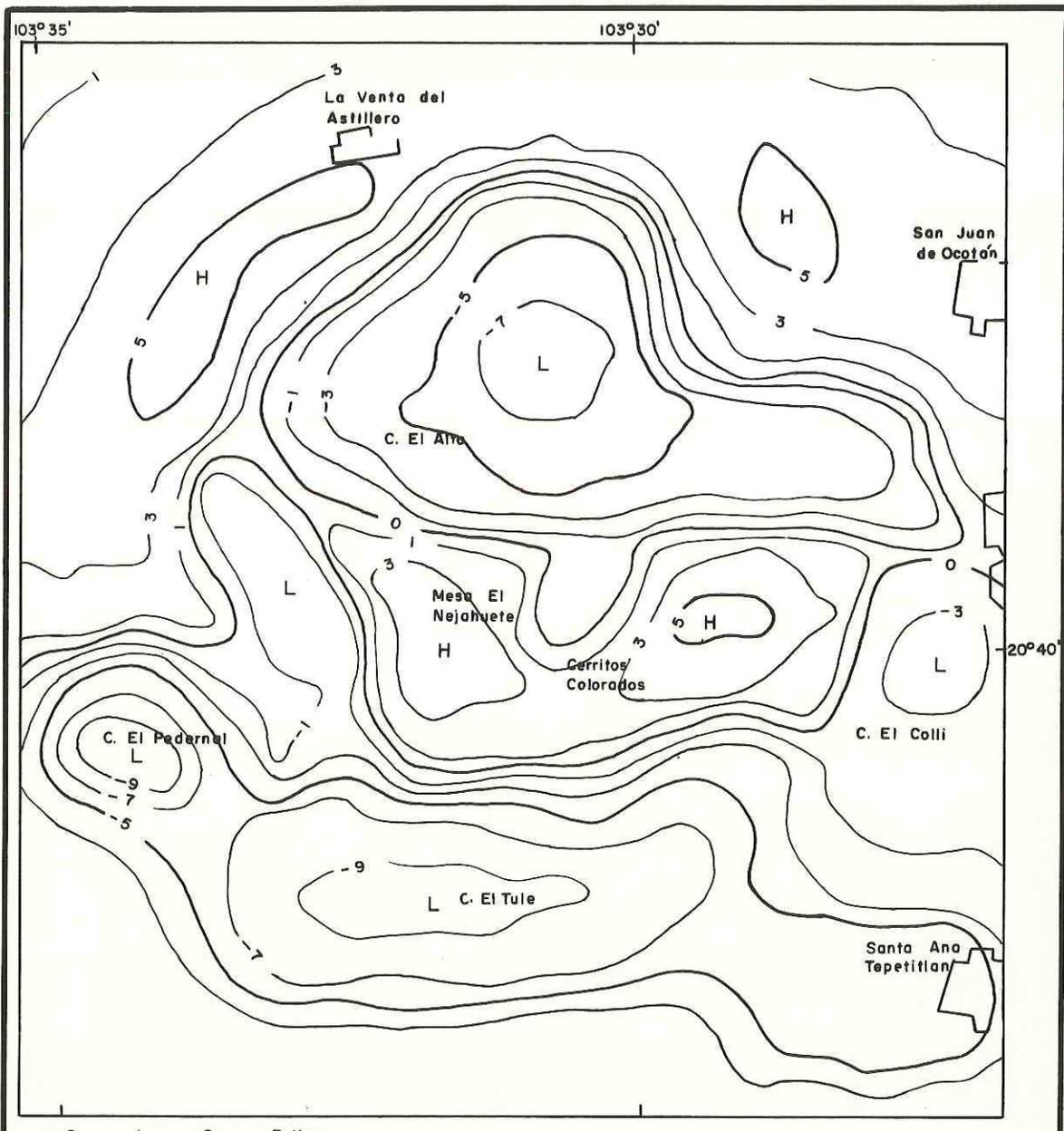
En el caso de la Sierra de La Primavera se modeló con bastante aproximación la anomalía residual de primer orden con 52 cuerpos prismáticos, cuya distribución se muestra en la figura 38. Esta distribución de cuerpos se eligió directamente de las secciones modeladas en 2-D, del modelo conceptual preliminar en 3-D obtenido de los planos de



derivadas verticales (figs. 22 y 24) y del comportamiento del mapa de la anomalía residual de primer orden.

Como se puede observar en las figuras 8 y 39, existe buena coincidencia de rasgos anómalos, a excepción de las diferencias en magnitud y en el comportamiento de las isogales localizados en la parte Norte de ambos planos. El comportamiento y distribución de los cuerpos pone de manifiesto varias características en la zona. Una de ellas es que destaca un sistema de lineamientos de rumbo aproximado NW-SE, que es más claro en la región E y que limita a un conjunto de estructuras alargadas caracterizadas por horsts y grabens con la misma orientación (conjunto que parece manifestarse casi en el seno de lo que se ha interpretado como colapso caldérico). Al respecto, la estructura de la caldera se define perfectamente hacia el centro y norte del área, mostrando sus límites cóncavos en la parte central, tal como se estableció en la interpretación bidimensional.

La ubicación del colapso de la caldera en la zona Norte a nivel de las fallas en arco, tal como ha sido postulado en varios trabajos (por ejemplo, Mahood, 1978; Venegas Salgado, 1981), se corrobora mediante estos modelados. Puede concluirse que no ha ocurrido mayor actividad que la que generaron dichas fallas, siendo entonces esa una zona "estable". Además, con esto se verifica lo explicado en el modelado bidimensional y en el trabajo de potencial espontáneo (Komeró González, 1981) acerca del carácter



SIMBOLOGIA

—9— ISOMILIGALS

FIGURA 39. CAMPO DE ANOMALIAS DE GRAVEDAD CALCULADAS
 COMO RESPUESTA DEL MODELO DE LA FIGURA 38

geohidrológico de la parte Norte del Área. Se puede reafirmar que toda esta zona, donde tienen expresión superficial las fallas en arco y que de acuerdo a Mahood (1978), forman la frontera de una depresión cerrada (con una extensión aproximada de 12 km en el modelo) funciona como barrera a la que pudiera ser la posible migración del fluido inyectado en horizontes permeables.

Es factible que el sistema de fallas NW-SE que se muestra al W del Área sea un grupo de estructuras someras de expresión superficial, que podrían ser las estructuras que facilitan la migración de fluidos hidrotermales en sentido horizontal, desde el reservorio en el centro del Área hasta los manantiales termales ubicados al W, tales como Río Caliente, Agua Brava, Arroyo Verde y La Primavera, los cuales geoquímicamente parecen relacionarse a un flujo lateral hacia el NW (Romero González, 1981).

Varios autores han indicado la presencia del sistema de fallas de rumbo NW-SE. Romero González (1981) adjudica a los fallamientos NW-SE y NE-SW una menor intensidad y menor profundidad que los que resultaron del colapso calderico, y una génesis ligada a la última etapa del asentamiento central de la caldera. Dichas estructuras, aunque son expresiones someras, no tienen manifestación superficial en la parte Oeste del Área, debido a que se hallan cubiertas por un depósito de sedimentos lacustres de forma alargada (JICA, 1986).

La mayor actividad tectónica de carácter superficial parece presentarse hacia el Oeste y el centro, donde ocurren altos estructurales definidos por bloques pequeños y donde se presentó una alta microsismicidad (Keyes Zamora, 1980). Otras características que evidencian este fracturamiento son una alta permeabilidad (reducido o casi nulo sellamiento por alteración hidrotermal), presencia de manifestaciones hidrotermales, y, asociadas a estas, la presencia de varias anomalías geofísicas (resistividad, MT. potencial espontáneo).

El límite sur de la caldera no se muestra bien definido en el modelo; sin embargo, los hundimientos que se revelan en el sur del mismo, acomodados en forma de arco, bien pudieran corresponder a la sección austral de la caldera.

Dentro de otras estructuras que se corroboraron a detalle en el modelo, aparece el graben de Cerritos Colorados, indicado por el límite Norte de los cuerpos 31 y 32, y por el límite sur de los cuerpos 34 y 27.

Es obvio que el flujo superficial ocurre con dirección Noroeste, como lo indica la topografía del área. Romero González (1981) relaciona los manantiales del Oeste de la Sierra con un flujo lateral, y con la misma dirección parecen fluir los manantiales de Río Caliente, teniendo su salida por la toba Tala (Ramírez Silva, 1987). Esto nos conduce a emitir la hipótesis de que, hasta cierta profundidad y posiblemente hasta el yacimiento geotérmico, exista migración de fluidos

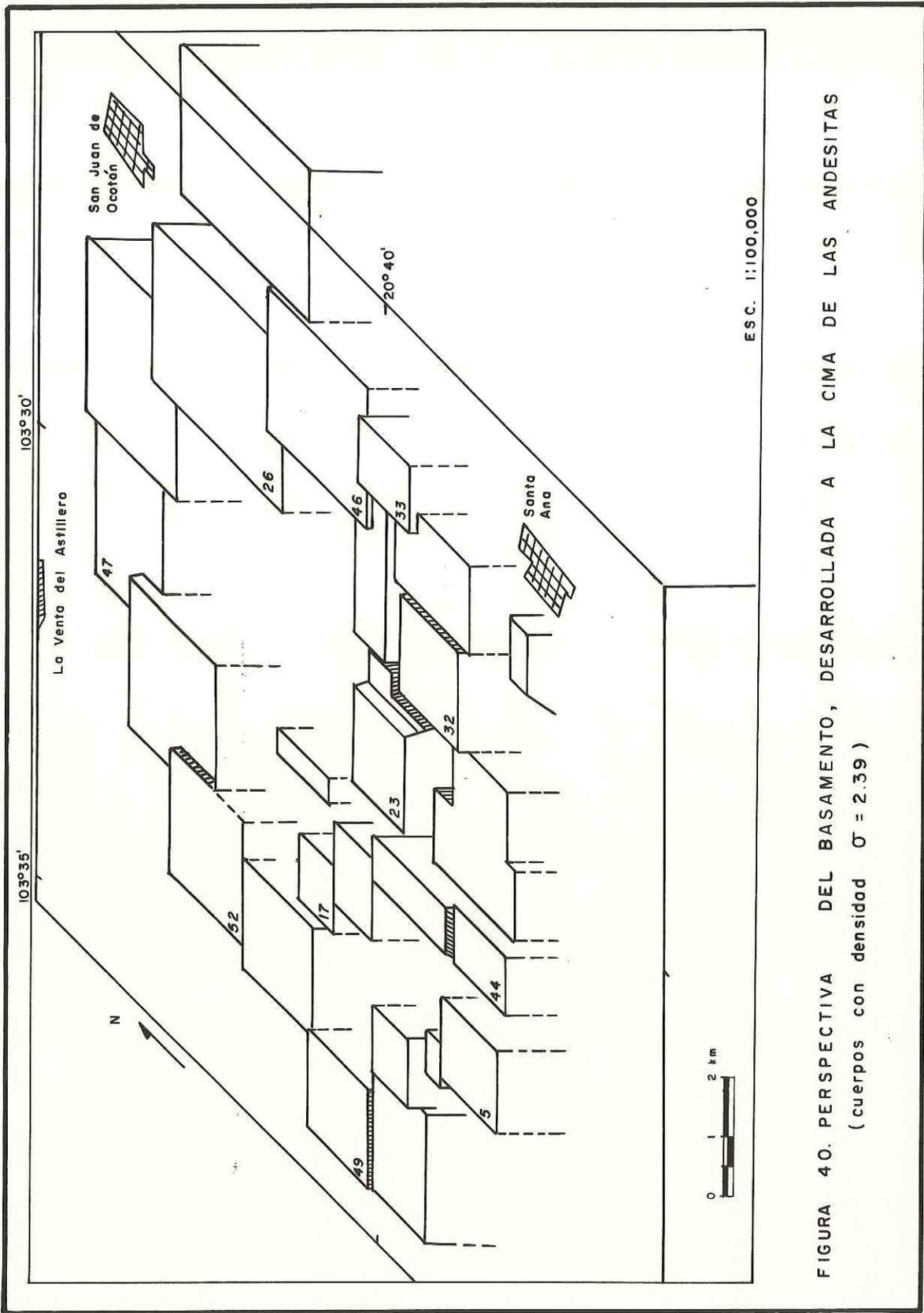


FIGURA 40. PERSPECTIVA DEL BASAMENTO, DESARROLLADA A LA CIMA DE LAS ANDESITAS (cuerpos con densidad $\sigma = 2.39$)

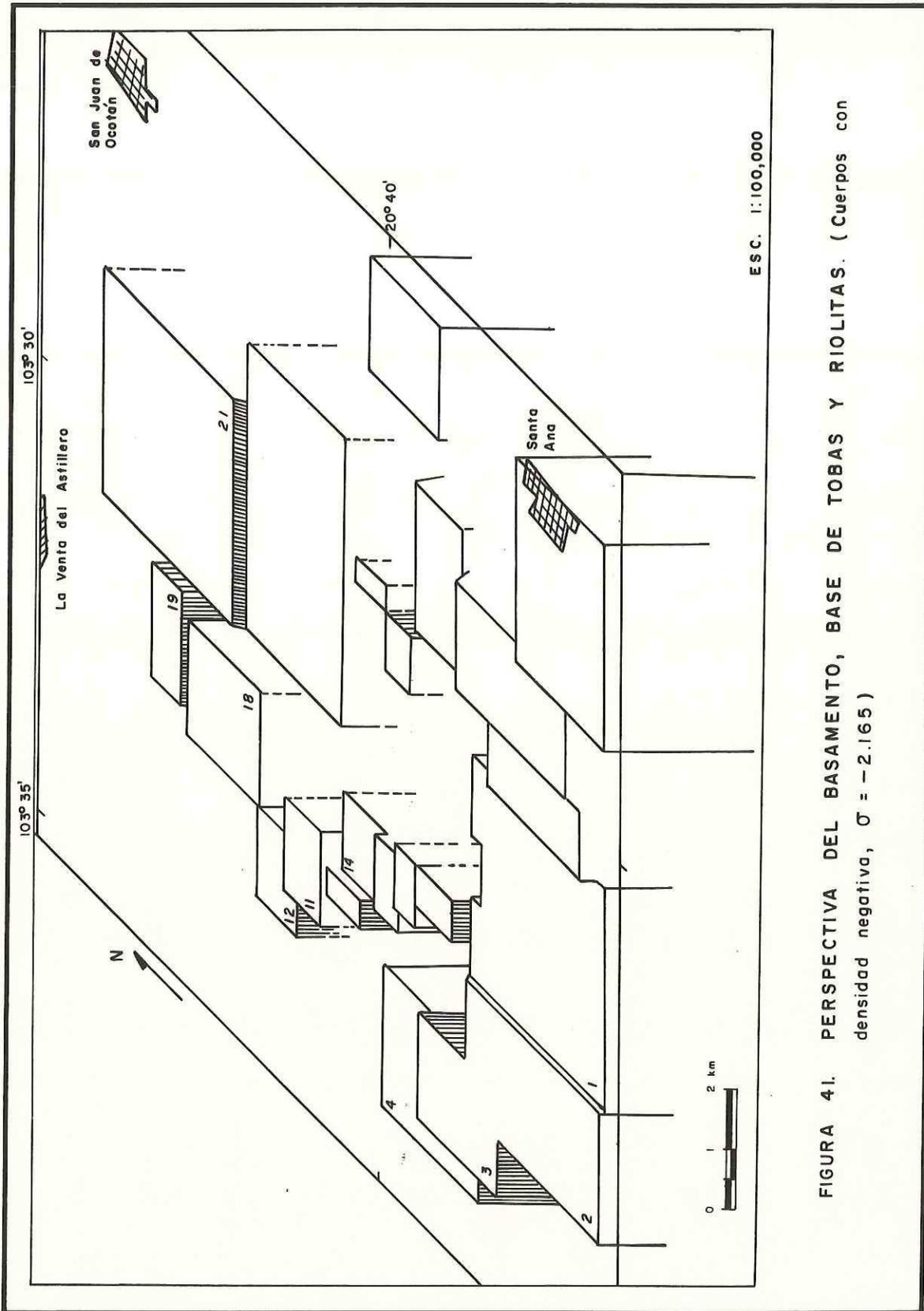


FIGURA 41. PERSPECTIVA DEL BASAMENTO, BASE DE TOBAS Y RIOLITAS. (Cuerpos con densidad negativa, $\sigma = -2.165$)

en dirección NW y con tendencia NW-SE aprovechando el alto fracturamiento asociado con los altos estructurales.

Al igual que con el modelado bidimensional, en este se vuelve a determinar que esas localidades del Área son las más adecuadas a un proceso de inyección de desechos hidrotermales, porque dicho proceso puede representar una recarga a la fuente geotérmica y el efecto contaminante de los fluidos se reduciría satisfactoriamente. Es posible que dichos fluidos tomen una dirección preferencial NW siguiendo las fallas de rumbo NW-SE. Las fallas y fracturas de dicho sistema parecen controlar la geometría del acuífero profundo y de manera general el flujo de los acuíferos en La Primavera lleva la misma dirección. La información obtenida de la interpretación tridimensional realizada a partir de una base de datos que se obtuvo de un vuelo aeromagnético regional (Campos Enriquez, 1986) concuerda con las características generales de nuestro modelo tridimensional. En su modelo, el límite E del cuerpo 6 coincide con el límite W de la estructura caldérica, y la posición del cuerpo 9 en el seno de la caldera implica la presencia de fallamientos mayores relacionados con la zona central de manifestaciones hidrotermales (Figura 42). En nuestro estudio, todas las fallas que se pueden inferir son de carácter local, pero pueden tener influencia de sistemas de fallas más regionales como las del graben Tepic-Chapala.

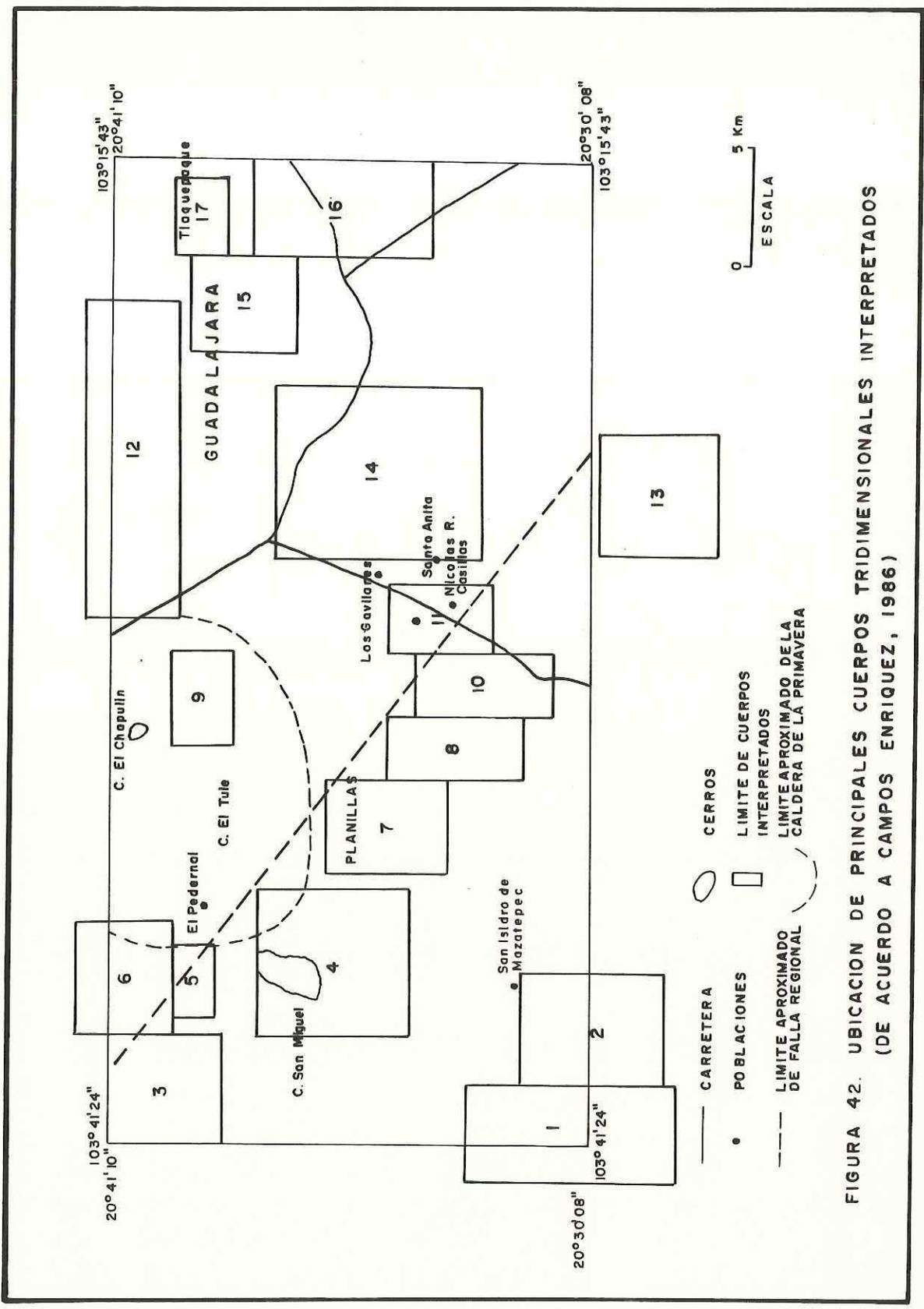


FIGURA 42. UBICACION DE PRINCIPALES CUERPOS TRIDIMENSIONALES INTERPRETADOS (DE ACUERDO A CAMPOS ENRIQUEZ, 1986)

VII. CONCLUSIONES.

A través de todo el estudio resultaron varios aspectos interesantes con relación a la Sierra de La Primavera y sus anomalías gravimétricas.

Se muestra la existencia de un comportamiento anómalo en los residuales que indica:

1) la presencia de un mínimo gravimétrico local, situado sobre la parte Norte de la zona, al E del cerro Alto, mostrando un engrosamiento de material de baja densidad.

2) varios máximos gravimétricos denotando un acercamiento hacia superficie de un exceso de masa o de cuerpos con un contraste de densidad positivo, sobre la zona de manifestaciones hidrotermales, y la parte Oeste del área, e indicando unas tendencias estructurales NW-SE y NE-SW.

Las continuaciones analíticas realizadas corroboraron estos hechos, y las derivaciones verticales destacan la presencia de tres sistemas de lineamientos estructurales con rumbo aproximado NW-SE, NE-SW y E-W. Estos son más o menos los mismos patrones de las fallas y fracturas que poseen expresión superficial, y dado que afectan en su mayor parte a cuerpos de pequeña longitud de onda, como las de tendencia NE-SW, no pueden ser estructuras muy profundas.

Las derivadas verticales del residual de primer orden muestran un esquema bastante detallado de la distribución de cuerpos que no se observan ni con la ayuda de las

continuaciones analíticas. La derivación vertical demuestra así una utilidad para discernir cuerpos y estructuras que de otra manera no resultan obvios. Se detallan varias estructuras alargadas de tendencia NW-SE que se componen de bloques escalonados, y que se encuentran emplazadas al Oeste de La Primavera. Hacia el Sur del Nejanuete y cerca de Cerritos Colorados se exhiben otros cuerpos que unidos a los anteriores juegan un papel de importancia en el problema de la resurgencia de la caldera.

Unicamente en el caso de los residuales y las continuaciones analíticas se refleja el comportamiento anómalo asociado con el colapso caldérico, porque esto no se aprecia en los mapas de derivadas.

En la etapa de la interpretación cuantitativa se modelaron en secciones 2-D los cuerpos causantes de las anomalías que se investigan. El algoritmo de Iannasoulas y Tsokas (1986) usado en la inversión del residual de primer orden proporcionó una magnífica aproximación a la interfase de mayor densidad que viene a ser el horizonte que separa al paquete tobas+riolitas del paquete subyacente de andesitas. Los perfiles obtenidos muestran de una manera más objetiva las principales estructuras que influyen en el comportamiento geohidrológico de la zona, observando esencialmente dos áreas de comportamiento tectónico diferente: una estable, caracterizada por ausencia relativa de fallamientos y fracturas, localizada al Norte de la Sierra y coincidente con

el arco formado por el colapso caldérico. Representa el límite Norte de la caldera y desde el punto de vista geohidrológico representa una barrera al flujo hidráulico lateral a profundidad, sobre todo impidiendo el contacto de ese flujo hacia los acuíferos someros del Valle de Atemajac que se localiza al E y N de la Sierra; y una área inestable, caracterizada por la presencia de varias estructuras (altos y bajos estructurales), fracturas, manifestaciones hidrotermales y localizada hacia el Oeste y centro de la Sierra, con la tendencia de los arroyos Caracol-Arena Grande, y al Sur de la Mesa el Nejahuete y Cerritos Colorados, coincidiendo además con el área de las perforaciones del campo geotérmico. Dado el carácter de alto tecturamiento de esta última zona, puede proporcionar una buena solución al problema de inyección de salmuera y otros desechos de los fluidos geotérmicos, sobre todo si se realiza por debajo de la Formación Tala, aprovechando que su base posee propiedades impermeables.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se pueden emitir dos alternativas para el control de fluidos por parte de las estructuras del área: una es que se continúen con la dirección preferencial de las estructuras que por su rumbo NW-SE y E-W se asocian a los grabens Tepic y Chapala, teniendo descarga finalmente en cotas más bajas (e.g. las líneas de costa) luego de haber depositado en su trayecto las sales y sustancias (solutos) más nocivas; o bien, que sirva

de alguna manera como recarga al acuífero profundo que es parte de la fuente del campo geotérmico, sobre todo si se toma en consideración la depresión alargada existente en la parte Oeste de la Sierra de La Primavera.

LITERATURA CITADA

- Banerjee, B. y P.D. Gupta. 1977. Gravitational attraction of a rectangular parallelepiped. *Geophysics*. 42(5):1053-1055.
- Banwell, C.J. 1967. El campo geotérmico de La Primavera, Jal. Reporte técnico inédito. CFE.
- Birch, F.S. 1982. Gravity models of the Albuquerque basin, Rio Grande rift, New Mexico. *Geophysics*. 47(8): 1185-1197.
- Briggs, I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*. 39(1): 39-48.
- Campos Enriquez, J.O. 1986. Interpretación cuantitativa del vuelo aeromagnético regional del área de La Primavera-Planillas, Jalisco. Informe 25/86 inédito. Depto. de Exploración. GPG-CFE.
- Castillo del García, L., C. Márquez Román y J.H. Sandoval Ochoa. 1971. Anomalías magnetométricas y gravimétricas regionales y su relación con la geología del área geotérmica de La Primavera, Jalisco. Inv. # 1050. Depto. de Exp. Geof., Inst. de Geofísica. UNAM.
- Casarrubias Unzueta, Z. 1981. Resumen de las exploraciones geotérmicas llevadas a cabo en el campo geotérmico de La Primavera, Jal. Área de Geología. GPG-CFE.
- Casarrubias Unzueta, Z. y R. Torres Hernández. 1982. Estudio de fracturamiento en el área de Cerritos Colorados-La Azufrera, campo geotérmico La Primavera, Jalisco, México. Inédito. GPG-CFE.

- Díaz Ulvera, A. 1983. Memoria sobre la mineralogía hidrotermal en los pozos de La Primavera, Jal. Reporte GG 18/83 inédito. GPG-CFE.
- ELC-Electroconsult. 1979. Area geotérmica La Primavera. Informe geológico final. GEM-D-4471, inédito. CFE.
- ELC-Electroconsult. 1982. El campo geotérmico de La Primavera: informe volcano-tectónico preliminar. Inédito. CFE.
- ELC-Electroconsult. 1983. El campo geotérmico de La Primavera. Informe y síntesis de los pozos y evaluación de campo. PRM-D-5575. Inédito. CFE.
- González Salazar, A. y A. Razo Montiel. 1966. Informe de la interpretación fotogeológica de la caldera La Primavera, Jalisco. Informe inédito. GPG-CFE.
- Gutiérrez Negrín, L.C.A. y A. López Martínez. 1983. Datación por trazas de fisión de obsidias de los campos geotérmicos de La Primavera, Jal. y Los Azufres, Mich. Informe 64/82, inédito. GPG-CFE.
- Henderson, R.G. y R. Zietz. 1967. The computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields. In mining Geophysics. SEG. Vol II: 606-620.
- Hernández Galán, J.L. 1985. La energía de la Tierra. CECSA-IIE. Primera ed. 233 pp.
- J.I.C.A. 1986. La Primavera Geothermal Development Project in United Mexican States. Reporte Jal 24, inédito. JICA-CFE.
- Mahood, G.A. 1978. Geologic data: part II of

- seismological/geological field study of the sierra La Primavera Geothermal System. By McEvelly et al., unpublished report. U.C. Berkeley. 8-23-78.
- McEvelly, T.V., G.A. Mahood, E.L. Majer, B. Schechter y A.H. Truesdell. 1978. Seismological/geological field study of the Sierra La Primavera Geothermal System. Preliminary report. U. C., Berkeley.
- Mercado González, S. 1969. Zona geotérmica de La Primavera, Jalisco, y zonas geotérmicas circundantes. Estudio geotermoquímico. Inédito. CFE.
- Mercado González, S. 1970. Exploración geotermoquímica preliminar de La Primavera, Jal. Inédito. GPG-CFE.
- Nagy, D. 1966. The gravitational attraction of a right rectangular prism. Geophysics. 31(2):362-371.
- Ramírez Silva, G.R. 1982. Hidrología superficial y subterránea en las zonas geotérmicas La Primavera-San Marcos-Hervores de la Vega, Jal. Informe 19/82 inédito. GPG-CFE.
- Ramírez Silva, J. Casco del Razo y M.V. Mata Villavicencio. 1982. Hidrogeología regional de las zonas geotérmicas La Primavera-San Marcos-Hervores de la Vega, Jal. Informe 14/82 inédito. GPG-CFE.
- Ramírez Silva, G.R. 1987. Consideraciones hidrogeológicas a la inyección en la toba Tala, de la salmuera residual del campo geotérmico de La Primavera, Jal. Informe GG 10/87, inédito. Depto. de Exploración. GPG-CFE.

- Razo Montiel, A., R. Ruiz D., J. Godoy J. y R. Leal Hernández. 1978. Reporte geológico preliminar del Área de La Primavera, Jal. Informe 8/78, inédito. GPG-CFE.
- Residencia de Perforación Guadalajara -RPG-. 1987. Proyecto geotérmico La Primavera-Las Planillas. Estados Unidos Mexicanos. Reporte Interno inédito. GPG-CFE.
- Reyes Vermot, P. 1982. Estudio geoelectrico de detalle en el Área geotérmica La Azufrera - Cerritos Colorados, Jalisco. Informe 57/82, inédito. GPG-CFE.
- Reyes Zamora, A. 1980. informe preliminar del estudio de microsismicidad en la zona geotérmica "La Primavera", Jal. Inédito. 15 pp. GPG-CFE-CICESE.
- Romero González, J.C., P. Reyes vermot y S. Venegas Salgado. 1979. Resultados preliminares de la exploración geoelectrica en el Área Cerritos Colorados-La Azufrera de la zona geotérmica de La Primavera, Jal. Informe 7/79 inédito. Depto. de Geotermia, Ofna. de Exp. CFE.
- Romero González, J.C. 1981. Estudios geológicos y geofísicos en el Área geotérmica de La Primavera, Jal. Informe 5/81 inédito. GPG-CFE.
- Sharma, P.V. 1986. Geophysical Methods in geology. Edit. Elsevier. Segunda Ed. 442 pp.
- Talwani, M., J.M. Worzel y M. Landisman. 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fracture Zone. Jour. of Geophys. Res. 64(1): 49.

- Talwani, M. y M. Ewing. 1960. Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shapes. *Geophysics*. 25(1):203-225.
- Templos Miranda, L.A. 1982. Resultados de las exploraciones en el campo geotérmico de La Primavera, Jalisco. Inédito. CFE.
- Templos Miranda, L.A., S.J. Villa Merlo y F. Munquía Bracamontes. 1982. Geoquímica de detalle del campo geotérmico de La Primavera y Las Planillas, Jal., Méx. Residencia de Perforación Guadalajara. Inédito. GPG-CFE.
- Thanassoulas, C. y G.N. Tsokas. 1985. A microcomputer program for Tsuboi's method of gravimetric interpretation. *First Break*. 3(6): 16-22.
- Tomoda, D. y K. Aki. 1955. Use of the function $\sin(x/x)$ in gravity problems. *Proceed. of the Japan. Acad.* 31:443.
- Truesdell, H.A. y G.A. Mahood. 1980. Preliminary geochemical assesment of the geothermal system of La Primavera, Jal., México. UCB-CFE.
- Tsuboi, C. 1983. *Gravity*. George Allen & Unwin, London. 254 pp.
- Venegas Salgado, S., C. Romero González, P. Reyes Vermot y S.H. Palma Guzmán. 1979. Informe preliminar de la geología del Área de La Azufrera-Cerritos Colorados de la zona geotérmica de La Primavera, Jal. Informe 8/79, inédito. GPG-CFE.
- Venegas Salgado, S. y Z. Casarrubias Unzueta. 1980. Informe

preliminar de la geología del área de Río Caliente - Agua Brava de la zona geotérmica de La Primavera, Jal. Informe 3/80, inédito. Depto. de Exp. GPG-CFE.

Venegas Salgado, S. 1981. Geología de la Sierra de La Primavera, Jal. Informe 52/81, inédito. Depto. de Exp. GPG-CFE.

