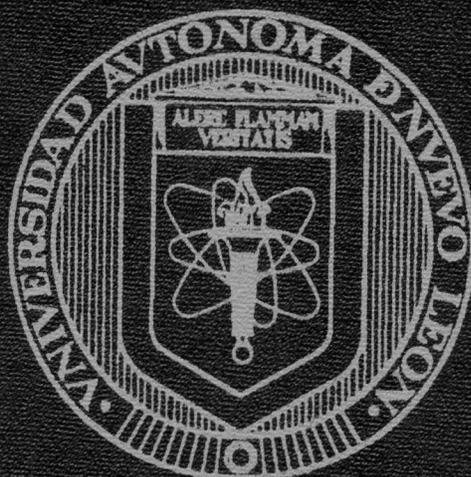


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



ESTUDIO GEOLOGICO-HIDROGEOLOGICO DE LA REGION NORDESTE
(SIERRA LAS MITRAS - CERRO EL TOPO - CERRO EL DURAZNO)
DE MONTERREY, NUEVO LEON/MEXICO

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLOGICAS

PRESENTA

EFRAIN ALVA NIÑO

LINARES, NUEVO LEON

ABRIL 1997

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**ESTUDIO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO DE LA REGIÓN NOROESTE
(SIERRA LAS MITRAS - CERRO EL TOPO- CERRO EL DURAZNO)
DE MONTERREY, NUEVO LEÓN/MÉXICO**

T E S I S

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

P R E S E N T A

EFRAÍN ALVA NIÑO

LINARES, NUEVO LEÓN

ABRIL 1997



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



La tesis

**ESTUDIO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO DE LA REGIÓN NOROESTE (SIERRA LAS
MITRAS - CERRO EL TOPO - CERRO EL DURAZNO) DE MONTERREY, NUEVO
LEÓN/MÉXICO**

elaborada por

EFRAÍN ALVA NIÑO

ha sido aceptada como requisito parcial para optar al grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo. ASESOR DE TESIS



Dr. Héctor de León Gómez

Linares, Nuevo León

Abril de 1997



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



La tesis

**ESTUDIO GEOLÓGICO-HIDROGEOLOGICO DE LA REGIÓN NOROESTE
(SIERRA LAS MITRAS - CERRO EL TOPO- CERRO EL DURAZNO)
DE MONTERREY, NUEVO LEÓN/MÉXICO**

elaborada por

EFRAÍN ALVA NIÑO

ha sido aceptada como requisito parcial para optar al grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

COMITÉ DICTAMINADOR DE LA TESIS



Dr. Héctor de León Gómez



Dr. José Rosbel Chapa Guerrero



Dr. J. Guadalupe López Oliva



Dr. Francisco Medina Barrera



Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia

Vo.Bo.



Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández
Jefe de la División de Estudios de Postgrado



La Geología y el Hidrogeología de la región noroeste de Monterrey, Nuevo León, México, se caracterizan por la presencia de unidades sedimentarias y metamórficas de gran parte del Cretácico y Terciario. El estudio geológico y hidrogeológico de esta zona es fundamental para el desarrollo de los recursos hídricos y minerales de la región.

Estudio geológico-hidrogeológico de la región noroeste (Sierra Las Mitras - Cerro El Topo - Cerro El Durazno) de Monterrey, Nuevo León/México.

Sancho Pardo, J. A. (1985). Estudio geológico-hidrogeológico de la región noroeste de Monterrey, Nuevo León, México. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.

La Geología es a la Ingeniería como la Fé respecto a las obras... El éxito bueno o malo de una empresa depende, en gran parte, de las condiciones físicas que estudia la Geología, de modo que las obras del ingeniero deberían basarse en la Fé del geólogo.

BOYD DAWKINS, F.R.S.

*No hay nostalgia peor
que añorar lo que nunca jamás sucedió...*

JOAQUÍN SABINA ("Con la frente marchita", 1989)

Sancho Panza: "Señor, los perros ladran"

El Quijote: "Señal de que estamos avanzando"

MIGUEL DE CERVANTES S. (El quijote de la Mancha)

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado de manera muy especial a mis padres, **Sr. Esteban Alva Martínez y Máxima Niño de Alva**, a los cuales agradezco de manera infinita la educación y el amor que me han brindado a manos llenas.

A **mis hermanos todos y a mis sobrinos**, los cuales siempre han procurado hacer de mis breves estancias con ellos lo más grato posible y a los cuales les doy mis más emotivas gracias.

Al **Sr. Fernando Velasco Valdespino y a su familia**, por brindarme su amistad desinteresada y por el calor de hogar que ahí se respira.

A los **M.C. Fernando Velasco Tapia, Juan Carlos Montalvo y Ulises Rdz.**, por estar en los momentos más importantes para mí a lo largo de mi desarrollo profesional, así como también en los momentos de alegrías y desventuras, por el consejo siempre oportuno, por tenderme la mano en momentos difíciles, por saber respetar una amistad, por permitirme celebrar con ellos sus triunfos.

A mis compañeros en la Maestría, ingenieros **Alberto, Alejandra, Uriel, Olivia, César Cisneros, Reyes Glz., Enrique Prado y Miguel Hdz.**, por brindarme su amistad y ayudarme en tantas cosas que sería imposible terminar de mencionar, simplemente gracias!!!

Al **Ing. Jorge A. Andaverde** y al **M.C. Ignacio Navarro**, por todo lo que me aconsejaron y apoyaron en todo momento.

A todos los estudiantes y tesistas de la Fac. de Ciencias de la Tierra/UANL, en especial para **Pedro L. Maldonado**, esperando que tomen las experiencias que viví y que les sean de utilidad.

A tantas personas que no menciono de manera involuntaria, este pequeño trabajo es el fruto de su confianza en mí.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (C.O.N.A.C.yT.)**, por brindarme la oportunidad de superarme académicamente y el apoyo que obtuve para ello.

Al Servicio de Agua Potable y Drenaje de Monterrey y a la C.N.A., en especial a los ingenieros **Octavio Salinas y Juan Pedro Pérez**, por las facilidades prestadas para la obtención de información de carácter invaluable para el desarrollo de la presente tesis.

Al personal docente de la Fac. de Ciencias de la Tierra/UANL, por la formación académica que he recibido de ellos, y en especial al C. Director, **Dr. Cosme Pola Símuta** y al Jefe de la División de Estudios de Postgrado, **Dr. J. Alonso Ramírez Fernández**.

Al Comité de Revisión de Tesis, **Dr. J. Gpe. López O., Dr. J. Rosbel Chapa Guerrero, Dr. Francisco Medina B. y Dr. G. Javier Castro L.**, por tomarse la difícil labor de revisar escritos anteriores, trabajo muy complicado y tedioso, así como también por las valiosas sugerencias que de ellos salieron.

De manera muy especial al **Dr. Héctor de León Gómez**, asesor de la presente tesis, por la confianza depositada en un servidor y por todo el apoyo y enseñanzas que he tenido a manos llenas por parte de él, y antes que nada, por brindarme su amistad.

A la **Maestra Manuelita Glz.** (la "teacher"), por las clases de Inglés, por todo su apoyo en momentos difíciles, por escucharme.

Finalmente, **a tí**, por tomarte la molestia y el interés de leer el presente trabajo, esperando que te sea de utilidad.

INDICE

	Página
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE	iii
RESUMEN	x
1. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Objetivos del estudio	3
1.1.2 Trabajos previos	4
1.2 Problemática	6
2. Fisiografía	7
2.1 Localización del área de estudio	7
2.2 Vías de acceso	7
2.3 Clima y vegetación	10
3. Metodología general	12
3.1. Metodología geológica	12
3.2. Metodología hidrogeológica	13
4. Geología	15
4.1 Geología regional	15
4.2 Geomorfología	19
4.3 Geología del área de estudio	21
4.4 Geología estructural	24
4.5 Estratigrafía	30
4.5.1 Generalidades	30
4.5.2 Litología y estratigrafía local	30
	iii

5. Hidrogeología	39
5.1 Introducción	39
5.2 Metodología hidrogeológica	42
5.3 Piezometría	42
5.4 Hidrogeoquímica	50
5.4.1 Introducción	50
5.4.2 Metodología	50
5.4.3 Descripción de parámetros analizados	51
5.4.3.1 Conductividad eléctrica	52
5.4.3.2 Calcio	52
5.4.3.3 Magnesio	55
5.4.3.4 Sodio	58
5.4.3.5 Potasio	59
5.4.3.6 Bicarbonatos	59
5.4.3.7 Cloruros	63
5.4.3.8 Sulfatos	63
5.4.3.9 Nitratos	65
5.4.3.10 Sólidos totales disueltos	67
5.4.4. Familias de aguas	69
5.4.5. Índices geoquímicos	75
6. Conclusiones y recomendaciones	83
7. Bibliografía	87
8. Anexos	95

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	Localización del área de estudio	8
Fig. 2.	Vías de acceso al área de estudio	9
Fig. 3.	Paleogeografía del Noreste de México durante el Oxfordiano (Jurásico Superior)(modificado de Padilla y Sánchez, 1986)	16
Fig. 4.	Paleogeografía del Noreste de México durante el Aptiano Superior/Albiano Inferior (Cretácico Temprano) (modificado de Padilla y Sánchez, 1986)	17
Fig. 5.	Paleogeografía del Noreste de México durante el Campaniano/Maastrichtiano (Cretácico Tardío) (modificado de Padilla y Sánchez, 1986)	18
Fig. 6.	Paleogeografía del Noreste de México durante el Terciario (modificado de Padilla y Sánchez, 1986)	19
Fig. 7.	Carta topográfica general de la zona metropolitana de Monterrey y alrededores mostrando los aspectos geomorfológicos mas relevantes (modificado de INEGI, 1978; escala 1:50000 reducida)	21
Fig. 8.	Carta geológica del área de estudio	25
Fig. 9.	Perfil geológico y columna estratigráfica del área de estudio. Escala vertical exagerada	26
Fig. 10.	Carta estructural del área de estudio. Para detalle de estereograma ver anexos 1A-1F	28
Fig. 11.	Estratos masivos y bloques de calizas de la Fm. Aurora. Sierra Las Mitras. Vista hacia el Norte	31

Fig. 12.	Fm. Cuesta del Cura. Obsérvese las intercalaciones de estratos de caliza de espesores medianos y estratos de caliza arcillosa, ambos presentando boudinage. Contacto entre la Fm. Cuesta del Cura (parte inferior) y la Fm. Agua Nueva (parte superior). Sierra Las Mitras, vista al Norte. El espesor del afloramiento es de aprox. 2 m	33
Fig. 13.	Fm. Agua Nueva. Presenta estratos calcáreo-arcillosos y lutitas carbonosas de espesores delgado a laminar. Sierra Las Mitras. Vista al Norte	34
Fig. 14.	Contacto Fm. Agua Nueva (izquierda) y Fm. San Felipe (derecha). Los estratos se vuelven mas arcillosos y reducen sus espesores, apareciendo estratos de bentonita y caliza silicificada. Autopista de cuota Saltillo-Nvo. Laredo, vista al Oeste	35
Fig. 15.	Transición Fm. San Felipe-Méndez. Desaparecen los estratos de bentonita y caliza silicificada, observándose estratos laminares de lutitas calcáreas y lutitas arcillosas. Sinclinal del Penal. Vista al Norte	36
Fig. 16.	Sedimentos de piedemonte, reportados como brecha sedimentaria (C.F.E., 1991), de espesor variable (0.5-2.5 m) y composición predominantemente calcárea. Cerro El Topo. Vista al Este	37
Fig. 17.	Carta de localización de pozos analizados en el área de estudio y desnivel topográfico existente entre ellos.	41
Fig. 18.	Piezometría y direcciones de flujo en año de 1988. El nivel dinámico se encuentra 8.76 m en promedio bajo la superficie	45
Fig. 19.	Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1995. El nivel dinámico se registró a los 13.49 m de profundidad, hasta Septiembre de ese año	49
Fig. 20.	Carta de documentación de pozos en el área de estudio	53
Fig. 21.	Isopletas de la Conductividad Eléctrica en el área de estudio	54
Fig. 22.	Isopletas del ión Calcio en el área de estudio	56

Fig. 23.	Isopletras del ión Magnesio en el área de estudio	57
Fig. 24.	Isopletras del ión Sodio en el área de estudio	60
Fig. 25.	Isopletras del ión Potasio en el área de estudio	61
Fig. 26.	Isopletras del ión Bicarbonato en el área de estudio	62
Fig. 27.	Isopletras del ión Cloruro en el área de estudio	64
Fig. 28.	Isopletras del ión Sulfato en el área de estudio	66
Fig. 29.	Isopletras del ión Nitrato en el área de estudio	68
Fig. 30.	Isopletras de Sólidos Totales Disueltos en el área de estudio	70
Fig. 31.	Diagrama múltiple trilinear, para la clasificación del agua según Piper (1944)	71
Fig. 32.	Diagrama modificado de Stiff, mostrando las diversas relaciones iónicas	73
Fig. 33.	Diagrama modificado de Stiff, mostrando las diversas relaciones iónicas (continuación)	74
Fig. 34.	Diagrama de Schöeller y Berkloff para las aguas subterráneas en la zona de estudio	76
Fig. 35.	Diagrama de Schöeller y Berkloff para la clasificación de las aguas subterráneas en la zona de estudio	77
Fig. 36.	Gráfico mostrando la relación Mg^{2+}/Ca^{2+}	78
Fig. 37.	Gráfico mostrando la relación K^+/Na^+ . Todos los valores son menores a 0.05, lo cual indica la poca interacción de éstas aguas	79
Fig. 38.	Gráfico de la relación Cl^-/HCO_3^- en el área de estudio	80
Fig. 39.	Gráfico mostrando la relación del índice geoquímico de los diferentes pozos del área de estudio	82

ANEXOS

- Anexo 1A. Estereograma de Schmidt mostrando la posición estructural entre la 95
estratificación y el diaclasamiento (*ac* y *bc*), así como la dirección
del eje del anticlinal ($\beta=138/14$) en la Sierra de Las Mitras en el
extremo Sureste
- Anexo 1B. Estereograma de Schmidt realizado en el Cerro El Durazno. Sólo se 95
representa el flanco Sur del anticlinal
- Anexo 1C. Estereograma de Schmidt realizado en la Loma de Vista Hermosa. 95
Obsérvese la semejanza estructural que guarda con respecto de la
Sierra de Las Mitras
- Anexo 1D. Estereograma de Schmidt realizado en el Cerro del Topo, extremo 95
Norte. Sólo se representa el extremo Norte del Anticlinal
- Anexo 1E. Estereograma de Schmidt realizado en el Cerro del Topo, en la parte 96
central. En esta zona las características estructurales se asemejan a
las obtenidas para la Sierra de Las Mitras
- Anexo 1F. Estereograma de Schmidt realizado en el Cerro del Topo, extremo 96
Sureste. Los datos representados son sólo de estratificación, ya que
el patrón de diaclasamiento es semejante a los mostrados en los
anexos 1D y 1E
- Anexo 2. Perfil hidrogeológico resaltando la posición de los diferentes 97
acuíferos en el área de estudio

Anexo 2A.	Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1989. El nivel dinámico promedio se registró a los 9.48 m bajo la superficie	98
Anexo 2B.	Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1990. El nivel dinámico se registró en los 25.33 m bajo la superficie, en promedio	99
Anexo 2C.	Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1991. En promedio, el nivel dinámico se registra en los 19.07 m bajo la superficie	100
Anexo 2D.	Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1992. El nivel dinámico promedio se encuentra a los 19.22 m bajo la superficie	101
Anexo 2E.	Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1993. El nivel estático se encontraba a 16.63 m en promedio bajo la superficie	102
Anexo 2F.	Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1994. La profundidad del nivel dinámico fue de 19.50 m en promedio	103
TABLA 1	UBICACIÓN DE LOS POZOS ANALIZADOS.	104
TABLA 2	CARACTERÍSTICAS DETERMINADAS EN CAMPO.	105
TABLA 3	RESULTADOS DE ANIONES Y CATIONES ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	106
TABLA 3	RESULTADOS DE ANIONES Y CATIONES ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO (CONTINUACIÓN).	107
TABLA 4	PORCENTAJE DE IONES PRESENTES EN LAS MUESTRAS ANALIZADAS.	108
TABLA 5	PRINCIPALES INDICES GEOQUIMICOS DETERMINADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	109

RESUMEN

El Noreste de la República Mexicana se ha caracterizado por ser una de las regiones con clima extremo y seco, por lo que las precipitaciones pluviales en esta zona son escasas. La ciudad de Monterrey, Nuevo León, se encuentra asentada en la zona antes mencionada, por lo que el abasto de agua de calidad potable para la población resulta ser uno de los principales problemas a resolver.

Dentro de las medidas implementadas para mejorar la actual oferta de agua, de calidad potable, a la población del área metropolitana de Monterrey, se encuentra la de conocer el estado actual de los acuíferos existentes dentro del área ya mencionada.

En el presente estudio se dan a conocer los resultados obtenidos de la cartografía geológica y del análisis estructural de las unidades geológicas; también se realizó la piezometría e hidrogeoquímica de los pozos de abastecimiento en producción, ubicados en el área comprendida entre los Cerros El Topo, Cerro El Durazno y Sierra de Las Mitras en la porción Noroeste del área metropolitana de Monterrey.

Dentro de la cartografía geológica se determinaron unidades que van desde el Cretácico Inferior (Formación Aurora) hasta el Cretácico Superior (Formación Méndez), así como también sedimentos alóctonos depositados en el valle existente entre los altos topográficos que delimitan la zona de estudio, de edad cenozoica (Terciario y Cuaternario).

El comportamiento estructural de los sedimentos es resultado de los esfuerzos a los que fueron sometidos durante la Tectogénesis Laramide que afectó y plegó los depósitos mesozoicos en esta región, por lo que el diaclasamiento presente en las rocas es de tipo distensional (ac y bc), mientras que las estructuras mayores presentan, como consecuencia de los esfuerzos en dirección NE, un plegamiento general NW-SE, a excepción de la zona de Monterrey, donde las direcciones de

plegamiento se orientan E-W, para posteriormente volver a tomar el rumbo general NW-SE en las cercanías de la ciudad de Saltillo, Coahuila.

El análisis piezométrico de los niveles estáticos revela que la recarga de los pozos de extracción someros se deriva principalmente de la Sierra de Las Mitras, con una dirección SW-NE, y otra, aunque en menor proporción, proveniente del W.

Los análisis hidrogeoquímicos realizados a 14 muestras de pozos de abastecimiento revelan que existen 2 familias de aguas, siendo predominantemente cálcico-bicarbonatada y sólo 2 pozos pertenecientes a la cálcico-mixta, ubicados éstos últimos al Norte del área de estudio.

Dentro de la distribución de los elementos mayores, la mayoría de los iones analizados se comportan dentro de los límites establecidos por la SEDUE, aunque la concentración de Nitratos resultó muy por arriba de los límites establecidos, motivado posiblemente por la proliferación de tiraderos de basura clandestinos o fallas técnicas en la construcción del relleno sanitario existente en la parte NW de la zona de estudio, por lo que un monitoreo exhaustivo de los pozos aledaños es recomendado, esto es, un análisis de muestra de aguas total, el cual incluya tanto análisis de elementos traza como bacteriológico.

De ésta manera, el presente estudio permite tener el conocimiento de la geología así como también del comportamiento piezométrico, hidrogeológico e hidrogeoquímico de los pozos someros de abastecimiento del área de estudio y la interacción existente entre ellos.

La comprensión de los factores anteriores ayudaría a reducir el actual déficit existente en el abastecimiento de agua potable para la zona metropolitana de Monterrey, permitiendo así la explotación más racional, distribución y protección contra contaminantes de los recursos hídricos existentes en el área y así mejorar la oferta de agua existente actualmente a una población en continuo crecimiento.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 Introducción

El abastecimiento de agua para las grandes ciudades ha resultado ser uno de los problemas más graves a resolver en los tiempos actuales, motivado por el acelerado crecimiento poblacional y el manejo inadecuado de los recursos hidráulicos. En la región Noreste de México éste problema es más agudo aún, como consecuencia del clima semi-árido extremoso que predomina en ésta zona, con períodos de lluvia cortos seguido de un período seco relativamente largo. Por tal motivo los recursos hidrológicos se ven grandemente influenciados por estos fenómenos meteorológicos, ya que éstos períodos determinan en gran medida la recarga de los acuíferos tanto someros como profundos en toda la región.

El estado de Nuevo León se encuentra enclavado en la región antes descrita, y su capital Monterrey junto con su área metropolitana, está incluida dentro de las tres zonas más densamente pobladas de México, además de contar con aproximadamente el 95% de la población del estado de Nuevo León (INEGI, 1986), por lo que su demanda de agua para usos industrial, doméstico y agrícola es enorme y en continuo crecimiento.

Actualmente el área metropolitana Monterrey (San Pedro Garza García, García, Escobedo, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina, Apodaca, Guadalupe y Juárez), con 3,5 millones de habitantes requiere de un suministro de agua de aprox. $17 \text{ m}^3/\text{s}$ (De León *et al.*, 1994). Sin embargo la oferta proporcionada por las fuentes

superficiales y subterráneas es de 10 m³/s. Esto significa un déficit de 7 m³/s. Se considera que para el año 2000 se tenga una población aprox. de 5,1 millones de habitantes, por lo que se requerirán aprox. 22 m³/s de agua para cubrir las necesidades de la población (De León *et al.*, op.cit.).

El área metropolitana de Monterrey cuenta para su suministro de agua con diferentes pozos localizados tanto en acuíferos granulares como en calizas. De los 10 m³/s de agua da calidad potable que son captados, aprox. un 60% de la oferta proviene de los pozos mencionados anteriormente, resultando insuficientes para satisfacer la demanda generada por la población. El restante 40% de la oferta es cubierto por otras fuentes de abastecimiento (presas, socavones, galerías de filtración). Aún así se continua con el déficit mencionado con anterioridad.

Estudios realizados a finales de la década de los 60's y mediados de los 70's (Comisión Agua Potable y Drenaje de Monterrey, C.A.P.D.M., 1989), contemplaban los acuíferos profundos emplazados en las calizas del Cañón de la Huasteca y en Mina como suficientes para cubrir la demanda de agua que exigía el área metropolitana de Monterrey, esto en caso de mantenerse el ritmo de crecimiento poblacional. La realidad rebasó con creces las expectativas planificadas, por lo que en la actualidad es necesario el conocimiento a detalle de los sitios o zonas que los estudios anteriores delimitaron como alternativas posibles a largo plazo, para de ésta manera cubrir el déficit en la demanda actual.

De esta manera, el presente trabajo se avoca al estudio de una de las alternativas propuestas con anterioridad, abarcando la zona comprendida entre la Sierra de Las Mítras, Cerro del Topo y Cerro El Durazno. Ya que esta región se encuentra constituida por cuerpos potentes de calizas de edad Cretácico Inferior en la zona central de los altos topográficos y hacia el valle por intercalaciones de sedimentos limo-arcillosos de edad Cretácico Superior. Estos últimos están cubiertos

en su mayor parte por sedimentos aluviales pertenecientes al Terciario y Cuaternario.

Este trabajo está enfocado a evaluar los acuíferos granulares presentes en la zona noroeste del área metropolitana de Monterrey, sus direcciones de flujo, estimación de recarga, precipitación, evaporación, como las condiciones de explotación y calidad química del agua en los diversos pozos en la zona de estudio.

1.1.1 Objetivos del estudio

El presente trabajo tiene como objetivo principal delimitar los diferentes acuíferos presentes en la zona, así como también conocer el mecanismo de recarga e interconexión entre los mismos y el volumen total de captación de la cuenca. Para esto se trazaron los siguientes objetivos específicos:

- ☒ Elaborar una carta geológica en el área de estudio, a escala 1:10,000 en campo y la reducción de la misma para su presentación final en el presente trabajo.
- ☒ Elaboración de perfiles geológicos en las distintas zonas de interés.
- ☒ Elaboración de la carta estructural del área, así como determinar los patrones y grados de fracturamiento existentes.
- ☒ Determinación de los tipos de acuíferos presentes en el área de estudio.
- ☒ Determinar zonas que reúnan las condiciones necesarias para la explotación de agua subterránea, tomando como base las características litológico-estructurales de las formaciones presentes en la zona de estudio.

1.1.2 Trabajos previos

Debido a su importancia, el abastecimiento de agua a una ciudad siempre ha tenido un carácter prioritario, máxime si se trata de una ciudad con características industriales y con un marcado crecimiento poblacional. La ciudad de Monterrey y su área metropolitana han incrementado en los últimos 20 años su demanda de agua en una forma acelerada. Debido a esta situación el estudio de los diferentes acuíferos tanto en Monterrey como en las zonas aledañas, han sido objeto de 2 análisis de factibilidad como también de factibilidad por parte de los diferentes organismos oficiales a cargo de la administración y distribución del agua, entre ellos la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H.), Comisión Nacional del Agua (C.N.A.), Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (S.A. y D.M.).

Dentro de los estudios de evaluación de los acuíferos realizados en el área de Monterrey, la Secretaría de Recursos Hidráulicos (1966) lleva a cabo estudios de captaciones de la cuenca del Río San Fernando para surtir agua potable para Monterrey, N.L. en la etapa de estudio de factibilidad técnica y económica, así como también en la etapa de estudio hidrológico y estudio geohidrológico.

Ingenieros Consultores y Proyectistas (C.I.E.P.S.) realiza en 1968 el estudio geohidrológico de acuíferos regionales en calizas en la zona de Monterrey, mientras que Planimex, Ingenieros Consultores, S. A. (1977) elabora un estudio para abastecimiento de agua al área metropolitana de Monterrey.

Murillo Martínez (1986), estudia la hidrogeoquímica del área metropolitana de Monterrey, N.L.; así mismo, Loaiza y Jiménez (1987) elaboran un estudio relacionado con la aplicación del modelo de asignación de agua a Monterrey, Nuevo León. La Comisión de Conurbanación del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México (1988) desarrolla el Plan Director de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Monterrey 1988-2010, consistiendo este en una revisión de los

recursos hidrológicos de la región y la investigación a fondo de las condiciones en que se encontraban los diversos acuíferos en la región y la capacidad para satisfacer la demanda de agua tanto en ese momento como para los años venideros y la implementación de fuentes alternas.

La Comisión Agua Potable y Drenaje de Monterrey (C.A.P.D.M., 1989), realiza un Estudio integral de los recursos hidráulicos para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey, N. L. y su área metropolitana. Mientras tanto la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E., 1991) estudia geológicamente la región de Monterrey para la elaboración de proyectos de acumulación de energía por bombeo.

De León Gómez (1993), desarrolla estudios geológico-hidrogeológicos de la presa José López Portillo/Cerro Prieto cerca de la ciudad de Linares, Nuevo León, como parte de las alternativas de abastecimiento para la ciudad de Monterrey.

Chapa Guerrero (1993) zonifica, bajo criterios ingeniero-geológicos, las zonas de riesgo geológico existentes en el frente de la Sierra Madre Oriental. González Lozano (1994) investiga la presencia de nitratos y nitritos en el agua subterránea del sector noroeste del área metropolitana de Monterrey y su relación con la salud de los consumidores. Alva Niño (1995) y Hernández Padilla (1995) elaboran conjuntamente investigaciones ingeniero-geológicas, geológicas e hidrogeológicas del área metropolitana de Monterrey, N.L., México.

Además, existen diversos estudios de los acuíferos de la región, aunque éstos son de carácter interno para los diversos organismos tanto municipales como los estatales y regionales encargados de la administración y regulación del agua tanto en el área metropolitana de Monterrey como en el Estado.

Como se observa, la mayoría de los trabajos realizados se encuentran enfocados a la prospección de nuevas fuentes de abastecimiento a nivel regional. Algunos otros sólo manejan el quimismo de las aguas y la relación con la salud de los consumidores. Sin embargo, se requiere la realización de estudios específicos sobre el comportamiento de los acuíferos y sus interacciones con el medio ambiente, dentro de los cuales se traten de conocer más a fondo las relaciones piezométricas, gastos reales de los pozos y del quimismo de las aguas subterráneas.

1.2 Problemática

El área metropolitana de Monterrey, con una tendencia de incremento en la población y su industria, demanda cada día más agua. Por otro lado, debido a la prolongada sequía de varios años, el clima extremo que posee la región y el aumento en la demanda de agua de calidad potable hace que la búsqueda de este líquido en las cercanías de la región sea una tarea cada vez más difícil. Para resolver la problemática anterior, es necesario conocer primeramente la situación geológica e hidrogeológica de la zona de estudio, para así poder realizar una evaluación geológica preliminar del acuífero somero. Realizado lo anterior, así como con ayuda de datos de extracción de pozos dentro del área de estudio y análisis químicos de esos pozos, es posible delimitar el área de recarga tanto geológica como hidrogeoquímicamente, para de esta manera observar las tendencias de los distintos iones disueltos en el agua y determinar alguna posible contaminación de esta fuente.

Es necesario realizar análisis periódicos para evaluar la variación de la composición química del acuífero, ya que así puede determinarse alguna posible sobre-explotación en una determinada zona y además posibles fuentes de contaminación (por ejemplo rellenos sanitarios).

CAPITULO 2

FISIOGRAFÍA

2.1 Localización del área de estudio

La zona de estudio se encuentra localizada entre los paralelos $100^{\circ}20'$ y $100^{\circ}30'$ de latitud Norte y $25^{\circ}40'$ y $25^{\circ}45'$ de longitud Oeste, dentro del área metropolitana de Monterrey, comprendiendo un área aproximada de 300 km^2 (Fig. 1).

Los límites del área de estudio son: al Norte y al Poniente por el Río Pesquería, al Sur por la carretera Monterrey-Villa de García y al Este por la calle Gonzalitos y su prolongación en el Boulevard Fidel Velázquez.

2.2 Vías de acceso

El área metropolitana de Monterrey cuenta con excelentes vías de acceso tanto por carreteras y ferrocarril como por vía aérea, haciendo de ésta una de las mejor comunicadas del país (Fig. 2).

Los ejes carreteros troncales son:

- a) Carretera Federal 85 (México-Nuevo Laredo), la cual cruza el Estado de Norte a Sureste, comunicando desde Nuevo Laredo con el Sureste del Estado y de ahí con Tamaulipas y el Golfo de México.
- b) Carretera Federal 40 (Matamoros-Mazatlán), cruzando de Este a Oeste, desde la ciudad de Reynosa, Tamaulipas, cruzando Monterrey, N.L., Saltillo, Coah. y

comunicando con el centro de la República, Norte y Noroeste de México.

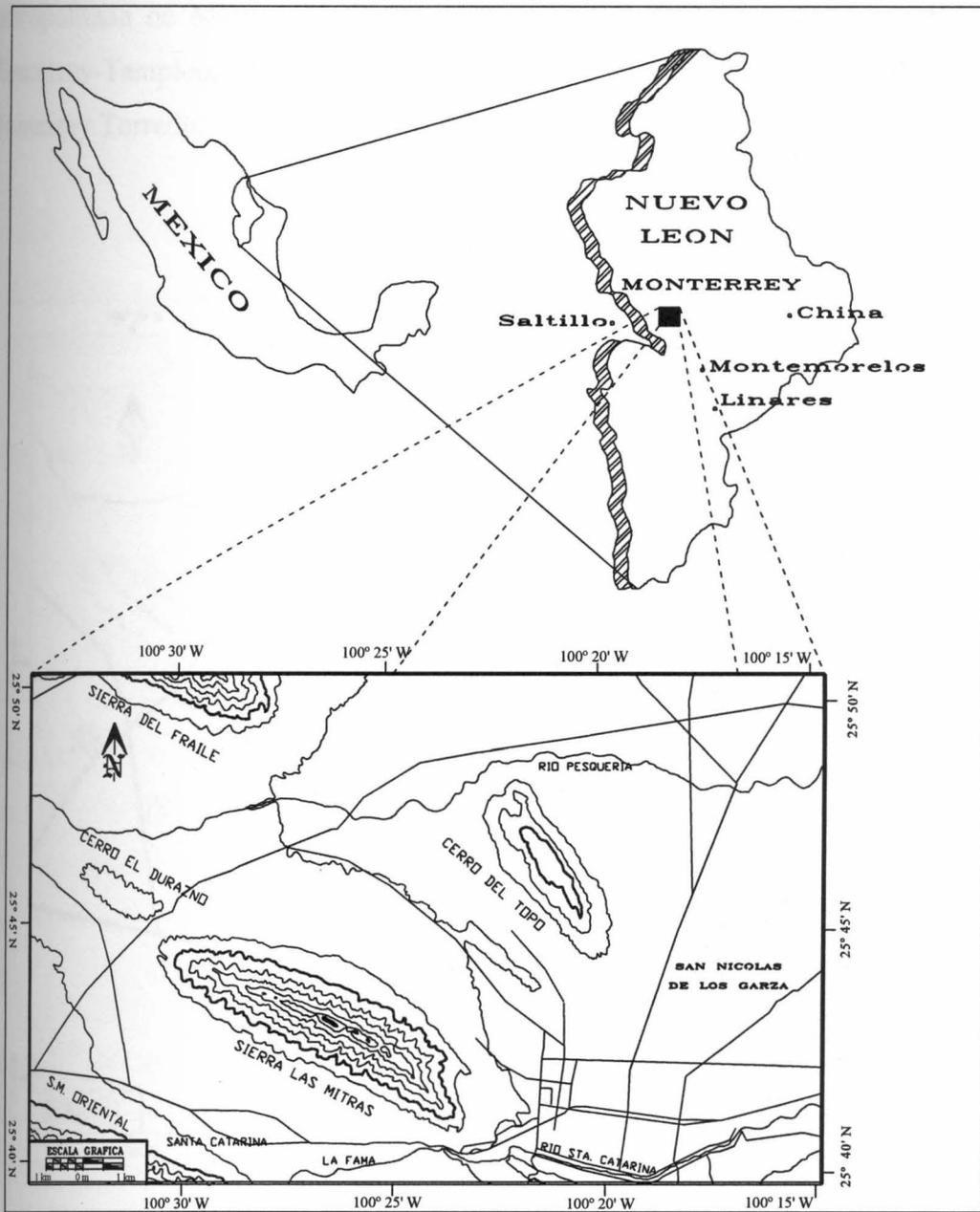


Fig. 1. Localización del área de estudio

2. Fisiografía

Otras carreteras de importancia son la carretera Monterrey-Monclova, Monterrey-Mier, Monterrey-Linares-San Luis Potosí. De igual manera, el área metropolitana de Monterrey se encuentra enlazada por ferrocarril por las vías Monterrey-Tampico, México-Monterrey-Nuevo Laredo, Monterrey-Matamoros y Monterrey Torreón.

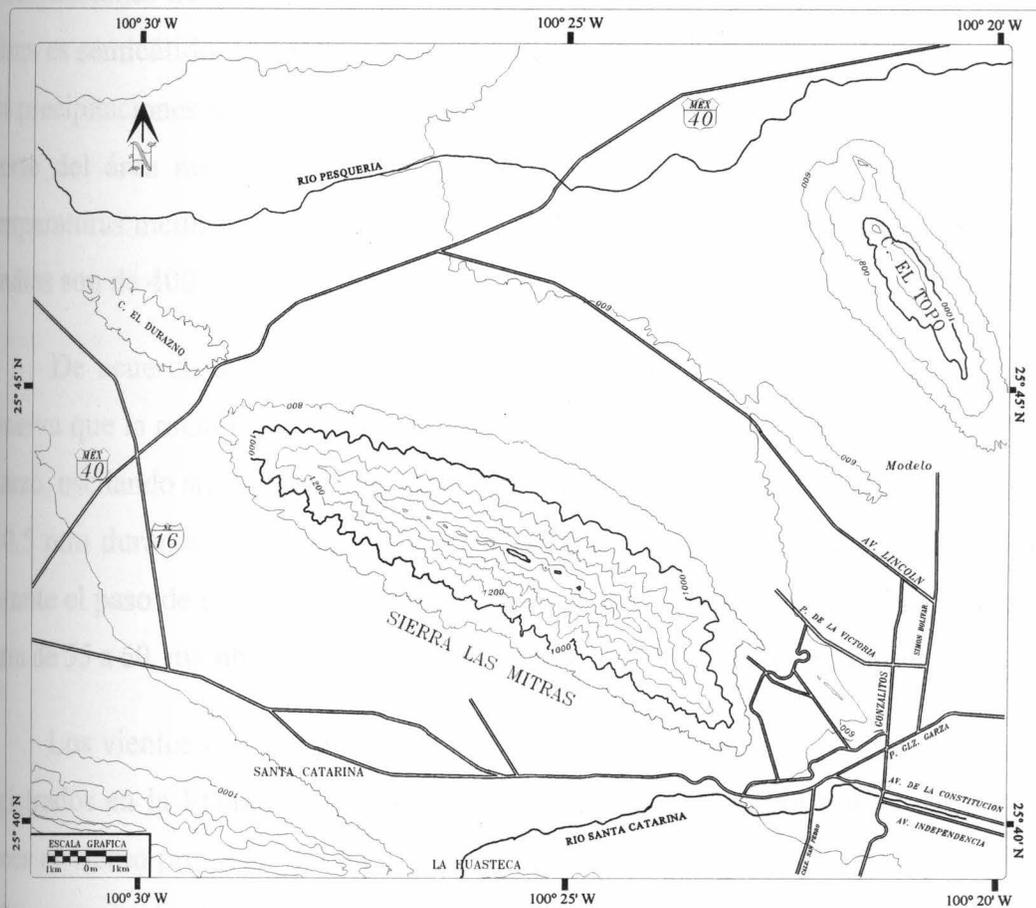


Fig. 2. Vías de acceso al área de estudio.

2.3 Clima y vegetación

El área metropolitana de Monterrey es caracterizada por poseer un clima cálido seco, cuyas temperaturas medias son de 21°C a 24°C; las precipitaciones varían de 500 a 700 mm al año (González Lozano, 1994).

En la parte Sur y Este del área metropolitana de Monterrey el clima es semicálido seco, con temperaturas medias entre los 20°C y 22°C y las precipitaciones tienen un promedio anual de 600 a 700 mm. En la región Oeste el clima es semicálido-árido, las temperaturas medias son del orden de 20°C a 23°C; sus precipitaciones son erráticas, torrenciales y en promedio menores de 400 mm. Al Norte del área metropolitana de Monterrey el clima es cálido, muy seco; las temperaturas medias son del orden de 22°C a 25°C y las precipitaciones pluviales medias son de 400 a 600 mm anuales.

De acuerdo a los registros de la Estación Climatológica Topo Chico, se observa que la menor incidencia de lluvia se registra en los meses de Diciembre a Marzo, oscilando sus valores entre los 12.2 y 14.3 mm, con una máxima mensual de 450.5 mm durante el verano (C.N.A., 1995), registrándose los valores máximos durante el paso de ciclones. El número de días al año con precipitación apreciable varía de 55 a 60, mientras que el resto del año (150-200 días) se encuentra despejado.

Los vientos dominantes son los alisios provenientes del Noreste. Los datos registrados en la Estación Meteorológica Monterrey muestran que el 26% de las veces el viento proviene del Noreste con una velocidad promedio de 3.9 m/s y un 15% corresponde al Sureste con una velocidad promedio de 4.2 m/s.

Por otro lado, en el área de estudio predominan llanuras y lomeríos con matorral submontano, como ocurre en el Cerro del Topo. En algunas zonas se encuentra pastizal inducido, mientras que en el resto es constituido por la zona

urbana (INEGI, 1986).

Las partes altas del Cerro del Topo propician el desarrollo de los suelos tipo Litosol, existiendo asociaciones con Regosol calcárico, presentándose lo mismo en la parte sur del área de estudio, mientras que hacia el centro y Sur del área se observa una pequeña porción de Feozem calcárico. La nomenclatura utilizada en la clasificación de los suelos es la empleada por la FAO-UNESCO de 1970, modificada por la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (DGGTN), (INEGI, *op. cit.*).

La mayor parte de la zona urbanizada está constituida por suelos tipo Regosol calcárico como suelo primario asociado a la Rendzina. Por otra parte, hacia el Noroeste de la zona de estudio se presentan los suelos Castañozem lúvico como suelo primario acompañado de Castañozem háplico y Feozem lúvico como suelo primario en asociación con Feozem calcárico. Cubriendo una pequeña zona, hacia el Sureste del área de estudio se localiza Rendzina como suelo primario en asociación con Litosol en fase petrocálica.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA GENERAL

La metodología utilizada en la realización del presente estudio consistió básicamente en dos fases: el desarrollo de la fase geológica y el desarrollo de la fase hidrogeológica-hidrogeoquímica.

3.1 Metodología geológica

La Cartografía Geológica a detalle permite el conocimiento de la situación geológica de la zona de estudio. Se realizó una cartografía geológica a escala 1:10,000 reducida, para revelar la composición y distribución de las diferentes unidades litológicas, tanto las pertenecientes al Cretácico como a los sedimentos pertenecientes probablemente al Terciario y Cuaternario, ocupando estos últimos en extensión aprox. el 70% del área cartografiada. Alva Niño(1995) y Hernández Padilla (1995) realizaron la cartografía geológica de la zona Sur del área del presente estudio, por lo que se hicieron caminamientos para corroborar la validez de la información y verificar la continuidad de las unidades geológicas hacia el Norte-Noroeste y el resto de la zona de estudio. Entre las unidades litológicas se incluyen la distribución de suelos tales como caliche, suelos rojos, limos y otros, los cuales influyen en la recarga de los acuíferos. Así también se delimitaron las zonas urbanizadas en el área para proponer áreas de protección para los acuíferos en la zona.

La Elaboración de los Perfiles Geológicos permite conocer el espesor real de los sedimentos, y el posible comportamiento de las diferentes unidades litológicas

presentes en el área de estudio, así como la distribución de estas y la secuencia que se observa, elaborando eventualmente algunos perfiles edafológicos típicos de la zona.

La Elaboración de la Carta Estructural del área pone de manifiesto la situación tectónica de las unidades y sus discontinuidades geológico-tectónicas (fallas y fracturas) ya que éstas juegan un papel muy importante en los procesos de infiltración y para el flujo de las aguas subterráneas (intercomunicación de acuíferos).

Para la Determinación de los Acuíferos presentes en el área de estudio Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (S.A. y D.M.) puso a nuestra disposición su información, la cual consiste de los pozos que abastecen a el área metropolitana de Monterrey así como las distintas perforaciones realizadas con fines particulares de abastecimiento.

3.2 Metodología hidrogeológica

Con los datos recabados en las etapas anteriores (pozos de abastecimiento, localización, geología y tectónica) se elaboró una carta de documentación donde se recabó la información de todos los pozos existentes en la zona. Esta información contiene las alturas de los pozos, sus niveles piezométricos, temperatura del agua y conductividad eléctrica, así como también la concentración de elementos químicos mayores disueltos en el agua, para después construir la carta de isopletas del área de estudio, tomando como base trabajos realizados en otras regiones o cercanas a la del presente estudio, los cuales manejan aspectos de distribución de elementos químicos mayores disueltos en el agua (D'Amore *et al.* (1983), De la Peña Gámez (1994), Monarrez (1976), Struckmeier & Margat (1995)), manejo de recursos hídricos (Aparicio (1992), Johnson (1975), López Urrutia (1976), Wall (1961)), elaboración

de balances hidrológicos (Aral & Haddad (1987), Bennet et al. (1982), Fetter (1988), Freeze & Cherry (1979), Gray (1970), Hemker & Maas (1987), Loaiza & Jiménez (1987), Lohman (1977), Mercer & Faust (1980)) y determinación de zonas de protección a los acuíferos (Attewell & Farmer, (1979), Matthes et al. (1985), Peavy et al. (1985).

Con lo anterior, se determinaron zonas que reunieron las condiciones hidrogeológicas necesarias para la explotación de las aguas subterráneas, tomando como base también las observaciones de campo de las características litológicas y estructurales de las distintas formaciones presentes en la zona de estudio, así como en la determinación de la profundidad a la que se encuentran. Tomando en cuenta lo realizado con anterioridad, se determinaron las direcciones preferenciales de flujo del acuífero somero, la distribución de las isopletras de elementos químicos mayores y la concentración de estos mismos, para después compararlos con los límites de concentración permisibles por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) (1989).

De esta manera se pretende establecer, conjuntando todos los datos ya recabados, algunas posibles fuentes de contaminación en el área las cuales serán presentadas en una carta, así como establecer algunas probables medidas de saneamiento del acuífero, en caso de encontrarse contaminado.

CAPITULO 4

GEOLOGIA

4.1 GEOLOGIA REGIONAL

La predominancia de rocas mesozoicas plegadas es una de las características más relevantes del Noreste de México, que descansan sobre un basamento de edad Paleozoico y Precámbrico (Morán Zenteno, 1984).

El rasgo fisiográfico más significativo dentro del área de estudio lo constituye la "Curvatura de Monterrey", una flexión que sufre la Sierra Madre Oriental a la altura de la ciudad de Monterrey, a partir de la cual adquiere una orientación general Este-Oeste. Al Norte de esta flexión los elementos orográficos se vuelven más espaciados y las estructuras geológicas menos estrechas; además, el relieve disminuye abruptamente al oriente, hasta constituirse en la Llanura Costera del Golfo (Morán-Zenteno, 1984; Michalzik, 1986).

La composición litológica de la Sierra Madre Oriental es principalmente una gruesa secuencia de rocas carbonatadas y terrígenas de edad mesozoica. Las rocas más antiguas en la región consisten en un basamento de edad Precámbrico y Paleozoico. Estos afloramientos están distribuidos de forma aislada y constituyen ventanas erosionales en la secuencia mesozoica plegada (Morán Zenteno, 1984). En forma también discordante se tienen rocas del Triásico provenientes de sedimentos de origen continental, siendo sobreyacidas por sedimentos marino-continentales del Jurásico Inferior (Padilla y Sánchez, 1982). Durante el desarrollo paleogeográfico de la región, en el Jurásico Superior en la región se inicia una transgresión marina, con

depósitos de mar abierto sobre los sedimentos del Jurásico Inferior, manteniéndose este sistema de sedimentación hasta entrado el Cretácico Inferior (Figs. 3 y 4). Este ritmo de sedimentación se ve afectado drásticamente en el Cretácico Superior debido al aporte de sedimentos detríticos del Occidente (Fig. 5), causado por una retirada paulatina de los mares.

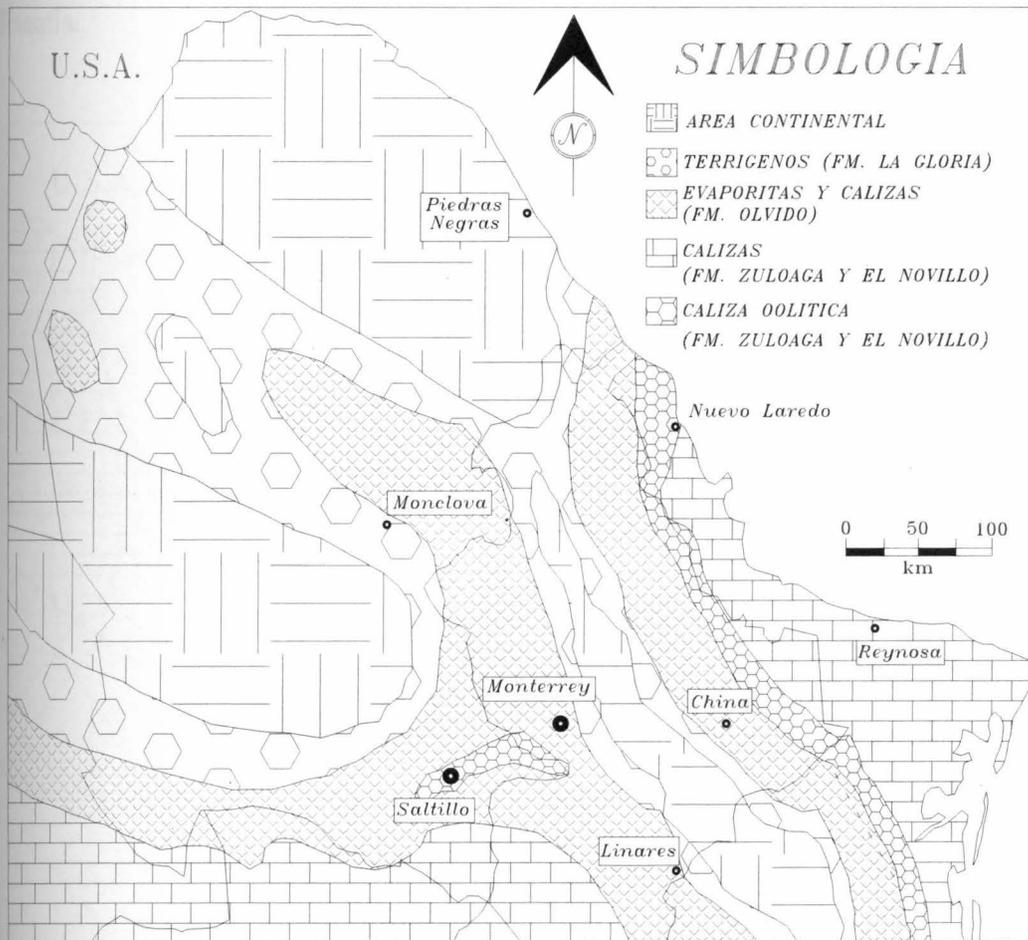


Fig. 3. Paleogeografía del Noreste de México durante el Oxfordiano (Jurásico Superior) (modificado de Padilla y Sánchez, 1986)

Los paquetes de rocas carbonatadas del mesozoico experimentaron un fuerte plegamiento y fueron cabalgadas por los esfuerzos de la Tectogénesis Laramide durante el Maastrichtiano-Eoceno Temprano (Meiburg, 1987); se le da el nombre de

Tectogénesis Laramide porque en esta región no se presentaron manifestaciones plutónicas como en otras regiones del planeta durante el mismo período. A inicio del Cenozoico se tienen las primeras manifestaciones orogénicas, con un considerable aumento de sedimentos terrígenos en aguas profundas, siendo éstas deformaciones el comienzo de la historia continental del sector Noreste del país, originando dos cuencas sedimentarias en el Terciario, la Cuenca de Burgos y la Cuenca Tampico-Misantla.

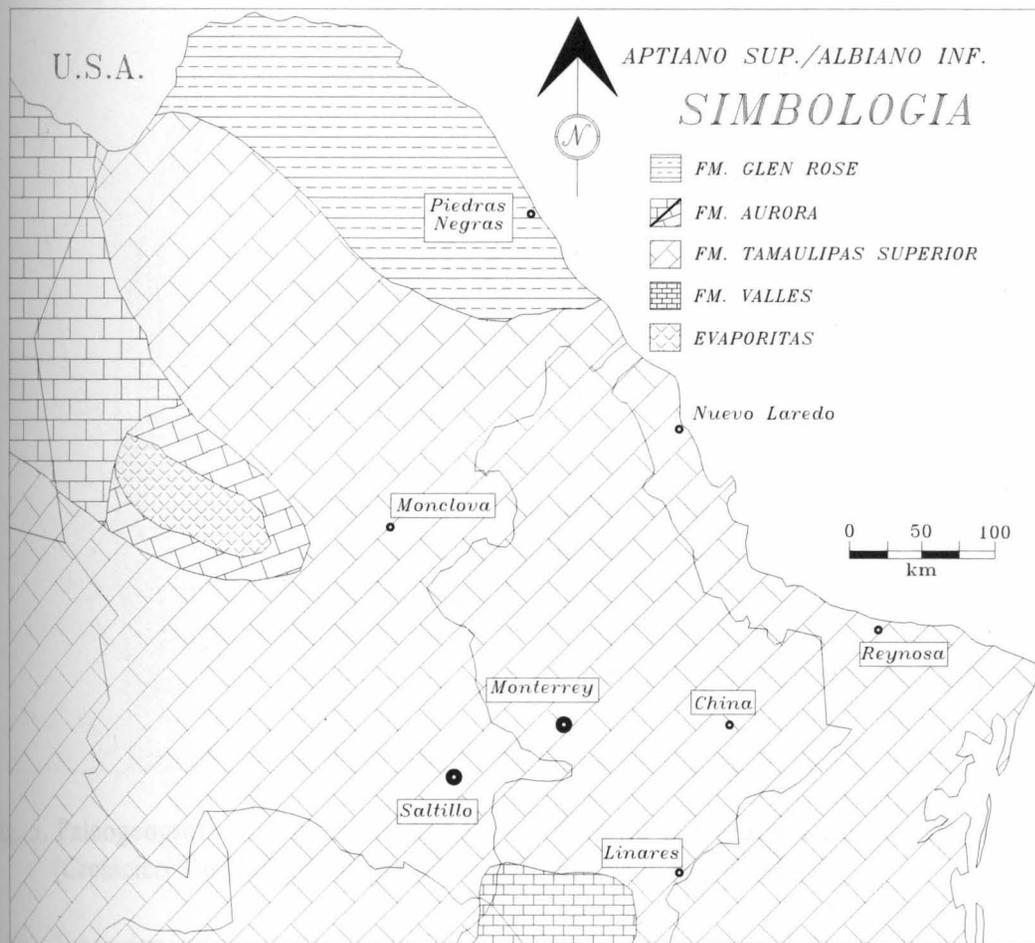


Fig. 4. Paleogeografía del Noreste de México durante el Aptiano Superior / Albian Inferior (Cretácico Temprano) (modificado de Padilla y Sánchez, 1986)

La cuenca de Burgos presenta unas secuencias sedimentarias marinas principalmente detríticas del Paleoceno al reciente, con espesores mayores de 1500 m y con un desarrollo de numerosas fallas normales de crecimiento contemporáneas a la depositación de los sedimentos (López-Ramos, 1982).

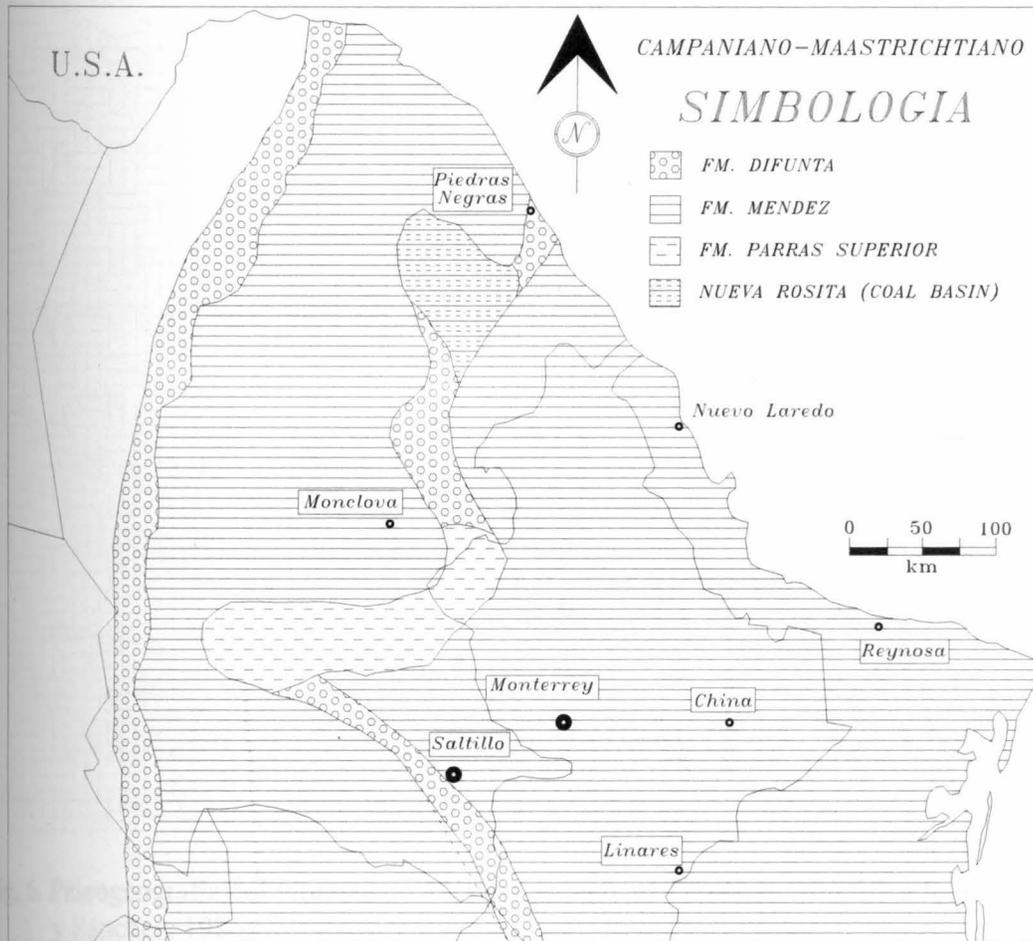


Fig. 5. Paleogeografía del Noreste de México durante el Campaniano / Maastrichtiano (Cretácico Tardío) (modificado de Padilla y Sánchez, 1986)

Estos depósitos terciarios ocurrieron en el marco general de una regresión con un rumbo general hacia el Este, dejando así sucesivas bandas de afloramientos paralelos a la actual línea de costa dispuestas de manera que estratigráficamente las capas más antiguas yacen en la porción occidental y más jóvenes hacia el oriente, lo

que provoca un marcado engrosamiento de los sedimentos en esa misma dirección (Fig. 6).

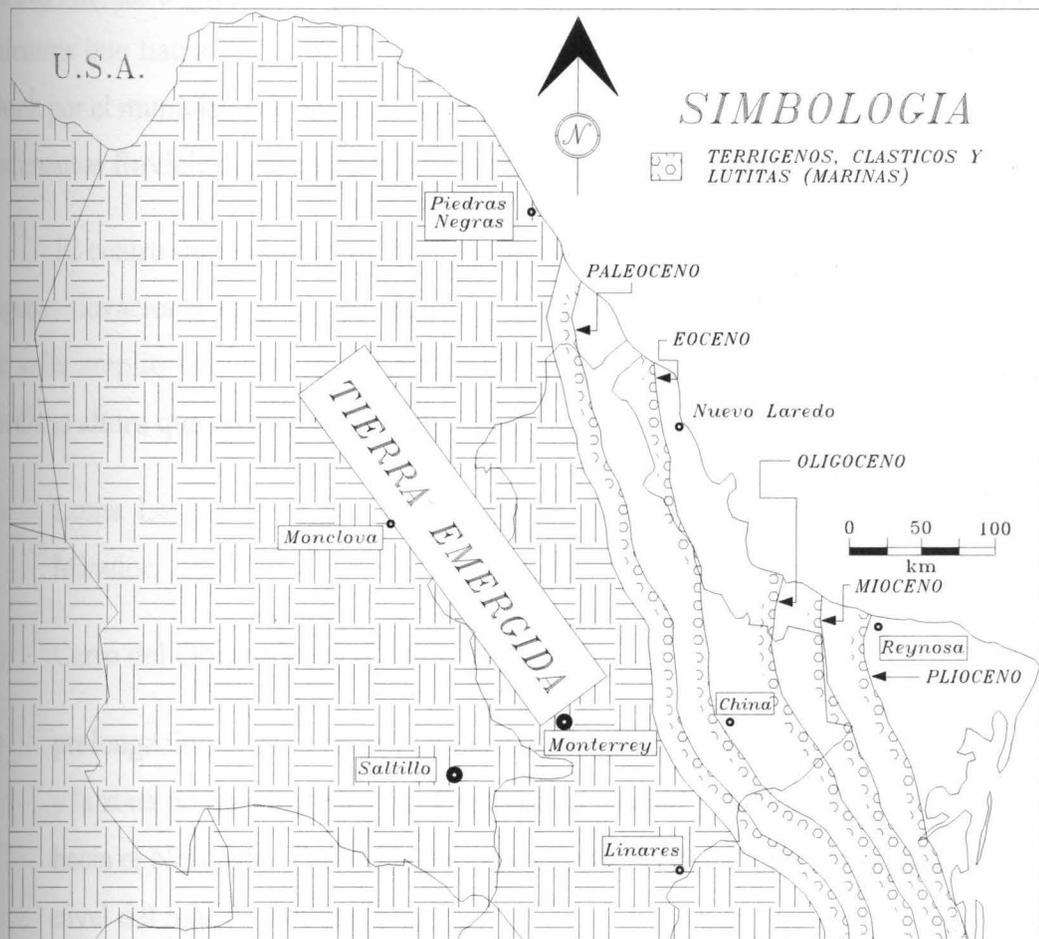


Fig. 6. Paleogeografía del Noreste de México durante el Terciario (modificado de Padilla y Sánchez, 1986)

4.2 Geomorfología

El área metropolitana de Monterrey se localiza en tres diferentes regiones geomorfológicas: el valle, montañas de mediana altura y montañas de gran altura. La zona del valle de Monterrey muestra la transición de la provincia de la Sierra Madre Oriental hacia la provincia de la Planicie Costera del Golfo, que desciende

paulatinamente hasta alcanzar la costa hacia el Este.

El valle comprende el centro de la ciudad de Monterrey, así como la ciudad de San Nicolás de los Garza y Guadalupe hacia el Norte y Noreste respectivamente, mientras que hacia el Suroeste por el municipio de San Pedro Garza García y al Oeste por el municipio de Santa Catarina. El material predominante en esta zona son sedimentos fluviales con escasos afloramientos de lutitas del Cretácico Superior.

El centro de la ciudad de Monterrey se localiza en una planicie rodeada por algunas elevaciones de mediana altura y por montañas altas, formando una estructura de valle amplio con una salida hacia el Noreste. Las principales elevaciones de mediana altura que enmarcan el valle de la ciudad de Monterrey son:

- a) Loma Larga en el Sur de Monterrey localizada al Norte del Cerro del Mirador,
- b) Cerro del Obispado localizado al Suroeste, y
- c) prolongaciones de la Sierra de las Mitras que son: la Loma de Vista Hermosa y la zona de San Jerónimo al Oeste de la ciudad y finalmente la Loma Linda hacia el Noroeste. Todas las elevaciones tienen una altura promedio sobre el nivel del mar de 700 m (Fig. 7).

El paleorelieve del área de Monterrey, posterior al levantamiento de la Sierra Madre Oriental, no difiere grandemente de las formas actuales, aunque existen elevaciones mayores en las márgenes de la sierra donde la erosión y el desgaste en masa han removido materiales. Depósitos fluviales observados en algunos afloramientos revelan la existencia de antiguos ríos, que depositaron grandes volúmenes de sedimentos como gravas, arenas y limos que forman parte de los rellenos del valle en el cual se formaron seguramente algunas planicies de inundación.

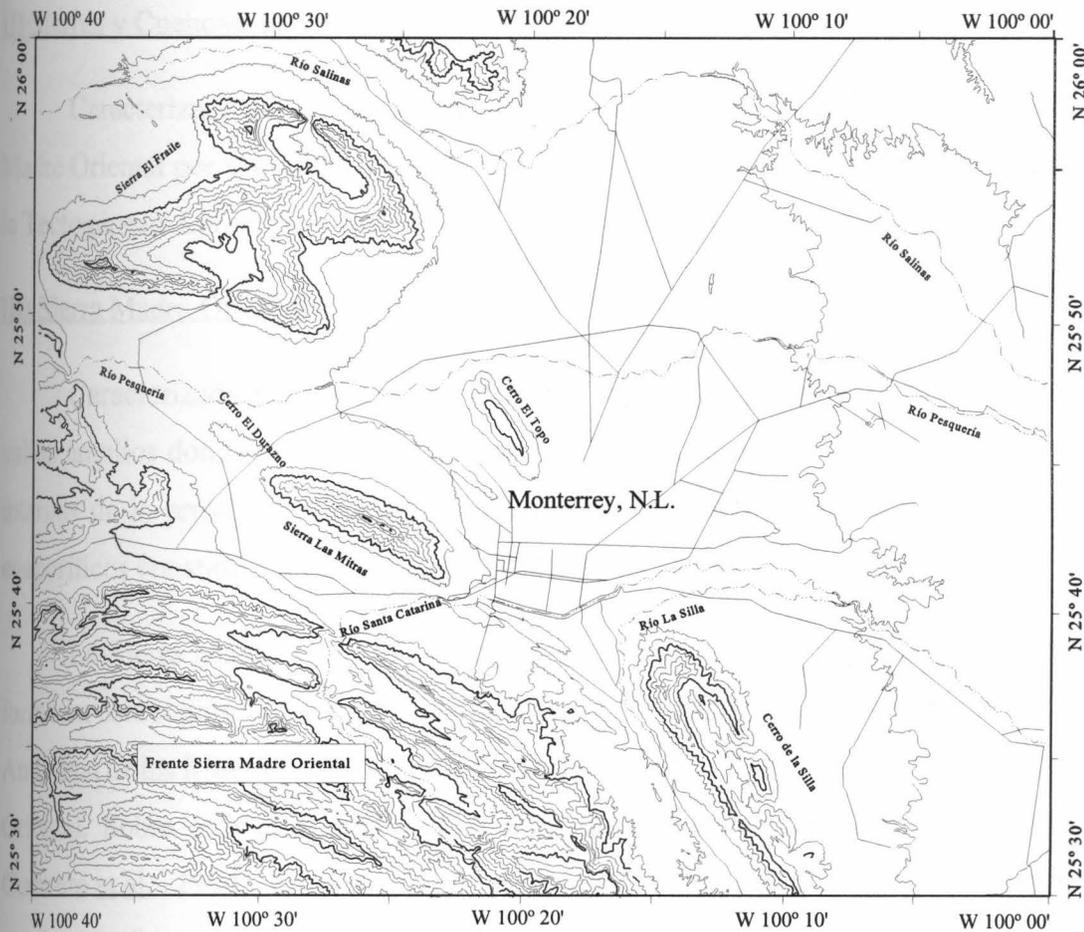


Fig. 7. Carta topográfica general de la zona metropolitana de Monterrey y alrededores, mostrando los aspectos geomorfológicos más relevantes (modificado de INEGI, 1978; escala 1:50000 reducida)

4.3 Geología del área de estudio

En el área de estudio se encuentran tres de las provincias fisiográficas más importantes del país se encuentran en la zona de estudio (López Ramos, 1982):

1) Provincia Costera del Golfo

Se caracteriza por lomeríos suaves que dominan la parte central del Valle de Monterrey, con sedimentos terciarios y cuaternarios de tipo detrítico y con un buzamiento general muy suave de 5° hacia el Noreste.

II) Sierras y Cuencas de Coahuila

Caracterizada por sierras bajas escarpadas constituidas al igual que la Sierra Madre Oriental por sedimentos marinos del Mesozoico plegados y deformados por la Tectogénesis Laramide a finales del Cretácico e inicio del Terciario.

III) Sierra Madre Oriental

Caracterizada por sierras con grandes espesores de calizas alternadas con valles amplios donde afloran formaciones arcillosas, mientras que hacia las zonas internas de la provincia aparecen depósitos de calizas y en el núcleo depósitos evaporíticos constituidos por yeso, anhidrita y sal.

La Sierra Madre Oriental, ubicada en el extremo Sur del área de estudio, forma en esta región la Curvatura de Monterrey. El frente está representado por el Anticlinal de los Muertos, que viene a ser el flanco Este y Noreste de la Sierra Madre Oriental. Sobre este anticlinal está localizada la Meseta de Chipinque (Chapa Guerrero *et al.*, 1994). En el municipio de Santa Catarina, el río del mismo nombre erosionó y formó el Cañón de la Huasteca que permite recorrer la secuencia estratigráfica desde las evaporitas jurásicas de la Formación Minas Viejas al Sur hasta la Formación Méndez al Norte, del Cretácico Superior (Michalzik, 1987).

Como estructuras aisladas del tren principal de la Sierra Madre Oriental están localizadas el Cerro de la Silla al Este y al Noreste la Sierra de las Mitras. El Cerro de la Silla es una estructura braquianticlinal parcialmente inversa (Padilla y Sánchez, 1982), que en su terminación Noreste imprime a la ciudad de Monterrey su símbolo característico que es el Cerro de la Silla. Este anticlinal tiene una dirección de N30°W y termina en el municipio de Allende, N.L.

La Sierra de las Mitras, ubicada al Sur del área de estudio y dentro de sus límites, es de igual forma una estructura braquianticlinal cuyo eje dirigido hacia el

Noroeste-Sureste tiene una inmersión muy suave en sus extremos, sufriendo en el extremo Sureste una bifurcación en la estructura anticlinal, formando dos estructuras alargadas con la misma orientación general de la Sierra Las Mitras, llegando a formar el Cerro del Obispado y la Loma Larga.

En el extremo Noroeste de la misma sierra se tiene una estructura con la misma orientación, llamado el Cerro El Durazno, el cual consiste en una estructura de poca elevación (aprox. 150 m de desnivel), de formas suaves y litología similar a la Sierra Las Mitras. En términos generales, esta litología consiste de calizas de estratos masivos (> 3m) a grandes (1-3 m) hacia el centro del anticlinal, los cuales se encuentran fuertemente diaclasados y con muestras de marcas de disolución tanto superficial como interna, llegando a formar grutas. Estos paquetes de calizas masivas se ven reducidos lentamente de tamaño hasta alcanzar espesores de estratos medianos a delgados hacia ambos flancos del anticlinal del Cerro El Durazno, para lentamente alternarse con estratos delgados de lutita y lutita arcillosa.

Conforme se aleja del centro del anticlinal los estratos de caliza se ven adelgazados de espesor hasta alcanzar tamaños que van de delgados a laminares, mientras que los de lutita se ven incrementados en su grosor, llegando de delgados a medianos y alternándose con lutita bituminosa. Ya en las faldas de los altos topográficos se observan estratos de lutita, lutita arcillosa que aparecen intercalándose con estratos de caliza silicificada y bentonita, los cuales se observan intemperizados y generalmente cubiertos de material de pendiente así como también de sedimentos aluviales.

El centro del área de estudio consiste en una planicie aluvial rellena por sedimentos tanto de clastos rodados de los altos topográficos que enmarcan al valle como también de los sedimentos arrastrados y depositados por los ríos Santa Catarina y Pesquería que enmarcan el área de estudio (Fig. 8). Hacia el centro del valle se

tiene un pequeño alto topográfico (relieve inverso), conocido geológicamente como el Sinclinal del Penal, consistiendo litológicamente en alternancias de estratos delgados de lutita, lutita arcillosa y caliza lutítica de estratos delgados a medianos. Esta pequeña loma marca el centro del sinclinal entre la Sierra Las Mitras y el Cerro del Topo al Norte-Noreste del área de estudio (Fig. 9).

El Cerro El Topo, al igual que la Sierra Las Mitras y el Cerro El Durazno, consiste de un alto topográfico formado por un anticlinal con unos flancos suaves y de litología semejante a la de la Sierra Las Mitras, con estratos de calizas masivas a gruesas hacia el centro; en la parte más alta del cerro sus estratos cambian de espesor, pasando a caliza de espesor delgado a mediano intercalada con lutita y lutita arcillosa conforme se acerca a las laderas del cerro y los estratos de caliza desaparecen paulatinamente. En la parte Norte del Cerro El Topo existen depósitos de material de pendiente muy consolidado, con un espesor ~ 20 m. Sus clastos son de tamaño y redondez variable, los cuales son provenientes de las partes altas del cerro y cementados fuertemente en una matriz arcillo-calcárea.

4.4 Geología estructural

En la región Noreste de México y en especial en la parte Norte de la Sierra Madre Oriental, se pueden observar grandes estructuras geológicas constituídas primordialmente por anticlinales y sinclinales, así como grandes pliegues "en rodilla" y fallas de tipo inverso. Las estructuras tienen un rumbo geológico predominante en dirección NW-SE, pero se puede observar en la parte Sur del área metropolitana de Monterrey la estructura conocida como "Curvatura de Monterrey", en la cual las estructuras geológicas cambian abruptamente a una dirección E-O; esta estructura muestra el flanco Norte del Anticlinal de Los Muertos con un buzamiento vertical y en ciertas zonas con buzamientos invertidos hacia el valle de Monterrey.

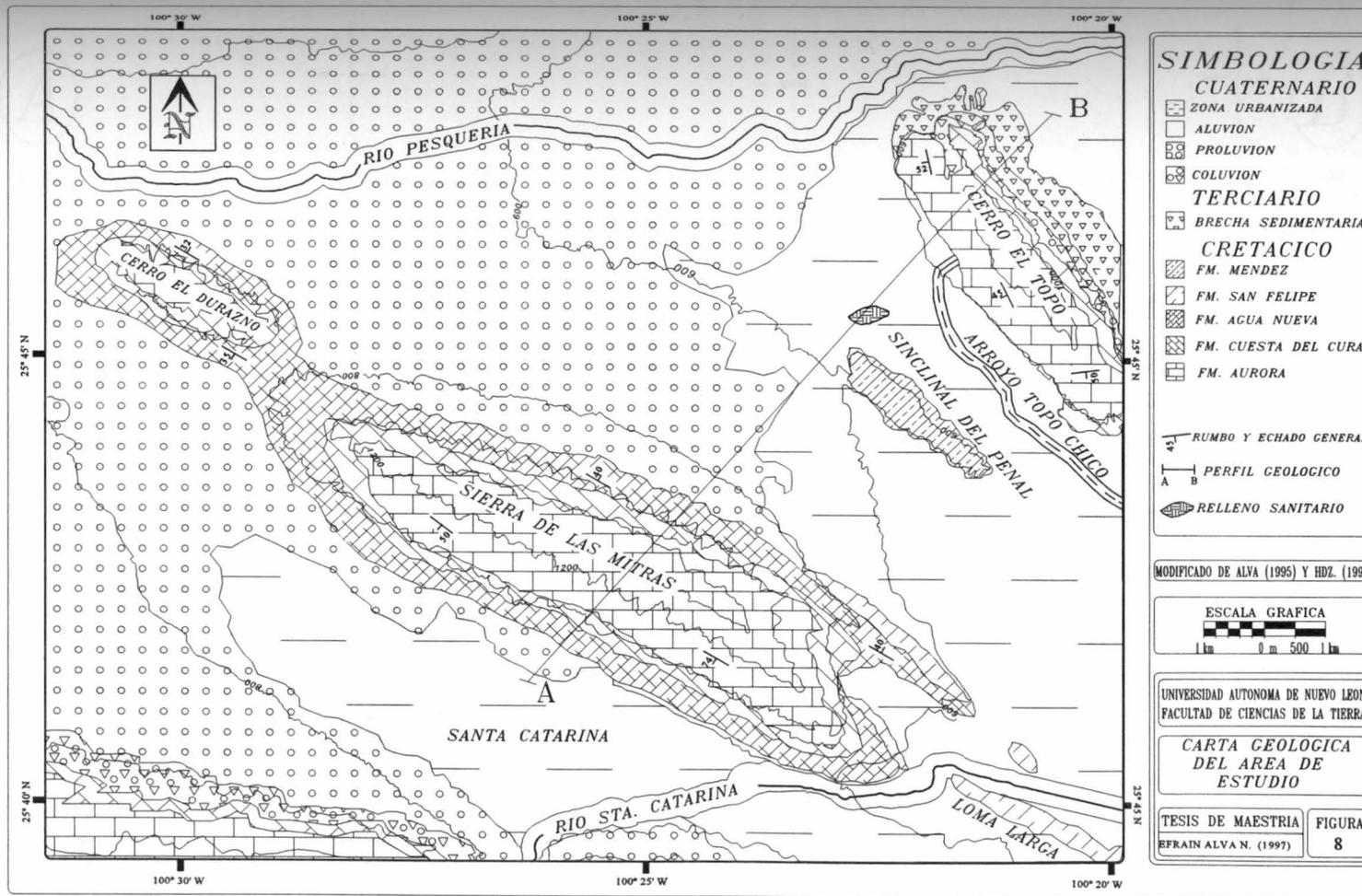


Fig. 8. Carta geológica del área de estudio

Estas estructuras geológicas son producto de los esfuerzos de la Tectogénesis Laramídica, lo cual originó a su vez una serie de estructuras presentes en el área de estudio. Las estructuras que complementan el marco del valle de Monterrey son las siguientes (ver Fig. 1).

En el Sureste la estructura conocida como Braquianticlinal del Cerro de la Silla, el cual tiene una orientación NNW-SSE y que se encuentra con una vergencia hacia el Este, variando el buzamiento de las capas entre los 25° y 40° .

En la parte Sur del área el Anticlinal de la Sierra de las Mitras, el cual mantiene una dirección NW-SE y una vergencia hacia el NE, mientras que su eje presenta una bifurcación en su terminación SE, presentando ambas estructuras una inmersión hacia el valle de Monterrey (Fig. 10). En el mapa estructural de la zona de estudio aparecen los distintos estereogramas realizados en diversos puntos del área, estando representados de manera muy esquemática. Para ver detalle de estos estereogramas, ver los anexos 1A a 1F. Los datos estructurales fueron tomados con brújula de tipo Clar, y la representación de los planos y los datos en general corresponden a este tipo de brújula.

Esta bifurcación del Anticlinal de Las Mitras se prolonga, formando dos anticlinales de características muy semejantes: el Anticlinal de Vista Hermosa al Norte y el Anticlinal de Obispado al Sur, con un plano axial de $221^\circ/80^\circ$ y $115^\circ/81^\circ$ respectivamente, y con una inmersión de sus ejes de 8° - 10° hacia el SE, y el Anticlinal de la Loma Larga, con un plano axial con una ligera vergencia hacia el NE (Hernández Padilla, 1995).

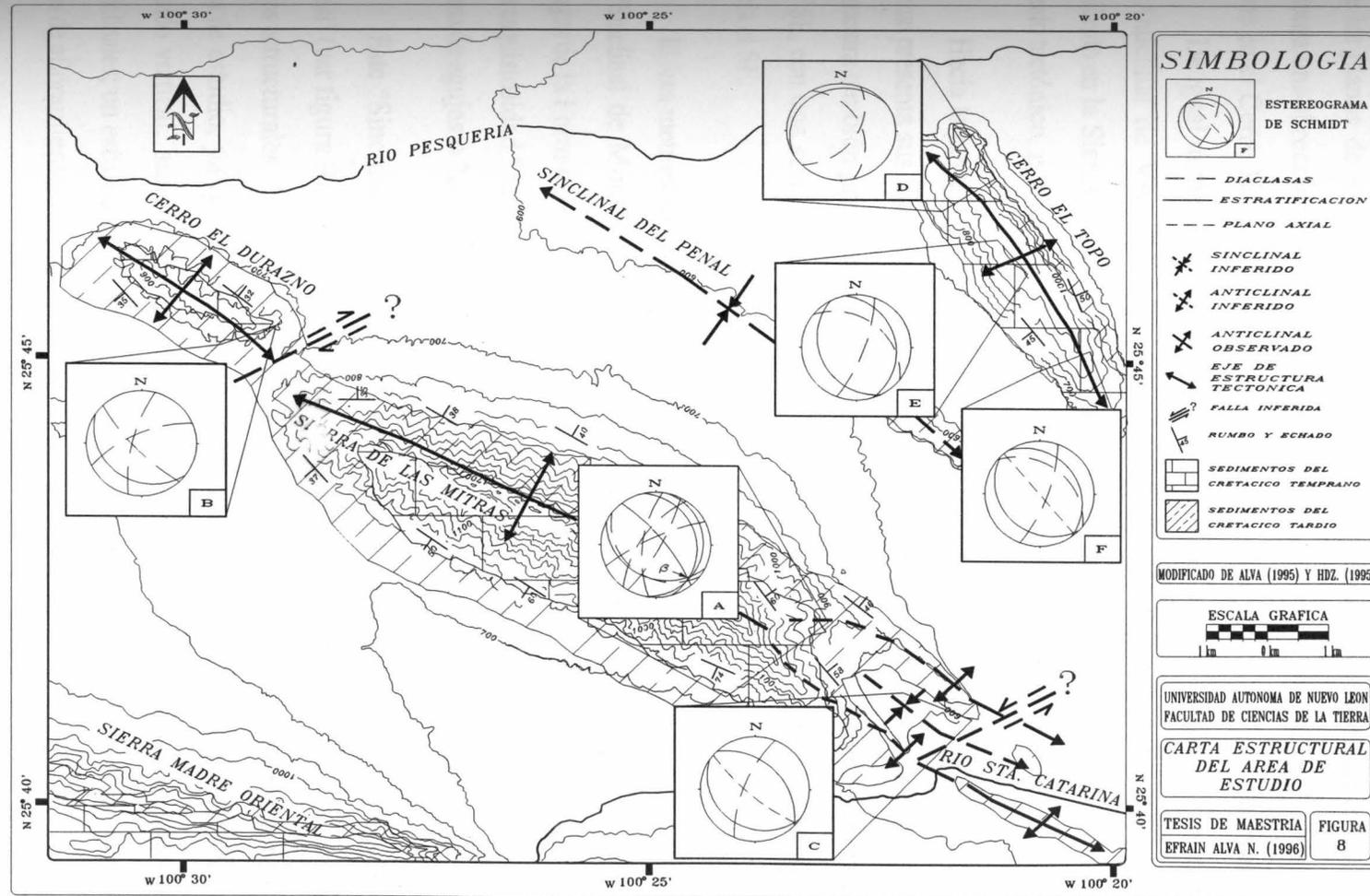


Fig. 10. Carta estructural del área de estudio. Para detalle de estereogramas ver anexos 1A-1F.

En el estereograma de Schmidt realizado en la Sierra de las Mitras se observa que los planos de estratificación definen claramente el eje del anticlinal, el cual muestra una dirección de $138^{\circ}/14^{\circ}$. Las diaclasas en la Sierra de Las Mitras, así como en el Cerro El Topo y el Cerro Durazno, muestran que son de tipo ac y bc.

De igual manera, los estereogramas realizados en el Cerro El Durazno y en el Anticlinal de Vista Hermosa presentan una semejanza con el estereograma realizado en la Sierra de las Mitras, dado que los tres fueron afectados por el mismo evento tectónico, por lo que sus estructuras están íntimamente relacionadas entre sí.

Hacia la parte Noreste del área de trabajo se localiza el Anticlinal del Topo, el cual presenta sus flancos con buzamientos suaves hacia el Noreste y Suroeste; esta estructura también presenta una inmersión de su eje hacia el valle de Monterrey de 40° SE, con una simetría en la parte SE, sufriendo su eje una inmersión de 5° - 10° hacia el SE.

El área metropolitana de Monterrey (zona centro del área de estudio) se ubica sobre el "Sinclinal de Monterrey" (Hernández Padilla, 1995), consistiendo en lutitas y margas de la Formación Méndez. Estas se encuentran fuertemente diaclasadas y con una esquistosidad "de fractura" o "de flujo" (Sherbon Hills, 1977) muy marcada en forma de agujas o "almendrilla" y buzamientos suaves (ver Fig. 9).

Este "Sinclinal de Monterrey" es también conocido como el "Sinclinal del Penal" (ver figura 9), aunque para definir la estructura en general es necesario más datos estructurales. La estructura de un sinclinal sencillo es la que mejor define el área de estudio, ya que no se tienen evidencias de un fallamiento de bloques en sentido vertical, aunque no se descarta la existencia de pequeños sinclinales y anticlinales; un estudio estructural más detallado no fue posible realizar debido a la falta de afloramientos.

Sobre la Formación Méndez del Cretácico Superior afloran capas delgadas de depósitos sedimentarios fluviales del Cuaternario, constituidos por gravas, limos, arcillas y arenas, los cuales forman el valle. Sobre estos sedimentos se han construido las unidades habitacionales existentes en el área.

4.5 Estratigrafía

4.5.1 Generalidades

El área de estudio se encuentra enmarcada por tres provincias geológicas: la Sierra Madre Oriental, la Provincia Costera del Golfo así como Sierras y Cuencas de Coahuila. La edad de los depósitos en la región Noroeste del área metropolitana de Monterrey es desde el Cretácico temprano hasta el reciente. Estos últimos están distribuidos ampliamente en el área de estudio y cubren las partes topográficas mas bajas, donde en su mayoría son depósitos fluviales, mientras que las partes mas altas presentan sedimentos consolidados del Mesozoico. En el área de estudio los estratos forman una secuencia normal, desde la Formación (Fm.) Aurora (Cretácico Inferior Tardío) hasta la Fm. Méndez (Cretácico Superior Tardío), así como depósitos del Cuaternario (Hernández Padilla, 1995).

4.5.2 Litología y estratigrafía local

Las rocas mas antiguas son las calizas correspondientes a la **Fm. Aurora**, con una edad Albiano Inferior-Albiano Medio (López-Ramos, 1982), que fueron depositadas en un ambiente de cuenca. Estas calizas constan de estratos gruesos (1-3 m) a masivos (> 3 m), muy competentes y con color de intemperismo gris claro, mientras que en fractura fresca presentan un color gris oscuro. Algunos presentan restos de conchas de braquiópodos, además de marcas de disolución (karren) y de presión (estilolitas). Hacia el contacto superior comienzan a reducir su espesor,

cambiando a medianos (0.5 m) a gruesos, con aparición de pequeños nódulos de pedernal y de fierro (1-10 cm de diámetro) (Fig. 11).

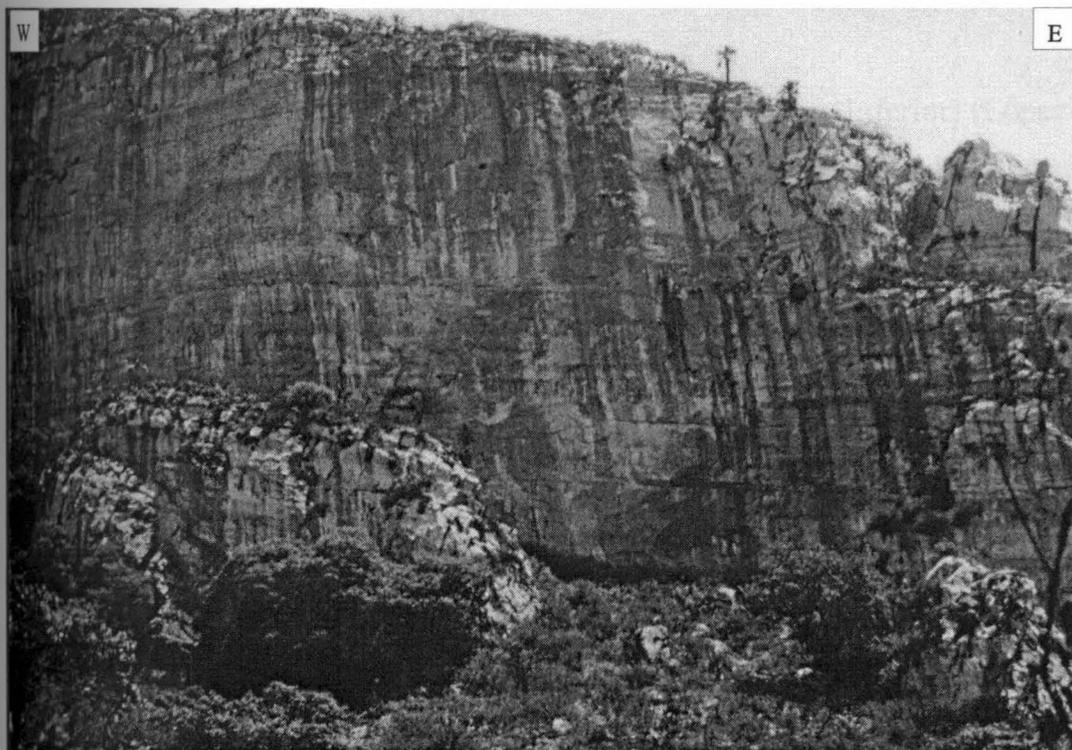


Fig. 11. Estratos masivos y bloques de caliza de la Fm. Aurora. Sierra de Las Mitras, vista al Norte.

La Fm. Aurora tiene un espesor mínimo aflorante de 200 m en el área de estudio. Ocupa las partes topográficas más altas del cerro El Topo, Sierra de las Mitras y en pequeña porción en el Cerro El Durazno, debido a que, como se menciona anteriormente, es más competente (ver figura 10). Debido a los esfuerzos de plegamiento a que fueron sometidos durante la Tectogénesis Laramide (Meiburg, 1987), los estratos de la Fm. Aurora, así como el resto de los depósitos mesozoicos están fuertemente deformados y diaclasados.

Esto ha permitido la disolución superficial de las discontinuidades de la caliza, facilitando la infiltración del agua meteórica y consecuentemente la formación de cavidades de tamaño variable, desde pequeñas oquedades (1-5 cm) hasta la formación de pequeñas grutas (1-5 m en promedio) distribuidas de manera irregular en ésta formación.

La **Fm. Cuesta del Cura** (Albiano Superior-Cenomaniano Inferior) (López-Ramos, 1982) aflora en las laderas de los altos topográficos y es concordante en su contacto litológico con la **Fm. Aurora**. Los sedimentos han sido interpretados como de cuenca profunda, y están compuestos por calizas de estratos medianos a gruesos con color de intemperismo gris claro, y un color gris oscuro en fractura fresca. Muestra intercalaciones de estratos delgados a medianos de lutita arcillosa, con lentes y bandas de pedernal negro paralelo a la estratificación. Estos tienen un promedio de 5-10 cm de espesor (Fig. 12).

El límite estratigráfico inferior es concordante y gradual con la **Fm. Aurora**, al igual que su límite superior con la **Fm. Agua Nueva**; la **Fm. Cuesta del Cura** tiene un espesor de aproximadamente 70 m en esta zona. Concordantemente se tiene hacia el límite superior el contacto gradual con la **Fm. Agua Nueva**, de una edad Cenomaniano Superior-Turoniano (López-Ramos, 1982) y un espesor en el área de aproximadamente 65 m, su límite superior subyace concordantemente a la **Fm. San Felipe**.

La **Fm. Agua Nueva** presenta sedimentos de plataforma abierta, que consisten de estratos calcáreo-arcillosos, color gris oscuro en fractura fresca de espesor delgado a laminar y de lutitas carbonosas, así como también lutitas arcillosas laminares y estratos delgados de margas (Fig. 13). Debido a sus características, la **Fm. Agua Nueva** es menos resistente a la erosión, por lo que geomorfológicamente forma depresiones. El contacto es gradual y concordante con la **Fm. San Felipe**, con una

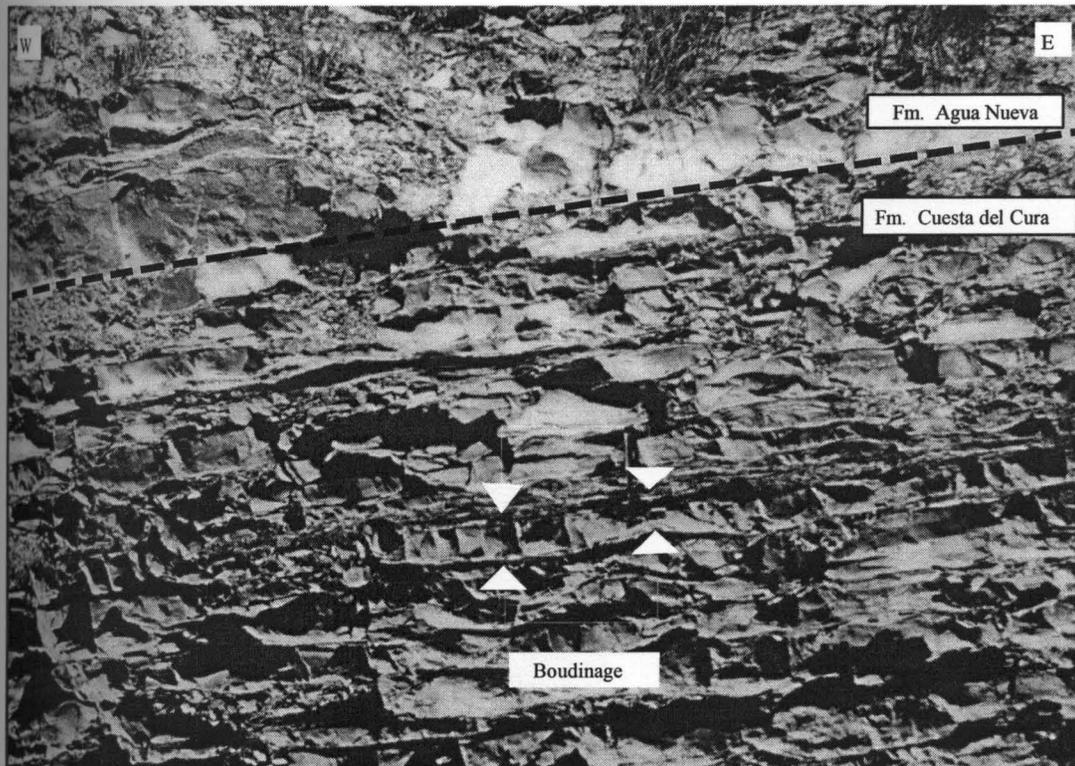


Fig. 12. Fm. Cuesta del Cura. Obsérvese las intercalaciones de estratos de calizas de espesores medianos y estratos de caliza arcillosa, ambos presentan boudinage. Contacto entre la Fm. Cuesta del Cura (parte inferior) y la Fm. Agua Nueva (parte superior). Sierra de Las Mitras, vista al Norte. El espesor del afloramiento es de aprox. 2 m.

edad que va del Coniaciano al Santoniano.

La Fm. San Felipe presenta una alternancia de sedimentos de calizas arcillo-margosas, compactas, delgadas con intercalación de horizontes lutíticos y bentoníticos, siendo sedimentos de plataforma abierta al igual que la Fm. Agua Nueva, sólo que con aporte de más terrígenos que cálcicos (López-Ramos, 1982)(Fig. 14). En el área de estudio esta formación presenta un espesor mínimo de 45-50 m, aunque se calcula que su espesor real alcanza hasta los 270-300 m, no aflorando su contacto superior con la Fm. Méndez. Además, presenta un marcado fracturamiento, el cual es rellenado por calcita. En el área es característica la presencia de horizontes silicificados y de bentonita, ambos con espesores promedio

de 10-30 cm.

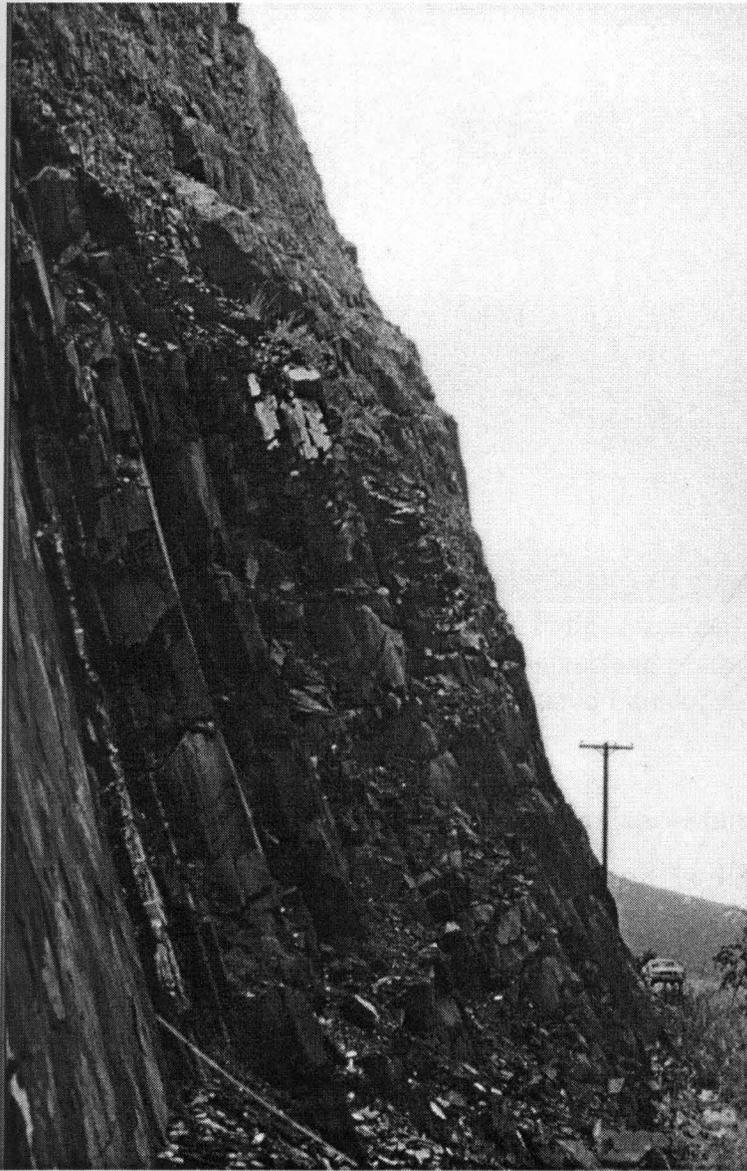


Fig. 13. Fm. Agua Nueva. Presenta estratos calcáreo-arcillosos y lutitas carbonosas de espesores delgado a laminar. Sierra de Las Mitras. Vista al Norte.

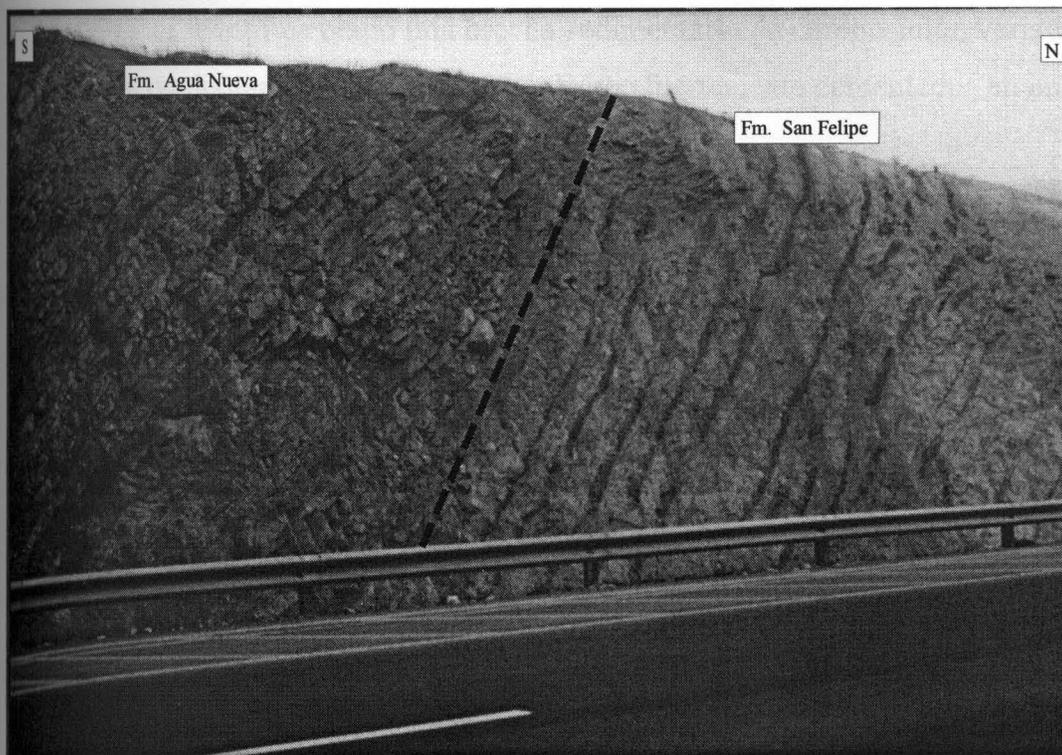


Fig. 14. Contacto Fm. Agua Nueva (izquierda) y Fm. San Felipe (derecha). Los estratos se vuelven más arcillosos y reducen sus espesores, apareciendo estratos de bentonita y caliza silicificada. Autopista de cuota Saltillo-Nuevo Laredo, vista al Oeste.

El contacto inferior de la **Fm. Méndez** (Campaniano-Maastrichtiano) es transicional y no aflora, pero se supone concordante con la Fm. San Felipe (Hernández Padilla, 1995). Esta consiste de sedimentos de mar somero con un gran aporte de material terrígeno (lutitas pobremente estratificadas), así como margas de espesor delgado a mediano, con un gran fracturamiento en la parte superior de la formación y produciendo así estructuras aciculares en forma de agujas conocidas regionalmente como “almendrillas” (Fig. 15). El espesor aflorante en el área de estudio es de 60 m, pero en el Cerro de la Silla llega a alcanzar hasta 300 m.

En forma discordante a los sedimentos del Mesozoico, en el área se localizan depósitos de piedemonte en las laderas de los altos topográficos, los cuales son datados de edad Terciaria; estudios de la Comisión Federal de Electricidad

(C.F.E.,1991) los identifica como una brecha sedimentaria de composición variada en sus clastos, predominando los de origen calcáreo fuertemente cementados en una matriz calcáreo-arcillosa.



Fig. 15. Transición Fm. San Felipe-Méndez. Desaparecen los estratos de bentonita y caliza silicificada, observándose estratos laminares de lutitas calcáreas y lutitas arcillosas. Sinclinal del Penal. Vista al Norte.

El espesor de estos sedimentos varía en los diferentes puntos donde se localiza, siendo del orden de 0.5-2.5 m en la mayoría de los casos, aunque se reportan espesores de hasta 15 m en la cara Norte del Cerro El Topo (C.F.E., 1991)(Fig. 16).

El resto de los sedimentos en el área de estudio lo conforman depósitos del Cuaternario, encontrándose más ampliamente distribuidos en toda la planicie. Estos consisten de clastos de origen aluvial de composición calcárea, medianamente cementados a sueltos, con una matriz arcillo-arenosa la cual actúa como cementante

en gran parte de los casos.



Fig. 16. Sedimentos de piedemonte, reportados como brecha sedimentaria (C.F.E., 1991), de espesor variable (0.5-2.5 m) y composición predominantemente calcárea. Cerro El Topo. Vista al Este.

Estos sedimentos cuaternarios, en conjunto con la zona intemperizada de la lutita de la Fm. Méndez, llegan a conformar el acuífero de gravas o somero que se extiende ampliamente en todo el valle de Monterrey, debido a la buena porosidad que presentan los sedimentos y a la posición que mantienen con respecto de los altos topográficos que los rodean (Alva Niño, 1995, Hernández Padilla, 1995).

Como se puede observar en este capítulo donde se detallan los aspectos geológicos, varios son los puntos que deben resaltarse por su importancia e influencia en el siguiente capítulo dedicado a la hidrogeología:

Primero, el tipo de rocas presentes en la zona de estudio, ya que estas son en gran parte de composición calcárea, lo cual permite, bajo las circunstancias tectónicas ya descritas, funcionar como rocas almacenadoras de agua.

Segundo, la posición estructural que poseen las rocas de composición calcárea unas con respecto de otras, donde el sinclinal ocupa la parte central del área de estudio y se encuentra cubierto por un paquete relativamente grueso de sedimentos aluviales, el cual es rodeado por sinclinales.

Tercero, el diaclasamiento presente en las rocas y la dirección de este, el cual es de tipo ac y bc, permite la rápida infiltración de las precipitaciones en las partes topográficas altas y su posterior migración a las partes centrales del sinclinal, mientras que en el valle este fenómeno es favorecido por la alta porosidad y permeabilidad del relleno aluvial.

Cuarto, la misma litología de las diferentes formaciones permite de manera general, suponer al menos la diferenciación de dos tipos diferentes de acuíferos, el profundo o de calizas y el somero o libre, ya que se tienen las condiciones propicias para la formación de estos acuíferos, aunque estos detalles se verán con mas profundidad en el siguiente capítulo.

CAPITULO 5

HIDROGEOLOGÍA

5.1 Introducción

La región Noreste del país se caracteriza por poseer un clima semi-árido extremo, con temperaturas superiores a los 40°C en verano y hasta -12°C en invierno. Así también los periodos de lluvia son relativamente cortos en relación con las épocas de sequía, por lo que los recursos hidrológicos se ven grandemente impactados por éstos fenómenos que afectan notoriamente la recarga de los acuíferos (Alva *et al.*, 1996). El requerimiento de agua actual en la región de Monterrey es de aprox. 17 m³/s para satisfacer la demanda de uso doméstico e industrial. Sin embargo, con las fuentes superficiales (Sistema Santiago II, el Sistema Regional Linares-Monterrey y más recientemente el Sistema Regional El Cuchillo) y subterráneas (Sistema Santa Catarina, Sistema Santiago I, Sistema Mina y el campo Monterrey/Topo Chico) con que cuenta el sistema de suministro al área metropolitana de Monterrey, se surten aprox. 10 m³/s por lo que se tiene un déficit de 7 m³/s (De León *et al.*, 1994).

La zona metropolitana de Monterrey se encuentra asentada sobre dos diferentes tipos de acuíferos, el somero y el profundo. El acuífero somero se comporta de manera libre y se localiza en los sedimentos del Cuaternario que se tienen en todo el valle de Monterrey, mientras que el acuífero profundo se encuentra en las formaciones calcáreas Cupido/Aurora del Cretácico Inferior Tardío. Estas formaciones calcáreas presentan una conductividad hidráulica y transmisibilidad alta, debido principalmente a que el agua que circula a través de éstas calizas lo hace por

oquedades kársticas y por zonas de fracturamiento y fallamiento. Cabe hacer la aclaración que entre estas dos formaciones de espesores muy potentes existe la Fm. La Peña, la cual, debido a su espesor promedio de 40-60 m, hidrogeológicamente no afecta demasiado a las dos formaciones calcáreas.

Tanto el acuífero profundo como el somero se hallan separados entre sí por las formaciones calcáreo-arcillosas del Cretácico Superior (Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe y la roca sana de la lutita Méndez), las cuales actúan como confinante superior para el acuífero profundo y confinante inferior para el acuífero somero (anexo 2). Sin embargo, la dirección de crecimiento poblacional ha provocado que los asentamientos habitacionales se realicen cerca o sobre las instalaciones de captación de agua del acuífero somero, por lo que la superficie de recarga de este acuífero se ve drásticamente reducida. Además, la proliferación de tiraderos clandestinos de desechos sólidos ha provocado que la calidad química del acuífero se vea deteriorada sensiblemente.

El presente estudio está basado en el análisis de 14 pozos que explotan el acuífero somero, ubicados en la región Noroeste del área metropolitana de Monterrey, en el valle formado entre el Cerro del Topo y la Sierra Las Mitras (Fig. 17), en el que se desarrolla una de las principales direcciones de flujo de agua subterránea que alimentan el área metropolitana de Monterrey (Murillo Martínez, 1986; Hernández Padilla, 1995).

El acuífero somero en el valle de Monterrey está constituido principalmente por paquetes de gravas de composición calcárea y limo-arcillosa en su gran mayoría, así como también de la parte superior de la Fm. Méndez, la cual se encuentra en esta región intensamente intemperizada y fracturada. Tenemos así que el acuífero somero puede actuar como acuífero de grietas y acuífero de gravas, variando su permeabilidad en función inversa de la cantidad de material fino que se encuentre en

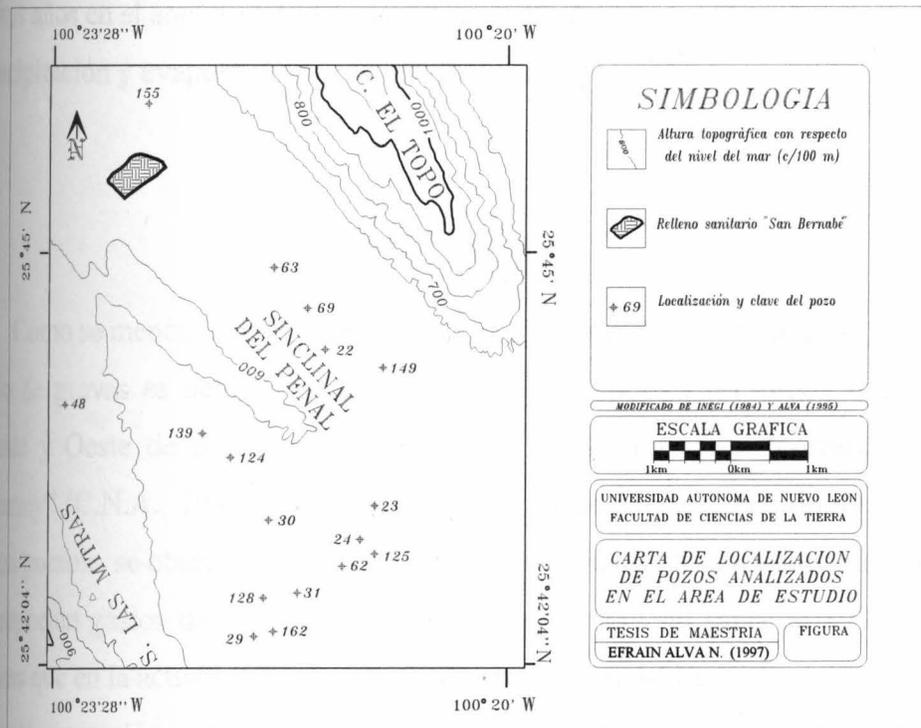
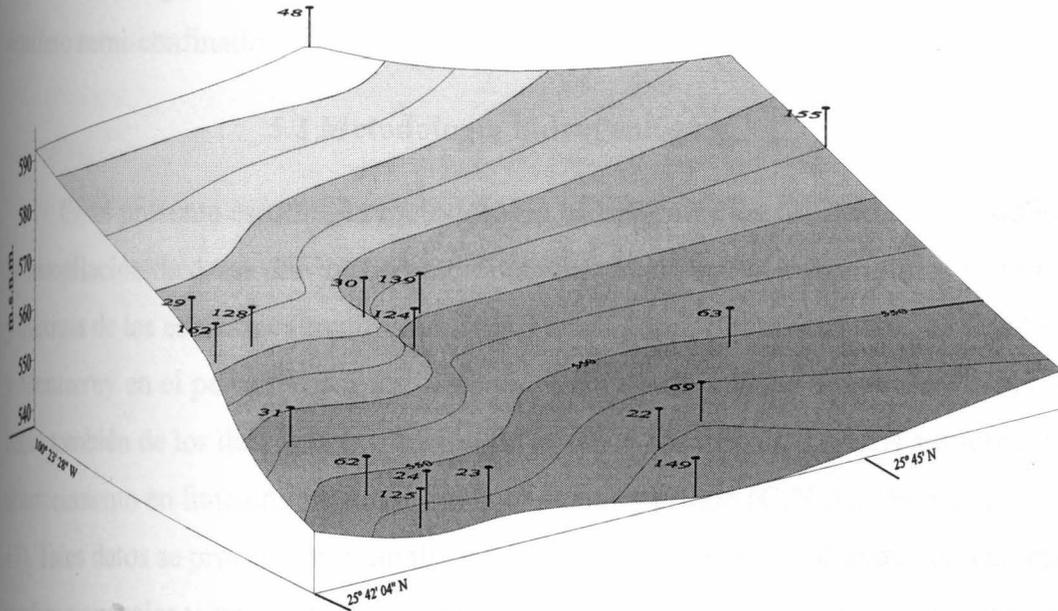


Fig. 17. Carta de localización de pozos analizados en el área de estudio y desnivel topográfico existente entre ellos.

la matriz, por lo que también en algunas ocasiones puede actuar como acuífero libre si no existe ningún lente de arcillas, o si existen tales lentes de arcillas o limos, acuífero semi-confinado.

5.2 Metodología hidrogeológica

En el presente estudio, la metodología hidrogeológica utilizada consistió en la recopilación de datos diarios de precipitación, evaporación, temperaturas mínima y máxima de las estaciones meteorológicas Topo Chico, Santa Catarina, El Canadá y Monterrey en el período comprendido entre Enero de 1992 y Mayo de 1995, así como también de los datos de extracción de agua de los distintos pozos someros de abastecimiento en funcionamiento durante el mismo período (C.N.A., 1995)(ver Fig. 17). Tales datos se procesaron y analizaron para de esta manera obtener los valores medios mensuales y así poder elaborar las cartas de isohipsas de extracción para los distintos años en el área de estudio, así como también de las gráficas para los valores de precipitación y evaporación para las distintas estaciones.

5.3 Piezometría

Como se menciona con anterioridad, la mayor parte de la recarga del acuífero libre o de gravas es debida, en gran parte, a los aportes recibidos de la región Suroeste y Oeste de la zona de estudio, en el denominado "corredor Saltillo-Monterrey" (C.N.A., 1995). De los datos reportados para extracción de las fuentes de agua potable, se observa un claro decremento en los gastos, ya que los anteriores años reportan gastos de 103-106 l/s en promedio mensual (año de 1988 y 1992), mientras que en la actualidad los gastos no rebasan los 48 l/s. Esta reducción en los gastos de extracción es motivada por distintas causas. La principal es la reducción en las precipitaciones en la zona de recarga del acuífero, ya que en los últimos años

la región Norte y Noreste del país ha estado bajo los efectos de una intensa y prolongada sequía. Este fenómeno afecta de manera directa la recarga y el coeficiente de almacenamiento del acuífero profundo (o de calizas) y al acuífero somero (o de gravas) con mayor intensidad, ya que está, de manera directa, influenciado por las variaciones en los factores climáticos, especialmente de la precipitación y la evaporación (Werner, 1996).

Otro de los factores que determinan la disminución en los gastos de extracción es el continuo crecimiento poblacional que registra el área metropolitana de Monterrey, ya que lo anterior provoca un aumento en la demanda de agua y una disminución en el área de recarga del acuífero somero, por lo que mientras la oferta de agua sigue siendo la misma o menor en algunos casos, la demanda continúa en crecimiento, por lo que los acuíferos son sometidos a una sobre-explotación, con los graves problemas que lo anterior acarrea para la hidrología de la región.

Aunado a esto, como consecuencia del aumento poblacional del área metropolitana de Monterrey, en la zona de estudio han proliferado los tiraderos clandestinos de basura, algunos asentados sobre los terrenos de antiguas granjas avícolas, por lo que la contaminación al acuífero libre o de gravas es muy grande, lo que motiva el cierre o clausura de pozos por contaminación de estos. Además, debido a falta de mantenimiento en algunos equipos de extracción se tienen fallas mecánicas en las bombas, provocando así la reducción en el suministro de agua a la población.

Se realizó la carta piezométrica y de direcciones de flujo en el área de estudio, tanto en bloque como en planta con los únicos datos proporcionados por C.N.A., consistentes en lecturas de niveles dinámicos para 17 pozos someros que se encontraban trabajando en el período de Enero de 1988 a Septiembre de 1995, así como también los datos de extracción de los mismos pozos (en l/s).

A continuación se presentan los resultados del análisis de los datos antes mencionados, con la debida aclaración de que los datos presentados son cifras promedio anuales, tanto de niveles dinámicos como de gastos de las fuentes, debido a que la lectura de los niveles estáticos no fué posible obtenerla, ya que los pozos se encontraban en operación continua.

La Fig. 18 muestra la piezometría en el año de 1988, durante el cual se extrajeron 103 l/s , resultando el pozo No. 29 (Burócratas Federales) con el nivel dinámico más bajo, con un promedio de 24.07 m bajo la superficie topográfica.

El nivel dinámico se mantuvo en general en los 497.83 m.s.n.m. (aprox. 8.76 m bajo la superficie); el pozo No. 162 (Burócratas del Estado II) registró para ese año el nivel dinámico más profundo, con 24.07 m bajo la superficie. La dirección de flujo es proveniente principalmente de la Sierra de Las Mitras con dirección Oeste - Este, siendo la parte Sur del área de estudio la que presenta la recarga más notable.

Enseguida se hace una descripción del comportamiento piezométrico del acuífero somero, respecto de los niveles dinámicos, en el área de estudio de manera detallada, presentándose solo en forma gráfica los resultados de los años 1988 y 1995, para de esta manera comparar las variaciones efectuadas en 8 años. Los gráficos correspondientes a los años de 1989 a 1994 se encuentran en los anexos 2A al 2F.

Para el año de 1989, la extracción del acuífero somero fue de 75 l/s en promedio, resultando ser el pozo No. 29 (Burócratas Federales) el que más gasto aportó con 18 l/s. El nivel dinámico fué aprox. a los 498.54 m.s.n.m. (9.48 m bajo el nivel topográfico). El pozo No. 124 (Santa Cecilia) fue el que presentó el desnivel más marcado con 26.25 m bajo el nivel de la calle.

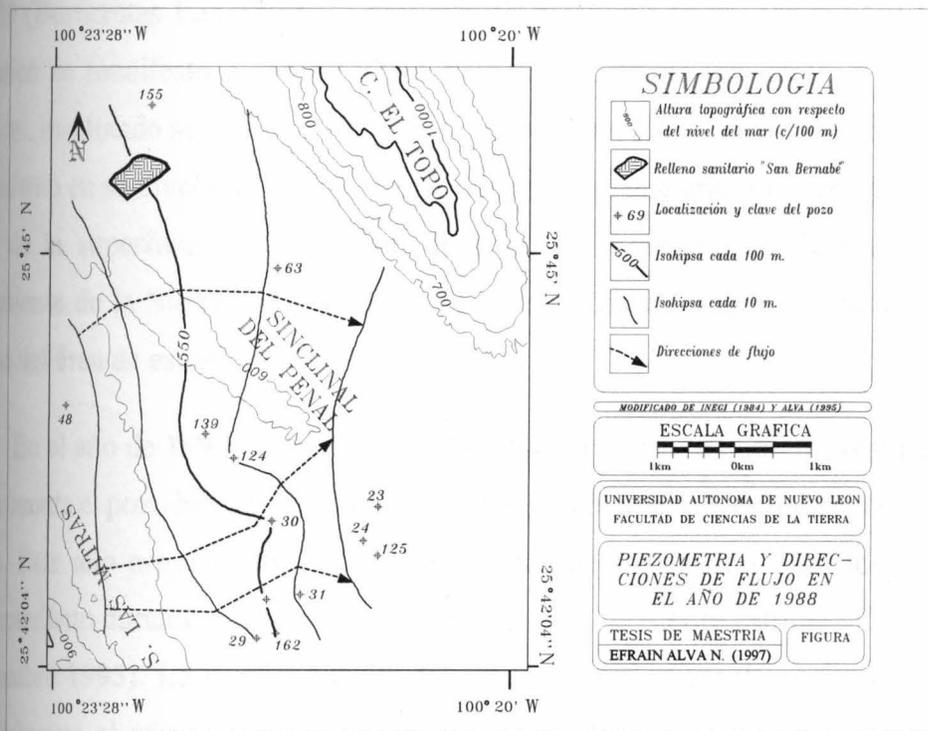
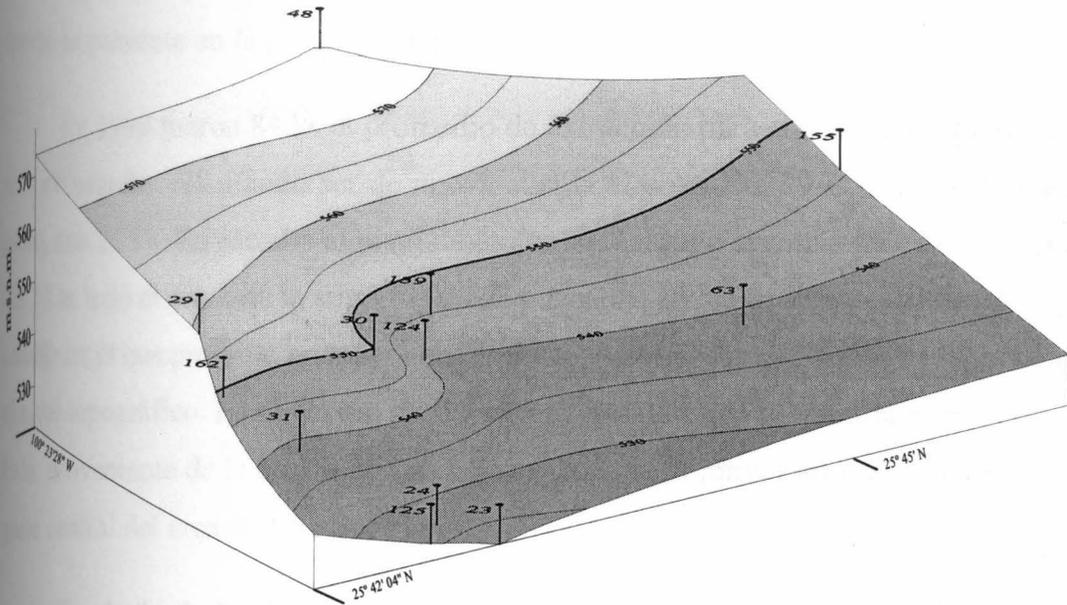


Fig. 18. Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1988. El nivel dinámico se encuentra 8.76 m bajo la superficie.

Semejante al año de 1988, la dirección de flujo del año de 1989 fue de Oeste a Este, viniendo principalmente el aporte de la Sierra de Las Mitras, y el mayor aporte se presenta en la parte Sur del área de estudio.

En 1990 fueron 84 l/s el promedio de extracción para el acuífero somero del área de estudio, resultando ser de nueva cuenta el pozo No. 29 el que aportó mas gasto, con 21 l/s. En ese año el nivel dinámico se mantuvo aprox. a 463.74 m.s.n.m. (25.33 m bajo el nivel de la superficie). El pozo No. 162 (Burócratas del Estado II) resultó ser el que presentó un mayor abatimiento, manifestándose en los 31.67 m bajo el nivel topográfico. La dirección de flujo en el año de 1990 se mantiene de Oeste a Este, proveniente de la Sierra de Las Mitras, aunque el mayor aporte se tiene en la parte central del área de estudio.

En el año de 1991 se extrajeron 104 l/s del acuífero somero, siendo el pozo No. 29 (Burócratas Federales) el que mayor gasto presentó, con 20 l/s. El nivel dinámico se manifestó a los 19.07 m bajo la superficie, es decir, a los 469.99 m.s.n.m., resultando ser el pozo No. 155 (San Bernabé III) el que presenta un mayor abatimiento en su nivel dinámico, manifestándose en este año a los 26.33 m bajo el nivel de la superficie. La dirección de flujo del acuífero va de Oeste a Este proveniente de la Sierra de Las Mitras, mostrándose el mayor aporte en la zona central del área de estudio.

En el año de 1992 se obtuvieron 106 l/s del acuífero somero, resultando de nueva cuenta el pozo No. 29 (Burócratas Federales) el que mayor gasto presentó, con 19 l/s. Este año presenta los valores más altos de extracción para los pozos de abastecimiento durante el período que comprende el presente estudio (Enero 1988-Septiembre 1995). La manifestación del nivel dinámico resulta ser un poco mas profunda que el año precedente, registrándose a los 19.22 m bajo la superficie (469.84 m.s.n.m.). El pozo No. 128 (Antiguo camino a Villa de García) muestra el

nivel dinámico más profundo, con 29.92 m bajo la superficie. La dirección de flujo continúa proviniendo de la Sierra de Las Mitras en dirección Oeste - Este, mostrando dos zonas de mayor aporte, el principal en la zona centro del área de estudio y otra menor en la porción Sur de la misma.

Durante el año de 1993, se extrajeron 91 l/s del acuífero somero, observándose un marcado decrecimiento en el volumen de extracción con respecto del período anterior, registrando nuevamente el pozo No. 29 (Burócratas Federales) el mayor gasto, con 19 l/s.

El nivel dinámico se registra a los 16.63 m bajo la superficie (505.70 m.s.n.m.), notándose un incremento en el nivel dinámico con respecto del registrado el año de 1992. El pozo No. 162 (Burócratas del Estado II) es el que registra un mayor descenso en su nivel dinámico, encontrándose en ese año a los 27.78 m bajo la superficie.

La Sierra de Las Mitras continua siendo la principal zona de recarga para el acuífero somero en la zona de estudio, presentando las direcciones de flujo un comportamiento de Oeste - Este, registrándose en la porción Sur la mayor cantidad de aporte al acuífero.

Para el año de 1994 los gastos de extracción se ven reducidos a 62 l/s, lo que significa 29 l/s menos que el año anterior, mostrando en general todos los pozos una drástica disminución en sus gastos de extracción, siendo los pozos Nos. 31 (Lincoln I) y 155 (San Bernabé III) los que presentan el mayor gasto, con apenas 7 l/s. En el período antes mencionado el nivel dinámico se registra a los 19.50 m bajo la superficie, es decir, a los 508.56 m.s.n.m., notándose una disminución en el nivel con respecto del año anterior de 2.87 m, mostrando el pozo No. 23 (V. Morelos) el nivel dinámico más bajo con 18.87 m bajo la superficie.

La dirección de flujo en el año de 1994 continua siendo de Oeste a Este, proveniente la mayor parte de la Sierra de Las Mitras, observándose que la mayor cantidad de aporte se registra en la región Sur del área de estudio.

Finalmente, los registros pertenecientes del año de 1995 (hasta el mes de septiembre) muestran un decremento notable en todos los niveles (figura 19), teniéndose un gasto de extracción general de 48 l/s, siendo el pozo No. 29 (Burócratas Federales) el que presenta un gasto mayor con 9 l/s. El nivel dinámico se encuentra a los 13.49 m bajo la superficie (544.14 m.s.n.m.), registrando el pozo No. 162 (Burócratas del Estado) el mayor abatimiento en su nivel dinámico (18.89 m bajo la superficie).

En este período, se observan dos direcciones de flujo preferentes en el área de estudio, la correspondiente de la Sierra de Las Mitras y otra proveniente del Cerro del Topo con dirección NNE-SSW. En general, en el período analizado para las fuentes de extracción las direcciones de flujo provienen de la Sierra de Las Mitras con una dirección Oeste-Este en su mayoría, con un promedio de extracción en el acuífero somero de 5.59 l/s, produciendo que el nivel dinámico se registrara en promedio a los 16.71 m de profundidad.

Como se puede observar, en resumen, los niveles dinámicos se presentan en promedio a los 16.4 m de profundidad, mostrándose el nivel dinámico más somero en el año de 1988 (8.7 m bajo la superficie), mientras que el año de 1990 presentó el nivel dinámico más profundo, a 25.3 m bajo la superficie.

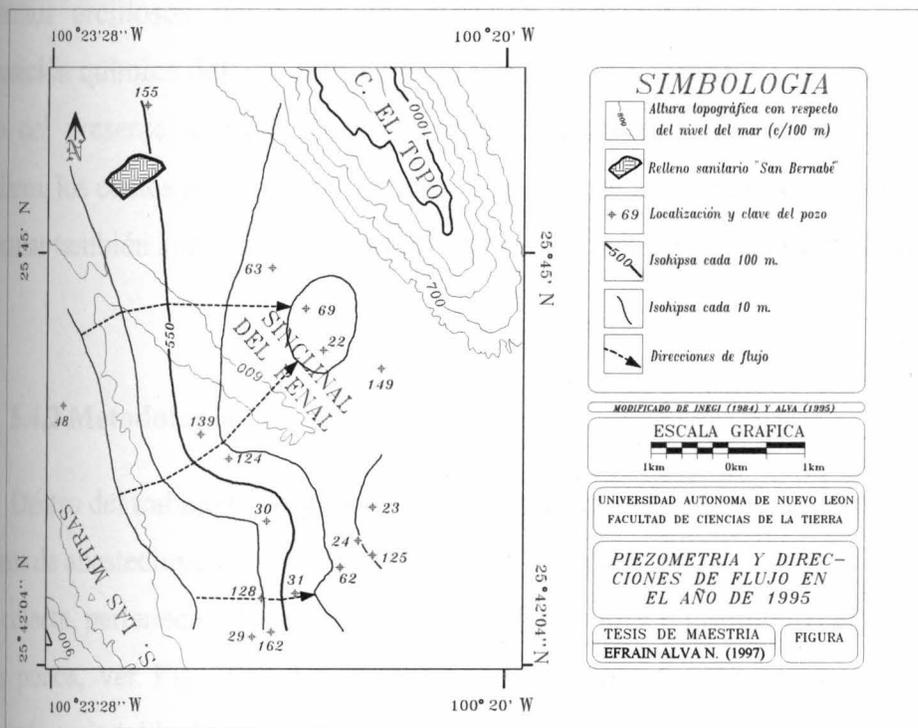
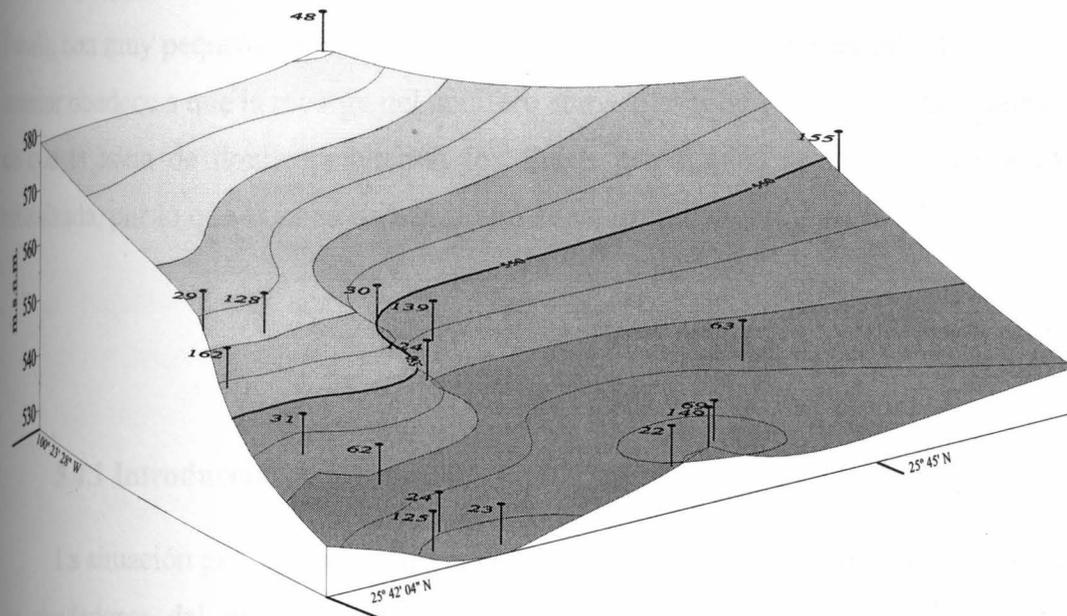


Fig. 19. Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1995. El nivel dinámico se registró a los 13.49 m de profundidad, hasta Septiembre de ese año.

Las direcciones de flujo se mantienen preferentemente en una dirección de Oeste a Este, es decir, de la Sierra de Las Mitras hacia el valle central (Sinclinal del Penal), con muy pequeñas aportaciones de la parte Noroeste del área de estudio. Lo anterior obedece a que la recarga del acuífero somero es muy local y rápida, además de que la zona de donde provienen los flujos principales se encuentra menos urbanizada, por lo que la zona de captación se ve grandemente favorecida.

5.4 Hidrogeoquímica

5.4.1 Introducción

La situación geológica y la diversa litología de los sedimentos existentes en los alrededores del área de estudio (desde las evaporitas del Jurásico hasta sedimentos arcillosos del Cretácico Tardío) determinan en gran medida la composición química del acuífero somero (Hernández, 1995). El acuífero somero, objeto del presente estudio, circula preferentemente a través de sedimentos granulares, los cuales poseen una composición de gravas, arenas y arcillas, además de circular también sobre la zona fracturada e intemperizada de la Fm. Méndez.

5.4.2 Metodología

Dentro del trabajo hidrogeoquímico, se realizó una campaña de muestreo en 14 pozos de abastecimiento que se encontraban en operación al momento de realizar dicha colecta, perteneciendo todos ellos al acuífero somero granular (para ubicación de los pozos, ver Fig. 17). La ubicación de los pozos por calle y colonia es presentada en la tabla 1 (ver anexo).

En el campo fueron determinadas, al momento de la recolección de las muestras de agua, las características físicas de Conductividad Eléctrica, Potencial de Hidrógeno (pH) y Temperatura de la muestra (°C), (Fig. 20, tabla 2). Posteriormente, las muestras (aprox. 6 litros de cada una) fueron refrigeradas para evitar reacciones de los componentes y transportadas al laboratorio de la Fac. de Ciencias de la Tierra / U.A.N.L. para su procesamiento respectivo. Los parámetros determinados fueron:

Método volumétrico: Dureza Parcial y Total, con un límite de detección (LD) de 0.8 mg/l y 2 mg/l de CaCO_3 , respectivamente; Alcalinidad total, con un LD de 1 mg/l como CaCO_3 y Cloruros, con un LD de 0.5 mg/l.

Método de emisión atómica: Sodio y Potasio, con un LD de 0.01 mg/l.

Método gravimétrico: Sulfatos, con un LD de 3 mg/l como SO_4 , Sólidos Totales y Sólidos Disueltos con un LD de 3 mg/l.

Método colorimétrico semicuantitativo: Nitrato, con un LD de ± 10 mg/l.

Los resultados de los aniones y cationes se presentan en la tabla 3, tanto en mg/l y meq y los porcentajes de los iones en la tabla 4 (ver anexo).

5.4.3 Descripción de parámetros analizados

Con los resultados del laboratorio se elaboraron cartas de isopleas tanto para cationes (Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio) como para aniones (Bicarbonato, Sulfato, Cloruros y Nitratos), elaborándose también una carta para la Conductividad Eléctrica y otra para los Sólidos Totales Disueltos. La descripción de éstos parámetros y la discusión sobre el posible origen de las concentraciones en el área de estudio es discutida a continuación. Al igual que durante la realización de las cartas de piezometría, las cartas de isopleas se realizaron por interpolación, las

cuales en algunos puntos la interpolación de punto a punto es muy lejana (en algunos casos de 2-3 km), lo que podría dar margen a error, por lo que en esos casos las isopletas deben tomarse con la reserva propia del caso.

5.4.3.1 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es uno de los parámetros físicos del agua que nos permite conocer la cantidad de sales en solución que contiene, ya que el agua químicamente pura no permite la conducción de la electricidad. De ésta manera, una muestra de agua con valores altos en conductividad indica valores mayores de sólidos en suspensión.

En el área de estudio los valores más bajos de conductividad se registran hacia la parte Sur del área de estudio (Fig. 21), con valores que oscilan entre los 650-750 $\mu\text{mhos/cm}$, indicando y reafirmando junto con la piezometría anteriormente discutida, que la recarga del acuífero somero proviene preferentemente de la Sierra de Las Mitras, ya que el agua en esta zona todavía no alcanza a interaccionar con los sedimentos existentes en el área de recarga. Los valores mas altos de conductividad eléctrica se presentan en la parte Norte del área, con valores que oscilan entre los 1300 y 1570 $\mu\text{mhos/cm}$.

5.4.3.2 Calcio (Ca^{2+})

Dentro de los elementos alcalinotérreos, el Calcio es el elemento que más abunda, presentando una gran movilidad en las aguas subterráneas. En el área de estudio, la principal fuente de Calcio la constituyen las rocas carbonatadas y sulfatadas tanto del Jurásico como del Cretácico por los fenómenos de disolución de éstas rocas tanto en el área como en las zonas de recarga.

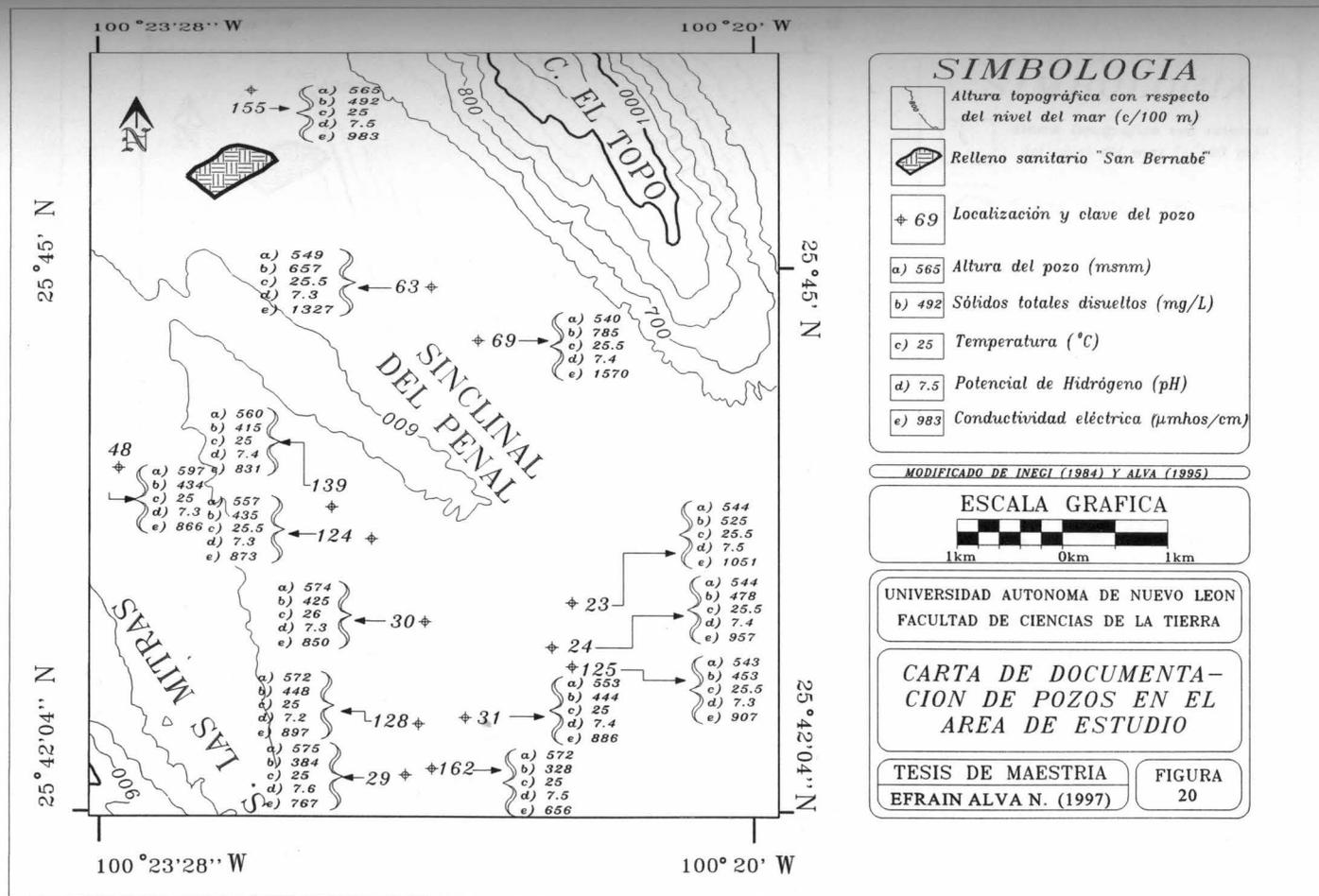


Fig. 20. Carta de documentación de pozos en el área de estudio.

Custodio & Llamas (1976) mencionan que las fuentes principales de Calcio en las aguas subterráneas provienen principalmente de la disolución de calizas, dolomitas, yesos y anhidritas, así como también de la concentración de agua de lluvia, mientras que Davis & De Wiest (1971) mencionan que valores normales de concentración son entre 10-100 mg/l de Ca^{2+} .

Las concentraciones mayores de Calcio en el área de estudio se encuentran en las laderas de los altos topográficos del área de estudio (Sierra de Las Mitras y Cerro El Topo) con valores que oscilan entre los 130 y los 170 mg/l de Ca^{2+} (Fig. 22), mientras que los valores menores se localizan hacia la parte Sureste de la zona de estudio.

5.4.3.3 Magnesio

En la Fig. 23 se observan la distribución de las isoplejas para el ión Magnesio, el cual junto con el ión Calcio determinan la dureza del agua. La principal fuente de éste ión lo constituyen las rocas dolomíticas, magnesitas e hidromagnesitas (Hem, 1985). Aunque se disuelve más lentamente, el Magnesio es más soluble que el Calcio y tiende a permanecer en solución cuando éste se precipita (Custodio & Llamas, 1976).

Davis & De Wiest (op. cit.) mencionan que las concentraciones más frecuentes de Magnesio fluctúan entre los 1-50 mg/l en el agua, mientras que en la zona de estudio se tienen concentraciones que van desde los 8.31 mg/l en el centro del área (pozo 30) hasta concentraciones 61.63 mg/l en el extremo Norte-Noreste del área (pozo 69). Al igual que las isoplejas del ión Calcio, la distribución del ión Magnesio presenta variaciones puntuales en la parte central del área estudiada, siendo posiblemente las causas algún tipo de alteración de tipo industrial o doméstica.

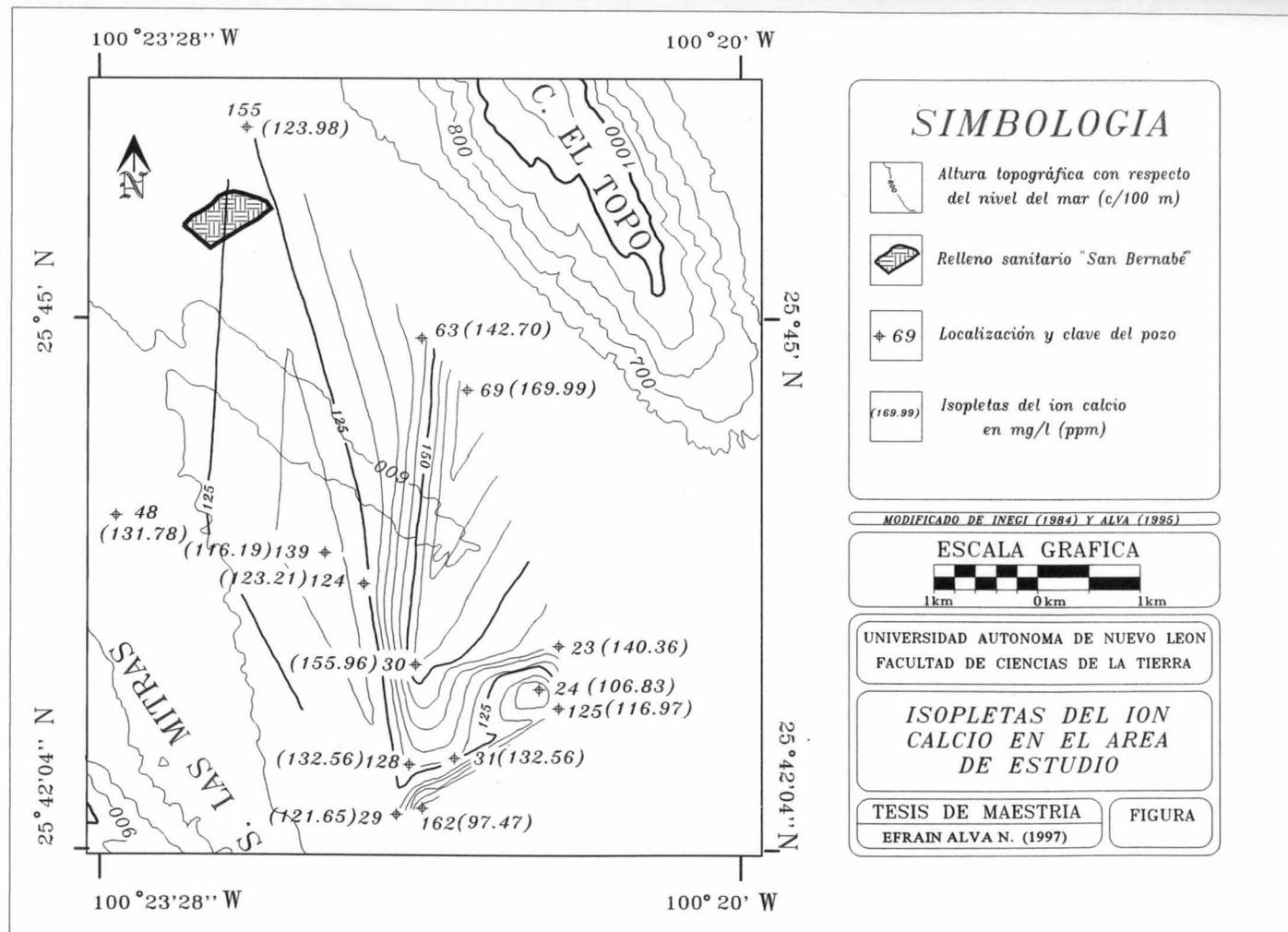


Fig. 22. Isopletas del ión Calcio en el área de estudio.

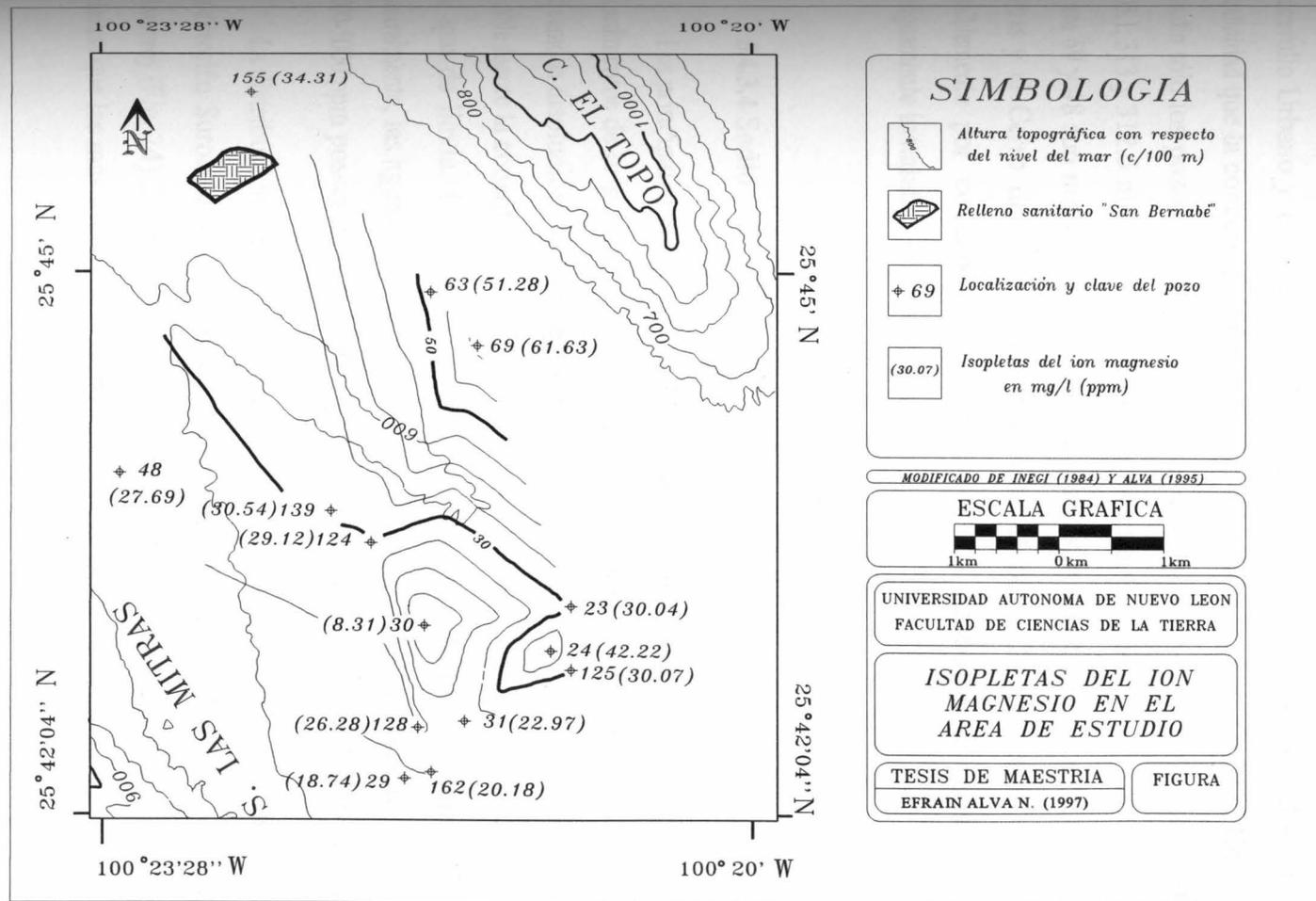


Fig. 23. Isopletas del ión Magnesio en el área de estudio.

En general, el aporte de Magnesio en el área de estudio es producido por depósitos lutíticos en los alrededores de la zona de recarga. La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE 1989), marca como un valor límite para alcalinidad que la concentración sea menor a los 300 mg/l de CaCO_3 . En el área de estudio sólo los pozos 24, 69 y 48 son los que rebasan tal norma, con valores de 305.1, 313 y 312.5 mg/l de CaCO_3 , respectivamente. Las concentraciones para los pozos 69 y 48 son normales debido a la cercanía que tienen con la Sierra de Las Mitras y el Cerro del Topo, mientras que el pozo 24 presenta valores altos, posiblemente por contaminación local, por los desechos de granjas avícolas antiguamente instaladas en esta zona.

5.4.3.4 Sodio

Los principales proveedores de Sodio para las aguas lo constituyen el lavado de sedimentos de origen marino y el cambio de bases de arcillas del mismo origen, así como la disolución de sales evaporitas, aunque esto último en forma local. Otra posible fuente la constituyen la contaminación urbana e industrial y la concentración del agua de lluvia. Este catión es muy soluble (Custodio & Llamas, op. cit.). Generalmente, las aguas con un contenido de Sólidos Totales Disueltos del orden de 1000-5000 ppm poseen más de 100 mg/l del ión Sodio (Davis & De Wiest, op. cit.).

La distribución del ión Sodio en el área de estudio presentan un incremento en dirección Suroeste a Noreste, es decir, de la Sierra de Las Mitras al valle de Monterrey (Fig. 24). La concentración mínima la presenta el pozo 48 con 8.4 mg/l, mientras que las más altas son reportadas para el pozo 69, con 57.85 mg/l.

5.4.3.5 Potasio

El aporte de Potasio a las aguas subterráneas es generalmente por el ataque que sufre la ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc.), y en forma local por la disolución de sales potásicas. Algunas cantidades son aportadas por concentración de agua de lluvia. En ocasiones procede de contaminación industrial, minera y agrícola (abonos), (Custodio & Llamas op. cit.). Normalmente, el agua subterránea de calidad potable contiene menos de 10 ppm, estando generalmente en los rangos de 1-5 ppm (mg/l) (Davis & De Wiest, op. cit.).

La distribución del ión Potasio es semejante a la del ión Sodio, observándose un incremento en la dirección Suroeste-Noreste, aunque los valores más pequeños se presentan en la parte Sur del área, registrando el pozo 128 valores de 0.55 mg/l, y los valores más altos los presenta el pozo 69 con 2.21 mg/l (Fig. 25). En general, los valores de potasio podrían deber su incremento hacia la región Noroeste del área de estudio ya que antiguamente ésta zona era utilizada como asentamiento para granjas avícolas y tiraderos clandestinos de basura. La SEDUE (op. cit.) no reporta valores límites o tolerancia en la concentración de los iones Sodio o Potasio en el agua.

5.4.3.6 Bicarbonato

La distribución de isopleas para el área de estudio (Fig. 26) revela que las mayores concentraciones de éste ión se registran en los pozos 48 (381.3 mg/l) y 69 (381.9 mg/l), lo cual es normal debido a su cercanía con los altos topográficos de composición predominantemente calcárea. El pozo 24 presenta una anomalía en su concentración, registrando valores inusualmente altos (372.2 mg/l), lo cual puede deberse a una contaminación de origen puntual. La SEDUE reporta como valores máximos de Dureza Total una concentración de 300 mg/l.

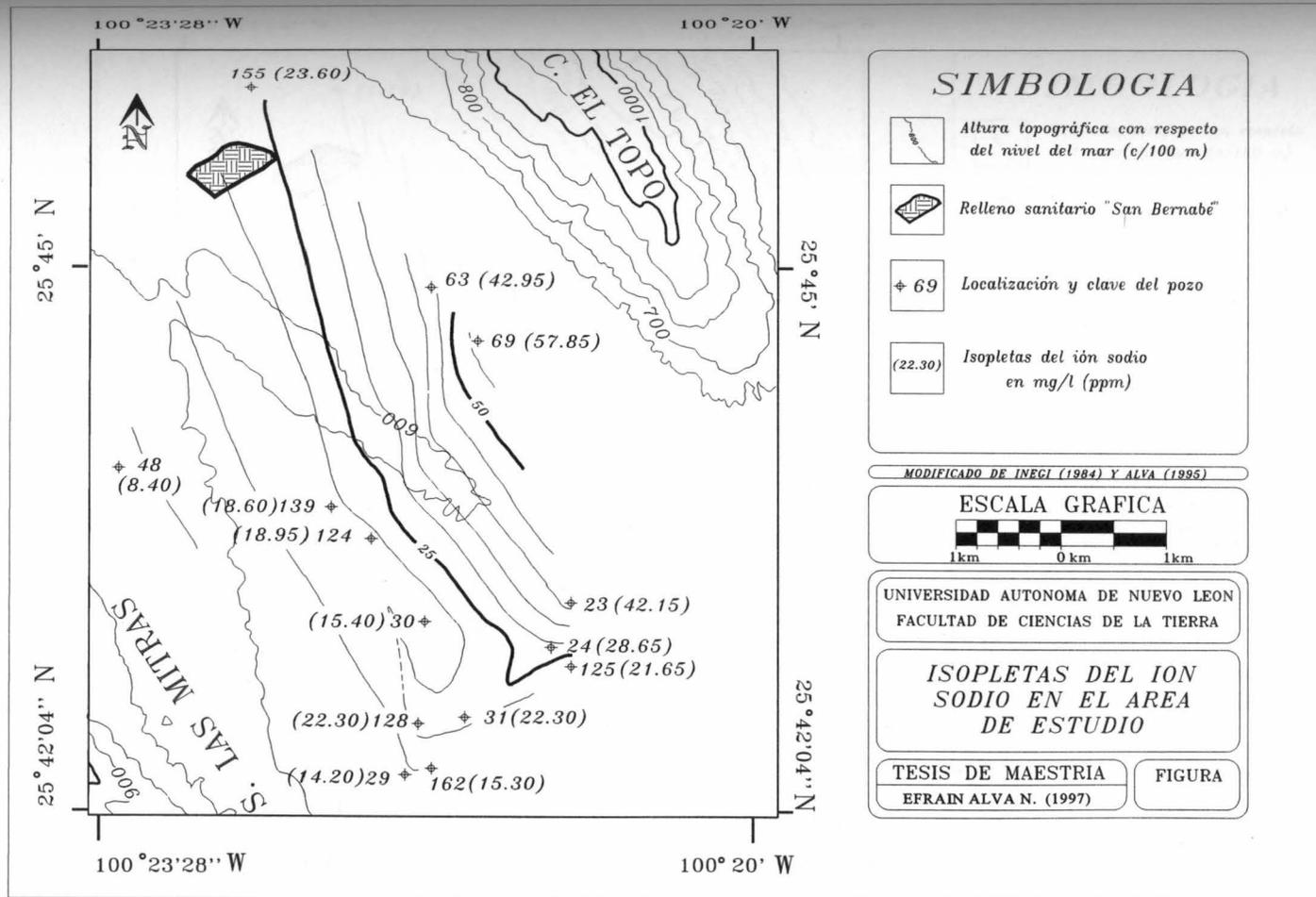


Fig. 24. Isopletas del ión Sodio en el área de estudio.

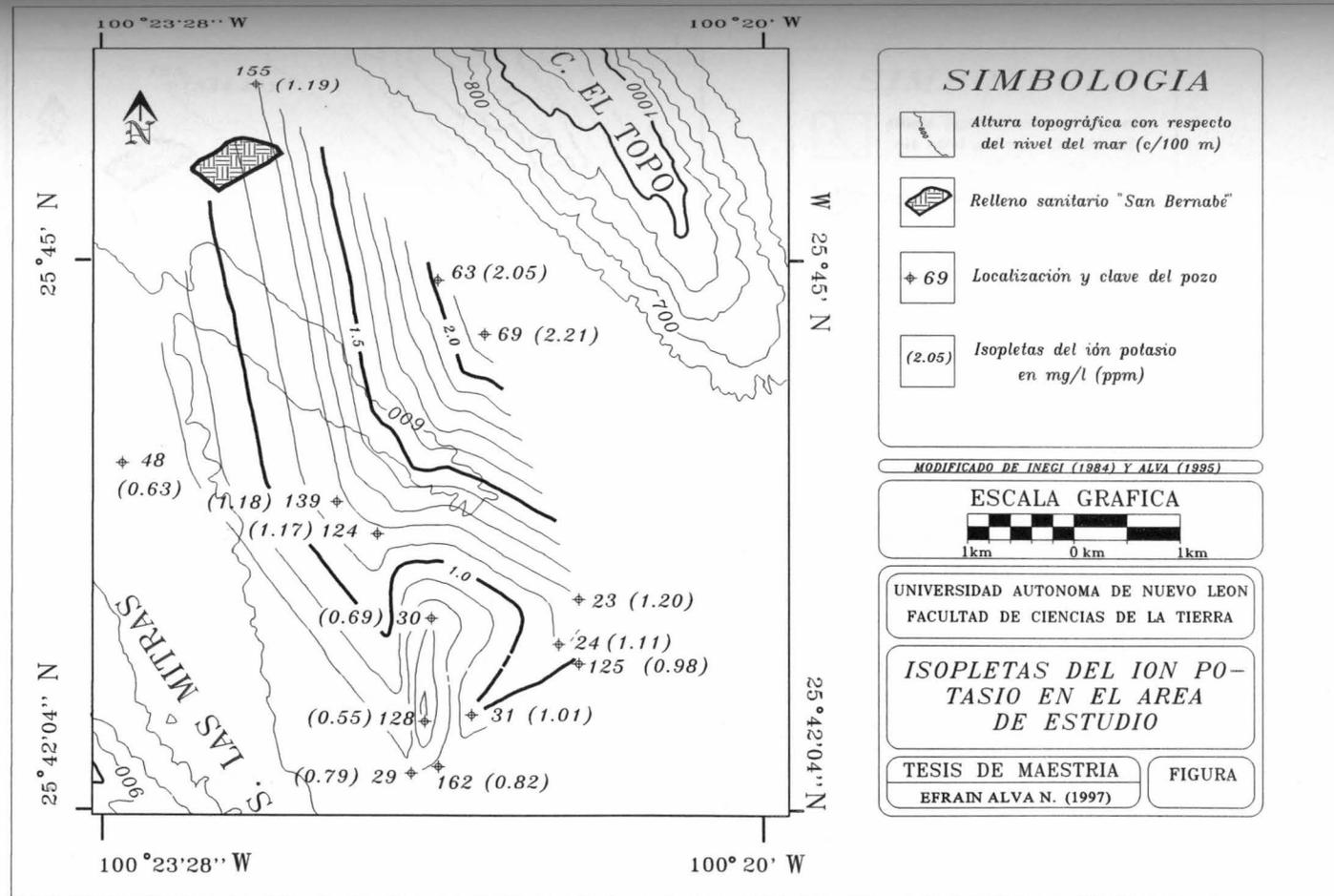


Fig. 25. Isopletas del ión Potasio en el área de estudio.

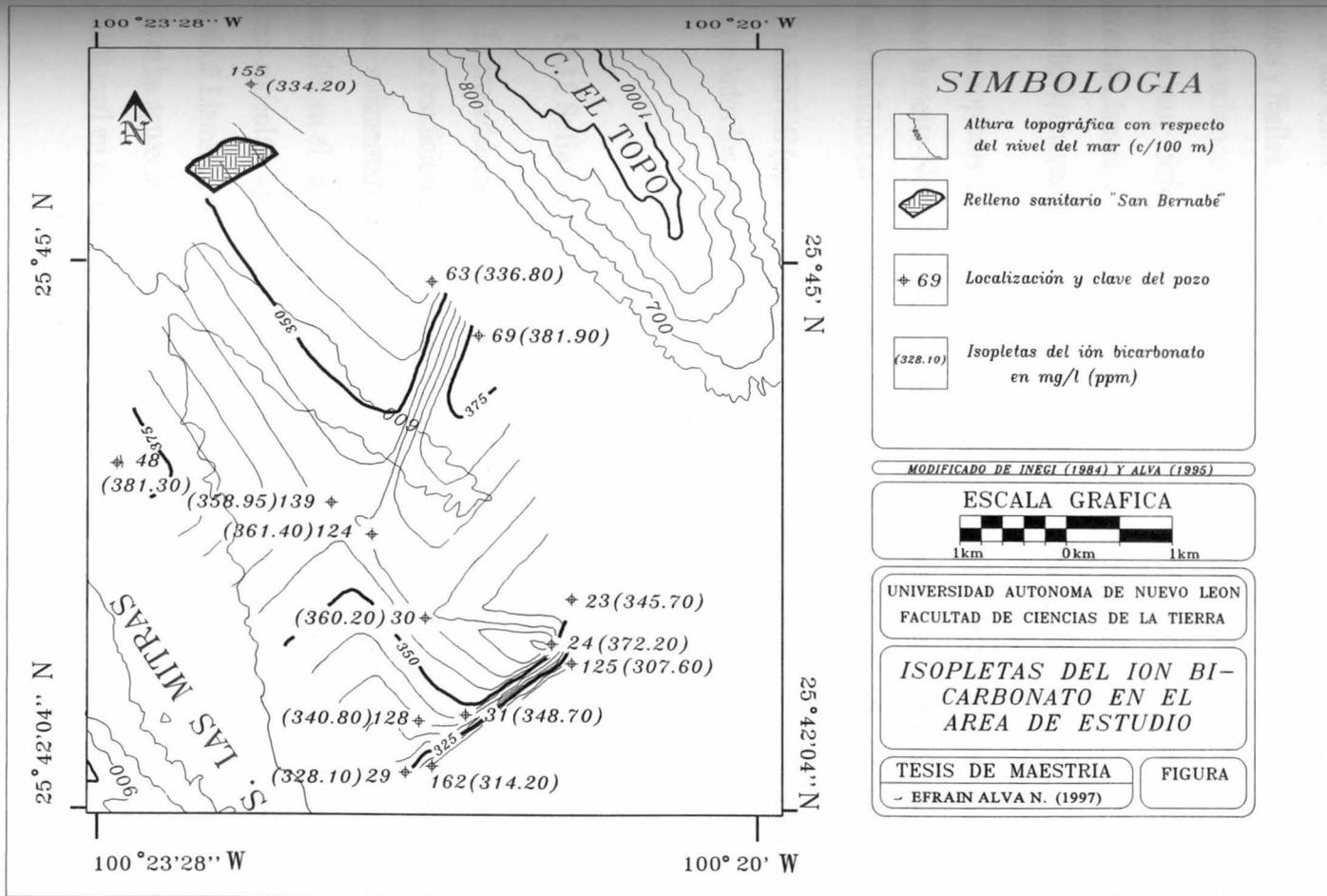


Fig. 26. Isopletas del ión Bicarbonato en el área de estudio.

5.4.3.7 Cloruros

El ión Cloruro procede del lavado de terrenos de origen marino, aguas congénitas y fósiles, agua de lluvia y concentradas en el terreno, así como también de vertidos urbanos e industriales. En aguas continentales no llega a saturar casi nunca y es muy difícilmente alterado por cambio iónico u otro tipo de acción (Custodio & Llamas, op. cit.). Las concentraciones varían de 0.1 mg/l (en el caso de aguas de lluvia) hasta 150,000 mg/l en las salmueras (Hem, op. cit.).

Las isopleas en la zona de estudio (Fig. 27) presentan un incremento en dirección Suroeste-Noreste, registrando el valor mínimo en el pozo 162 (17.95 mg/l) y el valor máximo en los pozos 63 (103.67 mg/l) y 69 (165.56 mg/l).

La SEDUE (op. cit.) reporta como tolerables valores menores a los 250 mg/l, por lo que todos los pozos se encuentran abajo de la Norma.

5.4.3.8 Sulfatos

La procedencia del ión sulfato es generalmente por el lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambientes marinos, corrosión de sulfuro en rocas sedimentarias, disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, concentración en el suelo de agua de lluvia y actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas, aportando en ocasiones cantidades importantes éstas últimas (Custodio & Llamas, op. cit.). Hem (op. cit.) Menciona que las concentraciones de sulfatos en las aguas subterráneas fluctúan entre los 0.2 mg/l (agua de lluvia) a más de 100,000 mg/l en el caso de las salmueras.

La distribución de isopleas en el área de estudio (Fig. 28) muestran una distribución algo irregular, ya que aunque la tendencia es a incrementarse desde la parte Oeste hacia el Este, en la región central del área se observa una depresión, registrando el pozo 30 valores de 30.90 mg/l, mientras que los pozos aledaños muestran valores entre 70.40 mg/l y 117.3 mg/l.

En general, la concentración mayor de Sulfato se registra en el pozo 69, con 150.60 mg/l, mas ninguno de ellos rebasa la concentración máxima permitida por la SEDUE (op. cit.), la cual establece un máximo de 500 mg/l.

5.4.3.9 Nitratos

La concentración de Nitratos en las aguas generalmente es producto de nitrificación natural, por ejemplo en las raíces de leguminosas; otra procedencia es la descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera, abonos agrícolas y en pequeña proporción el agua de lluvia. (Custodio & Llamas, op. cit.). Muchas veces es un indicador de contaminación, en cuyo caso suele estar estratificado, encontrándose las concentraciones mayores en la parte alta del acuífero libre. Si se tienen menos de 10 ppm, se considera que el contenido es bajo, aunque en aguas subterráneas no contaminadas es raro superar unas pocas ppm.

En el área de estudio las isopleas se comportan de manera semejante a los anteriores iones (Fig. 29), es decir, se observa un incremento en dirección Suroeste-Noreste, reportándose los valores menores en los pozos 29, 162 y 125 con concentraciones de 50 mg/l, mientras que los más altos (concentraciones de 150 mg/l) se registran en los pozos 69 y 155.

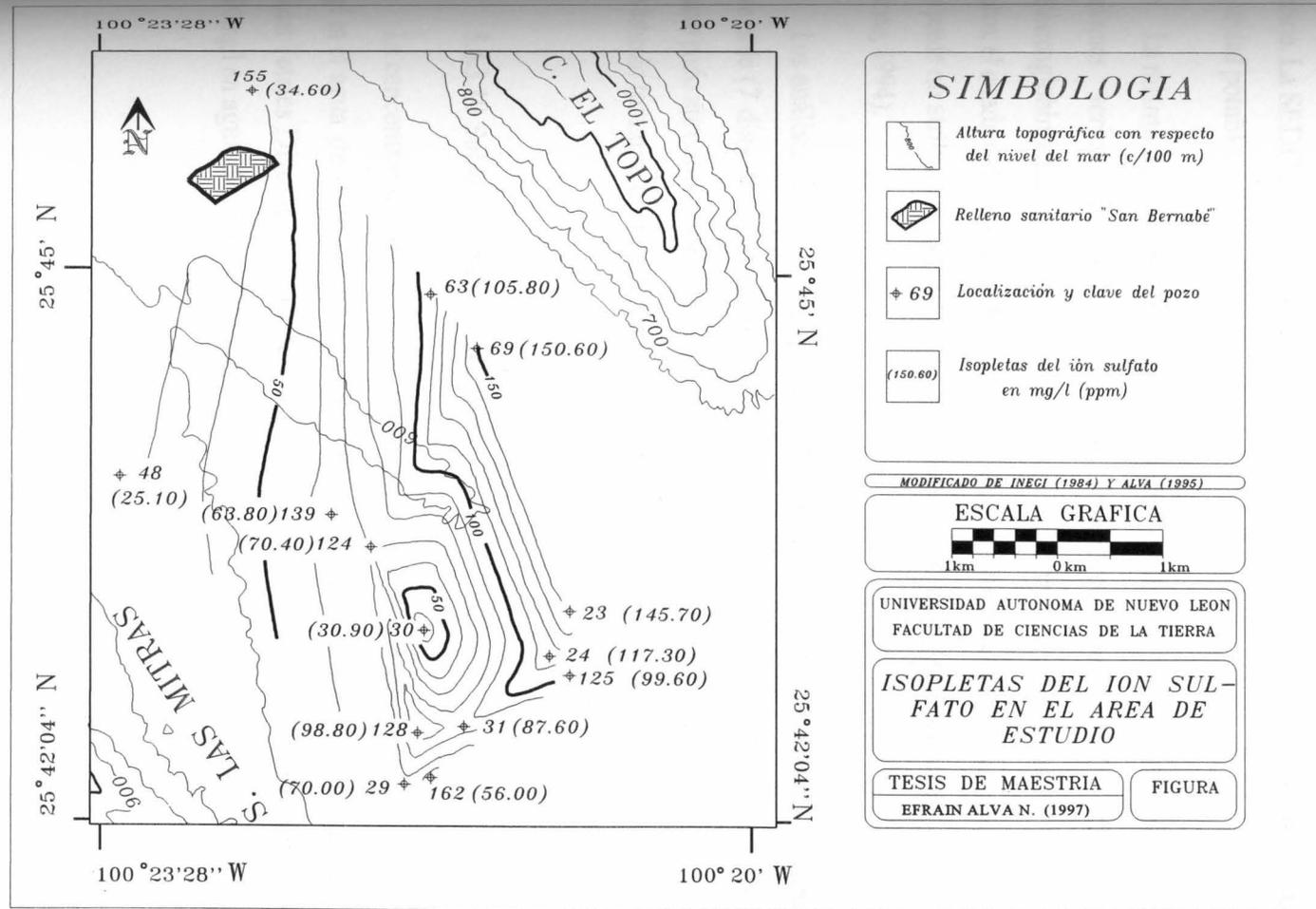


Fig. 28. Isopletas del ión Sulfato en el área de estudio.

Las concentraciones de nitratos resultaron ser del orden de 50-150 ppm, obteniéndose los valores más altos exactamente en las inmediaciones del relleno sanitario. La SEDUE (op. cit.) reporta un máximo de 22 mg/l de nitrato en las aguas de calidad potable.

La misma norma establece que a partir de los 44 mg/l comienzan a tenerse problemas serios de salud en los menores de edad, principalmente metahemoglobinemia (privación de oxígeno) y desarrollo de cáncer intestinal en los adultos; el cuadro clínico puede confundirse con anemia funcional y asfixia, por lo que puede no atribuirse la muerte al alto contenido de nitrato en el agua (González Lozano, 1994).

Los análisis de las aguas para la determinación de nitratos se realizaron un poco tarde (7 días después de tomada la muestra), por lo que la concentración de nitratos pudo aumentar por oxidación; sin embargo, aunque los resultados para éste ítem deberán tomarse con reserva los valores continúan siendo altos.

5.4.3.10 Sólidos totales disueltos

La concentración de Sólidos Totales Disueltos generalmente es menor a 10 mg/l en el agua de lluvia y hasta 300,000 mg/l en salmueras. Normalmente los Sólidos Totales Disueltos no deben sobrepasar los 1000 mg/l en agua potable y a 3000 mg/l en agua de riego (Werner, 1996).

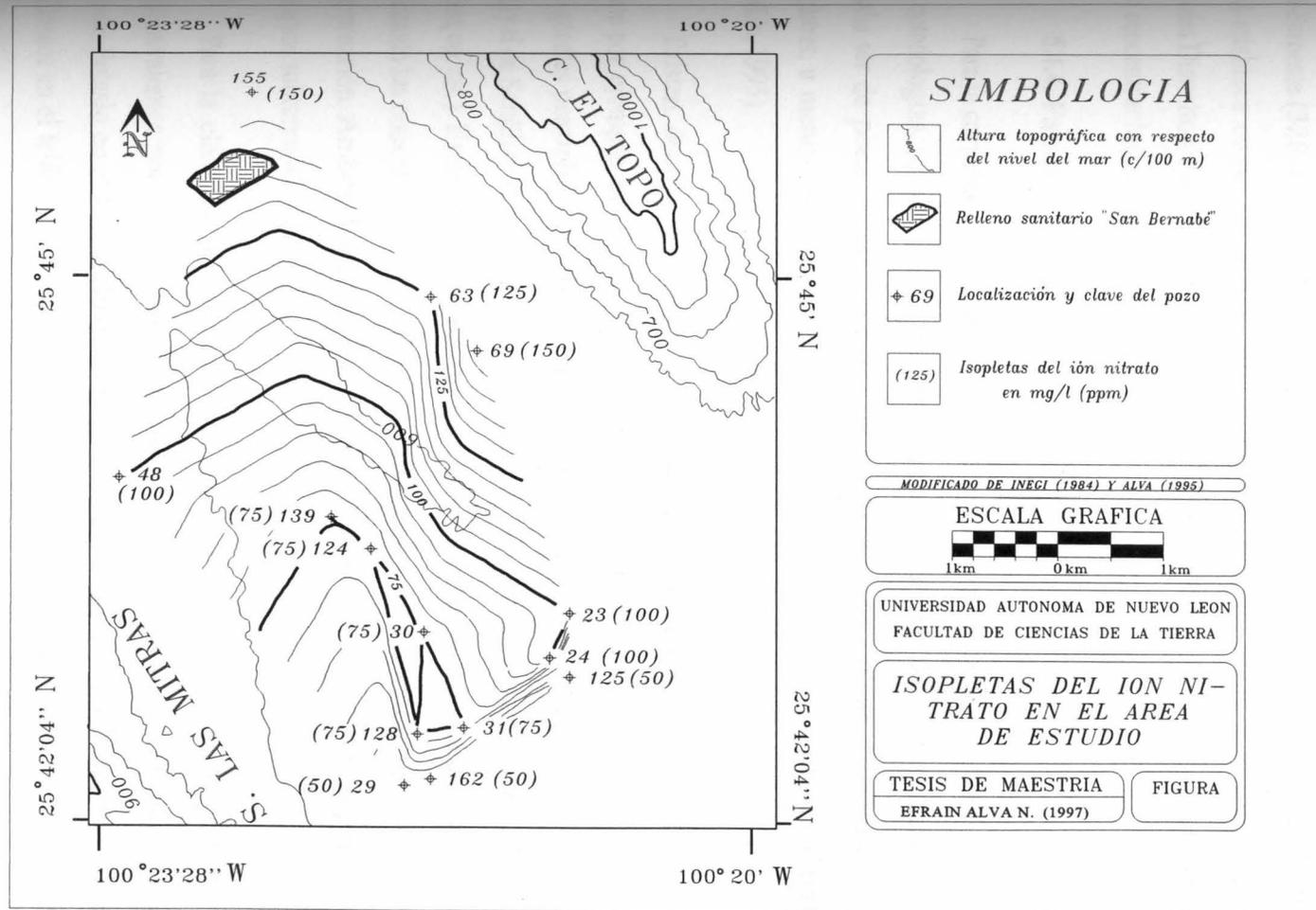


Fig. 29. Isopletas del ión Nitrato en el área de estudio.

La distribución de las isopletas en la zona de estudio (Fig. 30) se comportan de manera semejante a los iones antes descritos, incrementándose desde la porción Sur-Suroeste (328-415 mg/l) hacia la parte Noreste (657-785 mg/l). La SEDUE (op. cit.) establece como tolerancia una concentración de hasta 500 mg/l de Sólidos Totales Disueltos, por lo que al menos 4 pozos (63, 69, 23 y 125) rebasan tal norma, con concentraciones de 525-785 mg/l.

5.4.4. Familias de aguas

Para la caracterización gráfica de las agua subterráneas existe un gran número de metodologías, ya que la forma de presentación tabular de los resultados analíticos resulta ser de poca utilidad durante la interpretación de las relaciones entre las muestras, a menos que se realicen una serie de cálculos adicionales (Hernández Padilla, 1995).

Existen, dentro de la diversa gama de representaciones gráficas de resultados, como por ejemplo el diagrama múltiple lineal de Piper (1944), el diagrama de poligonales paralelos de Stiff (modificado), (Hem, 1985, Custodio & Llamas, op. cit.) y el de Schöller & Berkaloff por medio de diagramas logarítmicos (Davis & De Wiest, op. cit.). Estos métodos llevan a cabo la caracterización de las aguas naturales utilizando las concentraciones de los constituyentes más abundantes y facilitando la interpretación. Ambos diagramas se utilizaron en el presente estudio para clasificar las aguas subterráneas del área.

Para la clasificación según Piper (op. cit.) se calculan los porcentajes en miliequivalentes por litro de los distintos iones de cada muestra (Calcio, Magnesio y Sodio-Potasio en el triángulo de la izquierda o cationes y del Bicarbonato, Sulfato y Cloruros en el triángulo de la derecha o aniones), para posteriormente agruparlos en familias.

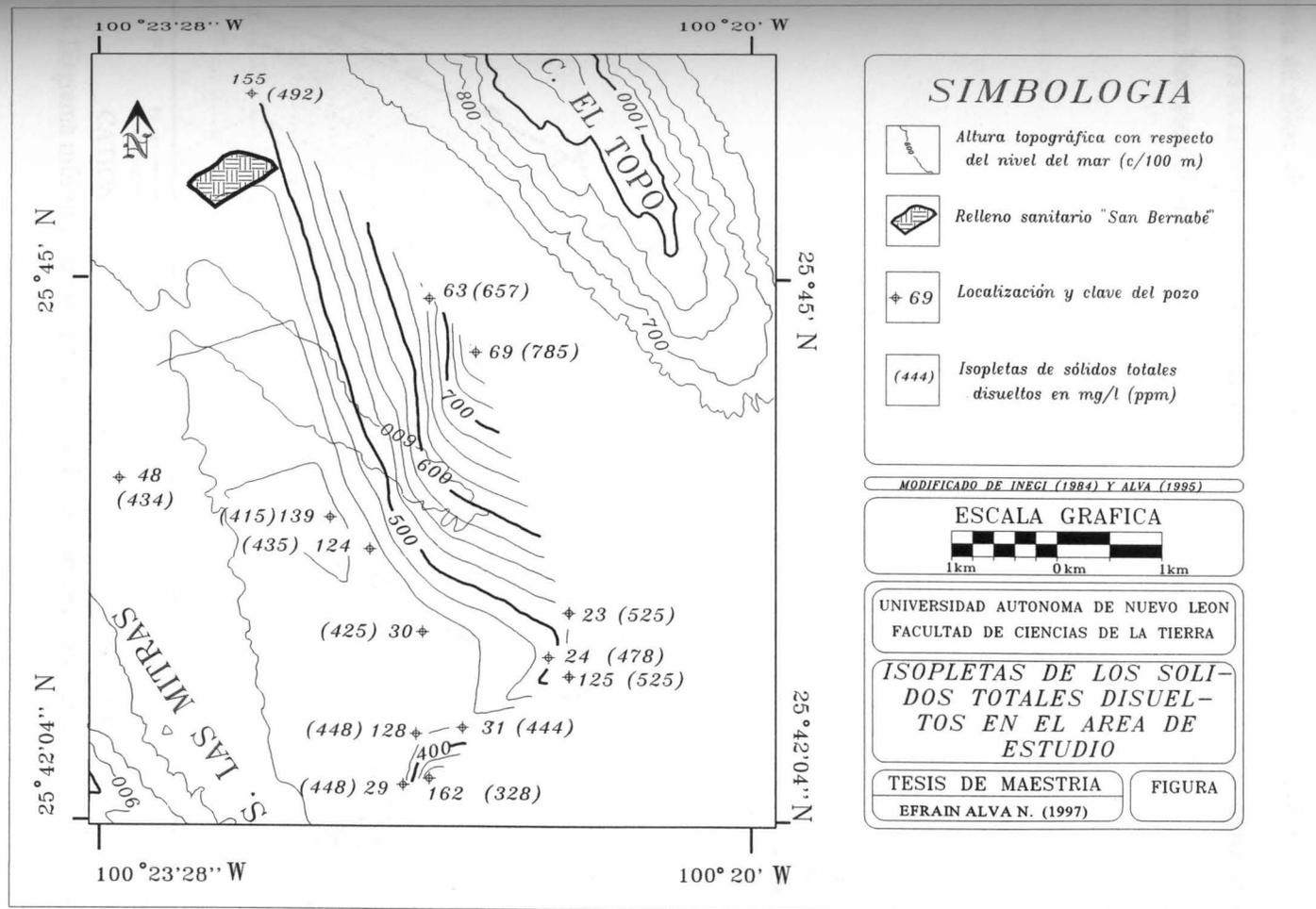


Fig. 30. Isopletas de Sólidos Totales Disueltos en el área de estudio.

En la Fig. 31 se observan la posición de las diferentes muestras, resultando que los pozos en el área de estudio pertenecen a la familia cálcico-bicarbonatada la mayoría de ellos (Fa1), con excepción de los pozos Nos. 63 y 69, los cuales pertenecen a la familia cálcico-mixta (Fa2), estando éstos últimos localizados en el extremo Noreste del área.

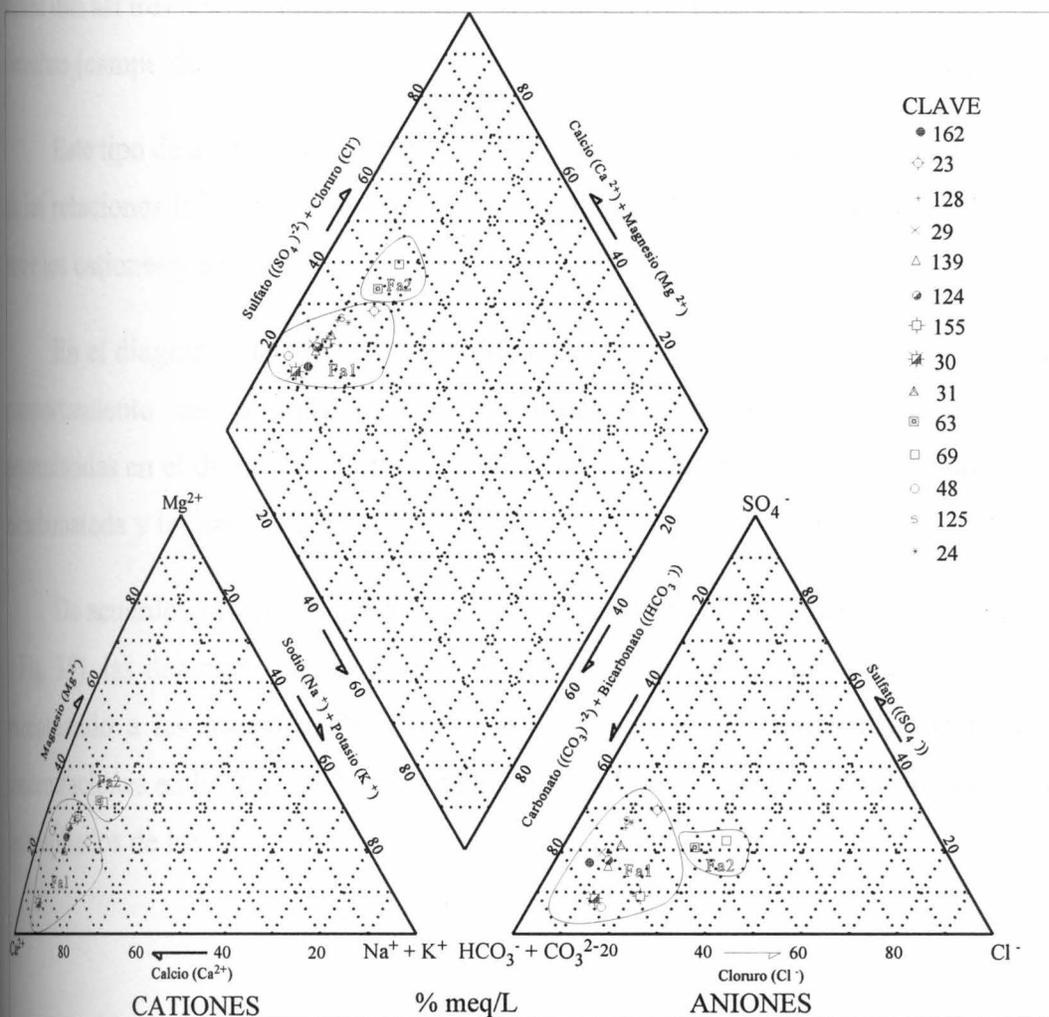


Fig. 31. Diagrama múltiple lineal, para la clasificación del agua según Piper (1944).

Basados en la clasificación de Davis & De Wiest (op. cit.), la cual toma en cuenta la cantidad de Sólidos Totales Disueltos (en ppm) presentes en las aguas subterráneas en ésta zona, recibirían la categoría de aguas dulces, ya que su concentración no sobrepasa a las 1,000 ppm.

El diagrama de poligonales de Stiff (modificado) consiste en tres líneas paralelas entre sí y espaciadas igualmente, las cuales son cortadas por una normal las cuales dan así tres semirrectas izquierdas (campo de los cationes) y tres semirrectas derechas (campo de los aniones).

Este tipo de arreglo de los iones permite una rápida apreciación de los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre los cationes y aniones.

En el diagrama de Stiff (modificado), (Fig. 32 y Fig. 33), se observa que el comportamiento de la mayoría de los iones corresponde con las familias determinadas en el diagrama de Piper, con la predominancia de la familia cálcico - bicarbonatada y la familia cálcico - mixta.

De acuerdo con los diagramas logarítmicos de Schöller y Berkaloff (Fig. 34 y Fig. 35), las diversas muestras se comportan de manera semejante entre ellas, exceptuando a las muestras Nos. 63 y 69 (Fig. 35), las cuales muestran altas concentraciones en la Dureza Total y en el contenido de Cloruros, coincidiendo con los resultados de los diagramas anteriores.

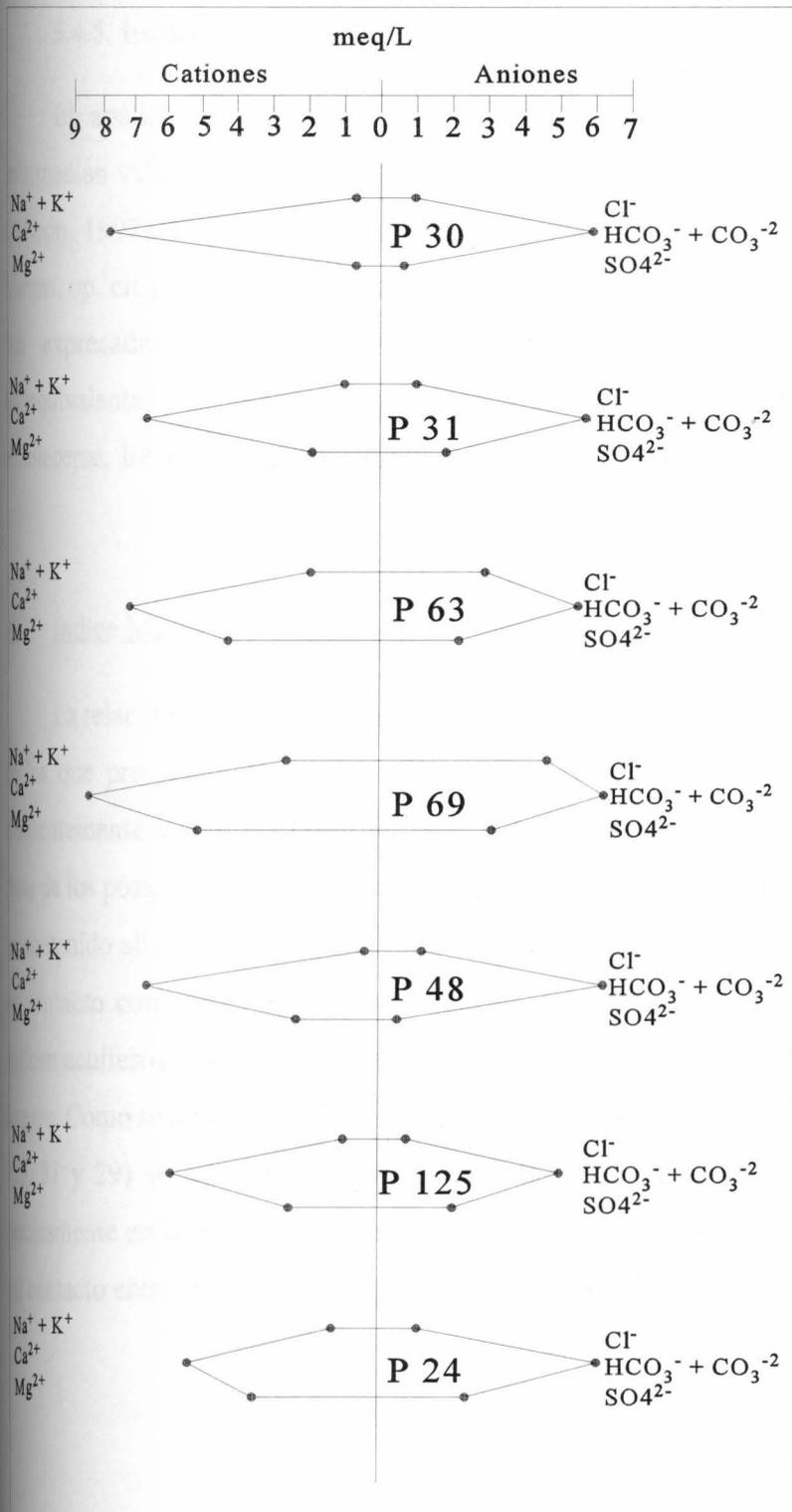


Fig. 33. Diagrama modificado de Stiff, mostrando las diversas relaciones iónicas (continuación).

5.4.5. Índices geoquímicos

El análisis de las relaciones iónicas disueltas en el agua proporciona información valiosa sobre su procedencia, comportamiento e interacción (Navarro de León, 1997). Estas relaciones son llamadas índices geoquímicos (Custodio & Llamas, op. cit.), los cuales son calculados con las especies cuyas concentraciones son expresadas en miliequivalentes por litro (meq/l) o porcentajes de miliequivalentes por litro ($r \cdot \text{meq/l}$). Dentro de las múltiples relaciones que pueden establecerse, los índices geoquímicos más significativos resultaron ser los siguientes:

A) Índice $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$.

La relación antes mencionada nos permite conocer sobre los tipos de acuíferos de los que provienen las aguas. Un índice entre 0.3 y 1.5 es en el que varían frecuentemente las aguas continentales. Como se observa en la Fig. 36, la mayor parte de los pozos oscilan entre valores de 0.2 y 0.4. Índices menores de 0.5 indican un contenido alto de Calcio con respecto al Magnesio, por lo que el agua ha estado en contacto con rocas de origen calcáreo, mientras que índices mayores de 0.5 indican acuíferos que han circulado por rocas depositadas en un ambiente marino somero. Como se observa en la gráfica, los pozos con índices superiores a 0.5 (pozos 125, 31 y 29) se localizan preferentemente en la parte Sur del área de estudio, precisamente en la zona donde es probable que los pozos estén extrayendo el agua del contacto entre la parte intemperizada de la Fm. Méndez y el relleno aluvial.

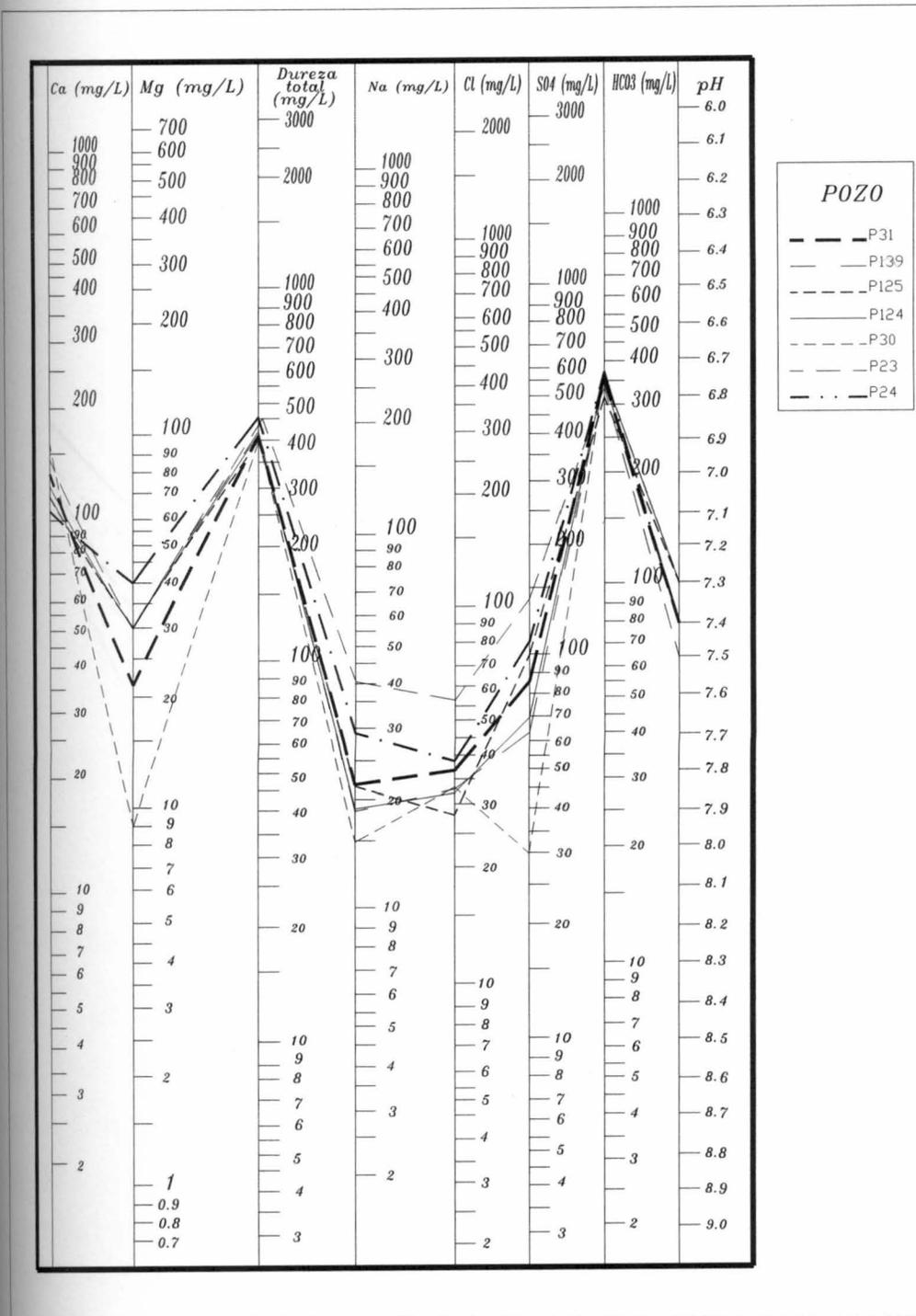


Fig. 34. Diagrama de Schöller y Berkaloff (1964) para las aguas subterráneas en la zona de estudio.

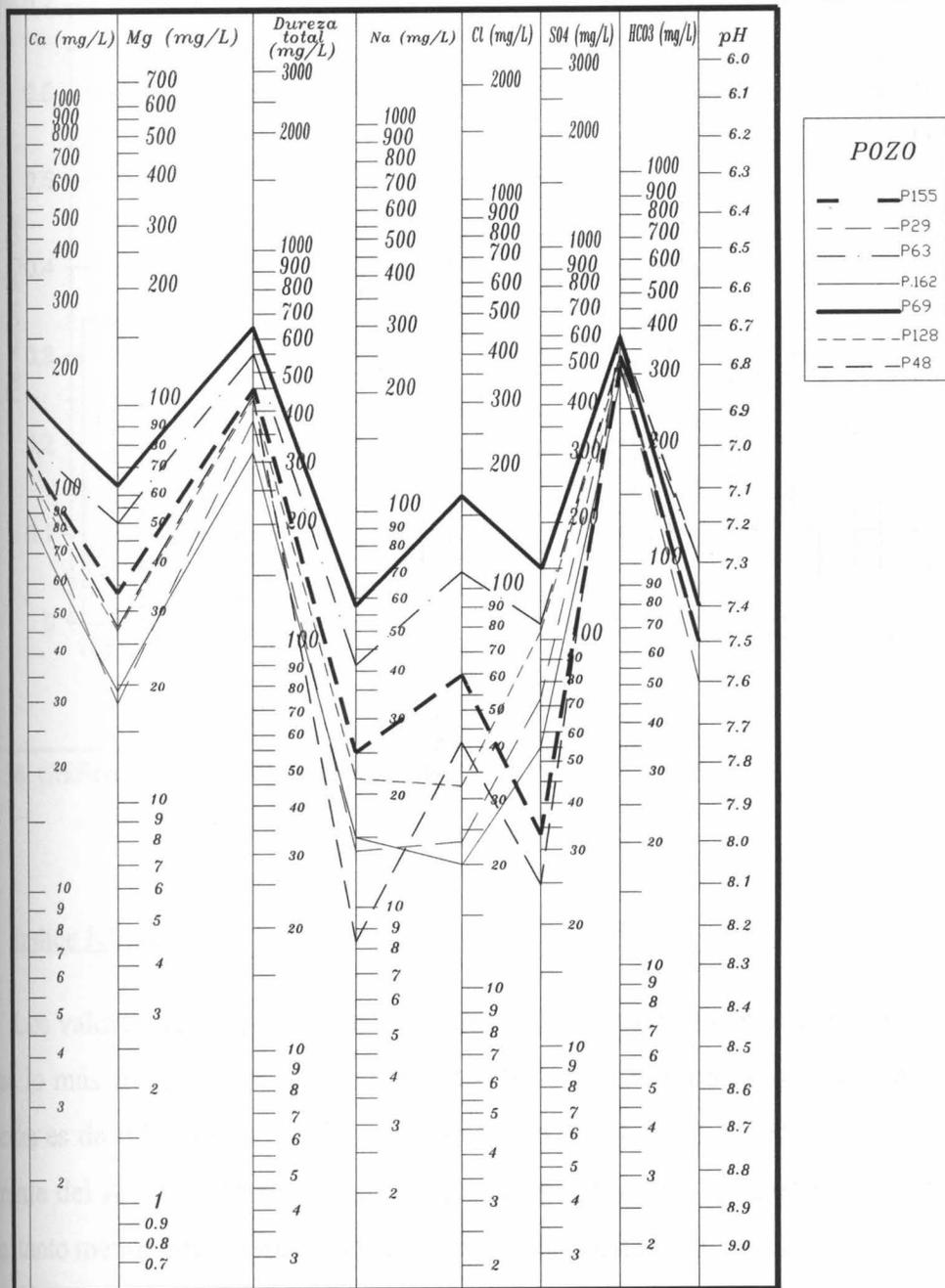


Fig. 35. Diagrama de Schöller y Berkaloff (1964) para la clasificación de las aguas subterráneas en el área de estudio.

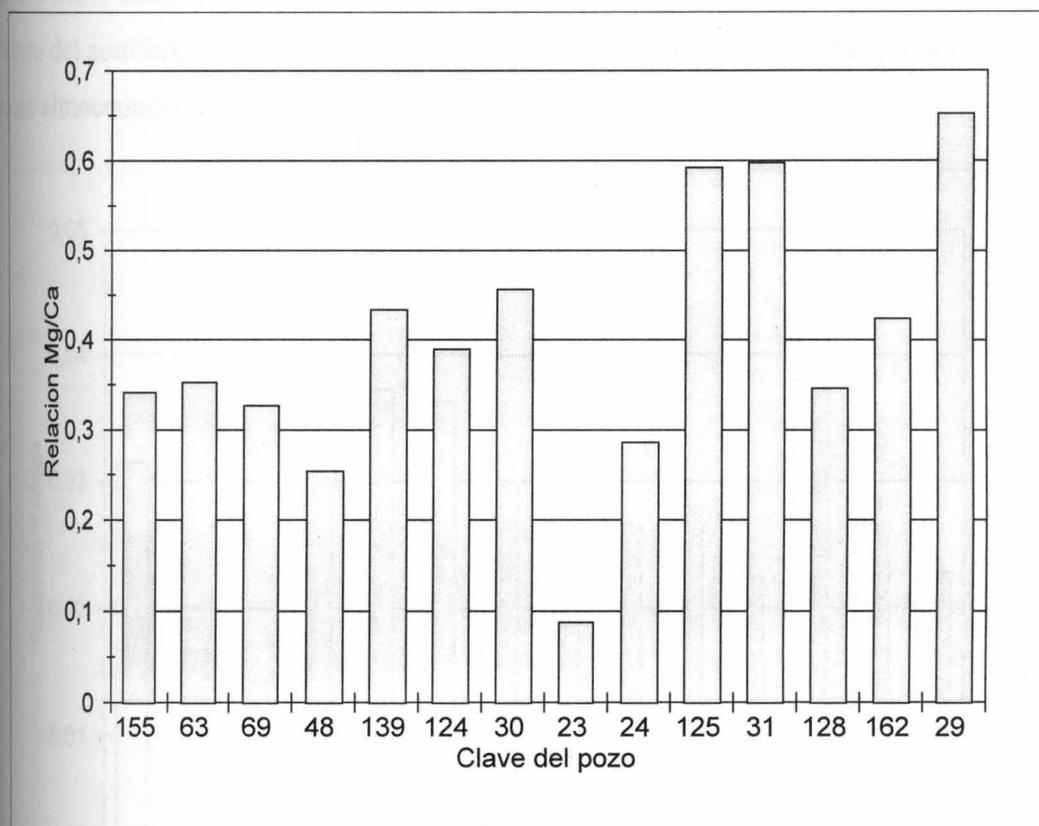


Fig. 36. Gráfico mostrando la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} .

B) Índice K^+/Na^+

Los valores de esta relación en aguas dulces pueden variar entre 0.001 y 1, aunque lo más frecuente es que varíe entre 0.04 y 0.3; para las aguas marinas la variación es de 0.02 a 0.025 (Custodio & Llamas, op. cit.). Debido a la fijación preferente del K^+ en el terreno, esta relación es menor en el agua que en la roca origen, tanto menor cuanto más concentrada en sales está el agua. En aguas con poca interacción esta relación es muy baja (menor a 0.05), lo cual concuerda con los resultados obtenidos para las muestras analizadas (Fig. 37). Como se puede observar en la gráfica, los valores de la relación antes descrita se encuentran en el rango de

0,02 a 0,04, confirmando el carácter dulce de las aguas, con una gran movilidad dentro del acuífero lo cual provoca que estas aguas interaccionen muy poco con las rocas almacenadoras.

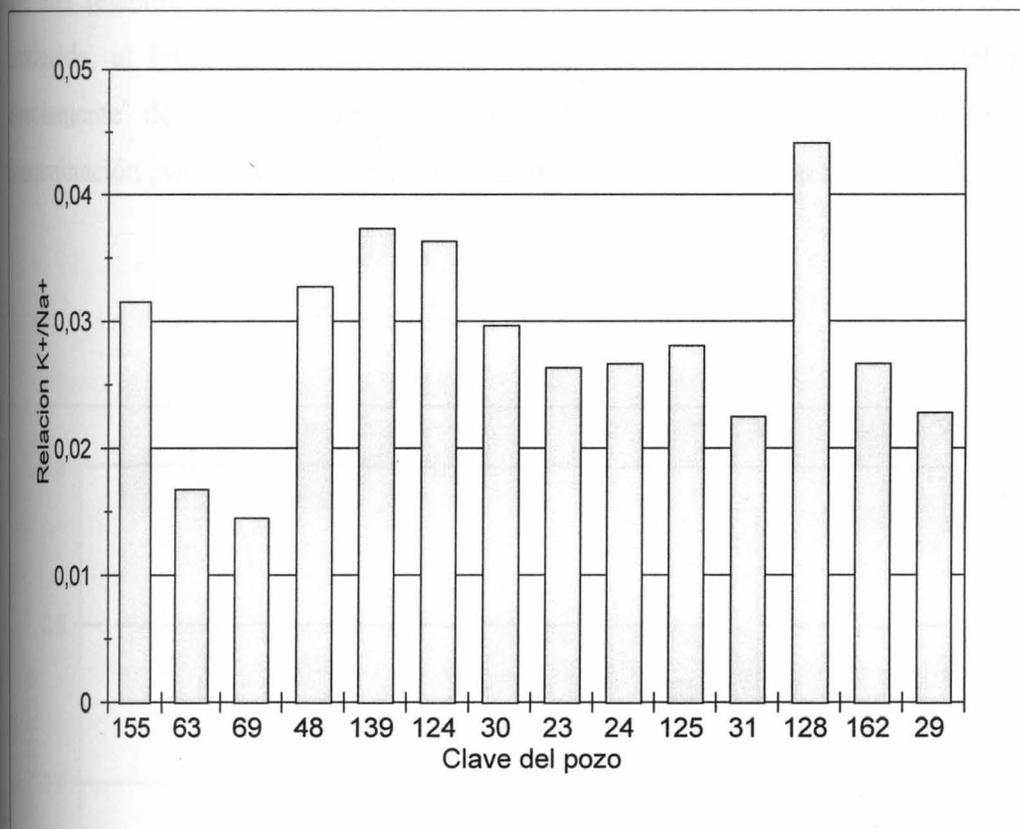


Fig. 37. Gráfico mostrando la relación K^+/Na^+ . Todos los valores son menores a 0,05, lo cual indica la poca interacción de estas aguas.

C) Índice Cl^-/HCO_3^-

Dado que el contenido de HCO_3^- se mantiene relativamente constante en las aguas subterráneas, su uso resulta de interés para seguir el proceso de concentración en sales en el sentido del flujo subterráneo (Navarro, op. cit.). Los valores para aguas continentales oscilan normalmente entre 0,1 y 5 y un aumento en la relación indica un avance en el proceso de concentración (Custodio & Llamas, op. cit.). En relación

a las muestras del área de estudio (Fig. 38), la gran parte indican valores menores de 0.2 en la relación, mostrando el origen relativamente reciente de las aguas y la predominancia del HCO_3^- , con excepción de los pozos Nos. 63, 30, 125 y 31, en los que esta relación se dispara incluso hasta más de 0.7 por el aumento de Cl^- , producido, al igual que en la relación $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$, por la extracción del agua directamente de la zona intemperizada de la lutita Méndez, aunque una contaminación por parte del clorador de la bomba de extracción no se excluye.

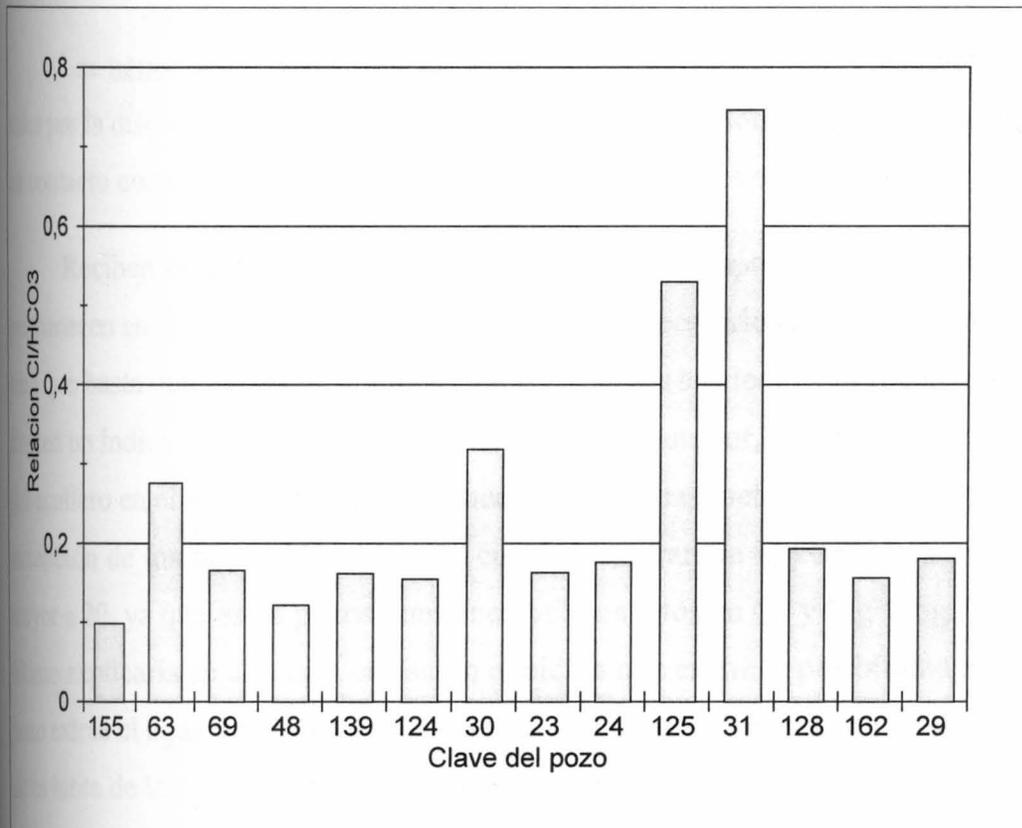


Fig. 38. Gráfico de la relación $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ en el área de estudio.

D) Índice $[(r\text{SO}_4^{2-} + r\text{Cl}^- + r\text{Ca}^{+2} + r\text{Mg}^{+2} + r\text{NO}_3^-)] - 50$

Por su origen y tiempo, Schöller (1964) clasifica las aguas en:

Aguas meteóricas o recientes.

Aguas selenitrosas.

Aguas fósiles

Las aguas meteóricas o recientes son las incluidas en el ciclo del agua en la hidrósfera-litósfera-atmósfera, presenta un índice entre 0 y 20 y su composición está influenciada principalmente por el agua de infiltración y la del material del acuífero.

Las aguas selenitrosas presentan un contenido extraordinariamente alto en sales por la disolución de yeso y otras sales evaporíticas. Son aguas que han entrado en contacto con cuerpos evaporíticos, por lo que su índice es superior a 20.

Reciben el nombre de aguas fósiles las aguas atrapadas en el terreno y que permanecen en él durante miles de años sin que sea necesario que sean estacionarias, sino que basta con que el movimiento de estas aguas sea lento y el recorrido largo. Poseen un índice menor de 0. Basados en el criterio anterior, la mayoría de las aguas del acuífero en el área de estudio pertenecen a las aguas meteóricas o recientes, con excepción de los pozos 31 y 125, los cuales muestran un incremento ligeramente mayor a 20, ya que estos pozos contienen valores altos en Cl^- y Mg^{2+} (Fig. 39); este último explicaría su alta concentración debido a que existe la posibilidad de que el pozo extrae el agua que está circulando entre el contacto con la parte intemperizada de la lutita de la Fm. Méndez y la base del relleno aluvial.

Con respecto del Cl^- , las únicas fuentes posibles para el aumento de la concentración de este ión sería que el pozo esté atravesando algún lente de lutita con alto contenido en sales y de ahí obtenga el cloro; otra posibilidad sería que, durante

la toma de la muestra, esta se contaminara con cloro residual existente en la red potabilizadora.

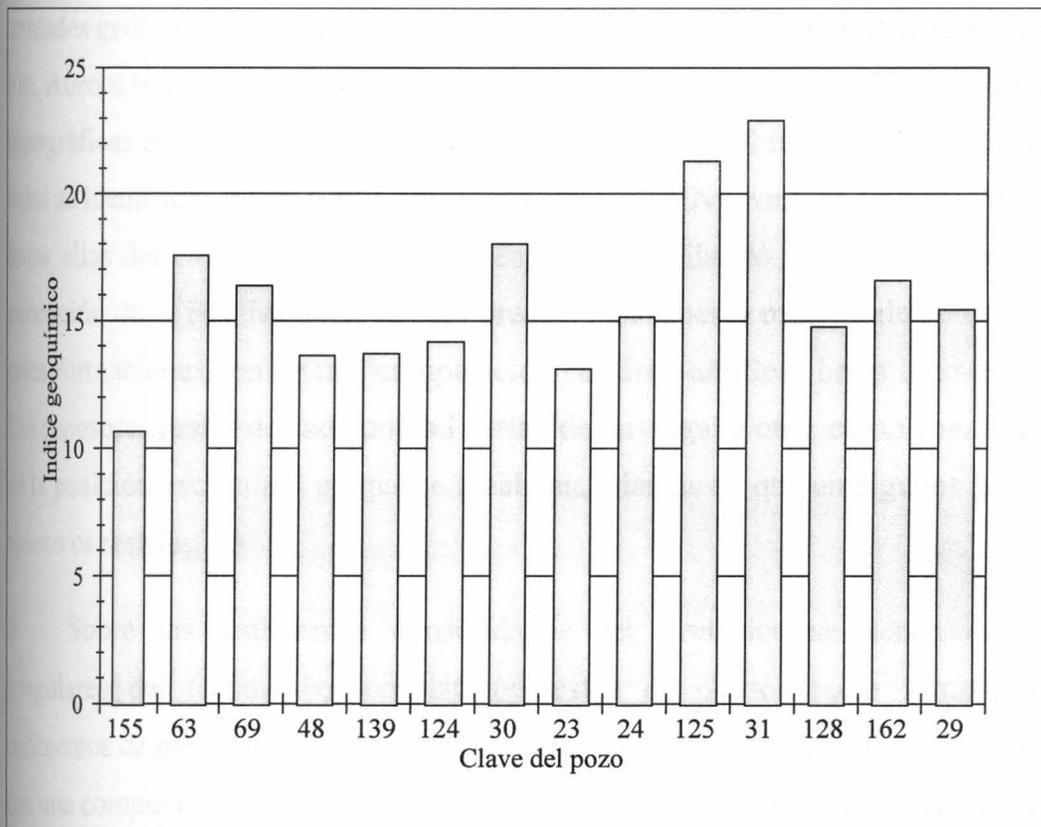


Fig. 39. Gráfico mostrando la relación del índice geoquímico de los diferentes pozos del área de estudio.

Los análisis geoquímicos de las aguas y las diversas relaciones encontradas entre estos iones muestran que las aguas en la zona de estudio pertenecen preferentemente a dos clases de familias: cálcico-bicarbonatada y cálcico-mixta. Con respecto a la predominancia de aniones y cationes se definen en el área de estudio las siguientes clasificaciones (según Piper, 1944):

* Aniones tipo 6: $r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{-2} > r\text{Cl}^-$

* Cationes tipo f: $r\text{Ca}^{+2} > r\text{Mg}^{+2} > r\text{Na}^+$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la parte Noroeste del área metropolitana de Monterrey se determinaron unidades geológicas pertenecientes al Cretácico y reciente, siendo la más antigua la Fm. Aurora (Cretácico Inferior) de composición calcárea, ocupando las posiciones topográficas más altas y con espesores mayores a los 150 m. Hacia las partes más bajas se identificaron las Fms. Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe y Méndez, todas ellas del Cretácico Superior, de espesores oscilando entre los 35-70 m, con excepción de la Fm. Méndez, la cual presenta un espesor mínimo de 100 m; todas estas formaciones son de una composición calcáreo-arcillosa hasta limo-arcillosa. Los espesores reales de cada unidad varían de un lugar a otro, como consecuencia de la posición estructural en que se localizan, además de que en algunos puntos el acceso es restringido.

Sobre los sedimentos consolidados del Cretácico se tienen depósitos irregulares del Cenozoico, consistentes éstos de clastos tanto formando los sedimentos de piedemonte como el relleno aluvial existente en el valle de Monterrey, con una composición variada aunque predominando los fragmentos de composición calcárea y con una matriz limo-arcillosa.

El análisis estructural de la Sierra Las Mitras, Cerro El Topo y Cerro El Durazno mostró que las tres estructuras son anticlinales con una dirección NW-SE, mostrando una inmersión de aprox. 5°-10° en los ejes en el extremo SE y una recumbencia hacia el NE. Los patrones de diaclasamiento son preferencialmente ac y bc.

Dentro del aspecto hidrogeológico, se determinaron, en base a su composición litológica y a su posición estratigráfica al menos dos acuíferos en la zona de estudio, uno profundo el cual se desplaza a través de las formaciones calcáreas del Cretácico Inferior, y otro somero, localizado en los rellenos aluviales del Cenozoico y la parte

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la parte Noroeste del área metropolitana de Monterrey se determinaron unidades geológicas pertenecientes al Cretácico y reciente, siendo la más antigua la Fm. Aurora (Cretácico Inferior) de composición calcárea, ocupando las posiciones topográficas más altas y con espesores mayores a los 150 m. Hacia las partes más bajas se identificaron las Fms. Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe y Méndez, todas ellas del Cretácico Superior, de espesores oscilando entre los 35-70 m, con excepción de la Fm. Méndez, la cual presenta un espesor mínimo de 100 m; todas estas formaciones son de una composición calcáreo-arcillosa hasta limo-arcillosa. Los espesores reales de cada unidad varían de un lugar a otro, como consecuencia de la posición estructural en que se localizan, además de que en algunos puntos el acceso es restringido.

Sobre los sedimentos consolidados del Cretácico se tienen depósitos irregulares del Cenozoico, consistentes éstos de clastos tanto formando los sedimentos de piedemonte como el relleno aluvial existente en el valle de Monterrey, con una composición variada aunque predominando los fragmentos de composición calcárea y con una matriz limo-arcillosa.

El análisis estructural de la Sierra Las Mitras, Cerro El Topo y Cerro El Durazno mostró que las tres estructuras son anticlinales con una dirección NW-SE, mostrando una inmersión de aprox. 5°-10° en los ejes en el extremo SE y una recumbencia hacia el NE. Los patrones de diaclasamiento son preferencialmente ac y bc.

Dentro del aspecto hidrogeológico, se determinaron, en base a su composición litológica y a su posición estratigráfica al menos dos acuíferos en la zona de estudio, uno profundo el cual se desplaza a través de las formaciones calcáreas del Cretácico Inferior, y otro somero, localizado en los rellenos aluviales del Cenozoico y la parte

intemperizada de la Fm. Méndez del Cretácico Superior. Las formaciones del Cretácico Superior sirven como barreras hidrogeológicas entre ambos acuíferos, debido a su alto contenido limo-arcilloso.

En base al estudio piezométrico de niveles dinámicos en los pozos someros que se encontraban en funcionamiento durante el período comprendido de Enero de 1988 a Septiembre de 1996, se determina que la dirección de flujo principal proviene de la Sierra de Las Mitras, con pequeños aportes del Cerro El Topo.

La recarga del acuífero somero es directamente afectada por los fenómenos climatológicos, ya que la prolongada sequía registrada en los años de 1990 y 1994 provocó el descenso drástico en los niveles dinámicos promedio de los acuíferos.

Los análisis químicos realizados a 14 muestras de agua de pozos someros revelaron la existencia de dos familias de agua, una cálcico-bicarbonatada (a la que pertenecen la mayoría de las muestras) y una cálcico mixta, a la que pertenecen sólo dos pozos (63 y 69) localizados en el extremo Noreste del área y con una clasificación 6f (6: $r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r.\text{Cl}^-$, f: $r\text{Ca}^{+2} > r\text{Mg}^{+2} > r\text{Na}^+$).

La tendencia en general de los iones disueltos es a incrementarse en dirección Suroeste-Noreste, coincidiendo con la dirección de flujo en el área. La evaluación de las relaciones iónicas mostraron que, salvo algunas escasas ocasiones en que tienen anomalías en la concentración de algún ión, el origen de las aguas en el acuífero es de procedencia meteórica o reciente, con una recarga local y que durante su movimiento ha circulado preferentemente a través de rocas de origen calcáreo.

La existencia del relleno sanitario de "San Bernabé" en la región Noroeste del área, ha propiciado el incremento de los nitratos en el agua con los consecuentes riesgos para la salud; así también, se tienen en los alrededores de este relleno la clausura de gran cantidad de pozos de extracción ya sea por contaminación (de parte

del relleno sanitario, por tiraderos clandestinos de basura antiguos o por las antiguas granjas agrícolas ahí asentadas), mal funcionamiento de las bombas o por abatimiento del pozo.

El incremento en los iones Magnesio y Cloruro puede tener distintos orígenes. Para el Magnesio, existen diversas explicaciones. Como se ha mencionado, cabe la posibilidad de que los pozos de extracción se encuentren en contacto con la parte intemperizada de las lutitas pertenecientes a la Fm. Méndez, las cuales subyacen de manera irregular al acuífero somero. Así, el contenido arcilloso de las lutitas altera de manera significativa el contenido de Magnesio en la muestra. Otra explicación sería que el acuífero entre en contacto con algún cuerpo dolomítico en profundidad, lo cual resulta ser poco probable.

Con respecto de las anomalías de Cloruro en algunos pozos, alguna de las causas probables se atribuirían a pequeños lentes de lutita con altos contenidos en sales presentes en la Fm. Méndez, estando distribuidos de manera irregular, motivando esto que algunos pocos pozos corten tales lentes. Otra posibilidad consiste en que durante la toma de la muestra, los pozos todavía contenían cloro residual de la red de distribución, lo que alteraría los resultados de algunas muestras de manera sensible.

Los resultados aquí obtenidos deberán tomarse con alguna reserva, ya que, a pesar de contar con lecturas de niveles piezométricos de varios años, los resultados de la geoquímica no pueden extrapolarse en el mismo lapso de tiempo, ya que la campaña de muestreo se realizó en un corto período de tiempo, por lo que para ser confiables y representativas se debieron realizar al menos tres campañas más.

Dentro de las recomendaciones se sugiere un estudio más profundo y periódico de los pozos, tanto en la capacidad de cada uno de ellos como en la evolución hidrogeoquímica de los mismos de manera estacional durante varios años.

6. Conclusiones y recomendaciones

La frecuencia de los muestreos deberá hacerse por lo menos cada tres meses, para así obtener un análisis más completo y real del acuífero somero y conocer la sensibilidad que tiene con respecto de los fenómenos atmosféricos. Además, la lectura de los niveles estáticos debería hacerse en los pozos que no se encuentren en funcionamiento, para que los valores del nivel freático fueran más reales.

Para mejorar la oferta de agua en el área metropolitana de Monterrey, es necesario realizar un estudio hidrogeológico más a detalle de la Sierra de Las Mitras, ya que las direcciones de flujo parten en su mayoría de esta zona; también deberían prospectarse la zona comprendida entre la Sierra de Las Mitras y Sierra del Fraile para la construcción de una batería de pozos someros, ya que la capa de sedimentos por la que se mueve el acuífero somero en el área metropolitana de Monterrey se prolonga hasta aquella región.

CAPITULO 7.

BIBLIOGRAFÍA

Alva-Niño, E. (1995): Datos base y metodología para la elaboración de una carta Ingeniero-Geológica de la zona metropolitana de Monterrey, N.L., México. Tesis de licenciatura. Fac. de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L. 82 pp, 5 anexos (sin publicar).

Alva-Niño, E., León-Gómez, H. de & Werner-Paulus, J. (1997): Aspectos hidrogeoquímicos del acuífero granular de la región Noroeste del área metropolitana de Monterrey, Nuevo León/México. 15. Geowissenschaftliches Lateinamerika-Kolloquium. Universität Hamburg (en prensa).

Aparicio F., J. M. (1992): Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. 1ª Ed. p. 303. México.

Aral, M. M. & Haddad, E. H. (1987): Modeling Transient Ground Water Flow in Multilayered Aquifer System. Georgia Inst. of Tech., School of Civil Engineering. pp. 69.

Attewell, P. B. & Farmer, I. W. (1979): Engineering Geology. John Wiley & Sons. Inc. 1ª Ed. p. 1035.

Bennet, G.D., Kontis, A. L. & Larson, S. P. (1982): Representation of Multiaquifer Well Effects in Three-Dimensional Ground-Water Flow Simulation. Ground Water, V. 29, n 3, p. 334-341.

- Chapa Guerrero, J.R. (1993):** Massenbewegungen an Steilhängen der Sierra Madre Oriental im Grossraum Monterrey, Mexiko. Mitt. Ing. - u. Hydrogeol. **54:** 164 p., 68 figs., 11 tablas, 11 anexos. Alemania.
- Chapa Guerrero, J.R., Meiburg, P. & Schetelig, K. (1994):** Riesgos geológicos en la Sierra Madre Oriental (Estado de Nuevo León), México.[Geological hazards in the Sierra Madre Oriental (State of Nuevo León), México.] - Zbl. Geol. Paläont. Teil I, **1993 (1/2):** 555-556; Stuttgart.
- C.I.E.P.S. (Ingenieros Consultores y Proyectistas), (1968):** Estudio Geohidrológico de Acuíferos Regionales en Calizas, Zona Monterrey. Tomo I (informe). Reporte interno, 48 anexos, 144 pp.
- Comisión Agua Potable y Drenaje de Monterrey (C.A.P.D.M.), (1989):** Estudio integral de los recursos hidráulicos para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey, N. L. y su área metropolitana. Reporte interno. 30 pp.
- Comisión de Conurbanación del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México (1988):** Plan director de desarrollo urbano del área metropolitana de Monterrey 1988-2010. Grafo Print Editores, S.A.
- Comisión Nacional del Agua (C.N.A.). Gerencia Estatal en Nuevo León. Subgerencia de Administración del Agua. Residencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (1995):** Datos mensuales de temperatura, precipitación y evaporación en mm desde enero de 1988 a mayo de 1995, estaciones climatológicas El Canadá, Monterrey, Topo Chico y Santa Catarina.
- Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) (1991):** Estudios geológicos en proyectos de acumulación de energía por bombeo en la región de Monterrey, N. L.. Superintendencia de estudios zona noroeste. Depto. de Geología. Lerdo, Durango. 152 pp.

- Custodio, E. & Llamas, M. R. (1976):** Hidrología subterránea. 2ª edición, Editorial Omega, España. Tomo III. 1154 p.
- D'Amore, F., Scandiffio, G. & Pachini, C. (1983):** *Some observations on the chemical classification of Groundwaters.* Geothermics, Vol. 12, No. 2/3, pp. 141-148. Printed in Great Britain.
- Davis, S. N. & De Wiest, R. (1971):** Hidrogeología. Ed. Ariel. Barcelona, España. 563 pp.
- De León Gómez, H. (1993):** Die Unterläufigkeit der Talsperre José López Portillo/Cerro Prieto auf einer Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge bei Linares, Nuevo León/México. Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie. Heft 53. Aachen, Alemania. p.181.
- De León Gómez, H., Schetelig, K. & Meiburg, P. (1994):** Abastecimiento de Agua Potable en el Noreste de México. Ejemplo: Presa Cerro Prieto. Zbl. Geol. Paläont. Teil I, p. 583-602, Stuttgart.
- De la Peña Gámez, M .R. (1994):** Investigaciones geológicas, mineralógicas e hidro-geoquímicas del área de Río Verde, San Luis Potosí. Tesis de licenciatura, Fac. de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L. 114 pp (sin publicar).
- Fetter, C. W. (1988):** Applied Hydrogeology. Second edition. Macmillan Publishing Company. U.S.A. 591 pp.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979):** Groundwater. Prentice-Hall, Inc. U. S. A. 604 pp.
- Gray D., M. (1970):** Handbook on the principles of hydrology.- Secretariat Canadian Nat. Com. for the Internat. Hydrological Decade; Ottawa.

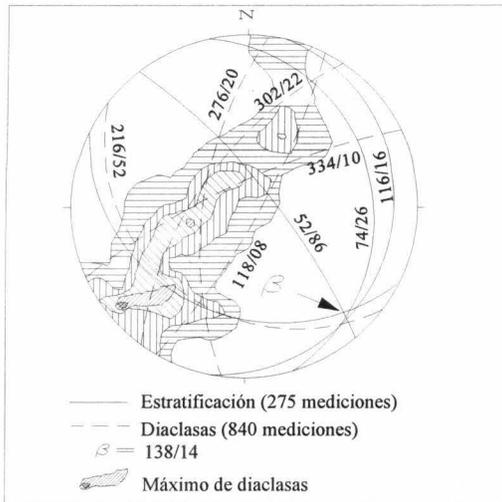
- González Lozano, D. I. (1994):** Presencia de nitratos y nitritos en el agua subterránea del sector noroeste del área metropolitana de Monterrey y su relación con la salud de los consumidores. Tesis de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental. Fac. de Ingeniería Civil, U.A.N.L. 70 pp (sin publicar).
- Hem, J.D. (1985):** Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2254, 263 p.
- Hernández Padilla, M. (1995):** Investigaciones geológicas e hidrogeológicas del área metropolitana de Monterrey, N.L., México. Tesis de licenciatura. Fac. de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L.. 94 pp, 4 anexos (sin publicar).
- Hemker, C. J. & Maas, C. (1987):** Unsteady Flow to Wells in Layered and Fissured Aquifer Systems. *Journal of Hydrology*, Vol. 90, No. 3/4, p. 231-249.
- I.N.E.G.I. (1978):** Cartas topográficas escala 1:50,000, hojas G14C15 Hidalgo, G14C16 Apodaca, G14C25 Garza García, G14C26 Monterrey.
- I.N.E.G.I. (1986):** Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. Editado por la Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP), 170 pp.
- International Association of Hydrogeologist (1991):** Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. *In: Lerner, N.L., Issar, A.S. & Simmers, I. (editors): International contributions to hydrology*. Vol. 8, 345 pp.
- International Association of Hydrogeologist (1992):** Selected papers on Over-exploitation. *In Simmers, I.; Villarroya, L. & Rebollo, F. (editors): 23rd. International Congress of the I.A.H., Tenerife, Spain*. Vol. 3. 391 pp. Verlange Heinz Heinse.

- Johnson, E. E. (1975):** El Agua Subterránea y los Pozos. Johnson Division, UOP Inc. Minnesota, U.S.A.. 513 pp.
- Loaiza, G. R. & Jiménez, A. R. (1987):** Aplicación del Modelo de Asignación de Agua a Monterrey, Nuevo León. Ingeniería Hidráulica en México. Vol.2, n.3, II época. p. 38-52.
- López Ramos, E. (1982):** Geología de México. Tomo II, Tercera edición, 454 p., México.
- López Oliva, J.G.(1989):** Bioestratigrafía del Jurásico Superior y del Cretácico Inferior de la Sierra del Fraile, Nuevo León, México. Diplomarbeit, Univ. Hamburg. 124 p (sin publicar).
- López Urrutia, P. (1976):** Estudio Geohidrológico del Valle Costero de Santiago-Salahua en el estado de Colima. Tesis de Maestría en Ciencias (Geofísica). Facultad de Ciencias. U.N.A.M. 83 pp (sin publicar).
- Lohman, S. W. (1977):** Hidráulica Subterránea. Ed. Ariel. 1ª Ed. pp. 185.
- Matthes, G., Foster, S.S.D. & Skinner, A.Ch. (1985):** Theoretical background, Hidrogeology and Practice of Grounwater Protection Zones. International Association of Hydrogeologists. In *International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 6, 204 pp. Verlang Heinz Heinse.
- Meiburg, P. (1987):** Paleogeografía y desarrollo estructural del Cretácico de la Sierra Madre Oriental Septentrional, México. Actas Fac. de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., Linares, 2, p. 197-199.
- Mercer, J. W. & Faust, C. R. (1980):** Groundwater Modelling: Applications: Groundwater, V.18, n.5, p.486-497.

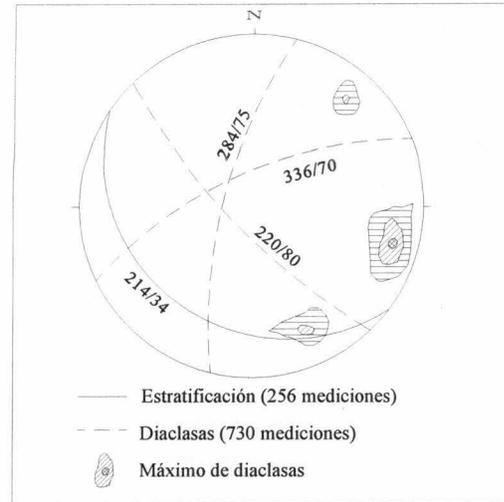
- Michazilk, D. (1986):** Stratigraphy and paleogeography of the Northeastern Sierra Madre Oriental, Mexico (Triassic-Lowermost Cretaceous), -Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 1985 (9/10): 1161-1169.
- Michazilk, D. (1987):** Sedimentación y sucesión de facies en un margen continental pasivo del Triásico al Cretácico Temprano del Noreste de la Sierra Madre Oriental, México. Actas Fac. de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., Linares, 2, p. 27-31.
- Monarrez Q., T. (1976):** Geología Aplicada al estudio Geohidrológico de las calizas en la zona sur de Saltillo, Coah. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería. U.N.A.M. 65 pp (sin publicar).
- Morán Zenteno, D. (1984):** Geología de la República Mexicana. Secretaría de Programación y Presupuesto (S.P.P.). 82 pp.
- Muñoz Hernández, B. (1988):** Impacto geotécnico de la urbanización en zonas montañosas. XIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Monterrey, Nuevo León, México. Memorias, 1, 1-13.
- Murillo Martínez, M. A. (1986):** Estudio hidrogeoquímico del área metropolitana de Monterrey, N.L.. Tesis de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería en Salud Pública. Fac. de Ingeniería Civil, U.A.N.L. 54 pp, 6 anexos (sin publicar).
- Navarro de León, I. (1997):** Estudio hidrogeológico de la Loma Los Pozos durante el llenado de la presa "El Cuchillo Solidaridad", China, Nuevo León, México. Tesis de Maestría en Ciencias Geológicas. Fac. de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León (sin publicar).

- Padilla y Sánchez, R. J. (1982):** Geologic Evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México.- Ph. D. Diss., Univ. of Texas at Austin, p.217 (sin publicar).
- Padilla y Sánchez, R. J. (1986):** Post-Paleozoic tectonics of Northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*. Vol. 25-1, pp 157-206.
- Piper, A.M. (1944):** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions*, v. 25, p. 914-923.
- Planimex, Ingenieros Consultores, S. A. (1977):** Abastecimiento de agua al área metropolitana de Monterrey. Plan maestro, primera etapa. Tomo I. 305 pp.
- Peavy, H.S., Rowe, D.R. & Tchobanoglous, G.(1985):** *Environmental Engineering*. McGraw-Hill International Editions. 720 pp.
- Schöller, H.(1964):** La classification géochimique des aux. IASH. General assembly of Berkeley, publ. 64, pp. 16-24.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), (1989):** Acuerdo sobre criterios ecológicos de la calidad del agua. CE-CCA-001. 18 p.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1966):** Agua Potable para Monterrey, N.L.. Proyecto de captaciones en la cuenca del Río San Fernando. Estudio de Factibilidad Técnica y Económica. Reporte interno. 79 pp.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1966):** Agua Potable para Monterrey, N.L.. Estudio Hidrológico (1ª etapa). Reporte interno, 54 pp.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1966):** Estudio Geohidrológico del Estado de Nuevo León. Estudio Hidrogeológico, tomo III. Reporte interno, 103 pp.

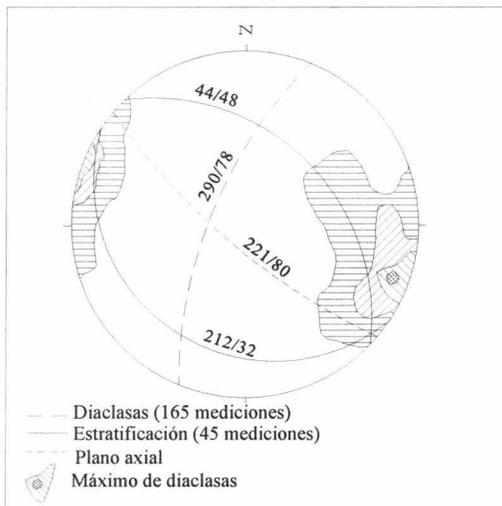
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1966):** Estudio Geohidrológico del Estado de Nuevo León. Hidrología Subterránea, tomo V. Reporte interno, 45 pp.
- Sherbon Hills, E. (1977):** Elementos de geología estructural. Ed. Ariel, 576 p. España.
- Struckmeier, W. F. & Margat, J. (1995):** Hydrogeological maps. A guide and a standard legend. International Association of Hydrogeologists. In *International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 17, 177 pp., 29 fig., 6 tbl., 4 plates. Verlange Heinz Heinse.
- Wall, J.R. (1961):** Geology and regional relationships of the Sierra del Fraile, Nuevo León, México. Dissertation for the degree of Doctor in Philosophy in the Department of Geology. Lousiana State University. U.S.A. 99 pp (sin publicar).
- Werner, J.(1996):** Introducción a la Hidrogeología. Primera edición. Editado por la Fac. de Ciencias de la Tierra de la Univ. Autónoma de Nuevo León. 174 p.
- Wilson, E. M. (1982):** Engineering Hydrogeology. Second Edition. MacMillan Press LTD. 232 pp.



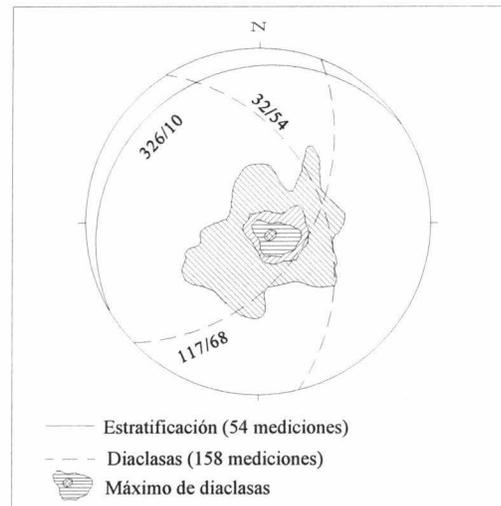
Anexo 1A. Estereograma de Schmidt mostrando la posición estructural entre la estratificación y el diaclasamiento (ac y bc), así como la dirección del eje del anticlinal ($\beta=138/14$) en la Sierra de Las Mitras en el extremo Sureste.



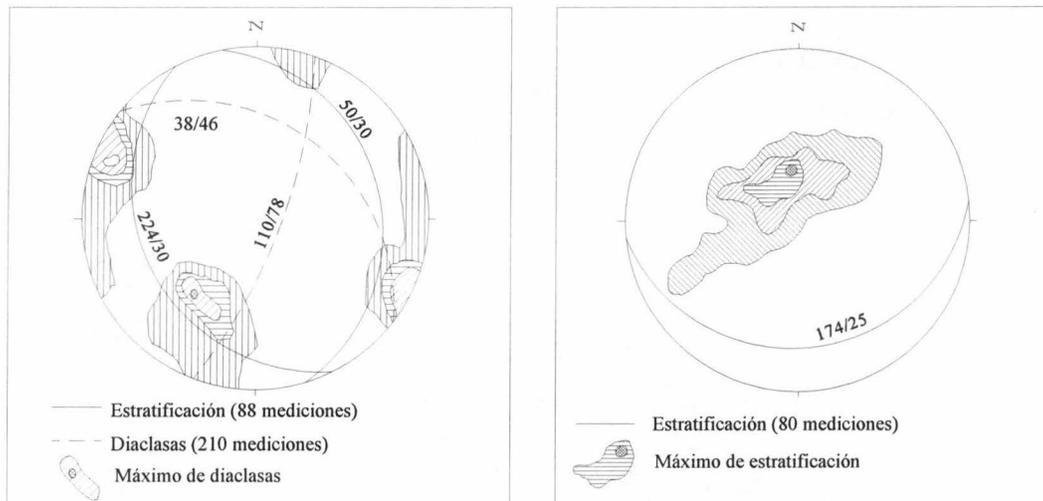
Anexo 1B. Estereograma de Schmidt realizado en el Cerro El Durazno. Sólo se representan datos del flanco Sureste del Anticlinal.



Anexo 1C. Estereograma de Schmidt realizado en la Loma de Vista Hermosa. Obsérvese la semejanza estructural que guarda con respecto de la Sierra Las Mitras.



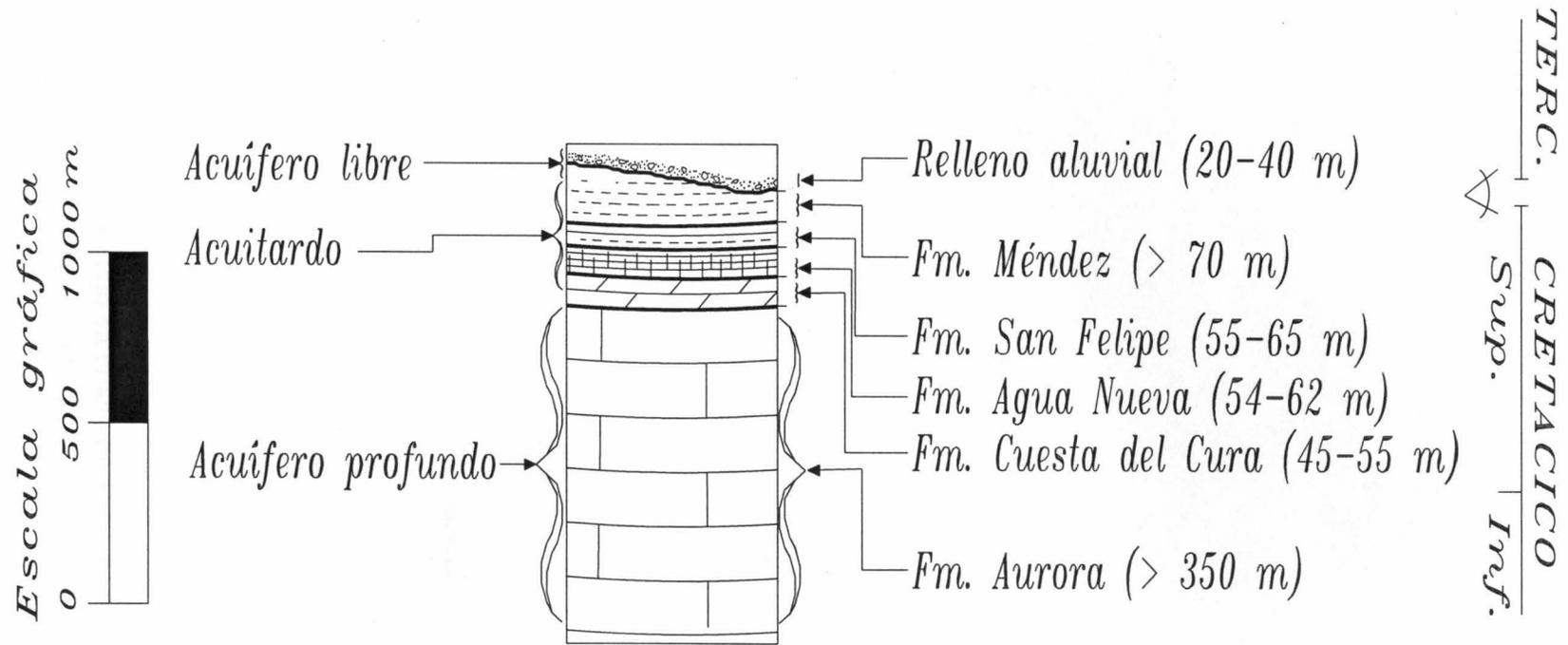
Anexo 1D. Estereograma de Schmidt realizado en el Cerro del Topo, extremo Norte. Sólo se representa el extremo Norte del anticlinal.



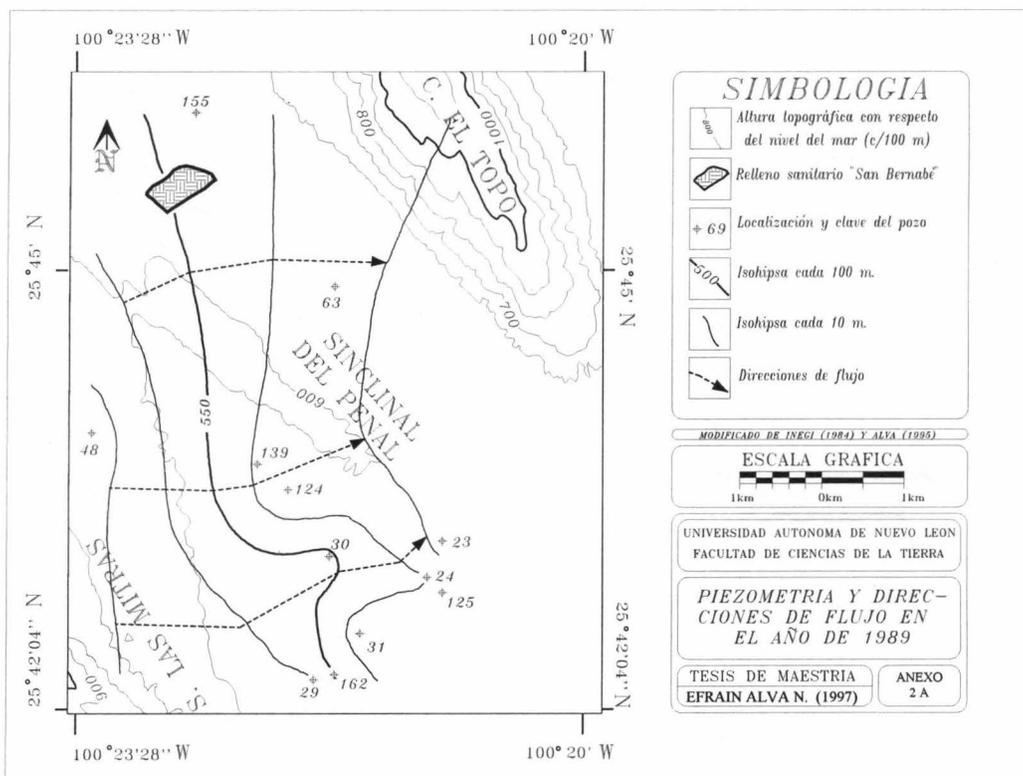
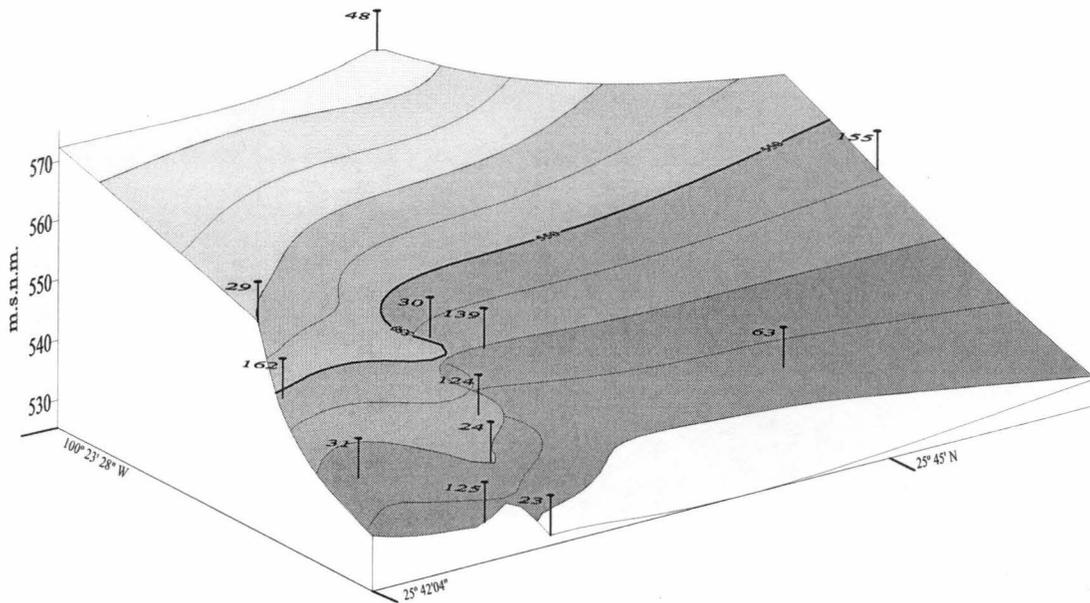
Anexo 1E. Estereograma de Schmidt realizado en el Cerro del Topo, en la parte central. En esta zona las características estructurales se asemejan a las obtenidas para la Sierra de Las Mitras.

Anexo 1F. Estereograma de Schmidt realizado en el Cerro del Topo, extremo Sureste. Los datos representados son sólo de estratificación, ya que el patrón de diaclasamiento es semejante a los mostrados en los anexos 1D y 1E.

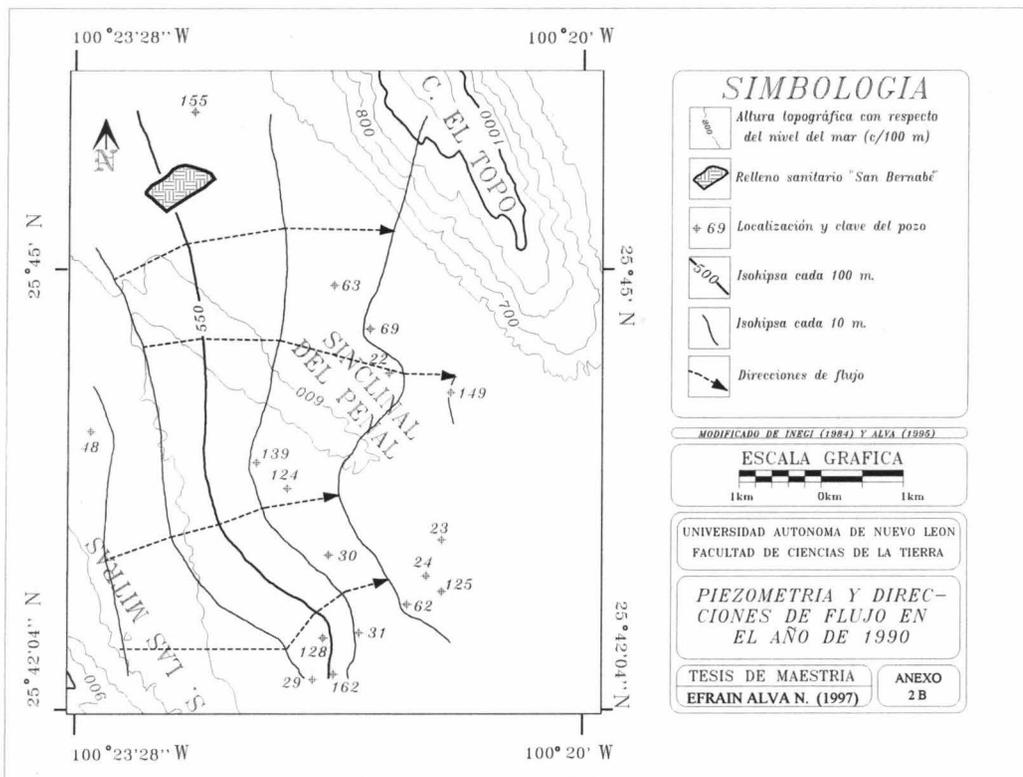
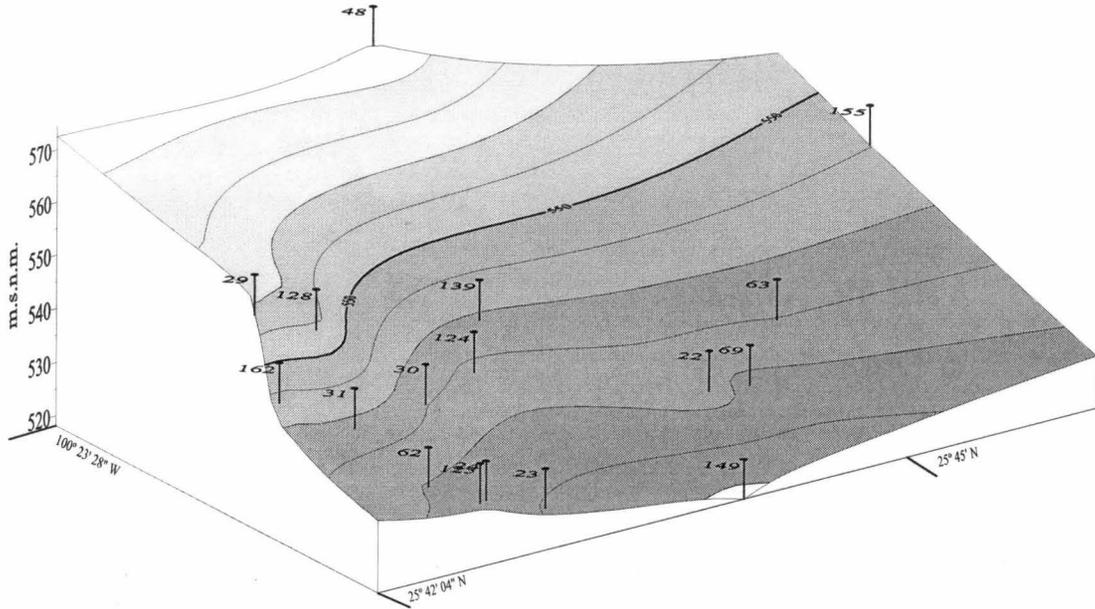
PERFIL HIDROGEOLOGICO



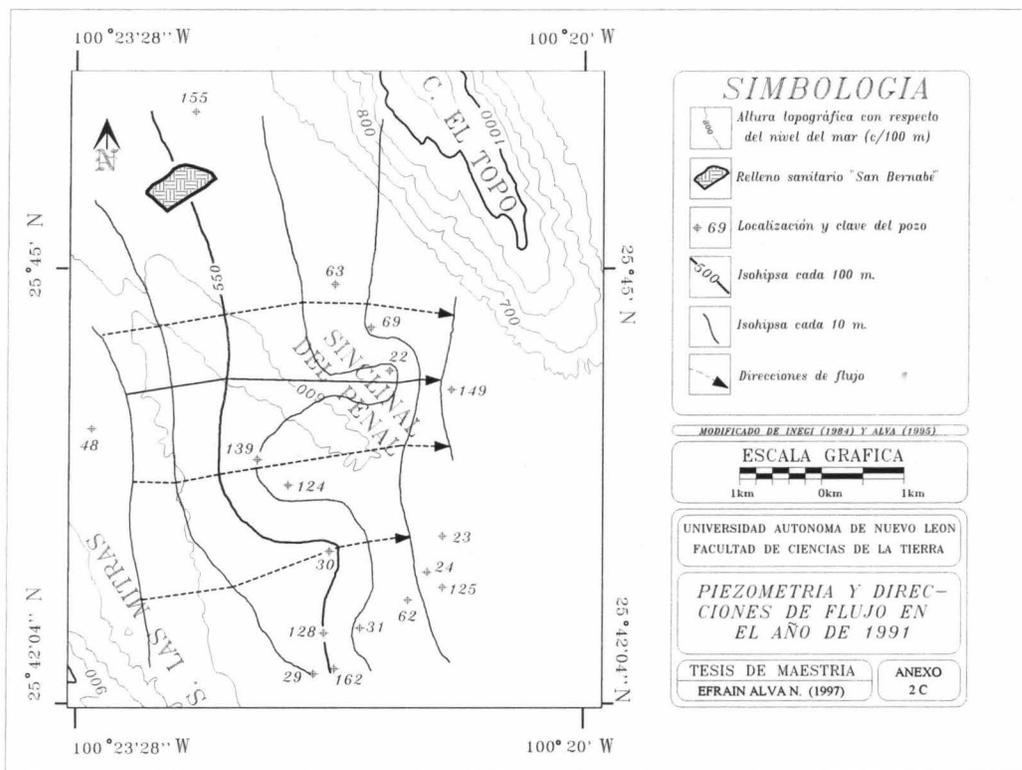
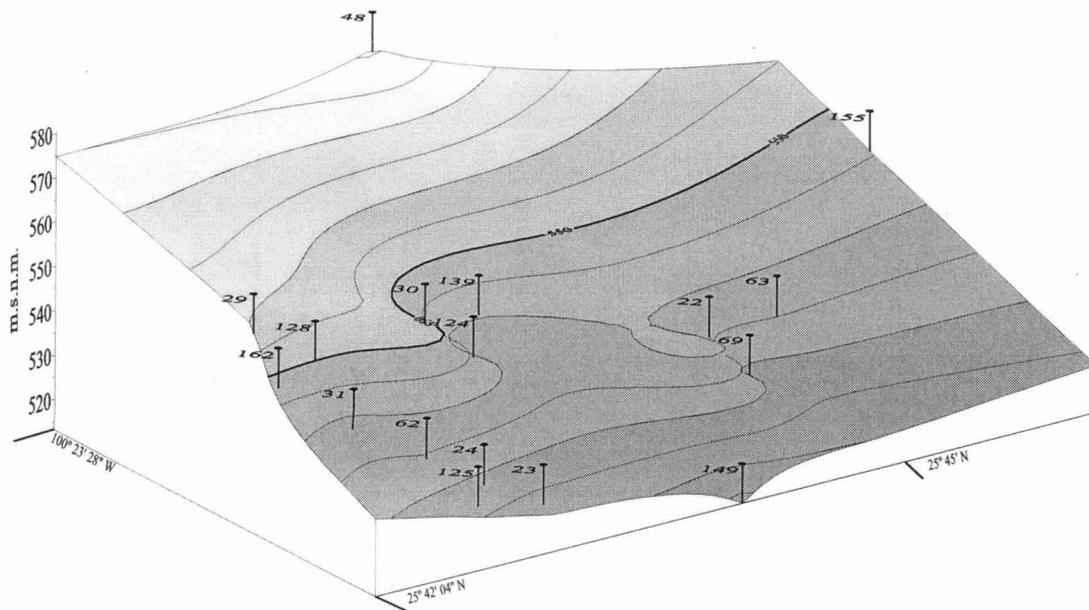
Anexo 2. Perfil hidrogeológico resaltando la posición de los diferentes acuíferos en el área de estudio.



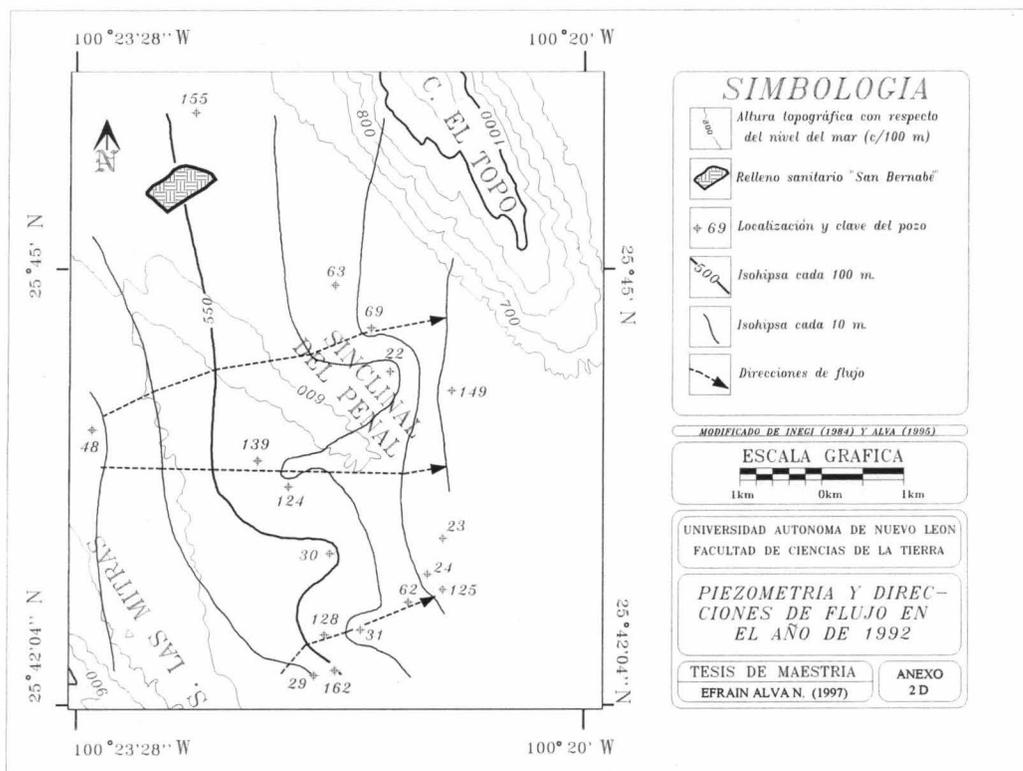
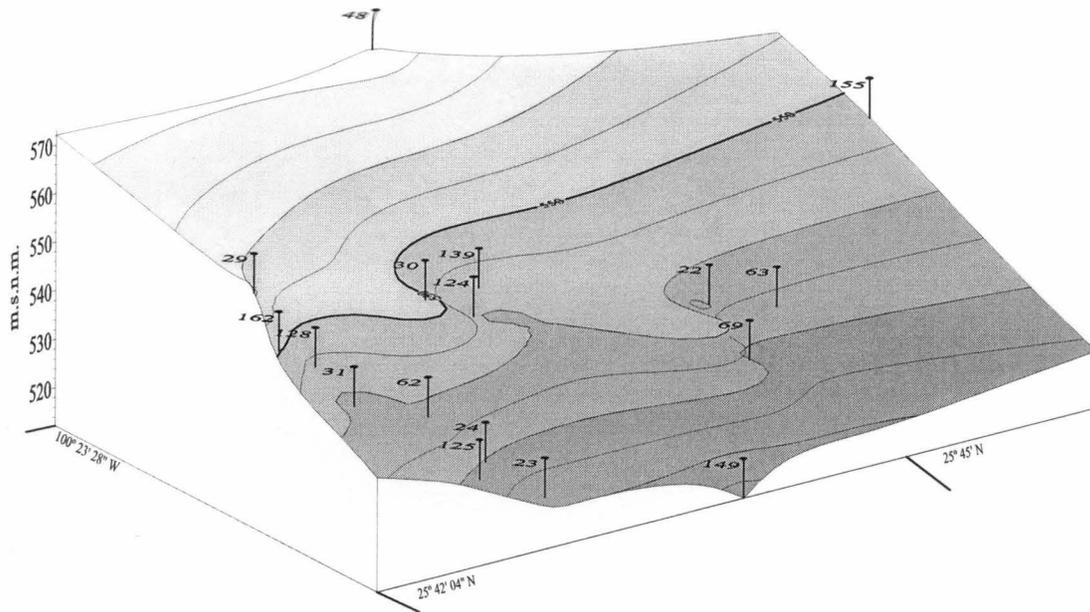
Anexo 2A. Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1989. El nivel dinámico promedio se registró a los 9.48 m bajo la superficie.



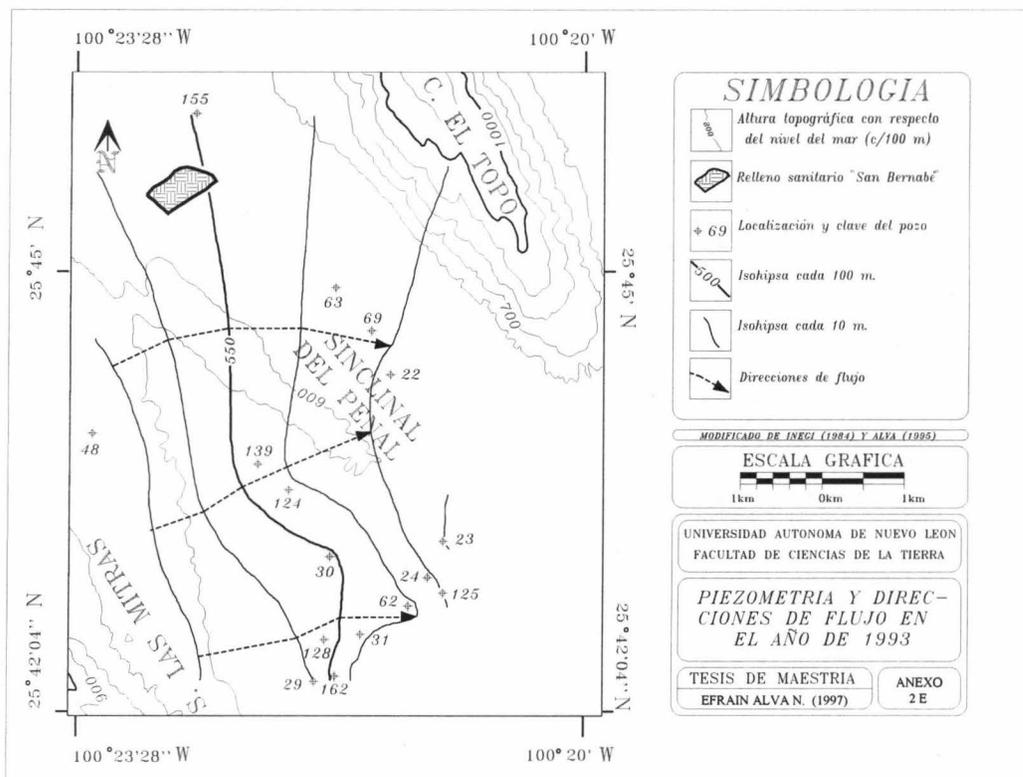
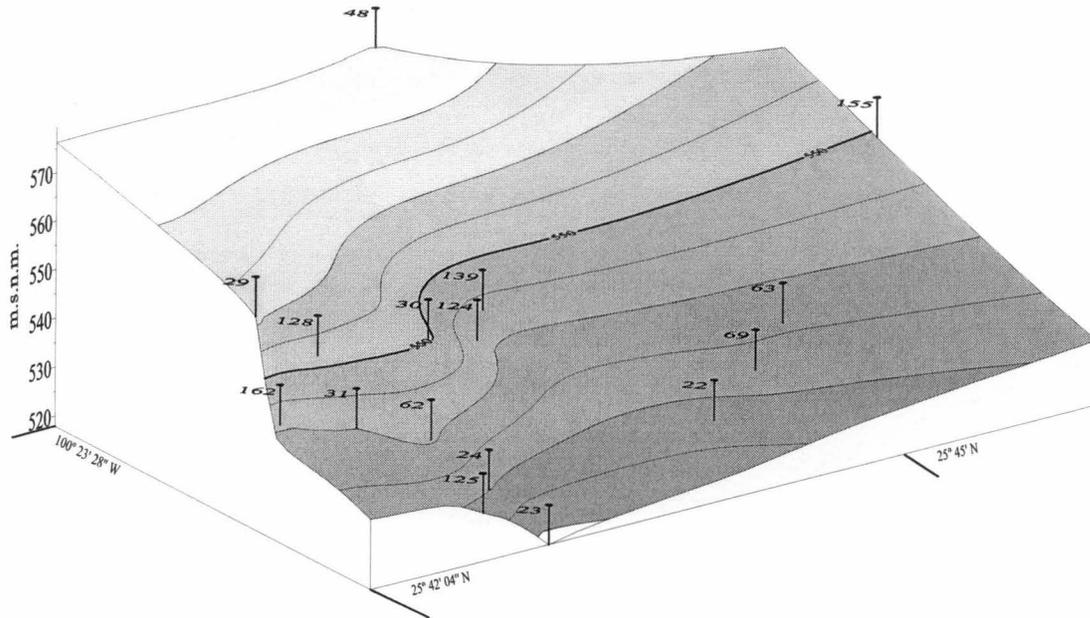
Anexo 2B. Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1990. El nivel dinámico se registró en los 25.33 m bajo la superficie, en promedio.



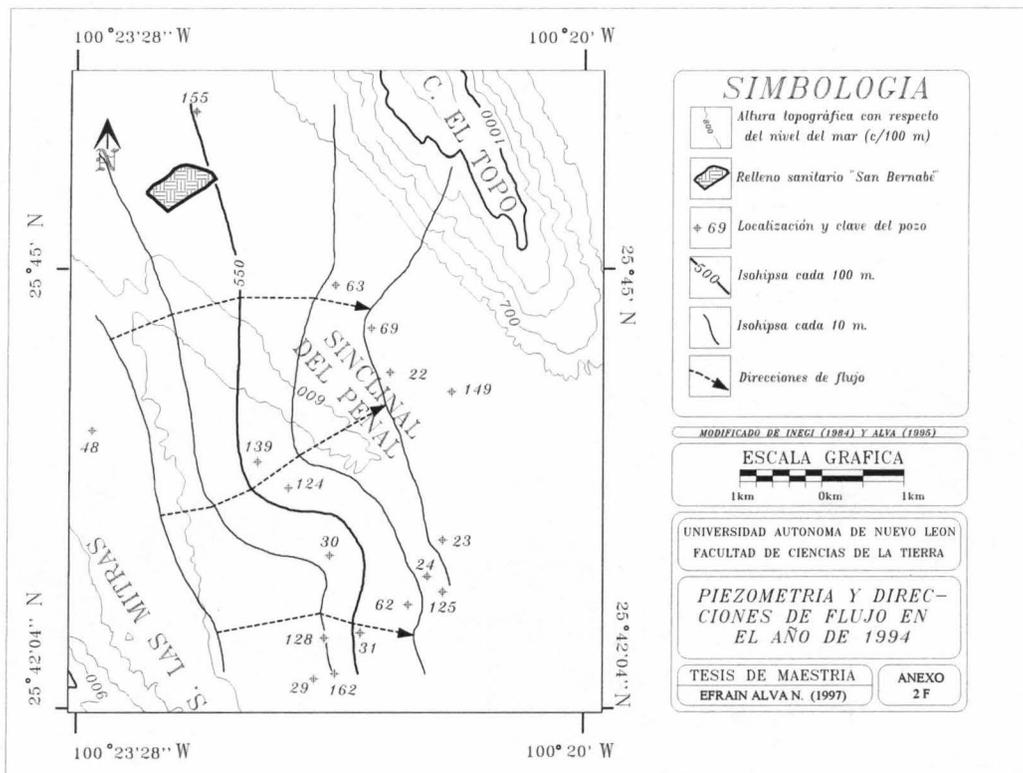
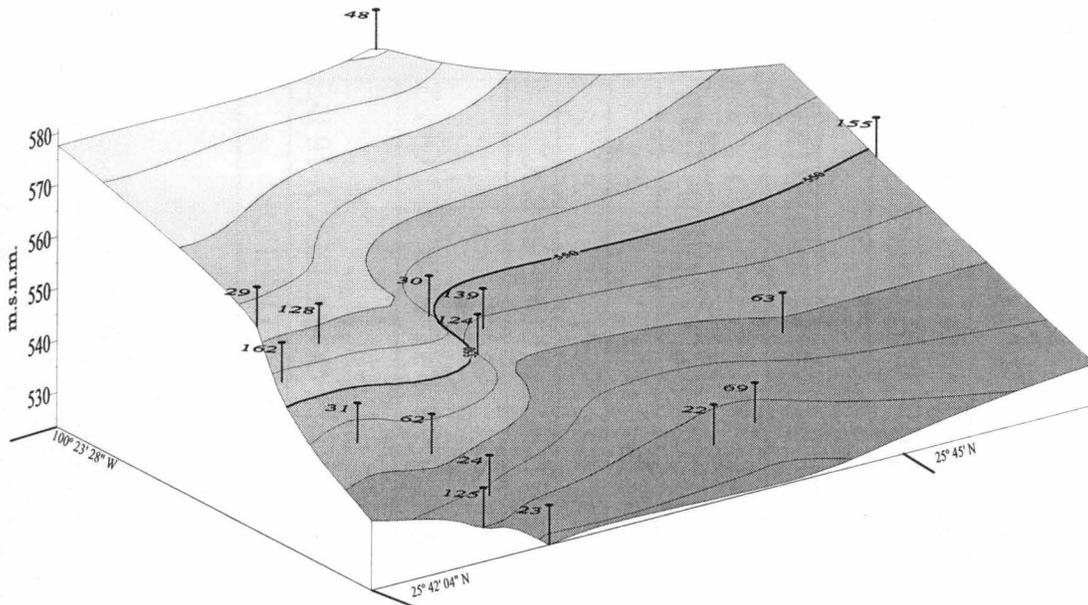
Anexo 2C. Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1991. En promedio, el nivel dinámico se registra en los 19.07 m bajo la superficie.



Anexo 2D. Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1992. El nivel promedio se encuentra a los 19.22 m bajo la superficie.



Anexo 2E. Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1993. El nivel dinámico se encontraba a 16.63 m en promedio bajo la superficie.



Anexo 2F. Piezometría y direcciones de flujo en el año de 1994. La profundidad del nivel dinámico fué de 19.50 m en promedio.

TABLA 1. UBICACIÓN DE POZOS ANALIZADOS.

DATOS DE CAMPO. FECHA DE MUESTREO:22-NOV.-1995. LUGAR: NW DE MONTERREY	
CLAVE DEL POZO	UBICACION (CALLE, COLONIA)
162 BUROCRATAS II (DEL ESTADO)	CALLE 5, U. HAB. A. LOPEZ MATEOS
23 M-5 VALLE MORELOS	CHAPULTEPEC Y TEPOZTLAN, VALLE MORELOS
128 ANTIGUO CAMINO A V. DE GARCIA	ANT. CAMINO A V. DE GARCIA, RUIZ CORTINEZ Y 16 DE SEPTIEMBRE
29 M-12 BUROCRATAS FEDERALES	JOSEFA O.DE DOMINGUEZ Y CALLE 5, U. HAB. A. LOPEZ MATEOS
139 VALLE VERDE 2º SECTOR	IBIS, ENTRE PINGÜINO Y AGAMIS, V. VERDE 2º SEC.
124 SANTA CECILIA	SAN MARINO Y MESSINA, STA. CECILIA
155 SAN BERNABE	NEPENTA Y FORMON, FOMERREY 113
30 M-15 VILLA MITRAS	VALLE DEL CAUCA Y VALLE DORADO, UNID. HAB. GRAL. NARANJO
31 M-16 LINCOLN I	URUAPAN Y NVA. INGLATERRA, JARDIN DE LAS MITRAS
63 N-42 SAN MARTIN I	MITRE Y T. DE ALVEAR, SAN MARTIN
69 N-51 GRANJA SANITARIA II	R. CABALLERO Y DR. A. MTZ.,GRANJA SANITARIA
48 N-19 HDA. MITRAS	HDA. BARTOLO Y HDA. EL MOLINO, HDA. MITRAS
125 F. VELAZQUEZ Y G.DE MEXICO	AVE. F. VELAZQUEZ Y GOLFO DE MEXICO, NVA MORELOS
24 M-6 NUEVA MORELOS	ARIZONA Y MAREA ALTA, NVA. MORELOS

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DETERMINADAS EN CAMPO.

Fecha de muestreo: Noviembre 22, 1995.

CLAVE DEL POZO	CONDUCTIV. (μ mhos/cm)	T. MUESTRA (°C)	T. AMB. (°C)	pH	S.D.T. (mg/L)
162 BUROCRATAS II (DEL ESTADO)	656 H	25	29	7.5	328
23 M-5 VALLE MORELOS	1051	25.5	25	7.5	525
128 ANTIGUO CAMINO A V. DE GARCIA	897	25	27	7.2	448
29 M-12 BUROCRATAS FEDERALES	767	25	29	7.6	384
139 VALLE VERDE 2º SECTOR	831	25	20	7.4	415
124 SANTA CECILIA	873	25.5	21	7.3	435
155 SAN BERNABE	983	25	22	7.5	492
30 M-15 VILLA MITRAS	850	26	27	7.3	425
31 M-16 LINCOLN I	886	25	29	7.4	444
63 N-42 SAN MARTIN I	1327	25.5	22	7.3	657
69 N-51 GRANJA SANITARIA II	1570	25.5	24	7.4	785
48 N-19 HDA. MITRAS	866	25	20	7.3	434
125 F. VELAZQUEZ Y G. DE MEXICO	907	25.5	25	7.3	453
24 M-6 NUEVA MORELOS	957	25.5	25.5	7.4	478

TABLA 3. RESULTADOS DE ANIONES Y CATIONES ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

POZO	(HCO ₃) ⁻ /l		(Cl) ⁻ /l		(SO ₄) ⁻² /l		(NO ₃) ⁻ /l	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
162	314.2	5.15	17.95	0.51	56.0	1.17	50	0.81
23	345.7	5.67	55.39	1.56	145.7	3.03	100	1.61
128	340.8	5.59	32.80	0.93	98.8	2.06	75	1.21
29	328.1	5.38	23.21	0.65	70.0	1.46	50	0.81
139	358.9	5.88	33.73	0.95	63.8	1.33	75	1.21
124	361.4	5.92	32.49	0.92	70.4	1.47	75	1.21
155	334.2	5.48	61.89	1.75	34.6	0.72	150	2.42
30	360.2	5.90	34.04	0.96	30.9	0.64	75	1.21
31	348.7	5.72	35.59	1.00	87.6	1.82	75	1.21
63	336.8	5.52	103.67	2.92	105.8	2.20	125	2.02
69	381.9	6.26	165.56	4.67	150.6	3.14	150	2.42
48	381.3	6.25	42.70	1.20	25.1	0.52	100	1.61
125	307.6	5.04	27.85	0.79	99.6	2.07	50	0.81
24	372.2	6.10	38.99	1.10	117.3	2.44	100	1.61

**TABLA 3. RESULTADOS DE ANIONES Y CATIONES ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO
(CONTINUACIÓN).**

POZO	(Ca) ⁺⁺ /l		Mg/l		K/l		Na/l	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
162	97.47	4.86	20.18	1.66	0.82	0.02	15.30	0.67
23	140.36	7.00	30.04	2.47	1.20	0.03	42.15	1.83
128	132.56	6.61	26.28	2.16	0.55	0.01	22.30	0.97
29	121.65	6.07	18.74	1.54	0.79	0.02	14.20	0.62
139	116.19	5.80	30.54	2.51	1.18	0.03	18.60	0.81
124	123.21	6.15	29.12	2.40	1.17	0.03	18.95	0.82
155	123.98	6.19	34.31	2.82	1.19	0.03	23.60	1.03
30	155.96	7.78	8.31	0.68	0.69	0.02	15.40	0.67
31	132.56	6.61	22.97	1.89	1.01	0.03	22.30	0.97
63	142.70	7.12	51.28	4.22	2.05	0.05	42.95	1.87
69	169.99	8.48	61.63	5.07	2.21	0.06	57.85	2.52
48	131.78	6.58	27.69	2.28	0.63	0.02	8.40	0.37
125	116.97	5.84	30.07	2.47	0.98	0.03	21.65	0.94
24	106.83	5.33	42.22	3.47	1.11	0.03	28.65	1.25

TABLA 4. PORCENTAJE DE IONES PRESENTES EN LAS MUESTRAS ANALIZADAS.

	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Ca	Mg	Na	K
POZO	%	%	%	%	%	%	%	%
162	28.04	4.37	11.53	4.48	32.45	13.75	5.24	0.14
23	33.04	5.37	3.60	6.77	43.55	3.83	3.75	0.10
128	33.20	6.40	2.78	8.57	34.93	12.10	1.94	0.09
29	28.60	5.16	11.45	7.56	24.99	16.28	5.84	0.13
139	31.77	5.14	7.17	6.53	31.30	13.56	4.37	0.16
124	31.32	4.85	7.75	6.40	32.50	12.67	4.36	0.16
155	34.71	3.41	7.86	5.43	32.77	11.19	4.48	0.14
30	26.82	8.55	3.53	11.84	30.28	13.82	5.02	0.15
63	24.41	6.73	13.07	6.95	30.17	10.65	7.90	0.13
69	28.59	4.74	10.53	6.19	33.85	11.06	4.96	0.07
31	19.20	14.32	9.61	7.42	26.01	15.55	7.72	0.17
48	32.51	3.96	8.81	4.87	36.69	9.32	3.73	0.12
125	21.30	11.28	8.50	7.78	27.47	16.27	7.21	0.20
24	29.69	5.21	9.47	6.28	34.36	9.81	5.04	0.13

TABLA 5. PRINCIPALES ÍNDICES GEOQUÍMICOS DETERMINADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

POZO	ERROR DE REACCION	R.A.S.	INDICE GEOQUIMICO	Mg / Ca	K / Na	(Na+K) / (Ca+Mg)	Cl / HCO3
162	3.16	0.16	81.67	1.07	0.05	0.18	500.05
23	2.44	0.12	74.76	1.05	0.05	0.14	649.45
128	-1.89	0.06	80.70	0.96	-0.03	-0.10	1.314.32
29	-5.52	0.21	83.15	0.90	-0.04	-0.25	395.95
139	-1.21	0.14	78.05	0.98	-0.12	-0.06	556.23
124	-0.63	0.14	78.66	0.99	-0.23	-0.03	557.85
155	-2.82	0.13	72.97	0.95	-0.05	-0.18	560.09
30	-1.46	0.17	86.64	0.97	-0.12	-0.06	506.65
31	-1.10	0.34	96.07	0.98	-0.31	-0.02	281.10
63	-2.31	0.30	85.84	0.95	-0.13	-0.09	288.25
69	-0.09	0.16	82.79	1.00	-1.78	0.00	505.69
48	-0.29	0.11	77.44	0.99	-0.39	-0.01	691.85
125	2.30	0.28	91.92	1.05	0.12	0.10	331.36
24	-1.32	0.17	80.91	0.97	-0.13	-0.06	486.51