UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DEL TIRADERO MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N. L., MÉXICO

TESIS

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

PRESENTA:

LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

LINARES, NUEVO LEÓN JUNIO 2003

TM
Z5818
.E3
FCT
2003
.L5

ILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA MAESTRÍA 2003

1020148516

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DEL TIRADERO MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N. L., MÉXICO

TESIS

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

PRESENTA:

LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

LINARES, NUEVO LEÓN JUNIO 2003

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

HDA. DE GUADALUPE CARR. A CERRO PRIETO KM. 8, A.P. 104
67700 LINARES, NUEVO LEÓN MÉXICO
TELS. (821) 2 43 02 Y 2 20 13, FAX (821) 2 43 26

La tesis

"ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DEL TIRADERO MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N.L., MÉXICO"

elaborada por

LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

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

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

DIRECTOR DE TESIS

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

LINARES, N.L. **MAYO 2003**

TM
Z5
.3
.003
.5

FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

HDA DE GUADALUPE CARR A CERRO PRIETO KM 8, A P 104
67700 LINARES NUEVO LEON MEXICO
TELS 821) 2 43 02 Y 2 20 13 FAX (821) 2 43 26

La tesis

"ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ÁREA DEL TIRADERO MUNICIPAL Y LA PETACA, LINARES, N.L., MÉXICO"

elaborada por

LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

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

MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.
COMITÉ DE REVISIÓN

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

DR. FRANCISCO MEDINA BARRERA

DR. JOSÉ DE JESÚS NÁVAR CHÁIDEZ
Fac. Ciencias Forestales, UANL

Vo. Bo.
SUBDIRECTOR DE POSGRADO

DR. JUAN ALONSO RAMÍREZ FERNÁNDEZ

LINARES, N.L. **JUNIO 2003**

"Análisis y evaluación del agua subterránea del área del Tiradero Municipal y La Petaca, Linares, N.L., México"

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos son dedicados a todos aquellos que han contribuido al logro de una más de mis metas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la concesión de la beca-crédito.

Gracias al proyecto PAICyT CT346-00 fue posible la realización de análisis en muestras de agua.

Toda mi gratitud a los Dres. Héctor de León Gómez y Francisco Medina Barrera por su asesoría y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, asi como por la revisión y correcciones del mismo.

Al Dr. José de Jesús Návar Cháidez por su asesoría, apoyo técnico y económico durante todo este proceso de mi formación y durante el desarrollo de esta tesis. Un agradecimiento especial por las revisiones de este trabajo y por su invaluable ayuda.

Un sincero agradecimiento al Dr. Fernando Velasco Tapia por sus comentarios y sugerencias.

Al personal docente, técnico y administrativo que labora en la Facultad de Ciencias de la Tierra (FCT) por su ayuda durante mi estancia en esta institución. A mis compañeros becarios y amigos por sus contribuciones y compañía durante la fase de campo.

Mi más grande y profundo agradecimiento a mi familia, por ser parte vital en mi vida, por representar el mayor apoyo que he recibido siempre y por permitirme formar parte de ellos: a mis padres, abuelos y tíos. En especial a Graciela, por toda su paciencia y comprensión durante esta etapa.

ÍNDICE **PÁG.**

Lista de figuras i

Lista de fotos iii

Lista de tablas v

Lista de anexos vii

Nomenclaturas y abreviaturas viii

Resumen xi

Summary xiii

Introducción xv

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1 Antecedentes 1

1.1.1 Revisión de literatura 2

1 1.2 Hipótesis 3

1.1.3 Objetivos 3

1.1.4 Metas 4

1.2 Rasgos geográficos 5

1.2.1 *Localización y vías de acceso* 5

1.2.2 Clima y vegetación 6

1.2.3 Suelos 7

1.2.4 Hidrología 7

1.2.5 Fisiografía 8

1.2.6 Literatura citada 8

CAPÍTULO 2 GEOLOGÍA

Introducción 10

2.1 Metodología 10

2.2 Geología regional 11

2.3 Geología del área de estudio 12

2.4 Estratigrafía 13

2.4.1 Formación Méndez 13
2.4.2 Depósitos terciarios 17
2.4.3 Depósitos cuaternarios 17
2.5 Geología estructural 21
2.6 Discusión y análisis del fracturamiento 23
2.7 Literatura citada 26

CAPÍTULO 3 HIDROGEOLOGÍA
Introducción 28
3.1 Metodología 29
3.2 Sistema hidrogeológico 31
3.3 Unidades hidrogeológicas 31
3.3.1 Acuífero de poros 32
3.3.2 Acuífero de grietas 32
3.4 Discusión y análisis de carta hidrogeológica 33
3.5 *Discusión y análisis del monitoreo mensual* 36
3.6 Literatura citada 38

CAPÍTULO 4 HIDROGEOQUÍMICA
Introducción 40
4.1 Metodología 41
4.2 Distribución de parámetros físicos e hidrogeoquímicos 44
4.2.1 Caracterización hidrogeoquímica del tipo de aguas (según Piper) 51
4.2.2 Caracterización de las aguas según el contenido de TSD 54
4.2.3 Clasificación del tipo de aguas por su dureza 55
4.2.4 Clasificación SAR 55
4.2.5 Parámetros que sobrepasan los límites máximos permisibles (LMP) 57
4.3 Análisis del monitoreo mensual 60
4.4 Variaciones espacio/temporales en las concentraciones 64
4.5 Discusión de resultados hidrogeoquímicos 69
4.6 Discusión sobre la calidad del agua 70

4.7 Literatura citada 72

CAPÍTULO 5 RELACIONES ENTRE GEOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA

Introducción 74

Análisis preliminar y discusión 74

CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA A LA CONTAMINACIÓN

Introducción 76

6.1 Metodología 77

6.2 Análisis de vulnerabilidad del área 79

6.3 Discusión de resultados 83

6.4 *Literatura citada* 84

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES 86

LITERATURA CITADA 89

ANEXOS 90

LISTA DE FIGURAS

PÁG.

Fig. 1	Localización y vías de acceso del área de estudio (Modificado de la carta topográfica Linares G14C58 INEGI, 1999)	6
Fig. 2	Columna estratigráfica general de la Curvatura de Monterrey en el NE de México (modificada de De la Garza-González, 2000)	12
Fig. 3	Estado de las fracturas cuando estas se encuentran cerradas, abiertas y rellenas, (tomado de Barton et al., 1978)	24
Fig. 4	Tipos de intersticios y relación entre la textura y la porosidad de las rocas. (a) Elementos de tamaño uniforme; porosidad alta. (b) Elementos homogéneos; baja porosidad. (c) Cantos rodados porosos heterogéneos; porosidad muy alta. (d) La porosidad ha disminuido por colmatación de los intersticios con materiales finos. (e) La porosidad de las rocas se debe a la disolución. (f) Rocas porosas por fracturación (Davis y De Wiest, 1971)	33
Fig. 5	Camino local del agua a través de las fracturas abiertas (flechas pequeñas). La línea punteada indica la dirección del agua subterránea (Werner, 1996)	34
Fig. 6	Diagrama de dispersión en el que se indican las variaciones del nivel freático (media) respecto a la duración del monitoreo realizado en el 2002	37
Fig. 7	Comportamiento de la precipitación y la evaporación durante el período de monitoreo realizado en el 2002	37
Fig. 8a	Zona 1: Muestras tomadas del cauce del río Pablillo y sus zonas aledañas. Aguas de tipo cálcico-sulfatadas (predomina el calcio)	52
Fig. 8b	Zona 2: Muestras tomadas en la colonia La Petaca que presentan concentraciones similares. Aguas de tipo cálcico-bicarbonatadas (predomina el calcio)	53

Fig. 8c	Zona 3: Muestras tomadas de los alrededores del antiguo tiradero municipal. Aguas de tipo bicarbonatada-cálcicas (predominan bicarbonatos)	53
Fig. 9	Diagrama de clasificación para aguas destinadas al riego según el U.S. Salinity Laboratory Staff (tomado de Custodio y Llamas, 1996)	56
Fig. 10a,b,c, d,e,f,g,h	Diagramas de distribución de cada elemento analizado durante el monitoreo hidrogeoquímico, indicando las variaciones observadas para cada uno de ellos durante el período de mediciones comprendido entre marzo y agosto del 2002	62
Fig. 11	Análisis de correspondencia canónica para detectar agrupamientos y tendencias de aprovechamientos hidráulicos y elementos químicos analizados en laboratorio, en Linares, N.L. México	65
Fig. 12	Análisis de correspondencia canónica para detectar agrupamientos y tendencias de aprovechamientos hidráulicos y elementos químicos analizados durante el monitoreo mensual, en Linares, N.L. México	66
Fig. 13	Sistema empírico GOD, por medio del cual se realiza el análisis de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (traducción de Foster, 1987)	81

LISTA DE FOTOS

PÁG.

Foto 1	Bloques de areniscas en la parte alta de El Cerrito, con espesor de 1.50 m. El buzamiento de sus estratos tiene una orientación hacia el SE con 42°	14
Foto 2	Bloques de areniscas intercaladas con material lutitico altamente intemperizado, mostrando una estratificación semi-horizontal con 14° de buzamiento hacia el SE. Afloramiento cercano al punto E. (Anexo 1)	14
Foto 3	Bloques de areniscas que muestran un alto intemperismo. Es una secuencia intercalada con rocas lutiticas, localizada en la cima del cerro La Tortuga	15
Foto 4	Distintos grados de intemperismo en rocas lutiticas. Se observa foliación y rellenos de calcita, los que indican antiguas infiltraciones (sobre el flanco N-NE del cerro La Tortuga)	16
Foto 5	Sobre la roca consolidada se deposita una cubierta de suelo intercalada con material calichoso, la cual contiene restos de materia orgánica y raíces. El espesor varía desde pocos cm a 1 m	16
Foto 6	Conglomerados (T 4) poco consolidados, con intercalación de material limoso-arcilloso. Descansa sobre lutitas de la Formación Méndez muy intemperizadas. En la superficie se deposita una cubierta de material húmico. Afloramiento H. (Anexo 1)	18
Foto 7	Conglomerados poco consolidados intercalados con material calichoso, forman la parte superior del acuífero de poros. Sobre la terraza No. 3 se asienta la colonia La Petaca	19

Foto 8	Terraza No. 1 sobre el cauce del río Pablillo. Estos son los sedimentos aluviales más recientes, ya que continuamente se están retransportando y depositando. Presenta una interacción de influencia del río con el acuífero de poros	20
Foto 9	*Residuos sólidos en contacto directo con las rocas fracturadas.* La apertura entre fracturas y la ausencia de geomembranas facilitan la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. El nivel freático se localiza a 17 m de profundidad en esta zona	25
Foto 10	Punto de monitoreo (P16). Equipo empleado para la localización de los aprovechamientos hidráulicos y el estudio hidrogeológico (sonda sonora, GPS y altímetro)	29
Foto 11	Punto de observación (P39), en el que se observa la litología del acuífero que comprende las gravas semi-cementadas con material arcilloso de la terraza No. 3. La profundidad del nivel freático es de 11.33 m	32
Foto 12	Titulación de una solución (EDTA); el pH es controlado por un potenciómetro (a) para obtener la concentración de dureza parcial. Laboratorio de geoquímica, Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L.	45
Foto 13	Filtración al vacío de muestras para la obtención de los sólidos disueltos	46
Foto 14	Determinación de la alcalinidad de las muestras mediante un método volumétrico ácido-base	46
Foto 15	*Residuos sólidos de todo tipo depositados sin control en el tiradero* municipal; incluyen envases de aceites y grasas, sólidos oxidables; se encuentran sin cubierta impermeable	69
Foto 16a, b	Combustión de los residuos sólidos generando además de la infiltración de lixiviados al subsuelo, proliferación de gases en la atmósfera	70

LISTA DE TABLAS

PÁG.

Tabla 1	Descripción de las aperturas en base a su separación (tomado de Barton et al., 1978)	24
Tabla 2	Información tomada de Drescher (1995) para el acuífero de poros dentro del área de estudio	35
Tabla 3	Parámetros hidrodinámicos en diferentes medios acuíferos (citados por algunos autores)	35
Tabla 4	Métodos empleados para el análisis hidrogeoquímico de las muestras en Laboratorio	42
Tabla 5	Clasificación según Piper por iones predominantes (Custodio y Llamas, 1996)	52
Tabla 6	Clasificación del tipo de aguas en base a su conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1996)	52
Tabla 7	Clasificación hidrogeoquímica de las muestras tomadas durante el 2002 en el área de estudio	54
Tabla 8	Clasificación del tipo de aguas en base a su concentración del total de sólidos disueltos (Davis & De Wiest, 1971; Werner, 1996))	54
Tabla 9	Clasificación del tipo de aguas en base a su dureza (como $CaCO_3$ mg/L). Tomada de Custodio y Llamas, 1996	55
Tabla 10	Tipo de aguas para riego según el Salinity Laboratory Staff (Custodio y Llamas, 1996)	56
Tabla 11	Límites máximos permisibles (LMP) establecidos por diversos organismos para la calidad del agua	60

Tabla 12 Datos recopilados a lo largo del período de monitoreo, aplicados para la evaluación de la vulnerabilidad en el área 78

Tabla 13 Parámetros de clasificación empleados en base a las características del área de estudio 79

Tabla 14 Resultados obtenidos del análisis de vulnerabilidad empleando dos métodos de análisis 82

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Carta geológica-estructural del área del Tiradero municipal y La Petaca, Linares, N.L., México

Anexo 2 Perfiles geológicos en cerro La Tortuga

Anexo 3 Localización de los aprovechamientos hidráulicos monitoreados y las características litológicas de los acuíferos explotados

Anexo 4 Carta hidrogeológica del área del Tiradero municipal y La Petaca, Linares, N.L., México

Anexo 5 Registro de la información obtenida en los distintos aprovechamientos hidráulicos durante el monitoreo llevado a cabo en los meses de febrero a septiembre del 2002

Anexo 6 Perfiles hidrogeológicos del área Tiradero municipal-La Petaca, Linares, N.L., México

Anexo 7 Resultados obtenidos durante los análisis químicos realizados en laboratorio el 5 de marzo del 2002

Anexo 8 Resultados de análisis químicos realizados durante el monitoreo hidrogeoquímico

Anexo 9 Características físicas de los puntos de muestreo

Anexo 10 Carta de vulnerabilidad del área del Tiradero municipal y La Petaca, Linares, N.L., México

NOMENCLATURAS Y ABREVIATURAS

ac	Diaclasas de extensión
AP	Aprovechamientos hidráulicos
As^{+2}	Ión Arsénico
Ba^{+2}	Ión Bario
$BaSO_4{}^{2}$	Sulfato de bario
°C	Grados centígrados
Ca^{+2}	Ión Calcio
$CaCO_3$	Carbonato de calcio
C.E.	Conductividad eléctrica
Cl	Ión Cloruro
cm	Centimetros
CNA	Comisión Nacional del Agua
Com. Pers.	*Comunicación personal*
CO_2	Dióxido de carbono
CVM	Cinturón Volcánico Mexicano
Dbas	Distancia al tiradero municipal
Dmarr	Distancia a granjas porcícolas
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
D.T.	Dureza total
ECOL	Ecología
EDTA	Ácido etilendiamintetraacético
EEC	European Economic Community
et al.	Y colaboradores
Fac.	Facultad
Fig.	Figura
GM	Golfo de México
GPS	Geoposicionador satelital
hk0	Diaclasas de cizallamiento o corte
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

K	Ión Potasio
K	Permeabilidad
k	Conductividad hidráulica
km^2	Kilómetros cuadrados
LMP	Límite máximo permisible
M	Metros
mm	Milímetros
m/d	Metros por día
meq	Miliequivalente
mg/L	Miligramos por litro
Mg^{+2}	Ión Magnesio
μ mhos/cm	Micromhos por centímetro
mmhr	Milímetros por hora
m^3	Metros cúbicos
msnm	Metros sobre el nivel del mar
N	Norte
NE	Noreste
N.L.	Nuevo León
NMP	Número más probable
No.	Número
NOM	Norma
PAICyT	Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica
PCG	Planicie Costera del Golfo
PEMEX	Petróleos Mexicanos
Piez	Piezometría
pH	Potencial de hidrógeno
PO_4^{-3}	Fosfato
ppm	Partes por millón
R^2	Coeficiente de variación
RH	Región hidrológica
rNa	Miliequivalentes de sodio

RP-1	Río Pablillo – 1
SAR	Indice de adsorción del sodio
SE	Sureste
Se^{2}	Selenio
SEV´s	Sondeos eléctricos verticals (Schlumberger)
SMO	Sierra Madre Oriental
SO_4^{2}	Sulfatos
SW	Suroeste
T1 (2,3,4,5)	Terraza No. 1 (No. 2, No. 3, No. 4, No. 5)
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
US EPA	United States Environmental Protection Agency
Usuelo	*Uso del suelo*
W	Oeste
WHO	World Health Organization

RESUMEN

En el área de estudio existen fuentes de contaminación puntuales (tiradero de basura municipal) y difusas (granjas porcicolas, fosas sépticas y letrinas, zonas agrícolas, ganaderas, vertido de aguas residuales municipal e industriales) que favorecen la infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. Esta se transporta a través de dos medios acuíferos de profundidad somera, que están conectados hidráulicamente: el de grietas formado por las rocas de la Formación Méndez, que permiten la infiltración y el transporte de lixiviados a través del intenso fracturamiento (porosidad secundaria), y el acuífero de poros compuesto por sedimentos granulares semi-consolidados (conglomerados, gravas) de permeabilidad alta.

Sobre el acuífero de grietas se localiza el antiguo tiradero municipal, en el que se depositaron aproximadamente 300,000 toneladas de residuos sólidos durante su periodo de actividades, comprendido entre 1980-2001. Este sitio carece del diseño de sistemas colectores de lixiviados y gases, así como geomembranas que eviten su infiltración hacia el agua subterránea (NOM ECOL-084-1994; NOM-ECOL-083-1996). La dirección principal del fracturamiento coincide con la dirección general del flujo del agua subterránea (SW-NE) y con el transporte de contaminantes a través de las líneas de flujo subterráneo. Sobre el acuífero de poros se concentra la mayor influencia antropogénica, ya que es ahí donde se ubican las fosas sépticas y letrinas.

Se realizaron análisis físicos, químicos, bacteriológicos y de metales pesados en muestras de agua evaluados en base a normas oficiales según el consumo humano, doméstico y agrícola. Según los LMP establecidos para agua potable, existen altas concentraciones de sólidos disueltos, coliformes totales y fecales; contaminación por sulfatos, según WHO, por nitratos, según USEPA, WHO, EEC y NOM-ECOL-127-1996, por bario, según la NOM-ECOL-127-1996 y por mercurio, según USEPA, WHO, EEC y NOM-ECOL-127-1996.

De acuerdo a los parámetros uso de suelo, uso del agua, tipo de acuífero, profundidad del nivel freático y la distancia de los puntos de muestreo a las fuentes de contaminación, se establece un método propuesto para evaluar las condiciones de vulnerabilidad que presenta el agua subterránea. Además, se aplica el método GOD (Foster, 1987) para evaluar las condiciones de vulnerabilidad respecto al medio natural (G =medio acuífero, O =litología de capas superiores, D =profundidad del nivel freático), que evalúa la vulnerabilidad del agua subterránea respecto al medio físico.

De esta forma puede observarse que el acuífero de poros presenta una alta vulnerabilidad en condiciones naturales, así como a la presencia de actividades urbanas (especialmente sobre el cauce del río Pablillo). Por otro lado, el acuífero de grietas es considerado como de baja vulnerabilidad respecto al medio natural, mientras que los grados de vulnerabilidad respecto a la presencia antropogénica, varían dependiendo de la distancia hacia las principales fuentes de contaminación, la profundidad del nivel freático y del uso de suelo.

Se observa que el antiguo tiradero municipal, granjas porcícolas, poliductos de hidrocarburos, así como las fosas sépticas y letrinas, representan la principal amenaza a la calidad del agua subterránea (pozos y norias en Linares y La Petaca) y escurrimientos superficiales (río Pablillo, colector principal de la presa Cerro Prieto). En el presente trabajo se proponen medidas de control y remediación, que permitan disminuir el impacto ambiental que las actividades antropogénicas provocan en el agua subterránea.

SUMMARY

In the study area exist sources of puntual (municipal landfill) and diffuse contamination (porcine farms, septic tanks, latrines, agricultural zones, cattle zones, domestic and industrial residual water spills) that favours the infiltration of polluting agents towards the ground water. This flows are transported through two aquifer types of shallow depth, which are connected hydraulically: the fractured aquifer is formed by rocks of the Méndez Formation, that allows the infiltration of leachates and its transport through the fracturing (secondary porosity), and the porous aquifer is made up of semi-consolidated granular sediments (conglomerate, gravel) of high permeability.

On the fractured aquifer the municipal landfill is located, in which were deposited around 300.000 tons of solid wastes during its period of activities, comprended between 1980-2001. This site lacks of the design of collectors systems of leachates and gases, as well as geomembranes that avoid their infiltration towards the ground water (Nom-Ecol-084-1994; Nom-Ecol-083-1996). The main direction of the fracturing correspond with the main direction of the ground water flow (SW-NE) and with the transport of polluting agents through the ground water flow lines. On the porous aquifer the antropogenic influence is concentrated, due to there is where the septic tanks and latrines are located.

Physical, chemical, bacteriological and of heavy metals analyses were made in water samples, and the results were evaluated on the basis of official norms according to the human consumption, agricultural and domestic use. According to the established Permissible Maximum Limits for potable water, high dissolved solid concentrations and total and fecal coliforms exist, as well as contamination by sulphates (WHO), nitrates (USEPA, WHO, EEC and Nom-Ecol-127-1996), barium (Nom-Ecol-127-1996) and mercury (USEPA, WHO, EEC and Nom-Ecol-127-1996).

According to the parameters: soil use, water use, type of aquifer, depth of the phreatic level and the distance of the sampling points to the contamination sources, has been proposed a method to evaluate the conditions of vulnerability that the ground water presents. In addition, method GOD is applied (Foster, 1987) to evaluate the conditions of vulnerability with respect to the natural media (G = aquifer media, O = litology of overall layers, D = depth of phreatic level), that evaluate the vulnerability of the ground water with respect to the natural environment.

It can be observed that the porous aquifer presents a high vulnerability in natural conditions, as well as to the presence of urban activities (specially on the Pablillo river channel). On the other hand, the fractured aquifer is considered as low vulnerability with respect to natural environment,

whereas the degrees of vulnerability respecting to the antropogenic activities vary depending on the distance towards the main sources of contamination, the depth of phreatic level and the soil use.

It is observed that the municipal landfill, porcine farms, as well as septic tanks and latrines, represent the main threat to the ground water quality (wells in Linares and La Petaca) and superficial flows (Pablillo river, main collector of the Cerro Prieto Lake). In the present work measures of control and remediation are proposed, that contribute to diminish the environmental impact that the antropogenic activities cause in the ground water.

INTRODUCCIÓN

La población en el Municipio de Linares Nuevo León se ha ido incrementando de 33,012 habitantes en 1980 a 69,205 habitantes en el 2000 (INEGI, 2001). El constante crecimiento de su población, así como el desarrollo de las actividades industrial, agrícola y los diferentes usos de suelo, demandan una mayor cantidad de agua con la calidad adecuada para satisfacer sus necesidades, ejerciendo presión sobre los acuíferos del área. Parte del agua que se consume es extraída del subsuelo. Existen numerosos aprovechamientos hidráulicos –pozos y norias- que son utilizados para satisfacer las demandas municipales (consumo humano, domestico, comercial, residencial y de servicios), agrícolas, ganaderas e industriales de la región.

Existen indicios de sobre-explotación y contaminación del agua subterránea (De León-Gómez y Medina-Barrera, 2000) y de aguas superficiales (Rodríguez de Barbarín y Barbarín-Castillo, 1996; Návar, 1999; 2001; Flores-Laureano y Návar, 2002) en el nordeste de México. Esta tendencia de asociar los niveles de contaminación con el crecimiento de poblaciones es característica del desarrollo regional en varias partes del mundo (Murck y Skinner, 1996; Jeong, 2001; Edmunds, et al., 2002).

Las fuentes de contaminación del agua subterránea se han clasificado como difusas y puntuales. En el área de Linares, los cambios de uso del suelo de matorrales nativos a terrenos agropecuarios desmontaron el 1.9% del municipio durante el periodo de 1973 a 1993 (Treviño et al., 1996), causando probablemente la aparición de fuentes difusas de contaminación. Los residuos sólidos (basureros municipales, residuos industriales) y líquidos (lagunas de oxidación, descargas municipales en los ríos, letrinas y fosas sépticas), además de otros, son causantes de la contaminación puntual.

En la región de Linares existen antecedentes de contaminación de acuíferos por nitratos (De León-Gómez y Medina-Barrera, 2000). Aunque las fuentes de origen no se han determinado, se sugiere que pueden ser el tiradero de basura municipal y las granjas porcícolas localizadas en las vecindades del mismo sitio. A pesar de esta problemática ambiental con repercusiones sociales, económicas, ecológicas y sanitarias, no se han realizado trabajos para evaluar la contaminación, sus fuentes, sus variaciones espacio7temporales así como las condiciones de vulnerabilidad en los acuíferos de la región.

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

En la región de Linares, N.L. México existen diversas zonas que facilitan la probable infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. En dirección SW-NE fluye el río Pablillo, el cual presenta una directa conexión hidráulica con el agua subterránea. Sobre su cauce se descargan aguas residuales de origen doméstico e industrial.

En la parte Este de la mancha urbana se localiza el tiradero municipal, en el cual se depositaron alrededor de 300,000 toneladas de residuos sólidos domésticos, municipales e industriales durante su período de actividad, que abarcó desde 1980 a febrero de 2000, año de su clausura. Este sitio fue ubicado directamente sobre el macizo rocoso, en una estructura de lomerío. Carece de sistemas de drenaje que desvíen los escurrimientos superficiales producto de la precipitación, de una geomembrana en su base y una cubierta en la superficie que eviten la infiltración de los lixiviados hacia el subsuelo a través del denso fracturamiento e intemperismo que presenta el macizo rocoso (NOM-ECOL-084-1994; NOM-ECOL-083-1996).

A 590 m al Oeste del antiguo tiradero se ubican granjas porcícolas, que mantienen una intensa actividad y escasas medidas de control de aguas superficiales, originando fuentes potenciales de contaminación puntual del acuífero. Entre las principales sustancias contaminantes que pueden generarse, se encuentran bacterias, virus, cloruros y nitratos, los cuales al entrar en contacto con el agua de precipitación pueden infiltrarse al subsuelo, según lo mencionan en trabajos relacionados Tchobanoglous (1993), Fetter (1993) y Murck y Skinner (1996).

Muy cerca del cauce del río Pablillo se encuentra la colonia La Petaca, en donde la red de drenaje es compuesta principalmente por fosas sépticas y letrinas, en donde se descargan las aguas residuales generadas por los habitantes, generando fuentes difusas de contaminación. Distribuidas por el área de estudio se localizan zonas de cultivos, así como aprovechamientos hidráulicos que sirven para fines de consumo humano, uso doméstico, riego y consumo de animales.

La preservación de la calidad en el agua subterránea es uno de los principales objetivos dentro del presente trabajo de tesis, por lo que es necesario identificar previamente las fuentes que pueden favorecer su contaminación.

La relación que existe entre la calidad del agua subterránea y el medio geológico adquiere mayor importancia cuando este último favorece la entrada de contaminantes hacia el acuífero, por lo tanto, es necesario conocer el comportamiento geológico/estructural y su conexión con las condiciones hidrogeológicas existentes en el área, así como observar estas variaciones tanto en espacio como en tiempo, que permitan analizar de manera preliminar la vulnerabilidad que el acuífero presenta a la contaminación.

1.1.1 REVISIÓN DE LITERATURA

La cercanía entre las provincias de la Sierra Madre Oriental (SMO) y la Planicie Costera del Golfo (PCG) ha originado el interés de algunos investigadores en estudiar la situación geológica, tectónica, así como condiciones hidrogeológicas para la prospección de agua, entre otras.

En 1978 Padilla y Sánchez elaboró un estudio geológico/estructural de la SMO en el área entre Linares-San Roberto. En 1986 Rojas-Ruiz y Méndez-Delgado realizaron un estudio para determinar el comportamiento del agua subterránea en la Ciudad Universitaria. Rangel-Rodríguez (1989) realizó un estudio hidrogeológico en el Centro de Producción Agropecuaria de la UANL, en Linares, Nuevo León, teniendo como objetivo principal la prospección de sitios de explotación para su aprovechamiento. Rodríguez de Barbarín y Barbarín-Castillo (1993) realizaron una evaluación de los efectos que pueden ejercer el ambiente geológico, el clima y los asentamientos humanos en la calidad del agua transportada a través de los principales cauces que atraviesan Linares (ríos Pablillo, Camacho, Hualahuises y Camachito).

En 1993, De León-Gómez desarrolló un estudio geológico/hidrogeológico en el área de la presa Cerro Prieto en Linares, para realizar una evaluación sobre el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Prado (1997) aplica métodos geofísicos (SEV´s) para investigar zonas de canales de gravas en el área de Hualahuises-Linares, elaborando prospecciones geoeléctricas entre estas zonas. De León-Gutiérrez (1999) establece una estratigrafía del Cuaternario en el Noreste de México. De la Garza-González (2000) realizó un estudio geológico-hidrogeológico en el área Linares-Hualahuises, N.L., para la explotación moderada del acuífero.

Los trabajos mas recientes relacionados con el area de estudio fueron publicados por De León-Gómez y Medina-Barrera (2000). Ambos investigadores realizaron un estudio sobre los procesos de contaminación del agua subterránea por lixiviados originados en el tiradero municipal en Linares, N.L., realizando diversos análisis de calidad del agua. Cabe señalar que este estudio en particular se considera un antecedente para la realización del presente trabajo de tesis.

1.1.2 HIPÓTESIS

En la zona de estudio existen las condiciones geológicas e hidrogeológicas que favorecen la entrada y el transporte de contaminantes hacia los acuíferos alterando la calidad del agua. Los contaminantes provienen de fuentes puntuales y difusas y muestran variaciones espacio/temporales por una interacción de factores fisicos y bióticos.

1.1.3 OBJETIVOS

El presente trabajo de investigación se desarrolló con el principal objetivo de identificar si existen elementos o compuestos en el agua subterránea, que sobrepasen los limites establecidos por las normas de calidad del agua en el área de estudio, si estos presentan variaciones espacio/temporales detectables y si la geología está facilitando estos procesos de entrada de contaminantes al acuífero. Al determinar lo anterior, las condiciones geológicas e hidrogeológicas que conllevan a estas variaciones fueron evaluadas, permitiendo detectar las posibles fuentes emisoras de contaminantes y delimitar las zonas de vulnerabilidad a la contaminación. Para ello se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la situación hidrológica del área, mediante el análisis de las condiciones topográficas, la información climática e hidrometeorológica obtenida
- Realizar un análisis geológico y estructural, determinando los contactos litológicos y las direcciones predominantes del fracturamiento en el macizo rocoso
- Realizar el estudio piezométrico en el área, manteniendo un monitoreo mensual del nivel freático en los diversos aprovechamientos hidráulicos existentes y disponibles en la zona

- Realizar análisis físicos, químicos y bacteriológicos en laboratorio de 10 muestras de agua y 7 muestras más para el análisis de la concentración de metales pesados, las cuales fueron extraídas de aprovechamientos hidráulicos previamente seleccionados para determinar las concentraciones actuales de los elementos en el agua en condiciones de ausencia de precipitación
- Realizar mensualmente análisis físicos y químicos cuantitativos de aproximación en muestras de agua tomadas en los 10 aprovechamientos hidráulicos seleccionados, para determinar si existen variaciones espacio/temporales detectables
- Revisar las normas oficiales que establecen límites máximos permisibles (LMP) para el consumo de agua potable, agrícola y uso urbano, determinando si existen zonas que presentan contaminación
- Identificar las zonas más vulnerables a la contaminación y evaluar la influencia que ejercen fuentes puntuales y difusas sobre la calidad del agua subterránea
- Proponer alternativas de remediación y control de la contaminación al medio acuífero

1.1.4 METAS

Al proponer los objetivos anteriores se pretenden lograr las siguientes metas planteadas:

- Identificar las zonas de recarga y descarga, que permitan una mejor comprensión del sistema hidrogeológico en el área
- En carta la geológica-estructural (a escala 1:10,000) se representan las condiciones de fracturamiento existentes en el macizo rocoso, que permiten identificar la relación entre sus orientaciones principales, la infiltración y el movimiento horizontal del agua subterránea, así como de sus contaminantes
- En la carta hidrogeológica (a escala 1:10,000) se representan las direcciones preferentes del flujo del agua subterránea, observando además mediante histogramas las fluctuaciones mensuales en el nivel piezométrico
- En base a los resultados obtenidos de los análisis físicos, químicos, bacteriológicos y de metales pesados, se evalúa si existen parámetros que sobrepasen los límites establecidos por las normas oficiales, que representen un riesgo a la salud de humanos y/o animales

- La concentracion de sustancias en el agua subterránea se analiza estadísticamente, a partir de aproximaciones efectuadas entre los resultados obtenidos de los análisis realizados en laboratorio y los análisis químicos cuantitativos realizados en campo. Esta interpretación estadística permite evaluar las variaciones espacio/temporales ocurridas dentro del período de muestreo
- La evaluación de las normas ambientales que establecen los LMP para los diferentes usos del agua, permite identificar la existencia de contaminación, así como las zonas más vulnerables
- Una vez que se reconocen las zonas vulnerables, es posible evaluar el grado de afectación que ejercen las fuentes de contaminación sobre la calidad del agua subterránea y sobre la salud de humanos y animales
- De acuerdo con la información obtenida, se proponen alternativas de remediación y control, delimitando zonas de vulnerabilidad de la contaminación al agua subterránea y de daño a la salud de la población

1.2 RASGOS GEOGRÁFICOS

1.2.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio se localiza en la periferia Este de la ciudad de Linares. Las coordenadas del área quedan comprendidas entre los paralelos 24° 50' y 24° 52' 30" de latitud Norte y los meridianos 99° 33'48" y 99° 30' 39" de longitud Oeste y abarca una superficie aproximada de 36 Km^2. El área de estudio es atravesada transversalmente por las vías de ferrocarril en el tramo Monterrey-Tampico y se comunica a través de la carretera Linares-Lucio Blanco. De Norte a Sur atraviesa la carretera que comunica Linares-Villagrán y de Oeste a Noreste se comunica mediante el camino que conecta a Linares con la presa Cerro Prieto. Existen además caminos de terracerías que comunican a Linares con rancherías y comunidades circunvecinas (Fig. 1).

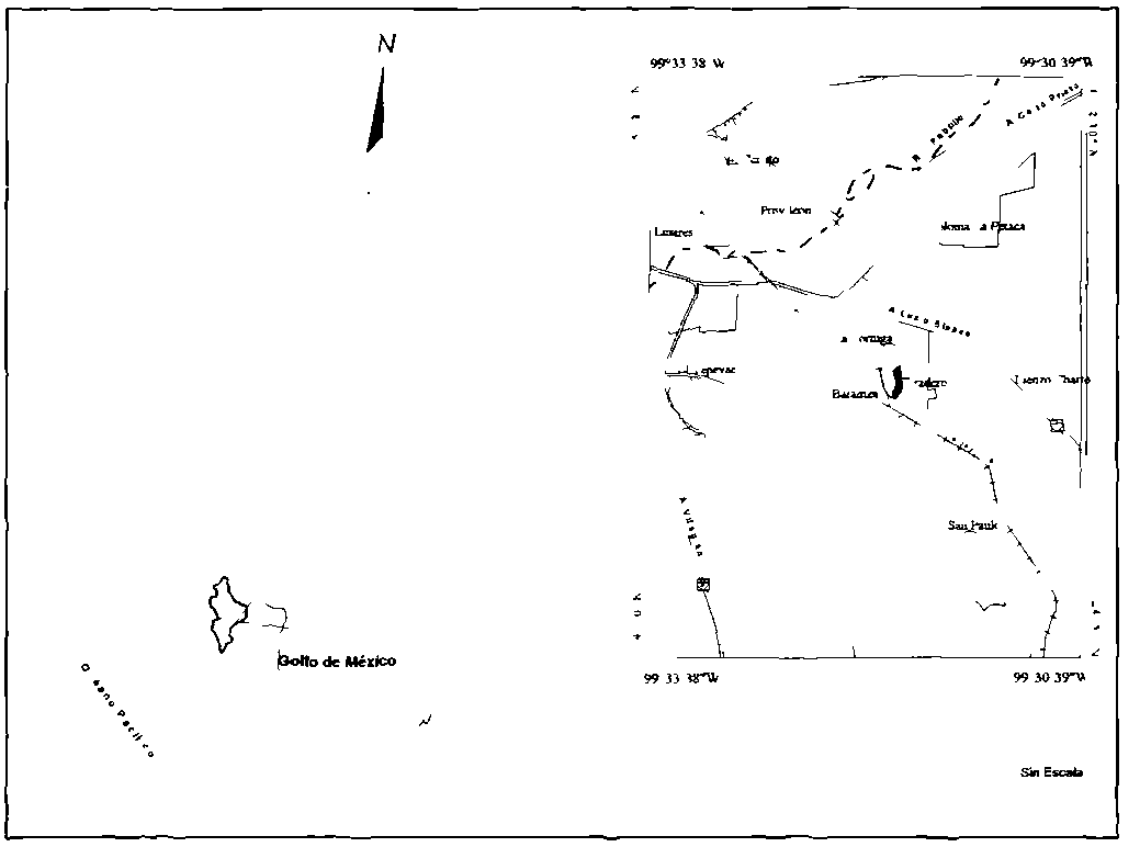

Fig 1 Localización y vías de acceso del área de estudio (Modificado de la carta topográfica Linares G14C59 INEGI, 1999)

1.2.2 CLIMA Y VEGETACIÓN

La zona de estudio se encuentra aproximadamente a 351 msnm, en una región con clima semi-árido subtropical, con altas temperaturas y lluvias al principio y final del verano, precipitación escasa el resto del año y severas heladas en algunos inviernos. La temperatura media anual es de 22.3 °C, mientras que la precipitación anual promedio es de 805 mm. En promedio existen 84 lluvias al año, de las cuales el 60% poseen menos de 5mm y solo el 10% son capaces de producir escorrentías superficiales, con intensidades superiores a 20 $mmhr^{-1}$ (Návar y Synnott 2000). La dirección del viento predominante es SE durante los meses de febrero a noviembre, mientras que en los meses de enero y diciembre del mismo año la dirección es hacia el N.

El tipo de vegetación predominante son los matorrales altos espinosos y subinermes, caracterizados por arbustos altos y árboles bajos (González-Elizondo, 1996), característicos de

climas subtropicales o semi-áridos del Nordeste de Mexico. Se caracteriza por la presencia de arbustos medianos de 1 a 2 m de altura, compuestos predominantemente por especies inermes y más o menos caducifolias, combinadas con especies espinosas. Entre las primeras, las más comunes son: *Leucophyllum texanum* (cenizo), *Cordia boisieri* (anacahuita), *Porlieria angustifolia* (guayacán). Entre las segundas especies se encuentran: *Acacia rigidula* (chaparro prieto), *Pithecellobium brevifolium* (tenaza), *Lycium Carolinianum* (cruceto), entre otras.

1.2.3 SUELOS

La cubierta superficial más reciente en el área es compuesta por suelos provenientes del material aluvial, predominando en la zona del valle los Vertisoles que tienen textura arcillosa. Los suelos localizados en las laderas y sobre los lomerios tienen una textura limo-arenosa, clasificados como Rendzinas con un cementante calichoso (INEGI, 1996; Manzano-Camarillo, 1997).

1.2.4 HIDROLOGÍA

La zona queda comprendida en la porción N de la Subcuenca del río Limón (río Pablillo), localizada a su vez dentro de la Cuenca del río San Fernando, en la Región Hidrológica RH-25 San Fernando-Soto La Marina, abarcando una superficie de 1708 km^2 (INEGI, 2001). El drenaje es de tipo dendrítico e intermitente, conformado por el río Pablillo el cual nace al SW del área, en la Sierra Madre Oriental. Su cauce atraviesa transversalmente de SW a NE el área hasta desembocar en la presa Cerro Prieto, siendo su colector principal; aporta un promedio anual de 138 millones de m^3 (De León-Gómez, 1993). Existen además pequeños tributarios que se desprenden de las elevaciones al S y SW del área.

1.2.5 FISIOGRAFÍA

La zona de estudio se localiza al pie de la Sierra Madre Oriental (SMO), dentro de la Planicie Costera del Golfo (PCG). Esta ubicación la convierte en una zona transicional entre estas dos provincias fisiográficas, ya que está formada por un amplio valle cubierto por material aluvial, en el que se localizan algunos lomeríos de poca elevación. Dichos lomeríos están constituidos por rocas lutíticas de la Formación Méndez las cuales están altamente fracturadas. El intenso fracturamiento es producto de los esfuerzos compresivos que actuaron en la deformación sobre la SMO durante la Orogenia Laramide (Padilla y Sánchez, 1978; 1985). La cercanía del área de estudio respecto al pie de la SMO permite suponer que los pequeños plegamientos que aquí se localizan, así como su intenso fracturamiento son producto de dichos eventos compresivos. Sobre los valles se depositan sedimentos de origen aluvial en diferentes terrazas o niveles de edad cuaternaria, producto de la erosión de rocas consolidadas.

1.2.6 LITERATURA CITADA

De la Garza-González, S.I. (2000): Estudio geológico/hidrogeológico en la región citrícola (Linares-Hualahuises) Nuevo León, México. Tesis de Licenciatura Fac. Ciencias de la Tierra, U A.N.L., 131 p.

De León-Gómez H. (1993): Evaluacion de las experiencias durante la operación de la Presa Cerro Prieto, Linares N.L., México, en la perspectiva de la Ingeniería Geológica e Hidrogeología. Universidad Técnica de Aachen, Alemania. Tesis doctoral.

De León-Gómez H., Medina-Barrera F. (2000): Impacto ambiental del tiradero de basura de Linares/México, en las aguas subterraneas. Actas del XI Congreso Latinoamericano de Geología y III Congreso Uruguayo de Geología, Edición Electrónica CD-Rom, Pág. 1-6 Uruguay.

De León-Gutierrez (1999): Investigación sobre las terrazas fluviales del Cañón Santa Rosa, Iturbide, N.L., como base para el establecimiento de una estratigrafía del Cuaternario en el Noreste de México. Tesis de Maestría Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., 119 pp.

Fetter C.W. (1993): Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, 445 pp.

González-Elizondo M. (1996). Análisis de la vegetación secundaria de Linares, N.L., México. Tesis de Maestría Fac. Ciencias Forestales, U.A.N.L., 103 pp.

INEGI(1996): Carta Edafológica Linares G14C58. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informatica.

INEGI (2001): Información estadística de los estados en la República Mexicana. www.inegi.gob.mx

Manzano-Camarillo M G F (1997) Procesos de desertificación asociados a sobrepastoreo por caprinos en el matorral espinoso de Linares, N.L. Tesis de Maestría Fac. Ciencias Forestales, U.A.N.L., 87 pp.

Murck B. S , Skinner B J , Porter S C. (1996) Environmental Geology. John Wiley and Sons, Inc. 535 págs.

Navar-Chaidez J., Synnott T J (2000): Soil infiltration and land use in Linares, N.L., Mexico. TERRA vol. 18, no. 3, pp. 255-262.

NOM-083-ECOL-1996 (1996): Norma que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos solidos municipales. www.semarnat.gob.mx

NOM-084-ECOL-1994 (1994): Norma que establece los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construccion de sus obras complementarias. www.semarnat.gob.mx

Padilla y Sánchez R.J. (1978): Bosquejo geológico-estructural de la Sierra Madre Oriental en el área Linares-Galeana-San Roberto, Estado de Nuevo León. Revista del Instituto de Geología, U.N.A.M., vol. 2, no. 1, pp. 45-54.

Padilla y Sánchez R.J. (1985): Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. UNAM, Instituto de Geología, Revista vol. 6, no. 1, pp. 1-20.

Prado (1997). Aplicación de métodos geofisicos (SEV's) para investigar zonas de canales de gravas en el área de Hualahuises-Linares, Nuevo León, México. Tesis de Licenciatura Fac. Ciencias de la Tierra U.A.N.L., 97 pp.

Rangel-Rodríguez (1989). Hidrogeología de la Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, México. Tesis de Maestría, TH-Darmstadt, 97 p.

Rodriguez de Barbarin C., Barbarin-Castillo J.M. (1993): Influencia de la geología regional, los ciclos estacionales y los asentamientos humanos en la caracterización de las aguas superficiales de la cuenca de Linares-Cerro Prieto, N.L., México. Geofisica Internacional, vol. 32, no. 2, pp. 221-235.

Rojas-Ruiz G. y Méndez-Delgado S. (1986): Consideraciones sobre el comportamiento de pozos hidrologicos en terrenos impermeables en la Planicie frente a la Sierra Madre Oriental, Nuevo León, Mexico. Actas Fac. Cienc. Tierra, UANL, vol. 1, pp. 88-101.

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S.A. (1994): Gestión ambiental de residuos sólidos. Ed. McGraw-Hill, 1107 pp.

CAPÍTULO 2 GEOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se localiza al NE de México dentro de la SMO en su parte marginal Este, provincia que se vio influenciada por los eventos compresivos que la deformaron. Las estructuras existentes en el área de estudio presentan una orientación general al NW–SE, que concuerda con el tren estructural de la SMO. El intenso fracturamiento que predomina en las rocas es debido a dichos esfuerzos compresivos (Tardy et al., 1975; Padilla y Sánchez, 1978; 1985). La geología del área la conforman rocas de la Formación Méndez de edad cretácica, así como conglomerados terciarios y sedimentos aluviales del Cuaternario.

Rocas consolidadas pertenecientes a la Formación Méndez son compuestas principalmente por lutitas y areniscas de baja permeabilidad, que al estar fuertemente fracturadas generan el medio ideal para la infiltración de los escurrimientos superficiales y lixiviados hacia el agua subterránea. Los conglomerados, así como los sedimentos aluviales componen el acuífero de poros, cuyo espesor somero y sus propiedades de permeabilidad facilitan la infiltración y el transporte de contaminantes. En el presente capítulo se determina la relación existente entre estas dos unidades acuíferas y la forma en que favorecen la entrada de contaminantes.

2.1 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consistió en la revisión de fotografías aéreas, consulta de mapas y recorridos de campo. El papel que desempeña el macizo rocoso en el área desde el punto de vista de la permeabilidad, puede evaluarse partiendo de la observación directa de su composición geológica, la medición del espesor de conglomerados en los distintos aprovechamientos hidráulicos y el estado tectónico que presentan los afloramientos estudiados.

Para tal efecto, se llevó a cabo la cartografía geológica a detalle con base en un mapa topográfico de escala 1:10,000 así como el inventario tectónico, considerando mediciones de rumbo de buzamiento medidos con brújula Clar en todos los afloramientos disponibles en el área.

Posteriormente, la información obtenida durante la cartografía fue digitalizada mediante el programa CANVAS 6 y los datos estructurales fueron analizados por medio del programa StereoNet. Las proyecciones estereográficas se incluyeron en la carta geológica-estructural (Anexo 1).

2.2 GEOLOGÍA REGIONAL

La SMO es una cadena montañosa de origen estructural, formada por una serie de plegamientos alargados orientados al NNW–SSE. Es compuesta por una gruesa secuencia de rocas carbonatadas y terrígenas del Mesozoico, que fueron plegadas y cabalgadas por los esfuerzos máximos de la Orogenia Laramide durante el Paleoceno tardío-Eoceno temprano (López-Ramos, 1980; Padilla y Sánchez, 1985). Ha sido motivo de interés para la realización de diversos trabajos, en los cuales puede consultarse sobre su origen y evolución paleogeográfica (Padilla y Sánchez, 1978; 1985; Meiburg et al., 1987; Michalzik, 1987; Peterson-Rodríguez, 1998; 2001; De León-Gutiérrez, 1999; De la Garza-González, 2000).

El área de estudio se localiza en el extremo E de la SMO, dentro de una zona transicional, colindando hacia el E con la Cuenca de Burgos y hacia el Sur con la Sierra de Tamaulipas. En esta parte de la provincia existen lomeríos suaves que se ven bordeados por amplios valles. Debido a los esfuerzos generados durante la Orogenia Laramide sobre la SMO, se formaron series de plegamientos recumbentes, los cuales se van suavizando más hacia el NE donde se dio lugar la depositación de sedimentos terrígenos, formando diferentes unidades litológicas durante el Terciario y Cuaternario, mismas que están presentes en el área de estudio. Estas rocas son de origen marino y tienen una permeabilidad mínima, por lo que no existen acuíferos regionales de importancia, debido a la predominancia de sedimentos como las lutitas (de coloraciones que van desde el gris oscuro a negro, azul, marrón y rojo) y areniscas compactas (de coloración gris oscuro que intemperiza a café, con estratificaciones que varían de media a gruesa), así como a la ocurrencia de material granular en una matriz de sedimentos de grano fino (Grubb y Carrillo, 1998).

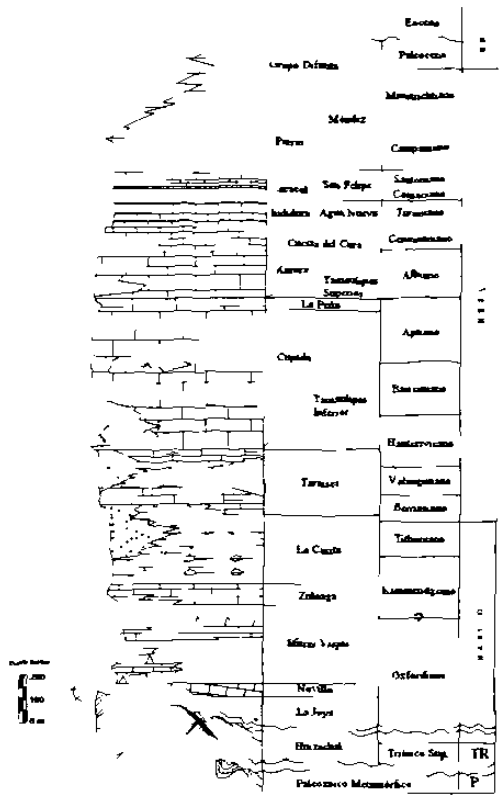

Fig. 2 Columna estratigráfica general de la Curvatura de Monterrey en el NE de México (modificada de Michalzik, 1987)

2.3 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La geología presente en el área ha sido definida en distintos trabajos, los cuales se han realizado desde un interés regional como provincia geológica (SPP, 1982; Padilla y Sánchez, 1978; Morán-Zenteno, 1994; Grubb y Carrillo, 1998), hasta estudios a nivel más local para la prospección de agua (Anderson y Aguilera, 1986; Rojas y Méndez, 1986; Galván-Mancilla, 1996; Prado-Gómez, 1997; De la Garza-González, 2000).

En general, la orientación de las estructuras principales muestra una dirección NW-SE. Las rocas más antiguas que *afloran* en el área de estudio pertenecen a la Formación Méndez (Fig. 2). Son de edad cretácica y están compuestas por rocas lutíticas intercaladas con areniscas calcáreas. Sobre esta Formación se depositan espesores de conglomerados en diferentes niveles o terrazas de edad terciaria y cuaternaria, producto del transporte de antiguos cauces de ríos y arroyos. Estos conglomerados se fueron depositando en forma horizontal en los valles y con ligeras inclinaciones sobre los lomeríos.

Gran parte del área está cubierta en la superficie por depósitos aluviales compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas, producto de la erosión de rocas consolidadas durante el Cuaternario (Anexo 1).

2.4 ESTRATIGRAFÍA

2.4.1 FORMACIÓN MÉNDEZ

Se designa con este nombre a una secuencia de lutitas limosas de colores que varían desde gris oscuro a negro, azul, marrón y rojo, hasta lutitas y margas de estratificación laminar a delgada, de color gris claro, gris oscuro y verde olivo (López-Ramos, 1980; Padilla y Sánchez, 1978; 1985; Anderson y Aguilera, 1986). Tienen una edad Campaniano-Maastrichtiano y un espesor de 500 m aproximadamente (Anderson y Aguilera, 1986), aunque otros autores mencionan espesores variables (De la Garza-González, 2000). Esta unidad presenta intercalaciones con estratos de areniscas con estratificación media a gruesa, cuyo color es gris oscuro e intemperiza a café; ambas unidades presentan indicios de bioturbación. El ambiente de depositación es de aguas marinas profundas, en una cuenca con gran subsidencia, lo cual provocó los grandes espesores que presenta esta unidad (López-Doncel, 1990).

El macizo rocoso dentro del área de estudio se compone por lutitas intercaladas con areniscas calcáreas. Su estilo de fracturamiento es muy característico, es de tipo concoidal y en algunas áreas está muy intemperizada, mostrando desde una estructura de laminillas, que cambian de una coloración gris en la roca sana a café amarillento, hasta suelos. En el área se distribuye principalmente en el lomerío El Tepeyac–San Paulo, El Cerrito y el Cerro La Tortuga.

En El Cerrito se observan las lutitas altamente intemperizadas, con una coloración que varía de gris a amarillento en forma de material suelto o suelo arcilloso semiconsolidado. En afloramientos medidos presentan un intenso fracturamiento, con extensión entre fracturas desde mm hasta 2 cm, algunas de ellas con rellenos de calcita, mostrando en algunas zonas una cubierta de caliche en su superficie. Existen intercalaciones con estratos de areniscas masivas, cuyos espesores varían desde 0.4 m hasta 1.5 m aproximadamente. Estas rocas presentan un fracturamiento alto y la extensión entre fracturas varía en ocasiones desde 1 hasta 10 cm (Foto 1).