

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**CAMBIOS TEMPORALES EN LA CALIDAD DEL AGUA
SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL DE LA
COMARCA LAGUNERA**

POR

SONIA SIOMARA LIZARDO GARAY

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

FEBRERO DE 2005

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**CAMBIOS TEMPORALES EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA
EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL DE LA COMARCA LAGUNERA**

TESIS DE LA C. **SONIA SIOMARA LIZARDO GARAY** QUE SE SOMETE A LA
CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORÍA Y APROBADA
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

ASESOR PRINCIPAL:

Dr. MARIO GARCÍA CARRILLO

COASESOR:

Ph. D. JUAN GUILLERMO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

COASESOR:

Ph. D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

COASESOR:

Dr. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

M. C. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

FEBRERO DE 2005

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**CAMBIOS TEMPORALES EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA
EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL DE LA COMARCA LAGUNERA**

TESIS DE LA C. **SONIA SIOMARA LIZARDO GARAY** QUE SE SOMETE A LA
CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR, COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

PRESIDENTE: _____


Dr. MARIO GARCÍA CARRILLO

VOCAL: _____


Ph. D. JUAN GUILLERMO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

VOCAL: _____


Ph. D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

VOCAL SUPLENTE: _____


Dr. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS


M. C. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA



AGRADECIMIENTO ESPECIAL

Al Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Coahuila por otorgarme el estímulo de la **“Beca Tesis”**, que sirvió para costear los gastos ocasionados por la realización de la tesis, además de darme la oportunidad de participar en el **“6° Verano de la Ciencia en Coahuila 2004”**. Cabe destacar el valioso apoyo recibido del Lic. Andrés Farías Cortés, Director Regional y de la Lic. María de Lourdes Hernández Castillo, Jefa de Formación de Recursos Humanos, incansables promotores de estos importantes programas.

El presente trabajo de investigación se realizó en su totalidad en las instalaciones del Centro Nacional de Investigaciones Disciplinarias en Relación Agua – Suelo – Planta – Atmósfera (CENID – RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Gómez Palacio, Durango, bajo la dirección y asesoría del Ph. D. Juan Guillermo Martínez Rodríguez.



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

DEDICATORIAS

A Dios:

Por darme la vida y la oportunidad de concluir satisfactoriamente una etapa más de ella.

A mis Padres:

Rafael Lizardo Sánchez y Sonia Gabriela Garay González. Por su amor, cariño, respeto, comprensión y apoyo incondicional durante toda mi vida. LOS AMO.

A mis Hermanos:

Martha, Antonio, Claudia, Cesar, Luis y Leonor, por el inmenso apoyo y amor que siempre me han brindado. GRACIAS.

A mi Abuela:

Leonor Garay, con amor, por ser una excelente persona y un ejemplo a seguir de respeto, responsabilidad y trabajo.

A Mi tío:

Cesar Garay, por brindarme siempre su cariño, apoyo, motivación y confianza.

A mi Novio:

Daniel Andrade Wiebe, por la gran paciencia y apoyo incondicional en todo este tiempo.

A mis amigos:

De la IV Generación de Procesos Ambientales, Soccer Femenil, Varonil, mis compañeras del Internado y en especial a mis amigas Nidelvia, Nelly y Aidé. A todos ellos por haberme brindado su cariño, amistad y apoyo, pero sobretodo, por esos momentos inolvidables que pasamos juntos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, mi familia, mis amistades y la oportunidad de desarrollarme y ser mejor persona cada día.

A mi “ALMA MATER” por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios profesionales.

Al Ph. D. Juan Guillermo Martínez Rodríguez, por su amistad y apoyo, así como su dedicación en la colaboración, asesoramiento y revisión del presente trabajo.

Al Ph. D. Vicente de Paul Álvarez Reyna por su amistad, enseñanzas y apoyo durante mis estudios y la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Mario García Carrillo por su amistad y gran participación para concluir este trabajo.

Al Dr. Héctor Madinaveitia Ríos por su amistad y su valiosa colaboración en la revisión del presente trabajo.

A CNA (Comisión Nacional del Agua), por su inmenso apoyo al proporcionarme la información necesaria para la realización de este trabajo.

Al CENID – RASPA (Centro Nacional de Investigaciones Disciplinarias en Relación Agua – Suelo – Planta – Atmósfera), por brindarme su apoyo y las herramientas necesarias para la elaboración de este proyecto.

A todos mis maestros que intervinieron a lo largo de mi carrera y contribuyeron en mi formación académica.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera colaboraron en el desarrollo de mis estudios y la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	PÁGINA
INDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 General.....	3
2.2 Específicos.....	3
2. HIPÓTESIS	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 Antecedentes.....	4
3.1.1 Definición de agua subterránea.....	5
3.1.2 Definición de acuífero.....	6
3.2 Características geoquímicas del agua.....	6
3.3 Calidad del agua.....	6
3.4 Aspectos básicos en la contaminación de aguas subterráneas.....	8
3.4.1 Fuentes de contaminación.....	8
3.4.1.1 Contaminación por iones nitratos.....	10
3.4.1.2 Contaminación por pesticidas.....	11
3.4.1.3 Contaminación por metales traza.....	11
3.4.2 Causas de la contaminación.....	12
3.5 Importancia de la calidad del agua en la salud.....	14
3.6 La distribución del agua en el cuerpo.....	15
3.7 Cambios en la calidad del agua.....	15
3.7.1 Sinopsis de la explotación del recurso hídrico en la Región.....	16
3.7.2 Disponibilidad de agua en la Comarca Lagunera.....	17
3.7.2.1 Disponibilidad de agua subterránea.....	18
3.7.3 Efectos colaterales a la sobreexplotación del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera.....	18
3.7.3.1 Nitratos.....	20

3.7.3.2 Arsénico.....	21
3.7.3.3 Níquel.	23
3.7.3.4 Plomo.	24
3.7.3.5 Cadmio.	25
3.7.3.6 Cromo.	27
3.8 Depuración de acuíferos.....	28
3.9 Descripción del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera.....	29
3.9.1 División municipal.....	29
3.9.2 Fisiografía.	29
3.9.2.1 Provincias fisiográficas.	29
3.9.3 Hidrografía.	30
3.9.4 Hidrogeología.....	31
3.9.4.1 Tipo de acuífero.....	31
3.9.5 Geomorfología.	31
3.9.6 Geología.....	32
3.9.6.1 Estratigrafía.	33
3.9.6.2 Geología estructural.	33
3.9.6.3 Geología del subsuelo.	34
3.9.7 Piezometría.....	35
3.9.7.1 Profundidad del nivel estático.....	35
3.9.7.2 Elevación del nivel estático.....	35
3.9.7.3 Evolución del nivel estático.....	36
3.10 Sistemas de información geográfica (GIS).	36
3.10.1 Antecedentes.	36
3.10.1.1 Definición de GIS.....	37
3.10.2 Conceptos Básicos de GIS.	38
3.10.2.1 Base de datos en los GIS.	38
3.10.2.2 Tipos de Datos.....	39
3.10.2.3 Imágenes gráficas. Tipos de formatos.....	40
3.10.2.3.1 Modelo raster.	41
3.10.2.3.2 Modelo vectorial.	42

3.10.2.4 Recomendaciones.....	43
3.10.2.5 Información alfanumérica.....	44
3.10.2.6 Georreferenciación.....	45
3.10.3 Funcionalidades de un GIS.....	45
3.10.3.1 Captura y Organización de Datos.....	45
3.10.3.2 Gestión de Tablas Alfanuméricas.....	46
3.10.3.3 Análisis Espacial.....	46
3.10.4 Aplicaciones prácticas.....	46
3.10.5 Beneficios de los GIS.....	49
3.10.5.1 Beneficios.....	49
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
4.1 Descripción del área de estudio.....	50
4.2 Descripción de los datos y el sistema.....	52
4.2.1 Sistemas de información geográfica.....	52
4.2.2 Descripción de los datos.....	53
4.2.2.1 Bases de datos impresos y digitales.....	54
4.2.2.2 Carta edafológica.....	59
4.2.2.3 Carta de uso de suelo y vegetación.....	60
4.2.2.4 Poblaciones.....	61
4.2.2.5 Profundidad del nivel estático.....	62
4.2.2.6 Concentración de los parámetros de calidad del agua: arsénico, nitratos, cadmio, cromo y plomo.....	65
4.2.2.7 Acuífero Principal.....	66
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
5.1 Cambios temporales del Arsénico.....	67
5.2 Cambios temporales del Nitrato.....	76
5.3 Cambios temporales del Plomo.....	79
5.4 Cambios temporales del Cadmio.....	80
5.5 Cambios temporales del cromo.....	82
5.6 Impactos Ambientales.....	83
6. CONCLUSIONES.....	84

7. RECOMENDACIONES	85
8. LITERATURA CITADA.....	86
9. APÉNDICE A.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 4.1. Temperatura promedio mensual de la Comarca Lagunera.	50
Figura 4.2. Precipitación promedio mensual de la Comarca Lagunera ...	51
Figura 4.3-a. Base de datos de características de los pozos y calidad del agua subterránea en 1998	55
Figura 4.3-b. Base de datos de calidad del agua subterránea en 1998 (continuación 1)	56
Figura 4.3-c. Base de datos de calidad del agua subterránea en 1998 (continuación 2).	57
Figura 4.4. Base de datos del nivel freático del Acuífero Principal.	58
Figura 4.5. Textura del suelo de la Comarca Lagunera.	59
Figura 4.6. Uso de suelo y tipo de vegetación en la Comarca	61
Figura 4.7. Poblaciones de la Comarca Lagunera.	62
Figura 4.8. Nivel estático de los pozos de uso doméstico de la Comarca Lagunera.	63
Figura 4.9. Nivel estático máximo y mínimo en relación al tiempo.	64
Figura 4.10. Número de pozos monitoreados anualmente durante el periodo de estudio.	64
Figura 4.11. Concentración de nitratos en la Comarca Lagunera para el año de 1990.	65
Figura 4.12. Ubicación del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera...	66
Figura 5.1. Concentración de Arsénico en la Comarca Lagunera, 1987-1988.	68
Figura 5.2. Áreas de la Comarca Lagunera donde incrementó el Arsénico 1995-1997.	69
Figura 5.3. Incremento de la concentración de arsénico en la Comarca Lagunera en el periodo 1995-1997	70
Figura 5.4. Cambios temporales del arsénico durante 2001- 2003....	72
Figura 5.5. Nivel estático del Acuífero de la Comarca en 1975.....	73

Figura 5.6. Nivel estático del Acuífero Principal en 1990.	74
Figura 5.7. Nivel estático del Acuífero Principal de la Comarca en el 2000.	75
Figura 5.8. Áreas de la Comarca Lagunera que manifestaron incremento en la concentración de nitratos.....	77
Figura 5.9. Variación de la concentración de nitratos en la Comarca Lagunera durante el periodo 1981-1997.....	78
Figura 5.10. Área que presenta aumento de plomo durante 98 -00....	80
Figura 5.11. Concentración de cadmio en la Comarca Lagunera.....	81
Figura 5.12. Concentración de cromo en la Comarca Lagunera durante el periodo de estudio.	82

RESUMEN

En la Comarca Lagunera la sobreexplotación del recurso hídrico junto con una serie de actividades antrópicas poco respetuosas con el medio, han propiciado: el abatimiento de los niveles piezométricos y el deterioro de la calidad del agua subterránea, manifestándose en la presencia de ciertos elementos químicos nocivos para el hombre en concentraciones por encima de los límites máximos permisibles para uso doméstico, y por lo tanto, se pone en peligro la salud de la población.

Por lo anterior, se planteó el presente trabajo teniendo como objetivos: determinar los cambios temporales y espaciales en la calidad del agua subterránea del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera, analizando arsénico, nitratos, plomo, cadmio y cromo, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (GIS), que permitan conocer sus causas, y establecer cuáles son las zonas geográficas con mayor riesgo de contaminación.

Los análisis temporales y espaciales de la calidad del agua subterránea demostraron que el Acuífero Principal presenta contaminación por arsénico y nitratos, y las zonas en riesgo son: Pastor Rouaix, Puente de Torreña, Venecia y Arcinas en Gómez Palacio, Ciudad Lerdo y La Luz en el Municipio de Lerdo, Los Arenales, Rancho Alegre y La Perla en Torreón, Hidalgo y El Cambio en Matamoros, Lequeito en Francisco I. Madero, Flor de Mayo y La Ventana en Viesca y San Rafael de Arriba en San Pedro. El Sistema de Información Geográfica regional generado permite realizar análisis con variabilidad espacial y temporal de calidad y fluctuación del agua subterránea.

Se recomienda hacer un uso más eficiente del agua para uso agrícola, así como, realizar monitoreos de calidad de agua con mayor frecuencia en las áreas con alto índice de contaminación y elaborar análisis completos de las muestras de aguas, con el fin de tener un control adecuado del recurso y evitar daños potenciales severos en la población.

INTRODUCCIÓN

La Región Lagunera está ubicada en los estados de Durango y Coahuila en el norte de México. La Comarca, es la cuenca lechera número uno en el país y una de las principales provincias ganaderas, lo que implica que gran parte de sus recursos hídricos son destinados a estas actividades, y hoy en día, esto podría poner en juego la viabilidad física del agua.

Se estima que la extracción total anual es alrededor de 1900 Mm³ y la recarga total, natural e inducida, es aproximadamente 518 Mm³. Del volumen total de extracción, el 86 % se utiliza con fines agrícolas, principalmente para la producción de alfalfa, 7 % para uso público urbano, 4 % para uso pecuario y el 3 % restante para uso industrial (CNA, 2000).

Al mismo tiempo las ciudades de Torreón y Gómez Palacio ubicadas dentro de la Comarca, cuentan con una población total de alrededor de un millón de personas, y el suministro depende enteramente del agua subterránea (INEGI, 2002).

La sobreexplotación del agua subterránea, recurso natural escaso en nuestra área geográfica, junto con una serie de actividades antrópicas poco respetuosas con el medio, han propiciado: el abatimiento de los niveles piezométricos – alcanzando el nivel del agua en ciertas áreas, hasta 130 m de profundidad (CNA, 2000) – y el deterioro de la calidad del agua subterránea, manifestándose en la presencia de ciertos elementos químicos nocivos para el hombre, en concentraciones por encima de los límites máximos permisibles para uso doméstico, y que, ponen en peligro la salud de la población.

El arsénico, por ejemplo, ha sido localmente identificado como la principal amenaza en el suministro de agua en la región con un rango de 0.05 mg/L entre la zona central a uno de 0.40 mg/L en la dirección norte, valores que sobrepasan el límite máximo de contaminación en agua potable establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), 10 mcg/L.

Estudios previos argumentan que el origen natural del arsénico en el agua subterránea es principalmente por actividad hidrotermal y diagénesis (Lara, 2003).

Además del arsénico, otro peligro es la presencia de nitratos en el acuífero, los que se han incrementado paulatinamente en los últimos años. Las causas principales son el incremento en la aplicación de fertilizantes nitrogenados a cultivos forrajeros, láminas de riego, y desechos orgánicos animales provenientes de los sistemas pecuarios (Martínez *et al.*, 2001).

Aunado a lo anterior, este problema trae consigo repercusiones económicas, sociales, ambientales y políticas.

Con este antecedente, se planteó el presente trabajo tendiente a analizar, desde una perspectiva de toxicidad para el hombre, los cambios ocurridos en la calidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera durante los últimos 18 años, mediante tecnologías (Sistemas de Información Geográfica) que permitan conocer sus causas, y establecer cuáles son las zonas geográficas con mayor problema o probabilidad de riesgo para tomar medidas correctivas y evitar daños potenciales severos en la población.

OBJETIVOS

Objetivo general.

- Determinar los cambios temporales en la calidad del agua subterránea en el Acuífero Principal de la Comarca Lagunera.

Objetivos específicos.

- ❖ Determinar los cambios espaciales de la concentración de arsénico, nitratos, cadmio, cromo y plomo en el Acuífero Principal de la Comarca Lagunera.
- ❖ Generar una base de datos georeferencial regional de la calidad del agua subterránea de dicho acuífero.
- ❖ Definir los impactos ambientales generados por los cambios temporales en la calidad del agua.
- ❖ Delimitación de áreas con mayor riesgo de elementos como, arsénico, cadmio, cromo, nitratos y plomo.

HIPÓTESIS

Factores antropogénicos como el abatimiento de los niveles piezométricos y el empleo excesivo de agroquímicos para uso agrícola, son la causa principal de los cambios presentados en la calidad del agua subterránea.

REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Antecedentes.

Pocos estudios han documentado las variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua subterránea en áreas con alta densidad de actividades agropecuarias, pese al hecho de que la aplicación de fertilizantes a cultivos forrajeros puede tener grandes efectos sobre la calidad del agua subterránea, o bien, los efectos a largo plazo que puede ocasionar sobre la calidad del agua superficial.

En el sur de Alberta, Canadá, Rodvang *et al.* (2002), realizaron un estudio sobre cambios en la calidad del agua subterránea en un área de riego con alta densidad de actividad agropecuaria para evaluar los efectos por aplicaciones de fertilizantes.

Tomando en cuenta que la contaminación por nitratos y cloro en el agua subterránea puede resultar de aplicaciones excesivas de estiércol como fertilizante, de lagunas de almacenamiento y directamente de establos y que las grandes aplicaciones de fertilizantes inorgánicos también puede contaminar el agua subterránea, Rodvang *et al.* (2002), comprobaron que tanto las concentraciones de nitrato como de cloro, fueron significativamente más altas en las áreas donde la agricultura es intensiva que donde existe poca actividad agrícola.

Castellanos, *et al.* (1998), demostraron que las aguas subterráneas de Guanajuato están incrementando su concentración de sales a través del tiempo como resultado del abatimiento de los niveles piezométricos. El catión que mostró las mayores tendencias de incremento fue el sodio, la zona en que se presentó la mayor concentración de sodio fue la suroeste, donde ya se ven los efectos negativos en el suelo y en las características fisiológicas de los cultivos, como el sorgo.

Un estudio más detallado realizado por Castellanos, *et al.* (2002) en Guanajuato, comprobó un incremento en la concentración salina del agua subterránea a medida que se abaten los niveles piezométricos, y además

explicó que la zona que presentó concentraciones más altas, fue el sureste con 1.22 dS/m (decisiémens por metro), mientras que la región con concentraciones más bajas de sales solubles fue el norte, con sólo 0.57 dS/m. Además, se han reportado incrementos salinos en aguas subterráneas originados por la misma causa, en regiones como: el Sureste de España, el sur de Texas y en el Norte de Chihuahua.

Otras variables medidas por los mismos investigadores, afectadas por el abatimiento de los niveles piezométricos fueron el pH, el cual no presentó cambios significativos, encontrándose dentro del rango normal con un promedio entre 7.7 y 7.8; otras variables fueron, los cationes de calcio, magnesio y potasio, que no mostraron cambios significantes, sin embargo, el sodio, un catión que puede provocar propiedades físicas indeseables en el suelo, mostró una clara tendencia ascendente, con un coeficiente de correlación de 0.59 que fue estadísticamente significativo ($P < 0.05$). En este estudio, las zonas que presentaron un alto nivel de sodio están ubicadas al sureste, con una concentración media de 7.2 meq/L (miliequivalentes por litro), seguida de la zona central, con 4.4 meq/L. Y el resto de las regiones presentaron una concentración media debajo de 3 meq/L.

Pese al hecho de que se han llevado a cabo estudios que analicen las variaciones en la calidad del agua subterránea, aún no han sido reportados documentos que detallen las variaciones en la calidad del agua por elementos que causen efectos adversos a la salud del hombre, puesto que la gran mayoría se enfocan a elementos dañinos para el suelo y la agricultura.

3.1.1 Definición de agua subterránea.

El agua subterránea es el agua que se encuentra entre las partículas del suelo, las rocas y entre las grietas del lecho rocoso. Están contenidas en sedimentos subterráneos permeables y pueden ser aprovechadas por medio de pozos (ATSDR, 2002).

El agua subterránea es considerada frecuentemente una fuente inagotable, pero recientemente las circunstancias indican que el agua subterránea es muy vulnerable a la contaminación y a su desaparición.

3.1.2 Definición de acuífero.

Significa portador de agua, es la zona subterránea donde existen grandes cantidades de aguas subterráneas que pueden abastecer pozos o manantiales (ATSDR, 2002).

3.2 Características geoquímicas del agua.

Es el disolvente más universal (de ahí su vulnerabilidad para degradarse), el de mayor tensión superficial, el de mayor constante dieléctrica, el de mayor valor de vaporización y a excepción del amoníaco, el de más alto calor de fusión; desde un punto de vista geoquímico, además de estas propiedades, si la geología y geomorfología de una determinada zona, condicionan la circulación del agua subterránea y la distribución de las áreas de recarga y descarga; todo ello conducirá a la creación de sistemas de flujo locales y regionales, con líneas de corriente que difieren unas de otras notablemente, en cuanto a recorrido, profundidad, tiempo de permanencia del agua en el terreno, temperatura y presión. De esta manera, en el Acuífero Principal existen importantes variaciones laterales y verticales en la composición química del agua subterránea; debidas éstas, principalmente, a condiciones de recarga, concentración de conos de abatimiento, cambios en la geología, mezclas de aguas de distintos orígenes y cambios en el tiempo de residencia en el terreno, por variaciones en la permeabilidad del medio (González *et al.*, 1991).

3.3 Calidad del agua.

Abarca las propiedades físicas, químicas biológicas y organolépticas del agua. Se refiere a la condición general que permite que el agua se

emplee para usos concretos. La calidad del agua está determinada por la hidrología, fisicoquímica y biología de la masa de agua a que se refiera.

Las características hidrológicas son importantes ya que indican el origen, cantidad de agua y tiempo de permanencia, entre otros datos. Estas condiciones tienen relevancia ya que, según los tipos de substratos por los que viaja el agua, ésta se cargará de sales en función de la composición y solubilidad de los materiales de dicho substrato. Las aguas que discurren por zonas calizas (rocas muy solubles) se cargarán fácilmente de carbonatos, entre otras sales. En el otro extremo, los cursos de agua que discurren sobre substratos cristalinos, como los granitos, se cargarán muy poco de sales, y aparecerá en cantidad apreciable el sílice.

La cantidad y temperatura también son importantes a la hora de analizar las causas que concurren para que el agua presente una calidad u otra. Lógicamente, para una cantidad de contaminantes dada, cuanto mayor sea la cantidad de agua receptora mayor será la dilución de los mismos, y la pérdida de calidad será menor. Por otra parte, la temperatura tiene relevancia, ya que los procesos de putrefacción y algunas reacciones químicas de degradación de residuos potencialmente tóxicos se pueden ver acelerados por el aumento de la temperatura (González *et al.*, 1991).

El agua encontrada en estado natural nunca está en estado puro, sino que presenta sustancias disueltas y en suspensión. Estas sustancias pueden limitar, de modo igualmente natural, el tipo de uso del agua. Las aguas hipersalinas o muy sulfurosas, por ejemplo, no se pueden usar como agua potable o de riego. En estos casos, con frecuencia, el carácter del agua la hace indicada para un uso reservado a la conservación, pues suelen albergar comunidades naturales raras.

Los parámetros más comúnmente utilizados para establecer la calidad del agua son los siguientes: oxígeno disuelto, pH, temperatura, color, sólidos en suspensión, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), dureza, fósforo, nitratos, nitritos, amonio, amoniaco, compuestos fenólicos, hidrocarburos derivados del petróleo, cloro residual, zinc total, cobre soluble, cationes

(sodio, potasio, calcio, magnesio), aniones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos), arsénico, plomo, cadmio, cromo (González *et al.*, 1991).

3.4 Aspectos básicos en la contaminación de aguas subterráneas.

No existe agua que sea completamente pura. Aún el agua en la naturaleza contiene impurezas. A medida que el agua fluye por diferentes rutas, se acumula en cuerpos de agua y se infiltra en las capas del suelo, disolviendo o absorbiendo los minerales o las sustancias que entran en contacto con ella. Algunas de estas sustancias no son dañinas a la salud, pero a ciertos niveles podrían afectar el sabor del agua y contaminarla.

Algunos contaminantes se originan de la erosión natural de las formaciones rocosas. Otros contaminantes provienen de descargas de residuos industriales, productos agrícolas o domésticos. Los contaminantes también pueden provenir de tanques de almacenamiento de agua, pozos sépticos, lugares con desperdicios peligrosos y vertederos. Otro es, por la recarga artificial de acuíferos con agua de baja calidad. O bien, por las posibles combinaciones entre ellos. Actualmente, los contaminantes del agua subterránea de mayor preocupación son los nitratos y los compuestos sintéticos, estos incluyen: solventes, pesticidas, pinturas, barnices y gasolina (ATSDR, 2002).

Lo anterior, origina cambios en los parámetros de calidad del agua subterránea, teniendo por consiguiente efectos adversos a la salud del hombre y las actividades que desempeña.

3.4.1 Fuentes de contaminación.

El hombre interviene sobre el ciclo del agua, entre otras formas, a través de la explotación del agua subterránea. Esta constituye uno de los medios receptores más importantes de contaminación, en función de que, si bien se encuentra más protegida que la superficial, una vez que el contaminante se incorpora a dicho medio, es más difícil de eliminar. En

muchos casos la contaminación del agua subterránea constituye un proceso irreversible.

Los cambios a los que se ha sometido el agua subterránea ha ocasionado una especie de “estrés”, debido a la sobreexplotación de los acuíferos que ha determinado su contaminación como resultado en buena medida de la relación cantidad/calidad de su agua (Martínez *et al.*, 2003).

La agricultura es un proceso bioquímico; sus avances tecnológicos han permitido mejorar la calidad de vida a nivel mundial. Sin embargo el conocimiento de dichos procesos ha permitido sintetizar y aportar a la planta sustancias químicas precisas para la producción agrícola y para la protección frente a las plagas. Alguna de las sales introducidas en el medio acuático subterráneo, debido a actividades agrícolas es preocupante por sus efectos sobre la salud, como el nitrato. Por otra parte, la calidad del agua subterránea, puede contaminarse por compuestos químicos a bajos niveles de concentración (trazas), tanto orgánicos (pesticidas), como inorgánicos (metales).

Otra fuente potencial de contaminación del agua subterránea son los residuos líquidos y sólidos urbanos, de mayor o menor consideración en función del tratamiento que reciben en los diferentes núcleos de población, que en casos permiten la infiltración de contaminantes inorgánicos y orgánicos hasta la zona saturada del suelo. Así como los lixiviados de residuos agrícolas, plásticos y otros restos de la producción agrícola muy contaminantes como son los contenedores de formulaciones de pesticidas (Martínez *et al.*, 2003).

El uso de agua residual doméstica, tratada o no para irrigación, puede ser, si no se ejerce un control adecuado, causa de contaminación de los mantos acuíferos. Los sistemas individuales de eliminación, tales como pozos negros e incluso las fosas sépticas y otros sistemas similares pueden producir problemas.

La producción, almacenamiento, transporte, empleo y eliminación de materiales radioactivos, representa una amenaza para el recurso hídrico subterráneo (FAO, 1981).

Las actividades industriales, agrícolas, domésticas y el empleo de sustancias radiactivas, constituyen las principales fuentes de elementos químicos y de microorganismos que puedan amenazar la calidad natural del agua subterránea. Dicha calidad puede verse amenazada además, por la contaminación de los ríos en conexión hidráulica con los mantos acuíferos, recarga artificial del acuífero con agua de baja calidad y la infiltración de agua de lluvia contaminada por la polución atmosférica (FAO, 1981).

3.4.1.1 Contaminación por iones nitratos.

Numerosos acuíferos se encuentran contaminados por nitrato. Son diversas las fuentes que aportan nitrato al medio ambiente. Entre las que afectan a los acuíferos resaltan: a) agua de lluvia que contiene nitrato y amonio, b) vertidos de agua residual, c) lixiviación en vertederos incontrolados, d) residuos orgánicos procedentes de ganado estabulado y e) excedente de fertilizantes nitrogenados, no usados por la planta y lixiviados a la zona saturada. La que más influencia tiene en nuestra área de estudio es la percolación del agua de riego en zonas de cultivos intensivos. En consecuencia la dosificación en exceso de fertilizante nitrogenado es la causa mayor de riesgo.

Los excedentes de nitrato en el nivel superficial del suelo, que incluye la zona radicular de la planta, muy móviles, pueden ser transportados a la zona no saturada del suelo, donde se mueven a velocidades aproximadas entre 50 y 100 cm/año, dependiendo de las características del suelo, hasta llegar a la zona saturada donde ocurren los procesos de dilución.

Las aguas subterráneas contaminadas por nitrato son difíciles de descontaminar y en todo caso el proceso es lento (Martínez *et al.*, 2003).

3.4.1.2 Contaminación por pesticidas.

La contaminación de agua subterránea por pesticidas es un tema de gran interés sobre calidad del agua potable, en la que limita la concentración máxima por pesticida o "producto relacionado" a 0.1 mg/L y de 0.5 mg/L para el conjunto de ellos. El concepto de "pesticida y producto relacionado" debe entenderse, según el Manual de Procedimientos de la Comisión Alimentaria extendida a reguladores del crecimiento, desfoliantes y cualquier otra sustancia adicionada a cultivos, pre o post-cosecha para proteger su deterioro durante almacenamiento y transporte (Martínez *et al.*, 2003).

La capacidad de un pesticida para alcanzar el agua subterránea se ha correlacionado con su persistencia en el suelo (caracterizada por su vida media) y la atenuación de dicha capacidad.

Además, hay que considerar la cantidad de pesticida empleado, de manera que solamente aquellos muy usados son potencialmente tóxicos. La rapidez con que aparecen nuevas formulaciones de pesticidas en el mercado y la ausencia de criterios unificados entre los distintos estados en relación al uso real de estas sustancias hace que la información disponible esté poco sistematizada (Martínez *et al.*, 2003).

3.4.1.3 Contaminación por metales traza.

El concepto de elementos traza contiene una cierta ambigüedad que parte de la ausencia de criterio en relación con los elementos que hay que incluir. Conceptos relativos son "ultratrazas", así como otros que hacen referencia al efecto tóxico de estas sustancias (metales tóxicos, metales pesados, etc). En todo caso cabe considerar en el grupo algunos cuyos efectos tóxicos y química ambiental son relativamente bien conocidos, como cadmio, plomo, cromo, mercurio, cobalto, cobre, manganeso, hierro, níquel, zinc, bario y vanadio.

Existe un grupo adicional en el que es mayor la necesidad de incidir a nivel de estudios de investigación como por ejemplo especiación de arsénico y de cromo (diferenciado entre la química ambiental del Cr^{+3} y Cr^{+6}).

De acuerdo con lo aceptado en la bibliografía científica, los compuestos químicos pueden encontrarse en el agua en forma disuelta (y en consecuencia filtrable), sobre partículas suspendidas (no filtrable) o bien como materia sedimentada. Desde el punto de vista geoquímico y de contaminación del agua, las partículas suspendidas juegan un papel importante en la circulación de metales en aguas naturales. Dependiendo de las características fisicoquímicas de la materia suspendida (capacidad de adsorción, composición, etc.) y medio acuoso (pH, temperatura, potencial redox, salinidad, etc.) los metales traza se redistribuyen entre las tres formas mencionadas (Martínez *et al.*, 2003).

3.4.2 Causas de la contaminación.

Muchas actividades humanas en la superficie de la tierra causan cambios en la calidad del acuífero. La importancia del efecto de una actividad en particular está relacionada con la habilidad del suelo y del sistema hídrico subterráneo de degradar o diluir los contaminantes así como del grado en que los contaminantes interfieren con el uso del agua. Uno de los principales contaminantes del agua subterránea son los pesticidas, que son diluidos e infiltrados por el agua de lluvia.

Otra causa de contaminación del agua subterránea es la lluvia ácida originada por contaminación atmosférica causada por el hombre. La acidificación del agua subterránea se realiza en tres etapas. Primero disminuye la capacidad de los suelos de neutralizar las precipitaciones. Aumentan los niveles de sulfato, calcio y potasio, en el agua subterránea, no existiendo ningún otro efecto que altere la calidad del agua. En esta etapa el agua se torna corrosiva y ataca las cañerías. Luego de esta etapa la acción neutralizante del suelo decae aún más y el efecto buffer del agua subterránea comienza a disminuir. Se nota en esta etapa un aumento en el poder corrosivo sobre metales y concreto. Por último, la capacidad neutralizante del suelo desaparece y los valores de pH descienden con un

aumento en la concentración de metales en el agua de los pozos, tornándose aún más corrosiva (Zambrano, 1997).

Según estudios realizados por González *et al.* (1991), se comprobó que el origen del arsénico en el Acuífero Principal es resultado de los eventos geológicos que originaron a la Comarca Lagunera; existieron procesos magmáticos y es muy probable que en la consolidación del magma, se haya formado un sistema hidrotermal acuoso que aportó una notable concentración de oligoelementos, como: litio, boro, arsénico y flúor, siendo la causa del hidroarsenismo en la región. La zona comprendida entre Torreón y Francisco I. Madero ya fue afectada por una fuente puntual de arsénico, el valle de Villa de Juárez presenta indicios de contaminación por arsénico, nitratos, fluoruros y sulfatos, entre otros, hacía su porción norooccidental.

Otra causa importante en la región es la sobreexplotación del recurso hídrico, ya que al disminuir los niveles piezométricos, la concentración de los elementos presentes en rocas a profundidades mayores aumenta, puesto que el agua tiene la capacidad para diluir dichos elementos, aunado al menor volumen de agua para disolverlos (González *et al.*, 1991).

El uso desmedido de agroquímicos ha impactado negativamente la calidad del agua del acuífero Principal. Castellanos *et al.* (1990), realizaron un estudio con el fin de determinar la calidad del agua en el acuífero regional. Sus resultados presentaron regiones con valores por encima de los límites máximos permisibles en la Organización Mundial de la Salud (OMS), la cual establece 10 ppm de N-NO₃ para consumo humano y 100 ppm para consumo animal como límites máximos permisibles. Estudios posteriores indican, que estos niveles han ido en aumento. Algunos de estos estudios indican que la principal fuente responsable de la contaminación con nitratos del agua subterránea, son las actividades antropogénicas (Martínez *et al.*, 2001).

3.5 Importancia de la calidad del agua en la salud.

Muy pocas personas, médicos y autoridades sanitarias incluidas, son realmente conscientes de la importancia que tiene el agua para la salud. Sin embargo, es absolutamente vital, mucho más de lo que inmensa mayoría de la gente pueda sospechar. Al punto de que muchas de las actuales enfermedades podría evitarse simplemente bebiendo agua viva y estructurada en lugar de esa agua muerta, desestructurada y a veces contaminada que hoy tomamos. Un problema que incluye a la mayor parte del agua mineral que se comercializa hoy día.

El 75 % de nuestro cuerpo al nacer es agua. También lo es el 70 % de la Tierra. No hay nada más abundante en nuestro planeta que el agua, constituyente necesario de las células de todos los tejidos animales y vegetales. La vida no puede existir durante un periodo limitado en ausencia de agua porque con ella se desarrollan todas las reacciones bioquímicas de los seres vivos. Simplemente, el agua es el fundamento de la vida porque la vida se generó en ella y es la base de todo ser vivo.

A nivel popular, nuestros conocimientos sobre el agua son muy escasos, apenas sabemos que está compuesta de dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno, y que ha de pasar a través de una serie de controles y procesos químicos para llegar a nuestro grifo en perfecto estado bacteriológico e higiénico.

Todo lo que comemos, respiramos o sentimos influye en nuestra salud global. También lo que bebemos y, más en concreto, la cantidad y calidad del agua que ingerimos ya que este elemento cumple funciones vitales en nuestro organismo. El agua es fundamental en la eliminación de los residuos, reparación de los tejidos, las secreciones gástricas e interviene en el mantenimiento de una adecuada temperatura corporal, entre otras muchas funciones vitales. Por tanto, su calidad puede llegar a determinar nuestro buen o mal estado de salud (Jimeno, 2003).

3.6 La distribución del agua en el cuerpo.

Un bebé se compone de un 75 % de agua, un hombre adulto de un 60% y una mujer de un 50 %. Es, por tanto, el elemento principal en la composición del cuerpo humano. En condiciones normales esta proporción se mantiene prácticamente constante mediante el ajuste del ingreso y la pérdida de agua. El ingreso está constituido por el agua de bebida, la contenida en los alimentos y una fracción menor resultante de la oxidación de los principios inmediatos en el organismo. La pérdida se produce principalmente por la orina, evaporación (sudor) y defecación.

En cuanto a su distribución, el agua corporal está distribuida en dos sistemas:

- ❖ En el interior de las células (aproximadamente el 63 % del total).
- ❖ En el exterior de las células (el 37 %). De esta cantidad el 27 % corresponde al líquido intercelular, el 3 % al agua transcelular y el 7 % al plasma (Jimeno, 2003).

3.7 Cambios en la calidad del agua.

La cada vez mayor dependencia del abastecimiento de agua potable del recurso hídrico subterráneo pone de relevancia la importancia que adquiere el conocer si la calidad del agua subterránea esta siendo alterada. Esto puede repercutir a mediano y largo plazo en la salud de la población abastecida (Rodríguez, 2003).

La alteración natural de la calidad del agua depende fuertemente de las condiciones geológicas de la zona y las interacciones agua-roca. Los sistemas acuíferos que reúnen condiciones para presentar contenidos sobre las normatividades internacionales para agua potable son: acuíferos de gran extensión y profundidad; sistemas hidrotermales; acuíferos que presenten condiciones reductoras; acuíferos con aguas fósiles: sistemas en cuya composición existan niveles evaporíticos; acuíferos volcánicos; formaciones calizas con intrusivos mineralizados; sistemas con formaciones sedimentarias lacustres recientes; acuíferos costeros (Rodríguez, 2003).

La alteración natural de la calidad del agua subterránea se origina por la circulación del agua por rocas con elementos lixiviables. Caso particular lo constituyen flujos regionales termales. Otro caso es la sobreexplotación de acuíferos, y al disminuir los niveles freáticos de este, se solubilizan elementos presentes en las rocas, aumentando la concentración de los mismos en el agua. Concentraciones de arsénico, flúor, fierro, plomo, boro, selenio, cromo, cadmio, compuestos de azufre entre otros pueden ser de origen natural. En algunas zonas, flujos profundos pueden acarrear radón (Díaz, 2003).

3.7.1 Sinopsis de la explotación del recurso hídrico en la Región.

En el año de 1840 ya existía una actividad agrícola, muy incipiente, en la Comarca Lagunera, ocasionada por el riego natural de las avenidas de los ríos Nazas y Aguanaval. A partir de entonces, el desarrollo agrícola se extendió mediante la construcción de obras rudimentarias que derivaban y conducían los escurrimientos de dichos ríos a terrenos dispersos en las inmediaciones de sus cursos. De tal manera que, para fines del siglo XIX, la agricultura regional cobró cierta importancia, aunque, como es lógico, con técnicas de riego poco sofisticadas.

En la década de los 20s del siglo XX, dada la necesidad de ampliar las tierras de cultivo, alejadas éstas de los cauces de los citados ríos, se inicia la explotación del Acuífero Principal con los primeros pozos. Así, la poca profundidad del nivel freático y la gran producción de las captaciones, propició que en los años 40s, las obras en operación fueran alrededor de mil. Paralelamente, en el año de 1941 se crea el Distrito de Riego No. 17 y en 1946 entra en operación la presa Lázaro Cárdenas con una capacidad disponible de 2,777 Mm³. Adicionalmente se construye una red de canales y un sin número de pozos, motivando el auge agrícola en la Comarca Lagunera (IMTA, 2000).

Este espectacular desarrollo originó cambios radicales en la hidrodinámica de la región; por una parte la proliferación de pozos (en 1950

existían alrededor de 3000), y por otra, la reducción de la recarga del acuífero aluvio- lacustre ocasionada por la regulación de los escurrimientos superficiales, motivaron la sobreexplotación del agua subterránea.

Por consiguiente, y a pesar de las sucesivas vedas que se implantaron para preservar los mantos acuíferos, los efectos colaterales a la sobreexplotación se incrementaron, dando por resultado: innumerables pozos inutilizados por el abatimiento del nivel del agua, reducción en el rendimiento de muchos otros y una elevación en los costos de extracción.

La rehabilitación del distrito de riego, iniciada en 1960, mejoró notablemente el aprovechamiento del recurso hídrico superficial; pero, al concluir la presa Francisco zarco (1968) y terminar, aproximadamente en el año de 1972, el revestimiento de 550 km de canales principales y 3,400 km de canales secundarios generaron que la recarga ejercida por el río Nazas disminuyera notablemente (IMTA, 2000).

De acuerdo con el censo de aprovechamiento de 1999 realizado por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la CNA en la Región Lagunera, se sabe que existen alrededor de 3577 pozos, de los cuales 59 son inactivos.

De los aprovechamientos activos, 2834, se estima un volumen de extracción de 1045.2 Mm³/año utilizados para fines agrícolas, 83 doméstico (9.2Mm³/año), público urbano 349 (127.8 Mm³/año), 84 son utilizados en actividades industriales (23.1 Mm³/año), 208 pecuarios (13.4 Mm³/año) y 19 (3.1 Mm³/año) para servicios; con los cuales, se explotaba un volumen del orden de 1 221.8 Mm³/año; y la zona de mayor densidad de captaciones, corresponde a las porciones centro-suroeste de la Comarca (CNA, 2002).

3.7.2 Disponibilidad de agua en la Comarca Lagunera.

De acuerdo a la información existente en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), el volumen concesionado de aguas subterráneas para este acuífero, al 30 de abril de 2002, es de 701, 834,604 (CNA, 2002).

3.7.2.1 Disponibilidad de agua subterránea.

La disponibilidad de agua subterránea es de – 182 934 604 m³/año, por lo que la cifra indica que no existe un volumen disponible para nuevas concesiones (CNA, 2002).

3.7.3 Efectos colaterales a la sobreexplotación del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera.

La explotación del agua subterránea ha ocurrido debido al incremento de su demanda en el uso agrícola, municipal e industrial. Una significativa reducción en los niveles de agua puede ser atribuido a cada uno de estos sectores, o a la combinación de ellos.

Algunos impactos económicos obvios de la explotación del agua subterránea incluye el incremento de costos por bombeo y la pérdida de pozos poco superficiales, los cuales a su vez, pueden conducir a conflictos entre los usuarios del agua subterránea.

La explotación del agua subterránea puede llevar también a serios impactos ambientales. Por reducción de los índices de agua, el bombeo de agua subterránea puede disminuir el flujo en corrientes de agua y, consecuentemente, puede poner en peligro los hábitats acuáticos e incrementar la erosión del suelo (Dos Santos, 1998).

Adicionalmente a lo anterior y siendo el objetivo principal del presente estudio, la sobreexplotación del Acuífero Principal ha generado un cambio drástico en la calidad del agua, teniendo consigo efectos colaterales para el hombre en diversos aspectos, los cuales se mencionan a continuación basándose en los estudios realizados por González *et al.*, 1991.

Como primera consecuencia al romper el equilibrio recarga vs extracción se genera un abatimiento de los niveles piezométricos, que está estrechamente relacionado con un grupo de factores que dependen primordialmente de la manera de diseñar el pozo y la construcción de éste.

Como segunda consecuencia se tiene el agotamiento de manantiales (punto o zona de la superficie del terreno en el que, de modo natural, fluye a

la superficie una cantidad apreciable de agua, procedente de un acuífero o embalse subterráneo).

Posteriormente está la afectación de pozos, causada por: la falta de proyectos para la construcción de pozos, basado en las características geológicas del acuífero, los principios de la hidráulica en el análisis del pozo, inadecuada selección del equipo de bombeo y la carencia de un mantenimiento preventivo de la interacción pozo – equipo de bombeo.

El último efecto es el carácter químico del agua subterránea, que, si bien, las características químicas del agua determinan su utilidad y la eventual presencia de yacimientos minerales ocultos, asimismo, aportan importantes indicadores de la historia hidrogeoquímica que ha sido objeto; por una parte, también ese carácter químico del agua nos revela con antelación los efectos nocivos que se pueden suscitar en la infraestructura hidráulica de los sistemas de abastecimiento, en el recurso suelo y en el sector salud, entre otros.

Por lo que, dentro de los efectos colaterales al carácter químico del agua del Acuífero Principal, está la incrustación y/o corrosión de ademes. En la Comarca Lagunera, dada la calidad química externada se cree que gran parte de los ademes de pozos está siendo objeto: por una parte, de una incrustación provocada por la precipitación de sulfatos de calcio y de magnesio, o de los carbonatos de estos últimos; y por una corrosión originada por el alto contenido de sólidos totales disueltos, que aumentan la conductividad eléctrica del agua, así como por los altos valores de cloruros y nitratos que se tienen.

Otros efectos son los procesos de salinización y alcalinización del suelo en la Comarca Lagunera.

El efecto de mayor relevancia es la salubridad del agua, por lo que se expone la nocividad y/o toxicidad de los iones y sustancias iónicas que presentan un mayor riesgo o pueden causar un efecto adverso a la salud del hombre (González *et al.*, 1991).

3.7.3.1 Nitratos*

El problema de nitratos radica en que pueden ser reducidos a nitritos en el interior del organismo humano, especialmente en los niños de menos de tres meses de edad y en adultos con ciertos problemas.

Los nitritos producen la transformación de la hemoglobina a metahemoglobina. La hemoglobina se encarga del transporte del oxígeno a través de los vasos sanguíneos y capilares, pero la metahemoglobina no es capaz de captar y ceder oxígeno de forma funcional. La cantidad normal de metahemoglobina no excede el 2 %. Entre el 5 y el 10 % se manifiestan los primeros signos de cianosis. Entre el 10 y el 20 % se aprecia una insuficiencia de oxigenación muscular y por encima del 50 % puede llegar a ser mortal.

Una vez formados los nitritos, pueden reaccionar con las aminas, sustancias ampliamente presentes en nuestro organismo, originando las nitrosaminas, un tipo de compuestos sobre cuya acción cancerígena no existen dudas.

En las experiencias de laboratorio se ha comprobado que alrededor del 75 % de ellas pueden originar cánceres hepáticos y, aunque con menor frecuencia, también de pulmón, estómago, riñones, esófago y páncreas.

También se ha podido comprobar que existe una correlación directa entre el consumo de alimentos o aguas con exceso de nitratos, cánceres gástricos y entre el trabajo en las fábricas de abonos químicos y dichos cánceres.

Se ha comprobado que cuando las embarazadas ingieren cantidades altas de nitratos se eleva la mortalidad durante los primeros días de vida del hijo, principalmente debido a malformaciones que afectan al sistema nervioso central, al muscular o al óseo. También se han descrito efectos perniciosos sobre las glándulas hormonales.

* Información basada en la fuente Miliarium (b), 2004.

3.7.3.2 Arsénico.

El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre que en algunas regiones del mundo puede estar presente en el agua cuando ésta atraviesa rocas que lo contienen en abundancia.

Los procesos que pueden dar lugar a una contaminación natural del agua por arsénico son muy variados: áreas geotermales, regiones volcánicas, acuitardos o niveles de arcillas, intercalados en acuíferos detríticos que contienen minerales con arsénico y acuíferos que contienen óxido de hierro y manganeso, con fuerte afinidad por el arsénico.

La presencia de arsénico en el agua subterránea también se puede explicar como resultado de la utilización, a veces excesiva y sin control, de productos relacionados con actividades agrícolas, jardinería y limpieza de malezas, como son los fungicidas, insecticidas y plaguicidas en general. Muchos de ellos tienen arsénico como compuesto tóxico, porque su utilización está indicada para erradicar plagas diversas.

La principal vía de dispersión del arsénico en el ambiente es el agua. Aún si se considera la sedimentación, la solubilidad de los arsenatos y arsenitos es suficiente para que este elemento se transporte en los sistemas acuáticos. La concentración de arsénico en aguas naturales frescas es muy variable y probablemente depende de las formas de arsénico en el suelo local.

La presencia de agua contaminada por arsénico adquiere mayor trascendencia en regiones con una importante actividad agrícola y ganadera, ya que el agua no sólo es utilizada para el abastecimiento de núcleos de población sino también como agua de riego y para bebida del ganado (Miliarium Aureum (a), 2004).

Las principales rutas de exposición de las personas al arsénico son la ingesta e inhalación. El arsénico es acumulable en el organismo por exposición crónica y superados ciertos niveles de concentración puede ocasionar afecciones como alteraciones de la piel (relajamiento de los capilares cutáneos y la dilatación de los mismos), lesiones dérmicas

(neoplasias de piel), vasculopatías periféricas ("enfermedad del pie negro"), además de enfermedades respiratorias; neurológicas (neuropatías periféricas), cardiovasculares y diversos tipos de cáncer (pulmón, riñón, hígado, vejiga y de piel).

Además, personas que ingieren de forma prolongada arsénico inorgánico, vía agua de bebida, pueden presentar hiperqueratosis palmo-plantar, cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel y callosidades localizadas en las palmas de las manos y pies.

La toxicidad por arsénico puede ocurrir en dos formas: toxicidad aguda y toxicidad crónica. La toxicidad aguda es consecuencia de la ingesta de alto contenido de arsénico en un tiempo corto y la toxicidad crónica es resultado de la ingesta de pequeñas cantidades de arsénico en un largo periodo de tiempo.

La toxicidad aguda de compuestos de arsénico en el ser humano es función de la capacidad de asimilación del cuerpo humano. La arsina es considerada la forma más tóxica, seguida del arsenito, arsenatos y los compuestos orgánicos de arsénico. La dosis letal para adultos está en el rango de 1 a 4 mg /kg del peso corporal (trióxido de diarsénico). La toxicidad del arsenito es 10 veces superior a la del arsenato.

La dosis letal 50 de trióxido de arsénico (As_2O_3) es de 2 a 3 microgramos por kilo de peso corporal, aunque en ocasiones cantidades considerablemente mayores no han causado la muerte debido a su expulsión inmediata por medio de vómitos originados por la gran irritación gástrica (Miliarium Aureum (a), 2004).

La Tabla 3.1 muestra los estándares ambientales del arsénico establecidos por diferentes países u organizaciones.

Tabla 3.1. Estándares ambientales del arsénico

País / Organización	Nivel de contaminación máximo (µg/l)
Canadá	25
USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)	Nivel Máximo de Contaminación 10
Organización Mundial de la Salud (OMS)	Valor Guía Provisional 10

(Miliarium Aureum (a), 2004).

3.7.3.3 Níquel.

En los sistemas acuáticos, el níquel habitualmente se encuentra en su forma Ni^{2+} . La forma en que se encuentra en el agua depende, entre otros factores, del pH. Los compuestos de níquel en los cuerpos de agua superficial o subterráneo se registra por regla general como "níquel total" y los resultados se presentan de la misma manera, si bien el espectro de los compuestos que se introducen en los cuerpos de agua por acción antrópica abarca desde sales solubles y óxidos insolubles hasta polvo de níquel metálico. Hasta ahora no se tiene conocimiento de compuestos de níquel que se encuentren exclusivamente en el agua.

El níquel es un elemento traza. El metal y sus compuestos inorgánicos se consideran comparativamente inocuos. En cambio ciertos compuestos orgánicos del níquel son extremadamente tóxicos (p. ej., el tetracarbonilo de níquel) y poseen un alto potencial alergénico y mutágeno. Es probable que el vapor y el polvo de níquel sean carcinógenos, lo mismo que algunos otros de sus compuestos (Escuelas de Ciencias de la Salud (b), 2001).

La Tabla 3.2 muestra los estándares ambientales del níquel en el agua potable, superficial, marina, subterránea y para riego, establecidos por diversos organismos.

Tabla 3.2. Estándares ambientales del níquel

Ámbito	País/organismo	Valor
Agua potable	CE	0,05 mg/l
Agua potable	OMS	0,1 mg/l
Aguas superficiales	EPA	1 mg/l
Agua marina	EPA	0,002 mg/l
Aguas subterráneas	EPA	1 mg/l
Agua p/riego	EPA	0,2 mg/l

(EPA, 2000)

3.7.3.4 Plomo.

El Plomo, proveniente de actividades industriales y uso de hidrocarburos, interfiere con el metabolismo y la función celular. Las altas concentraciones de este metal, que en la sangre tiene una vida media de uno a dos meses y en el hueso de 20 a 30 años, pueden producir efectos dañinos sobre los sistemas hematopoyético (formación de glóbulos rojos), hepático, renal, reproductivo y gastrointestinal. Los niños, bebés y fetos parecen ser más vulnerables a la intoxicación con plomo. Una dosis de plomo que puede tener pocas consecuencias en un adulto puede afectar mucho al organismo de un cuerpo pequeño. También, los niños absorben más rápidamente el plomo que ingieren.

El desarrollo mental y físico de un niño puede sufrir daños incorregibles al ser expuestos al plomo. En bebés, cuya dieta consiste de líquidos hechos con agua, el plomo en el agua potable que consumen es la mayor fuente de este metal (del 40 al 60 por ciento) (USEPA, 2000).

Los efectos del Plomo en niños se manifiestan en el sistema nervioso central; causa daño neuroconductual, que se refleja en el decremento de la atención, bajos puntajes en pruebas psicométricas y problemas de conducta como la hiperactividad; a largo plazo, cerca de 95 % del metal presente en el organismo se acumula a nivel óseo, sustituyendo al Calcio. Se sabe que también ocurre transferencia placentaria de plomo (Jiménez, 1993).

Los estándares impuestos por el gobierno federal limitaba inicialmente la cantidad de plomo en el agua a 50 ppb (partes por billón, equivale a 1 microgramo por litro (g/L) ó 0.001 miligramos por litro (mg/L). Resultado de la nueva información sobre la salud y el contacto con plomo, la EPA ha establecido el nivel de 15 ppb para tomar acción. Si las pruebas demuestran que el nivel de plomo en el agua corriente de la casa es de 15 ppb o más, se aconseja (especialmente si hay niños en la vivienda) reducir cuanto más posible el nivel del plomo en el agua (USEPA, 2000).

3.7.3.5 Cadmio.

El Cadmio que llega al agua procede principalmente de vertidos industriales, así como vertidos urbanos. La acumulación de Cadmio presenta, mayoritariamente, un origen alimentario. Además, de todos los metales tóxicos emitidos al medio ambiente, éste es uno de los que más tiende a acumularse en los alimentos.

Una característica del Cadmio es su fácil transferencia del suelo a los vegetales, siendo uno de los metales que mejor absorben las plantas, sobre todo cereales como el arroz, el trigo y, en menor cantidad el maíz.

El Cadmio contenido en el agua puede pasar a los recursos alimenticios acuáticos, y de aquí llegar a la cadena de alimentación.

La mayoría de la fauna y flora acuáticas pueden acumular Cadmio en cantidades superiores a los niveles que pueda haber en el agua.

Sí se conoce el hecho de que el agua puede contaminarse por el sistema de distribución, ya que muchas tuberías se realizan con hierro galvanizado, esto se logra con aleación con Zinc, muchas veces impuro, y la impureza que lleva el Zinc suele ser Cadmio, con lo que parte será cedido al agua de las tuberías (Escuelas de Ciencias de la Salud (a), 2001).

Se considerará una dosis mortal la de 100 mcg/dl (microgramos por decilitro). La cantidad en agua de bebida debe ser, según la OMS inferior a 5 mcg/l y según la EPA (2000), 10 mcg/l. Por ejemplo, en un neonato, la cantidad total de Cadmio en el organismo es de 1 mcg, pero en la edad

adulto podemos acumular de 30 a 40 microgramos, sin llegar a aparecer manifestaciones de toxicidad.

De las formas de absorción, la inhalatoria es la mayor (40 – 50 %), sin embargo puede considerarse poco significativa, con la excepción de los fumadores, ya que el tabaco de un cigarrillo contiene de 1.5 a 2 mcg de Cadmio, el 70 % del cual pasa al humo. La mayor vía de toxicidad es la vía gástrica. El Cadmio tiene una baja absorción, de 5 a 20 % en un adulto, y esta absorción se ve disminuida con la presencia de Calcio y ácido Fólico, así como metales como Zinc y Cromo.

El Cadmio se acumula entre el riñón y el hígado desde un 50 a 65 %. En un principio llega al hígado, que es donde se sintetiza la metalotioneína, y de aquí es trasladado progresivamente al riñón, donde quedará acumulado casi de forma definitiva, ya que la vida media del Cadmio es de unos 20 años en adultos (Escuelas de Ciencias de la Salud (a), 2001).

En caso de una ingestión masiva, los síntomas derivados se relacionan con procesos irritativos locales: náuseas, vómitos, dolor abdominal, hipersalivación, dificultad de tragar. Como procesos crónicos se pueden presentar:

- ❖ Nefrotoxicidad - puede alterar las funciones renales, y esta agresión se realiza sobre el epitelio tubular por ser el más sensible de la nefrona y el que está más diferenciado funcionalmente. Ello ocurre cuando la concentración de Cadmio en el riñón llega a valores de unos 200 mcg/g, dando lugar a la imposibilidad de reabsorción de ciertas moléculas y proteínas y si sigue aumentando la concentración, puede llegar a producir finalmente, muerte celular y anuria.
- ❖ Osteomalacia - Si la dosis de metal acumulado aumenta, podemos llegar a una intoxicación muy avanzada en que aparece Hipercalciuria, la cual, probablemente relacionada con una alteración del metabolismo óseo, puede llegar a producir Osteomalacia. Esta patología ósea se describe como fisuras óseas simétricas que aparecen sobretodo en el cuello del fémur. Se asocia a una alteración

del metabolismo del Calcio, ya que afecta especialmente a las mujeres después de la menopausia, provocando dolores violentos en pelvis y miembros inferiores.

- ❖ Carcinogénesis - El Cadmio actúa como antagonista del Zinc, en los hombres provoca un aumento de cáncer de próstata y pulmón, sobretodo en fumadores, ya que el tabaco dobla los valores de ingesta diarios (Escuelas de Ciencias de la Salud (a), 2001).

3.7.3.6 Cromo.

El cromo se utiliza como catalizador en la síntesis del amoniaco, en la fabricación de acero al cromo, acero inoxidable, aleaciones con cromo y en el cromado galvanizado.

Los diversos compuestos del cromo hexavalente representan la mayor amenaza, especialmente debido a sus efectos genéticos. Los compuestos del cromo (VI) actúan en casi todos los sistemas de ensayo diseñados para determinar sus efectos mutagénicos. El hecho comprobado de que atraviesa la placenta significa un alto riesgo, para los embriones y fetos (Gómez, 1997).

Shoental (1975) explicó la carcinogenicidad ocasionada en particular por el Cromo, por la producción de epoxialdehídos en una reacción catalizada por lipasas lisosomales, y Gómez-Arroyo *et al.* (1981) la explicaron por el intercambio de cromátidas hermanas en cultivos de linfocitos humanos.

Las intoxicaciones agudas con compuestos de cromo VI se manifiestan en lesiones renales, hepáticas y pulmonares, mutaciones en el tracto gastrointestinal así como acumulaciones en el hígado, en el riñón, en la glándula tiroides y en la medula ósea; resta capacidad a las propiedades de la sangre y reduce la de los glóbulos rojos (Willis, 1998).

La mayoría de las sustancias que contienen cromo ingresan al organismo a través de los alimentos y del agua de bebida (Gómez, 1997).

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2000) establece como límite máximo para la ingesta en humanos del cromo a 0.05 mg/l, ya que a

un nivel mayor que éste puede causar graves trastornos en los seres vivos, y finalmente ocasionar la muerte.

3.8 Depuración de acuíferos.

Los acuíferos tienen cierta capacidad de autodepuración, mayor o menor según el tipo de roca y otras características. Las sustancias contaminantes, al ir el agua avanzando entre las partículas del subsuelo se filtran, dispersan y también son neutralizadas, oxidadas, reducidas o sufren otros procesos químicos o biológicos que las degradan.

De esta manera el agua va limpiándose. Cuando la estructura geológica del terreno facilita una zona amplia de aireación, los procesos de depuración son más eficaces. También es muy favorable la abundancia de arcillas y materia orgánica. En cambio en los depósitos aluviales o las zonas kársticas la purificación del agua es mucho más difícil. Este tipo de acuífero es mucho más sensible a la contaminación (Díaz, 2003).

Es muy importante, de todas formas, tener en cuenta que las posibilidades de depuración en el acuífero son limitadas y que el mejor método de protección es, por tanto, la prevención. No contaminar, controlar los focos de contaminación para conocer bien sus efectos y evitar que las sustancias contaminantes lleguen al acuífero son los mejores métodos para poder seguir disfrutando de ellos sin problemas.

Cuando un acuífero está contaminado y hay que limpiarlo el proceso es difícil y caro. Se han usado procedimientos que extraen el agua, la depuran y la vuelven a inyectar en el terreno, pero no siempre son eficaces y consumen una gran cantidad de energía y dinero (Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 2002).

3.9 Descripción del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera[†].

3.9.1 División municipal.

La zona de estudio ocupa los municipios de Gómez Palacio, Lerdo y Tlahualilo en el estado de Durango y Torreón, Viesca, Matamoros, Francisco I. Madero y San Pedro de las Colonias en el estado de Coahuila. Por lo tanto, a partir de aquí, cuando se haga referencia a la Comarca Lagunera, corresponderá a los municipios mencionados.

La principal vía de acceso corresponde a la carretera federal No. 49 que une a las ciudades de Torreón, Coah., Gómez Palacio y Lerdo, Dgo. con la ciudad de Chihuahua, Chih., atravesando la zona del acuífero principal en su porción centro occidental; así mismo está comunicada por la carretera federal No. 40, que enlaza las ciudades de Durango y Torreón, pasando por la porción centro sur de la zona del acuífero de la Laguna, para posteriormente continuar hacia la ciudad de Saltillo y más adelante a Monterrey.

La posición geográfica de la Comarca Lagunera, así como sus distintos rasgos morfológicos y climatológicos, dan lugar a dos regiones bien definidas: las regiones montañosas, en las cuales, debido a la baja disponibilidad de agua, se ha generado un bajo grado de desarrollo económico en contraste con la porción del valle, la cual ha mostrado gran desarrollo principalmente agrícola e industrial, el cual se encuentra sustentado por la explotación del agua subterránea y el aprovechamiento del agua superficial que escurren en los ríos Nazas y Aguanaval.

3.9.2 Fisiografía.

3.9.2.1 Provincias fisiográficas.

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de las Provincias Fisiográficas de la Sierra Madre Oriental y de las Sierras y Llanos del Norte, el área de estudio queda incluida en cinco subprovincias fisiográficas:

- A. Subprovincia de Sierras Transversales

[†] Fuente de información de la descripción del Acuífero Principal: CNA, 2002.

- B. Subprovincia de Pliegues Saltillo-Parras
- C. Subprovincia Sierra de la Paila
- D. Subprovincia Laguna de Mayrán
- E. Subprovincia Bolsón Mapimí.

3.9.3 Hidrografía.

Las corrientes hídricas superficiales de mayor importancia son los ríos Aguanaval y Nazas, aunque existen otras corrientes secundarias que en la época de lluvias pueden drenar sus aguas hacia la zona del acuífero; dentro de estas se pueden mencionar el arroyo La Vega, Vinagrillos y Las Vegas.

El río Aguanaval se origina al poniente de la ciudad de Zacatecas y corre en una dirección sensible S-N, pasando por los poblados de Río Grande y San Francisco Zacatecas; más al norte sirve como límite estatal entre Durango y Coahuila, para posteriormente llegar hasta la zona de la Laguna de Viesca, en Coahuila, que es donde finaliza su recorrido.

Sus afluentes más importantes son los ríos Santa Clara, San Francisco, Zaragoza, Tetillas, Calabacillas y Santa Clara, todos ellos en el estado de Zacatecas. Hacia el norte de la Ciudad de Fresnillo, Zacatecas existe la presa Cazadero, como único aprovechamiento de agua superficial.

El río Nazas se origina en las porciones más elevadas de la Sierra Madre Occidental, al poniente de la ciudad de Durango, en donde lleva una dirección aproximada S-N y se le conoce como río Santiago; a la altura de Santiago Papasquiario, Dgo., cambia su rumbo hacia el oriente hasta llegar a ciudad Lerdo, Dgo., en donde pasa a formar el límite entre los estados de Durango y Coahuila; su traza se interna en la ciudad de Torreón para finalizar su recorrido en la antigua Laguna de Mayrán. En el transcurso de su recorrido, que supera los 400 km, presenta numerosos afluentes, dentro de los cuales los más importantes corresponden a los ríos Sextín, Potrerillos y Peñón Blanco. En su desarrollo existen dos presas que controlan sus aguas, Palmito o Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, ambas en el estado de Durango.

El Distrito de Riego No. 17 es servido mediante varios canales que conducen las aguas derivadas principalmente del río Nazas, y además de otros dos que derivan escurrimiento del Aguanaval.

3.9.4 Hidrogeología.

3.9.4.1 Tipo de acuífero.

Se determinaron dos tipos de capas almacenadoras de agua subterránea, la primera se encuentra estrechamente asociada a la presencia de sedimentos granulares, en tanto que la segunda se asocia con un medio fracturado constituido principalmente por rocas sedimentarias calcáreas y en menor porción por materiales de origen ígneo.

Las litofacies asociadas a los medios poroso y fracturado constituyen un sistema acuífero que fluctúa de libre a semiconfinado y indeterminadas áreas su comportamiento corresponde a un acuífero del tipo confinado, lo cual es producto de cambios de conductividad hidráulica atribuibles a la diversidad de litologías, tanto vertical como lateral en el subsuelo, teniendo un peso significativo, dentro de las conductividades hidráulicas presentes en el acuífero.

3.9.5 Geomorfología.

Como resultado de la caracterización geomorfológico del área de estudio, se definen tres unidades hidrogeomorfológicas.

Unidad hidrogeomorfológica I. Domina la mayor parte de la zona de estudio; constituida por valles, lomeríos y depresiones que forman pendientes bajas, donde las corrientes superficiales prácticamente están ausentes, representando una zona que propicia la infiltración del agua, por lo que su importancia radica en la recarga que representa para el acuífero.

Las pendientes de baja densidad así como la ausencia de drenaje, son parámetros que indican, que el mayor porcentaje de agua que sobre ellas escurre tiende a infiltrarse al acuífero, a través de los materiales granulares, fracturas y diaclasas que los caracterizan.

Unidad hidrogeomorfológica II. También llamada de mesetas, se distribuye principalmente en la porción norte de la zona de estudio aunque también se observan al poniente de la sierra El Rosario. Se caracteriza por presentar zonas variables en cuanto a propiedades de infiltración; es decir, la cima de los elementos geomorfológicos muestran infiltración sobre todo en las zonas de alto fracturamiento, donde las pendientes que existen son menores de 1%; sin embargo, debe considerarse que las características petrofísicas de la roca (material político), puede disminuir su capacidad de infiltración o ser alta en los casos que se combine la presencia de calizas, materiales granulares producto de la erosión de rocas preexistentes y fracturamiento.

Por el contrario, los bordes de las mesetas muestran una alta densidad de drenaje, por lo que el grado de infiltración se considera bajo. Lo anterior, aunado a que los materiales que conforman elementos los constituyen rocas muy consolidadas, provoca que en el subsuelo funcionen como barreras tanto laterales como verticales del acuífero aunque debe considerarse que si existe desarrollo de fracturas y estructuras de disolución sobre las laderas, puede existir buena infiltración hacia el subsuelo.

Unidad hidrogeomorfológica III. Está representada por las zonas de pendientes abruptas (20° o mayores), que corresponden a las sierras en las que se presenta un mayor porcentaje de escurrimiento en comparación con la infiltración; esto se manifiesta por la alta densidad de drenaje en comparación con las restantes geoformas, y en los casos en que las rocas son muy compactas, funcionan como barreras laterales y de fondo del acuífero. Sin embargo, las características químicas de las rocas (carbonatos), y el fracturamiento que muestran, son factores que favorecen la rápida infiltración.

3.9.6 Geología.

El acuífero de la Comarca Lagunera se encuentra incluido dentro de un valle intermontano cuya estructura geológica está asociada

principalmente a rocas sedimentarias plegadas, eventualmente afectadas por cuerpos ígneos intrusivos. Esta depresión a través de su historia de sedimentación, ha actuado como receptáculo de sedimentos aluviales, fluviales y lacustres, interdigitándose sus litofacies tanto transversal como longitudinalmente.

3.9.6.1 Estratigrafía.

Las rocas que conforman la columna sedimentaria mesozoica expuesta dentro de los límites de la Comarca Lagunera, están constituidas principalmente por unidades sedimentarias, depositadas en el intervalo de tiempo comprendido entre el Jurásico y el Cretácico superior, y que corresponden, de la más antigua a la más reciente, con las formaciones Nazas, La Gloria, La Casita, Taraises, Carbonera, Cupido, La Peña, Tamaulipas Superior, Viesca, Treviño, Acatita e Indura.

El Cenozoico está caracterizado en esta región por rocas de ambientes continentales como lo testimonia la formación terciaria Ahuichila y las unidades del Cuaternario: terrazas continentales, talud y aluvión. La Formación Ahuichila es una secuencia de areniscas, tobas y conglomerados y las unidades del cuaternario están representadas por aluviones y terrazas rellenando los cauces de arroyos y coronando rocas ígneas más antiguas.

3.9.6.2 Geología estructural.

Los ejes estructurales de las rocas mesozoicas, derivados de la tectónica comprensiva del Terciario Inferior (Orogenia Laramida), presentan un "trend" NW-SE y EW, encontrándose afectados por una falla de desplazamiento lateral que corre a lo largo de los bordes meridional y occidental de la Plataforma de Coahuila, así como por una serie de fallas distensivas que configuraron una serie de altos y bajos estructurales, en donde los eventos distensivos ocurridos en el Mioceno Temprano (24 a 20 m.a.) y Plioceno-Pleistoceno (2 a 1.2 m.a.), jugaron un papel importante en la zona de estudio ya que ocasionaron el callamiento normal de la región,

depositándose gruesos paquetes de sedimentos clásticos en los bajos estructurales.

3.9.6.3 Geología del subsuelo.

Se encuentran materiales granulares distribuidos a lo largo de todo el valle que corresponden a sedimentos de ambientes aluviales, fluviales y lacustres. Los primeros se encuentran localizados en las inmediaciones de las sierras, en donde llegan a desarrollar espesores de 100 a 250 m y extensiones laterales de 2.5 hasta 5 km, conformando una geometría lenticular, interdigitándose lateralmente con los sedimentos fluviales de facies de planicies de inundación. Por otra parte, en las zonas en donde se encuentran los bajos estructurales, se considera que las facies de abanicos aluviales alcanzaron a conformar cuerpos granulares de 150 a 700 m, debido a la actividad de las fallas normales.

Los sedimentos depositados como producto del transporte de los ríos Nazas y Aguanaval en facies de canales, bancos de arenas y planicies o llanuras de inundación, constituyen gran parte del volumen del material granular que rellenó el valle de la Laguna. Las facies de canales asociadas al río Nazas se encuentran distribuidas principalmente a lo largo de una franja orientada N-S, entre la ciudad de Gómez Palacio y la población de Tlahualilo de Zaragoza, la amplitud de esta franja es de 25 km, aproximadamente.

En lo que respecta a las facies de planicies de inundación, representadas por clásticos del tamaño de arenas, limos y arcillas, constituyen el mayor volumen de sedimentos depositados a lo largo de toda la extensión del acuífero, comparativamente con las facies de canales fluviales y lacustres.

Los valores de permeabilidad en estos cuerpos de sedimentos son menores a los que presentan los lentes de gravas y arenas de las facies de canales. Las zonas en donde las facies de planicies de inundación tienden a predominar sobre las de canales fluviales, se localizan hacia los flancos de la zona de canales asociados a la antigua trayectoria del río Nazas, la cual se

encuentra a lo largo de una franja orientada N-S, entre la ciudad de Gómez Palacio y la población de Tlahualilo de Zaragoza, asimismo las facies de planicies de inundación se encuentran tanto al norte como a lo largo del cauce del río Aguanaval.

3.9.7 Piezometría.

La piezometría se ha basado en varios pozos piloto, aunque cabe aclarar, que no han sido los mismos; sin embargo, se cuenta con una larga historia piezométrica.

3.9.7.1 Profundidad del nivel estático.

La zona con mayores abatimientos es la que tiene como vértices la ciudad de Torreón, las poblaciones de Matamoros, Santa, Manantial y Los Emilianos, en dicha superficie se llegan a manifestar abatimientos de 140 m. Abatimientos menores de 100 m se manifiestan aisladamente al norte de la ciudad de Gómez Palacio, así como en las inmediaciones de las poblaciones de Huitrón y San Francisco del Horizonte. Los valores inferiores a los 40 m de profundidad del nivel estático se manifiestan hacia los límites del valle, y hacia el sector de la presa Francisco Zarco. Las áreas menos afectadas se encuentran en las inmediaciones de los poblados San Pedro de las Colonias, Tacubaya y Las Campanas, con una profundidad del nivel estático de aproximadamente 20 m.

3.9.7.2 Elevación del nivel estático.

La elevación del nivel estático se encuentra por encima del que se manifiesta en las cabeceras de los ríos Aguanaval y Nazas, donde el nivel estático se encuentra alrededor de 1060 msnm. La mayor elevación corresponde a la zona localizada al NW de la ciudad de Gómez Palacio (sitio cuyo nivel se encuentra a 1000 msnm), los sitios restantes corresponden a las zonas de Concordancia, Tacubaya, sur de Matamoros y La Partida, localidades en donde la elevación del nivel estático supera los 1080 msnm.

Por otra parte, las áreas en donde se manifiestan depresiones piezométricas se localizan en las inmediaciones de las poblaciones de Huitrón, Torreón, norte de Gómez Palacio y sector SW de Matamoros, donde los niveles estáticos se encuentran por debajo de los 1000 msnm.

3.9.7.3 Evolución del nivel estático.

La evolución del nivel estático del acuífero, correspondiente al periodo 1975 - 1999, manifiesta un descenso progresivo del nivel desde la entrante del río Nazas al valle, hasta aproximadamente 5 km al norte de Torreón, zona donde el abatimiento varía desde 16 hasta 40 m, asimismo, al SE de esta ciudad, debido a la intensa explotación del acuífero, se formó un cono de abatimiento en cuya parte central el nivel descendió 64.85 m. En el norte de esta zona los descensos de los niveles tienden a ser menores, hasta llegar a -50 m, aproximadamente a 5 km al sur del poblado Francisco I. Madero, sitio a partir del cual se incrementan nuevamente los abatimientos del acuífero de tal forma, que se conforma un cono al poniente de San Rafael en donde el nivel desciende hasta -63.35 m. Únicamente en las inmediaciones de Bermejillo se presenta recuperación de los niveles alcanzando los 22 m. el valor medio en la zona de abatimientos es del orden 30 m en el periodo 1975 – 1999, lo que significa un abatimiento promedio de 1.25 m/año.

3.10 Sistemas de información geográfica (GIS).

3.10.1 Antecedentes.

Previo a la disponibilidad de la tecnología GIS, la forma en que se tomaban decisiones, no siempre era la más adecuada. Se confiaba en mapas tradicionales y en tablas estadísticas impresas. Estos mapas y registros se mantenían generalmente en departamentos o sectores aislados dentro de una cierta organización, perdiendo tiempo, duplicando esfuerzos e inevitablemente produciendo resultados erróneos. Mapas, tablas y cartografía eran difíciles de mantener actualizados, ni siquiera con los

mejores mapas, tablas o cartas, se podía imaginar cómo eran realmente las cosas, cuales eran las mejores opciones de localización, y cual la decisión que se debía tomar.

El resultado eran decisiones basadas en información pobre, y solucionando sólo parte del problema o simplemente realizando una mala planificación. Todas las alternativas no podían ser tenidas en cuenta ya que no podían ser visualizadas en conjunto. Adicionalmente, las alternativas que se consideraban eran generalmente basadas en datos incompletos. Era como si la gente mirara al mundo a través de una lente rajada, distorsionando de esta forma la realidad (AEROTERRA S. A., 2004).

3.10.1.1 Definición de GIS.

El uso de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) ha aumentado enormemente en las décadas de los ochenta y noventa; pasando del total desconocimiento a la práctica cotidiana en el mundo de los negocios, las universidades y organismos gubernamentales, usándose para resolver problemas diversos. Es lógico, por lo tanto, que hayan sido propuestas varias definiciones.

Una definición precisa y completa es: Un conjunto de equipos informáticos, programas, datos geográficos y técnicos organizados para recoger, almacenar, actualizar, manipular, analizar y presentar eficientemente todas las formas de información georeferenciada (ESRI, 2004).

Desde un punto de vista práctico un Sistema de Información Geográfica es un sistema informático capaz de realizar una gestión completa de datos geográficos referenciados. Por referenciados se entiende que estos datos geográficos o mapas tienen unas coordenadas geográficas reales asociadas, las cuales permiten manejar y hacer análisis con datos reales como longitudes, perímetros o áreas. Todos estos datos alfanuméricos asociados a los mapas más los que queramos añadirle los gestiona una base de datos integrada con el GIS (Bartolomé, 2003).

3.10.2 Conceptos Básicos de GIS.

3.10.2.1 Base de datos en los GIS.

Un aspecto fundamental dentro de los sistemas GIS es la forma de almacenar la información. Si bien en el inicio de estos sistemas era habitual que la gestión de esta información se realizara mediante programas propios, la tendencia actual es la de desligar el producto GIS del gestor de la base de datos utilizado, de forma que sea posible utilizar cualquiera de los productos que para este fin existen en el mercado.

Las bases de datos de los GIS contienen datos gráficos y alfanuméricos, integrados para formar una completa fuente de información. La exactitud y el nivel de resolución son elementos importantes en el desarrollo de una base de datos de un GIS, y vienen determinados por el uso al que vaya destinado el sistema. Así, un GIS diseñado para aplicaciones de ingeniería requerirá, en general, un alto nivel de exactitud y una gran resolución. Ambos aspectos, costo y nivel de detalle, deben ser analizados cuidadosamente con objeto de optimizar el diseño de una base de datos para un Sistema de Información Geográfica (GIS GOPDE, 2004).

La generación de la base de datos inicial incluye la captura e integración de datos que generalmente proceden de fuentes diversas. Estas fuentes a menudo presentan diferentes escalas y formatos que deben ser unificados. Una base de datos completamente integrada requiere unas entidades de control y referencia a las que se deben ajustar otras entidades que se incorporan en las distintas capas de la BD.

Cada una de las capas y entidades tienen una serie de características que influirán en el desarrollo de la BD inicial, en los procesos de mantenimiento y en las aplicaciones en las que vayan a ser utilizadas (Bartolomé, 2003).

3.10.2.2 Tipos de Datos[‡].

Los datos en un Sistema de Información Geográfica pueden ser clasificados en: gráficos y alfanuméricos. Cada uno tiene características específicas y diferentes requisitos para su eficaz almacenamiento, proceso y representación.

Los datos gráficos son descripciones digitales de las entidades del plano. Suelen incluir las coordenadas, reglas y símbolos que definen los elementos cartográficos en un mapa. El GIS utiliza esos datos para generar un mapa o representación gráfica en una pantalla de ordenador o bien sobre papel. Para la representación de datos gráficos se utilizan tres tipos básicos de entidades:

Nodos. Es un objeto sin dimensiones que representa una unión topológica o un punto terminal y que especifica una localización geométrica; en cualquier caso, se trata de la entidad básica para representar entidades con posición pero sin dimensión (al menos a la escala escogida). En el formato vectorial se les denomina puntos.

Líneas (o arcos). Son objetos de una dimensión definidos por un nodo inicio y un nodo fin.

Polígonos (o áreas). Son objetos limitados y continuos de dos dimensiones.

Los datos alfanuméricos son descripciones de las características de las entidades gráficas. Generalmente son almacenados en formatos convencionales para este tipo de información, si bien se están comenzando a utilizar junto con los GIS sistemas de gestión documental, que gestionan estos datos como imágenes gráficas en formato ráster. La información alfanumérica y gráfica se encuentra completamente integrada, siendo esta integración, junto con la capacidad de gestión de ambos tipos de datos, lo que caracteriza a los Sistemas de Información Geográfica.

Para representar el mundo real en datos espaciales debemos hacer un proceso de abstracción.

[‡] Fuente de información: GIS GOPDE, 2004.

Las entidades del mundo real pueden ser abstraídas de diferentes formas, por ejemplo, como puntos, líneas, áreas (abstracción geométrica o cartográfica) o como imágenes (por ejemplo, fotografías) o como etiquetas (por ejemplo una dirección). Así, un objeto del mundo real como puede ser un río, para incorporarlo a nuestro GIS lo abstraemos en una línea.

Las abstracciones de los objetos del mundo real ahora deben ser representadas. Estas representaciones pueden ser en formato vectorial, raster, como entidades topológicas (nodos, polígonos...), por símbolos o por textos. Por último señalar una de las características mas significativas de las entidades de datos espaciales son las relaciones existentes entre las mismas. Las más importantes son:

Relaciones topológicas: Se refiere a la posición relativa de dos o más entidades. Estas relaciones pueden estar directamente en los datos o ser deducidas a partir de la proximidad, solapamiento, etc.

Clasificación: Consiste en clasificar los objetos del mundo real en distintas clases o categorías.

Agregación: Los objetos del mundo real pueden ser definidos como composición o agregación de otros objetos.

Asociación: Es similar a las relaciones topológicas, ya que tiene gran importancia la posición (GIS GOPDE, 2004).

3.10.2.3 Imágenes gráficas. Tipos de formatos[§].

Las imágenes gráficas pueden ser almacenadas en formato raster (cada línea se define por todos sus puntos intermedios, siendo almacenados todos ellos) o en formato vectorial (cada línea queda definida por un punto inicial y un punto final (o punto y vector) siendo éstos los únicos puntos que se almacenan).

[§] Citado por Bartolomé, 2003.

3.10.2.3.1 Modelo raster.

En el modelo raster el espacio es discretizado en pequeños rectángulos o cuadrados, de forma que el tamaño que tienen estos elementos es fundamental y determina la resolución.

Utiliza una única primitiva muy similar al punto, el pixel, una malla de puntos de forma cuadrada o rectangular que contiene valores numéricos representa las entidades cartográficas y sus atributos a la vez. Los modelos lógicos menos complejos son los basados en el modelo conceptual raster, en buena medida porque la georreferenciación y la topología son implícitas a la posición - columna y fila - del pixel en la malla. Cada atributo temático es almacenado en una capa propia. La separación entre datos cartográficos y datos temáticos no existe, pues cada capa representa un único tema y cada celda contiene un único dato numérico.

La precisión de la georreferenciación en el modelo raster está sesgada conceptualmente por la porción del territorio que representa el pixel, la cual es la unidad de medida lineal y superficial mínima del sistema. Además a veces no se especifica como está georreferenciada la celda, respecto a su ángulo superior izquierdo o a su ángulo inferior izquierdo o respecto a su centro. El modelo conceptual raster tiene serias limitaciones conceptuales en la precisión de la referenciación, con un margen de error equivalente a la mitad de la base y de la altura del pixel.

Para emular la precisión del sistema vectorial, el sistema raster necesita mucho mas espacio de almacenamiento de datos. El almacenamiento interno de la información asociada a cada capa es un aspecto de la mayor relevancia, buscándose un compromiso entre varios requisitos que están normalmente en competencia son: el volumen de almacenamiento necesario que se pretende minimizar; la eficiencia de acceso a la información que debe maximizarse y los tiempos de respuesta requeridos en las operaciones efectuadas sobre dicha información.

El modelo raster tiene una organización muy simple de los datos, lo cual permite realizar con gran facilidad ciertos procesos de análisis, como por ejemplo la superposición de planos, muy fácil de programar mediante operaciones con matrices, esta operación computacionalmente muy costosa cuando los temas están en formato vectorial, se realiza rápidamente y automáticamente si los temas son raster, pero el resultado estará afectado de un error debido a la discretización. Sus gráficos, aunque deficientes, se pueden realizar con dispositivos baratos, como por ejemplo una impresora matricial. Sus inconvenientes son el gran volumen de almacenamiento que requiere, la baja calidad de las representaciones gráficas y la dificultad de realizar análisis complejos sobre los gráficos así almacenados. Por último, el modelo raster no reconoce explícitamente la existencia de objetos geográficos, y por tanto, en las aplicaciones en que sea esencial su empleo, este modelo no podrá ser utilizado.

3.10.2.3.2 Modelo vectorial.

El modelo vectorial se basa en tres primitivas básicas: el nodo, es la unidad básica para representar entidades con posición pero sin dimensión (al menos a la escala escogida); la línea o el arco, representa entidades de una dimensión y está restringido a línea recta en algunas implementaciones; y el polígono o área, se utiliza para representar las entidades bidimensionales.

Normalmente se almacenan relaciones del tipo: nodo origen, nodo final de arco y relación ordenada de los nodos internos si existieran; secuencia ordenada de los arcos que definen un polígono y polígonos a derecha y a izquierda de cada arco.

El detalle con el que se almacenan las relaciones es un compromiso entre la eficiencia del proceso y la modelización precisa de la realidad. Los procedimientos de análisis en este modelo son mas laboriosos, pero más precisos que en el modelo raster, ya que conllevan la resolución analítica de intersecciones entre arcos, la determinación de áreas y la evaluación de posiciones relativas entre elementos diferentes.

La posición de los datos puede ser georreferenciada directamente, por medio de un sistema de coordenadas, o indirectamente, utilizando por ejemplo la dirección postal, en ambos casos la solución es muy eficaz.

Los atributos no espaciales son almacenados en una base de datos alfanuméricos interrelacionada con la base de datos cartográficos, ofreciendo con ello posibilidades muy distintas de las del modelo raster. Las interrelaciones topológicas se explicitan hasta el último detalle y con gran sofisticación. En el caso vectorial, no hay ninguna limitación conceptual en la precisión de la georreferenciación, hay únicamente una limitación matemática y física de dígitos del hardware, en los casos de la precisión simple y doble. Esta limitación no existe en los ordenadores basados en numeración de coma flotante.

Éste modelo está más de acuerdo con la cartografía tradicional y, por ello, resulta más intuitiva. La principal ventaja de este modelo respecto del modelo raster es su capacidad para expresar las relaciones espaciales existentes entre las entidades, esto es, la información topológica, que es la que dota al modelo de la semántica necesaria para representar el conocimiento territorial (Bartolomé, 2003).

3.10.2.4 Recomendaciones

- ❖ Usar el formato vectorial para la realización de gráficos y mapas precisos.
- ❖ Usar el formato vectorial para análisis de redes (cableados eléctricos y telefónicos, rutas de transporte, etc.).
- ❖ Para la superposición y combinación de planos es más rápido y barato el modelo raster.
- ❖ Usar el método raster cuando se trabaja con representaciones y simulaciones de superficies.
- ❖ Utilizar el formato raster y vectorial en combinación cuando es necesario representar líneas con precisión (vectorial) y superficies rellenas (raster).

- ❖ Disponer de algoritmos de conversión de vectorial-raster y viceversa.
- ❖ Recordar que se pueden editar simultáneamente datos raster y vectoriales (GIS GOPDE, 2004).

3.10.2.5 Información alfanumérica.

Mediante la información alfanumérica se describen las características de las entidades gráficas. En una base de datos de un GIS podemos encontrar dos tipos de información alfanumérica: (a) Atributos alfanuméricos que proporcionan información descriptiva sobre las características de las entidades gráficas. Se relacionan con dichas entidades a través de identificadores comunes que se almacenan tanto en el registro alfanumérico como en el gráfico. Un sistema GIS debe ser capaz de realizar consultas o análisis sobre los atributos alfanuméricos de forma independiente y generar mapas basados en dichos atributos; (b) Datos geográficamente referenciados, mediante este tipo de datos se describen incidentes o fenómenos que se producen en una localización específica. A diferencia de los atributos estos datos no describen una entidad gráfica sino que proporcionan información asociada a una localización geográfica.

Para mejorar el acceso a la información se establecen normalmente dos tipos de mecanismos: (1) Índices geográficos, se utilizan en un GIS para seleccionar, relacionar y recuperar datos en función de su localización geográfica, de forma similar a como actúan los índices en una base de datos tradicional; no constituyen información en sí y únicamente sirven para mejorar los accesos y (2) Relaciones espaciales, proporcionan la información sobre las relaciones entre las distintas entidades gráficas, como son la conectividad entre las líneas o la adyacencia en el caso de los polígonos. Este tipo de información es fundamental para determinadas aplicaciones tales como el análisis de redes, puesto que proporcionan información sobre las interconexiones de los distintos elementos de la red (Bartolomé, 2003).

3.10.2.6 Georreferenciación.

La georreferenciación se puede definir como proceso mediante el cual se identifica una posición en la superficie terrestre. Existen dos tipos de georreferenciación:

- ❖ Georreferenciación directa: Se basa en el uso de un sistema de coordenadas establecido para un determinado sistema de proyección. Los sistemas de proyección están pensados para resolver el problema de proyectar la superficie curva de la tierra en un sistema plano. Aunque todo sistema de proyección distorsiona la realidad, podemos mantener sin distorsión el área (proyecciones equivalentes), las distancias (equidistantes) o los ángulos (conformes).
- ❖ Georreferenciación indirecta o discreta: Su fundamento es asociar al elemento que se representa una clave o índice, normalmente con significado administrativo (dirección, código postal, etc.), que puede ser usada para la determinación de una posición, naturalmente con una precisión no siempre equivalente a la obtenida con georreferenciación directa. La virtud de este sistema es el poder aprovechar de forma inmediata la gran cantidad de información disponible con georreferenciación directa (ESRI España, 2004).

3.10.3 Funcionalidades de un GIS

3.10.3.1 Captura y Organización de Datos.

Comprende funciones de: digitalización, filtrado de líneas, transformación de coordenadas, localización de errores, georreferenciación, gestión de tablas, borrado selectivo, creación de topologías, creación de mapas raster a partir de temas vectoriales, vectorización de un mapa temático raster, tratamiento de imágenes, corte y unión de redes de polígonos (ESRI, 2004).

3.10.3.2 Gestión de Tablas Alfanuméricas.

Se desarrollan funciones de: localización de registros, creación y modificación de la estructura de una tabla, indexado de tablas, relación entre tablas y de unión lateral, añadir registros procedentes de otras tablas, importación y exportación, borrado selectivo, actualización de columnas (ESRI, 2004).

3.10.3.3 Análisis Espacial.

Involucra funciones de: análisis de área de influencia, intersección, creación de mapas temáticos, localización y selección de entidades (inclusión, proximidad), agrupamiento y clasificación (ESRI, 2004).

3.10.4 Aplicaciones prácticas.**

Son muy diversos los sectores donde los sistemas GIS pueden ser utilizados como una herramienta de ayuda a la gestión. Entre dichos sectores se pueden citar:

Cartografía automatizada. Los organismos públicos han tomado la iniciativa en el mantenimiento de planos digitales de cartografía. Dichos planos son luego ofrecidos a las empresas a las que puedan resultar de utilidad. Los propios organismos se encargan después de proporcionar versiones actualizadas periódicamente.

Gestión de infraestructuras. Algunos de los primeros sistemas GIS fueron utilizados por las empresas encargadas del desarrollo, mantenimiento y gestión de redes de electricidad, gas, agua, teléfonos, alcantarillado, etc., lo que habitualmente se conoce como utilities. En estas empresas los sistemas GIS almacenan información alfanumérica de instalaciones, que se encuentra ligada a las distintas representaciones gráficas de las mismas. Estos sistemas suelen almacenar igualmente información relativa a la conectividad de los elementos representados gráficamente, para poder realizar un análisis de la red.

** Basado en la literatura de GIS GOPDE, 2004.

La producción de planos, así como la posibilidad de elaborar cualquier tipo de consulta, ya sea gráfica o alfanumérica, son las funciones más comunes en estos sistemas, si bien también son utilizados en trabajos de ingeniería, labores de inventario, planificación de redes, gestión de mantenimiento, etc.

Gestión territorial. Son aplicaciones dirigidas a la gestión de ayuntamientos o diputaciones, basadas en la utilización de formatos mixtos raster-vectorial. Estas aplicaciones permiten un rápido acceso a la información gráfica y alfanumérica, y proporcionan funciones para el análisis espacial de la información, incluyendo información procedente de varias capas superpuestas. Facilitan asimismo las labores de mantenimiento de infraestructuras, mobiliario urbano, etc., y permiten realizar una optimización en la realización de trabajos de mantenimiento de empresas de servicios. Ofrecen también la posibilidad de generar, de forma automática, documentos con información gráfica y alfanumérica tales como cédula urbanística, cédula catastral, etc.

Gestión medioambiental. Son aplicaciones dirigidas a instituciones de medioambiente y empresas de ingeniería, que facilitan la evaluación del impacto medioambiental en la ejecución de proyectos. Integrados con sistemas de adquisición de datos permiten el análisis en tiempo real de la concentración de productos contaminantes, para acelerar la ejecución de medidas correctoras. Proporcionan asimismo una ayuda fundamental en trabajos tales como repoblaciones forestales, planificación de explotaciones agrícolas, etc.

Gestión de equipamiento social. Dirigidas a la gestión de servicios tales como servicios sanitarios, centros escolares, etc., proporcionan información sobre los centros ya existentes en una determinada zona y ayudan en la planificación de ubicaciones para nuevos centros. Estos sistemas aumentan la productividad al optimizar recursos, ya que permiten asignar de forma adecuada los centros a los usuarios.

Gestión de recursos geológico-mineros. Facilitan el manejo de un gran volumen de información generado tras varios años de explotación intensiva, proporcionando funciones para la realización de análisis de elementos puntuales (sondeos o puntos topográficos), lineales (perfiles, tendido de electricidad), superficies (áreas de explotación) y volúmenes (capas geológicas). Proporcionan además herramientas de modelización de las capas o formaciones geológicas.

Gestión del tráfico. Se utiliza para modelizar el comportamiento del tráfico estableciendo modelos de circulación por una vía en función de las condiciones de tráfico y longitud. Asignando un costo a los nodos (o puntos) en los que existe un semáforo, se puede obtener información muy útil: Deducir el camino más corto en distancia o en tiempo entre dos puntos; Simular el efecto que puede tener un cambio en las condiciones normales (cortes por obra, manifestaciones, etc.).

Demografía. Se incluyen aquí un conjunto heterogéneo de aplicaciones cuyo nexo es la utilización de las características demográficas, y en concreto su distribución espacial, para la toma de decisiones. El repertorio de aplicaciones abarca el marketing, la selección de emplazamientos para la implantación de negocios o servicios públicos, la zonificación electoral, etc. (GIS GOPDE, 2004).

El origen de los datos suele ser los registros estadísticos diseñados por algún organismo.

Los GIS pueden y deben ser empleados en:

GeoMarketing: La base de datos unida a la información geográfica resulta indispensable para planificar una adecuada campaña de marketing o el envío de correo promocional.

Banca: Los bancos y cajas son unos buenos usuarios de GIS, ya que necesitan ubicar a sus clientes y planificar tanto sus campañas como la apertura de nuevas oficinas, incluyendo información sobre las sucursales de la competencia (ESRI España, 2004).

Análisis de Redes: Este es uno de los puntos fuertes de un GIS. Todo lo que se puede representar como una red se puede analizar mediante herramientas GIS.

La aplicación más conocida puede ser la obtención de rutas óptimas para el reparto de mercancías, transporte regular de pasajeros y seguimiento de flotas de vehículos (con dispositivos GPS) (ESRI España, 2004).

3.10.5 Beneficios de los GIS.

En la actualidad, debido a la disminución del costo de los Sistemas Informáticos, están materializándose importantes beneficios económicos en las empresas y organismos que disponen de la tecnología GIS (ESRI, 2004).

3.10.5.1 Beneficios.

Proporcionan: ahorro de tiempo en producción de mapas, mantenimiento y administración; información exacta, actualizada y centralizada; acceso rápido a los datos; reducción de actividades redundantes o tediosas; análisis complejos imposibles de hacer por métodos tradicionales; menores costos de operación; ayuda a la toma de decisiones para la realización de inversiones más efectivas; intercambio, venta de información impresa o en soporte magnético; creación de nuevos servicios, derechos por el uso de las bases de datos, etc.; obtención inmediata de estadísticas, mapas temáticos, etc.; mejora del servicio a los clientes; fácil acceso a la información (por dirección, calle, número de parcela, etc.); análisis e informes de gran calidad (mapas temáticos, estadísticas, listados, etc.); eliminación de información redundante en distintos departamentos, al estar totalmente integrada e incremento de la productividad (ESRI, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio.

El Acuífero Principal se localiza en la parte suroeste del estado de Coahuila y en la porción noreste del estado de Durango (Figura 4.12). El acuífero cubre una superficie de 14, 548 km². Geográficamente, la zona de estudio se localiza dentro de la poligonal cuyos vértices se enlistan en el Apéndice A.

La zona está caracterizada por tres tipos de climas: BS₁K, que significa semiseco templado en las partes de mayor altura, las porciones correspondientes a las sierras bajas se encuentran dominadas por un clima BSoK, que quiere decir seco templado y la mayor extensión la ocupa el valle donde se encuentra un clima de tipo BWh, o sea muy seco y semi cálido (INEGI, 2002).

La temperatura media anual es de 22.6 °C (Figura 4.1), la mínima promedio es de 14.1 °C en el mes de Enero y la máxima promedio es de 29 °C en el mes de Junio (INEGI, 2002).

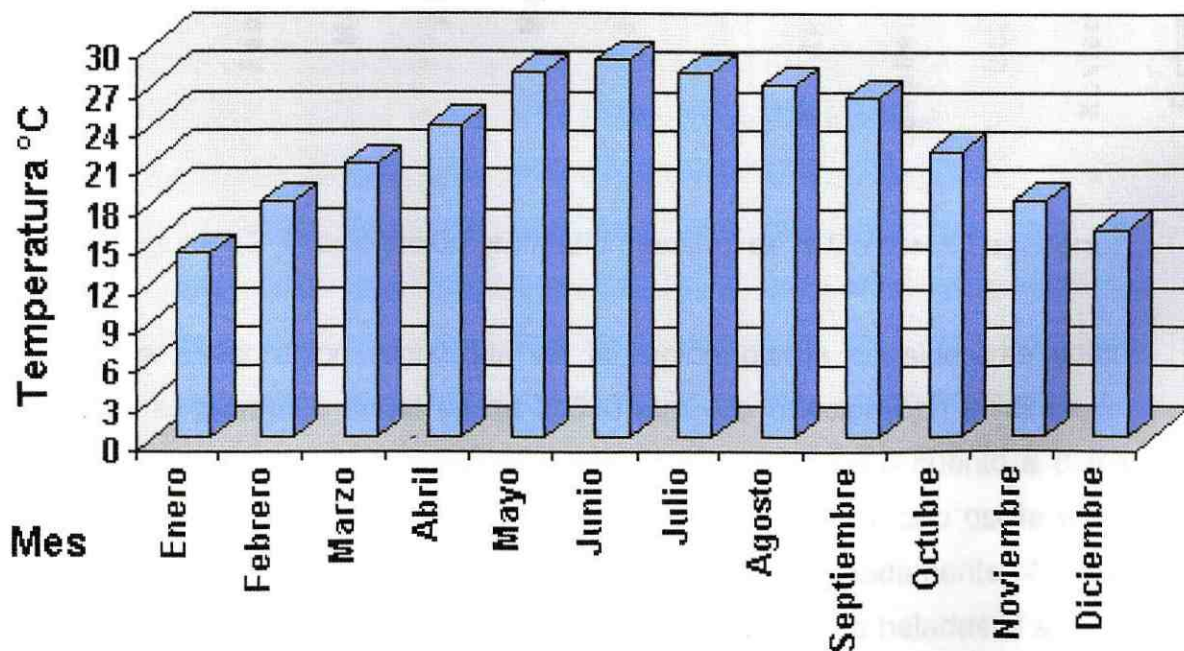


Figura 4.1 Temperatura promedio mensual de la Comarca Lagunera.

La precipitación promedio anual de la Comarca es de 215.5 mm, siendo Septiembre el mes más lluvioso con 44.9 mm, y Marzo el de menor precipitación con 1.5 mm. La variación de precipitación se presenta en la Figura 4.2 (INEGI, 2002).

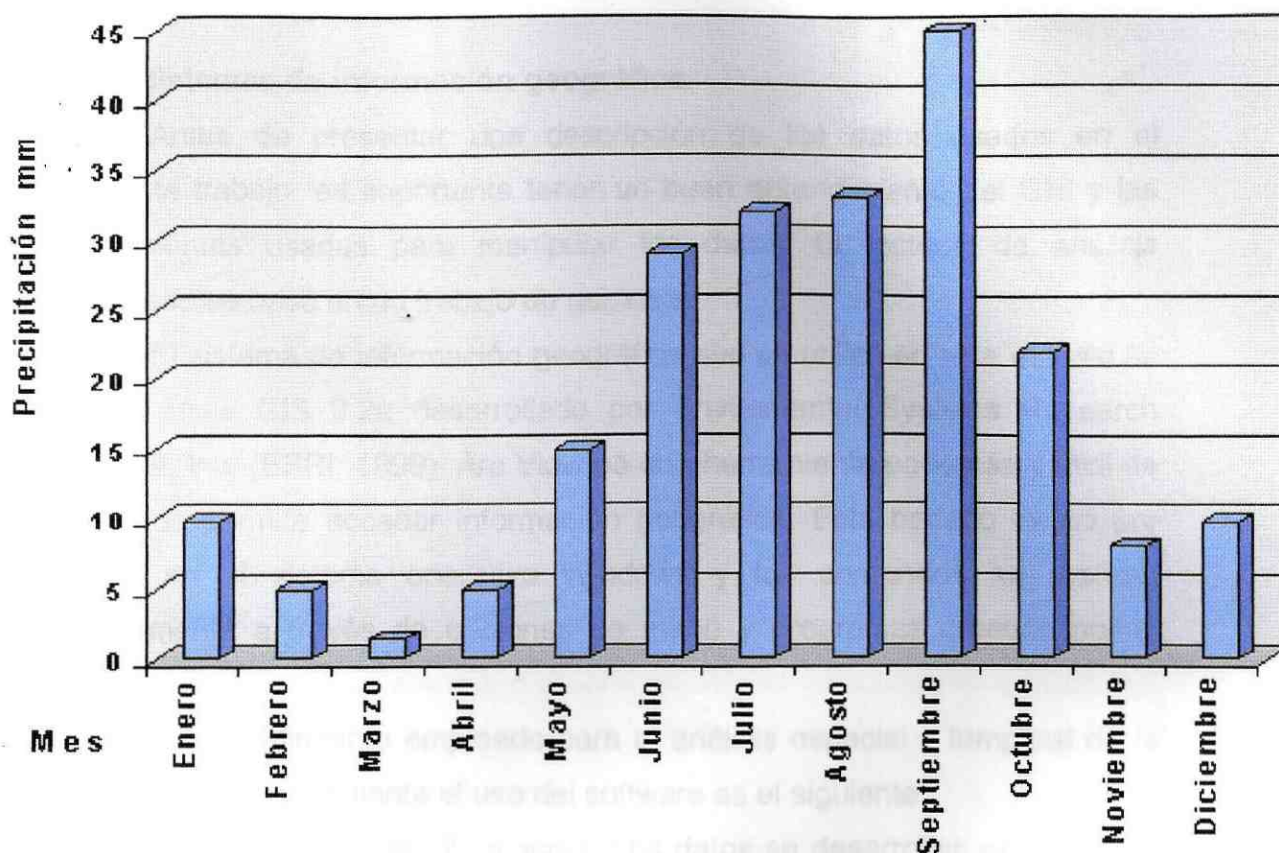


Figura 4.2 Precipitación promedio mensual de la Comarca Lagunera.

La evaporación registrada en la región puede considerarse como intensa, el promedio anual es de 2 500 mm. En relación con la dirección preferencial de los vientos, ésta es norte-noroeste-este. En cuanto a datos adicionales se tiene que el número de días despejados al año oscila entre 199 y 213, el número de días nublados es aproximadamente 40, las tormentas eléctricas varían de 37 a 40 días y el número de heladas al año es de 22 días (INEGI, 2002).

4.2 Descripción de los datos y el sistema.

Debido a la suma importancia que representa para este trabajo tanto los datos digitales como el GIS empleado, se considera de interés realizar una descripción de las características del GIS, así como de los datos utilizados.

4.2.1 Sistemas de información geográfica.

Antes de presentar una descripción de los datos usados en el presente trabajo, es importante tener un buen entendimiento del GIS y las herramientas usadas para manipular los datos. El método de análisis empleado se basó en un trabajo de gabinete.

El sistema de información geográfica que se utilizó en este estudio es el Arc View GIS 3.2a desarrollado por Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI, 1999). Arc View es una herramienta poderosa y fácil de usar que permite acceder información geográfica. Está basado ciento por ciento en el sistema operativo Windows y los comandos se realizan básicamente a través de opciones de menú y programas creados por el usuario.

El procedimiento empleado para el análisis espacial y temporal de la calidad del agua mediante el uso del software es el siguiente:

- ❖ Procesamiento de información. Los datos se desarrollan en Hojas de Cálculo de Excel y se les proporciona un formato compatible con el Arc View 3.2a.
- ❖ Despliegue de imagen. Un tema representa un conjunto de elementos geográficos similares en una fuente particular de información. Así que en una vista se relacionan los diversos temas de estudio (Región Lagunera, cartas edafológicas, de uso de suelo y vegetación, etc.) con las bases de datos (parámetros de la calidad del agua y nivel freático de los pozos).
- ❖ Transformación de información vectorial a raster. La información almacenada dentro de Arc View 3.2 puede graduarse de diversas

maneras. Esta información es referenciada a un sistema de coordenadas geográficas y almacenada tanto en formato sectorizado (puntos, líneas y polígonos) ó en formato raster (píxeles o celdas). Por lo tanto, es posible analizar la relación de los diferentes temas con las bases de datos espacialmente.

- ❖ Ponderación Inversa a la Distancia. (IDW, Inverse Distance Weighing) Método empleado para realizar interpolaciones, en el cual, a menor sea la distancia de la interpolación de un tema, mayor es su veracidad y viceversa. Se utiliza el método IDW para determinar las zonas con sus respectivas concentraciones de un parámetro específico.
- ❖ Álgebra de mapas. Incluye un conjunto de operadores aritméticos y lógicos. Se realizan diversas operaciones que permiten calcular el área total afectada por contaminación de uno o varios elementos, de igual forma, conocer las zonas que no presentan riesgo, la población total existente, el uso de suelo y tipo de vegetación, etc., mediante la interrelación de temas.

Una vez que se ha manejado la información, se despliega en pantalla los resultados que se obtuvieron de este procesamiento, para posteriormente pasar a la etapa de interpretación.

4.2.2 Descripción de los datos.

Diferentes tipos de datos se requieren para un proyecto que pretende validar una metodología que involucra grandes áreas. Por lo tanto, es muy importante examinar en detalle cada uno de los datos.

La información utilizada en este estudio y que será detallada en esta sección es: bases de datos digitales, carta edafológica, carta de uso del suelo y vegetación, poblaciones, profundidad del nivel estático, concentración de los parámetros de calidad del agua: arsénico, nitratos, cadmio, cromo y plomo, y las características del acuífero Principal.

Cada una de las cartas o mapas geográficos generados se proyectaron en el sistema UTM 1927 correspondiente a la zona 13, cuyo meridiano central es el -105; el esferoide utilizado es el de Clarke 1866, y a partir del cual se generaron los diferentes mapas temáticos referentes a la calidad del agua, nivel freático, edafología, etc.; la escala empleada en el software fue de 1:500,000.

4.2.2.1 Bases de datos impresos y digitales.

La información básica para llevar a cabo este trabajo tiene como fuente los registros de los monitoreos del nivel freático del acuífero principal y los análisis de la calidad del agua subterránea durante el periodo 1986 – 2003, llevados a cabo por el personal de la Comisión Nacional del Agua (CNA) correspondiente a la Región VII de Cuenca Centrales del Norte ubicada en Torreón, Coahuila. Estos datos fueron relacionados con el mapa digital de la Comarca Lagunera, el cual está disponible en la página Web de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Se analizó la variación de calidad del agua subterránea con un rango de 18 años, con la finalidad de conocer los cambios temporales en un lapso de tiempo considerable y simultáneamente, descubrir las posibles causas de dicha variación. Las variables que se seleccionaron fueron los siguientes elementos: arsénico, nitratos, cadmio, cromo y plomo, se consideraron estos indicadores de calidad de agua por ser los elementos que mayor toxicidad pueden provocar en la salud del humano.

Inicialmente la información se desarrolló en una base de datos en Hoja de Cálculo de Excel®, se procesó y posteriormente se anexó como base de datos relacional dentro de Arc View® 3.2a, en la cual se incorporó el siguiente contenido: Nombre del municipio, número de pozo, ubicación en la Región Lagunera, uso del pozo, coordenadas geográficas y los siguientes parámetros de calidad de agua, pH, temperatura, color, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica, calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), sodio (Na^+), potasio (K^+), carbonatos (CO_3^-), bicarbonatos (HCO_3^-), cloro (Cl^-),

sulfatos (SO_4^-), dureza total, dureza por calcio, dureza por magnesio, alcalinidad total, alcalinidad por fenoles, arsénico (As^{+++}), cadmio (Cd^{++}), cobre (Cu^{++}), cromo (Cr^{+VI}), hierro (Fe^{++}), manganeso (Mn^{++}), plomo (Pb^{++}), zinc (Zn^{++}) y nitratos (Figura 4.3-a, 4.3-b y 4.3-c). Las unidades de los parámetros de calidad están dadas en mg/L, a excepción del pH, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), color (upt) y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

ArcView GIS 3.2a

File Edit Table Field Tools Window Help

0 of 91 selected

Attributes of 1998.dbf

Municipio	No. pozos	Ubicación	Uso	Latitud	Longitud	pH	Temp	Color	Salt	Cond	Ca	Mg	Na
Lerdo	5	P.P. Gja El Refu	Multiples	25.5133	-103.5256	7.35	23.0	7	460	720	94.32	6.03	35.50
Gomez	10	SIDEAPA	Public ur	25.5722	-103.5122	7.90	30.0	4	780	1220	112.40	31.68	101.90
Gomez	13	SIDEAPA	Public ur	25.5786	-103.5064	8.09	30.0	4	858	1340	147.40	32.89	92.70
Gomez	16	SIDEAPA	Public ur	25.5011	-103.5153	7.68	30.0	4	1120	1750	191.44	45.57	132.00
Gomez	17	P.P. Las Luisas	Agricola	25.5889	-103.5278	8.12	29.0	4	653	1020	89.15	28.77	74.00
Gomez	55	P.P. Gja Ideal	Agricola	25.6750	-103.5289	8.00	28.0	3	2675	4180	478.64	111.77	295.90
Gomez	104	P.P. Competencia	Agricola	25.6628	-103.5236	8.02	28.0	3	2483	3880	499.24	107.21	257.70
Gomez	109	P.P. Sn Roque	Industria	25.7278	-103.5903	8.14	28.0	4	2214	3460	226.61	27.59	498.80
Gomez	116	P.P. Ilhuicamina	Agricola	25.7117	-103.6042	7.02	28.0	4	1651	2580	309.79	70.72	144.10
Gomez	117	P.P. Ilhuicamina	Agricola	25.7086	-103.6094	8.04	29.0	4	1440	2250	253.20	79.85	126.10
Gomez	158	P.P. La Rosita	Agricola	25.8286	-103.5258	8.16	29.0	4	665	1040	75.86	8.06	115.00
Gomez	186	P.P. Lorenzo	Agricola	25.6544	-103.6097	8.04	29.0	4	461	720	65.67	18.52	48.30
Gomez	208	EJ. Transporte	Agricola	25.6400	-103.5839	7.95	26.0	3	1504	2350	284.06	126.50	81.70
Gomez	230	SIDEAPA	Public ur	25.5856	-103.4894	7.86	30.0	4	979	1530	164.43	40.58	106.60
Gomez	231	SIDEAPA	Public ur	25.5778	-103.4747	7.77	30.0	4	1382	2160	304.19	58.39	100.30
Gomez	232	SIDEAPA	Public ur	25.5758	-103.4744	7.60	23.0	4	710	1110	139.83	22.30	46.00
Gomez	242	SIDEAPA	Public ur	25.5806	-103.4556	8.00	30.0	4	633	990	123.91	17.09	56.95

Figura 4.3-a. Base de datos de características de los pozos y calidad del agua subterránea en 1998.

ArcView GIS 3.2a

File Edit Table Field Tools Window Help

0 of 91 selected

Attributes of 1998.dbf

	K	Ca3	Hco3	Cl	So4	Dur_tot	Dur_ca	Dur_mg	Alc_tot	Alc_fer	As	Cd	Cu	Cr	Fe
94.32	2.91	0.0	302.61	19.95	81.39	260.0	236	24.00	248	0	0.0057	0.0002	0.0140	0.0270	0.4561
112.40	2.19	0.0	156.67	37.61	413.48	410.8	281	129.84	128	0	0.0428	0.0002	0.0140	0.0270	0.0555
147.40	5.00	5.8	196.80	43.29	456.89	503.1	369	134.14	85	10	0.0304	0.0001	0.0140	0.0270	0.0304
191.44	3.16	0.0	170.82	73.24	638.50	665.2	479	186.00	140	0	0.0154	0.0001	0.0140	0.0270	0.1994
89.15	3.88	1.2	149.58	29.12	298.51	340.7	223	118.00	123	2	0.0279	0.0001	0.0140	0.0270	0.0240
478.64	8.22	0.0	102.48	422.78	1503.94	1654.8	1197	458.00	83	0	0.0035	0.0001	0.0228	0.0292	0.0536
499.24	8.98	0.0	102.98	220.52	1886.56	1684.2	1248	436.00	84	0	0.0076	0.0003	0.0221	0.0270	0.0868
226.61	7.25	0.0	79.93	110.85	1522.69	678.9	566	113.00	65	0	0.0262	0.0002	0.0140	0.0270	0.0240
309.79	5.91	0.0	150.69	182.61	834.40	1063.9	774	289.00	122	0	0.0367	0.0001	0.0140	0.0270	0.0299
253.20	5.50	0.0	87.05	169.98	781.04	960.0	633	327.00	71	0	0.0643	0.0008	0.0140	0.0270	0.0428
75.86	2.30	0.0	77.30	34.98	348.17	222.6	190	33.00	63	0	0.0484	0.0002	0.0140	0.0270	0.0240
65.67	3.09	0.0	170.73	32.09	119.43	240.0	164	76.00	140	0	0.0201	0.0002	0.0140	0.0270	0.0240
284.06	4.49	9.8	156.61	140.70	914.81	1051.2	710	519.00	128	17	0.0436	0.0002	0.0185	0.0270	0.0338
164.43	4.01	0.0	161.06	63.34	520.08	577.3	411	166.28	132	0	0.0288	0.0002	0.0140	0.0270	0.0461

Figura 4.3-b. Base de datos de calidad del agua subterránea en 1998
(continuación 1).



Municipio	No_pozo	Ubicacion	Latitud	Longitud	Mg	Na	Mn	Pb	Zn
Lerdo	5	P.P. Gija El Refu	25.5133	-103.5256	6.03	35.50	0.0309	0.0019	0.0190
Gomez	10	SIDEAPA	25.5722	-103.5122	31.68	101.90	0.0140	0.0006	0.0090
Gomez	13	SIDEAPA	25.5786	-103.5064	32.89	92.70	0.0140	0.0007	0.0090
Gomez	16	SIDEAPA	25.5011	-103.5153	45.57	132.00	0.0189	0.0006	0.0090
Gomez	17	P.P. Las Luisas	25.5889	-103.5278	28.77	74.00	0.0140	0.0006	0.0090
Gomez	55	P.P. Gija Ideal	25.6750	-103.5289	111.77	295.90	0.0140	0.0009	0.0090
Gomez	104	P.P. Competencia	25.6628	-103.5236	107.21	257.70	0.0165	0.0021	0.0147
Gomez	109	P.P. Sn Roque	25.7278	-103.5903	27.59	498.80	0.0140	0.0016	0.0214
Gomez	116	P.P. Ilhuicamina	25.7117	-103.6042	70.72	144.10	0.0140	0.0012	0.0214
Gomez	117	P.P. Ilhuicamina	25.7086	-103.6094	79.85	126.10	0.0140	0.0019	0.0222
Gomez	158	P.P. La Rosita	25.8286	-103.5258	8.06	115.00	0.0140	0.0011	0.0090
Gomez	186	P.P. Lorenzo	25.6544	-103.6097	18.52	48.30	0.0140	0.0016	0.0090
Gomez	208	EJ. Transporte	25.6400	-103.5839	126.50	81.70	0.0140	0.0255	0.0090
Gomez	230	SIDEAPA	25.5856	-103.4894	40.58	106.60	0.0140	0.0010	0.0090
Gomez	231	SIDEAPA	25.5778	-103.4747	58.39	100.30	0.0140	0.0013	0.0090
Gomez	232	SIDEAPA	25.5758	-103.4744	22.30	46.00	0.0121	0.0013	0.0317
Gomez	242	SIDEAPA	25.5806	-103.4556	17.09	56.95	0.0140	0.0006	0.0090

Figura 4.3-c. Base de datos de calidad del agua subterránea en 1998 (continuación 2).

Es importante destacar que la información obtenida no contaba con todos los parámetros de calidad del agua para todos los pozos, así mismo hubo deficiencias con respecto al número de pozo, coordenadas geográficas, bajo número de pozos monitoreados, falta de indicadores de calidad del agua subterránea para varios años, pocos parámetros de calidad en los primeros años, y todo esto hizo imposible manipular perfectamente los datos en el software, teniendo con ello una gran limitante de precisión en la obtención de resultados.

Para el nivel freático se utilizó el mismo procedimiento para la obtención y procesado de las bases de datos. La información incorporada en estas bases fue: Número de pozo, coordenadas geográficas, municipio al que pertenece, y una larga historia piezométrica, nivel estático y dinámico de los pozos en los años 1975, 1990, y para el periodo 1992 a 2003, registrando para este lapso dos monitoreos anuales, el primero en el mes de Marzo y el segundo en Septiembre (Figura 4.4); las unidades de los niveles están dadas en metros.

No. pozo	Longitud	Latitud	Mpio	Niv. (75)	Niv. (92 marzo)	Niv. (92 sept)	Niv. (94 marzo)	Niv. (94 marzo)	Niv. (94 agosto)	Niv. (94 agosto)	Niv. (95 marzo)	Niv. (95 marzo)
1438	-103.5172	25.6819			62.15	62.84	63.00			63.00		63.00
1464	-103.3856	25.5600										
1467	-103.1339	25.8831	Sn Pedro	58.0	50.63			83.00	67.80			68.22
1489	-103.0639	25.6911	Sn Pedro	12.5	8.82	8.71	9.00		9.01			10.62
1508	-103.3122	25.9089	Fco I Mat									
1515	-103.1236	25.8200	Gomez		41.55		49.00			68.00		71.00
1517	-103.5517	25.8164			72.40	78.53	78.00		79.10	110.00		110.00
1526	-103.1347	25.7264				5.34	7.00		6.53			9.86
1532	-103.3511	25.4756	Torreón		116.07	117.83		130.00		130.00		133.00
1541	-103.0653	25.9328	Sn Pedro	67.0								
1549	-103.4300	25.5867					86.00	0.00	0.00	107.00	0.00	115.00
1553	-103.2444	25.5472	Matam	51.2	3.86	3.31		11.00		11.00		11.00
1557	-103.1161	25.4514										
1587	-103.1300	25.9522	Fco I Mat	85.0								
1597	-103.3153	25.4764			98.25		128.00			131.00		124.00
1612	-103.6222	25.7528	Gomez		72.55	69.45	70.00	70.00	70.35		80.21	
1632	-103.3814	25.6231			97.52	97.05	95.00		96.85			104.00
1675	-103.0681	25.8117	Sn Pedro	45.5			31.00		33.02		33.27	
1695	-103.1542	25.9006	Sn Pedro					85.00		67.00		68.00
1696	-103.4458	25.8833										
1698	-103.2189	25.9319	Fco I Mat	56.8	42.12	57.97	59.00		59.94		60.84	
1744	-103.6256	25.7581										
1754	-103.5414	25.8764			56.40	58.97	63.00		64.95		62.57	
1788	-103.5361	25.9450	Tlahual		26.44	26.36		61.00	71.92		60.70	
1799	-103.1758	25.4883	Matam	98.0								
1806	-103.2183	25.4886										

Figura 4.4. Base de datos del nivel freático del Acuífero Principal.

Al igual que en la calidad del agua, la información del nivel freático presentó deficiencias de un contenido completo.

4.2.2.2 Carta edafológica.

Presenta información referente a las características morfológicas, física y químicas de suelo. Por medio de colores y claves, indica el tipo de suelo existente, las fases salina, sódica y la textura superficial dominante. Además, señala las fases físicas, como rocas, tepetates o caliches que limitan la profundidad del suelo, y la existencia de ellos en la superficie como fases pedregosas o gravosas.

La distribución de los tipos de textura de suelo presentes en el área de estudio se detalla en la Figura 4.5.

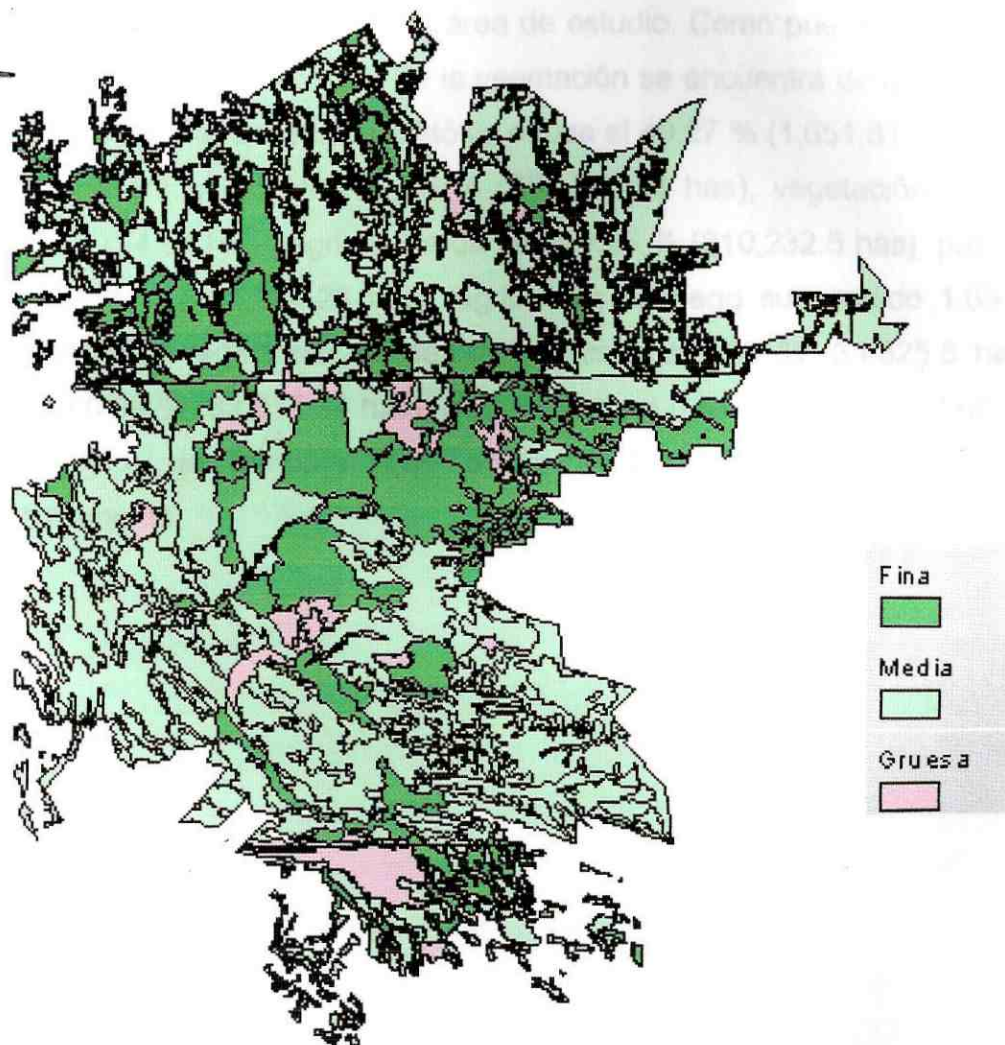


Figura 4.5. Textura del suelo de la Comarca Lagunera.

Como puede observarse la textura predominante es la media con 2,493,540.71 has correspondiente al 76.27 %, seguida por la fina con 657,408.79 has correspondiendo el 20.11 %, y finalmente la textura gruesa, la cual comprende una extensión de 118,392.09 has perteneciente al 3.62 % del área de estudio.

4.2.2.3 Carta de uso de suelo y vegetación.

Delimita y clasifica las zonas agrícolas de riego y temporal, así como los diferentes tipos de cultivos. Además contiene información de las zonas cubiertas por pastizales, bosques, matorrales, así como datos sobre los tipos de vegetación predominante en el área de estudio. Como puede observarse en la Figura 4.6, la distribución de la vegetación se encuentra de la siguiente manera: el matorral desértico rosetófilo ocupa el 49.27 % (1,651,813.96 has), matorral desértico micrófilo 22.66 % (759,848.58 has), vegetación halófila 9.7% (323,794.54 has), agricultura de riego 9.25 % (310,232.5 has), pastizal halófilo 4.52 % (151,684.23 has), agricultura de riego suspendido 1.65 % (55,506.9 has), vegetación de desiertos arenosos 1.03 % (34,825.5 has), chaparral 0.99 % (33,317.84 has), pastizal natural 0.51 % (17,377.88 has) y la agricultura de temporal que ocupa el 0.42 % (14,145.76 has) respectivamente.

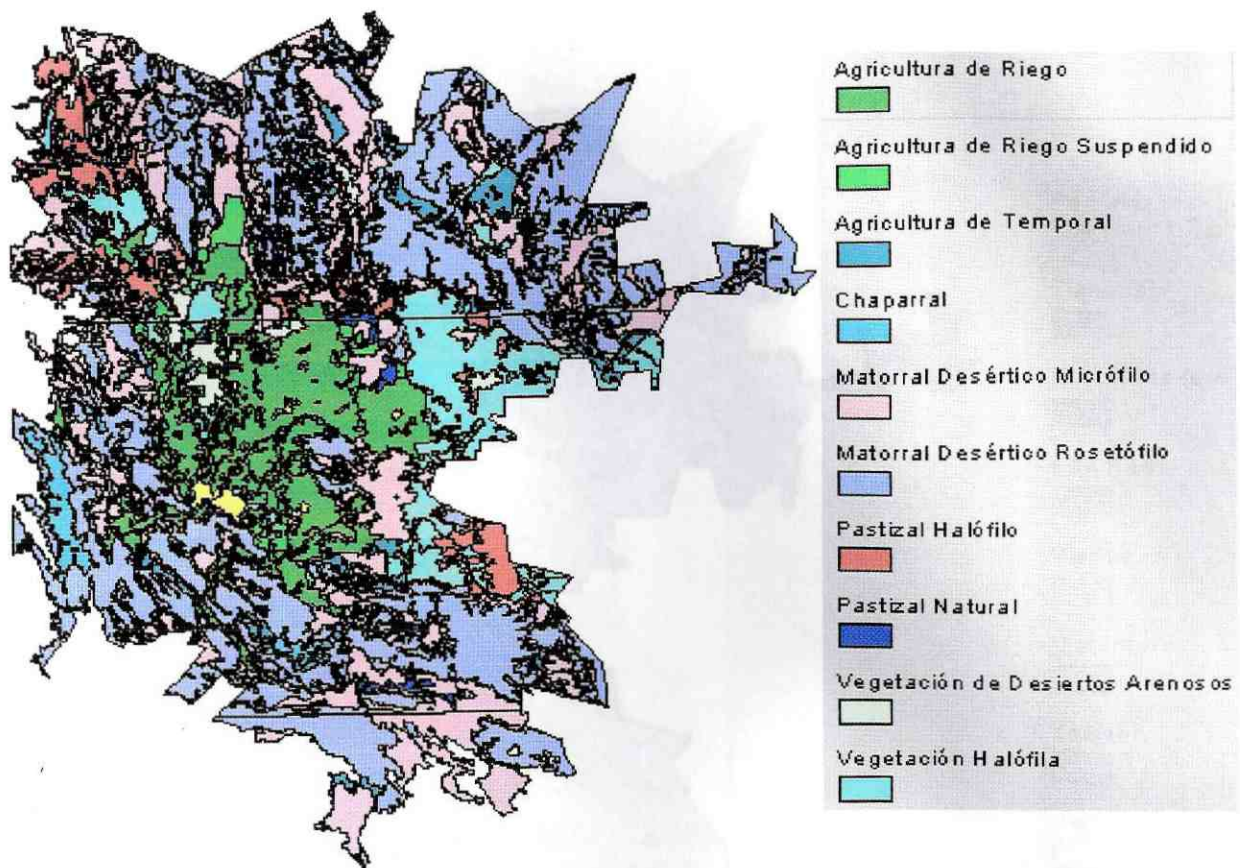


Figura 4.6. Uso de suelo y tipo de vegetación en la Comarca.

4.2.2.4 Poblaciones.

Presenta información referente a las localidades de la zona de estudio, entre la información que dispone este mapa se encuentra: nombre de la localidad, municipio y entidad federativa, número total de habitantes, coordenadas geográficas y altitud de las mismas. Se manejan 8 municipios, 3 pertenecientes al Estado de Durango, los cuales son Tlahualilo, Gómez Palacio y Lerdo, los 5 restantes corresponden al Estado de Coahuila, y son: Francisco I. Madero, San Pedro, Viesca, Matamoros y Torreón; el número total de localidades en los ocho municipios es de 1453, y el número total de habitantes en la Comarca Lagunera es de 1,188,039. Este mapa empleó la base de datos Contar 2000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI, que cuenta con el XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (Figura 4.7).

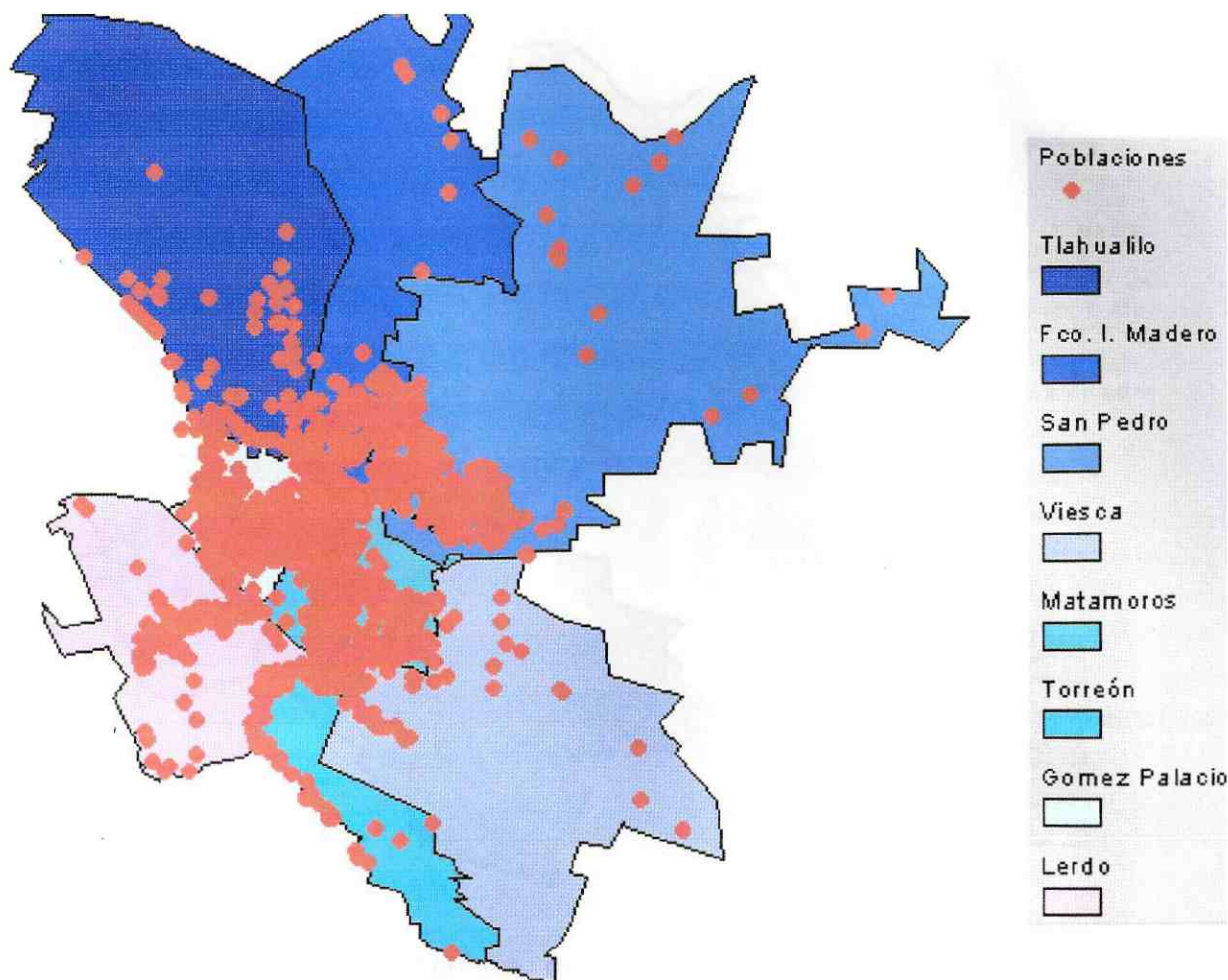


Figura 4.7. Poblaciones de la Comarca Lagunera.

4.2.2.5 Profundidad del nivel estático.

Esta información se colectó del recorrido de piezometría realizado en los meses de Marzo y Septiembre en los años 1975, 1990 y durante el periodo 1992 – 2003 por el personal de la CNA, en el que se tomaron lecturas a un total de 326 pozos pertenecientes al Acuífero Principal de la Comarca Lagunera, destinados exclusivamente a uso doméstico. Además, incluyen las coordenadas geográficas de cada pozo (Figura 4.8).

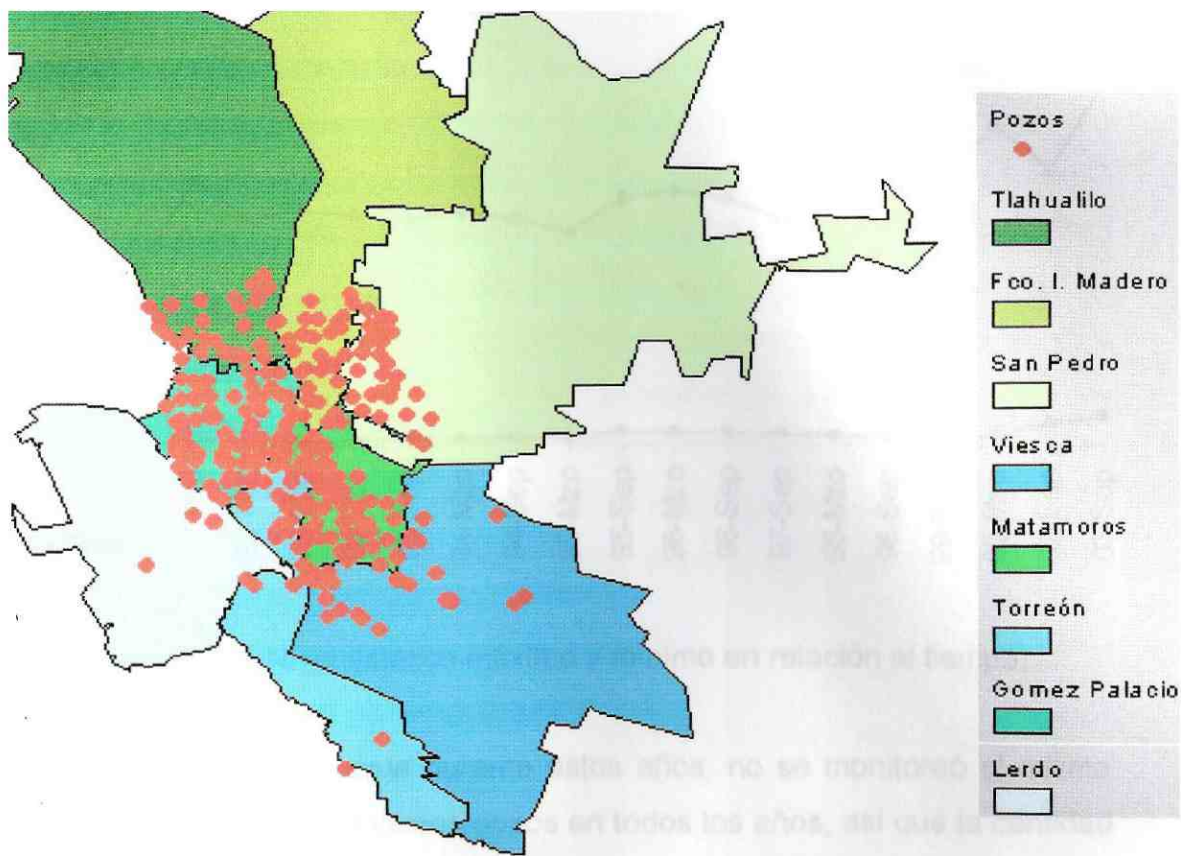


Figura 4.8. Nivel estático de los pozos de uso doméstico de la Comarca Lagunera.

En la Figura 4.9 se muestra el nivel freático máximo y mínimo presentado en los años de 1975 al 2003 durante los meses de Marzo y Septiembre; la profundidad mínima del nivel estático fue de 2 m durante el año de 1992, y el nivel máximo registrado fue de 198 m en Marzo del 2003. Los pozos que presentaron grandes profundidades en su nivel estático se ubicaron principalmente en el centro y sur de Torreón, suroeste de Matamoros, oeste y sur de Gómez Palacio, centro de Francisco I. Madero, sureste de Lerdo y noroeste de Viesca, mientras que los pozos que registraron las profundidades mínimas se localizaron en el centro y norte de Lerdo, sur de Francisco I. Madero y oeste de San Pedro de las Colonias.

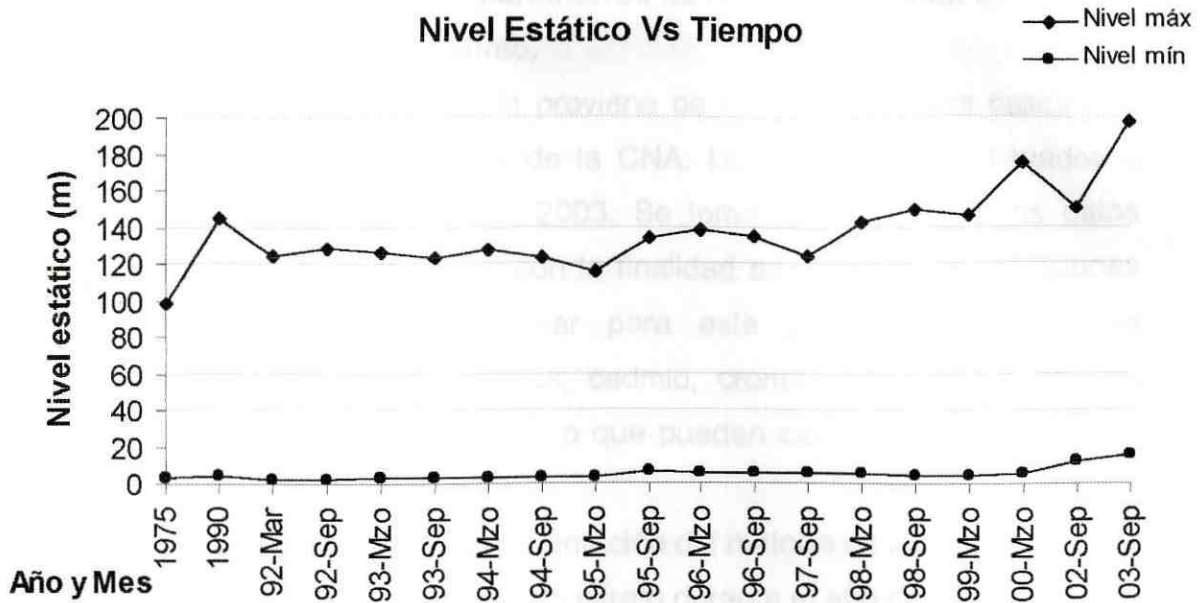


Figura 4.9. Nivel estático máximo y mínimo en relación al tiempo.

Cabe mencionar que durante estos años, no se monitoreó el mismo número de pozos ni los mismos pozos en todos los años, así que la cantidad total de pozos monitoreados por cada año fue muy variable, en la Figura 4.10 se presenta la información colectada al respecto.

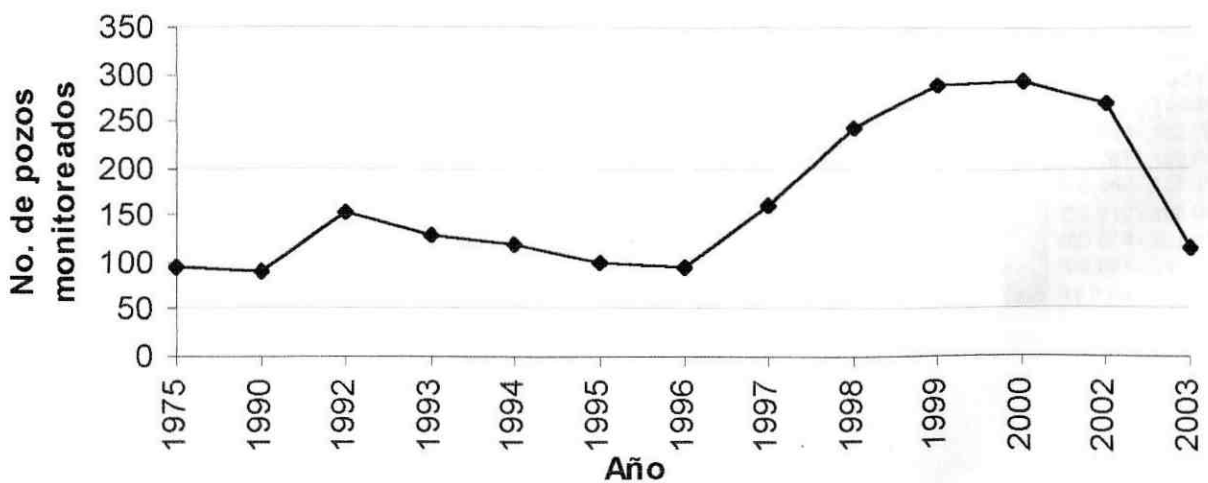


Figura 4.10. Número de pozos monitoreados anualmente durante el periodo de estudio.

4.2.2.6 Concentración de los parámetros de calidad del agua: arsénico, nitratos, cadmio, cromo y plomo.

La información presentada proviene de monitoreos sobre calidad de agua realizados por el personal de la CNA. Los cuales fueron llevados a cabo durante el periodo 1986 – 2003. Se tomaron como base los datos correspondientes a los 18 años con la finalidad de analizar las variaciones temporales, y se decidió analizar para este periodo únicamente la concentración de arsénico, nitratos, cadmio, cromo y plomo, por ser los parámetros de calidad más tóxicos o que pueden causar mayores efectos adversos a la salud del hombre.

La Figura 4.11 es una representación del método de interpolación IDW para las diversas concentraciones de nitrato durante el año de 1990.

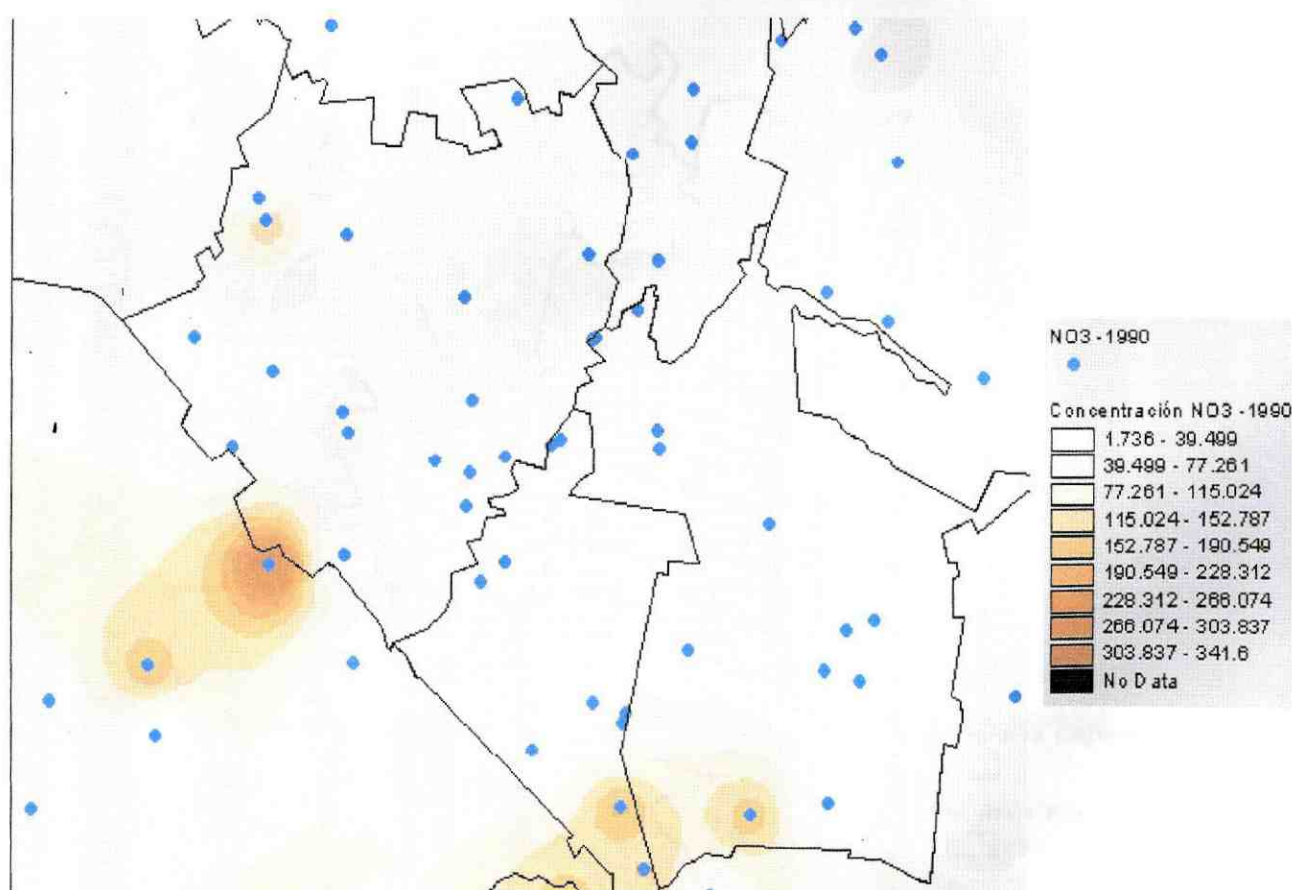


Figura 4.11. Concentración de nitratos en la Comarca Lagunera para el año de 1990.

4.2.2.7 Acuífero Principal.

Presenta información referente al Acuífero Principal, contemplando los siguientes datos: sobreexplotación del acuífero, no existen posibilidades de intrusión salina, tiene proyectos sobre sustentabilidad, el aprovechamiento subterráneo es de 2388 Mm³, la extracción es de 1900 Mm³ mientras que la recarga es de 518 Mm³, su disponibilidad es de -182,934604 m³/año, se destinan 1822 Mm³ para actividad agrícola y se usan 772.4 Mm³, para actividades pecuarias se destinan 195 Mm³ y se usan 35.4 Mm³, para el consumo urbano se destinan 300 Mm³ y se usan 107.8 Mm³, y para la industria se destinan 71 Mm³ y se usan 15.3 Mm³.

La Figura 4.12 es una representación gráfica del Acuífero Principal y su ubicación en la Comarca Lagunera.

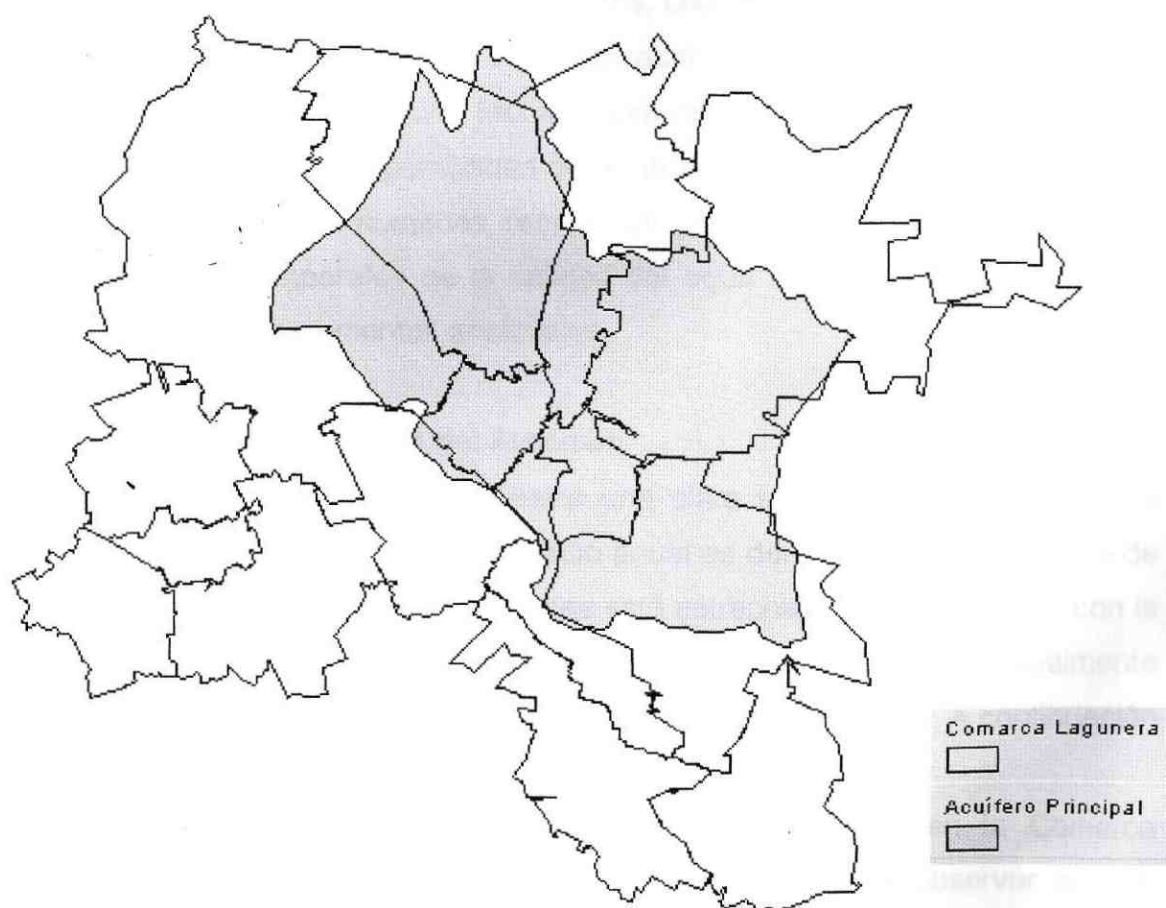


Figura 4.12. Ubicación del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Sistema de Información Geográfica del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera consta de mapas temáticos de suelo, uso de suelo y vegetación, poblaciones, nivel estático de los pozos de uso doméstico, calidad del agua subterránea y características del mismo acuífero, cuyas bases de datos incluyen: textura, clasificación, fase física y química del suelo; uso de suelo, tipo de vegetación y características de la misma; nombre de la entidad federativa, del municipio y la localidad, población total, número de municipios, localidades y habitantes en cada una de ellas; año de monitoreo del nivel piezométrico de los pozos, cantidad total de pozos muestreados por año, nivel estático y dinámico; concentración de los parámetros de calidad de agua, específicamente, arsénico, nitratos, cadmio, cromo y plomo, durante el periodo 1986-2003, así como su ubicación en la Comarca (municipio y localidad), número de pozo, fecha y hora de muestreo; extracción, recarga, aprovechamiento y disponibilidad de agua subterránea del acuífero para las diversas actividades humanas, respectivamente. A continuación se describen los cambios temporales de la calidad del agua subterránea, especificando cada uno de los elementos analizados.

5.1 Cambios temporales del Arsénico.

El nivel de arsénico muestra una clara tendencia de incremento a través de los años. El aumento medio anual es del 0.105 mg/L. La causa de este aumento en el agua subterránea está estrechamente relacionado con la disminución de los niveles piezométricos del Acuífero debido principalmente a la sobreexplotación del recurso hídrico para fines agrícolas. A continuación se muestran los gráficos que representan dicha tendencia.

La Figura 5.1 muestra la presencia de arsénico en la Comarca Lagunera en los años 1987 y 1988, además se puede observar que su concentración aumentó de 0.012 a 0.084 mg/L, lo que indica que se presentó un incremento de 0.072 mg/L en estos años.

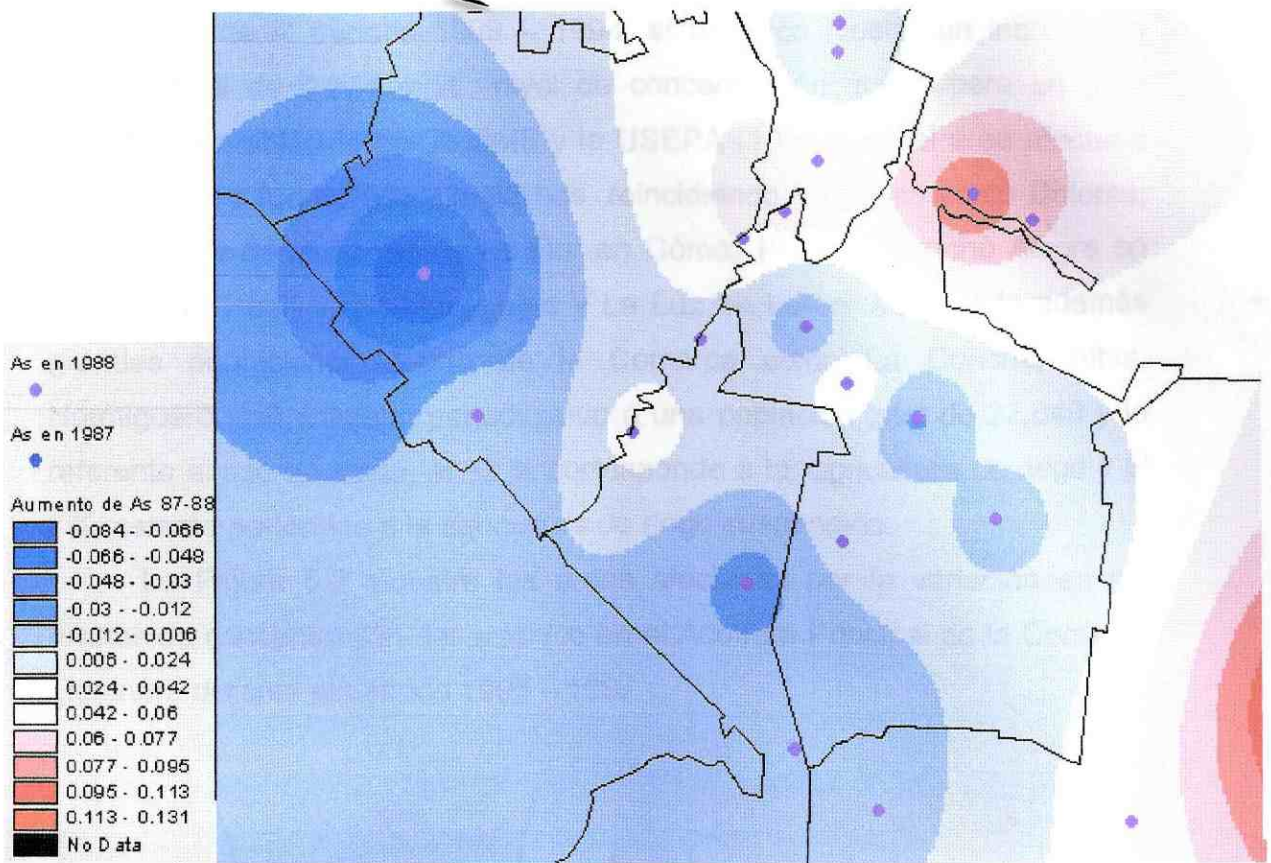


Figura 5.1. Concentración de Arsénico en la Comarca Lagunera, 1987-1988.

El área en la que se incrementó el nivel de concentración de arsénico fue de 64, 604.16 has, abarcando poblaciones en el centro y norte de Matamoros, sobresaliendo Vicente Guerrero y El Pacífico; en el centro de Torreón a Los Arenales, La Perla y Rancho Alegre; en Gómez las comunidades de Pastor Rouaix, Transporte, El Vergel, Puente de Torreña, Dinamita, La Aurora, Dolores, La Competencia, Manila, Brittingham; y La Luz en Lerdo; afectando a una población total de 21, 493 habitantes

En lo que respecta al uso de suelo y tipo de vegetación, se encuentra una zona del 80 % destinada a la Agricultura de Riego, mientras que el Matorral Desértico Micrófilo abarcó el 15% y la Agricultura de Riego Suspendido únicamente el 5 %.

Durante el periodo 1989 – 1994, el arsénico mostró un incremento medio anual de 0.274 mg/L, nivel de concentración que supera en gran medida el establecido por la OMS y la USEPA (10 mcg/L); el área afectada en este lapso fue de 505,325.62 has, reincidiendo en zonas como Dolores, Noe, Puente de la Torreña y La Flor en Gómez Palacio, Rancho Alegre en Torreón, El Pacífico en Matamoros y La Luz en Lerdo, abarcando además grandes poblaciones dentro de la Comarca como La Concha, Albia, Hormiguero y El Cambio; perjudicando a una población total de 22,849 y lo referente al uso de suelo, el 93 % corresponde a la agricultura de riego y el 7% restante pertenece a la agricultura de riego suspendido.

La Figura 5.2 muestra las áreas afectadas por la variación en los niveles de concentración del arsénico en el Acuífero Principal de la Comarca Lagunera durante el periodo 1995 – 1997.

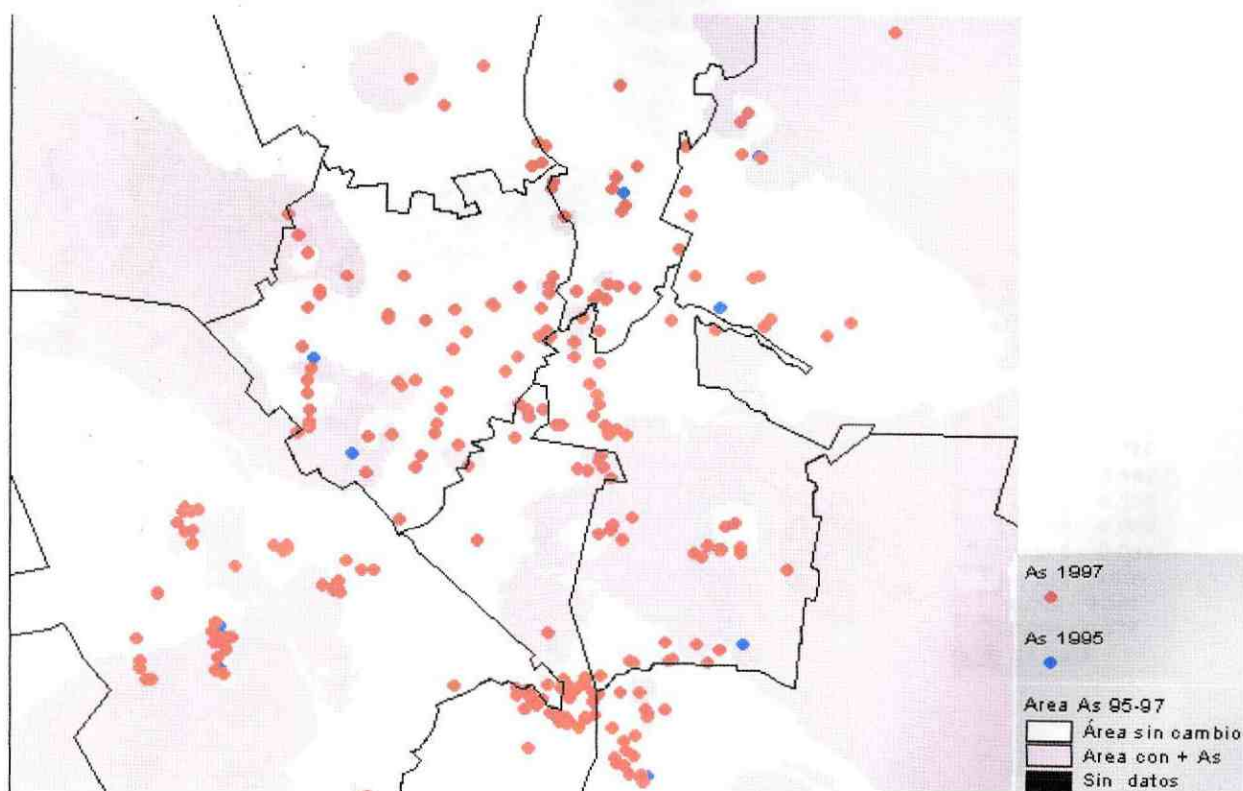


Figura 5.2. Áreas de la Comarca Lagunera donde incrementó el Arsénico 1995-1997.

Las zonas donde aumentó el nivel de arsénico durante los años 1995-1997 fueron noroeste y suroeste de Gómez Palacio, centro de Lerdo, este, centro y sur de Torreón, centro y sur de Matamoros, oeste de San Pedro y norte de Viesca. El área total afectada por el aumento en la concentración de arsénico fue de 548,907.59 has.

A continuación se muestra la Figura 5.3, que describe la variación en el incremento de arsénico para el mismo periodo de estudio. En donde las concentraciones se manifestaron entre 0.01 y 0.361 mg/L, y las áreas en donde presentó el mayor incremento fueron: Ciudad de Matamoros, Hidalgo, Petronilas y Buena Vista en Matamoros y Villanueva, Nueva Reynosa y San Luis en Viesca. Sobresaliendo aunque en menor escala, otras regiones como: Flor de Mayo, La Esperanza, La Partida y San Rafael de Arriba.

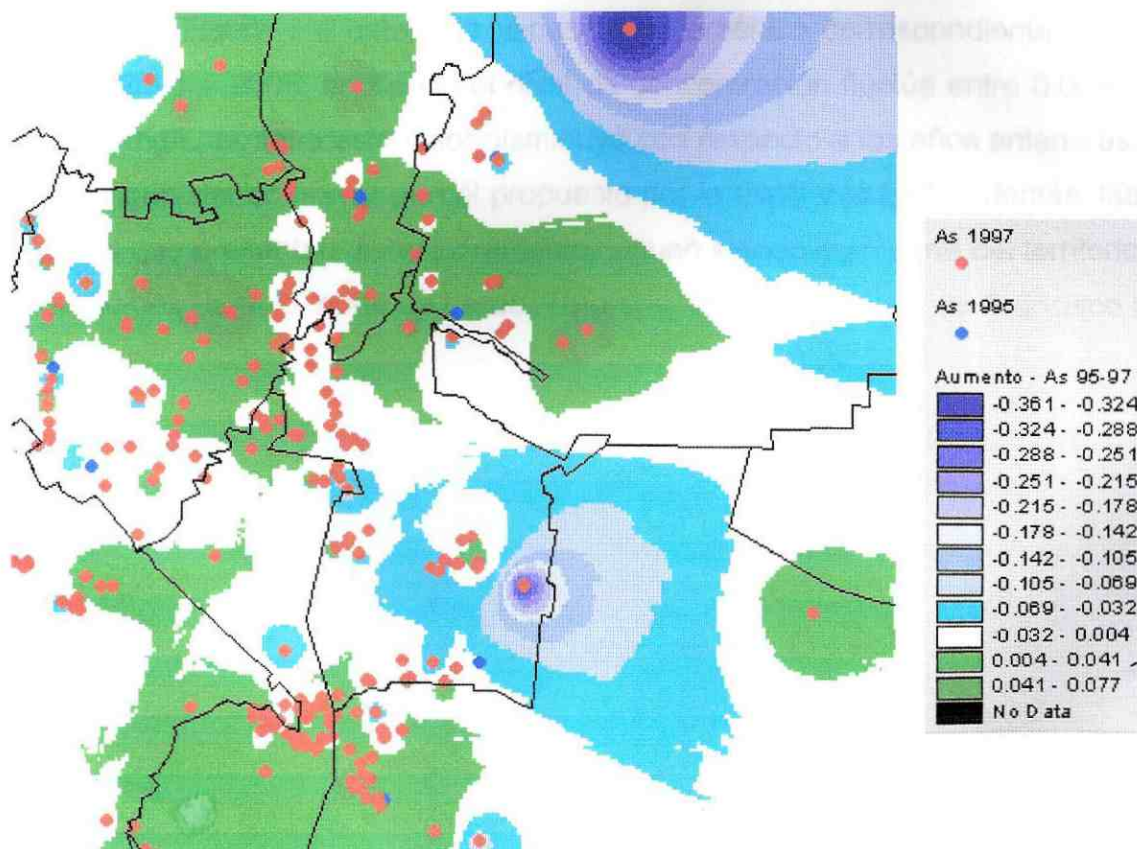


Figura 5.3. Incremento de la concentración de arsénico en la Comarca Lagunera en el periodo 1995-1997.

Nuevamente el incremento de arsénico abarcó un uso de suelo correspondiente a la agricultura de riego (92 %) y la agricultura de riego suspendido (8 %).

Los suelos de las zonas afectadas presentan textura fina en 52.1 %, textura gruesa con 25 % y textura media en 22.9 %.

Durante 1998 – 2000, el arsénico presentó un incremento medio anual de 0.081 mg/L. Las zonas más afectadas fueron: Jiménez en Gómez, Buenavista en Fco. I Madero, Los Arenales y La Perla en Torreón, Francisco Villa en Lerdo, Benavides en Matamoros y Tejaban de la Rosita en Viesca, perjudicando aproximadamente a 10,358 habitantes.

El área abarcó el siguiente uso de suelo y tipo de vegetación: agricultura de riego (85 %), agricultura de riego suspendido (10 %) y vegetación halófila (5 %).

La Figura 5.4 detalla la variación de arsénico correspondiente a los años 2001 – 2003, en donde el nivel de concentración fluctúa entre 0.009 y 0.066 mg/L, aunque este valor disminuyó con respecto a los años anteriores, aún sigue siendo mayor que el propuesto por la OMS y la EPA. Además, las zonas que presentan dicho incremento, siguen siendo gran parte del territorio de Gómez Palacio, norte de Lerdo, Torreón y Matamoros y sur de Francisco I Madero.

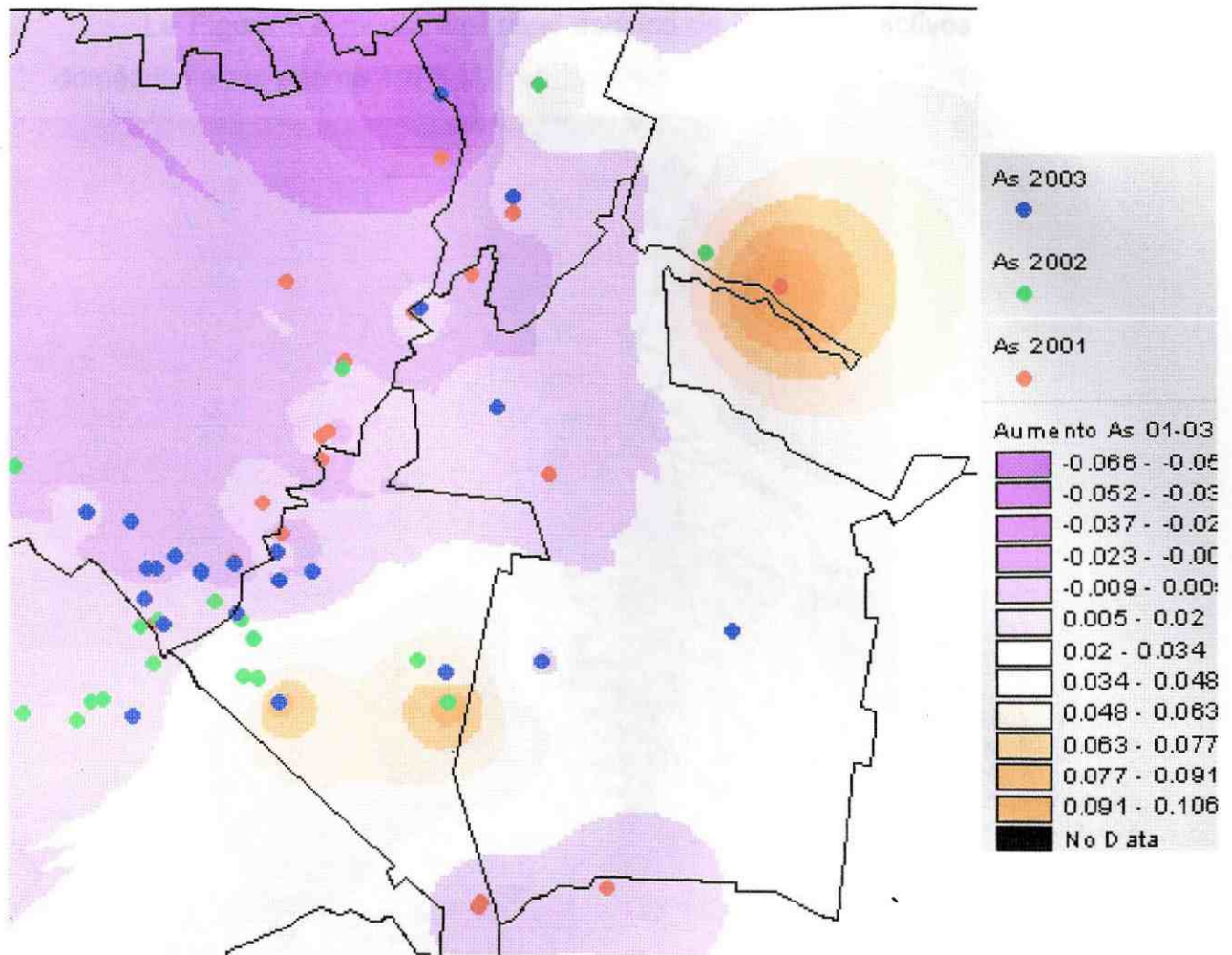


Figura 5.4. Cambios temporales del arsénico durante 2001 – 2003.

Para este periodo, el uso de suelo fue en su totalidad la agricultura de riego y predominó el suelo con textura media en un 70 %, seguido del de textura fina en un 30 %, mientras que el de textura gruesa no se hizo presente.

Después de haber comprobado el incremento temporal del arsénico en los últimos 18 años, se hizo una interrelación con el abatimiento de los niveles piezométricos de los pozos correspondientes al Acuífero Principal a través de los años. A continuación, se describe tal correlación.

En 1975 el nivel estático de los pozos pertenecientes al acuífero fluctuaba de 3.6 a 14 m en la Cd. de Lerdo, y de 87.49 a 97.96 m en algunas poblaciones de Torreón.

La Figura 5.5 muestra el nivel estático de los pozos activos para uso doméstico en el año de 1975.

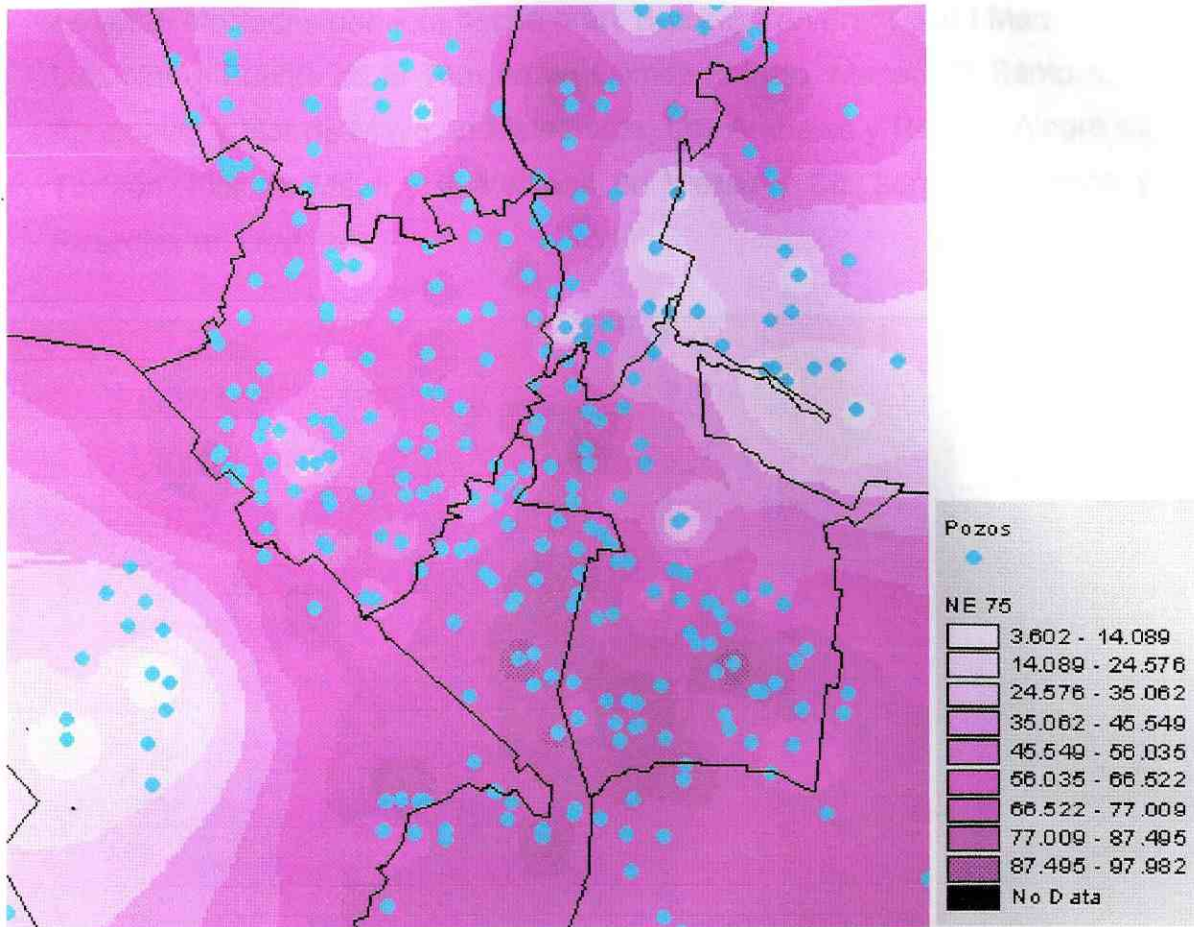


Figura 5.5. Nivel estático del Acuífero de la Comarca en 1975.

Los pozos con mayor sobreexplotación durante este año, pertenecían a las poblaciones: Dieciocho de Marzo y Batopilas en Francisco I Madero, Sofía de Arriba en San Pedro, Arcinas y Esmeralda en Gómez Palacio, la Cd. de Lerdo, Purísima, El Cambio, Solima, Granada e Hidalgo en Matamoros y la Perla y Rancho Alegre en Torreón.

Después de 15 años, el nivel estático de los pozos se encontraba en un rango de 1.72 y 124 m. El abatimiento de los niveles piezométricos se había dado principalmente en el sur de Torreón, suroeste de Matamoros, oeste y sur de Gómez, centro de Francisco I Madero, sureste de Lerdo y noroeste de Viesca.

La Figura 5.6 describe el nivel estático de los pozos sobreexplotados en la Región Lagunera hasta el año de 1990; las principales poblaciones que se veían afectadas por este hecho eran: Batopilas en Francisco I Madero, La Luz, Noe y Puente de la Torreña en Gómez Palacio, Manantial, Santo Niño Aguanaval y Flor de Mayo en Matamoros, Los Arenales y Rancho Alegre en Torreón, Flor de Mayo y la Ventana en Viesca y Cd. Lerdo, Nazareno y Picardías en Lerdo.

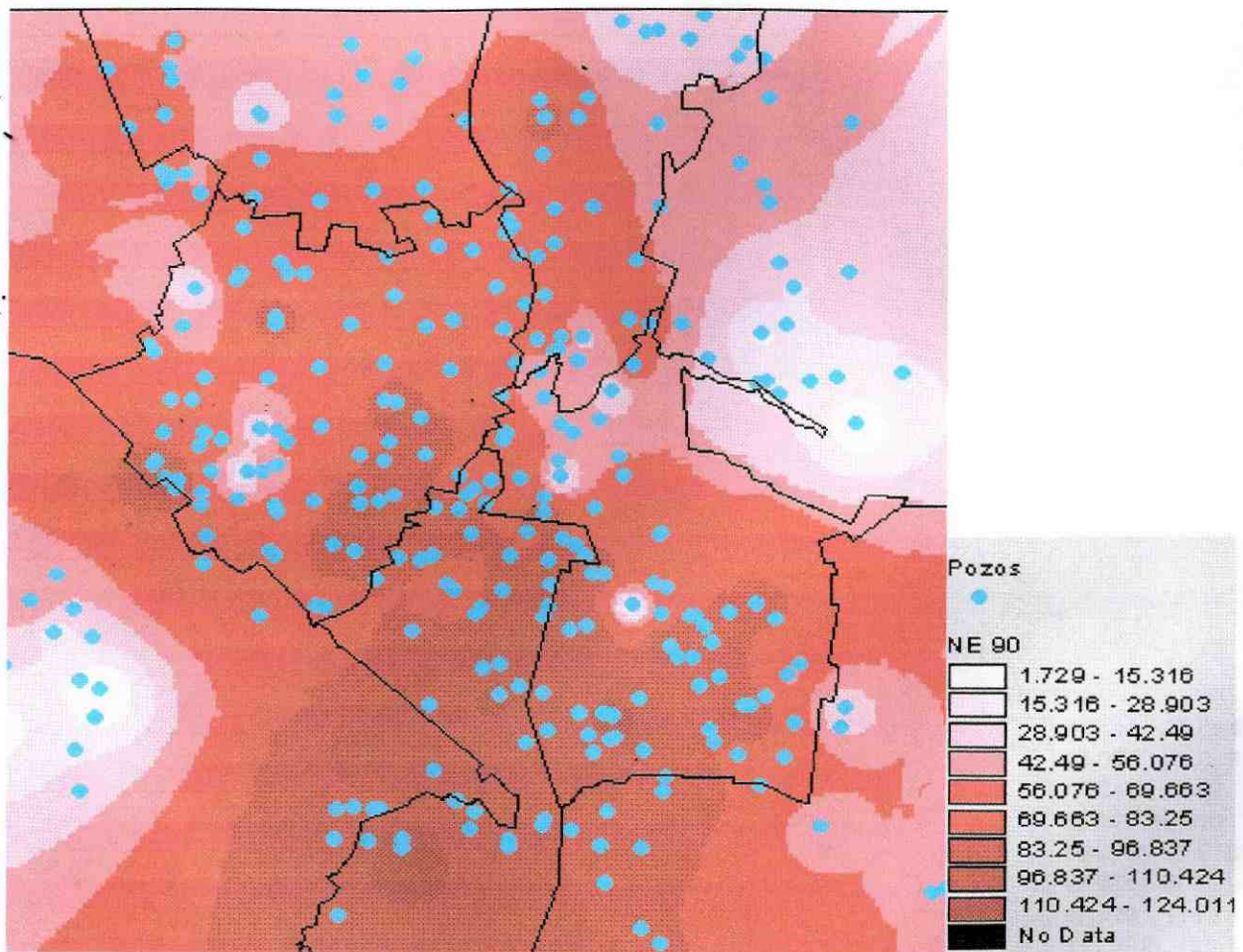


Figura 5.6. Nivel estático del Acuífero Principal en 1990.

A 10 años posteriores, el nivel estático del acuífero fluctuaba entre 14.11 y 139.7 m. El número de pozos de uso doméstico que habían disminuido sus niveles piezométricos se había incrementado en gran medida,

puesto que fue necesario con el fin de satisfacer las necesidades hídricas de la Región. Para este año, los principales pozos que habían sufrido un abatimiento considerable estaban ubicados en: Arcinas, Tlahualilo; Lequeito y Las Mercedes en Francisco I Madero, Pastor Rouaix, La Popular, Noe y Puente de la Torreña en Gómez, La Luz, Picardías y Nazareno en Lerdo, Santa Fe, La Partida, Los Arenales, La Perla y Rancho Alegre en Torreón, Manantial, Santo Niño Aguanaval e Hidalgo en Matamoros y Flor de Mayo y La Ventana en Viesca (Figura 5.7).

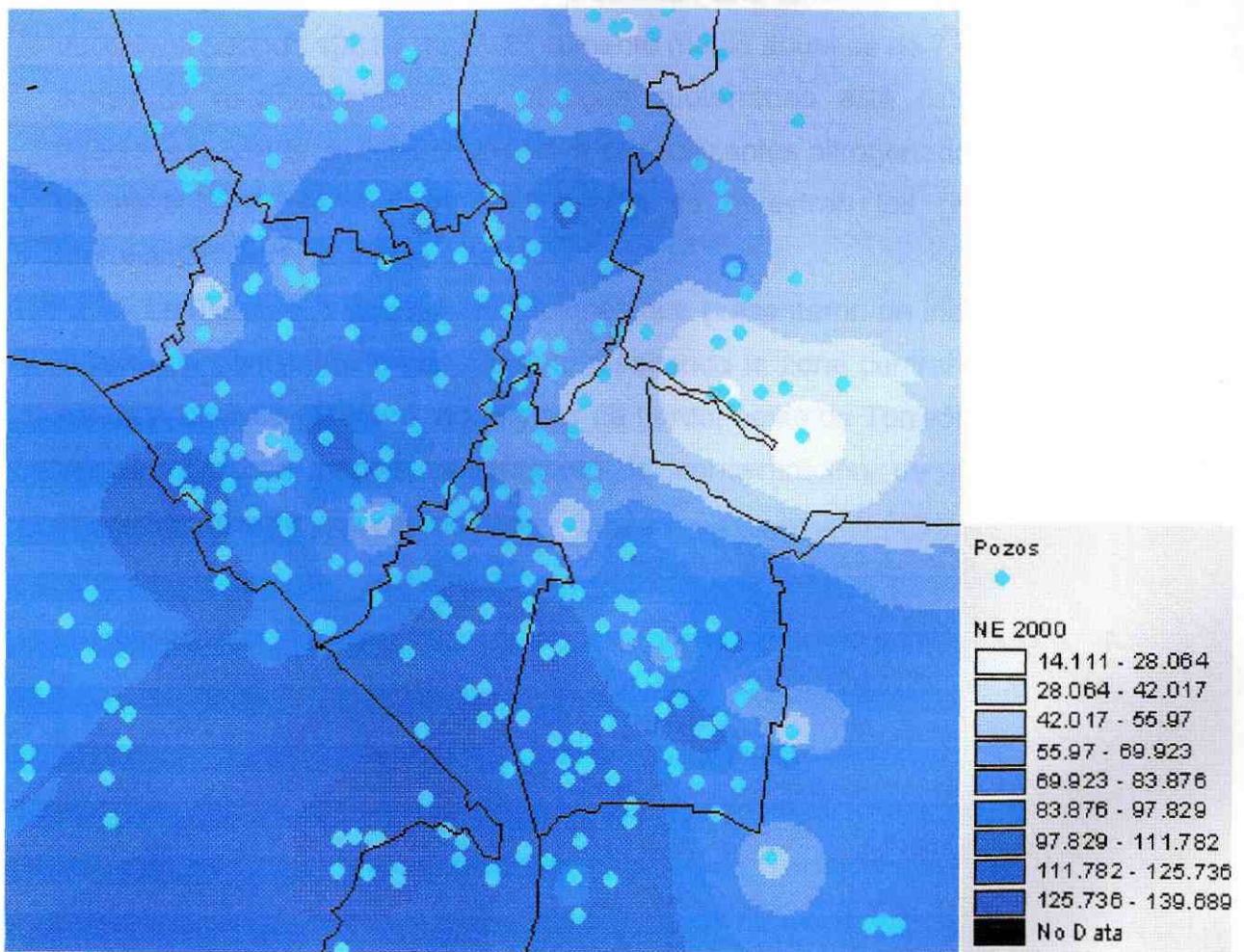


Figura 5.7. Nivel estático del Acuífero Principal de la Comarca en el 2000.

Las áreas que cuentan con pozos que han sufrido una disminución severa de los niveles piezométricos están asociadas con aquellas que muestran un incremento en la concentración de arsénico en el agua subterránea, y éstas a su vez, están relacionadas con aquellas que presentan un uso de suelo destinado principalmente a la agricultura de riego.

5.2 Cambios temporales del Nitrato.

Fundamentándose en la información obtenida, se observa que los niveles de concentración del nitrato presentan una tendencia de incremento durante el periodo 1981 – 1997. El aumento medio anual es de 7.43 mg/L. La causa de este incremento en el agua subterránea está estrechamente relacionada con la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados en zonas de agricultura intensiva. A continuación se muestran los gráficos que representan dicho aumento.

La Figura 5.8 muestra las regiones que presentaron un incremento en el nivel de concentración de nitratos, resaltando la zona central de Gómez, sur de Francisco I Madero, norte y sur de Lerdo, oeste de Torreón y norte de Viesca. El área donde se aumentó la concentración de nitratos fue aproximadamente 278,390.67 has.

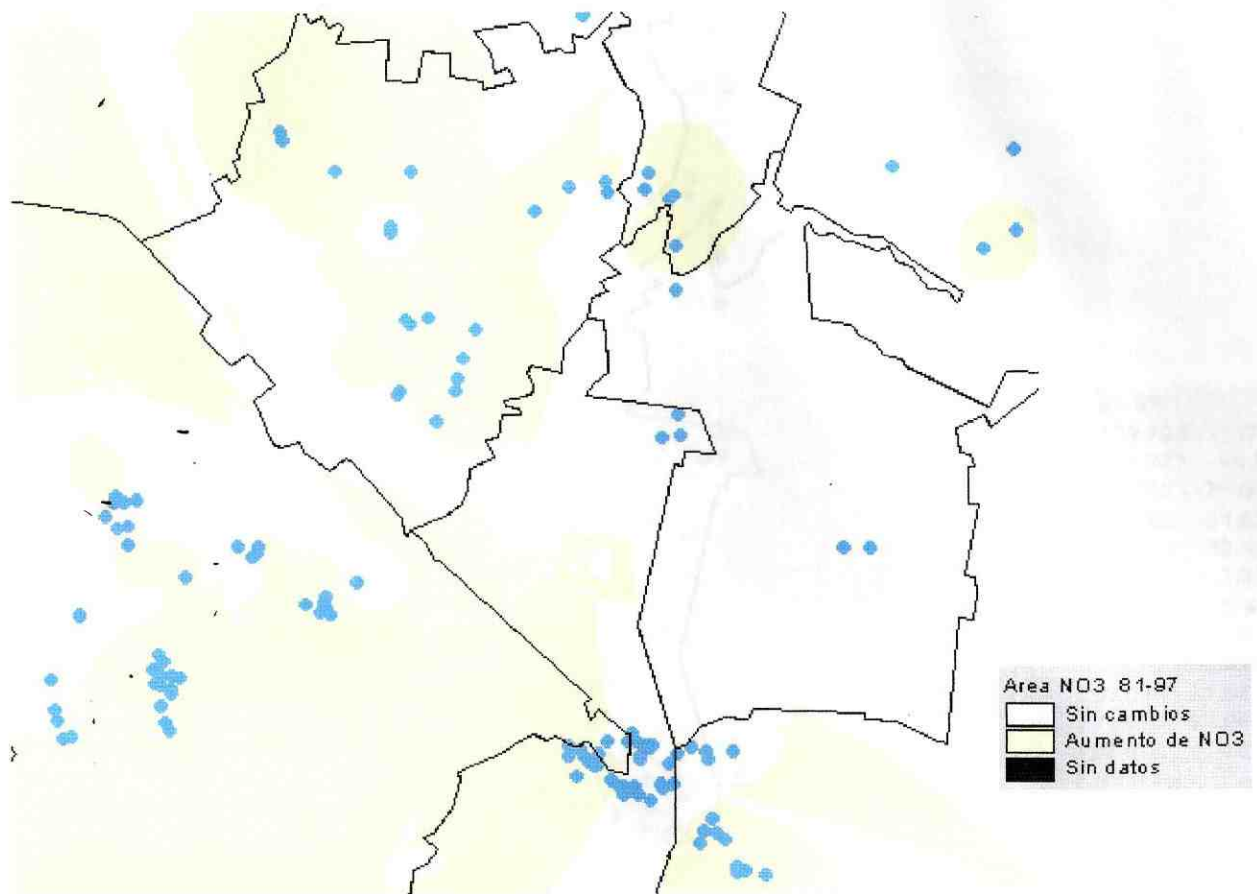


Figura 5.8. Áreas de la Comarca Lagunera que manifestaron incremento en la concentración de nitratos.

En la Figura 5.9 se detalla que el incremento en la concentración de nitratos varió de 0.252 a 138.79 mg/L, comprobándose así, una contaminación extrema por nitratos en la Región, ya que si se realiza una comparación con el nivel máximo de contaminación por nitratos para consumo humano establecido por la Organización Mundial de la Salud (10 mg/L), se tiene que es 12.8 veces más que lo permitido.

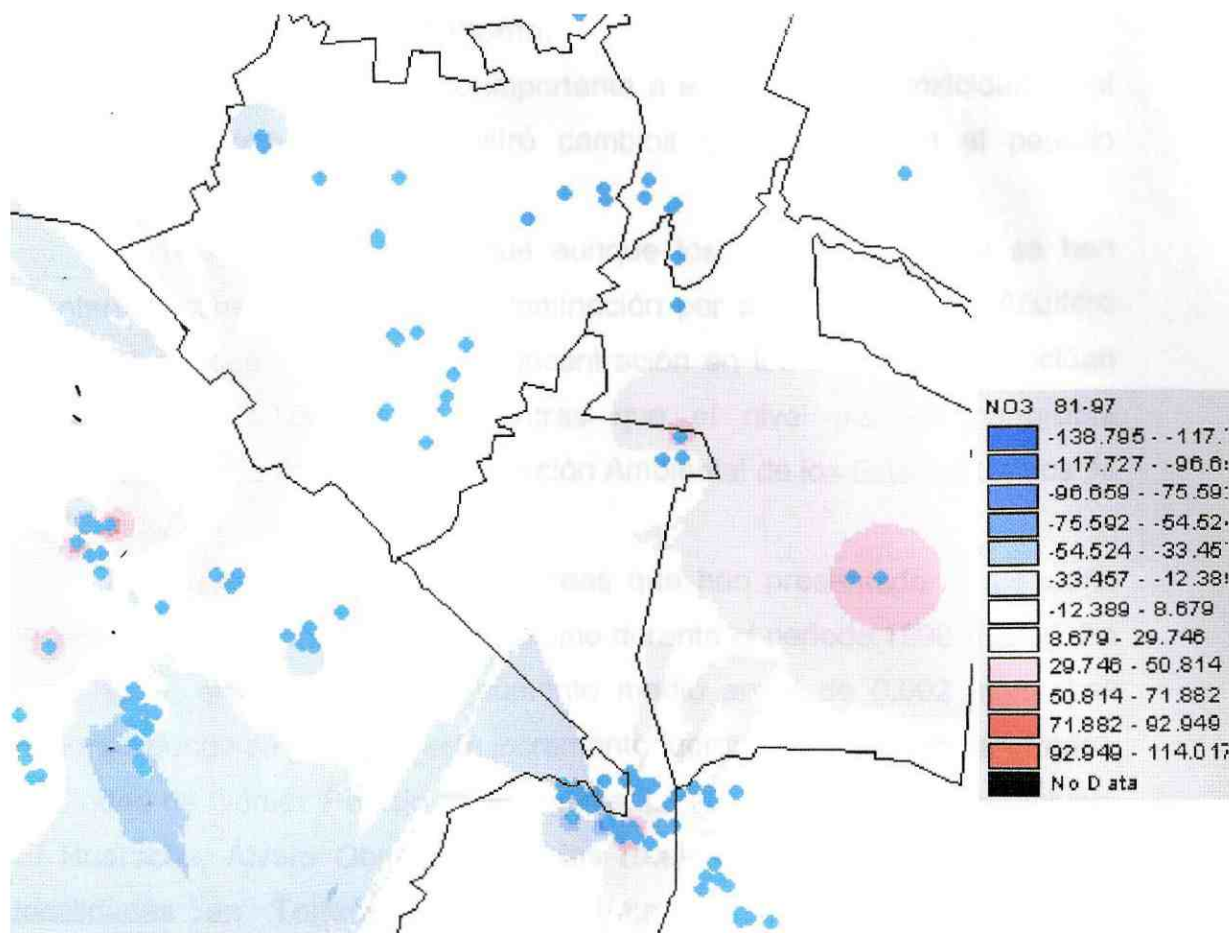


Figura 5.9. Variación de la concentración de nitratos en la Comarca Lagunera durante el periodo 1981-1997.

Las principales poblaciones en riesgo por la contaminación causada por el incremento en el nivel de concentración de nitratos son: Seis de Octubre en Gómez Palacio, Sapioris, La Loma y Nazareno en Lerdo y Flor de Mayo en Viesca, estimándose en estas localidades y zonas aledañas una población total de 15,236 habitantes.

Es menester mencionar que el área afectada por el incremento de nitratos está íntimamente relacionada con el uso de suelo, ya que esta zona está destinada exclusivamente a la agricultura de riego.

5.3 Cambios temporales del Plomo.

El plomo es un elemento importante a analizar por su toxicidad en el hombre. Sin embargo, no mostró cambios significativos en el periodo estudiado.

Es relevante mencionar que aunque los niveles de plomo se han mantenido constantes, existe contaminación por este metal en el Acuífero Principal, ya que los niveles de concentración en los últimos años fluctúan entre 0.001 a 0.049 mg/L mientras que el nivel máximo permisible establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos es de 15 mcg/L.

La Figura 5.10 muestra las áreas que han presentado un pequeño incremento en la concentración de plomo durante el periodo 1998 – 2000. En este lapso, el plomo tuvo un aumento medio anual de 0.002 mg/L. Las regiones donde se presentó este incremento fueron: La Rosita en San Pedro, la Ciudad de Gómez Palacio, Los Ángeles, Las Cuevas, Villa de Guadalupe, El Huarache, Álvaro Obregón y Carlos Real en Lerdo y otras pequeñas localidades en Torreón y Gómez Palacio. Estando en riesgo por contaminación de plomo en agua subterránea aproximadamente una población total de 234,745 habitantes.

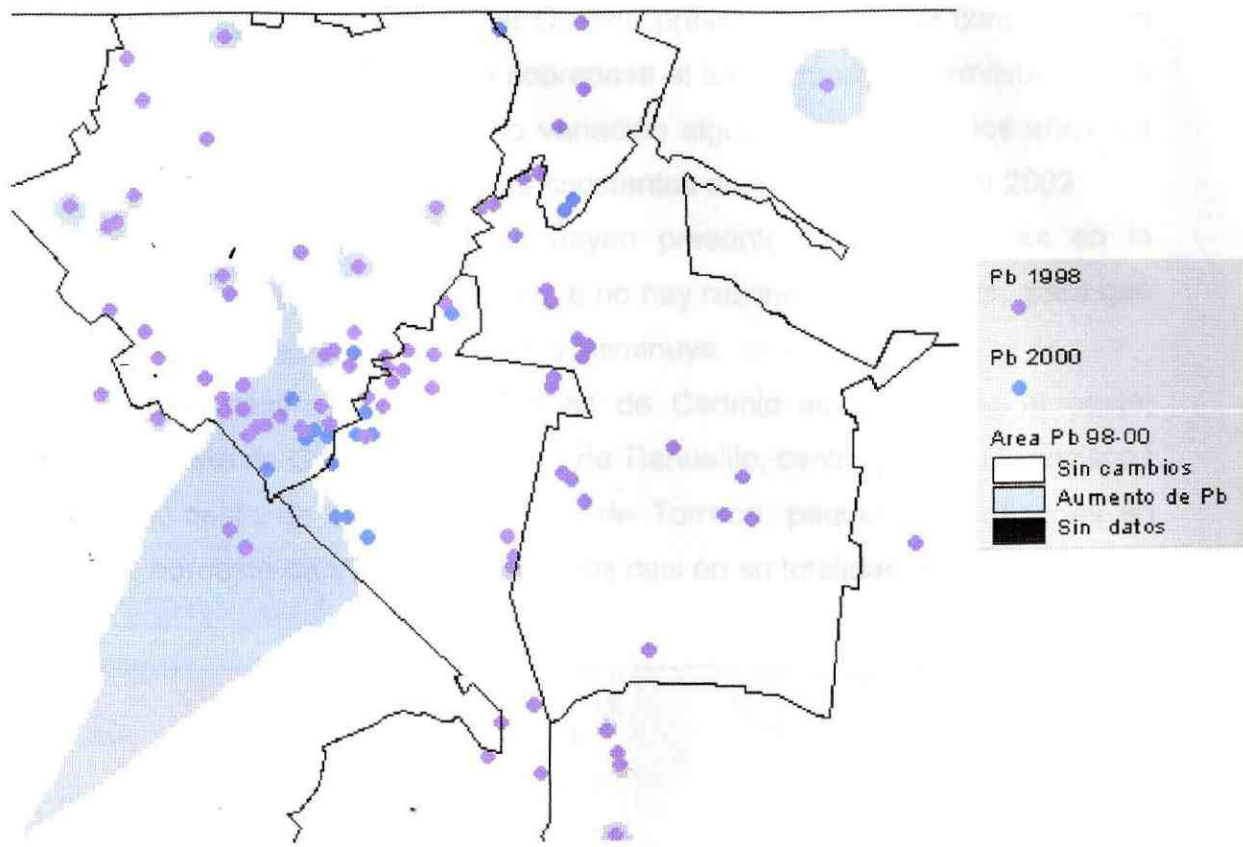


Figura 5.10. Área que presenta aumento de plomo durante 98 –00.

Sin embargo, un suceso importante de mencionar ha ocurrido en los últimos tres años, el nivel de plomo en el agua subterránea ha disminuido considerablemente su concentración, fluctuando únicamente entre 0.001 – 0.009 mg/L en el año 2003, aunque se desconocen las causas de dicha tendencia.

5.4 Cambios temporales del Cadmio.

El cadmio es un metal pesado que trae graves repercusiones en la salud del hombre si excede los límites permisibles en el organismo. Según la Organización Mundial de la Salud el nivel máximo de contaminación en el agua de bebida debe ser inferior a 5 mcg/L y según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) 10 mcg/L.

En el presente estudio, el Cadmio presenta niveles de concentración entre 1 y 9 mcg/L, es decir, no sobrepasa el límite máximo permisible por la EPA y además, no ha mostrado variación alguna a través de los años, ya que sus niveles se han mantenido constantes desde 1994 hasta el 2002.

Es razonable que no se hayan presentado modificaciones en la concentración de cadmio, puesto que no hay razones en la Región, para que el nivel de este elemento aumente o disminuya.

Las máximas concentraciones de Cadmio se ubican en el oeste, centro y este de Gómez Palacio, sur de Tlahualilo, centro y sur de Francisco I Madero, oeste de San Pedro, norte de Torreón, pequeñas localidades en Lerdo, noroeste de Viesca y Matamoros casi en su totalidad (Figura 5.11).

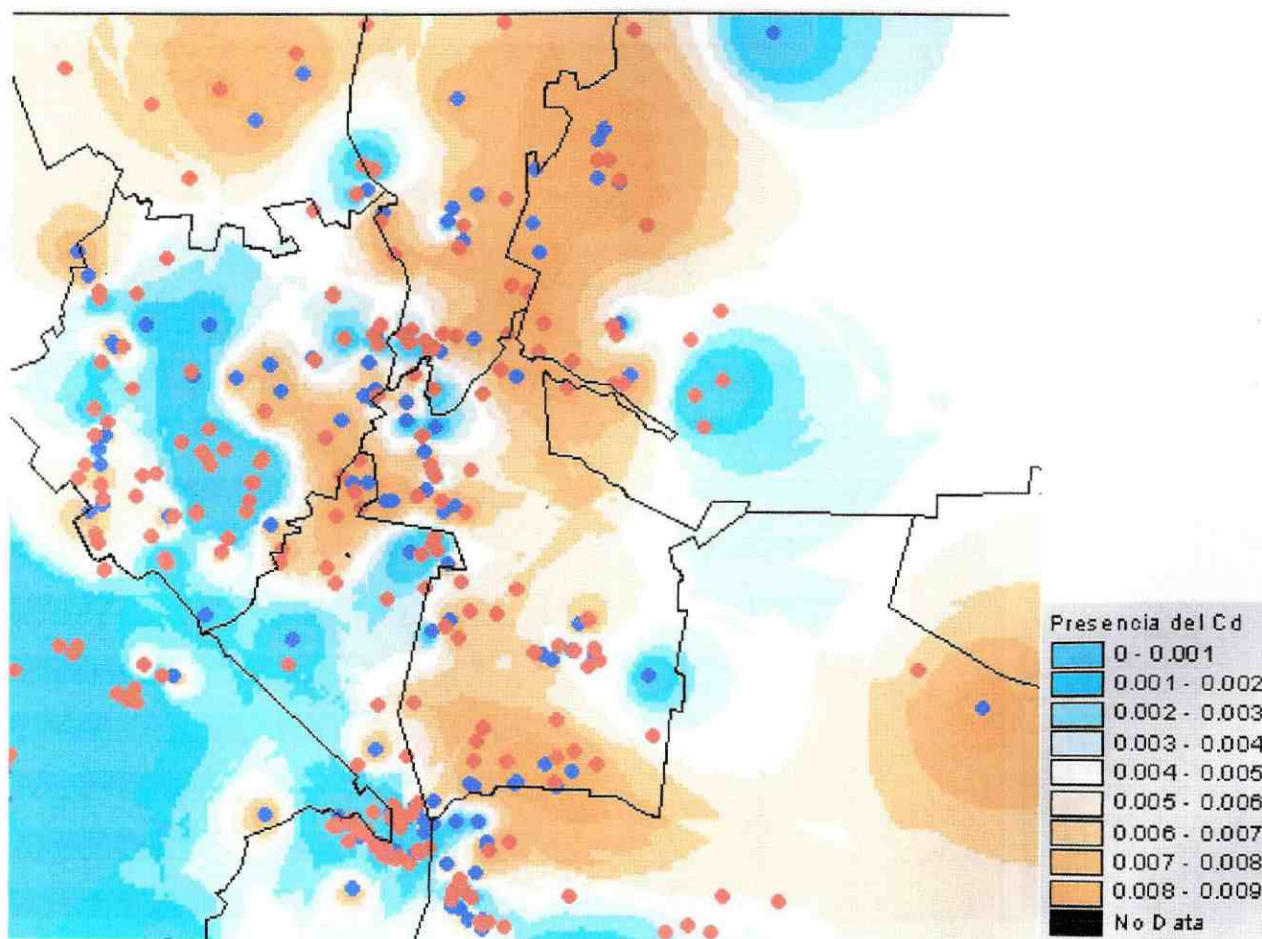


Figura 5.11. Concentración de cadmio en la Comarca Lagunera.

5.5 Cambios temporales del cromo.

En el periodo de estudio, el cromo ha mostrado fluctuaciones entre 0.016 y 0.049 mg/L, y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos establece como límite máximo permisible para el agua de uso doméstico a 0.05 mg/L. O sea que, los niveles de cromo no sobrepasan los estándares permitidos, y al igual que el cadmio, no ha mostrado tendencias de incremento o reducción en el agua subterránea de la Comarca Lagunera.

La Figura 5.12 muestra la concentración del cromo en la Comarca Lagunera a través de los años. Las regiones que presentan las más altas concentraciones de cromo, aunque sin riesgo de contaminación, son: el este de Viesca y el sur de San Pedro.

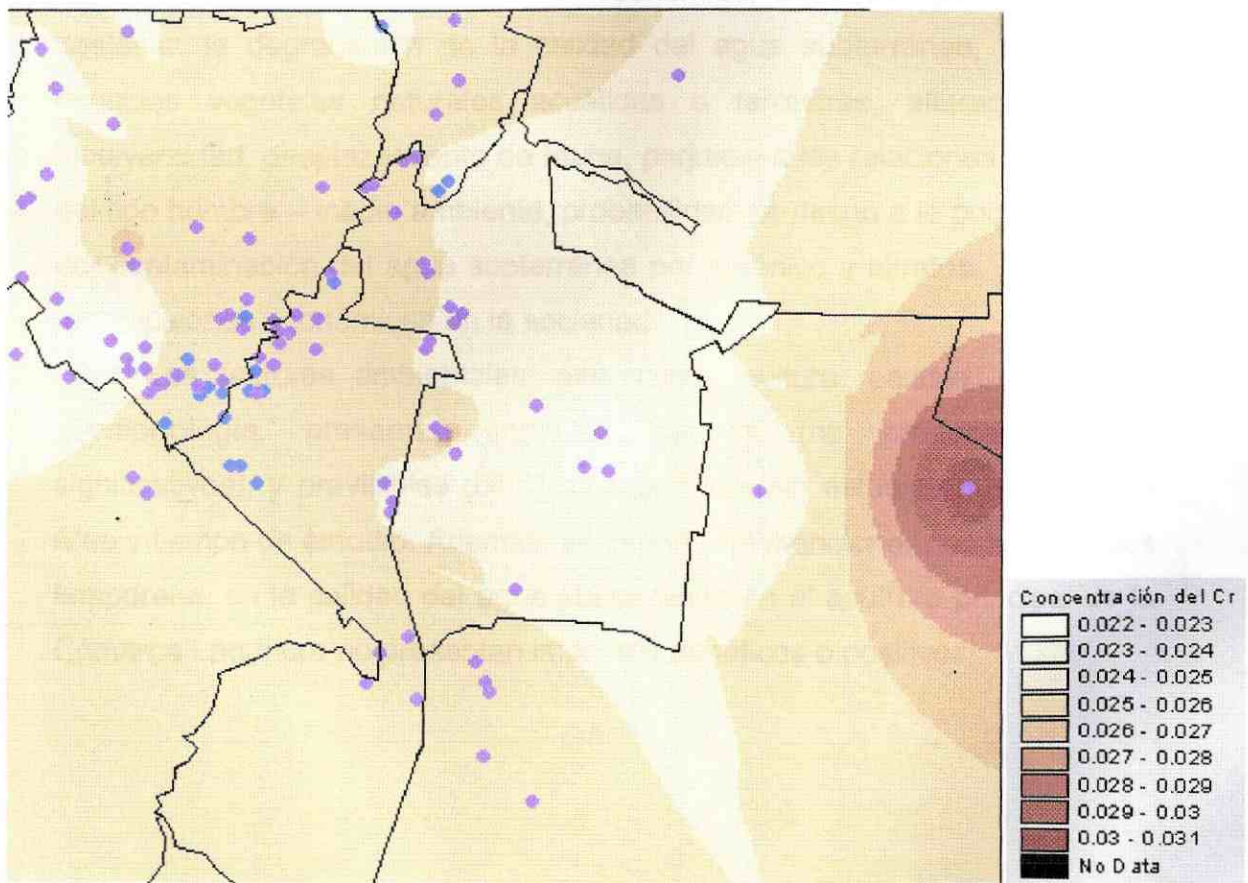


Figura 5.12. Concentración de cromo en la Comarca Lagunera durante el periodo de estudio.

5.6 Impactos Ambientales. CONCLUSIONES

Los impactos ambientales generados por los cambios temporales en la calidad del agua subterránea son resultado de la acumulación de impactos de diversa magnitud y alcance, con la consecuente degradación de los recursos naturales.

Los impactos negativos o adversos significativos (ocasionado el impacto, no existe remediación, es decir, son de alta intensidad) provocados por las actividades antrópicas son: cambios en el nivel freático y riesgos de salud a la población que habita áreas con altos índices de contaminación y regiones aledañas.

Los impactos ambientales negativos o adversos no significativos, ya que existe la posibilidad de remediación, o bien, son de baja intensidad, pueden ser de tipo natural y socioeconómico, entre los que se pueden destacar: la degradación de la calidad del agua subterránea, pérdida de especies vegetales naturales acuáticas o terrestres, alteración de la biodiversidad, desplazamiento de fauna, perjuicio a las relaciones ecológicas del tipo hombre – medio ambiente, probabilidad de riesgo a la población total por contaminación del agua subterránea por arsénico y nitratos, y por ende, repercusiones económicas en la sociedad.

Los factores ambientales: aire, clima, cultura, paisaje, geología y geomorfología, presentan impactos neutros (no producen efectos significativos), y previsibles (difícil de cuantificar sin estudios previos) en el área y tiempo de estudio. Además, es importante mencionar que los cambios temporales en la calidad del agua subterránea en el acuífero principal de la Comarca Lagunera no presentan impactos benéficos o positivos.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio se concluye que:

- ❖ Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta útil para realizar análisis de variabilidad espacial y temporal de calidad y fluctuación del agua subterránea.
- ❖ El análisis de los cambios en la calidad del agua subterránea con respecto al arsénico, demostró que el incremento en los niveles de concentración de este elemento es provocado por el abatimiento de los niveles piezométricos del acuífero.
- ❖ Las tendencias de aumento en los niveles de concentración de nitrato en el Acuífero Principal a lo largo de los años, pueden ser consecuencia de la lixiviación de fertilizantes nitrogenados, provocada por la aplicación de excesivas láminas de riego en zonas de cultivos intensivos.
- ❖ La disminución en los niveles piezométricos no provocó cambios temporales en la concentración de plomo, cadmio y cromo.
- ❖ Las poblaciones en el área de estudio con mayor contaminación por arsénico y nitratos son: Pastor Rouaix, Puente de Torreña, Venecia y Arcinas en Gómez Palacio, Ciudad Lerdo y La Luz en el Municipio de Lerdo, Los Arenales, Rancho Alegre y La Perla en Torreón, Hidalgo y El Cambio en Matamoros, Lequeito en Francisco I. Madero, Flor de Mayo y La Ventana en Viesca y San Rafael de Arriba en San Pedro. La población total existente en estas regiones y con riesgo de contaminación es de 84, 077 habitantes.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se proponen para regular y mantener la calidad del agua subterránea son:

- ❖ Hacer un uso más eficiente del agua para uso agrícola mediante la aplicación de láminas de riego adecuadas.
- ❖ Regular la extracción del recurso hídrico subterráneo mediante inspecciones periódicas por parte de las dependencias correspondientes.
- ❖ Realizar monitoreos de calidad de agua con mayor frecuencia en las áreas con alto índice de contaminación.
- ❖ Elaborar análisis completos de las muestras de aguas (incluir todos los parámetros de calidad).
- ❖ Diseñar y promover programas de concientización a la sociedad sobre el uso eficiente del agua.
- ❖ Implementar técnicas, tecnologías y/o proyectos que faciliten la utilización del recurso hídrico en el hogar y simultáneamente comprendan un ahorro del mismo.
- ❖ Desarrollar mecanismos para la implementación de mini o micro plantas tratadoras de agua a nivel comunal con apoyo de gobiernos municipales, estatales y federales.
- ❖ Desarrollar proyectos a corto plazo sobre remediación del agua subterránea, principalmente en áreas con mayor contaminación.

LITERATURA CITADA

- AEROTERRA S. A., 2004. ¿Qué es un Sistema de Información Geográfica? (Revisado el 18 de Julio de 2004) [En Línea]
<http://www.aeroterra.com/HTMs/Gis.htm>
- ATSDR, 2002. El Agua Subterránea. Agencia Para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos. Correo Electrónico: atsdric@cdc.gov
- Bartolomé C. T., 2003. Sistemas de Información Geográfica. Ingeniería Informática. Sistemas de Información y Telecomunicaciones. Revista: Robotiker. (Revisado el 28 de Julio de 2004). [En Línea]
<http://revista.robotiker.com/articulos/articulo60/pagina1.jsp>
- Castellanos J. Z. y J. J. Peña-Cabriales, 1990. Los Nitratos Provenientes de la Agricultura: Una Fuente de Contaminación de los Acuíferos. Terra 8 (1): 113-126.
- Castellanos J. Z., B. Hurtado y S. Villalobos, 1998. Cambios en la Calidad del Agua Subterránea debido al Abatimiento de los Niveles Piezométricos en el Estado de Guanajuato. INIFAP, Celaya, Guanajuato. En Memoria del Simposio Internacional de Aguas Subterráneas.
- Castellanos J. Z., A. Ortega, O. A. Grajeda, A. Velásquez, S. Villalobos, 2002. Changes in the Quality of Groundwater for Agricultural Use in Guanajuato. Terra Vol. 20, No. 2: 161-170.
- Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 2002. Contaminación del Agua. Contaminación de Aguas Subterráneas. (Rev-25-Jul-2004)[En Línea]
<http://www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/170AgSub.htm>

CNA, 2000. Región VII de Cuencas Centrales del Norte de la Comisión Nacional del Agua. (Revisado el 14 de Octubre de 2004). [En línea] http://www.cna.gob.mx/publicaciones/PNH0106/EI_agua_recurso4.pdf

CNA, 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Principal, Estados de Durango y Coahuila. Comisión Nacional del Agua – Gerencia de Aguas Subterráneas – Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México, D.F.

Díaz P. L., 1997. Geohidrología: Composición de las Aguas Subterráneas. Sustancias que se Encuentran Disueltas en un Agua Natural Subterránea. Iones Fundamentales y Menores. Lucas Morea, Sinexi S.A. (Revisado el 23 de Junio de 2004). [En Línea] <http://www.monografias.com/trabajos/geohidro/geohidro.shtml>

Dos Santos P., 1998. Water Management in Arizona: Strategies for Controlling GroundWater Depletion and Degradation. Arizona Department of Environmental Quality. Tucson, Arizona, U.S.A.

EPA, 2000. Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable. Ground Water and Drinking Water Standards. Environmental Protection Agency. (Revisado el 12 de Agosto de 2004). [En Línea] <http://www.epa.gov/safewater/agua/estandares.html>

Escuelas de Ciencias de la Salud (a), 2001. Metales. Acumulación - Toxicidad -Humanos. Utilización: Cromados. Contaminación Agua y Medio Ambiente. (Revisado el 08 de Julio de 2004) [En Línea] <http://html.rincondelvago.com/cadmio.html>

Escuelas de Ciencias de la Salud (b), 2001. Metales. Acumulación y Toxicidad en Humanos. Energía, Contaminación de Agua y Medio Ambiente. (Revisado el 08 de Julio de 2004). [En Línea]
<http://144.16.93.203/energy/HC270799/HDL/ENV/envsp/Vol336.htm>

ESRI, 2004. Environmental Systems Research Institute. Arc View ® GIS 3.2. Seattle, Washington. U. S. A.

ESRI España, 2004. Qué es GIS. Environmental Systems Research Institute Grupo EP. Correo Electrónico: info@esri-es (Revisado 18-Julio-2004) [En Línea] <http://www.esri-es.com/index.asp?pagina=285>

FAO, 1981. Riego y Drenaje. Contaminación de las Aguas Subterráneas. Tecnología. Economía y gestión. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

GIS GOPDE, 2004. Qué es un Sistema de Información Geográfica. (Revisado el 18 de Julio de 2004) [En Línea]
<http://www.cesga.es/ca/defaultC.html?Gis/index.html&2>

Gómez-Arroyo, S., M. Altamirano y R. Villalobos-Pietrini. 1981. Sister – Chromatid Exchanges Induced by Some Chromium Compounds in Human lymphocytes In Vitro. *Mutation Res.* 90: 425-431.

Gómez Mesa E., 1997. Problemas Ambientales del Cromo. Santo Domingo, República Dominicana. (Revisado el 23 de Junio de 2004) [En Línea]
<http://html.rincondelvago.com/cadmio.html>

González H. L., L. F. Sánchez y M. Arellano, 1991. Estudio Hidrogeoquímico e isotópico del acuífero granular de la Comarca Lagunera. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua - Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos - Subcoordinación de Hidrología y Aprovechamientos Hidráulicos y Comisión Nacional del Agua - Gerencia en la Región Lagunera. México.

IMTA, 2000. Sistema de Recarga Artificial en el Acuífero Principal de la Comarca Lagunera.

Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI), 2002. Cuaderno Estadístico Municipal de Torreón Coahuila de Zaragoza. 1ª. Edición. Aguascalientes, Aguascalientes.

Jiménez, C. 1993. Factores de Exposición Ambiental y Concentraciones de Plomo en Sangre en Niños de la Ciudad de México. Salud Pública 35 - 6. (Revisado el 15 de Agosto de 2004)
[En Línea] <http://www.Insp.mx/salud/35/356-95.html>

Jimeno M. L., 2003. La Enorme Importancia de la Calidad del Agua en la Salud. DSALUD. Madrid, Esp. [En Línea]
http://www.dsalud.com/numero50_3.htm

Lara F., 2003. Feasibility Study for Artificial Aquifer Recharge at the Comarca Lagunera Aquifer, Coahuila, Mexico. Presented at the 11th Biennial Symposium on the Groundwater Recharge, Phoenix, Arizona.

Martínez J. G., J. Martínez, J. Z. Castellanos y C. Sarabia, 2001. Determinación Espacial de la Vulnerabilidad de un Acuífero a ser Contaminado por Nitratos. XI Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 9. Contaminación, Tratamiento y Reuso del Agua. Guanajuato, México.

Martínez J. L., L. Molina, M. D. García, F. Sánchez, A. Pulido y A. Garrido, 2003. El Agua Subterránea: Calidad y Contaminación. Departamento de Hidrogeología y Química Analítica. Universidad de Almería. Encuentro Medioambiental Almeriense: en Busca de Soluciones.

Miliarium Aureum (a), 2004 - As. Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Contaminación por Arsénico y Efectos Sobre la Salud. (Rev. 08- Julio-2004). [En Línea] <http://www.miliarium.com/Arsenico/Toxicidad.asp>

Miliarium Aureum (b), 2004 - NO₃. Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Contaminación por Nitratos y Efectos Sobre la Salud. (Rev. 08-Julio-2004). [En Línea] <http://www.criecv.org/es/consumimos/nitratos.html>

Rodríguez C. R., 2003. Contaminación de Acuíferos. Curso de Calidad de Aguas Subterráneas y su Protección. Red de Vulnerabilidad de Acuíferos. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. (Revisado el 28 de Julio de 2004) [En Línea] <http://tierra.rediris.es/hidrored/apuntes/bolivia/cursolapaz/Ramirod1.html>

Rodvang S. J., D. M. Mikalson y M. C. Ryan, 2002. Changes in Ground water Quality in an Irrigated Area of Southern Alberta. Ground Water Quality. Published in Journal Environmental Quality. 33: 476 – 487 (2004).

Shoental, R. 1975. Chromium Carcinogenesis, Formation of Epoxyaldehydes and Tanning. Br. J. Cancer 32: 403-404.

USEPA, 2000. Plomo en el Agua Potable: Lo que Usted Puede Hacer Para Reducir el Plomo en el Agua Potable. (Rev. 15-Junio-2004). [En línea] <http://www.epa.gov/safewater/agua/plomo.html>

Willis, D. P., 1998. Toxic Exposures 29 Septiembre 1998. (Revisado el 15 de Agosto de 2004) [En Línea] http://www.texasrialawyer.com/chromium_toxicity/index.html

Zambrano A. R., 1997. Efectos de la Lluvia Ácida en los Ecosistemas Terrestres. Calidad del Medio Ambiente y la Química. Lucas Morea Sinexi S.A. México, D.F.

APÉNDICE

A

Tabla 1 A. Vértices de la poligonal del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera.

Vértice	LONGITUD OESTE			LONGITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	5	24.0	25	57	39.6	
2	104	5	42.0	26	5	6.0	
3	104	2	9.6	26	10	12.0	
4	103	54	21.6	26	15	50.4	
5	103	45	57.6	26	27	36.0	
6	103	40	55.2	26	43	19.2	Del 6 al 7 por el límite estatal
7	103	32	31.2	26	39	0.0	
8	103	31	44.4	26	44	42.0	
9	103	27	28.8	26	43	48.0	
10	103	21	39.6	26	37	1.2	
11	103	18	46.8	26	33	21.6	
12	103	16	22.8	26	15	0.0	
13	103	1	8.4	26	9	14.4	
14	102	59	2.4	26	15	0.0	
15	102	33	50.4	25	59	52.8	
16	102	32	49.2	25	59	2.4	
17	102	29	20.4	25	57	36.0	
18	102	40	8.4	25	42	21.6	
19	102	42	18.0	25	32	13.2	
20	102	43	30.0	25	25	12.0	
21	102	39	43.2	25	23	52.8	
22	102	37	22.8	25	7	37.2	
23	102	40	30.0	25	5	56.4	
24	102	45	43.2	25	10	12.0	
25	102	54	10.8	25	8	27.6	
26	103	7	51.6	25	11	49.2	
27	103	10	37.2	25	9	0.0	
28	103	19	4.8	25	10	30.0	
29	103	22	48.0	25	16	19.2	
30	103	20	13.2	25	22	15.6	Del 30 al 31 por el límite estatal
31	103	20	20.4	25	23	49.2	Del 31 al 32 por el límite estatal
32	103	29	42.0	25	32	13.2	
33	103	36	32.4	25	33	54.0	
34	103	42	36.0	25	40	26.4	
35	103	40	40.8	25	46	37.2	
36	103	47	2.4	25	45	10.8	
37	103	56	9.6	25	58	55.2	
1	104	5	24.0	25	57	39.6	

Fuente: CNA, 2002