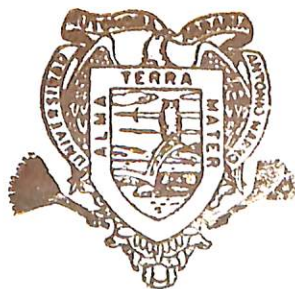


DIAGNOSTICO DEL HIDROARSENICISMO DEL  
ACUIFERO DE LA REGION LAGUNERA

JOSE ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
EN RIEGO Y DRENAJE



Universidad Autónoma Agraria  
Antonio Narro

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

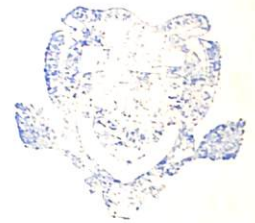
AGOSTO DE 1989

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener

el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN RIEGO Y DRENAJE

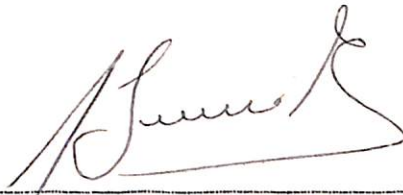
Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"  
UNIDAD SALTILO




BIBLIOTECA

COMITE PARTICULAR

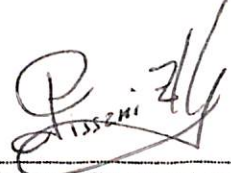
Asesor principal:

  
Ing. M.C. Alejandro Zermeño González.

Asesor:

  
Ing. M.C. Leopoldo Moreno Díaz.


Asesor:

  
Dr. Juan Francisco Pissani Zuñiga.

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"



BIBLIOTECA

  
Eluterio López Pérez  
Subdirector de Asuntos de Postgrado

Buenavista Saltillo, Coahuila  
Agosto de 1989

## A G R A D E C I M I E N T O S

Mi agradecimiento para las siguientes Instituciones y personas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría y el financiamiento para el desarrollo del presente estudio.

A la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría y por las facilidades necesarias para la realización del presente trabajo.

A la Escuela Superior de Agricultura y Zootecnia por los conocimientos adquiridos durante mis estudios de Ingeniería.

A la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Cd. Lerdo Dgo. por las facilidades proporcionadas en el análisis de la información.

Ing. M.C. Alejandro Zermeño Gonzalez por su apoyo y orientación del presente estudio, así como sus valiosos consejos durante mis estudios de Maestría; Muchas gracias Zermeño.

Ing. Victor Cantú Hernández por sus enseñanzas transmitidas en clase así como el apoyo del inicio al término de mis estudios, gracias Victor.

A la familia Jara Cantú por sus facilidades, muchas gracias.

Ing. M.C. Leopoldo Moreno Díaz por su orientación y consejos en esta Investigación.

Ing. M.C. Jesús Cortéz Bracho por sus orientaciones y sugerencias.

Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga por el apoyo y sugerencias al presente estudio.

Ing. Horacio Rubio Medina Jefe de la Residencia general de 'Administración y Control de Sistemas Hidrológicos (SARH), Cd. Lerdo Dgo.

Ing. Oscar García Nájera Jefe de la Unidad de Calidad del Agua (SARH), Cd. Lerdo Dgo.

Ing. Raul García Meraz por su apoyo y facilidades en la presente Investigación.

## DEDICATORIA

A mis padres

Sr. Primitivo Montemayor Favela.

Sra. Francisca Trejo de Montemayor.

Con admiración y respeto por haber hecho de mi un hombre útil en mi existencia.

A mis hermanos

Luis Fernando, Marisela, Rosa Amelia, Angeles, Claudia, Rocio, Susana y Sandra.

Por los lazos de amistad que nos une.

A ti Griselda

Por tus contribuciones a hacer de mí lo que soy.

A mi esposa

Claudia Elena

Como olvidar la compañera de mi vida, por su comprensión y cariño.

A mi hijo

José A. Montemayor J.

Por ser fuente de superación en mi vida profesional.

A la memoria de un gran amigo

Luis Humberto de la Rosa Godoy (Beto).

Que en paz descanse

A mis amigos

Agustin, Gustavo y Mario

Como un estímulo de superación.

COMPENDIO

Diagnóstico del Hidroarsenicismo del Acuífero de la  
Región Lagunera

POR

JOSE ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

MAESTRIA

RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Agosto 1989

Ing. M.C. Alejandro Zermeño González - Asesor -

Palabras claves: Arsénico, Acuífero, Región Lagunera.

El presente trabajo tuvo como objetivo observar el comportamiento del Arsénico en el espacio y tiempo, en el acuífero de la Región Lagunera que comprende parte de los Estados de Coahuila y Durango. Esto se hizo mediante curvas de isoconcentración de arsénico, así como también se obtuvieron modelos para estimar la concentración de arsénico en función de las coordenadas de cada pozo, nivel estático, cota del brocal y tiempo. Para tal efecto se recopiló información de 50 pozos piloto distribuidos al

azar para los años de 1977, 1981, 1983, y 1987. Los resultados indican que las partes más afectadas son los Municipios de San Pedro, Francisco I. Madero, Matamoros y Viesca por parte del Estado de Coahuila, y Tlahualilo por el Estado de Durango. En el modelo propuesto, se observó que las variables Latitud y Longitud de cada pozo se encuentran más correlacionadas con las concentraciones de arsénico, no sucediendo así con los niveles estáticos, cota del brocal y el tiempo.



ABSTRACT

Diagnostic of Hidroarsenic in the Aquifer of  
Región Lagunera

By

JOSE ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

MASTER OF SCIENCE

IRRIGATION AND DRAINAGE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
Buenavista, Saltillo, Coahuila. Agosto 1989

Ing. M.C. Alejandro Zermeño González - Adviser-

Key words: Arsenic, Aquifer, Región Lagunera.

The objective of this work was to observe the behavior of arsenic (As) in the space and time, in the aquifer of the Región Lagunera, which is located in the Coahuila and Durango States in the North of Mexico. Through arsenic isoconcentration curves, and the use of models, the variables proposed, where the arsenic concentration comprehended inside the coordinates of each well, static level, well cota and time. The information was recopilated of 50 pilot holes distributed in the following years 1977, 1981, 1983 y 1987.

The results show that the Region of San Pedro, Francisco I. Madero, Matamoros and Viesca in the Coahuila State; and Tlahualilo in the Durango State were the most damaged. In the proposed model, it was observed that Latitud and Longitude of each hole were correlationated with the arsenic concentrations; however, this is not true for static level, curb cota and time.

## INDICE DE CONTENIDO

|  | Pág. |
|--|------|
| INDICE DE CUADROS.....   | xiv  |
| INDICE DE FIGURAS.....   | xv   |
| INTRODUCCION.....  | 1    |
| REVISION DE LITERATURA.....  | 4    |
| El Elemento Arsénico.....  | 4    |
| Generalidades.....   | 4    |
| Propiedades Físicas y Químicas.....                                  | 5    |
| Geoquímica General del Arsénico.....                                 | 6    |
| Abundancia y Caracter Geoquímico Natural.                            | 6    |
| Presentación en las Rocas Igneas.....                                | 7    |
| Ciclo Geoquímico.....  | 8    |
| Toxicología del Arsénico.....  | 9    |
| Calidad del Agua Subterránea y Normas para su<br>Potabilización..... | 13   |
| Orígenes de la Contaminación de Acuíferos.....                       | 19   |
| Comportamiento Hidráulico del Acuífero de la<br>Región Lagunera..... | 23   |
| Desarrollo Histórico.....  | 23   |
| Usos Principales del Agua Subterránea en la<br>Región Lagunera.....  | 25   |
| Uso Agrícola.....  | 25   |
| Uso Pecuario.....  | 26   |
| Uso Público - Urbano.....  | 26   |

|  | Pág. |
|--|------|
| Uso Industrial.....  | 26   |
| Estudios Desarrollados Relacionados con la Con-<br>taminación de Arsénico en el Acuífero de la<br>Región Lagunera..... | 27   |
| MATERIALES Y METODOS.....  | 30   |
| Características Generales del Area de Estudio..  | 30   |
| Localización.....  | 30   |
| Clima.....   | 30   |
| Suelos.....  | 31   |
| Hidrografía.....   | 32   |
| Aguas Subterráneas.....  | 32   |
| Topografía.....  | 33   |
| Uso del Suelo.....   | 33   |
| Areas de Estudio.....  | 35   |
| Area San Pedro - Francisco I. Madero.....  | 35   |
| Area Tlahualilo - Gómez Palacio.....   | 37   |
| Area Matamoros - Viesca.....   | 37   |
| Recopilación y Análisis de la Información.....   | 38   |
| Selección de Pozos de Bombeo.....  | 38   |
| Coordenadas Geográficas.....   | 40   |
| Concentraciones de Arsénico.....   | 40   |
| Niveles Estáticos y Cota del Brocal.....   | 40   |
| Trazo de Curvas de Isoconcentración y Modelos<br>para estimar la Concentración de Arsénico.....                        | 41   |
| Curvas de Isoconcentración de Arsénico...  | 41   |

|  |    |
|--|----|
| Modelos para Estimar la Concentración<br>de Arsénico.....                | 41 |
| RESULTADOS Y DISCUSION.....  | 43 |
| Determinación de las Áreas con Mayor Conta-<br>minación de Arsénico..... | 46 |
| Tendencias del Arsénico en el Acuífero.....                              | 49 |
| Modelos Obtenidos.....   | 50 |
| Area San Pedro - Francisco I. Madero.....                                | 50 |
| Area Tlahuililo - Gomez Palacio.....                                     | 55 |
| Area Matamoros - Viesca.....   | 61 |
| CONCLUSIONES.....  | 65 |
| RESUMEN.....   | 67 |
| LITERATURA CITADA.....   | 69 |
| APENDICE.....  | 72 |

## INDICE DE CUADROS

| Cuadro |  | Pág. |
|--------|--|------|
| 2.1    | Abundancia del arsénico, antimonio y bismuto en los meteoritos y en las rocas ígneas.....      | 7    |
| 2.2    | Sustancias químicas que afectan la potabilidad del agua.....                                   | 18   |
| 2.3    | Sustancias tóxicas que afectan la potabilidad del agua.....                                    | 18   |
| 2.4    | Indicadores químicos de polución.....  | 19   |
| 3.1    | Población y extensiones territoriales para los municipios que comprenden el área de estudio... | 31   |
| 1A     | Relación de pozos estudiados para el municipio de San Pedro.....                               | 73   |
| 2A     | Relación de pozos estudiados para el municipio de Francisco I. Madero.....                     | 74   |
| 3A     | Relación de pozos estudiados para el municipio de Tlahualilo.....                              | 74   |
| 4A     | Relación de pozos estudiados para el municipio de Gómez Palacio.....                           | 75   |
| 5A     | Relación de pozos estudiados para el municipio de Torreon.....                                 | 76   |
| 6A     | Relación de pozos estudiados para el municipio de Matamoros.....                               | 77   |
| 7A     | Relación de pozos estudiados para el municipio de Viesca.....                                  | 78   |
| 8A     | Relación de pozos estudiados para el municipio de Lerdo.....                                   | 79   |

## INDICE DE FIGURAS

| Figura |  | Pág. |
|--------|--|------|
| 3.1    | Evolución de los niveles estáticos en el acuífero de la Región Lagunera.....   | 34   |
| 3.2    | Localización de áreas estudiadas.....  | 36   |
| 3.3    | Localización de municipios estudiados y pozos de bombeo.....   | 39   |
| 4.1    | Curvas de isoconcentración de arsénico para el año de 1977.....  | 44   |
| 4.2    | Curvas de isoconcentración de arsénico para el año de 1981.....  | 45   |
| 4.3    | Curvas de isoconcentración de arsénico para el año de 1983.....  | 47   |
| 4.4    | Curvas de isoconcentración de arsénico para el año de 1987.....  | 48   |
| 4.5    | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 852, municipio de Francisco I. Madero Coah.....  | 51   |
| 4.6    | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 852, municipio de Francisco I. Madero Coah.....                | 51   |
| 4.7    | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 860, municipio de Francisco I. Madero, Coah..... | 52   |
| 4.8    | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 860, municipio de Francisco I. Madero Coah.....                | 52   |
| 4.9    | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 900, San Pedro Coah.....                         | 53   |
| 4.10   | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 900, San Pedro, Coah.....                                      | 53   |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.11 | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 1000, Francisco I. Madero, Coah..... | 54 |
| 4.12 | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 1000, Francisco I. Madero Coah....                 | 54 |
| 4.13 | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 158, Gómez Palacio Durango.....      | 56 |
| 4.14 | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 158, Gómez Palacio, Durango.....                   | 56 |
| 4.15 | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estaticos pozo 172, Gómez Palacio Durango.....      | 57 |
| 4.16 | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 172, Gómez Palacio, Durango.....                   | 57 |
| 4.17 | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 336, Torreón, Coah.                  | 58 |
| 4.18 | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 336, Torreón, Coah.....                            | 58 |
| 4.19 | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 1339, Tlahualilo Durango.....        | 59 |
| 4.20 | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 1339, Tlahualilo Durango.....                      | 59 |
| 4.21 | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 2745, Tlahualilo, Durango.....       | 60 |
| 4.22 | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 2745, Tlahualilo, Durango.....                     | 60 |
| 4.23 | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estático pozo 1956, Matamoros Coah.....             | 62 |
| 4.24 | Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 1956, Matamoros Coah.....                          | 62 |
| 4.25 | Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 2722, Viesca Coah..                  | 63 |



4.26 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 2722, Viesca Coah..... 63

## INTRODUCCION

En los últimos años, la Región Lagunera que comprende parte del Estado de Coahuila y Durango, México., se ha visto en la problemática de la contaminación de arsénico en el acuífero principal de la región, que es sin duda una de las principales fuentes de aportación del recurso hidráulico y que sustenta principalmente al sector agrícola, actividad que absorbe aproximadamente el 90 por ciento del volumen total anual extraído, representando el principal desarrollo económico de la región. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH 1984).

Mendoza y Gámez (1974) reportan que en 1962 se presentaron 40 personas con enfermedad y una defunción por intoxicación arsenical, y que además en varios pozos de la región se ha venido detectando la presencia de arsénico en cantidades que superan al máximo permisible que es de 0.05 partes por millón según la Organización Mundial de la Salud (OMS). Bracho (1971) realizó un estudio epidemiológico en el área Norte de la Región Lagunera en el que comprobó que en 268 casos se presentaron lesiones dérmicas cancerígenas.

Según las estadísticas de la (SARH), para los años de 1977 y 1983 la concentración promedio para los municipios de Tlahualilo, Viesca, San Pedro y Fco.I.Madero fue de 0.1925 y 0.214 partes por millón (ppm) respectivamente, lo que representa una concentración cuatro

veces mayor a la máxima permisible.

El Informe de Actividades del Sector Salud (1986) reporta estudios realizados por el Departamento de Bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Coahuila (UAC), en los años 1981, 1982, 1985 y 1986; encontraron que cada vez era mayor el número de comunidades donde el agua para consumo humano se encontraba contaminada, mencionan que en 1962 solamente 17 poblados estaban afectados y para 1986 el número aumentó a 63, lo que representa un problema de magnitud considerable.

Ademas dicho Informe indica que en este mismo año la SARH, en reuniones con otros organismos, analizó las posibles alternativas de solución a este problema, de las cuales optó por repartir el agua en "bloques", mediante la perforación de pozos cercanos al río Nazas y de esta manera dotar de agua de buena calidad a los municipios afectados, más sin embargo, el peligro por contaminación sigue latente .

En relación con lo anteriormente establecido los objetivos de esta investigación son:

1. Determinar las áreas con mayor contaminación de arsénico en el acuífero principal de la Región Lagunera.
2. Establecer las posibles direcciones de contaminación de arsénico, así como su evolución en el tiempo y espacio.

3. Obtener algunos modelos del comportamiento de arsénico en función de las coordenadas geográficas de cada pozo, nivel de bombeo, tiempo y cota del brocal.

### HIPOTESIS

1. Existen áreas con mayor contaminación de arsénico, así como direcciones de flujo de arsénico en el acuífero de la Región Lagunera.
2. Existe una relación entre las concentraciones de arsénico, con las coordenadas del pozo, el nivel de bombeo, cota del brocal y el tiempo.

## REVISION DE LITERATURA

### El Elemento Arsénico

#### Generalidades.

Según Kirk y Othmer (1961) el arsénico (As), número atómico 33, peso atómico 74.91; está colocado en el grupo V de la tabla periódica, y en el subgrupo que contiene el nitrógeno, el fósforo, el antimonio y el bismuto. A pesar del peso atómico fraccionario asignado al arsénico, sólo se conoce una forma isotópica estable; muestra números de valencia de -3, +3, y +5. Aunque suele clasificarse como elemento no metálico o metaloide, el arsénico forma normalmente cristales metálicos de color gris de acero y se llama "arsénico metálico". El trióxido,  $As_2O_3$  o  $As_2O_5$ , se designa comercialmente con el nombre de "arsénico blanco" o simplemente "arsénico", presenta varias formas alotrópicas, además de la forma natural; una forma cristalina amarilla (cúbica) de densidad 2.06; una forma amorfa de color rojo o pardo oscuro de densidad 3.67 a 4.13, y una forma criptocristalina de color gris a negro de densidad 4.64, ninguna de estas formas conduce la electricidad, pero la forma normal es conductora. El elemento arsénico en sí mismo no es venenoso, pero los compuestos son notables por su actividad como venenos, y muchos de sus usos comerciales se basan en esta propiedad.

Propiedades Físicas y Químicas del Arsénico

---

Alcántara (1973) menciona que el arsénico sólo puede fundirse bajo presión, p.f., 814 °C ; calor específico 0.078 a 18 °C ó 0.822, en el intervalo 0-100 °C; dureza mineralógica (escala de Mohos), 3.5; dureza Brinell 147 y a la presión normal el metal se sublima sin fundirse; la vaporización es manifiesta a 100 °C., es rápida a 450 °C., y la presión de vapor llega a 700 mm a la temperatura de 604.3 °C.

El calor latente de sublimación es de 60 cal/gramo, la forma normal de los cristales de arsénico es de tipo romboédrico del sistema hexagonal con dos átomos en una célula unitaria, tiene mediana actividad química, no se altera en el aire seco, pero se oxida lentamente en el aire húmedo. Arde con llama blanca azulada, despidiendo humos densos de trióxido de arsénico que tiene olor característico a ajo, el metal es inoxidable en el ácido sulfúrico diluido, pero se disuelve en el ácido concentrado y caliente.

El ácido clorhídrico ataca débilmente al arsénico, el cloro se combina directamente con él en caliente y forma el tricloruro. Calentándolo con azufre, forma varios sulfuros según las proporciones empleadas. Posee muchas de las propiedades consideradas como características de los metales y propiedades de metaloide, es fuertemente anfótero y forma arsenitos, y otros derivados ácidos más complejos. Se caracteriza en el método usual de análisis cualitativo

por precipitación con los metales del grupo II, en forma de sulfuro amarillo,  $As_2S_3$ , en solución ácida. La valoración suele hacerse por oxidación iodométrica del estado trivalente al pentavalente.

Pueden describirse cantidades muy pequeñas de arsénico, de 0.001 a 0.5 mg, por medio de las pruebas de Marsh o de Gutzeit, que se basan en la producción de arsenamina por reducción con zinc en solución ácida o alcalina.

### Geoquímica General del Arsénico

#### Abundancia y carácter geoquímico natural.

---

Rankama y Sahama (1962) menciona que el arsénico (As), antimonio (Sb) y bismuto (Bi) son unos componentes muy raros de la litósfera superior, siendo el arsénico el más abundante de ellos, y el bismuto el más escaso como se muestra en el (Cuadro 2.6.) donde se indican los contenidos medios de estos elementos en las materias terrestres y meteóricas, dichos autores se basan en las determinaciones de Noddack y Walter (1930 y 1934) de As, Sb, y Bi en los meteoritos y Goldschmidt y Peters (1934) As en las rocas ígneas. El rango más saliente, por lo que respecta a su geoquímica general es su carácter calcófilo, sin embargo, el As está concentrado también en el hierro meteorítico. Este hecho, junto con la presencia de 2300 g/ton de As en la joséfinita y 500 g/ton de As en otros hierros telúricos, constituye una prueba del carácter siderófilo del arsénico.

**Cuadro 2.1. Abundancia del Arsénico, Antimonio y Bismuto en los Meteoritos y en las Rocas Igneas. (Rankama y Sahama, 1962).**

| Materia                           | As<br>g/ton | Sb<br>g/ton | Bi<br>g/ton |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Ferroníquel de los meteoritos     | 360         | 2.0         | 0.5         |
| Fase troilítica de los meteoritos | 1020        | 7.8         | 2.0         |
| Fase silicatada de los meteoritos | 20          | 0.1         | 0.02        |
| Rocas igneas                      | 5           | 1.0         | 0.2         |

**Formas de Presentación en las Rocas Igneas.**

Según Rankama y Sahama (1962) el arsénico, Antimonio, y Bismuto son oxífilos. No se dispone de determinaciones fidedignas relativas al contenido en arsénico de los diversos grupos de rocas igneas, los tres se combinan fácilmente con el Azufre, Selenio y Teluro, formando sulfosales, arseniuros y antimoniuros con varios metales pesados, de preferencia con el cobre, hierro, níquel y cobalto. Los tres se encuentran en estado nativo en muchos filones, además el arsénico forma varios arseniatos que contienen el anión  $\text{AsO}_4$  en posición estructural análoga a la del grupo  $\text{PO}_4$  de los fosfatos. Además, se conocen en la naturaleza varios arsenitos, diversos óxidos de antimonio, (algunos de los cuales se incluyen en el grupo del pirocloro), así como vandatos, arseniatos, teluratos y molibdatos de bismuto. Mencionan que las primeras menas de hierro magmático son pobres en arsénico. Siendo el contenido medio en los sulfuros magmáticos de unos 2000 gramos y que es probable que en la



pirita existan cantidades notables de arsenico, pero es indudable que, en los fosfatos y en los silicatos de las rocas igneas hay una cantidad mucho mayor.

#### Ciclo Geoquímico.

Rankama y Sahama (1962) indican que el contenido medio en arsénico de los sedimentos arcillosos es del mismo orden de magnitud que el de las rocas igneas. Los análisis realizados dan un promedio de 4 g/ton de As en los sedimentos del fondo del atlántico, los mismos autores han encontrado de 65-650 g/ton de As en las menas mesozoicas y paleozóicas de minerales oxidados de hierro de origen sedimentario, lo que supone una concentración 100 veces mayor que el contenido medio en los sedimentos arcillosos. Las menas sedimentarias de siderita son mucho más pobres en arsénico, pero las bauxitas ricas en hierro y los sedimentos marinos glauconíticos suelen ser ricos en este elemento, el cual acompaña también al hierro en los oxidatos de agua dulce; por ejemplo, en los vaciamientos de los lagos y de los pantanos.

Suponen que el arsénico se encuentra en el agua del mar principalmente en forma de arsenito, y que su contenido fluctúa debido a que este elemento puede sustituir al fosforo en muchos organismos marinos. Por tanto, el arsenico se encuentra en los yacimientos marinos de fosfatos; como es el hecho de encontrar de 0.007 a 0.03 g /ton de As en una fosforita y que las rocas sedimentarias

de origen marino contienen por término medio mas arsénico que las rocas ígneas, debido a que la actividad volcánica ha introducido gran cantidad de éste elemento directamente en el ciclo exógeno.

#### Toxicología del arsénico

Rankama y Sahama (1962) mencionan que el arsénico en pequeñas cantidades es un contaminante universal de las plantas y de los animales, y puede encontrarse algunas veces en forma notable en los organismos; por ejemplo, en las plantas terrestres que crecen en suelos ricos en arsénico y en los organismos marinos y de agua dulce, como los peces, moluscos, crustáceos, el placton y algunas algas pardas. Con frecuencia éste esta muy concentrado en las cenizas de carbón, por tanto el polvo y las partículas de humo de las ciudades y centros industriales de sus alrededores son arseníferos. El arsénico que pasa a la atmósfera en la combustión del carbón termina por precipitarse con el agua de lluvia, encontrándose por término medio, en el agua de lluvia normal 0.0025 g/ton de As.

La American Society of Agricultural Engineers (ASAE) (1979) indica que datos experimentales de ensayos con arsenatos y arsenitos mostraron toxicidad ó acumulación en el tejido, cuando los animales son expuestos a concentraciones en exceso de 0.5 mg /lt; indican que el Council for Agricultural Science and Technology (CAST)

y la Environmental Protection Agency (EPA), consideran este nivel mas razonablemente siendo de 0.2 mg/l.

Ullman y Fritz (1931) indica que la eliminación del arsénico suele efectuarse principalmente por la orina; empieza algunas horas de 7 a 12 despues de la toma, y dura por lo regular de 4 a 5 dias. El tiempo que tarda en eliminarse por la orina después de la última toma es muy distinto, como se ha comprobado por muchos experimentos. Algunos autores afirman que han encontrado arsénico en la orina a los 80 y 90 dias después de las intoxicaciones por el arsénico, y que en cuanto a la retención del As por los distintos organismos, se afirma que se han encontrado siempre en grandes cantidades en el higado, en el estomago y los intestinos con sus respectivos contenidos, pues es claro que en caso de intoxicación se encontrará en ellos la mayor parte del arsénico. Se ha encontrado igualmente en los riñones y músculos; en el cerebro sólo se encontrarán en algunas ocaciones. Por el contrario, se ha hallado en repetidas veces en los huesos, y de aquí ha surgido la teoría de que el ácido fosfórico de los mismos pudiera substituirse por el ácido arsénico.

Kirk y Othmer (1961) mencionan que el carácter altamente tóxico de los compuestos arsenicales, exige precauciones especiales para preservar la salud de las personas que trabajan en fabricas que producen o tratan dichos compuestos. La extremada dispersión de indicios de

arsenico en tantos materiales de uso comun exige precauciones especiales, a veces en direcciones inesperadas. Por ejemplo, hace algunos años se produjo en Inglaterra una epidemia de envenenamiento con arsénico por la cerveza fabricada con adición de glucosa, que se habia fabricado empleando ácido sulfúrico que contenia indicios de arsenico. Los mismos autores indican que el riesgo más grande se debe al uso muy general de insecticidas arsenicales, con el peligro consiguiente de comer frutas que no han sido lavadas e incluso despues de lavadas, pueden contener suficiente arsénico para ser peligrosas si se comen sin pelar. Los limites de tolerancia fijados por el Servicio de Sanidad Pública de los Estados Unidos para las manzanas y peras fueron elevadas en 1940 hasta 3.56 mg/kg , cifras que algunos consideran demasiado elevadas.

Kirk y Othmer (1961) mencionan que las manifestaciones por intoxicación se presentan en la piel (dermatitis, ulceración, bronceamiento), así como perforación del tabique nasal, perturbaciones gastrointestinales, o a veces daños en los riñones y en el hígado.

Ullmann y Fritz (1931) indica que todos los compuestos de arsénico son tóxicos para animales y vegetales, y que pueden influir en algunas reacciones de química inorgánica "venenos de contacto". Siendo estas propiedades las que han hecho que se apliquen más cuidadosamente los métodos analíticos de reconocimiento y

determinación cuantitativa de arsénico. Describen que como sucede con otros tóxicos, los compuestos de As en pequeñas dosis se emplean como medicamentos, pudiéndose hacer que hombres y animales resistan en muy notable grado a la acción del arsénico, hasta al punto de ingerir dosis mortales sin daño.

Caballero (1986) menciona que una planta puede ser dañada por arsénico si se desarrolla en un medio donde éste elemento se encuentra en cantidades considerables. Se ha demostrado que la absorción de arsénico por la planta cuando el elemento se encuentra en forma natural en el suelo, es muy pequeña y a la vez inevitable en las condiciones existentes en la Región Lagunera; pero el contenido del contaminante en los diversos cultivos puede incrementarse por el arsénico añadido a las plantas y al suelo en forma artificial. El mismo autor indica que las concentraciones de arsénico encontradas en las plantas son de importancia con respecto a la salud de los humanos y animales que pudieran ingerir éstos vegetales como alimento y que para obtener una evaluación completa respecto a este punto deben considerarse algunos factores tales como:

1. La concentración de arsénico en cada una de las partes de la planta.
2. El estado químico del elemento contaminante.
3. La magnitud de las cantidades de As. que pueden considerarse para la especie que lo consume.

Calidad del Agua Subterránea y Normas para su  
Potabilización

Custodio y Llamas (1976) indican que la calidad de las aguas subterráneas depende mucho de las condiciones del acuífero, de su litología, de la velocidad de circulación, de la calidad del agua de infiltración, de las relaciones con otras aguas o acuíferos y de las leyes del movimiento de las sustancias transportadas por el agua. Además, las aguas subterráneas tienen la oportunidad de absorber materiales por las lentas velocidades de circulación, mayor presión y temperatura a las que están sometidas y facilidad de disolver  $\text{CO}_2$  del suelo no saturado. Por ello, sus concentraciones salinas son superiores a las de aguas superficiales en general. Los mismos autores describen lo siguiente: " El agua se considera polucionada cuando la composición o el estado físico, son directa o indirectamente modificados por la actividad del hombre, en una medida tal que su utilización se ve restringida para todos o para algunos de aquellos para los que podría servir en su estado natural ".

Benitez (1973) menciona que la mayor parte de las sales solubles encontradas en aguas subterráneas provienen de la solución de los materiales existentes en las rocas, y que el hecho de estar las aguas subterráneas en contacto con los terrenos que la contienen, desde los tiempos de formación geológica del terreno, hacen que los contenidos de sales de estas aguas sean muy elevados, pudiendo

absorber además, gases de origen geológico que contribuyen a la disolución de los productos minerales de las rocas que la rodean.

El mismo autor menciona que el agua subterránea al atravesar rocas igneas suele disolver sólo pequeñas cantidades de sustancias minerales, debido a la escasa solubilidad de estas rocas. Lo contrario con rocas sedimentarias que son generalmente mas abundantes, donde se constituyen la mayor proporción de sales.

Fair et al (1971) mencionan que una amplia variedad de venenos tóxicos pueden llegar a los suministros públicos de agua para consumo humano, y como ejemplo escribe los siguientes:

1. Sustancias tóxicas disueltas de formaciones de minerales, como los fluoropatitos.
2. Fitotoxinas elaboradas por algas específicas.
3. Metales pesados provenientes de las plantas de tratamiento.
4. Desechos industriales, que pueden contener productos químicos (venenos), evacuados en las corrientes de agua.
5. Sustancias radiactivas presentes en el agua de lluvia o procedentes de la industria de energía nuclear.
6. Insecticidas que llegan a las corrientes de agua, de los polvos y aspersiones químicas que se aplican a cosechas, el flúor, selenio,

arsénico y boro son ejemplos de contaminantes minerales.

Davis y Wiest (1971) indica que las concentraciones naturales de arsénico, cobre, plomo, níquel y uranio han sido estudiados por algunos investigadores que han utilizado los análisis de agua en la metodología de la prospección de yacimientos minerales. Establece que en general, las aguas que tienen un bajo valor de pH o que se encuentran a elevada temperatura suelen contener las mayores concentraciones de éstos metales.

Algunas aguas de las galerías de las minas y muchas de las aguas residuales de las industrias, contienen cantidades nocivas de arsénico y plomo, que al mezclarse con las aguas subterráneas potables pueden convertirlas en aguas no recomendables ni para consumo doméstico ni para ganado.

Cabo et al (1972) indica que las aguas subterráneas de calidad aceptable pueden ser contaminadas al alterarse su velocidad de filtración, como ocurre en el avenamiento de aguas superficiales contaminadas a capas más profundas como consecuencia de la depresión causada por el bombeo, o los fenómenos de succión que tiene lugar por el desplazamiento de las aguas subterráneas, o por la extracción forzada realizada en el acuífero. Además, establece que existen ciertas zonas caracterizadas por materiales que al presentar permeabilidad exclusivamente



por fisuración (rocas carbonatadas, granitos, etc.) presentan zonas de vulnerabilidad, constituyendo un medio favorable para la contaminación de aguas subterráneas.

Linsley et al. (1977) menciona que casi toda el agua subterránea es agua meteórica proveniente de la precipitación, y que en algunos sitios se encuentra agua de formación presente en la roca durante su formación o deposición, y generalmente de alto contenido salino. Describe también que en menores cantidades existe la llamada agua juvenil, formada químicamente dentro del subsuelo, y traída a la superficie por rocas intrusivas. Tanto el agua de formación como el agua juvenil con frecuencia son la fuente de minerales indeseables en el agua subterránea. Por ejemplo, el agua subterránea en el valle de San Joaquín en California contiene Boro traído de la superficie desde grandes profundidades.

Verry (1968) menciona que la solubilidad de arsénico en el agua es tan baja que su presencia suele ser indicador de que hay operaciones de minas de tipo metalúrgico en el lecho de los ríos, o bien de que hay áreas agrícolas en donde se están utilizando materiales con arsénico como venenos industriales. El mismo autor describe que si el arsénico está en forma coloidal debe eliminarse mediante los procesos convencionales de tratamiento de aguas, si está en forma orgánica con una coagulación subsecuente o mediante un proceso de adsorción.

## Normas de Potabilidad del Agua.

Custodio y Llamas (1976) indican que la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su estudio: "International Standards for Drinking Water"; adoptó el criterio de dividir en cuatro grupos las características a tener en cuenta y que afectan a la potabilidad del agua las cuales son:

1. Químicas y físicas
  - a) Sustancias químicas que afectan a la potabilidad del agua.
  - b) Sustancias químicas que pueden afectar la salud.
  - c) Sustancias tóxicas.
  - d) Indicadores químicos de polución.
2. Bacteriológicos.
3. Biológicos.
4. Radiactivos.

En el (Cuadro 2.2., 2.3., y 2.4.,) se muestran las características que de sobrepasarse, supondrían la impotabilidad del agua. Los mismos autores mencionan que los distintos países adoptan y legislan los límites de acuerdo a sus peculiaridades, la mayoría de ellos suelen guiarse por los de la OMS.

**Cuadro 2.2. Sustancias químicas que afectan la potabilidad del agua. (Custodio y Llamas, 1976).**

| Sustancia  | Concentración máxima aceptable (mg/l) | Concentración máxima permitida (mg/l) |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Sólidos totales  | 500.0                                 | 1500.0                                |
| Color (ppm de la escala platino-cobalto)               | 5.0                                   | 50.0                                  |
| Turbidez en SiOP                                       | 5.0                                   | 25.0                                  |
| Gusto  | no detectable                         | -----                                 |
| Olor   | no detectable                         | -----                                 |
| Hierro (Fe)  | 0.3                                   | 1.0                                   |
| Manganeso (Mg)   | 0.1                                   | 0.5                                   |
| Cobre (Cu)   | 1.0                                   | 1.5                                   |
| Zinc (Zn)  | 5.0                                   | 15.0                                  |
| Calcio (Ca)  | 75.0                                  | 200.0                                 |
| Magnesio (Mg)  | 50.0                                  | 150.0                                 |
| Sulfatos (SO <sub>4</sub> )                            | 200.0                                 | 400.0                                 |
| Cloruros (Cl)  | 200.0                                 | 600.0                                 |
| pH (unidades de pH)                                    | 7.0-8.5                               | 6.5-9.2                               |
| Sulfato magnesico-sódico                               | 500.0                                 | 1000.0                                |
| Sustancias fenólicas (como fenol)                      | 0.001                                 | 0.002                                 |
| Contaminantes orgánicos (carbono extracto cloroformo)  | 0.02                                  | 0.5                                   |
| Tensoactivos (detergentes) ABC (alkilbencil-sulfonato) | 0.5                                   | 1.0                                   |

**Cuadro 2.3. Sustancias tóxicas que afectan la potabilidad del agua. (Custodio y Llamas, 1976).**

| Sustancia           | Concentración máxima permitida (mg/l) |
|---------------------|---------------------------------------|
| Plomo               | 0.05                                  |
| Arsénico            | 0.05                                  |
| Selenio             | 0.01                                  |
| Cromo (hexavalente) | 0.05                                  |
| Cianuro             | 0.20                                  |
| Cadmio              | 0.01                                  |
| Bario               | 1.0                                   |
| Plata               | 0.05                                  |

**Cuadro 2.4. Indicadores químicos de polución. ( Custodio y Llamas, 1976 ).**

| Indicador                                   | Limite mínimo para considerar que hay contaminación (mg/lt) |
|---|---|
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)            | 10  |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)         | 6   |
| Nitrógeno total (excluido NO <sub>3</sub> ) | 1   |
| Amoniaco NH <sub>3</sub>                    | 0.5   |
| Carbono (extracto de cloroformo)            | 0.5   |
| Grasas                                      | 1   |

#### Origenes de la Contaminación de Acuíferos

Custodio y Llamas (1976) indican que los posibles orígenes de la contaminación de los acuíferos son muy variados y difícil de recogerlos en forma sintética; según ellos, basándose en Schoeller (1969) efectúan la siguiente clasificación:

#### Contaminación por actividades domésticas.

Es una contaminación esencialmente orgánica y biológica, nacida en fosas sépticas, pozos negros, fugas de sistemas de alcantarillado, vertido indiscriminado de aguas de letrinas, así como la utilización de productos químicos de uso doméstico; tales como los detergentes en sus diversas versiones.

#### Contaminación por labores agrícolas.

El aspecto más importante es el de los abonos, que pueden ser a base de estiércol y entonces la contaminación

producida es principalmente debida al aporte de nitratos.

La técnica del riego con aguas residuales aumenta la producción de CO<sub>2</sub> y la actividad biológica del terreno, con resultados similares.

#### Contaminación por ganadería.

---

Es una contaminación esencialmente orgánica y biológica, con matices muy similares a la contaminación por actividades domésticas, pero con frecuencia más concentrada e intensa en especial en granjas intensivas.

#### Contaminación por aguas superficiales.

---

Se produce cuando éstas recargan al acuífero, y entonces, la contaminación de las aguas subterráneas está muy ligada a la de las superficiales. Mencionan, que generalmente la parte en suspensión del agua superficial no contribuye a la contaminación, pero que puede provocar un frenado de la infiltración del agua al acuífero por sedimentación del área de recarga.

#### Contaminación por aguas salinas.

---

La forma más importante en las regiones costeras es la intrusión marina; tanto en regiones costeras, como en regiones interiores existe además, la posible contaminación por aguas salobres o salados naturales, o a través del medio poroso ó favorecido por perforaciones mal construidas o abandonadas.

### Contaminación por actividades mineras.

Es una contaminación esencialmente mineral y frecuentemente se puede relacionar con evacuaciones de agua de mina y con lavaderos de mineral, siendo también de importancia el lavado por agua de lluvia o por agua de superficie a escombreras que contienen materiales oxidables, tales como sulfuros y materias carbonosas.

### Contaminación por actividades industriales.

Este tipo de contaminaciones son especialmente insalubres y nocivas; los metales pesados procedentes de la industria metalúrgica, química y petroquímica pueden introducir en el terreno sustancias orgánicas en grandes cantidades de materia orgánica, al igual que las de bebidas, las cuales pueden además aportar detergentes.

### Contaminación por actividades nucleares.

Las actividades nucleares pueden aportar además de productos orgánicos e inorgánicos, comunes con otras industrias químicas o de transformación, radioisótopos, en especial en las plantas de tratamientos de combustibles nucleares irradiados y de minerales radioactivos.

### Contaminación por pozos mal contruidos o abandonados.

Es un tipo de contaminación a la que muchas veces se le presta poca importancia, pero que puede tener graves consecuencias; los pozos que ponen en comunicación varios

acuíferos, los pozos con entubaciones rotas o corroidas en niveles con aguas de mala calidad, o aquellos que permiten la fácil entrada de aguas superficiales son especialmente peligrosos.

#### Contaminación por pozos de inyección.

---

La introducción en el terreno de aguas residuales mediante pozos de inyección (Recarga artificial), es una práctica cada día más difundida; en general, es una forma de utilizar el subsuelo como almacén de residuales; esta técnica puede originar una contaminación no solo inorgánica, orgánica o biológica, sino también una contaminación térmica a la que por desgracia muchas veces se le concede poca importancia.

#### Contaminación por vertido de basuras.

---

Es una contaminación muy ligada a las actividades humanas. Su máximo desarrollo se tiene cuando las basuras se entierran de forma inadecuada, en excavaciones de material permeable mal protegido o peor aún si entran en contacto con el nivel freático.

#### Contaminaciones químicas provocadas por el ciclo del agua.

---

Con frecuencia se procede a eliminar la nieve o a proteger contra la misma las vías de comunicación añadiendo sal granulada, la cual puede crear un problema de contaminación salina, a veces notable.

Comportamiento Hidráulico del Acuífero de la Región  
Lagunera

Desarrollo Histórico.

De acuerdo con la SARH (1984) el acuífero de la Comarca Lagunera se comenzó a explotar alrededor de 1920, existiendo para este año únicamente doce pozos; con una profundidad que no llegaba a los cincuenta metros, contando con un nivel estático de siete punto cinco metros. Tomando en cuenta el número de pozos existentes en aquella época, se tenía como promedio de extracción dos punto cinco millones de metros cúbicos anuales por pozo, lo que daba un total estimado de treinta millones de metros cúbicos de extracción por año. Sin embargo, debido a la poca disponibilidad del agua superficial y a la variabilidad que presentaban las avenidas de los ríos Nazas y Aguanaval, motivó a los agricultores a hacer perforaciones sin tener una planeación de la capacidad máxima de extracción, llegando a contarse en el año de 1935 con 727 perforaciones, que extraían un volumen total de 445 millones de metros cúbicos al año; propiciando ésto, un descenso en el nivel estático de 7.5 a 12 metros. La perforación de pozos continuó sin control alguno, llegando en el año de 1947, a la cantidad de 1800 pozos, que extraían un volumen total de 1100 millones de m<sup>3</sup>/año. Esto propició a que en éste año, la federación se viera en la necesidad de intervenir, llegando a la decisión de vedar a la Comarca Lagunera. Sin embargo, ésta veda no cubrió la



totalidad del área aprovechando ésto para seguir perforando en las zonas no vedadas. Por lo que hubo necesidad de decretar nuevas zonas de vedas, en los años 1951, 1958 y 1965, con los cuales se cubrió la totalidad del área; pero existiendo ya en el año de 1965; 3008 aprovechamientos los cuales integraban un volumen de extracción aproximado de 1300 millones de m<sup>3</sup> por año; extracción muy superior a la recarga, originando que los niveles siguieran descendiendo, incrementando a su vez tanto los costos de perforación como los costos de extracción. Para el año de 1977 había 3198 pozos de los cuales 2888 se encontraban operando, teniendo una profundidad promedio de perforación de 264.9 metros y un nivel estático de 63.54 metros; lo cual permite apreciar una gran diferencia con respecto a las primeras perforaciones de 1920, lo que da una cifra de 56.04 metros de descenso en el nivel estático y 215 metros de profundidad, teniendo como resultado un descenso en el nivel estático de 1.12 metros por año .

Dena (1984) menciona que el acuífero en cuestión ha sido explotado irracionalmente, sin tomar en cuenta la verdadera capacidad de recuperación del mismo, apreciándose ésto físicamente en el abatimiento de los niveles del acuífero, que afectan principalmente la economía de los usuarios, quienes tienen que bombear a mayores profundidades y efectuar reposiciones en sus pozos con mayor frecuencia, afectando la calidad del agua la cual

puede llegar a quedar inhabilitada para emplearse en usos domésticos o pecuarios, e incluso para uso agrícola. Indica que a pesar de las vedas que se implementaron en los años de 1949, 1952, 1958, y 1965 para preservar a los acuíferos de los efectos perjudiciales de la sobreexplotación, los resultados de los balances de agua subterránea demuestran que la recarga del acuífero ha venido decaiendo notablemente a lo largo del tiempo, de tal forma que durante los últimos cinco años, la recarga anual que recibieron los acuíferos fue de 350 a 450 millones de m<sup>3</sup> por año. Dicha recarga, representa apenas alrededor del veinticinco por ciento del volumen del agua bombeada por los pozos; el setenta y cinco por ciento restante, representativo de la sobreexplotación con el consiguiente descenso de los niveles de agua .

#### Usos Principales del Agua Subterránea en la Región

##### Lagunera

De acuerdo con la SARH (1984) los usos principales a que se destina el recurso hídrico se resume de la forma siguiente:

##### Uso agrícola.

Es la actividad que consume el mayor volumen de agua subterránea, la cual corresponde al 90.07 por ciento del volumen total extraído; a través de 2213 aprovechamientos subterráneos, de 70,213 ha, con un volumen de 980.97 millones de m<sup>3</sup> anuales. Siendo los cultivos

principales la alfalfa, con una superficie de 21,674 ha; la vid con una superficie de 7,910 ha; algodón con 7,164 ha y maíz con 4,704 ha.

#### Uso pecuario.

---

Los volúmenes de agua destinados para este uso son relativamente pequeños, aún cuando están relacionados entre sí, por la producción de forrajes, pero se considera en forma independiente por las necesidades del ganado, tanto para su consumo como para el mantenimiento y limpieza de sus instalaciones. Utilizando un volumen de 9.14 millones de mts<sup>3</sup> . equivalente a 0.84 por ciento del total extraído.

#### Uso Público urbano.

---

El volumen destinado para este uso es de 7.94 por ciento del total anual extraído anualmente y que corresponde a 84.46 millones de metros cúbicos por año, destinados a 1'193,306 habitantes.

#### Uso industrial.

---

Este uso utiliza un volumen de 7.07 millones de m<sup>3</sup> que corresponden tan sólo 0.65 por ciento del total extraído. Integrado por la industria metalúrgica, vitivinícola, generaciones de energía eléctrica, etc.

Estudios Desarrollados Relacionados con el Arsénico en el  
Acuífero de la Región Lagunera.

Mendoza y Gámez (1974) estudiaron los procesos de remoción de arsénico en la Región Lagunera mediante los procesos de coagulación química, utilizando los compuestos de cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato de aluminio y el de adsorción con alúmina activada, con el fin de evaluar eficiencias que sirvieran de base para el diseño y costo de una planta de tratamiento, y concluyeron lo siguiente:

1. El arsénico de las aguas estudiadas, tiene una fracción en estado coloidal soluble no filtrable.
2. En las condiciones de operación establecidas, el coagulante sulfato férrico es el más efectivo de los empleados.
3. El coagulante sulfato de aluminio, no es efectivo para remover arsénico a pH natural de las aguas.
4. El coagulante cloruro férrico es efectivo, pero su costo lo hace impráctico para usarse en una planta a escala industrial.
5. El proceso de adsorción de arsénico con alúmina activada es muy efectivo.
6. Los resultados permiten tener bases para el diseño y operación de una planta de tratamiento a escala industrial.

Describen también los procesos químicos y físicos que se han estudiado para remover arsénico de los cuales se deduce lo siguiente.

1. La sedimentación simple tiene cierta eficiencia, pero con periodos de retención de mas de diez días.
2. Los intercambios iónicos han dado buenos resultados, pero el proceso es costoso y su operación compleja .
3. La filtración lenta en arena es efectiva, pero las carreras de operación son cortas al disminuir la capacidad de adsorción del medio.
4. La adsorción con carbón de hueso es efectiva, pero la recuperación del arsénico durante la regeneración del medio es baja, lo cual hace que el carbón se sature rápidamente. Además hay indicios de que el arsénico, adsorbido provoca un cambio irreversible en la estructura básica del carbón.

Actividades Desarrolladas por el Sector salud (1986) mencionan que el fenómeno del hidroarsenicismo se ha presentado en forma natural en el subsuelo del antiguo vaso de la laguna de Mayrán, que se fue desaguando hasta desaparecer, debido al escaso aporte pluvial, lo cual representa una mancha geológica no determinada y que abarca los municipios de: San Pedro, Francisco I. Madero, Matamoros y Viesca, por parte del Estado de Coahuila y el

Matamoros y Viesca, por parte del Estado de Coahuila y el municipio de Tlahualilo del Estado de Durango. Tambien indican que estudios de mortalidad (1970-1974) han demostrado mayor frecuencia de defunciones por cancer en los municipios de la Region Lagunera; en (1983-1984) otro estudio identifica una prevalencia del 56 por ciento de arsenicismo y 19 casos de cancer epidermoide en municipios con agua contaminada con arsénico, comparado con localidades sin este problema en donde no hubo casos de arsenicismo ni de cancer.

Estadisticas de la SARH (1987) muestran que para los pozos clasificados con los numeros 1467, 1000, 2745 y 1975 que se ubican en los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero, Tlahualilo y Matamoros, se han encontrado concentraciones desde 0.08 a 0.38 ppm de As, lo que indica que las concentraciones en estos pozos han superado siete punto seis veces más a la concentración máxima permitida por la OMS.

## MATERIALES Y METODOS

### Características Generales del Area de Estudio

#### Localización.

-----

El área de estudio que pertenece al acuífero principal de la Región Lagunera, se localiza entre los paralelos 102° 45' y 104° 00' longitud al Oeste del Meridiano de Greenwich y los meridianos 25° 15' y 26° 00' latitud Norte. En esta área se localiza la mayor parte de la explotación del agua para uso agrícola, que comprende los municipios de: Torreón, San Pedro, Fco. I. Madero, Viesca y Matamoros por parte del Estado de Coahuila, y Lerdo, Gómez Palacio y Tlahualilo por parte del Estado de Durango. En el (Cuadro 3.1.) se especifican las características de población y extensiones territoriales para cada municipio.

#### Clima.

-----

El clima de la región, de acuerdo a la clasificación de Koppen modificado por García (1973) para la República Mexicana es de tipo BW hw (e'). Lo cual significa que es un clima seco con lluvias en verano e invierno, pero escasas durante todo el año. Su temperatura promedio anual es de 21.07 °C ., pero muy extrema con oscilaciones mayor de

14°C; su precipitación promedio es de 201.38 mm, con mínima de 64 mm. y máxima de 373.39 (INEGI, 1981a). Por esta razón Dena (1984) menciona que no hay corrientes permanentes que permitan el riego por escurrimiento de la superficies cultivadas, ni mucho menos que algún volumen de precipitación recargue los mantos acuíferos, pues el promedio anual de evaporación alcanza la cifra de 2600 mm; superior once veces a la precipitación media anual de la región.

**Cuadro 3.1. Población y extensiones territoriales para los municipios que comprenden el área de estudio.**

| Municipio      | Población<br>(miles) | Extensión territorial <sup>2</sup><br>km |
|----------------|----------------------|--|
| Fco. I. Madero | 47.511               | 1947.7                                   |
| Matamoros      | 77.771               | 1003.7                                   |
| San Pedro      | 93.410               | 9942.4                                   |
| Torreón        | 363.886              | 1947.7                                   |
| Viesca         | 21.095               | 4203.5                                   |
| Gómez Palacio  | 180.001              | 1082.76                                  |
| Lerdo          | 73.527               | 1922.23                                  |
| Tlahualilo     | 28.449               | 3307.77                                  |

\* Censo general de población y vivienda del Estado de Coahuila, 1980.

\* Censo general de población y vivienda del Estado de Durango, 1980.

#### Suelos.

Los suelos predominantes son los de tipo aluvial de clave Xh + Jc, que pertenecen al tipo xerosoláplico y calcáreos; que se caracterizan por tener una capa superficial de color claro y pobre en materia orgánica, pudiendo ser en el subsuelo, ricos en arcilla ó carbonatos



muy parecidos a la capa superior. (INEGI, 1982a).

#### Hidrografía.

Los recursos hidrológicos con que cuenta son: los ríos Nazas, Aguanaval y escurrimientos menores, y los del subsuelo. Sobre el río Nazas, el cual tiene una longitud de 220 km se localizan las presas Lázaro Cárdenas (almacenadora) y Francisco Zarco (reguladora). Con capacidades de 2873 y 300 millones de metros cúbicos respectivamente, las cuales son operadas por la SARH., siendo el agua utilizada por el distrito de riego 017, para fines de riego agrícola. (INEGI, 1981b).

#### Aguas subterráneas.

De acuerdo con la clasificación para aguas subterráneas y la composición de las rocas, el área de estudio se encuentra en una unidad de material no consolidado con posibilidades altas; el acuífero es de tipo libre, en el que actualmente los niveles estáticos están entre los 75 y 120 m debido a la sobre explotación existente.

La calidad del agua radica fundamentalmente por la existencia de las rocas carbonatadas, que funcionan como zona de recarga en la región, siendo representados de la manera siguiente: en la parte Sureste, desierto (laguna) de Mayrán, es de dulce a tolerable; en los valles de Velardeña, Pedriceña y Aguanaval es tolerable; las áreas de

Lazaro Cárdenas, Bolsón de Mapimí, Torreón y Matamoros es de tolerable a dulce, en los alrededores de Gómez Palacio es dulce.

La dirección de flujo del agua subterránea es concéntrica y se divide prácticamente en dos conos: el de la porción Norte de Gómez Palacio y el de la porción Oriente de Torreón (INEGI 1981c). Las direcciones de flujo dependen básicamente de la posición estructural de las rocas existentes y la sobreexplotación que forma dos conos de abatimiento, como se puede observar en la (Figura 3.1).

#### Topografía.

El área de estudio es una gran planicie (zona de bombeo), cuya altura promedio es aproximadamente 1150 msnm rodeada por algunas elevaciones como son: al Norte se localiza el Cerro Colorado; al Noreste entre Tlahualilo y San Pedro se localizan unos pequeños conos; hacia el Sureste entre San Pedro y Matamoros, se encuentran las sierras de San Lorenzo, Texas y el Solís. Hacia el Sur se localizan las sierras de las Noas y Boca de los Álamos y al Noroeste las sierras de Mapimí, Sarnoso y Bermejillo, variando sus alturas de 1570 a 2040 msnm (INEGI, 1981d).

#### Uso del suelo.

En las partes altas de la región se localiza matorral desértico rosetófilo, rodeado de matorral micrófilo, aguas abajo se localiza la gran planicie donde se encuentra



al área agrícola, su capacidad permite realización de prácticas de labranza con maquinaria agrícola siendo posible obtener dos ciclos agrícolas al año (INEGI, 1982b).

#### Áreas de Estudio

La SARH (1984) menciona que en los diferentes estudios que se han realizado en el acuífero principal de la Región Lagunera, se ha observado que existen áreas que en el transcurso del tiempo, cada una de ellas ha presentado comportamientos diferentes, por lo que en futuros estudios al acuífero es recomendable realizarlos por zonas o áreas.

Por lo anterior expuesto, en el presente estudio se analizaron tres áreas que comprenden el acuífero principal de la Región, las cuales son: área San Pedro - Francisco I. Madero, área Tlahualilo - Gómez Palacio y área Matamoros - Viesca; las cuales fueron localizadas en un plano de localización de pozos formulado por la Residencia de Aguas Subterráneas de la SARH, como se muestra en la (Figura 3.2)

#### Área San Pedro - Francisco I. Madero.

Se ubica en las coordenadas Sur 20 km y Norte 20 km (S-20 , N-20) de latitud y las coordenadas de longitud Este 10 y 45 km (E-10 , E-45) del plano de localización de pozos de la SARH; comprende una superficie de 1400 km<sup>2</sup>, donde fueron analizados 12 pozos piloto seleccionados aleatoriamente como se muestra en la (Figura 3.2) la superficie esta



Figura 3.2 Localización de áreas estudiadas.

delimitada hacia el Sur por la sierra de San Lorenzo constituida principalmente por rocas sedimentarias de litología caliza y al Norte por dos pequeñas sierras formadas por rocas ígneas extrusivas básicas (INEGI, 1981d).

#### Area Tlahualilo - Gómez Palacio.

Esta superficie comprende además el municipio de Torreón, y parte del municipio de Lerdo, se localiza en las coordenadas latitud Sur 40 km y Norte 20 km (S-40 , N-20), y longitud Oeste 20 km y Este 10 km (W-25 , E-10)., su área es de aproximadamente 1800 km<sup>2</sup>, donde se localizan 23 pozos piloto seleccionados al azar (Figura 3.2), esta superficie se caracteriza por ser beneficiada por los abanicos aluviales de las sierras de Mapimí, Binagrillos y las Noas, las cuales están formadas por rocas sedimentarias calizas, aunque existen algunas porciones formadas por Lutita y Arenisca, contando como fuente principal de recarga el Río Nazas (INEGI, 1981d).

#### Area Matamoros - Viesca.

Se ubica en las coordenadas 20 km y 65 km de latitud Sur (S-20 , S-65) y Este 10 km y 45 km de longitud (E-10 , E-45), en esta localidad se estudiaron 16 pozos piloto, comprendiendo una superficie de aproximadamente 1575 km<sup>2</sup> (Figura 3.2), está rodeada hacia el Norte por las sierras de Texas y Solís formadas por rocas sedimentarias

de litología caliza, y al Sur por las sierras Boca de Alamos constituida principalmente por rocas calizas sedimentarias (INEGI, 1981d).

#### Recopilación y Analisis de la Información

La información que se analizó en el presente estudio fue proporcionada por el laboratorio de Calidad de Aguas y la Residencia de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos, de la SARH delegación en el Estado de Durango, Cd Lerdo., como se mencionó anteriormente los municipios que comprenden el estudio son: Francisco I. Madero, San Pedro, Matamoros, Viesca y Torreon por parte del Estado de Coahuila, y Tlahualilo, Lerdo y Gomez Palacio por parte del Estado de Durango, que se ubican en la Planicie del acuífero de la Región Lagunera, los cuales representan el área de mayor explotación, así como la principal zona agrícola., en la (Figura 3.3) se encuentra la ubicación de cada uno de ellos.

#### Selección de Pozos de Bombeo.

Los pozos de bombeo se seleccionaron en base a un plano topográfico con cuadrícula de 10 por 10 km (Figura 3.3) formulado por la Residencia de Aguas Subterráneas de la SARH., tomando en cuenta la distribución de la red piloto, del laboratorio de calidad de aguas. Se seleccionaron los pozos que han sido monitoreados más frecuentemente a través del tiempo, encontrándose

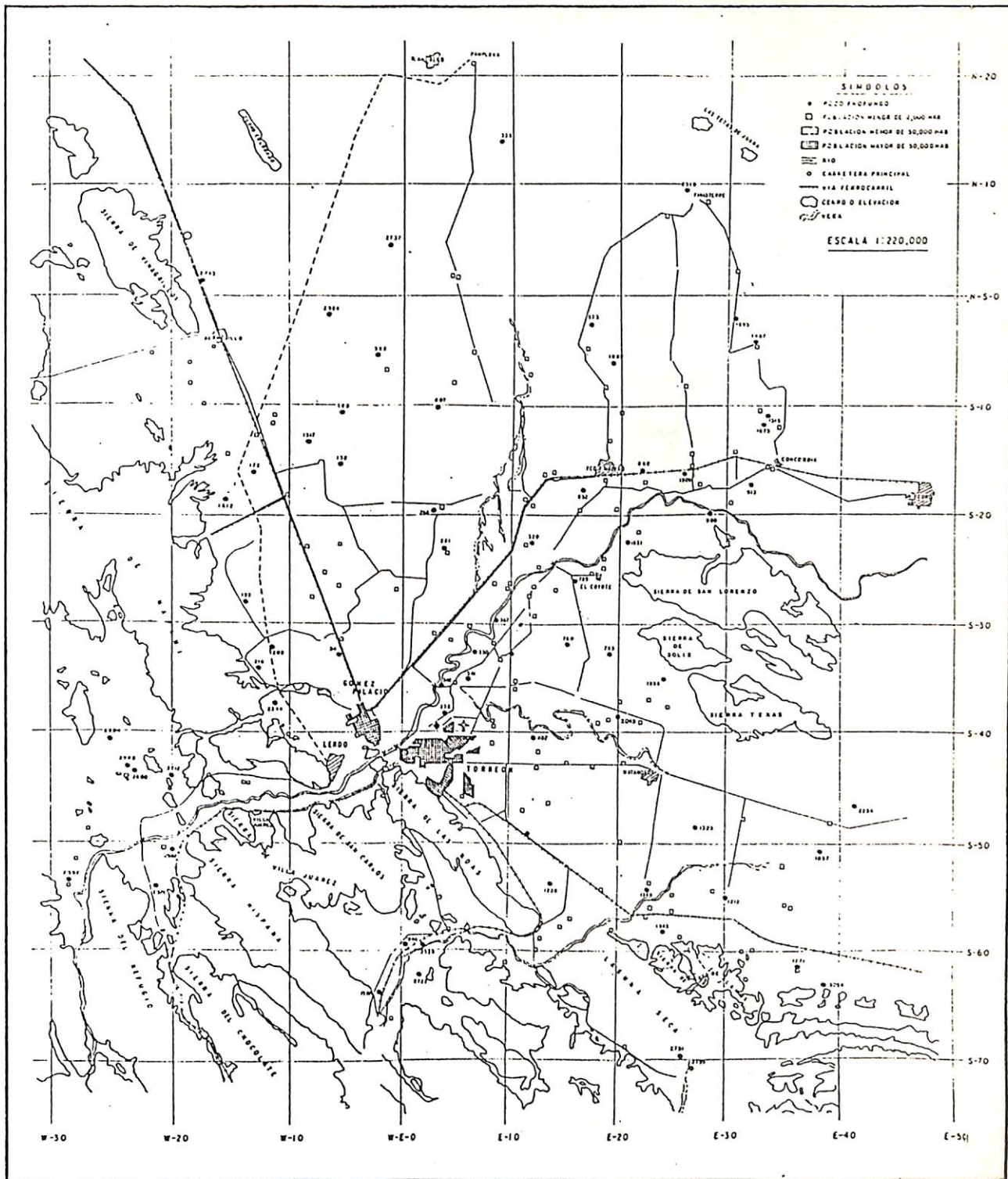


Figura 1.3 Localización de municipios estudiados y pozos de bombeo.



información para cincuenta pozos piloto distribuidos al azar y con información para los años de 1977, 1981, 1983 y 1987.

#### Coordenadas Geográficas.

El plano está referenciado a una cuadrícula no convergente de 10 por 10 km con un meridiano base y un paralelo principal que de hecho constituyen un sistema de ejes coordenados rectangulares; mismos que sirven para localizar cada uno de los pozos como se puede observar en la (Figura 3.3).

#### Concentraciones de Arsénico.

Las concentraciones de arsénico para cada pozo fueron tomadas de las estadísticas del laboratorio de calidad de aguas de la SARH., Cd Lerdo; las cuales pertenecen a los años 1977, 1981, 1983 y 1987. El método empleado para las determinaciones de arsénico para los años de 1977 a 1983 fue el Método Colorimétrico que emplea el dietil- ditio carbonato de plata, y para el año de 1987, se empleó el Método de Absorción Atómica; las concentraciones están dadas en partes por millón (ppm).

#### Niveles Estáticos y Cota del Brocal.

Los niveles estáticos y cota del brocal para cada pozo fueron proporcionados de las estadísticas de la Residencia de Aguas Subterráneas de la SARH, para los años

arriba mencionados; en el apéndice se muestran los pozos evaluados para cada municipio, así como sus respectivas características.

Trazo de Curvas de Isoconcentración y Modelos para estimar la Concentración de Arsénico en el Agua del Acuífero de la Región Lagunera.

#### Curvas de isoconcentración de arsénico.

Una vez seleccionados y localizados los pozos para cada municipio, se procedió a realizar un plano de curvas de isoconcentración de arsénico para cada uno de los años estudiados; con la finalidad de observar el comportamiento del arsénico en el espacio y posibles tendencias o direcciones de flujo. Para el trazo de curvas se empleó el método de interpolación lineal simple.

#### Modelos para estimar la concentración de arsénico.

De acuerdo a la selección y ubicación de cada una de las áreas anteriormente mencionadas y con referencia al número de pozos para cada una de ellas, se ajustó un modelo, donde la concentración de arsénico en el agua para cada pozo está en función de las coordenadas de cada pozo, nivel estático, cota del brocal y el tiempo.

Y en función (  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  )

Donde:

Y = Concentración de As ppm

$X_1$  = Latitud de cada pozo km

X = Longitud de cada pozo km

2

X = Nivel estático m

3

X = Cota del brocal m.

4

X = Tiempo en años.

5

Utilizándose para ello la técnica de regresión lineal múltiple. Los datos fueron procesados en una computadora BPM/ST utilizando el paquete "Lotus" implementado en el Centro de Cómputo del Departamento de Riego y Drenaje.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Planos de Isoconcentración de Arsénico

De acuerdo a las (Figuras 4.1 a la 4.4) que muestran las curvas de isoconcentración de arsénico para cada uno de los años estudiados, los resultados son los siguientes:

En la (Figura 4.1) se observa que en los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero y Tlahualilo, son los más fuertemente afectados existiendo concentraciones de As desde 0.15 a 0.6 ppm., en los municipios de Gómez Palacio, Lerdo y Torreón las concentraciones varían de 0.01 a 0.06 ppm., en los municipios de Matamoros y Viesca las concentraciones se presentan desde 0.03 a 0.3 ppm en forma concéntrica siendo la parte central entre los dos municipios la más afectada.

En la (Figura 4.2) se observa que en los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero y Tlahualilo se presentan concentraciones de 0.1 a 0.6 ppm de As., en los municipios de Gómez Palacio, Lerdo y Torreón las concentraciones varían de 0.03 a 0.07 ppm lo que indica que existen pozos que superan al máximo permitido. En los municipios de Viesca y Matamoros las concentraciones son de 0.05 a 0.2 ppm y se presentan en forma concéntrica.

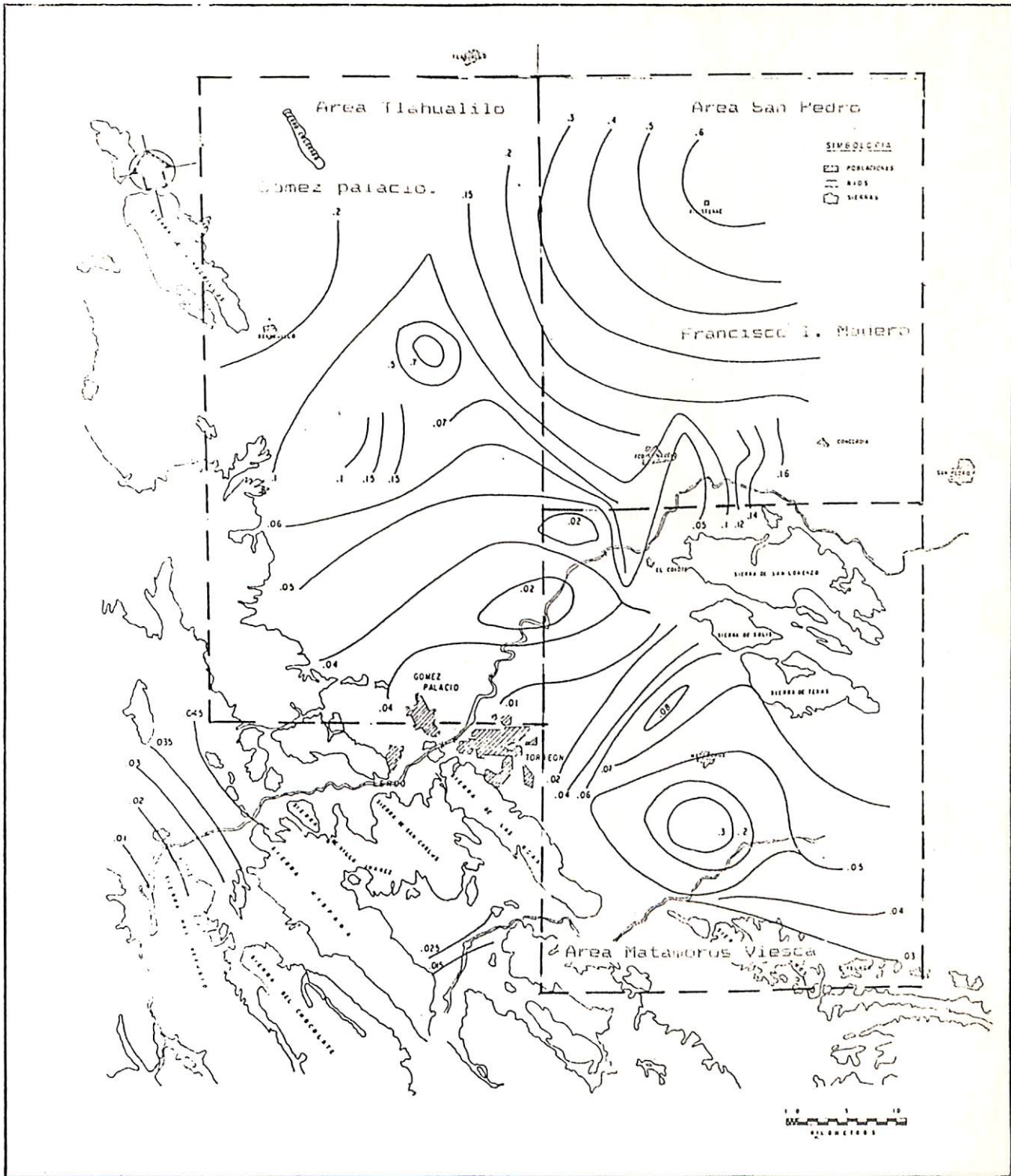


Figura 4.1 Curvas de isoconcentración de arsénico (1977).

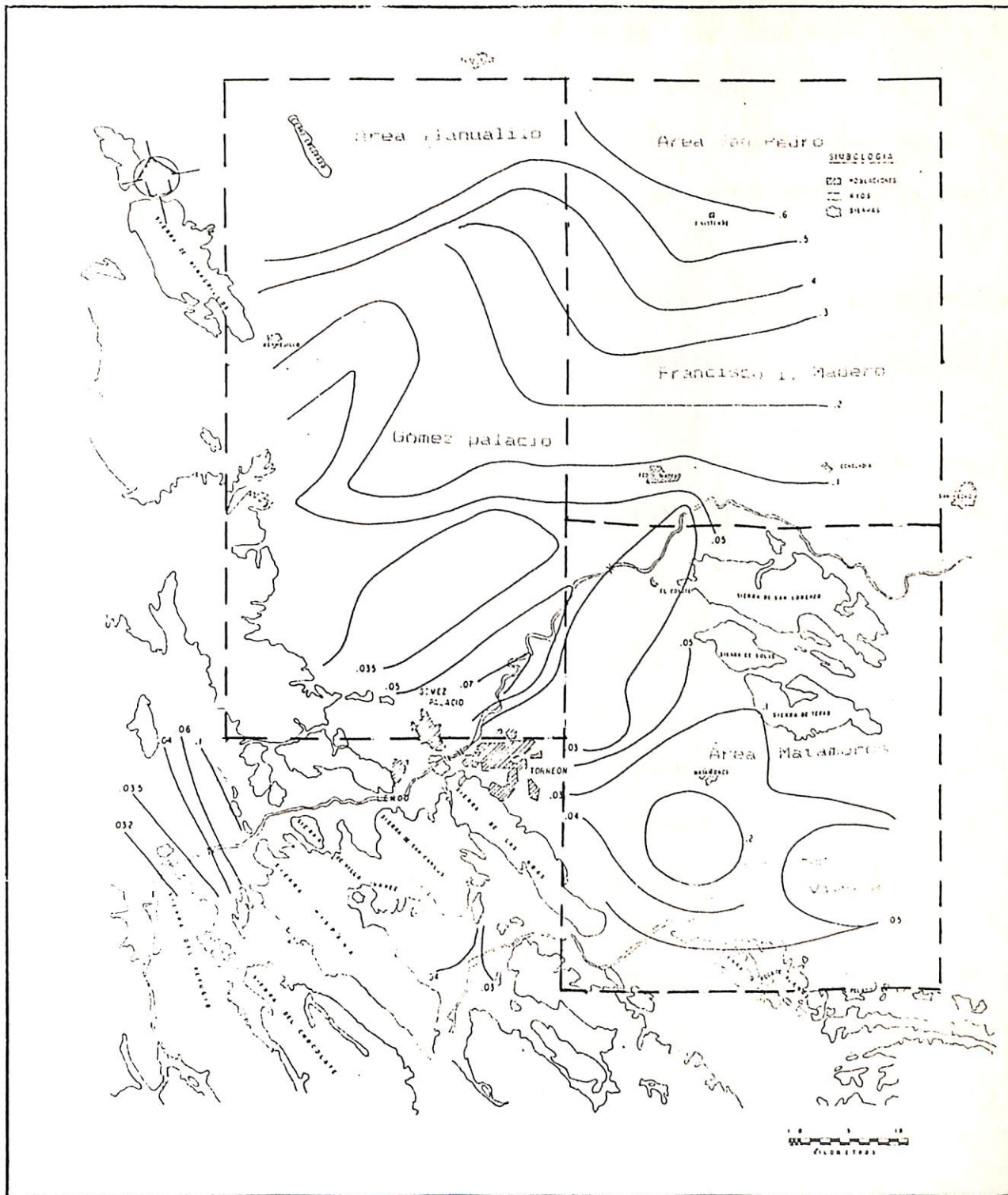


Figura 4.2 Curvas de isoconcentración de arsénico (1981).

En la (Figura 4.3) se observa que en los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero y Tlahualilo se presentan concentraciones de 0.05 a 0.55 ppm de As., en los municipios de Gómez Palacio, Lerdo y Torreón las concentraciones se presentan de 0.02 a 0.05 ppm y para los municipios de Matamoros y Viesca las concentraciones varían de 0.04 a 0.2 ppm de As.

En la (Figura 4.4) se observa que en los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero y Tlahualilo las concentraciones son de 0.1 a 0.6 ppm., en los municipios de Gómez Palacio, Lerdo y Torreón las concentraciones varían de 0.02 a 0.06 ppm y en los municipios de Matamoros y Viesca las concentraciones son de 0.1 a 0.2 ppm de As.

#### Determinación de Areas con mayor Contaminación de Arsénico.

Los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero y Tlahualilo, que comprenden la parte Norte y Noreste de la Región Lagunera, son los más fuertemente afectados donde la concentración de arsénico supera con facilidad al máximo permisible que es de 0.05 partes por millón (ppm). Hacia el Sureste se localizan los municipios de Matamoros y Viesca, donde la concentración de arsénico se presenta en forma muy variable, existiendo curvas de isoconcentración desde 0.02 hasta 0.3 ppm, siendo la parte central de estos municipios la más afectada, donde las concentraciones superan con facilidad al máximo permisible. En la porción central donde se localizan los municipios de Torreón, Lerdo y Gómez





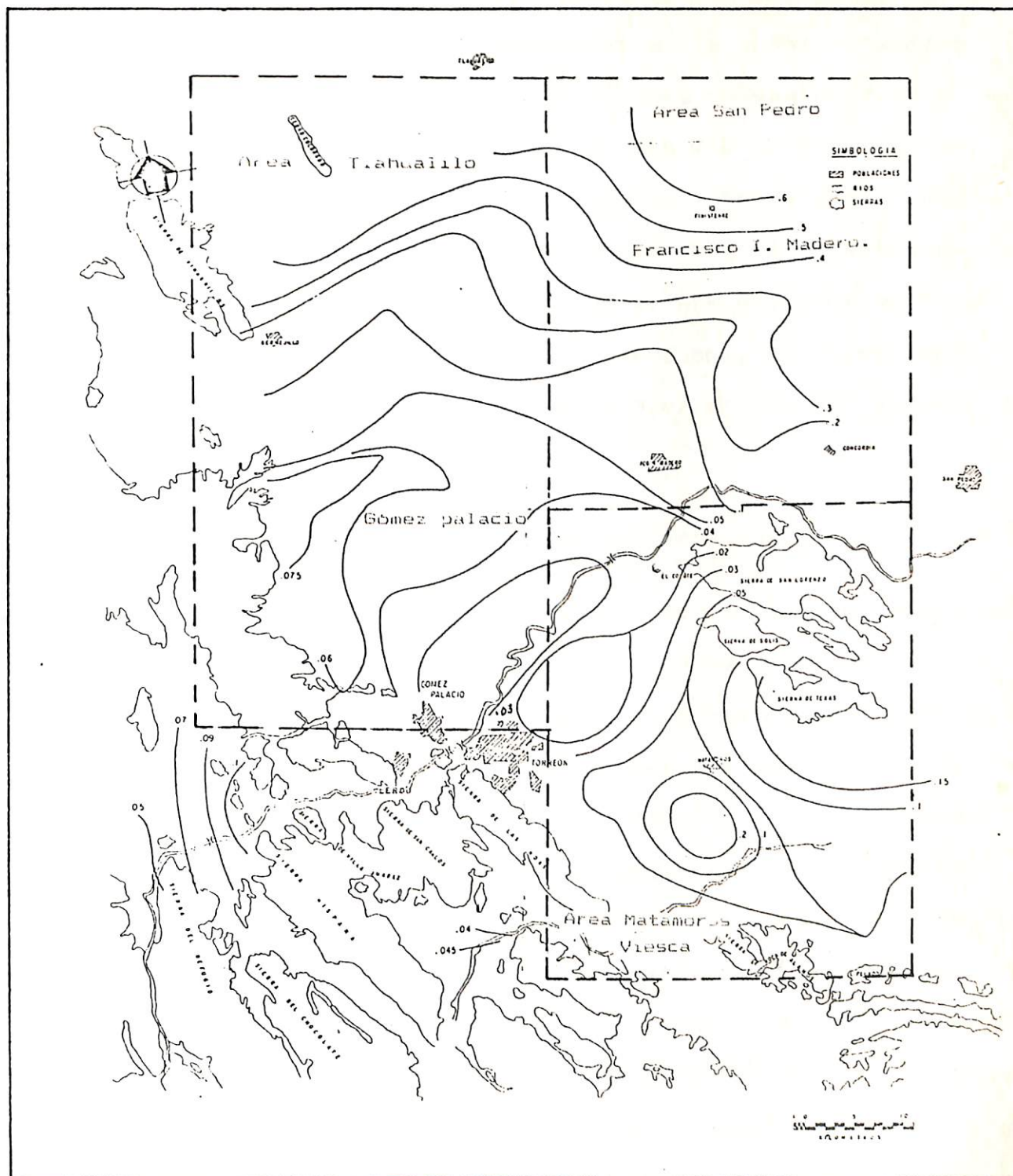


Figura 4.4 Curvas de isoconcentración de arsénico (1987).

Palacio, las concentraciones de arsénico son generalmente inferiores al máximo permisible, aunque existen algunos pozos que muestran tendencias a la contaminación; las (Figuras 4.2 y 4.3) muestran algunas curvas de 0.05 y 0.07 ppm de As, es necesario mencionar que en esta parte, se localizan los pozos de bombeo de la SARH para el reparto de agua en "bloques" hacia los municipios más afectados. Con esto se quiere decir que aunque el esfuerzo por mejorar la condición de los lugares más afectados, no lo es tanto ya que concentraciones de 0.05 y 0.07 ppm de As violan los estandars de la DMS.

#### Tendencias del Arsénico en el Acuífero.

---

Para poder inferir sobre las posibles direcciones ó tendencias de flujo del arsénico, se puede observar en las (Figuras 4.1 a la 4.4) que existen áreas con características de comportamiento diferentes. Para los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero y Tlahualilo, las curvas de isoconcentración muestran una tendencia a aumentar hacia el Norte y Este, existiendo una dirección bien definida que tiende a aumentar hacia el Noreste, con concentraciones que van de 0.1 a 0.6 ppm de As. En los municipios de Matamoros y Viesca, el comportamiento del arsénico tiende a aumentar en forma concéntrica y con tendencias muy similares al comportamiento de los niveles estáticos como se puede apreciar en la (Figura 3.1) siendo la parte central de estos municipios la más afectada donde se

encuentran valores de 0.03 a 0.3 ppm de As. Para la porción central del acuífero donde se localizan los municipios de Torreón, Gómez Palacio y Lerdo, las curvas de isoconcentración tienden a aumentar hacia los municipios de Tlahualilo y Francisco I. Madero presentando valores de 0.01 a 0.07 ppm de As.

#### Modelos Obtenidos

De acuerdo a la ubicación de cada área como se muestra en la (Figura 3.2) y con las características evaluadas para cada pozo, se obtuvieron los modelos siguientes:

Modelo para el Área San Pedro - Francisco I. Madero.

---

En esta área se observó que las variables: nivel estático, cota del brocal y tiempo, no parecen estar correlacionadas con la concentración de arsénico; en las (Figuras 4.5 a la 4.12) se muestra el comportamiento de la concentración de arsénico con respecto a los niveles estáticos y el tiempo, de algunos pozos que fueron tomados al azar, en las cuáles se observa que en algunos pozos la concentración de arsénico tiende a aumentar, conforme aumentan los niveles estáticos y el tiempo, (Figuras 4.7, 4.8 y 4.9) más sin embargo, en las (Figuras 4.5, 4.6, 4.10, 4.11, y 4.12) las concentraciones de arsénico tienden a bajar ó a mantenerse constantes con respecto al nivel estático y el tiempo. En cuanto a las variables latitud y longitud, indican tener mayor correlación con la concentra-

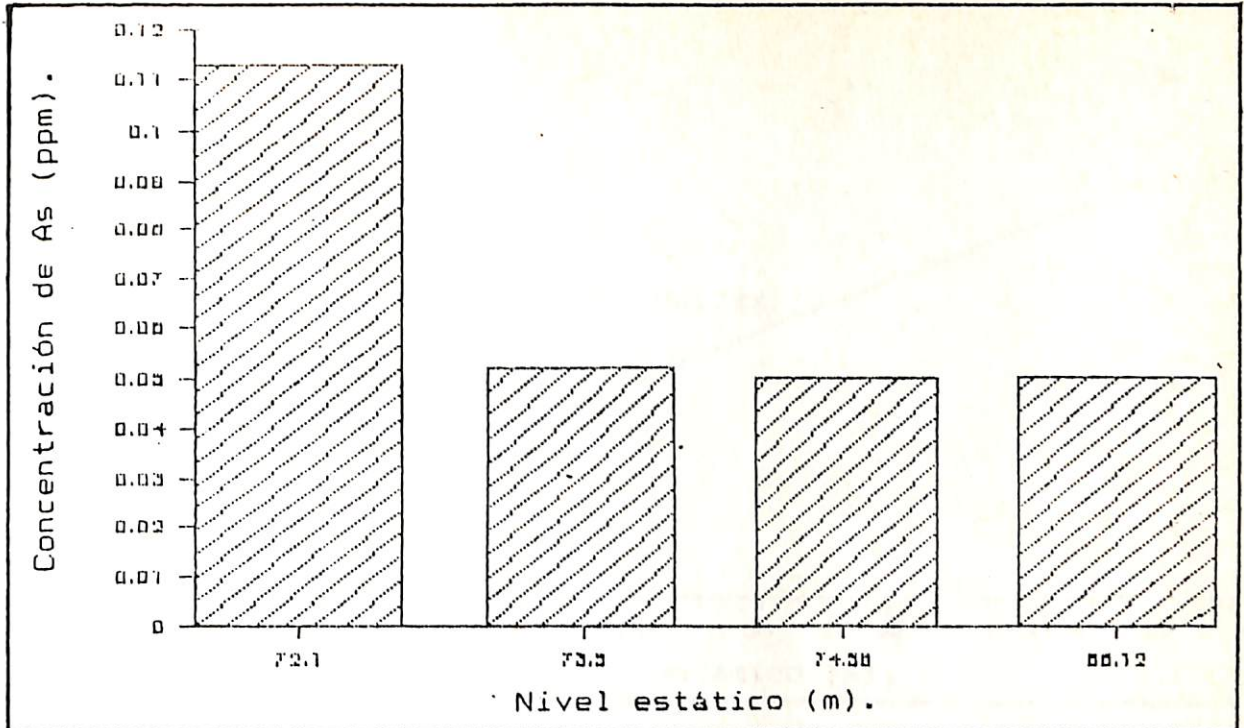


Figura 4.5 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 852, Francisco I. Madero, Coahuila.

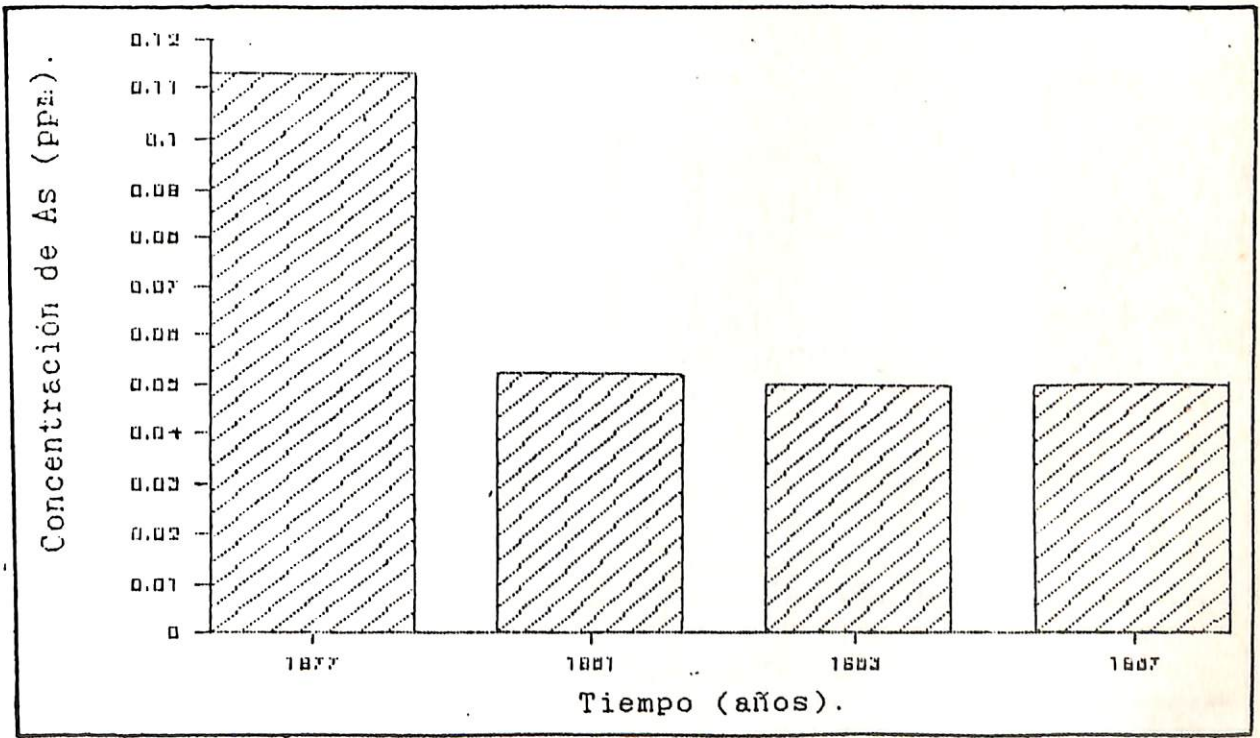


Figura 4.6 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 852. Francisco I. Madero, Coahuila.

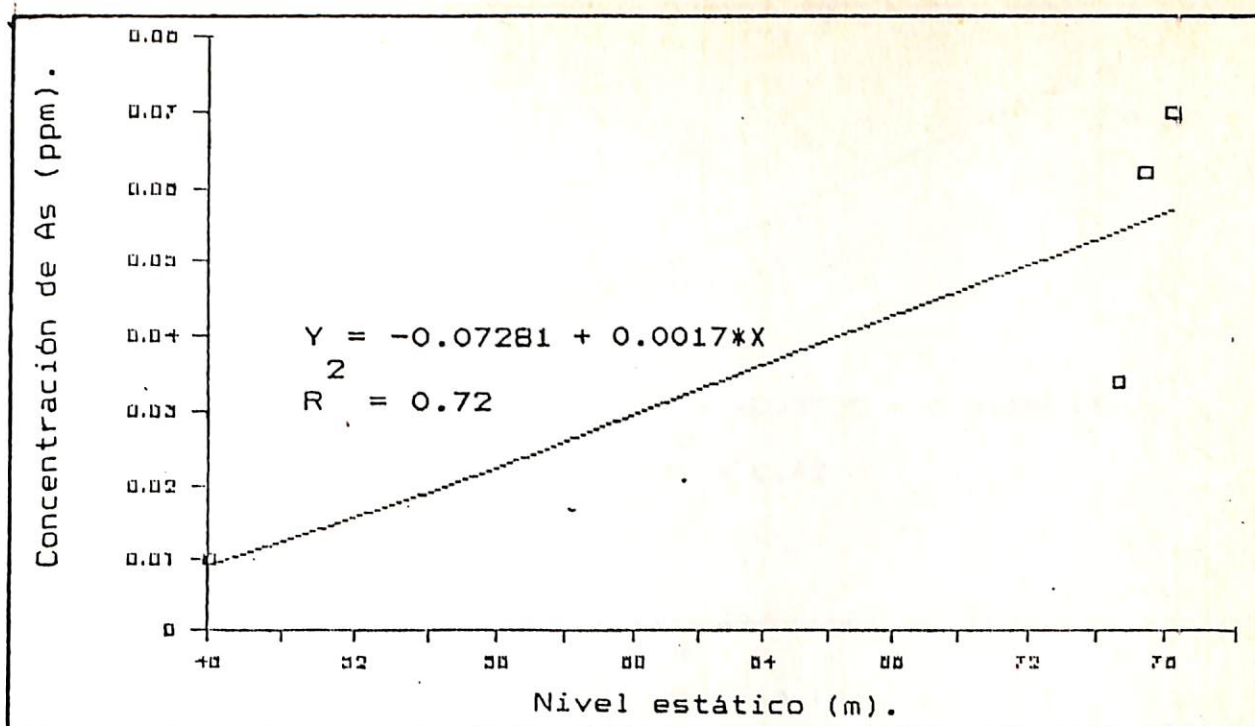


Figura 4.7 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 860. Francisco I Madero, Coahuila.

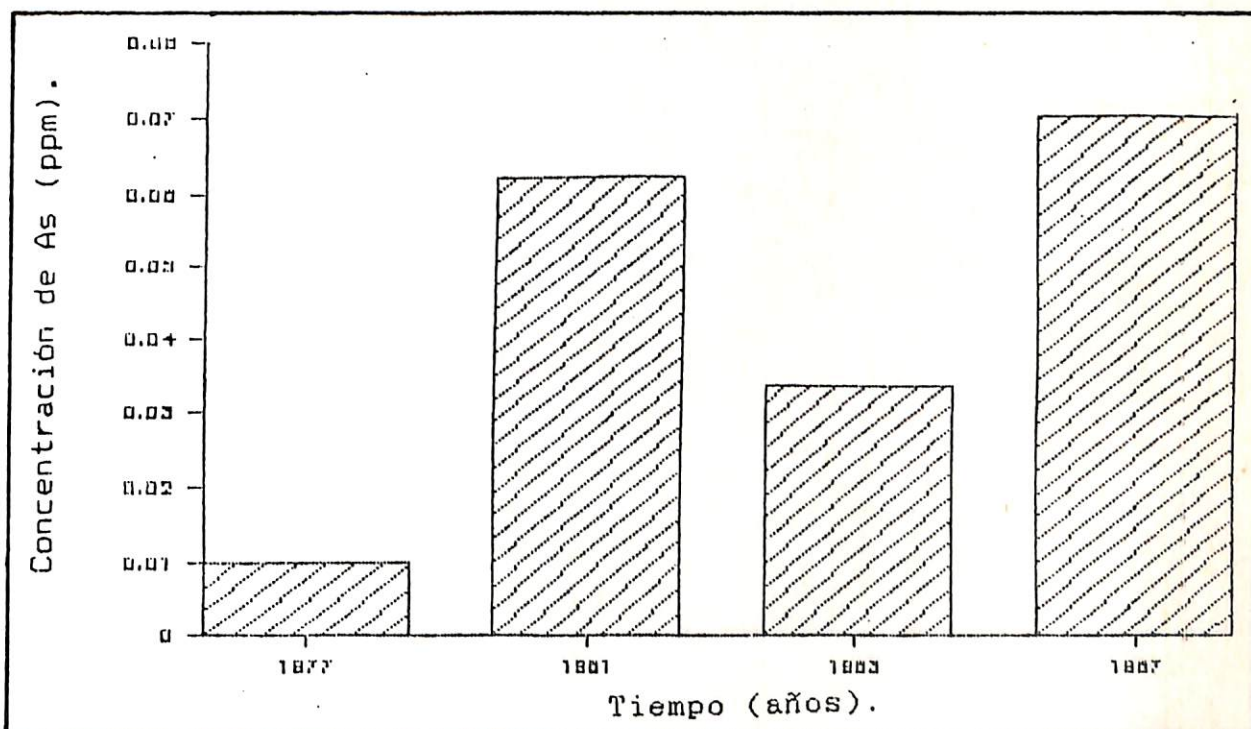


Figura 4.8 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 860. Francisco I. Madero, Coahuila.

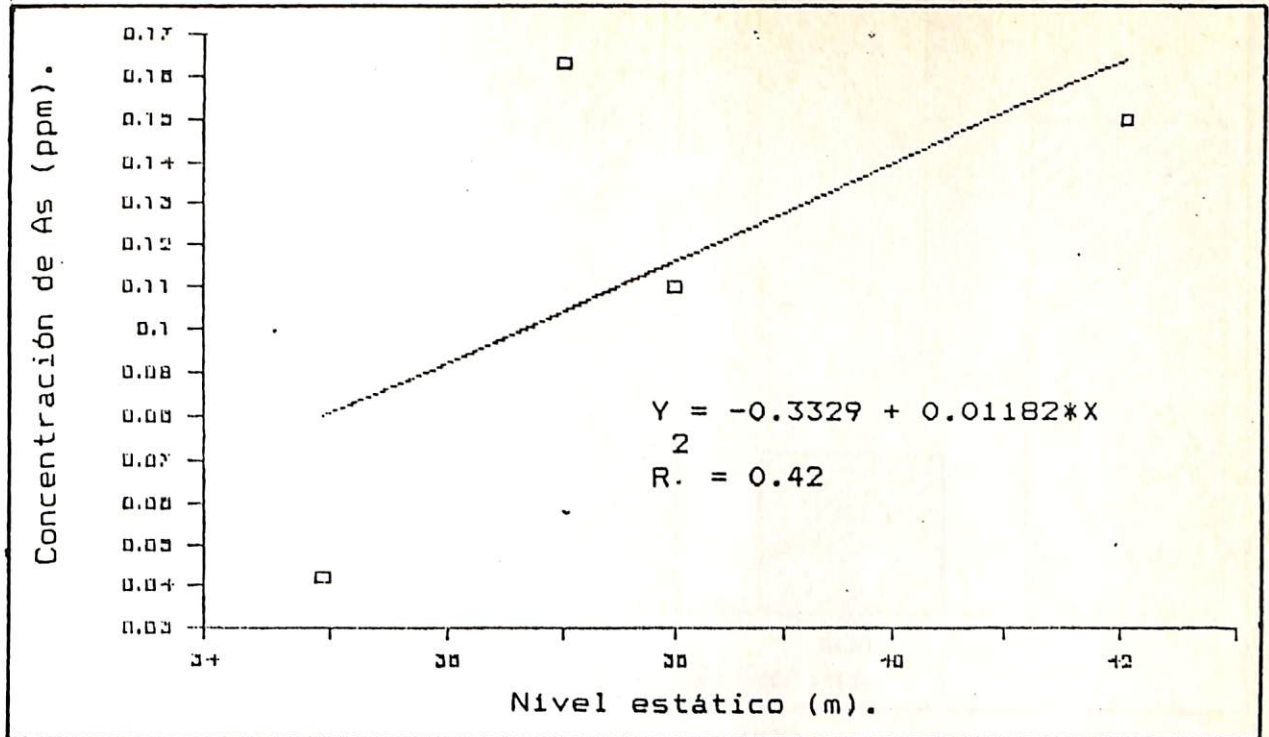


Figura 4.9 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 900. San Pedro, Coahuila.

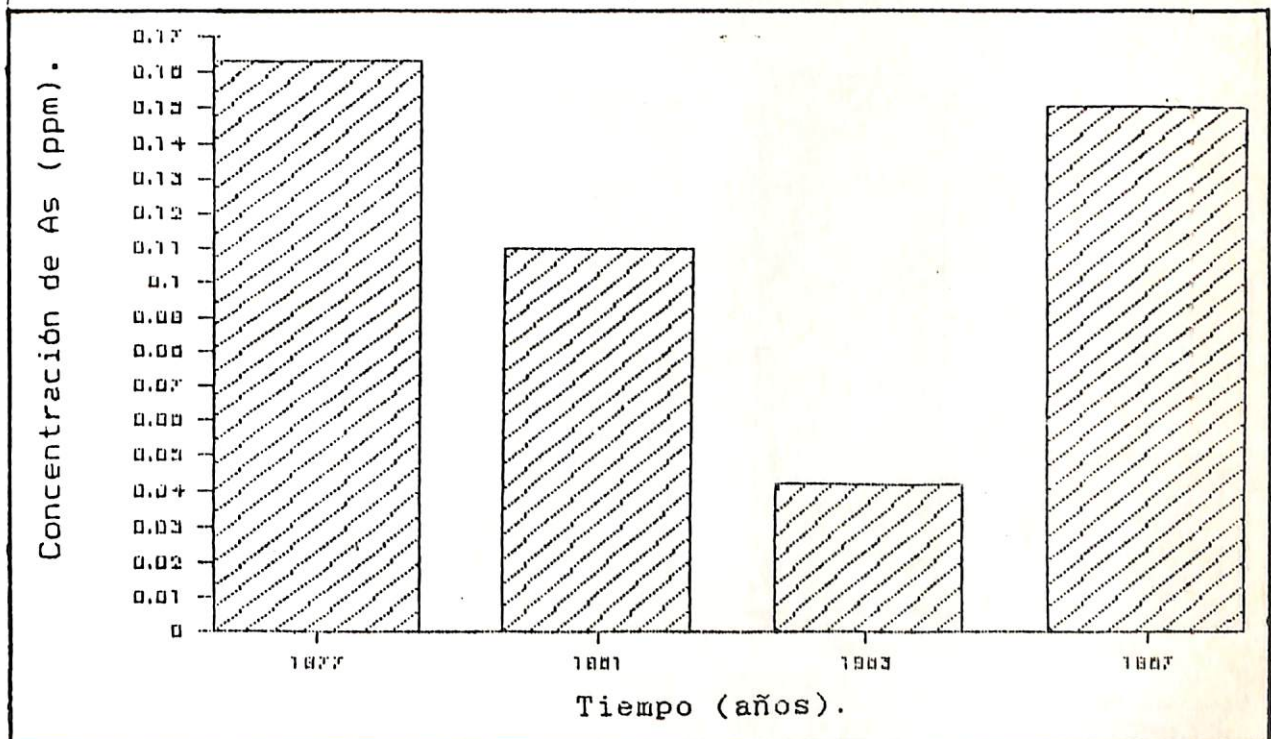


Figura 4.10 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 900. San Pedro, Coahuila.

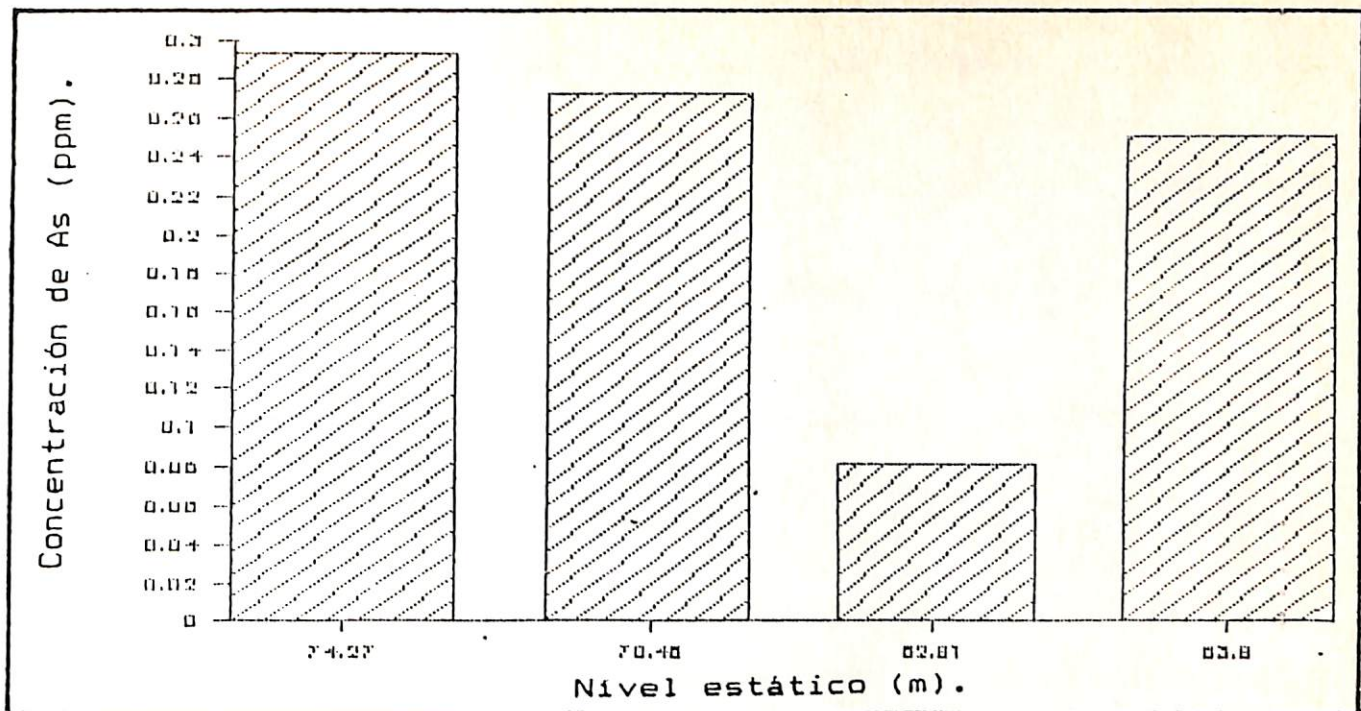


Figura 4.11 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 1000. Francisco I. Madero, Coahuila.

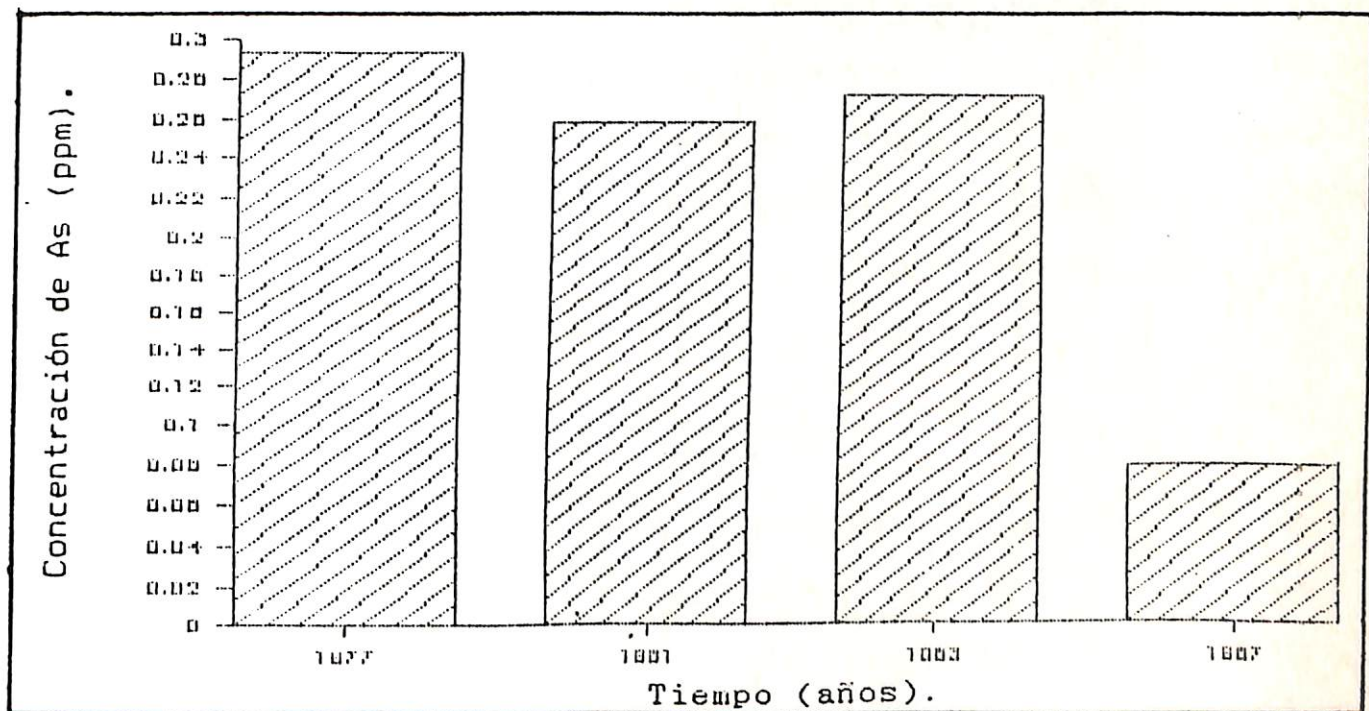


Figura 4.12 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 1000. Francisco I. Madero, Coahuila.

ción de arsénico de las cuales se obtuvo el siguiente modelo:

$$Y = 0.281906 + 0.027839 \cdot X_1 + 0.004604 \cdot X_2 + 0.000439 \cdot X_1^2$$

$$R^2 = 0.84 \quad \text{Desv. std.} = 0.053$$

Donde:

Y = Concentración de arsénico (ppm)

X<sub>1</sub> = Latitud del pozo (km)

X<sub>2</sub> = Longitud del pozo (km)

De este modelo, se deduce que las concentraciones de arsénico están correlacionadas con la localidad del pozo, y que tienden a aumentar hacia el Noreste donde se localiza el municipio de Finisterre que es el más fuertemente afectado donde se localizan las sierras Tetas de Juana formadas principalmente por rocas ígneas extrusivas básicas que por sus contenidos de arsénico reportados por Rankama y Sahama (1962) puede ser la causa principal de las altas concentraciones de As para esta área.

#### Área Tlahualilo - Gómez Palacio.

---

En esta área al igual que la de San Pedro y Francisco I. Madero, se observó que las variables latitud y longitud, mostrarán estar más correlacionadas con la concentración de arsénico; encontrándose también que las variables nivel estático, cota del brocal y tiempo, no muestran una correlación bien definida con respecto a las concentraciones de As, en las (Figuras 4.13 a la 4.22) se



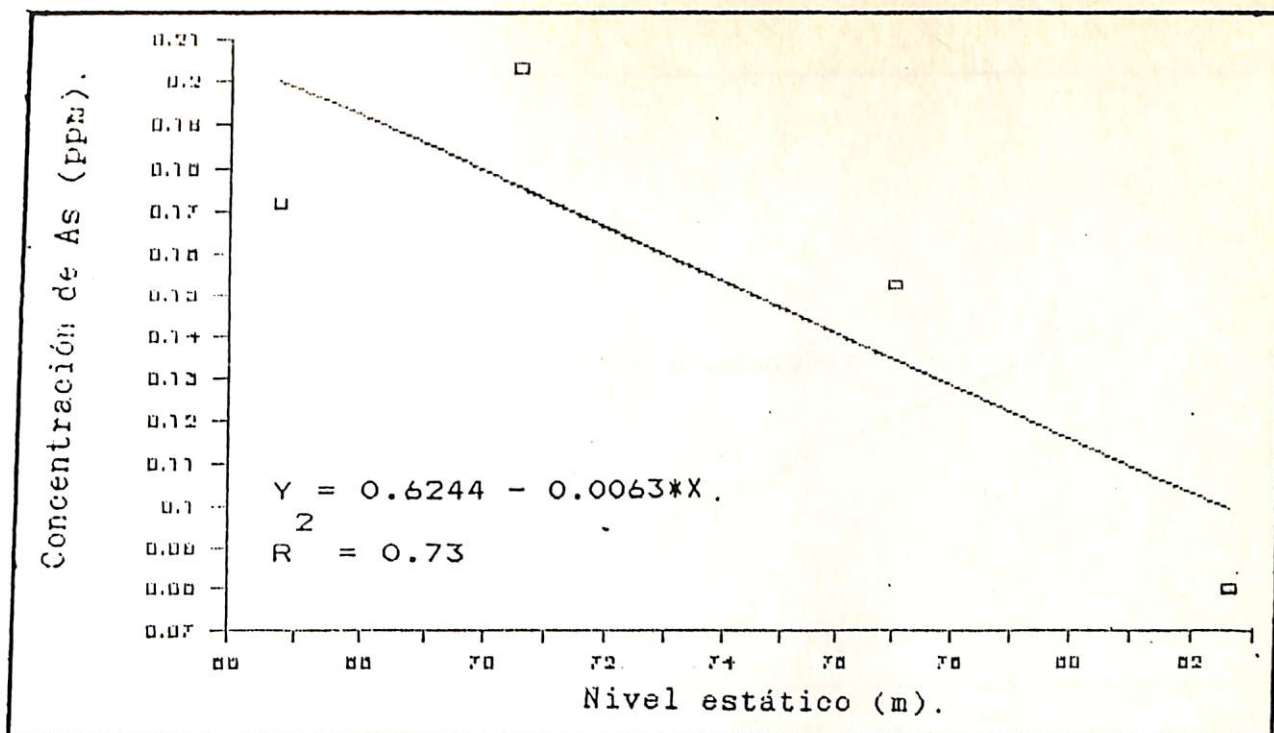


Figura 4.13 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 158. Gomez Palacio, Durango.

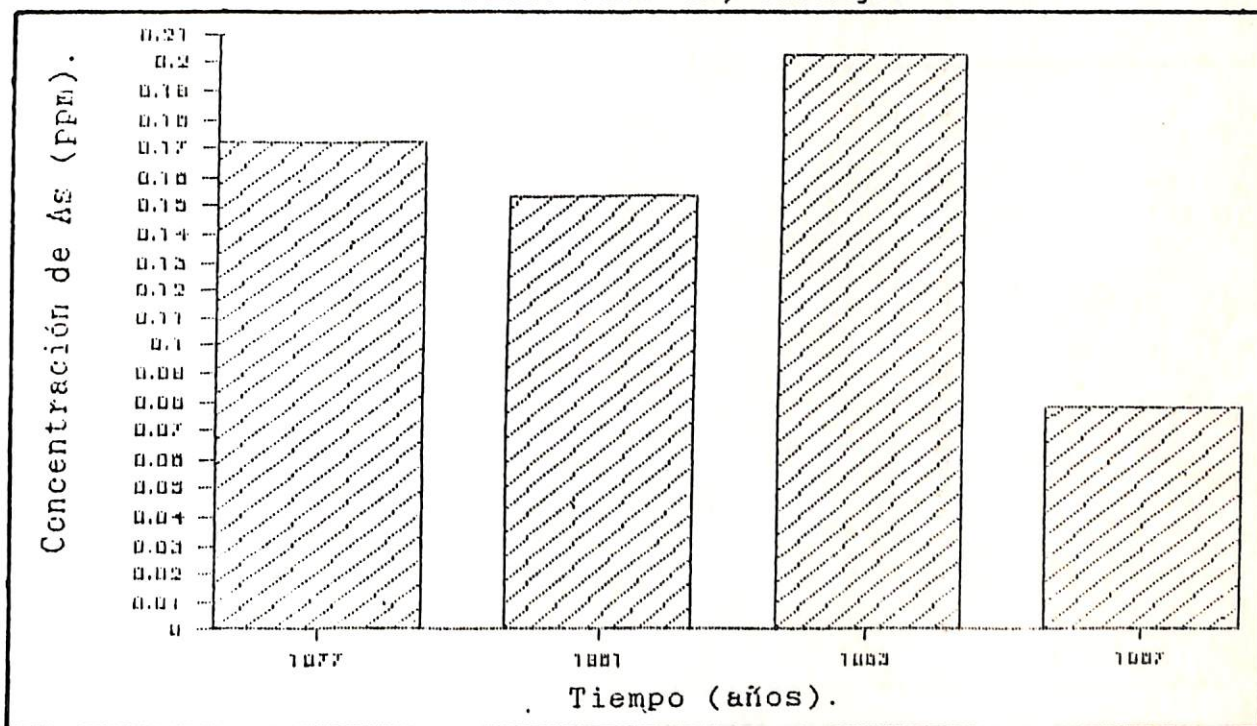


Figura 4.14 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 158. Gomez Palacio, Durango.

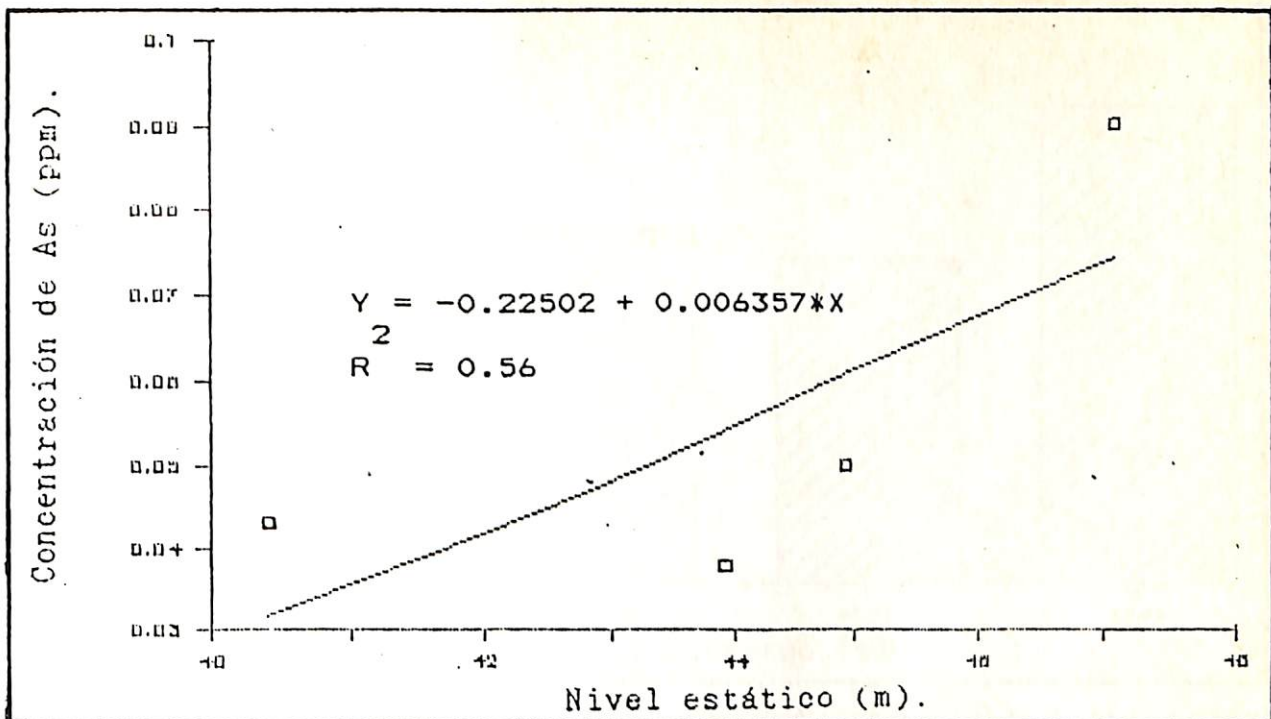


Figura 4.15 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 172. Gomez Palacio, Durango.

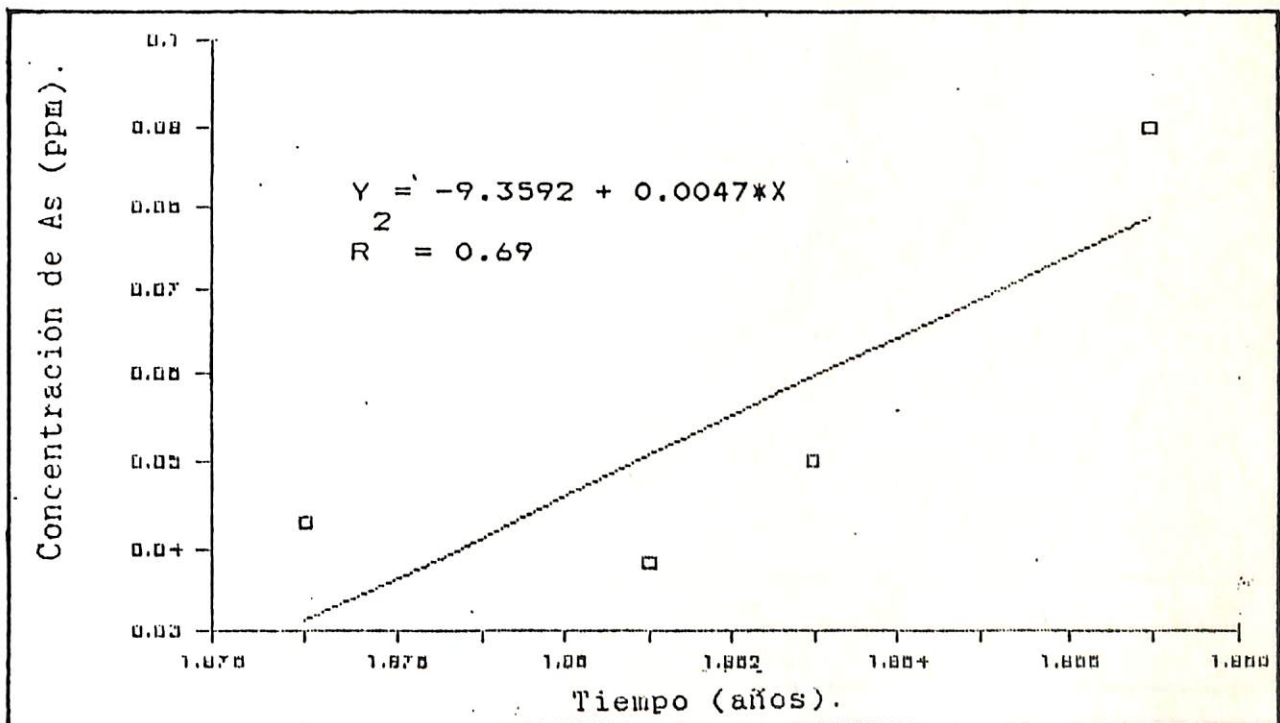


Figura 4.16 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 172. Gomez Palacio Durango.

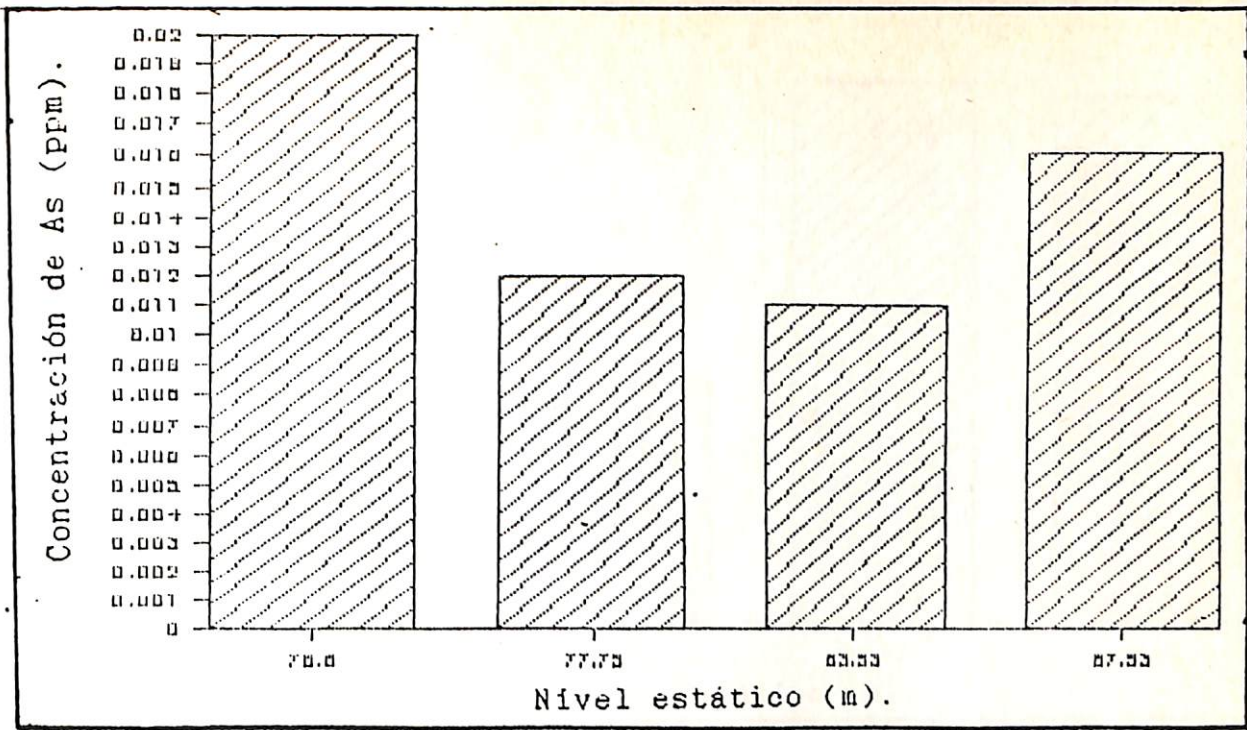


Figura 4.17 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 336. Torreón, Coahuila.

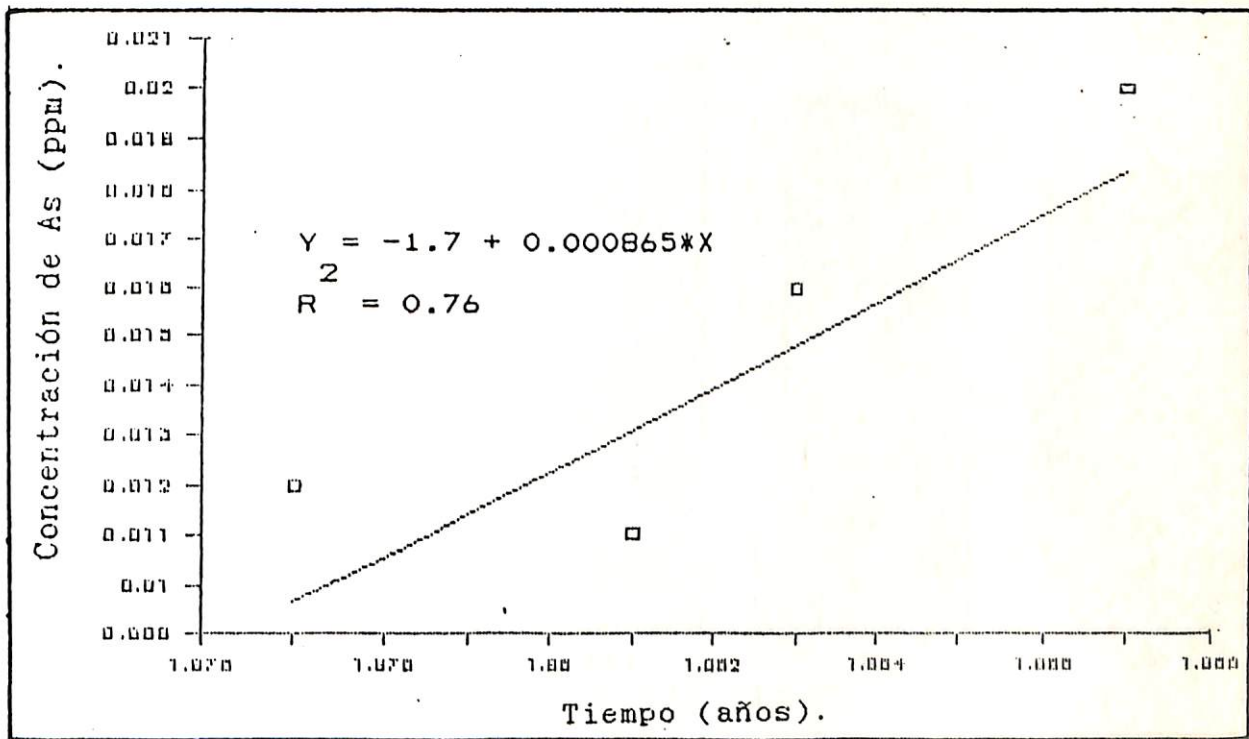


Figura 4.18 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 336. Torreón, Coahuila.

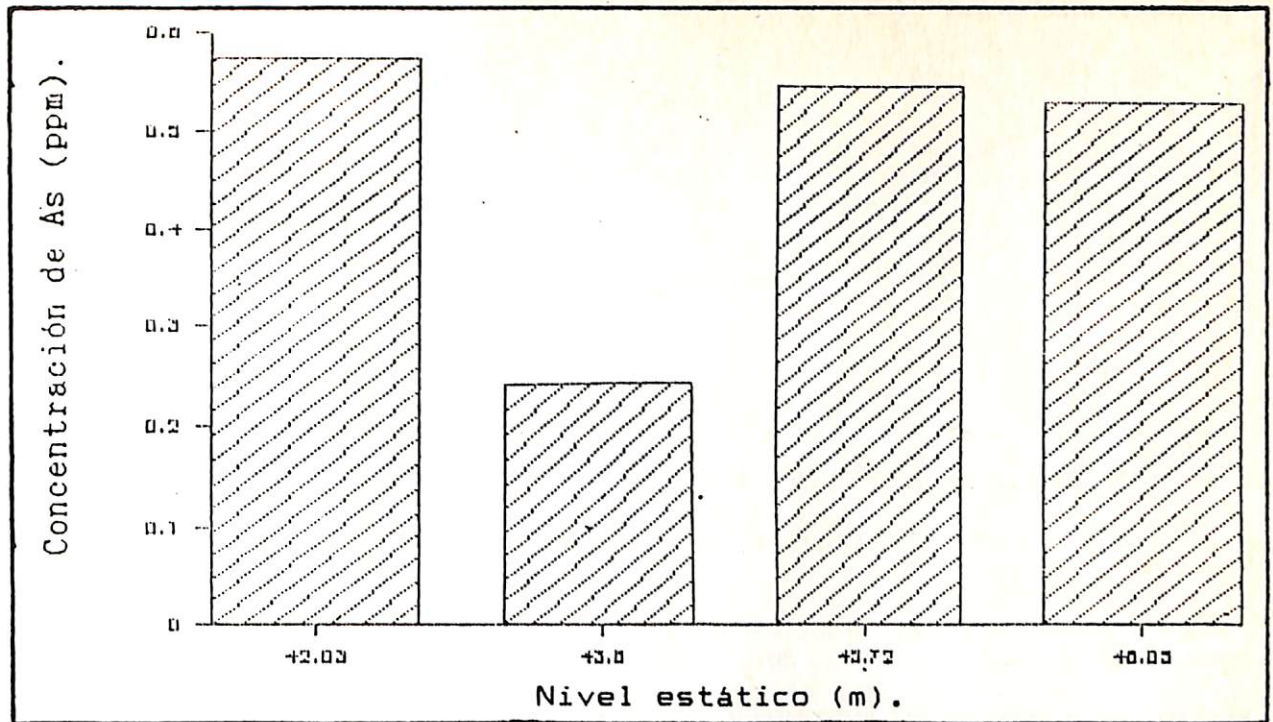


Figura 4.19 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 1339. Tlahualilo, Durango.

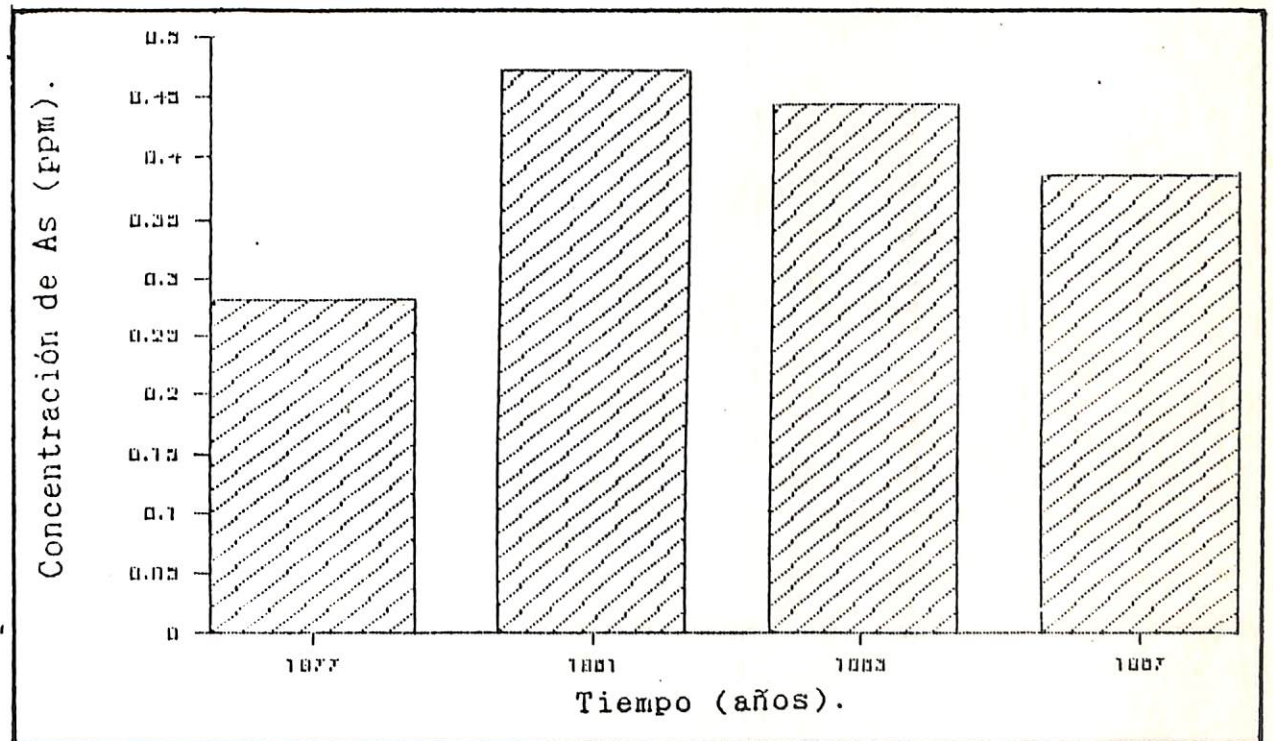


Figura 4.20 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 1339. Tlahualilo, Durango.

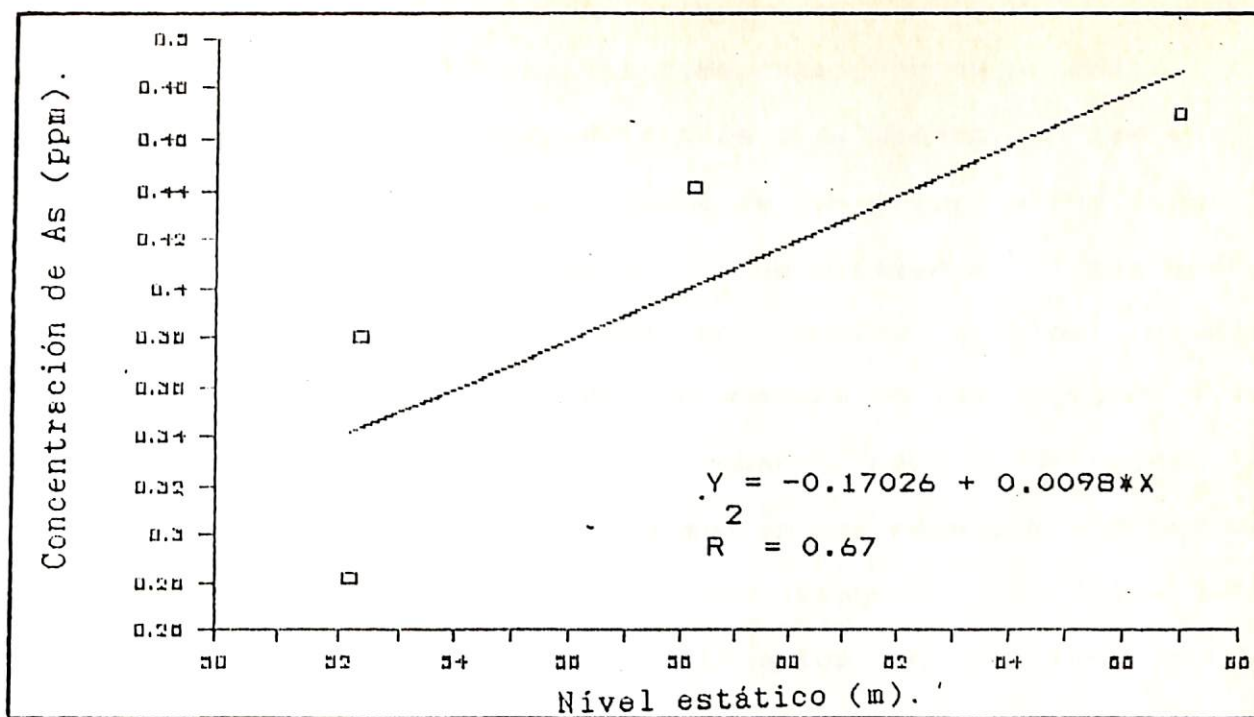


Figura 4.21 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 2745. Tlahualilo, Durango.

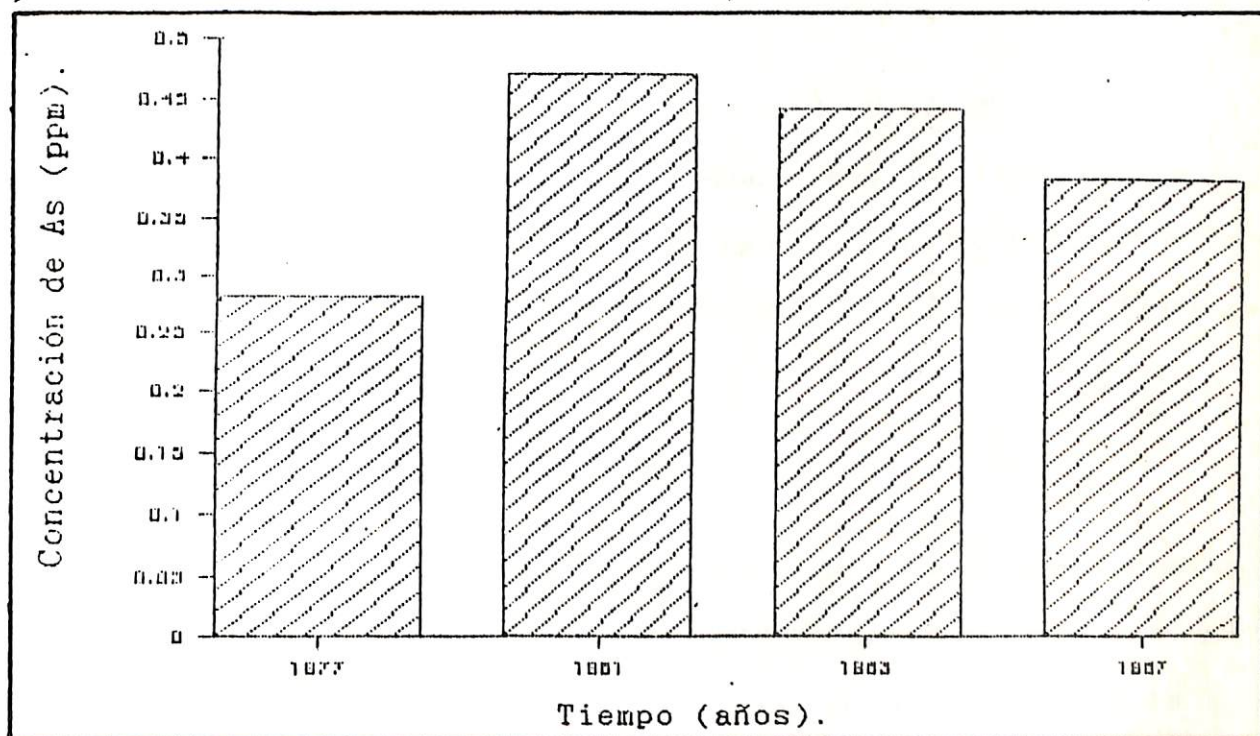


Figura 4.22 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 2745. Tlahualilo, Durango.

muestran las gráficas del comportamiento de arsénico, con respecto a los niveles estáticos y el tiempo, en las que se puede observar que en algunos de los pozos estudiados la concentración de arsénico tiende a bajar o a mantenerse aproximadamente constante en función de los niveles estáticos y el tiempo como se muestra en las (Figuras 4.13, 4.14, 4.17, y 4.19) más sin embargo, para otros pozos las concentraciones tienden a aumentar con respecto a estas dos variables como se muestra en las (Figuras 4.15, 4.16, 4.18, 4.21, y 4.22) el modelo obtenido en función de las coordenadas es el siguiente.

$$Y = 0.199093 + 0.013033 \cdot X_1 + 0.000424 \cdot X_2 + 0.000223 \cdot X_1^2 + 0.000274 \cdot X_2^2$$

$$R^2 = 0.76 \quad \text{Desv. std.} = 0.045$$

De este modelo, se deduce que las concentraciones de arsénico tienden a aumentar hacia el Norte y Noreste donde se localizan los municipios de Tlahualilo y Francisco I. Madero.

#### Area Matamoros - Viesca.

En esta área, se observó que las concentraciones de arsénico cambian a través del tiempo, y con el nivel estático como se muestra en las (Figuras 4.23 a la 4.26) donde se observa que las concentraciones de arsénico se encuentran muy relacionadas con la profundidad del nivel estático y el tiempo, obteniéndose coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.93 a 0.99.

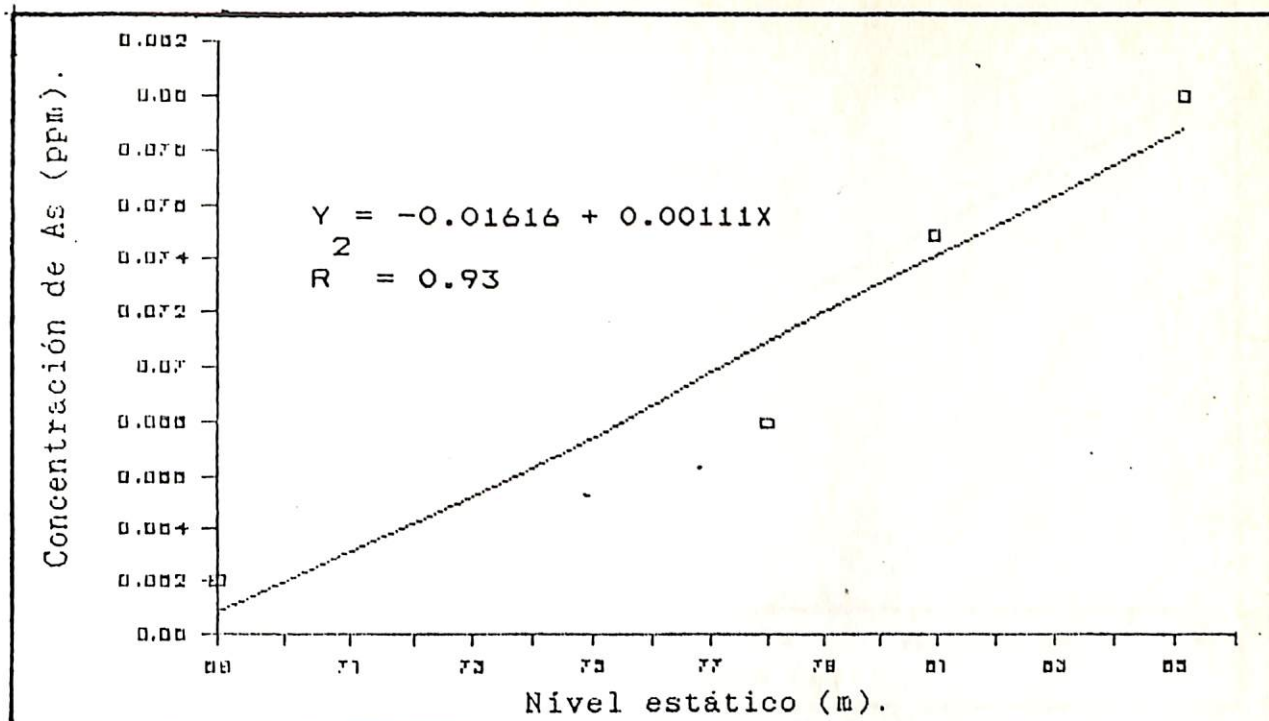


Figura 4.23 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 1956. Matamoros, Coahuila.

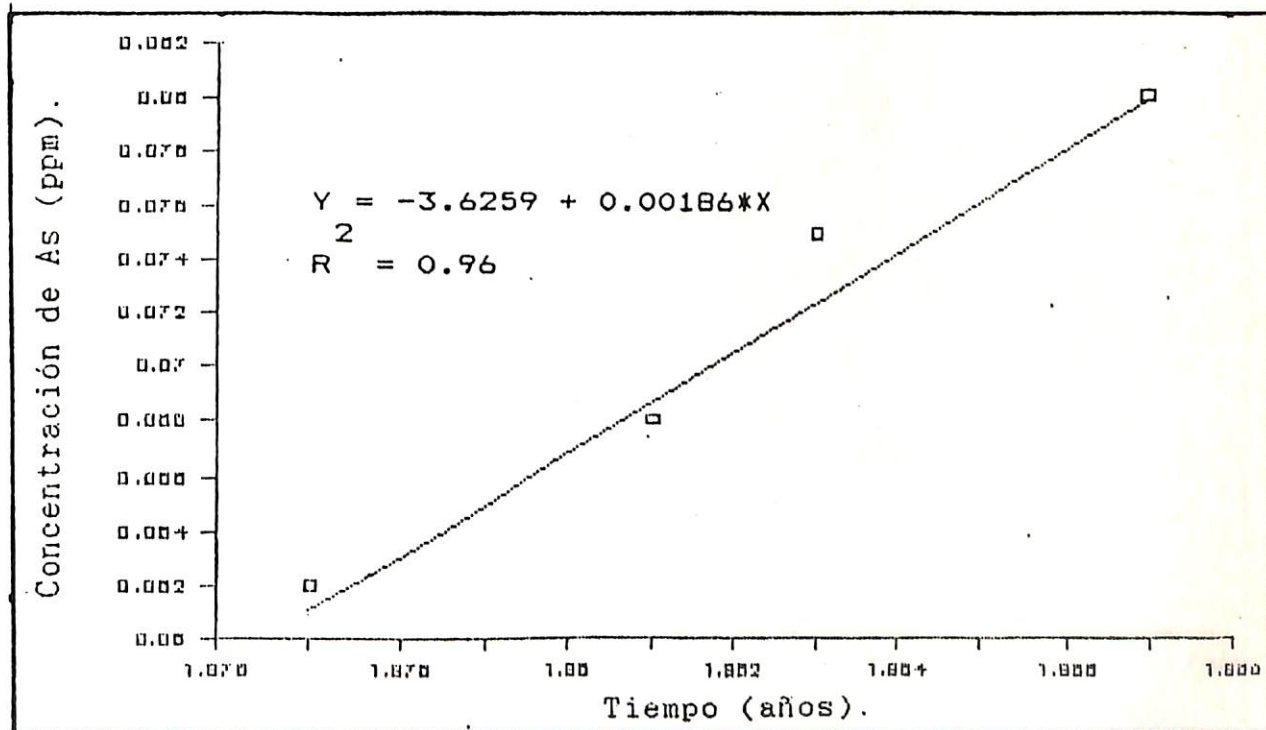


Figura 4.24 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 1956. Matamoros, Coahuila.

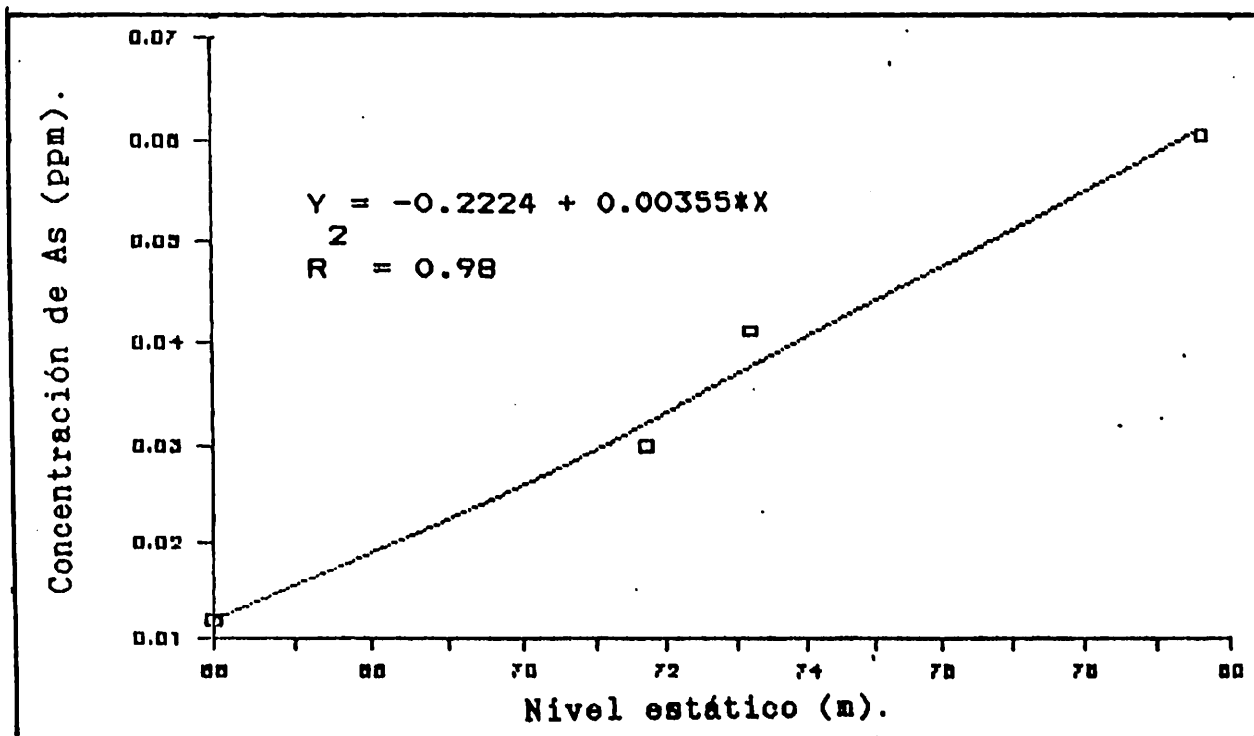


Figura 4.25 Comportamiento del arsénico con respecto a los niveles estáticos pozo 2722. Viesca, Coahuila.

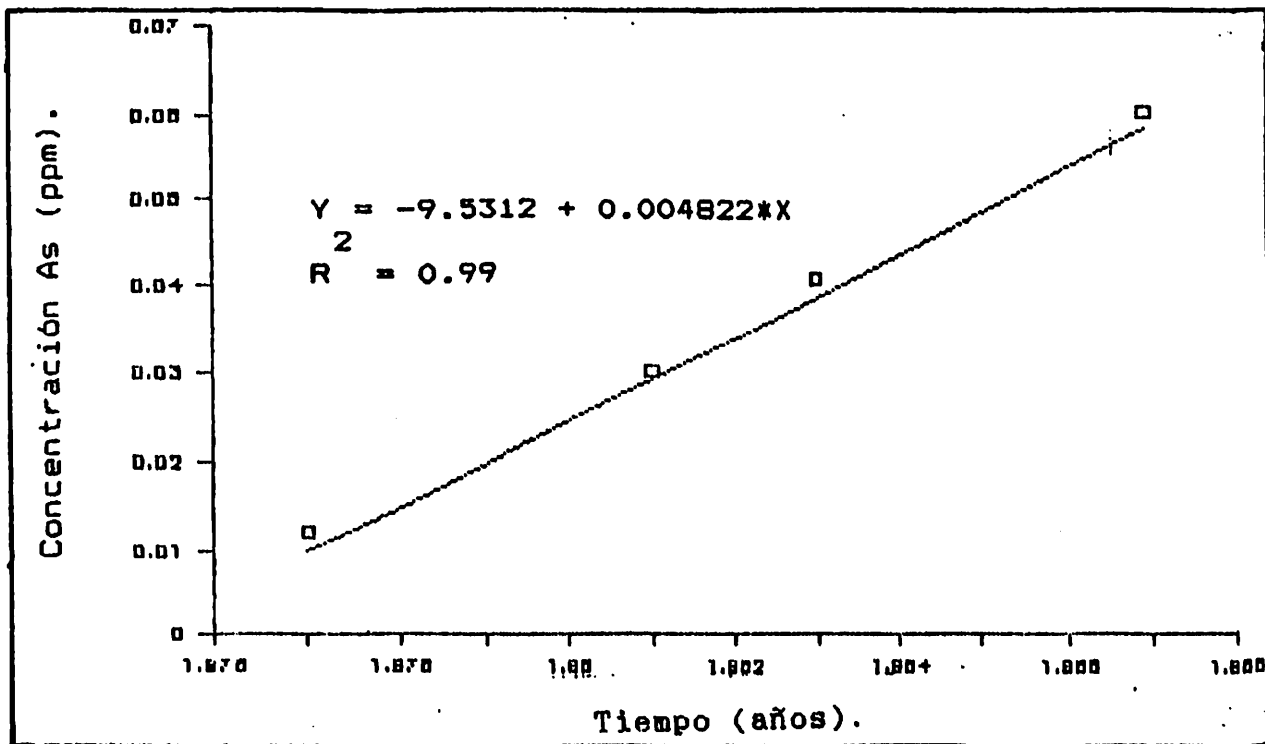


Figura 4.26 Comportamiento del arsénico con respecto al tiempo pozo 2722. Viesca, Coahuila.



El modelo encontrado es el siguiente:

$$Y = -0.12644 - 0.00404*X_1 + 0.002754*X_2 + 0.00046*X_3 + 0.00001*X_1^2 + 0.000304*X_2^2 + 0.000285*X_1 * X_2$$

R = 0.68                      Desv. std. = 0.017

Donde:

Y = Concentración de arsénico (ppm)

X = Latitud del pozo (km)

X<sub>1</sub> = Longitud del pozo (km)

X<sub>2</sub> = Nivel estático (m)

La parte más afectada se ubica en la porción central de los dos municipios donde se observan concentraciones de 0.03 a 0.3 ppm de As (Figuras 4.1 a la 4.4) la cual coincide con la superficie de mayor explotación de acuífero (Figura 3.1). Dena (1984) indica que esta zona presenta mayores efectos de sobre explotación, lo que demuestra que las aportaciones del acuífero no se distribuyen uniformemente en toda el área, sino que se concentran a la entrada de la región entre la sierra de las Noas y la de Jimulco.

## CONCLUSIONES

1. Las concentraciones de arsénico en el agua del acuífero de la Región Lagunera son más fuertes en los municipios de Francisco I. Madero, San Pedro, Matamoros Y Viesca, por parte del estado de Coahuila y Tlahualilo por parte del estado de Durango.
2. En los municipios de Gómez Palacio y Torreón las concentraciones de arsénico son generalmente inferiores al máximo permisible pero existen algunos pozos con tendencias de contaminación.
3. En el área San Pedro - Francisco I. Madero, las concentraciones de arsénico muestran tendencias bien definidas hacia el Noreste, donde las concentraciones de arsénico parecen depender más de la coordenadas de cada pozo y no de los niveles estáticos y el tiempo, esto puede ser debido a que hacia el Noreste se localizan dos sierras formadas por rocas ígneas de las que se han reportado concentraciones de 5.0 ppm de As ( Rankama y Sahama, 1962).
4. Para el área Tlahualilo - Gómez Palacio, las concentraciones de arsénico tienden a

aumentar hacia el Norte y Noroeste, donde se ubican los municipios de Tlahualilo y Francisco I. Madero; existiendo algunos pozos que muestran tendencias a aumentar su concentración a través del tiempo.

5. En el área Matamoros Viesca, las distribuciones de arsénico muestran tendencias similares al comportamiento de los niveles estáticos, por lo que se concluye que la sobre explotación para esta área si afecta la calidad del agua.
6. No se pudo apreciar alguna relación bien definida, entre las concentraciones de arsénico con los niveles estáticos y el tiempo para las áreas de San Pedro, Francisco I. Madero, Tlahualilo y Gómez Palacio.
7. Debido a que las concentraciones dependen más de la localización del pozo, se puede inferir que el problema es de tipo geológico, por lo que se recomienda para futuros estudios analizar los cortes geológicos de cada pozo.

## RESUMEN

En el acuífero principal de la Región Lagunera, que se ubica entre los Estados de Coahuila y Durango, México; se llevó a cabo el presente estudio, con el objetivo de observar el comportamiento del arsénico en el espacio y tiempo., para poder definir áreas críticas de contaminación por arsénico en el acuífero de la Región Lagunera. Se propuso además un modelo del comportamiento de arsénico, donde la concentración de arsénico (y) esta en función de las coordenadas de cada pozo (latitud y longitud), nivel estático, cota del brocal y tiempo. Para lo cual se recopiló información de la contaminación de arsénico en 50 pozos de bombeo de la red piloto, distribuidos al azar de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Cd Lerdo Durango., para los años de 1977, 1981, 1983 y 1987; Se recopilaron además las coordenadas, niveles estáticos y cota del brocal, de cada pozo; los resultados indican que los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero y Tlahualilo son los más fuertemente afectados, donde las concentraciones superan con facilidad al máximo permisible de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En los municipios de Matamoros y Viesca, las concentraciones se presentan muy variables y con tendencias de tipo concéntrico, existiendo valores desde 0.02 hasta

0.3, siendo la parte central la más afectada.

Para los municipios de Torreón, Lerdo, y Gómez Palacio, las concentraciones son generalmente inferiores al máximo permitido, aunque existen algunos pozos que muestran tendencias a la contaminación.

El modelo propuesto fué evaluado para tres áreas que comprenden el acuífero, las cuales son: Area San Pedro-Francisco I. Madero, Area Tlahualilo - Gomez Palacio y Area Matamoros - Viesca; en las cuales se encontró que las concentraciones de arsénico se encuentran más correlacionadas con las localidades de los pozos (latitud y longitud) no lográndose apreciar una correlación bien definida entre las variables tiempo, niveles estáticos y cota del brocal; por lo que se puede inferir que este problema es de tipo geológico.

## LITERATURA CITADA

- Actividades Desarrolladas por el Sector Salud 1986. Para el estudio y control del Hidroarsenicismo en Comarca - Lagunera. Informe. Torreón, Coahuila, México. 30 p.
- Alcantara B., M.C. 1973. Química inorgánica moderna. ed. ECLALSA. México. p. 520-523.
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE) 1979. Third Domestic Water Quality Symposium (for individual water systems). ASAE publication 1-79 St. Louis Missouri. p. 21- 29
- Benitez., A. 1973. Captación de aguas subterráneas, nuevos métodos de prospección y de cálculos de caudales. 2 ed. Dosat. Madrid. p. 579-585
- Bracho F., A.R. 1971. Intoxicación arsenical crónica ó arsenicismo crónico en la Comarca Lagunera. Tesis. Escuela de Medicina. Universidad Autónoma de Coahuila. UAC. Torreón, Coahuila, México. 150 p.
- Caballero G., M.L. 1986. Evaluación General del Hidroarsenicismo en la Región Lagunera. Tesis. Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón Coah, México. p.90
- Cabo J., R., Puente de la. y Catalan. 1972. Bacteriología y Potabilidad del Agua. Editorial BLUME. España. p. 131- 136
- Custodio., E. y M. Llamas D. (Ed.). 1976. Hidrología Subterránea. Tomo II. Ediciones Omega, S.A. España p. 1886-1926
- Davis, N.S., J.M.R. De Wiest. 1971. Hidrogeología. Ediciones ARIEL. Barcelona. España. p. 160-165.
- Dena L., F.J. 1984. Comportamiento del Acuífero de la Comarca Lagunera durante el período de 1977 a 1983. Tesis. Licenciatura. Escuela Superior de Agricultura y Zootecnia. Venecia, Durango, México. p. 104
- Fair, G.M., J.C. Geyer y D.A. Okun. 1971. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Tomo I. Editorial Limusa-Wiley, S.A. México. p. 14-34

- García., E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. Ed. Universidad Autónoma de México. (UNAM).
- Goldschmidt V., M. y C. Peters L. 1934. Zur Geochemie des Arsens. Ibid, Math. physik. Klasse, IV, W.F., 1, Numero 2, p.11.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 1981a Chihuahua. Carta de Climas. Escala 1:1'000,000. Color varios Secretaría de Programación y Presupuesto. (SPP). México.
- 
- 1981b Chihuahua. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales. Escala 1:1'000,000. Color varios. (SPP). México.
- 
- 1981c. Torreón. Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas. G 13-9. Escala 1:250,000. Color Varios. (SPP). México.
- 
- 1981d. Chihuahua. Carta Geológica. Escala 1: 1'000,000. Color varios. (SPP). México.
- 
- 1982a Chihuahua. Carta Edafológica. Escala 1: 1'000,000. Color varios. (SPP). México.
- 
- 1982b. Chihuahua. Carta de Uso Potencial. Agricultura Escala 1:1'000,000. Color varios. (SPP). México.
- Kirk, R.E. y D.F. Othmer (Ed.) 1961. Enciclopedia de tecnología química. Unión Tipográfica. Editorial Hispano Americana. Tomo II. México. p. 736 - 752.
- Linsley, R.k., M.A. Koler y L.H. Paulhs. 1977. Hidrología para ingenieros. 2a ed. Mc Graw-Hill. México. p.166
- Mendoza G.,G y D. Gámez S. 1974. Remoción de arsénico de las aguas naturales. Universidad Autónoma de México (UNAM). p. 103-128.
- Noddack, I. y Walter. 1930. Die Haufigkeit der Chemischen elemente. Naturwissenschaften 18, p. 757.
- 
1934. Die geochemischen Verteilungs Koeffizienten, der elemente. Suensk Kem. Tid. 46, p.173.

Rankama, K.D. y G.D. Sahama, H. 1962. Geoquímica. Editorial Aguilar p. 687-690.

Schoeller., H. 1969. Pollution artificielle des eaux souterraines. Bull. International Association of Scientific Hydrology. Numero 3, año 14, p. 179-183.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1977.. Estadísticas de Calidad del Agua. Lerdo, Durango, México.

---

1983. Estadísticas de Calidad del Agua. Lerdo, Durango, México.

---

1984. Uso y Aprovechamiento del Agua en la Comarca Lagunera. Lerdo, Durango, México. 20 p

---

1987. Estadísticas de Calidad del Agua. Lerdo, Durango, México.

Ullmann y Fritz (Ed.). 1931. Enciclopedia Química Industrial. Tomos, II, XI. Editorial Gustavo Gil, S.A. p.451- 453, 513.

Verry., M.J. 1968. El agua su calidad y tratamiento. American Water Works Association 2a ed. Editorial UTEAHA. p.55-59.



A P E N D I C E

Cuadro A1. Relación de pozos estudiados para el Municipio de San Pedro Coahuila.

| Número de pozo | Concentración (As)<br>Y | Latitud (km) | Longitud (km) | N.Estático (m) | Tiempo (años) |
|----------------|-------------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
|                |                         | X1           | X2            | X3             | X4            |
| 900            | 0.163                   | -19.75       | 28.28         | 36.99          | 1977          |
| 913            | 0.178                   | -17.33       | 32.14         | 22.90          | 1977          |
| 1467           | 0.110                   | -4.14        | 32.38         | 59.14          | 1977          |
| 1515           | 0.226                   | -10.96       | 32.69         | 29.10          | 1977          |
| 1675           | 0.194                   | -12.02       | 39.31         | 38.00          | 1977          |
| 1695           | 0.468                   | -2.14        | 30.52         | 56.80          | 1977          |
| 1909           | 0.115                   | -16.37       | 25.87         | 65.50          | 1977          |
| 900            | 0.110                   | -19.75       | 28.28         | 37.99          | 1981          |
| 913            | 0.098                   | -17.33       | 32.14         | 34.00          | 1981          |
| 1467           | 0.260                   | -4.14        | 32.38         | 68.24          | 1981          |
| 1515           | 0.184                   | -10.96       | 32.69         | 30.00          | 1981          |
| 1675           | 0.165                   | -12.02       | 39.31         | 39.00          | 1981          |
| 1695           | 0.310                   | -2.14        | 30.52         | 55.80          | 1981          |
| 1909           | 0.094                   | -16.37       | 25.87         | 67.50          | 1981          |
| 900            | 0.042                   | -19.75       | 28.28         | 34.95          | 1983          |
| 913            | 0.105                   | -17.33       | 32.14         | 25.18          | 1983          |
| 1467           | 0.400                   | -4.14        | 32.38         | 56.17          | 1983          |
| 1515           | 0.195                   | -10.96       | 32.69         | 50.70          | 1983          |
| 1675           | 0.342                   | -12.02       | 39.31         | 39.23          | 1983          |
| 1695           | 0.497                   | -2.14        | 30.52         | 50.82          | 1983          |
| 1909           | 0.157                   | -16.37       | 25.87         | 62.07          | 1983          |
| 900            | 0.150                   | -19.75       | 28.28         | 42.05          | 1987          |
| 913            | 0.110                   | -17.33       | 32.14         | 30.64          | 1987          |
| 1467           | 0.380                   | -4.14        | 32.38         | 62.70          | 1987          |
| 1515           | 0.320                   | -10.96       | 32.69         | 51.80          | 1987          |
| 1675           | 0.220                   | -12.02       | 39.31         | 42.87          | 1987          |
| 1695           | 0.260                   | -2.14        | 30.52         | 60.18          | 1987          |
| 1909           | 0.200                   | -16.37       | 25.87         | 71.88          | 1987          |

Cuadro A2. Relación de pozos estudiados para el Municipio de Fco.I. Madero Coahuila.

| Número de pozo | Concentración (As) Y | Latitud (km) | Longitud (km) | N.Estático (m) | Tiempo (años) |
|----------------|----------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
|                |                      | X1           | X2            | X3             | X4            |
| 852            | 0.113                | -17.23       | 16.96         | 72.10          | 1977          |
| 860            | 0.010                | -15.85       | 21.79         | 48.07          | 1977          |
| 975            | 0.346                | -2.62        | 16.78         | 71.43          | 1977          |
| 1000           | 0.293                | -5.98        | 18.83         | 74.27          | 1977          |
| 2510           | 0.684                | 9.39         | 25.90         | 33.25          | 1977          |
| 852            | 0.052                | -17.23       | 16.96         | 73.50          | 1981          |
| 860            | 0.062                | -15.85       | 21.79         | 75.40          | 1981          |
| 975            | 0.364                | -2.62        | 16.78         | 81.00          | 1981          |
| 1000           | 0.258                | -5.98        | 18.83         | 83.90          | 1981          |
| 2510           | 0.642                | 9.39         | 25.90         | 34.50          | 1981          |
| 852            | 0.050                | -17.23       | 16.96         | 74.56          | 1983          |
| 860            | 0.034                | -15.85       | 21.79         | 74.65          | 1983          |
| 975            | 0.242                | -2.62        | 16.78         | 78.14          | 1983          |
| 1000           | 0.272                | -5.98        | 18.83         | 79.48          | 1983          |
| 2510           | 0.593                | 9.39         | 25.90         | 46.04          | 1983          |
| 852            | 0.050                | -17.23       | 16.96         | 88.12          | 1987          |
| 860            | 0.070                | -15.85       | 21.79         | 76.16          | 1987          |
| 975            | 0.220                | -2.62        | 16.78         | 82.91          | 1987          |
| 1000           | 0.080                | -5.98        | 18.83         | 79.35          | 1987          |
| 2510           | 0.660                | 9.39         | 25.90         | 44.93          | 1987          |

Cuadro A3. Relación de pozos estudiados para el Municipio de Tlahualilo Durango.

| Número de pozo | Concentración (As) Y | Latitud (km) | Longitud (km) | N.Estático (m) | Tiempo (años) |
|----------------|----------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
|                |                      | X1           | X2            | X3             | X4            |
| 1339           | 0.240                | 13.80        | 8.48          | 43.80          | 1977          |
| 1576           | 0.126                | -0.34        | -16.15        | 59.07          | 1977          |
| 2737           | 0.106                | 4.33         | -1.92         | 50.51          | 1977          |
| 2745           | 0.282                | 1.56         | -18.39        | 52.20          | 1977          |
| 1339           | 0.573                | 13.80        | 8.48          | 42.03          | 1981          |
| 1576           | 0.146                | -0.34        | -16.15        | 71.49          | 1981          |
| 2737           | 0.178                | 4.33         | -1.92         | 66.18          | 1981          |
| 2745           | 0.470                | 1.56         | -18.39        | 67.00          | 1981          |
| 1339           | 0.546                | 13.80        | 8.48          | 45.72          | 1983          |
| 1576           | 0.273                | -0.34        | -16.15        | 64.56          | 1983          |
| 2745           | 0.441                | 1.56         | -18.39        | 58.27          | 1983          |
| 2984           | 0.313                | -1.63        | -7.48         | 57.78          | 1983          |
| 1339           | 0.530                | 13.80        | 8.48          | 46.05          | 1987          |
| 1576           | 0.190                | -0.34        | -16.15        | 64.16          | 1987          |
| 2737           | 0.150                | 4.33         | -1.92         | 62.31          | 1987          |
| 2745           | 0.380                | 1.56         | -18.39        | 52.38          | 1987          |

Cuadro A4. Relación de pozos estudiados para el Municipio de Gómez Palacio Dgo.

| Número de pozo | Concentración (As)<br>Y | Latitud (km)<br>X1 | Longitud (km)<br>X2 | N.Estático (m)<br>X3 | Tiempo (años)<br>X4 |
|----------------|-------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 34             | 0.050                   | -32.79             | -6.59               | 57.25                | 1977                |
| 158            | 0.172                   | -15.22             | -6.58               | 66.76                | 1977                |
| 168            | 0.169                   | -10.60             | -6.26               | 53.32                | 1977                |
| 172            | 0.043                   | -16.04             | -14.01              | 40.41                | 1977                |
| 209            | 0.034                   | -32.16             | -12.44              | 61.12                | 1977                |
| 268            | 0.040                   | -19.62             | 2.03                | 73.48                | 1977                |
| 281            | 0.038                   | -23.04             | 3.02                | 87.52                | 1977                |
| 297            | 0.003                   | -26.50             | 2.49                | 65.30                | 1977                |
| 607            | 0.069                   | -10.12             | 2.54                | 63.83                | 1977                |
| 1517           | 0.076                   | -13.34             | -9.12               | 61.00                | 1977                |
| 1612           | 0.065                   | -18.54             | -16.38              | 75.18                | 1977                |
| 34             | 0.026                   | -32.79             | -6.59               | 66.70                | 1981                |
| 158            | 0.153                   | -15.22             | -6.58               | 77.00                | 1981                |
| 168            | 0.122                   | -10.60             | -6.26               | 55.08                | 1981                |
| 172            | 0.038                   | -16.04             | -14.01              | 43.92                | 1981                |
| 209            | 0.042                   | -32.16             | -12.44              | 75.60                | 1981                |
| 268            | 0.026                   | -19.62             | 2.03                | 83.97                | 1981                |
| 281            | 0.015                   | -23.04             | 3.02                | 88.40                | 1981                |
| 297            | 0.025                   | -26.50             | 2.49                | 71.00                | 1981                |
| 1517           | 0.088                   | -13.34             | -9.12               | 81.51                | 1981                |
| 1612           | 0.041                   | -18.54             | -16.38              | 76.50                | 1981                |
| 34             | 0.023                   | -32.79             | -6.59               | 65.10                | 1983                |
| 158            | 0.203                   | -15.22             | -6.58               | 70.52                | 1983                |
| 172            | 0.050                   | -16.04             | -14.01              | 44.92                | 1983                |
| 209            | 0.061                   | -32.16             | -12.44              | 81.48                | 1983                |
| 268            | 0.019                   | -19.62             | 2.03                | 86.10                | 1983                |
| 281            | 0.023                   | -23.04             | 3.02                | 83.02                | 1983                |
| 297            | 0.015                   | -26.50             | 2.49                | 79.10                | 1983                |
| 607            | 0.038                   | -10.12             | 2.54                | 70.61                | 1983                |
| 1517           | 0.061                   | -13.34             | -9.12               | 72.37                | 1983                |
| 1612           | 0.053                   | -18.54             | -16.38              | 68.25                | 1983                |
| 34             | 0.020                   | -32.79             | -6.59               | 68.80                | 1987                |
| 172            | 0.090                   | -16.04             | -14.01              | 47.10                | 1987                |
| 209            | 0.085                   | -32.16             | -12.44              | 92.42                | 1987                |
| 268            | 0.040                   | -19.62             | 2.03                | 87.35                | 1987                |
| 281            | 0.040                   | -23.04             | 3.02                | 86.07                | 1987                |
| 297            | 0.030                   | -26.50             | 2.49                | 104.50               | 1987                |
| 607            | 0.050                   | -10.12             | 2.54                | 73.58                | 1987                |
| 1517           | 0.070                   | -13.34             | -9.12               | 73.61                | 1987                |
| 1612           | 0.070                   | -18.54             | -16.38              | 79.28                | 1987                |

Cuadro A5. Relación de pozos estudiados para el Municipio de Torreón Coahuila.

| Número de pozo | Concentración (As) Y | Latitud (km) X1 | Longitud (km) X2 | N. Estático (m) X3 | Tiempo (años) X4 |
|----------------|----------------------|-----------------|------------------|--------------------|------------------|
| 336            | 0.012                | -38.68          | 3.02             | 77.75              | 1977             |
| 342            | 0.002                | -35.80          | 2.96             | 73.30              | 1977             |
| 367            | 0.094                | -29.60          | 8.00             | 73.21              | 1977             |
| 407            | 0.018                | -40.12          | 11.41            | 78.25              | 1977             |
| 422            | 0.001                | -33.85          | 10.20            | 77.00              | 1977             |
| 1532           | 0.025                | -49.24          | 11.10            | 97.75              | 1977             |
| 336            | 0.011                | -38.68          | 3.02             | 83.53              | 1981             |
| 342            | 0.082                | -35.80          | 2.96             | 87.86              | 1981             |
| 367            | 0.063                | -29.60          | 8.00             | 89.00              | 1981             |
| 407            | 0.010                | -40.12          | 11.41            | 95.00              | 1981             |
| 422            | 0.010                | -33.85          | 10.20            | 92.60              | 1981             |
| 1532           | 0.012                | -49.24          | 11.10            | 102.05             | 1981             |
| 2349           | 0.115                | -46.47          | 11.24            | 96.00              | 1981             |
| 336            | 0.016                | -38.68          | 3.02             | 87.53              | 1983             |
| 342            | 0.015                | -35.80          | 2.96             | 87.86              | 1983             |
| 407            | 0.019                | -40.12          | 11.41            | 96.12              | 1983             |
| 422            | 0.095                | -33.85          | 10.20            | 87.64              | 1983             |
| 1532           | 0.016                | -49.24          | 11.10            | 77.38              | 1983             |
| 2349           | 0.116                | -46.47          | 11.24            | 73.03              | 1983             |
| 336            | 0.020                | -38.68          | 3.02             | 76.80              | 1987             |
| 407            | 0.010                | -40.12          | 11.41            | 104.43             | 1987             |
| 422            | 0.010                | -33.85          | 10.20            | 103.84             | 1987             |
| 1532           | 0.018                | -49.24          | 11.10            | 121.56             | 1987             |
| 2349           | 0.130                | -46.47          | 11.24            | 111.51             | 1987             |

Cuadro A6. Relación de pozos estudiados para el Municipio de Matamoros Coahuila.

| Número de pozo | Concentra      | Latitud    | Longitud   | N.Estático | Tiempo       |
|----------------|----------------|------------|------------|------------|--------------|
|                | ción (As)<br>Y | (km)<br>X1 | (km)<br>X2 | (m)<br>X3  | (años)<br>X4 |
| 729            | 0.071          | -26.04     | 15.40      | 69.70      | 1977         |
| 765            | 0.020          | -32.65     | 18.80      | 53.06      | 1977         |
| 1212           | 0.062          | -54.71     | 30.10      | 95.80      | 1977         |
| 1228           | 0.043          | -53.62     | 13.45      | 88.40      | 1977         |
| 1931           | 0.006          | -22.42     | 20.35      | 35.51      | 1977         |
| 1956           | 0.062          | -35.06     | 23.95      | 69.00      | 1977         |
| 2049           | 0.090          | -38.59     | 19.59      | 78.03      | 1977         |
| 520            | 0.037          | -22.55     | 11.37      | 74.90      | 1981         |
| 729            | 0.025          | -26.04     | 15.40      | 78.00      | 1981         |
| 760            | 0.021          | -31.84     | 14.68      | 90.50      | 1981         |
| 765            | 0.037          | -32.65     | 18.80      | 61.00      | 1981         |
| 1212           | 0.050          | -54.71     | 30.10      | 110.30     | 1981         |
| 1228           | 0.036          | -53.62     | 13.45      | 100.44     | 1981         |
| 1325           | 0.081          | -48.57     | 27.14      | 93.85      | 1981         |
| 1931           | 0.009          | -22.42     | 20.35      | 40.00      | 1981         |
| 1956           | 0.068          | -35.06     | 23.95      | 87.00      | 1981         |
| 1975           | 0.134          | -41.87     | 37.22      | 86.25      | 1981         |
| 2049           | 0.056          | -38.59     | 19.59      | 98.00      | 1981         |
| 520            | 0.024          | -22.55     | 11.37      | 68.72      | 1983         |
| 729            | 0.050          | -26.04     | 15.40      | 77.80      | 1983         |
| 760            | 0.018          | -31.84     | 14.68      | 93.52      | 1983         |
| 765            | 0.019          | -32.65     | 18.80      | 58.49      | 1983         |
| 1212           | 0.037          | -54.71     | 30.10      | 107.92     | 1983         |
| 1228           | 0.020          | -53.62     | 13.45      | 103.29     | 1983         |
| 1325           | 0.034          | -48.57     | 27.14      | 101.97     | 1983         |
| 1931           | 0.006          | -22.42     | 20.35      | 42.37      | 1983         |
| 1956           | 0.075          | -35.06     | 23.95      | 80.92      | 1983         |
| 1975           | 0.214          | -41.87     | 37.22      | 82.34      | 1983         |
| 2049           | 0.060          | -38.59     | 19.59      | 89.67      | 1983         |
| 520            | 0.010          | -22.55     | 11.37      | 83.72      | 1987         |
| 729            | 0.020          | -26.04     | 15.40      | 73.43      | 1987         |
| 760            | 0.020          | -31.84     | 14.68      | 100.50     | 1987         |
| 765            | 0.030          | -32.65     | 18.80      | 60.67      | 1987         |
| 1212           | 0.050          | -54.71     | 30.10      | 114.86     | 1987         |
| 1228           | 0.010          | -53.62     | 13.45      | 106.71     | 1987         |
| 1325           | 0.050          | -48.57     | 27.14      | 90.87      | 1987         |
| 1931           | 0.006          | -22.42     | 20.35      | 44.65      | 1987         |
| 1956           | 0.080          | -35.06     | 23.95      | 85.15      | 1987         |
| 1975           | 0.250          | -41.87     | 37.22      | 84.61      | 1987         |
| 2049           | 0.050          | -38.59     | 19.59      | 95.68      | 1987         |

Cuadro A7. Relación de pozos estudiados para el Municipio de Viesca Coahuila.

| Número de pozo | Concentración (As)<br>Y | Latitud (km) | Longitud (km) | N.Estático (m) | Tiempo (años) |
|----------------|-------------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
|                |                         | X1           | X2            | X3             | X4            |
| 1271           | 0.038                   | -61.17       | 36.71         | 28.92          | 1977          |
| 1983           | 0.031                   | -57.96       | 24.27         | 83.60          | 1977          |
| 2234           | 0.300                   | -46.58       | 41.59         | 65.84          | 1977          |
| 3054           | 0.034                   | -62.97       | 38.97         | 30.80          | 1977          |
| 1271           | 0.062                   | -61.17       | 36.71         | 38.45          | 1981          |
| 1983           | 0.025                   | -57.96       | 24.27         | 88.30          | 1981          |
| 2234           | 0.212                   | -46.58       | 41.59         | 73.50          | 1981          |
| 3054           | 0.042                   | -62.97       | 38.97         | 40.67          | 1981          |
| 1097           | 0.050                   | -69.53       | 25.96         | 86.35          | 1983          |
| 1271           | 0.068                   | -61.17       | 36.71         | 37.12          | 1983          |
| 1983           | 0.052                   | -57.96       | 24.27         | 88.47          | 1983          |
| 2234           | 0.187                   | -46.58       | 41.59         | 65.64          | 1983          |
| 3054           | 0.021                   | -62.97       | 38.97         | 36.18          | 1983          |
| 1097           | 0.070                   | -69.53       | 25.96         | 103.98         | 1987          |
| 1271           | 0.050                   | -61.17       | 36.71         | 57.30          | 1987          |
| 1983           | 0.040                   | -57.96       | 24.27         | 83.37          | 1987          |
| 2234           | 0.160                   | -46.58       | 41.59         | 73.87          | 1987          |
| 3054           | 0.300                   | -62.97       | 38.97         | 44.43          | 1987          |

Cuadro AB. Relación de pozos estudiados para el Municipio de Lerdo Durango.

| Número de pozo | Concentración (As)<br>Y | Latitud (km)<br>X1 | Longitud (km)<br>X2 | N.Estático (m)<br>X3 | Tiempo (años)<br>X4 |
|----------------|-------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 214            | 0.040                   | -34.02             | -13.67              | 59.95                | 1977                |
| 1846           | 0.042                   | -59.36             | -0.16               | 60.20                | 1977                |
| 1856           | 0.010                   | -63.62             | -2.76               | 68.46                | 1977                |
| 2344           | 0.053                   | -37.30             | -12.20              | 62.21                | 1977                |
| 2539           | 0.024                   | -59.60             | 1.00                | 63.62                | 1977                |
| 2576           | 0.030                   | -53.93             | -22.48              | 125.50               | 1977                |
| 2592           | 0.010                   | -53.36             | -29.79              | 5.99                 | 1977                |
| 2604           | 0.041                   | -40.72             | -26.30              | 59.42                | 1977                |
| 2612           | 0.051                   | -43.87             | -21.23              | 20.45                | 1977                |
| 214            | 0.032                   | -34.02             | -13.67              | 72.45                | 1981                |
| 1846           | 0.051                   | -59.36             | -0.16               | 71.69                | 1981                |
| 1856           | 0.033                   | -63.62             | -2.76               | 70.10                | 1981                |
| 2344           | 0.043                   | -37.30             | -12.20              | 76.95                | 1981                |
| 2539           | 0.020                   | -59.60             | 1.00                | 72.08                | 1981                |
| 2576           | 0.036                   | -53.93             | -22.48              | 29.98                | 1981                |
| 2592           | 0.030                   | -53.36             | -29.79              | 8.00                 | 1981                |
| 2604           | 0.041                   | -40.72             | -26.30              | 70.51                | 1981                |
| 2612           | 0.140                   | -43.87             | -21.23              | 25.00                | 1981                |
| 214            | 0.053                   | -34.02             | -13.67              | 76.46                | 1981                |
| 1846           | 0.037                   | -59.36             | -0.16               | 83.62                | 1983                |
| 1856           | 0.037                   | -63.62             | -2.76               | 69.87                | 1983                |
| 2344           | 0.073                   | -37.30             | -12.20              | 72.67                | 1983                |
| 2539           | 0.023                   | -59.60             | 1.00                | 82.81                | 1983                |
| 2576           | 0.042                   | -53.93             | -22.48              | 30.76                | 1983                |
| 2592           | 0.020                   | -53.36             | -29.79              | 9.25                 | 1983                |
| 2604           | 0.032                   | -40.72             | -26.30              | 100.71               | 1983                |
| 2612           | 0.042                   | -43.87             | -21.23              | 25.80                | 1983                |
| 214            | 0.060                   | -34.02             | -13.67              | 79.28                | 1987                |
| 1846           | 0.040                   | -59.36             | -0.16               | 90.25                | 1987                |
| 1856           | 0.050                   | -63.62             | -2.76               | 74.16                | 1987                |
| 2344           | 0.050                   | -37.30             | -12.20              | 78.68                | 1987                |
| 2539           | 0.030                   | -59.60             | 1.00                | 90.86                | 1987                |
| 2576           | 0.090                   | -53.93             | -22.48              | 30.72                | 1987                |
| 2592           | 0.040                   | -53.36             | -29.79              | 7.05                 | 1987                |
| 2604           | 0.070                   | -40.72             | -26.30              | 121.78               | 1987                |
| 2612           | 0.120                   | -43.87             | -21.23              | 18.64                | 1987                |