



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO DE UNA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO
POR ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL CONTROL DE LA
CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL
VALLE DE QUERÉTARO**

T E S I S

QUE PARA PRESENTAR EL TITULO DE
I N G E N I E R O G E O F Í S I C O
P R E S E N T A :
CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ LEÓN

DIRECTOR DE TESIS: ING. F. ALEJANDRO ARROYO CARRASCO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., DICIEMBRE DE 2004





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-1184

SR. CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ LEÓN
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Francisco A. Arroyo Carrasco y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

DISEÑO DE UNA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO POR ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL CONTROL DE LA CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE QUERÉTARO

- INTRODUCCIÓN**
- I MARCO GEOHIDROLÓGICO Y GEOGRÁFICO**
- II ANÁLISIS ESTADÍSTICO**
- III ANÁLISIS DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS**
- IV DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO**
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**
- ANEXOS**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 13 de noviembre de 2003
EL DIRECTOR

M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*JAGC*gtg

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: González León
Carlos Alberto
FECHA: 28 - Enero - 2004
FIRMA: [Firma]

*No heredamos la Tierra de nuestros ancestros,
la tomamos prestada a nuestros hijos.
(Proverbio Holandés)*

Agradecimientos

A Dios y a mi Ángel, por haberme brindado la dicha de vivir, pensar y discernir entre la luz y la oscuridad.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme abierto las puertas al conocimiento.

A la Facultad de Ingeniería, la cual recordaré como un segundo hogar en la que viví y aprendí algo más que Ingeniería Geofísica.

Al Ing. Alejandro Arroyo Carrasco, ya que más que un profesor, lo considero como un buen amigo, agradeciendo su gran apoyo, conocimiento y paciencia para la creación de este trabajo y la formación de este estudiante.

A todo los profesores y personal docente, quienes sin su ayuda, conocimiento, paciencia y tolerancia no hubieran hecho de mí la persona que soy.

A los amigos, que me enseñaron el gran valor de la amistad, en especial: Pedro, Marco, Kike , Aristides, Daniel, Chucho, Dark, José, Trix, Taz, Lidia, Rubi, Isabel, Carlos Miguel, Dulce, Noe, Max, Tortas, Ari, Mauricio, Pico, Roberto, Luis, Aida, , Fernando, Nubia, Marcos, Hector, Raúl, y a todos aquellos que influyeron en mi vida para ser una mejor persona y estudiante.

Dedicatorias

A mis padres, que sin su amor, cariño, paciencia y apoyo, nunca hubiera terminado esta etapa de mi vida.

A Juan, ya que no habría podido escoger mejor hermano.

A Diana, por su amor, consejo e interés y que es para mí ese ángel que ilumina mis días en la oscuridad, mi fuente de inspiración, mi único amor.

A toda mi familia por su interés y preocupación en mis estudios.

INDICE

Introducción	
• Generalidades.	ii
• Objetivos del trabajo.	vi
Capítulo 1. Marco Geográfico y Geohidrológico de Referencia.	
1.1 Localización.	2
1.2 Vías de Comunicación.	3
1.3 Fisiografía.	4
1.4 Clima.	5
1.5 Vegetación.	7
1.6 Población y Actividades Económicas.	8
1.7 Hidrografía.	9
1.8 Geología.	10
1.9 Geología del Subsuelo.	13
1.10 Censo de Aprovechamientos.	15
1.11 Hidrometría Subterránea.	16
1.12 Piezometría.	17
1.13 Transmisividad.	21
1.14 Marco Hidrodinámico del Acuífero.	23
1.15 Tipo de Acuífero.	23
Capítulo 2. Análisis Estadístico.	
2.1 Propiedades Estadísticas.	26
2.1.1 Distribución Normal y Medidas de Posición o Tendencia Central.	26
2.1.2 Medidas de Dispersión o Variabilidad.	27
2.2 Técnica Jackknife.	27
2.3 Coeficiente de Correlación.	28
2.4 Análisis Estadístico en las Redes de Monitoreo.	28
2.5 Interpolación.	34
Capítulo 3. Análisis de los Niveles Piezométricos.	
3.1 Introducción.	37
3.2 Ciclo del Monitoreo.	41
3.3 Análisis del Comportamiento Histórico de los Niveles Piezométricos.	43
3.4 Variaciones de los Niveles a Corto Plazo.	48
3.5 Variaciones de los Niveles a Largo Plazo.	55
Capítulo 4 Diseño de la Red de Monitoreo.	
4.1 Introducción.	60
4.2 Metodología Empleada para el Establecimiento de la Red de Monitoreo del Acuífero del Valle de Querétaro.	62
4.2.1 Análisis Estadístico de los Datos Piezométricos.	62
4.3 Ecuación de Regresión y Puntos Mínimos a Medir.	68
4.4 Identificación de Zonas con Deficiencia de Datos.	71

<i>4.5 Distribución de Pozos para diseño de Red de Monitoreo.</i>	73
<i>4.5.1 Selección de los Puntos de Medición.</i>	73
<i>4.6 Frecuencia de Monitoreo.</i>	78
<i>4.7 Comparación con el Método Geoestadístico.</i>	80
<i>4.8 Análisis de Costos.</i>	81

Conclusiones y Recomendaciones.

Bibliografía.

Anexos.

Anexo 1. Conceptos Para la Construcción de Piezómetros.

Anexo 2. Costo Cuadrilla de Monitoreo.

Anexo 3. Diseño de los Piezómetros.

INDICE DE FIGURAS**Capítulo 1**

A.1	Conteo de Pozos Piloto.	ii
1.1	Localización de la Zona de Estudio.	2
1.2	Vías de Comunicación.	3
1.3	Fisiografía.	4
1.4	Climas.	5
1.5	Temperatura.	6
1.6	Precipitación.	6
1.7	Vegetación.	7
1.8	Acueducto de la Ciudad de Querétaro.	8
1.9	Hidrografía.	9
1.10	Mapa Geológico Regional.	11
1.11	Esquema Tectónico Regional.	12
1.12	Sección Geológica.	14
1.13	Distribución de los Pozos en el Periodo de 1996.	15
1.14	Hidrometría Subterránea para el Valle de Querétaro.	16
1.15	Distribución de Pozos de Bombeo para 1996.	17
1.16	Configuración de la Elevación del Nivel Estático Agosto 1990.	18
1.17	Configuración de la Elevación del Nivel Estático Diciembre 1995.	19
1.18	Configuración 3D de Elevación del Nivel Estático para Agosto de 1990.	20
1.19	Configuración 3D de Elevación del Nivel Estático para Diciembre de 1995.	20
1.20	Mapa de Conductividad de el Área de Estudio.	22

Capítulo 2

2.1	Densidad Espectral para un Proceso $x(t)$.	33
2.2	Esquema de Interpolación.	35

Capítulo 3

3.1	Esquema del Ciclo de Monitoreo.	42
3.2	Evolución de los Pozos Perforados en el Valle de Querétaro.	43
3.3	Evolución de Perforaciones Acumuladas.	44
3.4	Historial de los Pozos Medidos.	45
3.5	Mapa de Área de Usos del Agua en Agosto de 1990.	46
3.6	Mapa de Área de Usos del Agua en Diciembre de 1995.	46
3.7	Fotografías de la Zona Industrial Benito Juárez.	47
3.8	Configuración de Pozos Piloto con Mayor Bombeo en el Periodo de 1996.	48
3.9	Mapa de Distribuciones de Estaciones Meteorológicas.	49
3.10	Estación Juriquilla y Pozos 0550 y 0552.	50
3.11	Estación La Palma y Pozo 0613.	51
3.12	Estación Pueblito y Pozos 0627 y 0647.	52
3.13	Estación Querétaro y Pozos 22063 y 0870.	54
3.14	Historia de Profundidad y E.N.E.	55
3.15	Resumen de Información.	58

Capítulo 4

4.1	<i>Distribución de los Pozos para los Periodos de 1990 y 1995.</i>	63
4.2	<i>Número de Puntos contra Varianza Expresada en Error Porcentual, para el periodo de 1990.</i>	64
4.3	<i>Dirección de Gradiente Hidráulico Agosto 1990.</i>	65
4.4	<i>Número de Puntos de Medición contra Varianza Expresada en Error Porcentual, para el Periodo de Diciembre de 1995.</i>	65
4.5	<i>Dirección de Gradiente Hidráulico Diciembre 1995.</i>	66
4.6	<i>Gradiente Hidráulico en los Periodos de 1990 y 1995.</i>	66
4.7	<i>Varianza Acumulada en el Periodo de Agosto 1990.</i>	67
4.8	<i>Varianza Acumulada en el Periodo de Diciembre 1995.</i>	68
4.9	<i>Ajuste de la Función de Distribución de Errores Acumulados.</i>	69
4.10	<i>Ajuste de la Función de Distribución de Errores Acumulados.</i>	69
4.11	<i>Puntos Mínimos Necesarios para Agosto de 1990.</i>	70
4.12	<i>Puntos Mínimos Necesarios para Diciembre de 1995.</i>	70
4.13	<i>Gráfico de Desviación Estándar.</i>	71
4.14	<i>Mapa de Ausencia de Información Piezométrica.</i>	72
4.15	<i>Configuración de Derivada y Grados de Libertad para el Periodo de Agosto de 1990.</i>	74
4.16	<i>Configuración de Derivada y Grados de Libertad para el Periodo de Diciembre de 1995.</i>	75
4.17	<i>Red de Monitoreo.</i>	76
4.18	<i>Ubicación y Usos de Pozos y Piezómetros que Integran la Red de Monitoreo.</i>	77
4.19	<i>Ubicación de Áreas de Monitoreo.</i>	78
4.20	<i>Red de Monitoreo Bajo un Esquema Ideal.</i>	81

INDICE DE TABLAS

Introducción

A.1	<i>Categorías de las Redes de Monitoreo.</i>	iv
A.2	<i>Tipos de Monitoreo Específicos.</i>	V

Capítulo 1

1.1	<i>Volumen de Extracción en 1996.</i>	16
-----	---------------------------------------	----

Capítulo 3

3.1	<i>Actividades que Conllevan a la Implementación de una Red de Monitoreo.</i>	37
3.2	<i>Coordenadas Geográficas del Acuífero 2201 Valle de Querétaro</i>	39

Capítulo 4

4.1	<i>Frecuencia de Medición de la Red de Pozos Piloto.</i>	79
4.2	<i>Análisis de Costos.</i>	82



INTRODUCCIÓN

Introducción

Generalidades

El agua es fundamental para los procesos tanto ambientales como sociales e indispensable para el surgimiento y desarrollo de la vida. De aquí que existe una gran importancia en la actualidad en el manejo y administración de las aguas subterráneas; más aún, en aquellas regiones donde es significativa su participación como única fuente de abastecimiento. Por otro lado, el establecimiento de políticas de manejo pueden resultar en tareas muy complejas, si se desconocen las condiciones hidrogeológicas y socioeconómicas de la zona.

En todas las cuencas hidrológicas del país el crecimiento demográfico, industrial y agrícola ha traído como consecuencia mayores demandas de agua. Esto se ha visto acentuado en las regiones con elevaciones sobre el nivel del mar superiores a los 1400 m, que no cuentan con recursos hidráulicos superficiales suficientes para satisfacer dichas demandas. En estas cuencas se ha incrementado drásticamente el número de perforaciones profundas en los últimos años, lo que ha provocado, que el balance hidrológico se haya modificado al sobrepasar la extracción por bombeo a la recarga natural del sistema. Esto origina que en la actualidad en muchas zonas, el abastecimiento de agua se realice a costa del almacenamiento de los acuíferos.

El valle de Querétaro, ubicado en la región del bajo, no es la excepción. En los últimos 30 años ha sufrido una sobreexplotación del agua subterránea que en estos momentos pone en duda su desarrollo sustentable. Los efectos irreversibles que ha provocado el sobre bombeo, son entre otros: un acelerado descenso de los niveles de agua subterránea, la compactación y asentamiento diferencial del terreno, y agrietamientos que favorecen la transmisión directa de agua contaminada al acuífero.

Por otra parte, este valle cuenta con un historial de monitoreo de niveles de agua subterránea que se inicia desde el año de 1970 con 15 pozos piloto ⁽¹⁾, para 1990 ya se contaba con 55 pozos, 1993 con 62 y 1995 con 60. (Figura A.1)

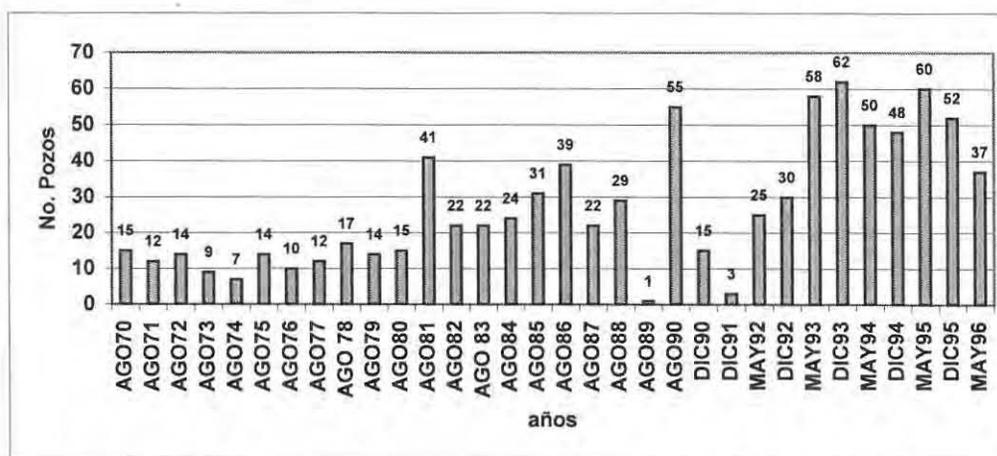


Figura A.1 *Conteo de Pozos Piloto*

Sobre esta figura se puede observar que no se tiene un control sistemático establecido de medición de por lo menos todos los pozos, situación que provoca que se incremente el número de toma de datos con el consecuente incremento económico que conlleva la actividad.

⁽¹⁾ Se considera pozo piloto a aquel que cuenta con información de profundidad de agua al nivel estático y elevación topográfica de brocal.

El monitoreo del agua subterránea es el instrumento más importante que se tiene para obtener información sobre su cantidad y calidad, para conocer:

- (i) Su situación natural.
- (ii) Los efectos de la intervención del hombre.
- (iii) Los usos actuales.

La información que se obtiene del monitoreo, apoya y complementa la evaluación de la situación que guardan los acuíferos, además, es variable en el tiempo, por lo que se hace necesario realizar mediciones periódicas.

El monitoreo del agua subterránea se refiere específicamente a la colección de datos, generalmente en sitios y profundidades a diferentes intervalos regulares de tiempo con el propósito de proveer información para ser utilizada en:

- (i) Determinar el estado actual del agua subterránea tanto cualitativa como cuantitativamente.
- (ii) Proporcionar las bases para detectar tendencias en el tiempo y en el espacio sobre la evolución de los abatimientos del agua subterránea y las variaciones de la calidad.
- (iii) Facilitar el establecimiento de las relaciones causa-efecto.
- (iv) Actualizar y calibrar los modelos matemáticos de flujo de agua subterránea y de transporte de contaminantes.

En la **tabla A.1** se presentan diversos tipos de categorías y redes de monitoreo. La operación y vigilancia de la red debe estar acoplada a sus respectivas funciones, usos, problemas y amenazas que se presentan en el acuífero. Los tipos de monitoreo a menudo se deben de ajustar a una de estas tres categorías. Algunas de las características y objetivos de los diferentes tipos de monitoreo se resumen en esta tabla.

La operación de un programa de monitoreo de agua subterránea es una de las herramientas que permite obtener información necesaria para una toma oportuna de decisiones sobre el ambiente, el desarrollo sustentable y la protección de las fuentes de agua subterránea.

Se considera que las bases técnicas de una red de monitoreo de agua subterránea consisten de un conjunto de puntos de observación principalmente en sitios donde se encuentran pozos, agujeros o lugares propiamente designados, así como pozos de observación o piezómetros.

Una red de monitoreo bien diseñada permite conocer el comportamiento de los niveles de agua subterránea y apoyar a calibrar los modelos matemáticos de flujo hidráulico subterráneo, zonas de recarga, conocer su calidad y apoyará a la planeación del crecimiento ordenado de la población.

Para poder realizar lo antes expuesto, se requiere contar con un censo de captaciones actualizado, que permita identificar en el espacio, la distribución de las captaciones, sus profundidades totales y de cámara de bombeo, sus volúmenes de explotación por usos, así como identificar las zonas con mayor explotación y abatimiento. Otro aspecto fundamental es la definición del marco físico conceptual de funcionamiento hidráulico subterráneo, para ello se requiere contar con un muy sólido conocimiento del marco geológico, además, de disponer de información histórica sobre niveles de agua, volúmenes de extracción, pruebas de bombeo, aforos, exploraciones geológicas y geofísicas, para conocer las propiedades hidrodinámicas y la geometría del acuífero como base de balances volumétricos y modelos matemáticos de simulación y sobre todo determinar la disponibilidad del recurso.

Tipos de monitoreo en aguas subterráneas			Características	Información
Estado del arte	Contexto regional	Tipos de comparación		
Estratégico	Básico/referencia para el estatus de valoración y confianza	-Estaciones de respaldo -Sistema de referencia -Monitoreo establecido por la ley	-Más allá de la influencia antropogénica local. -Relación (difundir causas antropogénicas o naturales) -Directrices internacionales y convenciones	-Situación natural. -Tendencias (natural, contaminación difundida, régimen hidráulico) -Línea base (para detectar el impacto humano), niveles de referencia. -Distribución espacial -Prevención -conformidad
Operacional	Monitoreo acoplado a las funciones/ usos para propósitos específicos de confianza, protección especial de áreas, remediación y restauración.	-Monitoreo referido. -Monitoreo de cumplimiento. Monitoreo de implementación. -Monitoreo de efectividad. -Validación.	-Acoplamiento de usos y funciones, regulaciones, leyes, directrices, actos, etc. -Protección de funciones y usos. -Modelos. -Implementación y efectividad.	-Estándares de calidad. -Criterios. -Riesgos de salud. -Riesgos ambientales. -Validación. -Pronósticos. -Efectividad de las mediciones.
Vigilancia	Prevención y vigilancia.	-Monitoreo de prevención. -Monitoreo de impacto	-Control	-Prevención. -Riesgos. -Efectividad de las mediciones.

Tabla A.1 Categorías de las Redes de Monitoreo (Tomado de "STATE OF THE ART ON MONITORING AND ASSESSMENT OF GROUNDWATER", VOL 4, 1999, Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO.)

Teniendo todos estos parámetros, se puede establecer la distribución de los puntos de medición y la frecuencia con que serán medidos. Se tienen los siguientes tipos de monitoreo que están orientados a diferentes objetivos, como se muestra en la **tabla A.2**

Tipos de monitoreo	Frecuencia de las mediciones	Duración del monitoreo	Intensidad en el análisis de los datos
Tendencia	Baja	Largo plazo	Bajo a moderado
Referencia	Baja	Corto a medio	Bajo a moderado
Implementación	Variable	Duración del proyecto	Bajo
Efectividad	Medio a alto	Corto a medio	Medio
Cumplimiento	Variable	Dependiente del proyecto	Moderado a alto
Sistema de Alerta	Medio a alto	Corto a medio	Alto

Tabla A.2 Tipos de monitoreo específicos Tomado de "STATE OF THE ART ON MONITORING AND ASSESSMENT OF GROUNDWATER", VOL 4, 1999, Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO.)

- **El monitoreo de tendencia** se realiza por medio de mediciones en intervalos de tiempo uniformes y bien distribuidos, con objeto de determinar la tendencia a largo plazo de los niveles del agua subterránea, ocasionada por fenómenos naturales o inducida por el hombre.
- **El monitoreo de referencia** está orientado a caracterizar las condiciones previas y establecer una base para la planeación o comparaciones futuras.
- **El monitoreo de implementación** está orientado a evaluar el desarrollo de un proyecto específico e identificar si las actividades programadas están llevándose a cabo tal como lo indica el programa.
- **El monitoreo de efectividad** permite evaluar si las acciones que se están implementando conforme a la planeación, están generando el efecto deseado como en el caso de un plan de reducción de las extracciones de agua subterránea, donde conviene conocer si éstas se reflejan en la estabilización de los niveles del acuífero.
- **El monitoreo de cumplimiento** está orientado hacia la aplicación de actos de autoridad donde interesa conocer si los concesionarios están cumpliendo con las condiciones impuestas.
- **El monitoreo de alerta** está orientado a prevenir problemas en las fuentes de abastecimiento, originados por fenómenos naturales o antropogénicos.

Con todo lo expuesto, se crea todo un sistema para el mejor aprovechamiento y cuidado de los acuíferos para asegurar el abastecimiento de agua en el futuro.

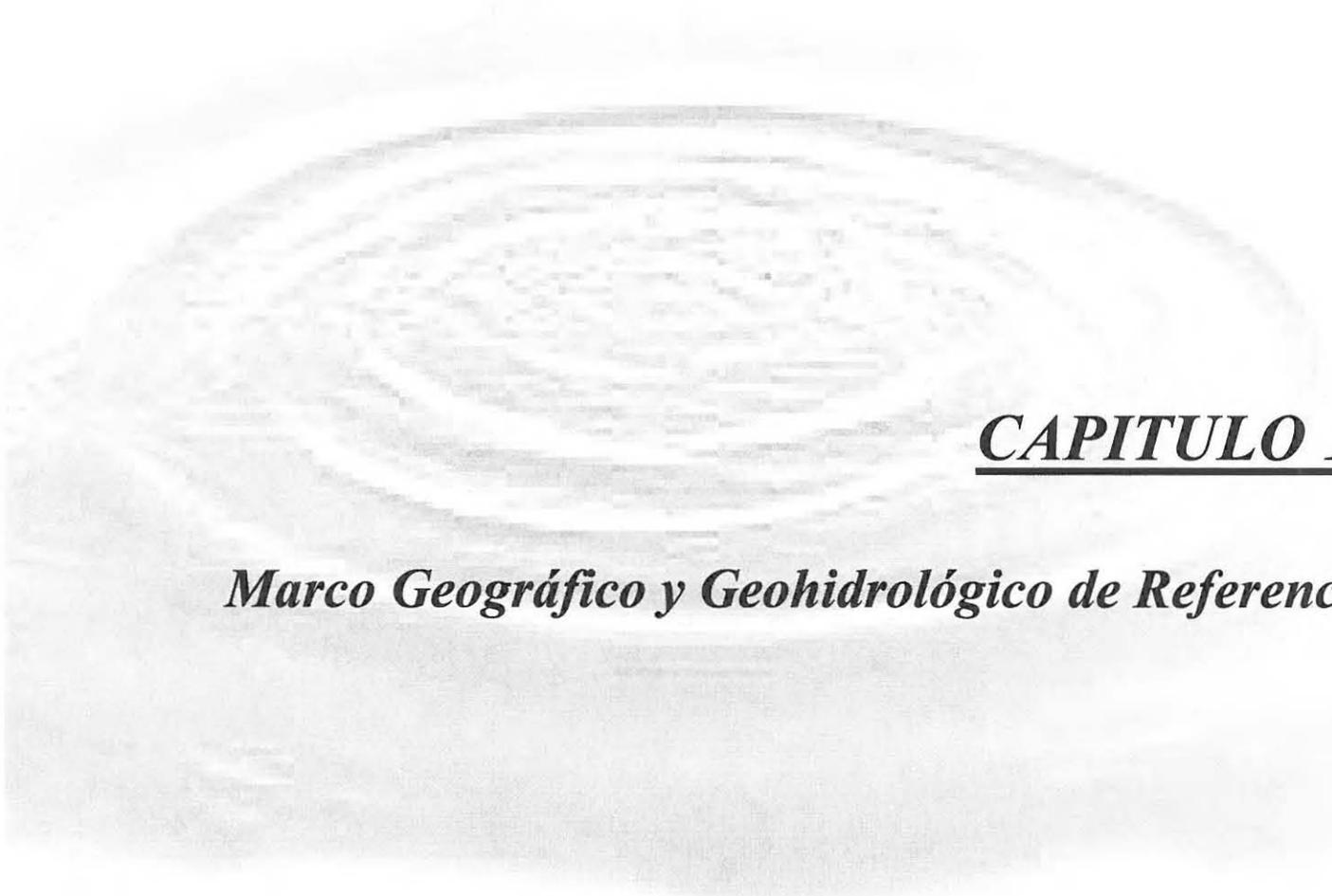
Existen varias técnicas que se pueden aplicar para el diseño de una red de monitoreo entre las que destacan: el análisis estadístico, geoestadístico y espectral, cada una requiere de un tratamiento diferente de la información.

Sobre este tema cabe destacar que toda la comunidad europea cuenta en estos momentos con un sistema de monitoreo automatizado y una metodología establecida que permite conocer al momento la situación que guarda el agua superficial y subterránea tanto en cantidad y calidad, evitando con esto conflictos

internacionales y le dan al agua su valor ecológico y económico real, además de conocer la disponibilidad del recurso la cual es la base para un desarrollo sustentable.

Objetivos del trabajo

1. Con base en lo anterior, el motivo de este trabajo es el de proponer una red de monitoreo aplicando un análisis estadístico, complementarlo con información hidrogeológica y comparar los resultados con los obtenidos al aplicar un análisis geoestadístico ya realizado, tomando como base la información de un acuífero que aparentemente cuenta con la información suficiente para aplicarla.
2. Dar las bases para establecer la metodología que permita contar con la información del acuífero ante un evento impredecible (inundación, fuente de contaminación, sequía prolongada, movimientos diferenciales del terreno, etc.).



CAPITULO 1

Marco Geográfico y Geohidrológico de Referencia

Capítulo 1. Marco Geográfico y Geohidrológico de Referencia

1.1 Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada en la porción sur-occidental del estado de Querétaro a 210 km de la ciudad de México; sus coordenadas geográficas son 20° 33' 25" a 20° 45' 00" de Latitud Norte y 100° 22' 40" a 100° 31' 03" de Longitud Oeste. En el lado norte se limita por una línea divisoria de aguas superficiales que pasa por la localidad de Santa Rosa de Jáuregui; El lado sur se limita por una línea imaginaria que atraviesa por los poblados de Lourdes Calichar, San Francisco y El Progreso; el lado oriental se limita con una línea imaginaria, que pasa por La Cañada y al poniente con el límite estatal con Guanajuato. (Figura 1.1)

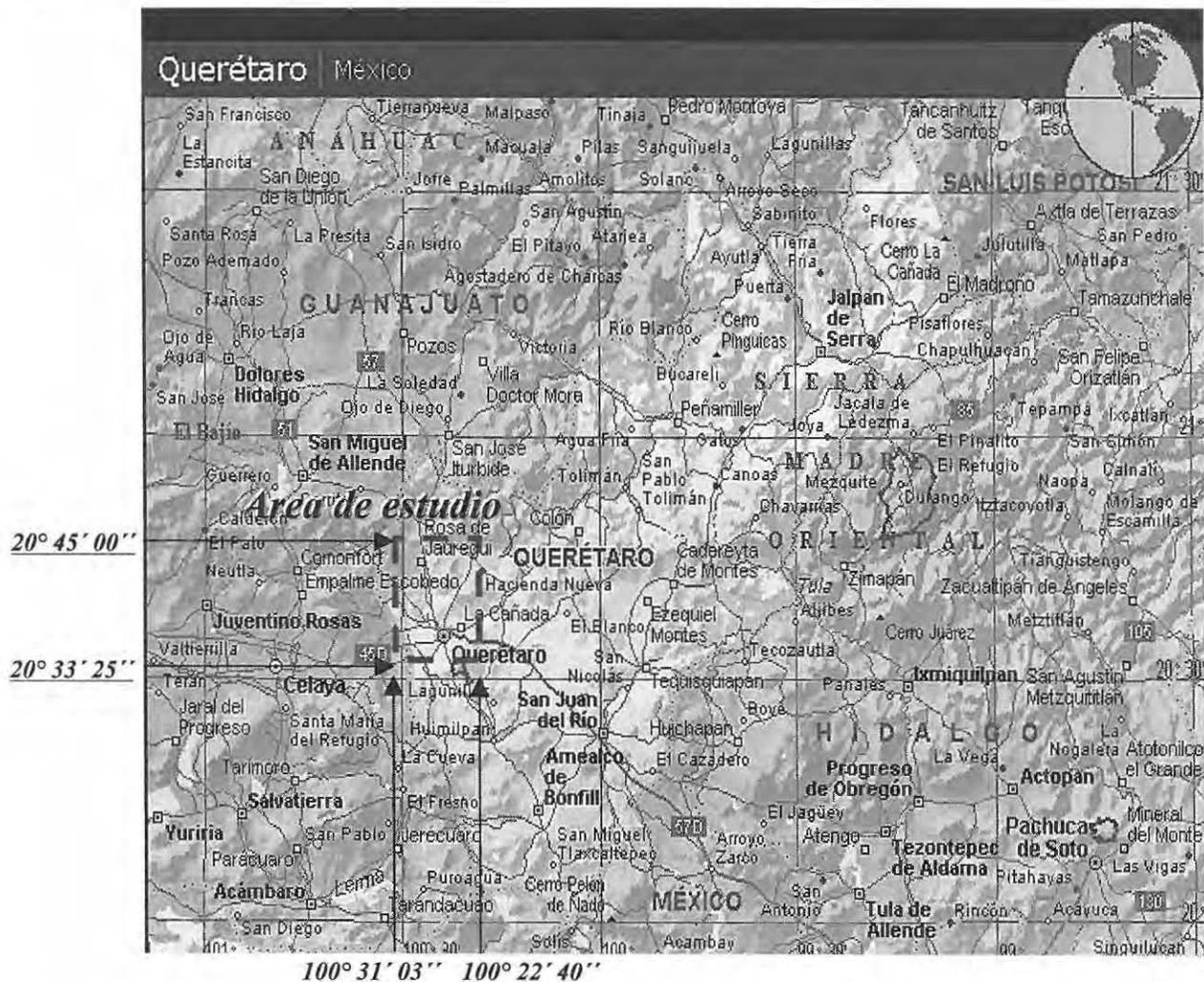


Figura 1.1 Localización de la zona de estudio (Atlas Mundial Encarta 2000)

1.2 Vías de Comunicación.

La zona cuenta con una extensa red de carreteras que la atraviesan en los cuatro sentidos, comunicándola internamente y con el resto de país.

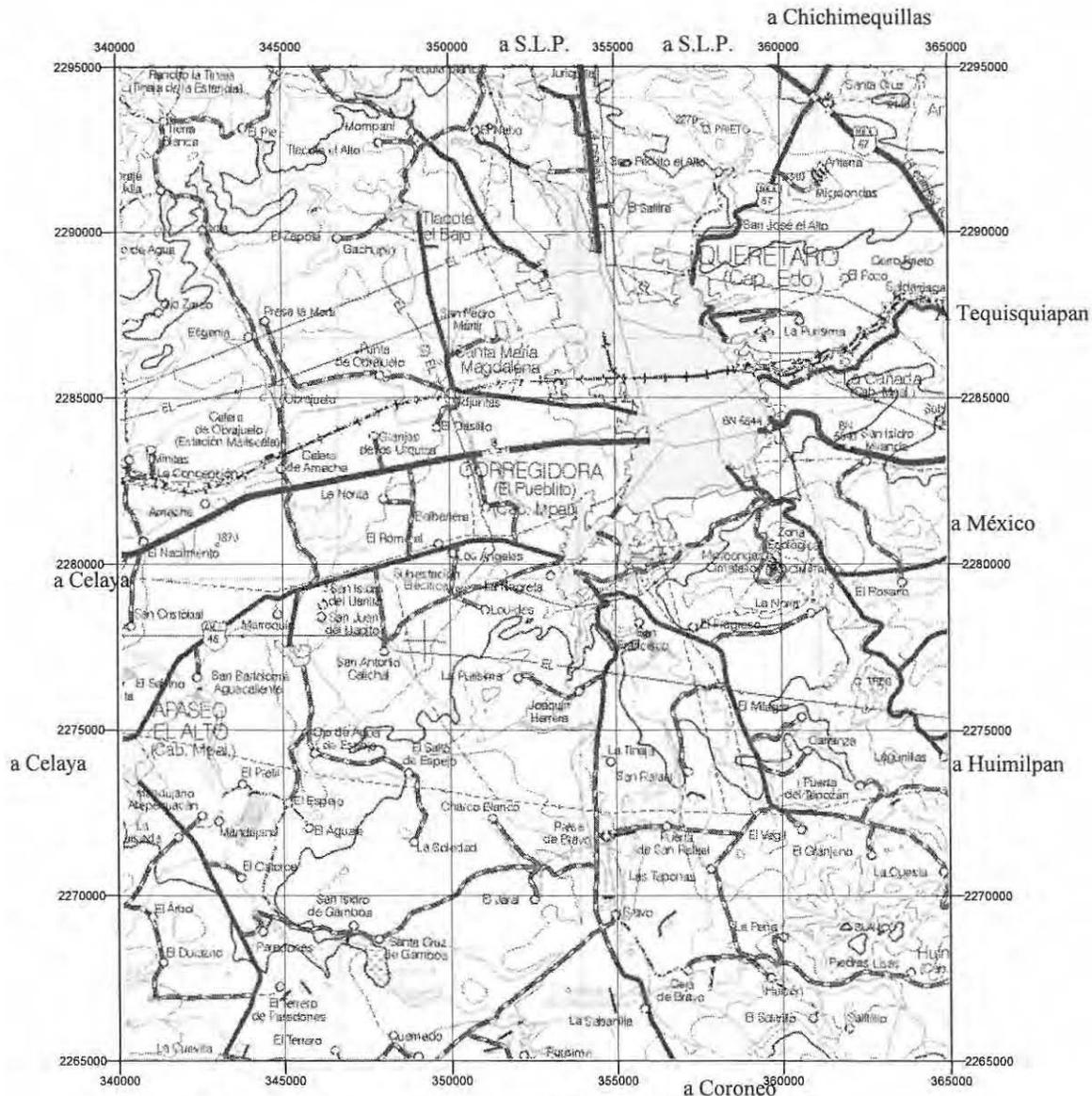


Figura 1.2 Vías de comunicación (INEGI, escala 1:200,000)

Cuenta también con una línea de ferrocarril y con un aeropuerto intercontinental. (Figura 1.2)

1.3 Fisiografía.

La zona de estudio pertenece a la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico, dentro de la subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, la topoforma presente es un valle, que se encuentra flanqueado en su parte sur por la elevación denominada el Cimatario, en su parte oriente por la falla Querétaro, al norte por una serranía de poca elevación y al poniente por la falla Obrajuelo y Tlacote (**Figura 1.3**). La composición geológica de las rocas son volcánicas del Terciario extrusivas de composición basáltica, andesítica y tobácea; en la parte del valle se presentan sedimentos aluviales.

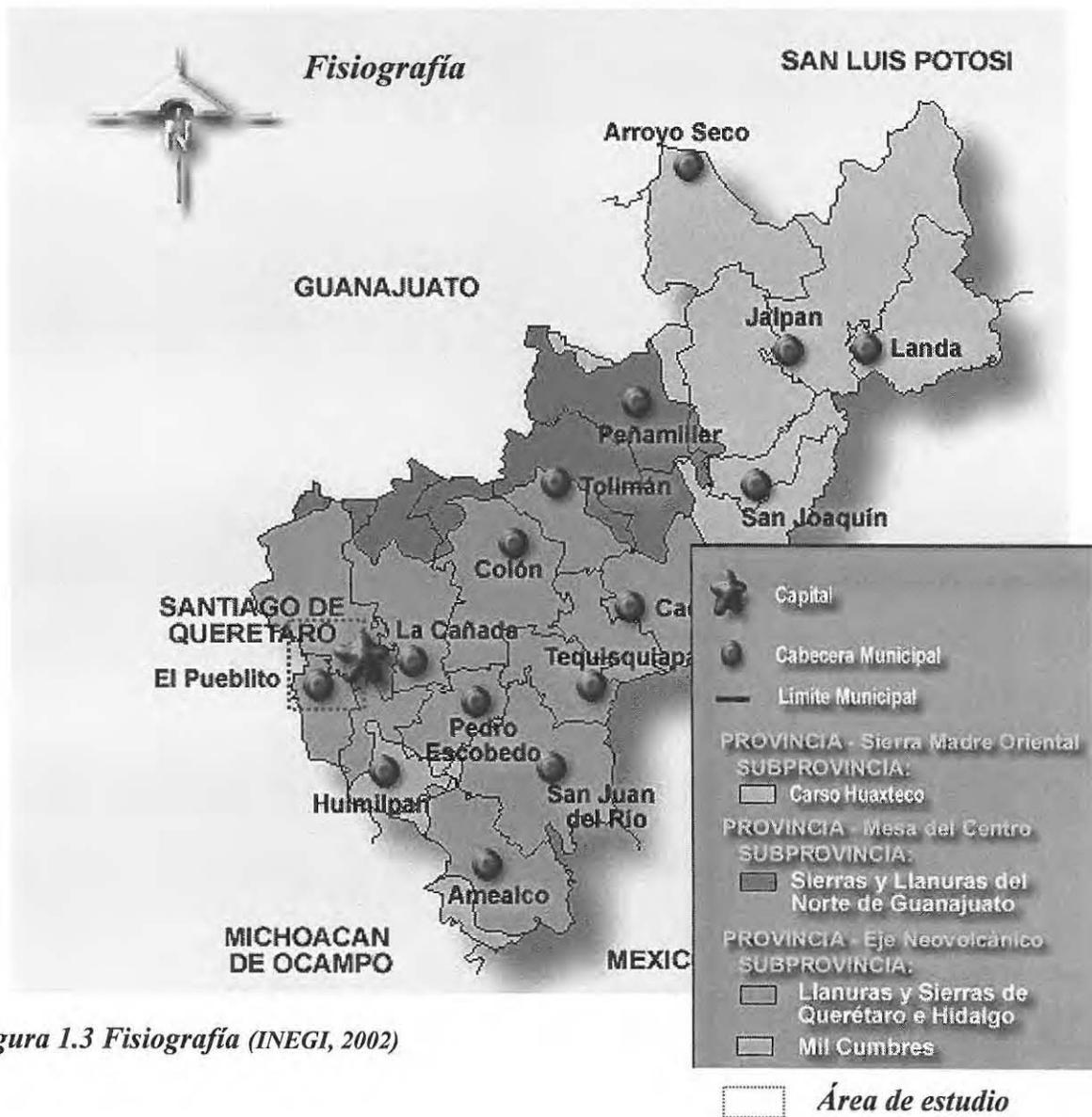


Figura 1.3 Fisiografía (INEGI, 2002)

1.4 Clima

El clima del Valle de Querétaro está condicionado a los accidentes del relieve topográfico y a factores geográficos definidos por las diferentes altitudes de la Sierra Madre Oriental, que funciona como barrera orográfica, limitando el paso de los vientos marítimos procedentes del Golfo de México así como también por la parte de la vertiente del Pacífico.

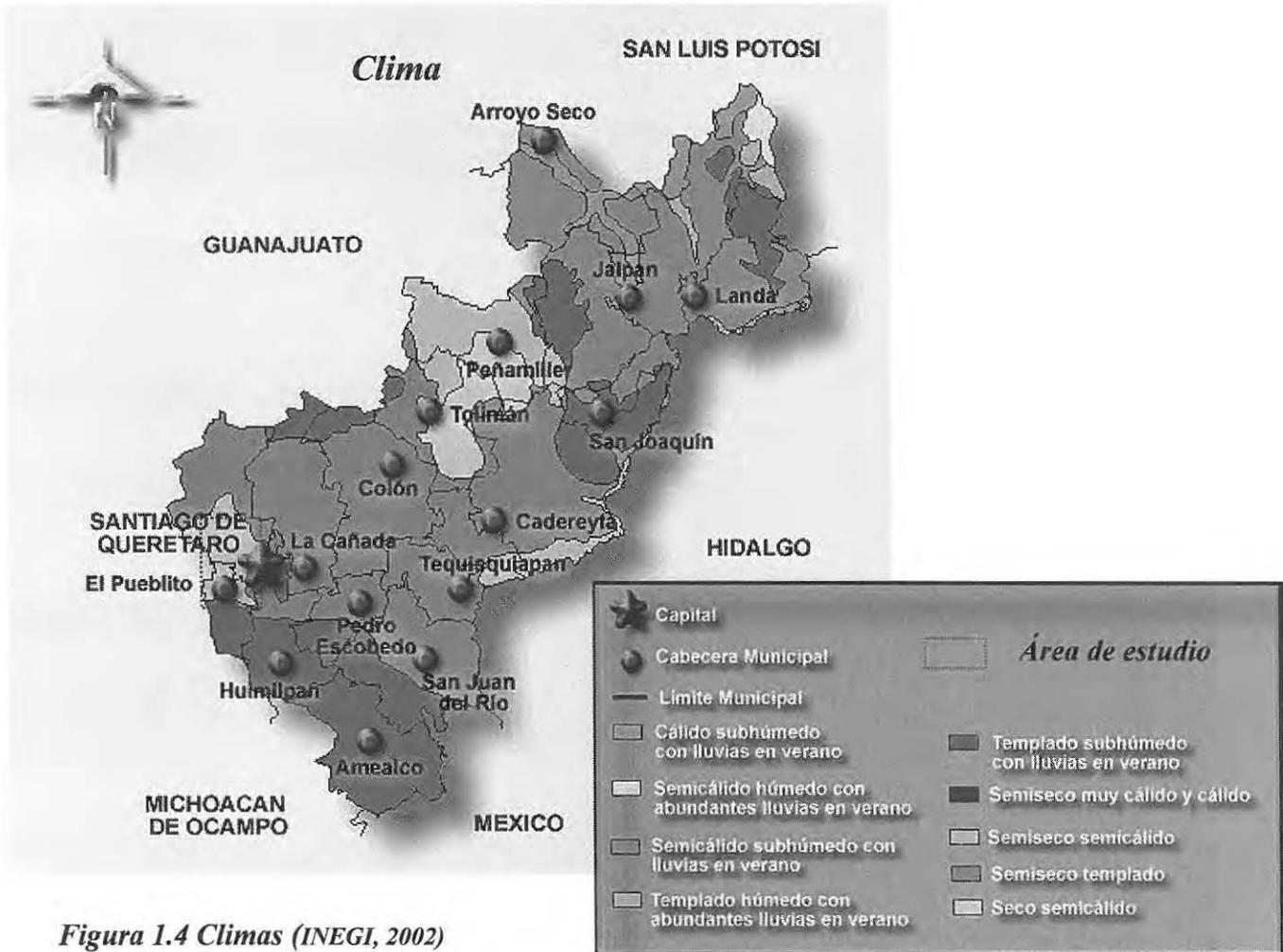


Figura 1.4 Climas (INEGI, 2002)

El Clima es semiseco semicalido, (Figura 1.4) con una temperatura media anual de 17°C. (Figura 1.5)

La precipitación media anual es de 548.8mm con lluvias entre los meses de mayo a octubre. (Figura 1.6)

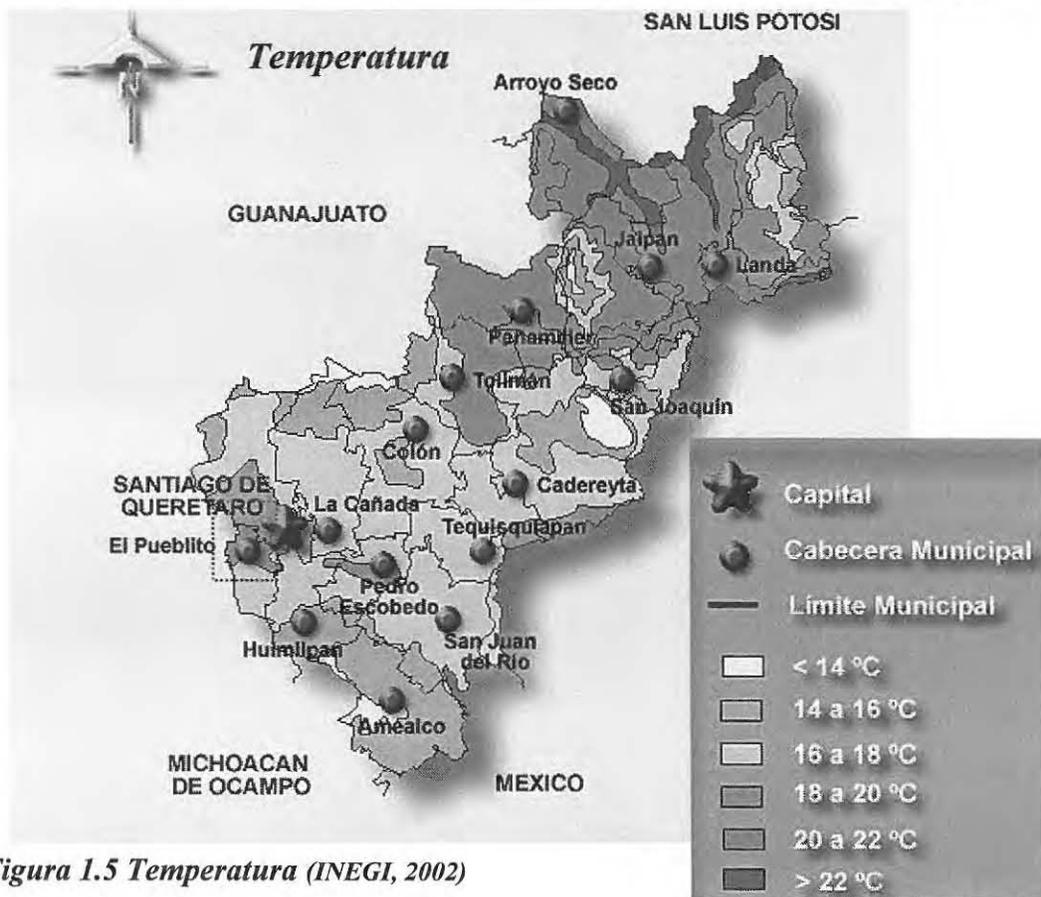


Figura 1.5 Temperatura (INEGI, 2002)

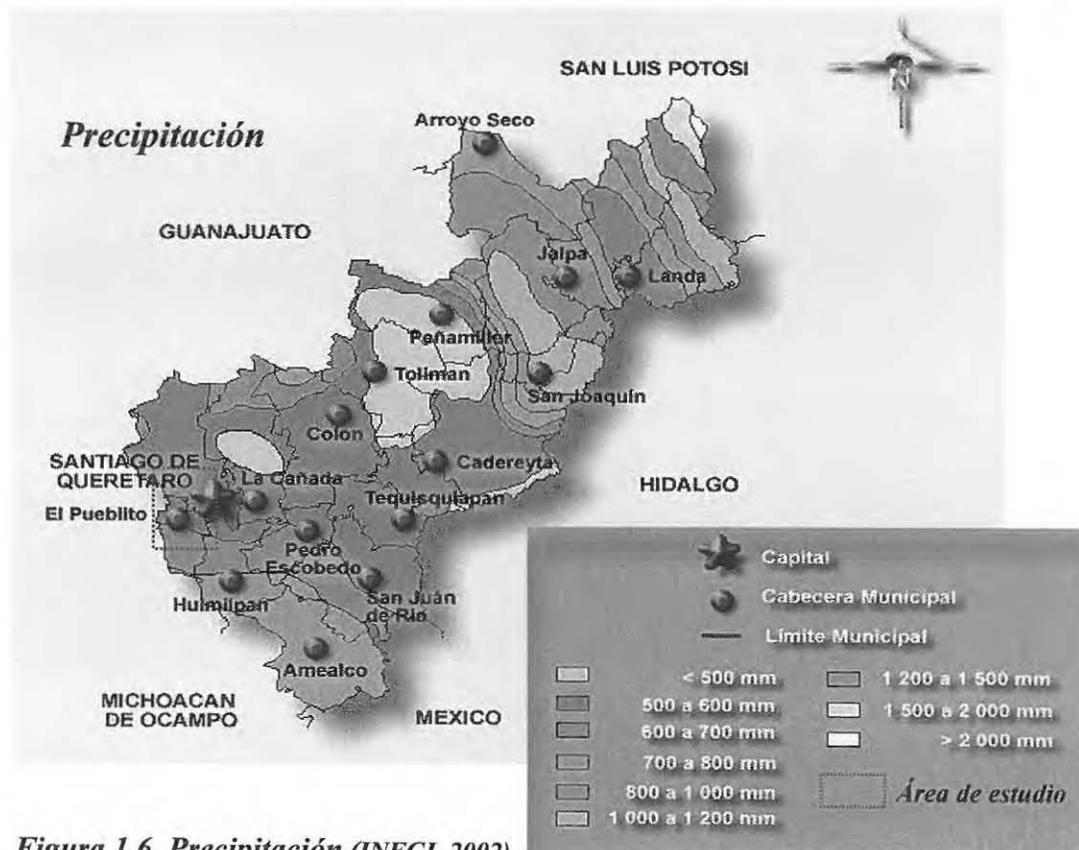


Figura 1.6 Precipitación (INEGI, 2002)

1.5 Vegetación

La vegetación existente y su distribución en el Valle de Querétaro obedece a las diferencias de altitud, clima y tipo de suelo. El tipo de vegetación xerofítica es la más importante, sabiendo que su mayoría son nopales, garambullo y huisache.

En el valle se desarrolla una intensa actividad agrícola con riego a través de pozos profundos. Los principales cultivos son: alfalfa, sorgo, maíz y cultivo de alto rendimiento como legumbres, lechuga y brócoli.

(Figura 1.7)



Figura 1.7 Vegetación (INEGI, 2002)

1.6 Población y Actividad Económica.

La población total del estado de Querétaro es de 1,404,306 habitantes, en la zona de estudio se asienta más de la mitad. (Censo Poblacional INEGI, 2000).

De acuerdo con la información estadística, (INEGI. Encuesta Nacional de Empleo Urbano, 2003), la principal actividad económica desarrollada en el estado es la de servicios con un 39.6 % del total de su población, seguida por el comercio 22.7%, la industria de la transformación 22.7% y otras actividades menores (construcción, transporte, gobierno, etc.) 15%. El sector agropecuario ocupa únicamente al 0.6 % de la población asentada en la zona estudio.

De la población económicamente activa se tiene que el 75% pertenece a hombres y el 25% a mujeres (INEGI. Encuesta Nacional de Empleo Urbano 2003).

Por otra parte, cabe destacar que existe una población flotante en la zona aún no cuantificada para 2003, proveniente de las localidades aledañas y de otras regiones del país, que son un factor que podría modificar los porcentajes descritos anteriormente y que demanda servicios.

La ciudad de Querétaro debe su desarrollo económico al hecho de constituir una destacada zona agrícola, industrial, turística y un importante enlace de comunicaciones entre tres regiones como son el Bajío, el Valle de Toluca y la Altiplanicie. En la imagen, (**figura 1.8**), se observa el famoso acueducto que recorre la ciudad, realizado en la segunda mitad del siglo XVIII, época de mayor esplendor artístico, cuando Querétaro se convirtió en centro del barroco mexicano, siendo actualmente un atractivo turístico.



Figura 1.8 Acueducto de la Ciudad de Querétaro

1.7 Hidrografía

El Valle de Querétaro se sitúa en la cuenca del Río Lerma en la subcuenca hidrológica del Río la Laja, de la región hidrológica No. 12, sin embargo, la corriente principal -Río Laja- no surca esta porción, pues tiene su origen en el estado de Guanajuato, donde realiza la mayor parte de su recorrido. Dentro del área de estudio se presentan dos corrientes poco caudalosas, los ríos: Querétaro y El Pueblito, que recogen volúmenes en una cuenca cuya característica esencial es la de pertenecer a una zona semiárida (**Figura 1.9**). Esta es una de las razones por las que en el estado de Querétaro el único recurso suficientemente aprovechable es el subterráneo. Actualmente, por estas corrientes transita agua residual tanto de la ciudad como de las poblaciones por donde pasan.



Figura 1.9 Hidrografía (INEGI, 2002)

En la zona de estudio se encuentran 5 bordos que funcionan para control de avenidas y desvío.

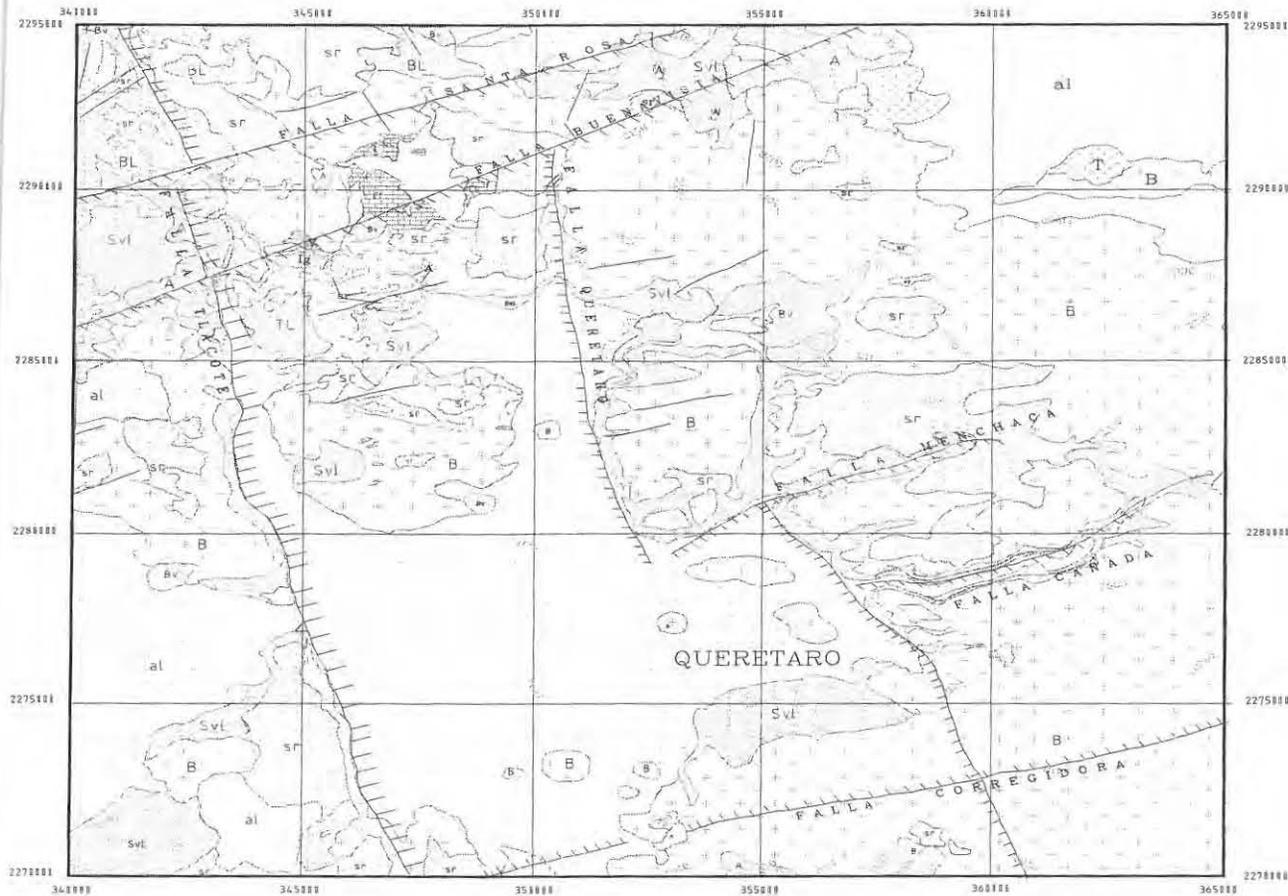
1.8 Geología.

En la zona de estudio, en su porción norte, se identificaron rocas sedimentarias del Cretácico Superior con muy poca o nula permeabilidad que funcionan como barrera o como basamento hidráulico estando integradas principalmente por lutitas.

También se identifican una serie de eventos volcánicos de composición ácida, intermedia y básica, que fueron erupcionadas en el Oligoceno y Mioceno, así como una capa de material aluvial que cubre principalmente el Valle de Querétaro (**figura 1.10**), en estas rocas es donde se acumula el agua que da sustento a la actividad socioeconómica.

El Valle de Querétaro se encuentra afectado por una serie de fallas y fracturas (**figura 1.11**) entre las que destacan la falla Querétaro, localizada al oriente de la zona de estudio y la línea divisora entre el Valle de Querétaro y San Juan del Río. Al poniente se localiza la falla Tlacote. Estas fallas tienen una orientación preferencial NW-SE y fueron generadas por efectos distensivos los cuales generaron un graben.

Otras fallas presentan una orientación preferencial al E-W las cuales fueron generándose por efectos compresivos, destacándose las fallas Buenavista, Santa Rosa, Menchaca y Cañada, así como alineamientos menores que presentan el mismo rumbo.



COLUMNA GEOLÓGICA
ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCÁNICAS

sr	SUELO RESIDUAL, TIERRA DE CULTIVO CON FRAGMENTOS DE ROCA DE TAMAÑO VARIADO SOBRE CUALQUIER TIPO DE ROCA
al	DEPÓSITOS ALUVIALES CONSOLIDADOS POR BOLEOS, GRAVAS Y ARENAS EN MATRIZ LIGERA O ARCILLOSA SIN COMPACTACIÓN LA PARTE SUPERIOR SON SUELOS ARCILLOSOS NEGROS CON ABUNDANTES ORIZAS POR DESECCACIÓN
Bv	BRECHA VOLCÁNICA DE COMPOSICIÓN BASÁLTICA CONSTITUYE EN ALGUNOS CASOS ESTRATO VOLCÁNICO, TOBAS, TEZONTLE Y FRAGMENTOS ANGULOSOS CON ACOMODO HETEROGÉNEO DE BASALTO VESICULAR Y MASIVO, EN OTROS, PRESENTA UNA OXIDACIÓN LOMITICA Y EROSIÓN DIFERENCIAL CON ABUNDANTES ZONAS CAVERNOSAS
T-B	BASALTO DEFORMADO EL TAMBOR, POSIBLEMENTE FISURA, GRIS NEGRO, CON TEXTURAS APANITICA, HOLOCISTALINA, MEROLITICA, GLOMERO - PERIFERICA, INTERGRANULAR, DENSO Y PESADO, CON FRACATURAS VERTICALES Y HORIZONTALES FORMANDO BLOQUES CASI CUBICOS, FORMA MUELAS CON PEQUEÑOS CAÑILES, SE ENCUENTRA SOBRE LAS UNIDADES A4, Svl Y T PRINCIPALMENTE EN ALGUNOS CASOS ESTÁ EN CONTACTO CON BASALTO LAJEADO
T	TOBAS, LIMO AMHOSAS CAPE CLARO A OSCURO, ALGO APANITICA, CON CALICHE EN ALGUNOS CASOS, EN ESTRATOS DUREZ CUANDO EL ESPESOR SOBREPASA LOS 10 CM, DEPÓSITOS PRÁCTICAMENTE HORIZONTALES
Svl	SEDIMENTOS VOLCANOLÁSTICOS LAUSTRES, DE TEXTURA PROCLÁSTICA - EPICLÁSTICA, ES UN DEPÓSITO VOLCANOSEDIMENTARIO COMPLEJO CONSTITUIDO POR LIMOS, ARCILLAS, ARENAS DE DIFERENTES GRANULOMETRÍAS, CON TRANSPORTE SECUENCIAL, PUMITICAS, BLANCAS A GRIS CLARO, CON ESTRATIFICACIÓN CASI HORIZONTAL DE ESTRATOS LAMINARES A GRUESOS, CON ESTRATIFICACIÓN CRUZADA E INTERDIGITACIONES DE GRAVAS Y GRAVILLAS POCO CONSOLIDADAS, MUESTRA INCLUSIÓN DE BOLEOS CON INTERCALACIONES DE COLADAS BASÁLTICAS Y ANDESÍTICAS, ALCANZA UN ESPESOR MAYOR A LOS 451 M EN LA ZONA CENTRAL DEL VALLE DE QUERÉTARO
BL	BASALTO LAJEADO NEGRO CON TEXTURAS APANITICA, PROCLÁSTICA PORFÍDICA, MEROLITICA, CAMBIA A BASALTO DE OLIVINO, BASALTO ANDESITICO, CON ESTRUCTURA LAJEADA HORIZONTAL, VERTICAL Y EN TODAS DIRECCIONES, SEGUN EL AFLORAMIENTO, CON FRACTURAMIENTO ORIGINAL VERTICAL PRINCIPALMENTE, DENSO, MUY DURO Y PESADO, MASIVO Y POCO VESICULAR
lg	IGUMBIRTA, POSIBLEMENTE CONTEMPORÁNEAS AL BASALTO LAJEADO, TAMBIÉN SE CLASIFICAN COMO TOBAS VOLCÁNICAS DE TEXTURA PROCLÁSTICA CON ALTERACIÓN SUPERGÉNICA
A	ANDESITA MASIVO ROCOSO DE COLORACIÓN GRIS ROSADA A ROJIZA, PANORITICA, PORFÍDICA, DE MATRIZ APANITICA, EN ALGUNOS CASOS SE OBSERVA CUARZO SECUNDARIO O ACCESORIO Y CUARZO INTRODUCIDO POSTERIORMENTE EN PLANOS DE FRACTURA, PETROGRÁFICAMENTE SE CLASIFICARON ANDESITAS, TRILAUANDESITAS Y DACITAS, EN ALGUNOS LUGARES PUEDE CONSTITUIR UN BASAMENTO, EN OTROS, LUGARES SE ENCUENTRA PUERTAMENTE ALTERADA POR PROCESOS HIDROTÉRMICOS, REEMPLAZAMIENTO Y DINAMOMETAMORFISMO
Ca	CALIZAS Y LUTITAS, POSIBLEMENTE CORRESPONDIENTES A LAS FORMACIONES SVYAL O CARACOL, ELEVADAS POR ALGÚN PROCESO INTRUSIVO
ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS	
I	DACITA DE HORNBLENDA GRIS CLARO, HOLOCISTALINA PORFÍDICA CONSTITUYE LA MANIFESTACIÓN DE UN TRONCO INTRUSIVO DE BAJO GRADO
TL	TOBAS LÍTIKAS DE ASPECTO BRECHUDO, FORMA DIQUES SATÉLITE DE POCOS CENTÍMETROS HASTA ALGUNAS DECENAS DE METROS, ASOCIADO CON FISSURAS CUENCO Y TUBOS
VI	VITRÓFIDO DE COMPOSICIÓN ANDESÍTICA CON BANDAS DE PIEDRA PÓMEZ GRIS CLARO, MUY LOCAL



PLANO GEOLÓGICO QUERÉTARO

Figura 1.10 Mapa Geológico Regional, CNA, ("ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DE AGUASCALIENTES Y QUERÉTARO", 1996)

Esquema Tectónico Regional

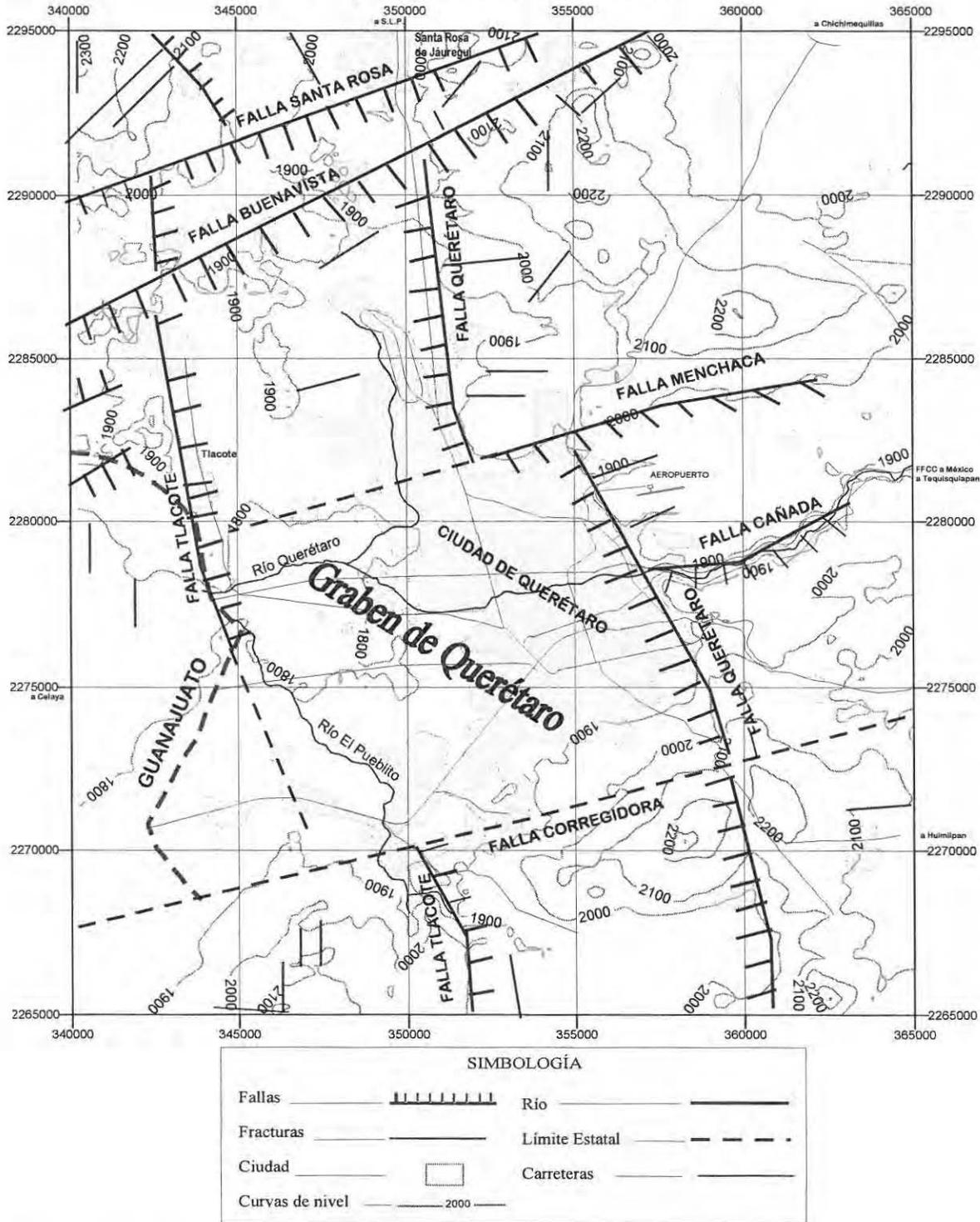


Figura 1.11 Esquema Tectónico Regional CNA , (“ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DE AGUASCALIENTES Y QUERÉTARO”,1996)

1.9 Geología del Subsuelo

Con el propósito de identificar las estructuras que se ubican en el subsuelo y su composición, se tomó del trabajo *Modelo Geoeléctrico Del Acuífero Del Valle De Querétaro*, Tesis Profesional de Gabriela Vanessa Zavala Sánchez una sección E-W en la que se muestra una serie de eventos volcánicos de diferentes composiciones. Fue elaborada con información de 80 sondeos eléctricos verticales (SEV), 10 sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo y con cortes litológicos de pozos. **(Figura 1.12)**.

Se tiene un cuerpo basáltico cuya interpretación fue inferida con la información disponible del subsuelo y de los afloramientos. Su espesor es variable con un mínimo de 60 m y un máximo de 240 m, detectado desde la superficie en algunas zonas hasta los 210 m de profundidad.

También es de hacer notar la presencia de un cuerpo delgado pero extenso de brechas volcánicas de naturaleza basáltica, y una zona de alteración constituida por andesitas de coloración verdosa y de comportamiento plástico.

Además, los SEV realizados a profundidades reales de exploración de 600 metros, definen la presencia de las fosas y pilares que presumiblemente forman el basamento rocoso fracturado. Este modelo eléctrico ha sido parcialmente sustentado con sondeos electromagnéticos, que no solo infieren la ocurrencia de estas rocas a profundidades de 500 metros, sino, la acumulación en los fondos de las fosas de los sedimentos lacustres más antiguos.

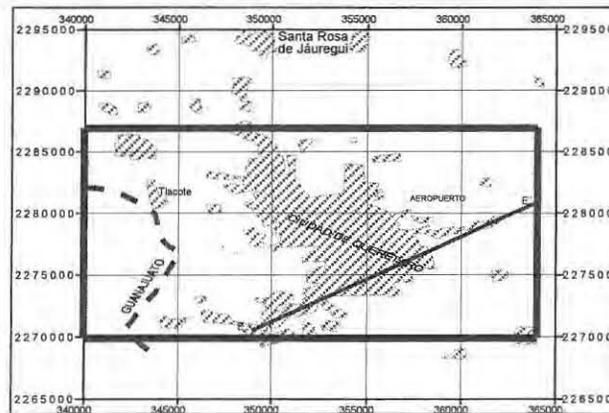
En esta sección se identifica que el valle de Querétaro es muy vulnerable a la contaminación por la influencia de agua, tanto por las características litológicas como estructurales.

Acuífero del Valle de Querétaro



- LITOLOGIA**
- a1 Depositos aluviales
 - Svl 1 Sedimentos volcanoclásticos lacustres. Unidad mas joven 1
 - B 1 Colada basáltica 1 Colada más joven
 - Svl 2 Sedimentos volcanoclásticos lacustres. Segunda unidad
 - B 2 Colada basáltica. Segunda Colada
 - Svl 3 Sedimentos volcanoclásticos lacustres. Tercera Unidad
 - B 3 Colada basáltica. Tercer Colada
 - Svl 4 Sedimentos volcanoclásticos lacustres. Cuarta unidad

LOCALIZACIÓN.



SIMBOLOGÍA.

Profundidad del Nivel Estático diciembre de 1995

ESCALA NUMÉRICA

Escala Horizontal : 1 : 82 000

Escala Vertical : 1 : 10 638

La escala vertical se encuentra exagerada aproximadamente 8 veces con respecto a la horizontal

Sección geológica geofísica E - E'
Valle de Querétaro.

Figura 1.12 Sección Geológica (Modelo Geoeléctrico Del Acuífero Del Valle De Querétaro, Tesis Profesional de GABRIELA VANESSA ZAVALA SÁNCHEZ)

1.10 Censo de Aprovechamiento.

Censo general de pozos para el valle de Querétaro.

Para el año de 1996, en la zona de estudio, existían 216 pozos, siendo el principal usuario del agua subterránea el sector público – urbano con el 46% de la infraestructura hidráulica, el agrícola con 30%, industrial con 21% y abrevadero con el 3%. De esto se deduce que en la medida que el crecimiento urbano aumente, se demandará un mayor volumen de agua subterránea y habrá mayor competencia por el recurso, específicamente del sector público – urbano.

En cuanto a la distribución de los pozos, en la **figura 1.13** se aprecia que la mayor cantidad de pozos se encuentra en la parte central de la ciudad, siendo estos para uso industrial y potable, dejando a los pozos agrícolas en la parte oeste y de abrevadero al sur de la misma ciudad.

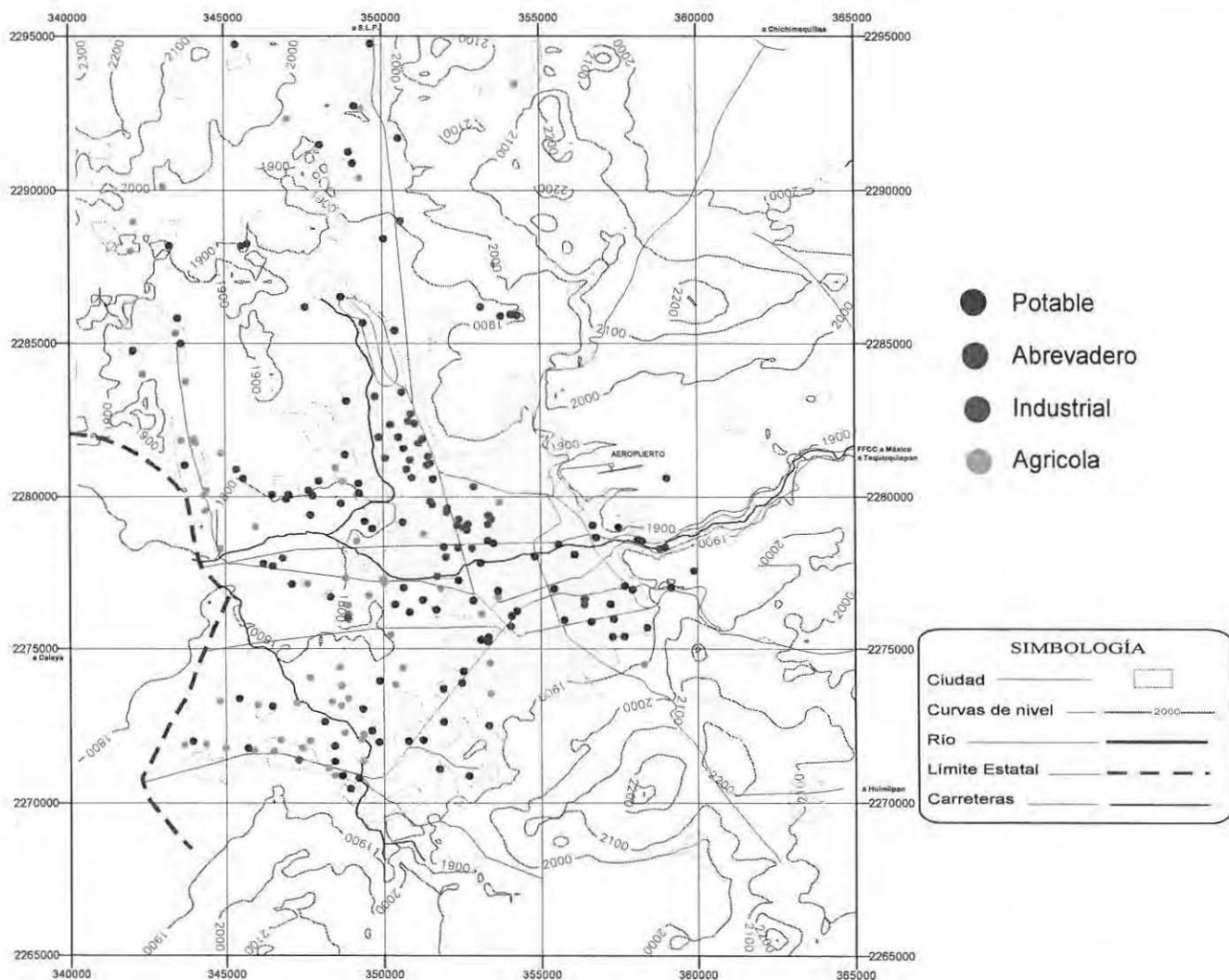


Figura 1.13 Distribución de los pozos en el periodo de 1996

1.11 Hidrometría Subterránea.

En cuanto a los requerimientos de agua, para 1996, el sector público urbano consumió 67,609,963 m³, el sector agrícola 32,006,565 m³, el sector industrial 9,383,579 m³ y de abrevadero 255,312 m³. (Figura 1.14).

Cabe mencionar que los pozos de agua potable operan las 24 horas al día los 365 días del año, mientras que los otros usuarios sus tiempos son de acuerdo a sus requerimientos. Esto se refleja en el acuífero en un abatimiento de los niveles del agua subterránea, lo que ha ocasionado la compresión del terreno y generado una serie de fallas activas que ponen en riesgo la infraestructura urbana y la vida de los habitantes, al introducirse una serie de contaminantes al agua subterránea. El volumen de extracción en 1996 fue de 109,25 Mm³ (tabla 1.1).

USO	POZOS	VOLUMEN (Mm3/1996)	%
POTABLE	98	67.6	61.88
AGRÍCOLA	65	32.0	29.29
INDUSTRIALE	46	9.4	8.6
ABREVADERO	7	0.25	0.23
TOTAL	216	109.25	100%

(Tabla 1.1) Volumen de extracción en 1996



Figura 1.14 Hidrometría subterránea para el Valle de Querétaro en 1996.

En la figura 1.15 se representa la configuración de isovolúmenes de extracción para 1996, se observa que la mayor concentración de bombeo se ubica en la parte central del valle con una tendencia NW-SE, esto servirá posteriormente para poder identificar las zonas que requieran de un mayor control de extracción.

Bajo este escenario y con base en el crecimiento industrial y poblacional que se presenta en la actualidad, las necesidades de agua se han acrecentado y sobretodo los usos deben de haber cambiado con respecto a 1996, específicamente en los pozos destinados a riego agrícola, ya que la mancha urbana ha cubierto ya muchas de esas tierras. Lo anterior implica que muchas de las captaciones deben de estar operando las 24 horas del día como se había mencionado y otras más deben de estar llegando al término de su vida útil.

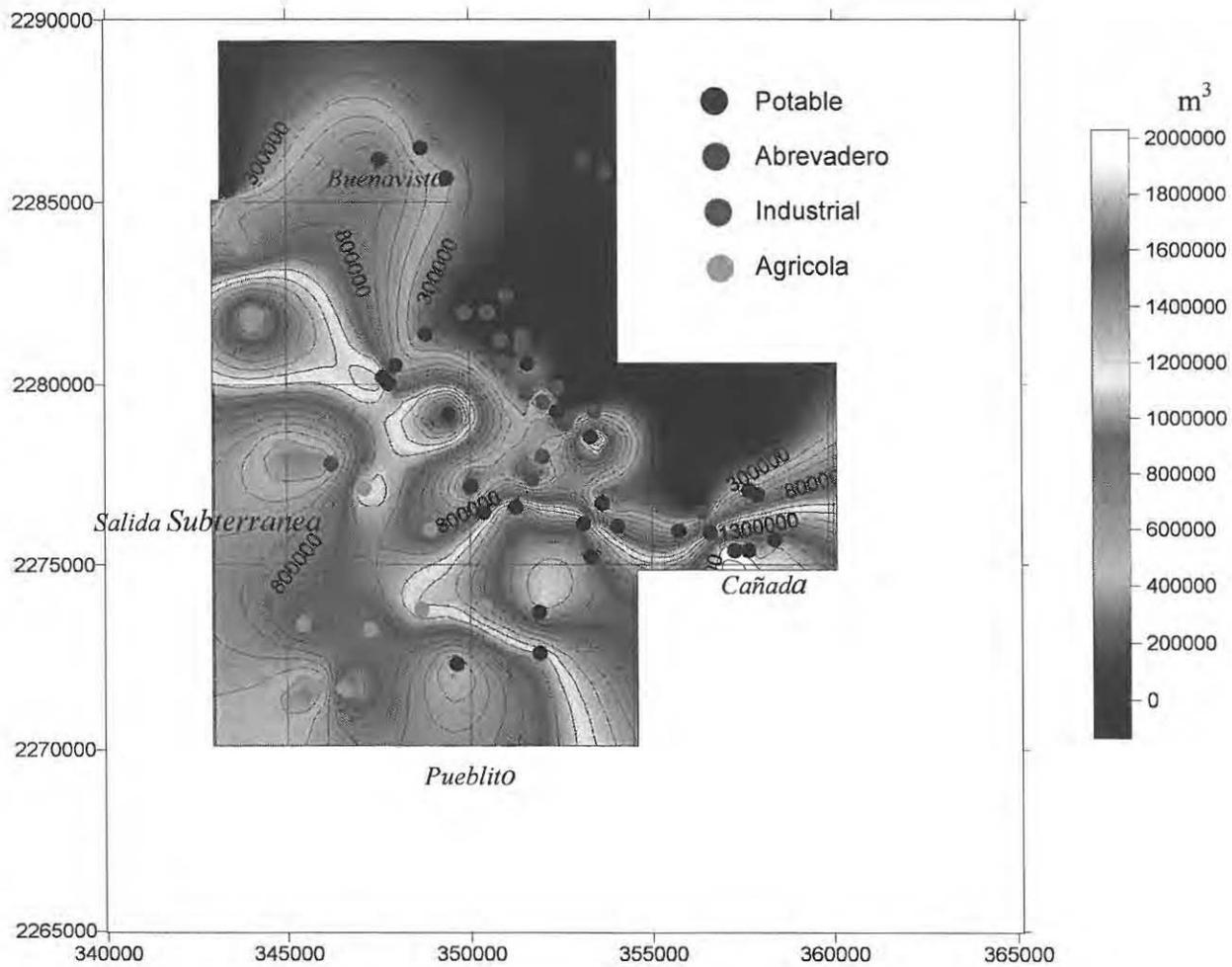


Figura 1.15 Distribución de pozos de bombeo para 1996

1.12 Piezometría

La piezometría, es el principal indicador del flujo subterráneo si las cargas están referidas a la elevación media del nivel del mar. De esta forma las zonas de saturación de mayor elevación, generan movimientos del agua subterránea en dirección de los sitios donde la elevación de los niveles de saturación es menor, todo esto si no existen fronteras que impidan dicho acceso. Para conocer la posición del nivel del agua referido al nivel del mar, se tiene una red de pozos pilotos los cuales se han medido desde el año de 1970. Para este estudio se considerarán los años 1990 y 1995 los cuales son los que muestran una mayor cantidad de pozos y son los que reflejan mejor el comportamiento de los niveles

En las **figuras 1.16 y 1.17** se representan las equipotenciales de dichos años, identificándose una entrada de agua subterránea en la zona de La Cañada en la parte norte y sur; la salida subterránea se observa en la parte poniente, representando de esta forma el flujo regional.¹

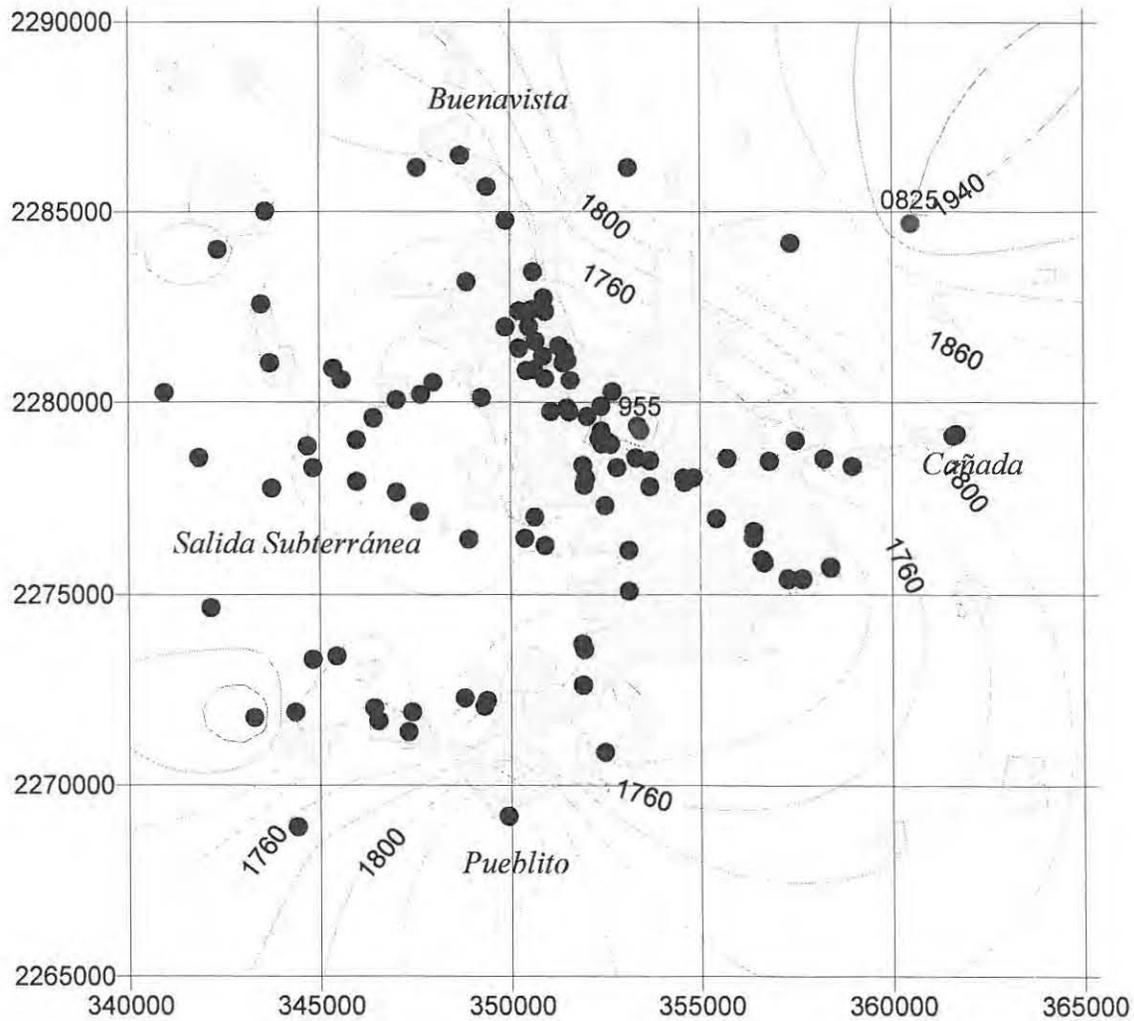


Figura 1.16 Configuración de la Elevación del Nivel Estático agosto 1990 (msnm)

SIMBOLOGÍA	
Pozos Agosto 1990	●
Ciudad	□
Río	—
Límite Estatal	- - - -
Carreteras	—

¹ **Elevación del Nivel Estático (E.N.E.):** Se refiere a la posición del nivel del agua subterránea con relación al nivel del mar.
Profundidad al Nivel Estático (P.N.E.): Se refiere a la posición del agua subterránea que hay con relación a la superficie del terreno.

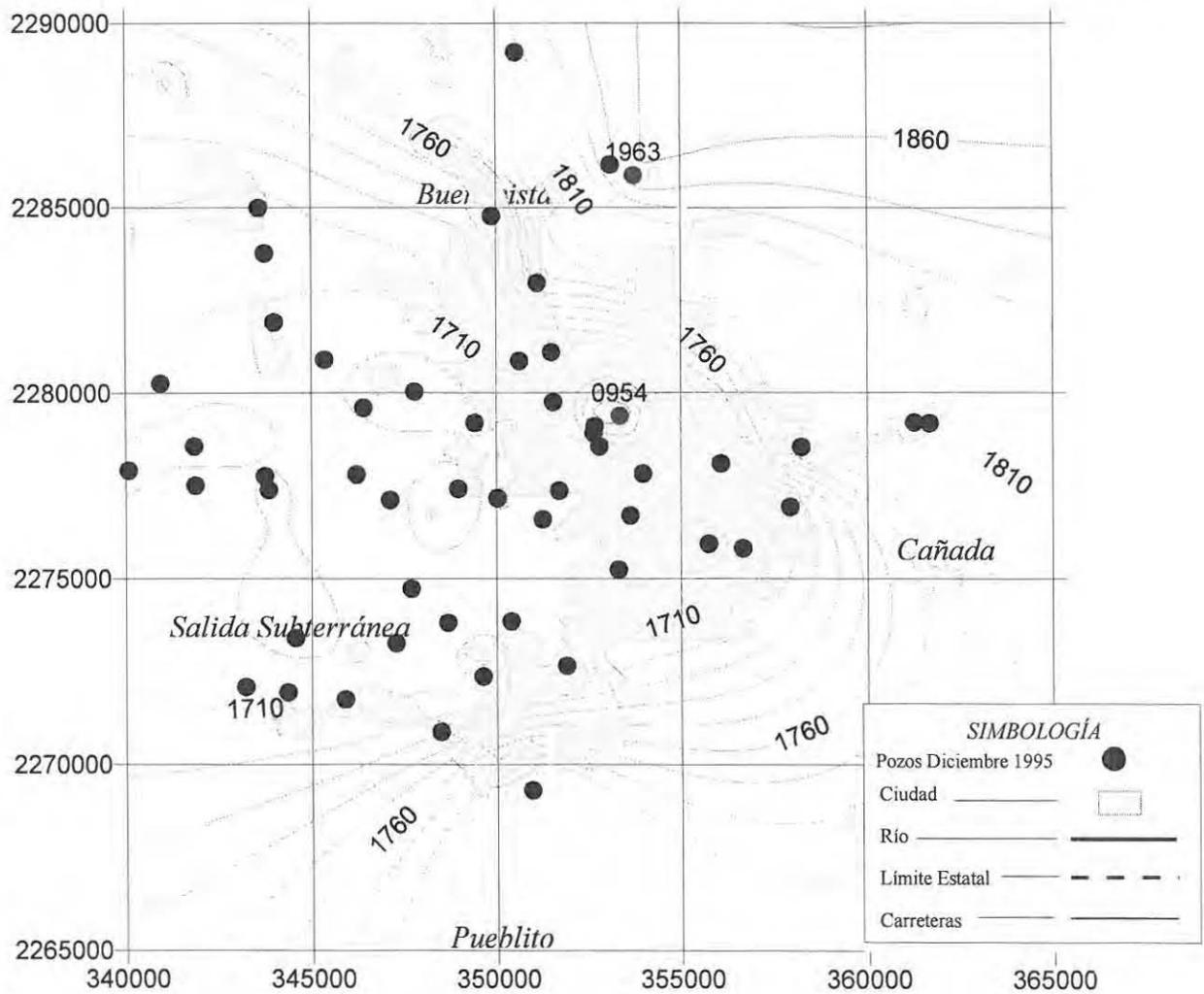


Figura 1.17 Configuración de la Elevación del Nivel Estático diciembre 1995 (msnm)

Se observa como se han ido cerrando las líneas de elevación piezométrica en la parte central de la ciudad, zona donde se utiliza principalmente los pozos con fines industrial y potable, el cual ha ido creciendo y concentrándose en esta parte.

Los pozos marcados con color rojo son aquellos en los que se presentan las mayores diferencias en sus Elevaciones de Nivel Estático. tanto para el periodo de agosto de 1990 (pozos 0825 y 0955, mayor y menor respectivamente), como para el periodo de diciembre de 1995 (pozos 1963 y 0954, mayor y menor respectivamente). En las **figuras 1.18** y **1.19** se representan las configuraciones en tres dimensiones del comportamiento de la elevación del nivel estático.

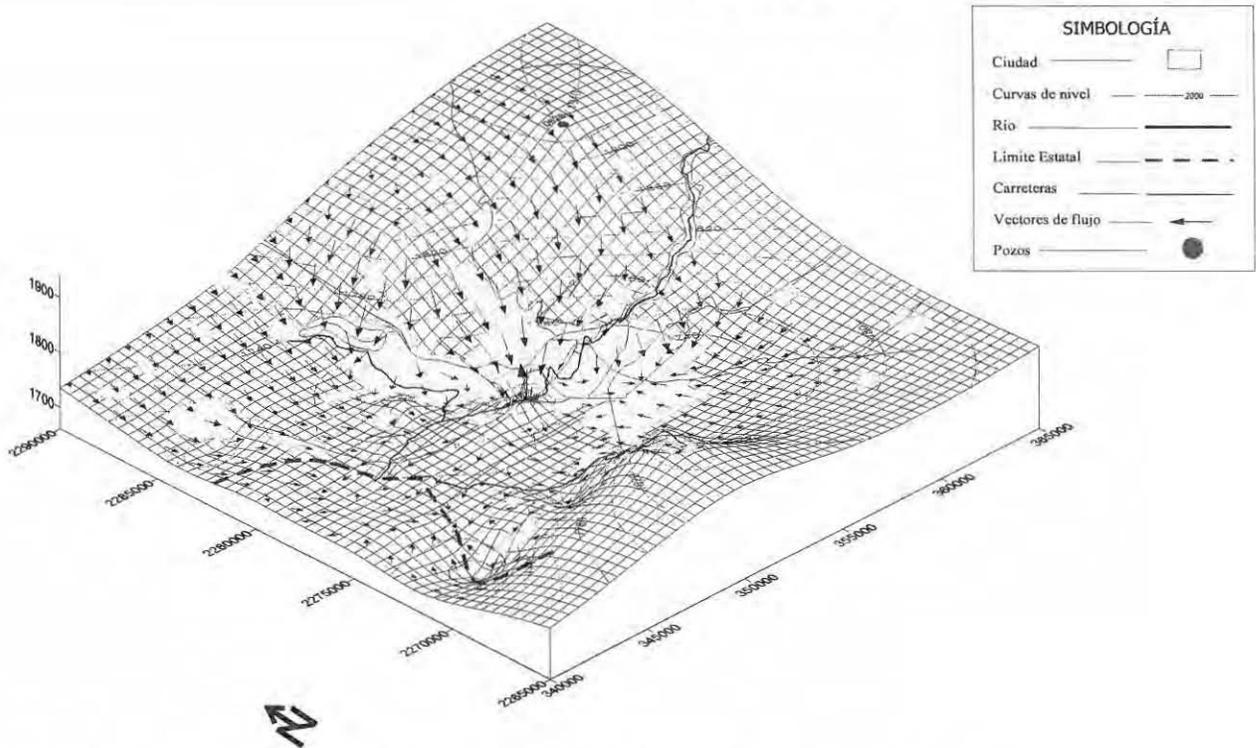


Figura 1.18 Configuración 3D de Elevación del Nivel Estático para agosto de 1990.

Como se pueden apreciar en las figuras 1.18 y 1.19, la dirección de flujo subterráneo tiene una dirección de las zonas de mayor elevación a las de menor elevación, esto da origen a que el flujo tenga una entrada en la parte alta NE de la ciudad, y una salida hacia a la parte baja SW y sobretodo de un cono de abatimiento, el cual va creciendo de forma radial.

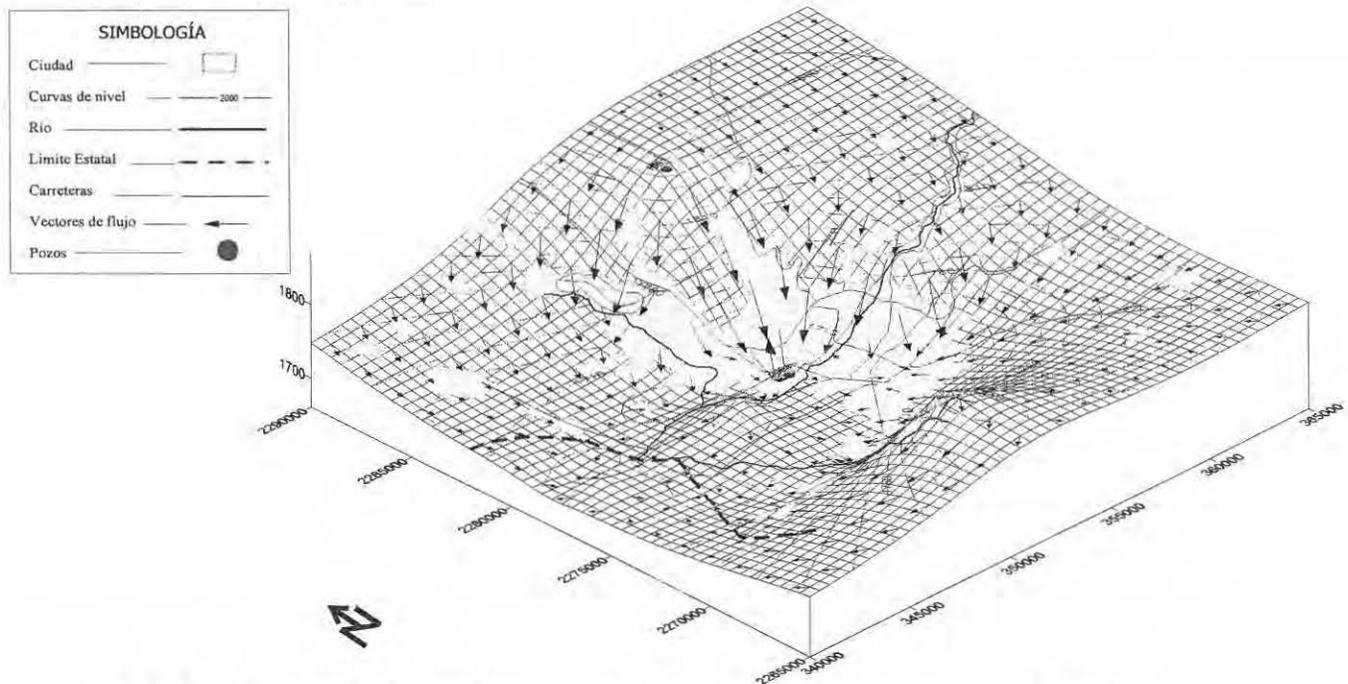


Figura 1.19 Configuración 3D de Elevación del Nivel Estático para diciembre de 1995.

De estas **figuras 1.18 y 1.19**, se describe que el flujo regional de la zona es de NE-SW y que no ha variado en este sentido, al igual que las zonas de recarga. Lo que sí ha variado es el crecimiento de los conos de abatimiento, sobretodo de la parte central, lugar como se ha mencionado es la parte industrial de la ciudad, la cual ha tenido un crecimiento significativo, al igual que las zonas de pozos para agua potable. Cabe mencionar que aunque las mediciones las realizó la misma empresa, los pozos medidos en ambas campañas de medición no fueron los mismos, situación que hace variar el comportamiento de las cargas piezométricas.

El análisis del comportamiento de los niveles en los periodos propuestos indica que existe una gran variabilidad del nivel estático, específicamente en la zona poniente del valle. Para 1990 existe salida subterránea, mientras que en la de 1995 aparentemente no existe, esto se refiere a que el nivel es dinámico en el tiempo.

1.13 Transmisividad.

El concepto de transmisividad se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unitario a una temperatura fija o determinada.

La Transmisividad (T) en un acuífero se puede expresar como el producto de la conductividad hidráulica (K) y por el espesor del acuífero (h):

$$T = Kh$$

La conductividad hidráulica (K) se define como el caudal que pasa por una sección unitaria del acuífero bajo un gradiente también unitario a una temperatura fija o determinada, y puede expresarse en términos de la velocidad (v) y del gradiente hidráulico (i):

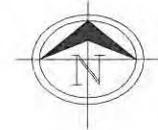
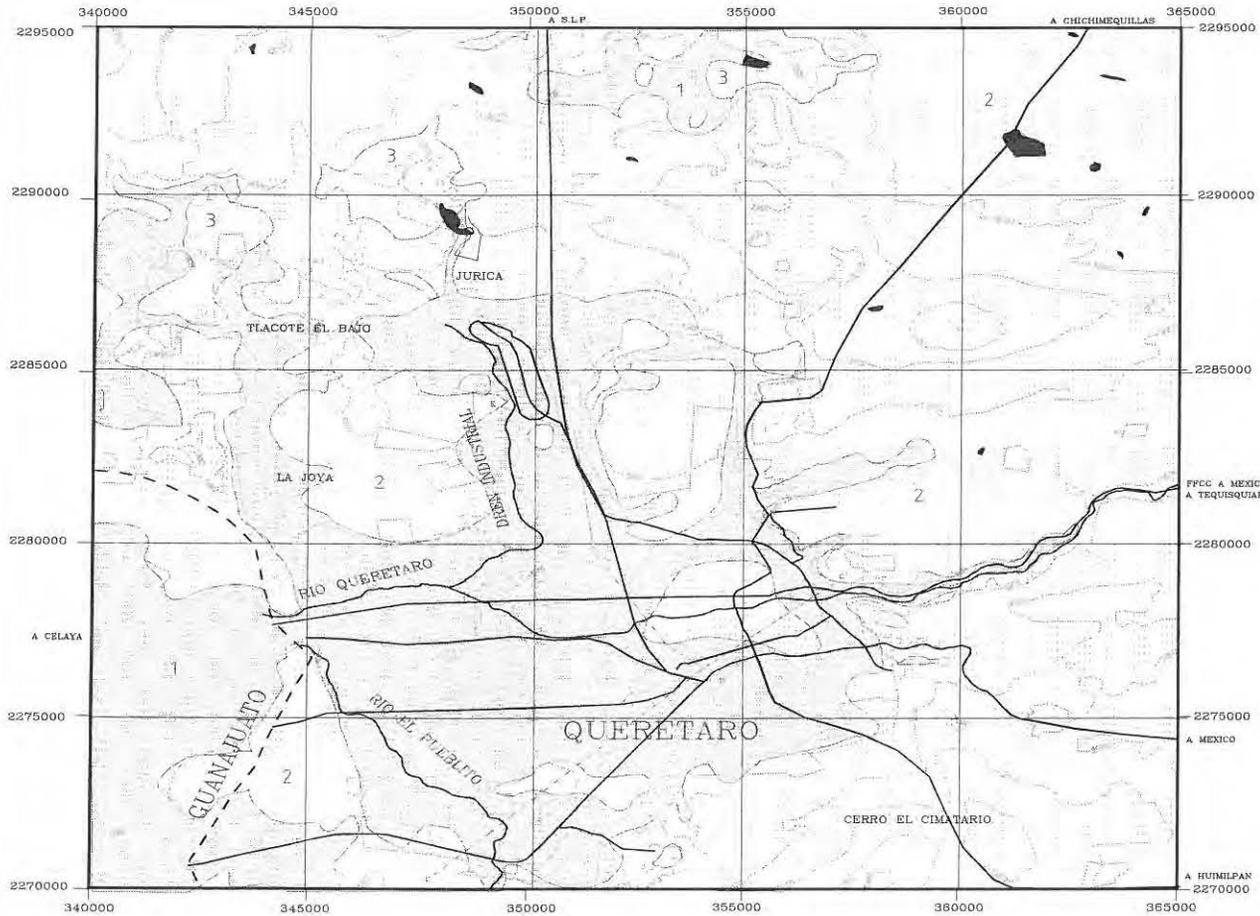
$$K = \frac{v}{i}$$

Dentro de las conductividades encontradas se tiene:

Las zonas donde se identifica un medio poroso, que varía de 0.01 a 10 m/día, constituido principalmente por depósitos aluviales y vulcanolacustres presentan los valores mas altos de conductividad hidráulica. De acuerdo con los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo (CNA "ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DE AGUASCALIENTES Y QUERÉTARO", 1996), las conductividades hidráulicas horizontal y vertical varían de 0.01 a 10 m/día.

Dentro de las zonas fracturadas, la conductividad horizontal y vertical varía de 0.084 a 40 m/día.

(Figura 1.20)



SIGNOS CONVENCIONALES

- POBLACION
- VIA DE FERROCARRIL
- CARRERA PAVIMENTADA
- TERRACERIA
- BORDO
- LIMITE ESTATAL
- CURVA DE NIVEL TOPOGRAFICA
- RIOS Y ARROYOS
- SECCION HIDROGEOLOGICA



MEDIO POROSO
 ZONA CON DEPOSITOS ALUVIALES, TOBAS ARENOSAS Y SEDIMENTOS VULCANOLACUSTRES.
 ESTA ZONA FUNCIONA COMO UN ACUIFERO DE LIBRE A SEMICONFINADO SE PRESENTA COMO ZONA DE RECARGA, CON UNA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA QUE VARIA DE 0.01 A 10 m/día.



MEDIO FRACTURADO
 ZONA CONSTITUIDA PRINCIPALMENTE POR BASALTO Y BRECHAS VOLCANICAS.
 ESTA TIENE UNA FUNCION DE ACUIFERO LIBRE, SIENDO UNA ZONA DE RECARGA DESDE LA SUPERFICIE HACIA EL ACUIFERO PRINCIPAL, CON UNA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA HORIZONTAL Y VERTICAL QUE VARIA DE 0.084 A 40 m/día.



UNIDAD IMPERMEABLE
 CONSTITUIDA DE ANDESITA, IGIMBRITA, RIOLITA, CALIZA, TOBA.
 TIENE UNA FUNCION IMPERMEABLE TANTO EN SUPERFICIE COMO EN LOS POCOS POZOS QUE LA HAN ATRAVESADO.



NOTA: ESTE PLANO SE HIZO EN COORDENADAS UTM

Plano de Hidrogeología y Transmisividad para el Valle de Querétaro

Figura 1.20 Mapa de Conductividad de el Área de Estudio (CNA "ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN EN LOS ACUIFEROS DE AGUASCALIENTES Y QUERÉTARO", 1996)

1.14 Marco Hidrodinámico del Acuífero. (información obtenida de la CNA "ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DE AGUASCALIENTES Y QUERÉTARO", 1996).

El Valle de Querétaro se encuentra formado por una acumulación significativa de sedimentos volcanolacustres con derrames intercalados de lavas que integran un paquete acuífero de mas de 600 metros de espesor.

En un inicio la fuente principal de recarga de agua al Valle de Querétaro, provenía de las infiltraciones de las lluvias en las superficies permeables y por la infiltración de los ríos Querétaro por el lado oriente, el Río Pueblito por el sur y los arroyos La Gallina y Jurica por el sector norte.

Las descargas de la cuenca tenían lugar por los manantiales en las partes altas y en los bordes de los ríos, por el drenado del Río Querétaro y el drenado subterráneo hacia el Valle de los Apaseos.

Antes de la década de los setentas la recarga de agua total era igual a la descarga del sistema, situación que se modificó a mediados de la década de los setenta, época en que se inició la explotación intensiva del acuífero.

A medida que fue aumentando la actividad socioeconómica del Valle de Querétaro, la explotación del agua subterránea comenzó a depender directamente del almacenamiento del acuífero, por lo que el sistema inició su régimen transitorio en un acuífero del tipo libre, provocando una pérdida en el balance hidrodinámico.

Esto provocó que se llegara a las capas semiconfinantes de baja conductividad hidráulica y se comenzaron a estudiar los sistemas de flujo subterráneos principales que constituían al acuífero.

A medida que se han tomado mediciones tanto de la recarga, como del bombeo y la variación litológica. Los niveles de agua subterránea han presentado un descenso que ha sido progresivo de 1990 a 1996, acelerando la velocidad anual de abatimiento a 3.7 metros.

Para 1996 la descarga de agua subterránea del Valle de Querétaro se llevaba a cabo por el bombeo de 216 pozos, por escurrimiento superficial del Río Querétaro y por flujo subterráneo hacia el estado de Guanajuato así como por evapotranspiración en las áreas verdes que aún quedan.

1.15 Tipo de Acuífero

Dentro de las unidades litológicas se agrupan dos medios: poroso y fracturado, creando un sistema que controla el flujo del agua subterránea en la zona de estudio, debido a esto constituye un sistema de acuífero de tipo libre.

Al contar con una variedad de tipos de rellenos, el acuífero se vuelve heterogéneo, presentando variaciones litológicas de orden horizontal como vertical, con secuencias mezcladas repetitivamente entre derrames volcánicos y depósitos granulares.

El medio fracturado es permeable aún encontrándose encima del nivel de saturación, lo anterior se debe al grado y calidad de fracturamiento, limpio y abierto, generando buena permeabilidad entre fracturas. Además, funciona como recarga al acuífero desde la superficie. Los caudales y profundidades totales son muy heterogéneos, por lo que es difícil su zonificación.

En general la cuenca para el año de 1996 soportaba una extracción media anual por bombeo de pozos de 109 millones y recibía una recarga también anual de 42 millones de metros cúbicos. La profundidad al nivel estático era de 110 m en promedio y llegaba a 170 m en la zona industrial

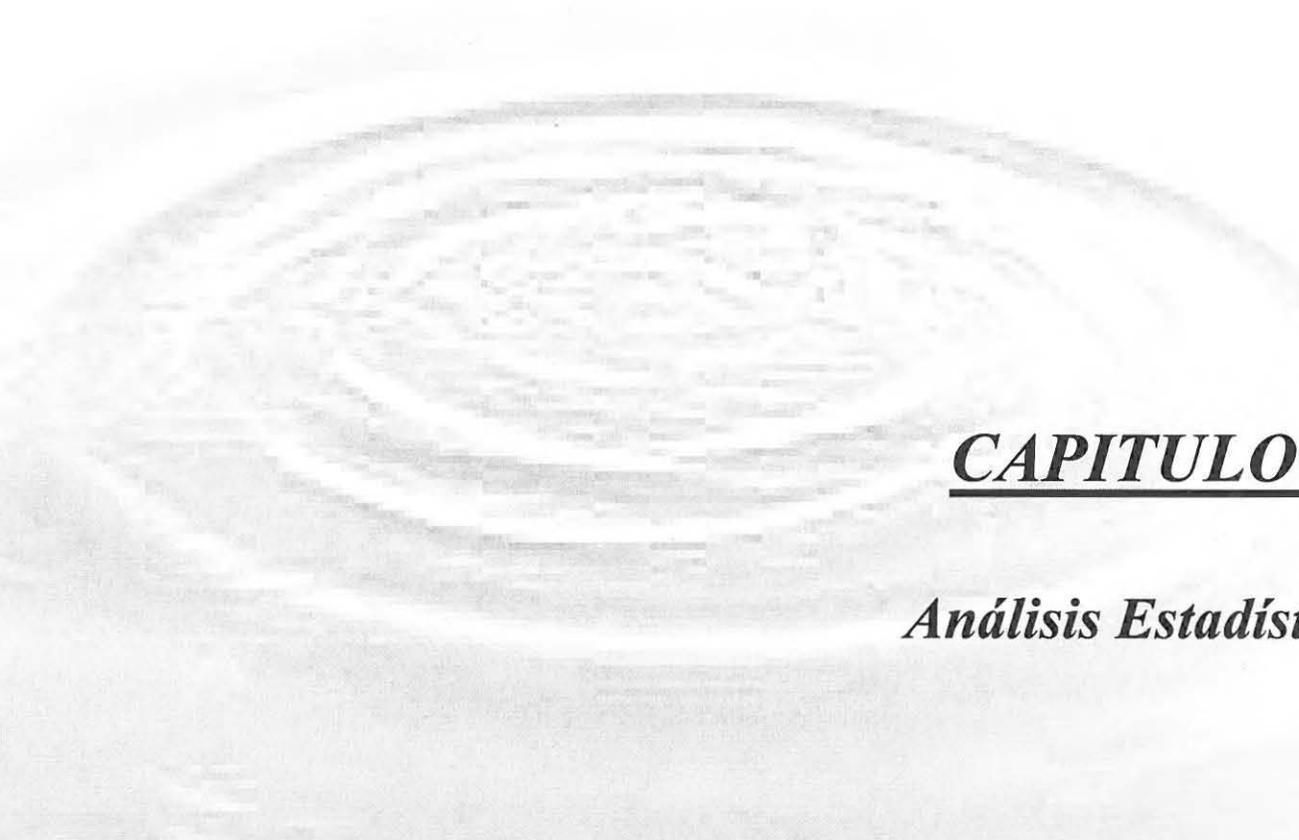
De la información socioeconómica se interpreta que la tasa poblacional se incrementa cada vez, la actividad industrial permanece estable, no siendo el caso en el área agrícola, la cual va disminuyendo.

Para el uso de agua potable, el tiempo de operación de las bombas es de 24 horas, todos los días del año.

Por otra parte, la mancha urbana va creciendo, creando una barrera de asfalto y concreto que obstruye las zonas de recarga y desforestando las áreas verdes. Esto provoca que en época de lluvias, no se puedan infiltrar ocasionando severos daños a la infraestructura urbana por la inundaciones a casas y calles.

Otro problema radica que al no haber esta infiltración de agua de lluvia, se provoca un abatimiento acelerado de los niveles de aguas subterráneas, los cuales ponen en riesgo el desabasto sustentable del Valle de Querétaro.

También se tiene el problema de las aguas negras de zonas industriales y de la ciudad, las cuales se vierten en los ríos y contaminan los cuerpos subterráneos de agua.



CAPITULO 2

Análisis Estadístico

Capítulo 2. Análisis Estadístico

2.1 Propiedades Estadísticas.

Es muy frecuente la necesidad de predecir el comportamiento futuro de una determinada variable, partiendo de su evolución pasada. También es necesario crear sistemas que permitan reunir esa información sobre la evolución pasada de una forma sintética que permita su fácil manejo.

La estadística es una herramienta muy útil para efectuar este tipo de tratamientos, a fin de obtener la máxima información a partir de una muestra de un universo de datos. Para el caso del acuífero del Valle de Querétaro estará representado por la red de pozos piloto.

Dentro de la estadística existe una serie de parámetros deducidos, que pretenden dar una imagen reducida de ellas.

Si estos parámetros se obtienen a partir de los datos muestrales, se denominan *estadísticos*.

Se pueden clasificar en: medidas de posición o tendencia central, medidas de dispersión o variabilidad y medidas de desviación o asimetría.

Para el caso que nos ocupa, se utilizó principalmente medidas de posición o tendencia central y medidas de dispersión o variabilidad.

Para definir dichos parámetros se usará la siguiente notación:

x_i, x_j, \dots, x_k : son valores observados.

n_i, n_j, \dots, n_k : sus respectivas frecuencias absolutas.

n : el número total de observaciones o frecuencia total.

n_i/n : es la frecuencia relativa.

Se verifica: $n_i + n_j + \dots + n_k = n$

2.1.1. Distribución Normal y Medidas de Posición o Tendencia Central

Distribución Normal: La distribución continua de probabilidad más importante en todo el campo de la estadística es la *distribución normal*. Su gráfica, que recibe el nombre de *curva normal*, es la curva en forma de campana, la cual describe en forma aproximada muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación, de aquí que por la cantidad de datos manejados obedece al *teorema del límite central*, el cual establece dos casos para la cantidad de la población que se tenga:

1. Si la población es grande y está distribuida normalmente, la distribución de la muestra media será normal.
2. Si la población es grande, pero la distribución no es normal, la distribución de la muestra media se aproximará a una distribución normal, siempre que el tamaño de la muestra sea grande (especialmente si es mayor que $30^{(1)}$).

⁽¹⁾ Taro, Yamane. Estadística, 1973, Editorial Harla, S.A. de C.V., México, pág. 94.

- A las medidas de posición o tendencia central también se les conoce por **promedio** y son valores de la variable que tienen sus mismas dimensiones. Los usados para el presente trabajo son:
- **Media Aritmética:** Es la suma de todos los valores observados, dividida por el número total de observaciones. Es decir

$$X = X_m = \frac{n_i x_i + n_j x_j + \dots + n_k x_k}{n_i + n_j + \dots + n_k}$$

La media de una variable X es de especial importancia en estadística debido a que determina el lugar donde se centra la distribución de probabilidad. No obstante, por sí misma la media no proporciona una adecuada descripción de la forma de la distribución. Se necesita caracterizar la variabilidad de la distribución.

2.1.2. Medidas de Dispersión o Variabilidad

Miden el grado de extensión de los valores observados alrededor de un promedio.

- **Varianza:** Llamada también variancia o fluctuación es el cuadrado de la desviación tipo:

$$\sigma^2 = \frac{n_i (x_i - x_m)^2 + n_j (x_j - x_m)^2 + \dots + n_k (x_k - x_m)^2}{n_i + n_j + \dots + n_k}$$

La varianza es una medida razonablemente buena de la variabilidad debido a que si muchas de las diferencias son grandes (o pequeñas) entonces el valor de la varianza σ^2 será grande (o pequeña). El valor de la varianza puede sufrir un cambio muy desproporcionado, aún más que la media, por la existencia de algunos valores extremos en el conjunto.

- **Desviación tipo:** También llamada por algunos autores típica o standard, es la desviación cuadrática respecto a la media aritmética.

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_i (x_i - x_m)^2 + n_j (x_j - x_m)^2 + \dots + n_k (x_k - x_m)^2}{n_i + n_j + \dots + n_k}}$$

Representa el alejamiento de una serie de números de su valor medio. Se calcula a partir de todas las desviaciones individuales con respecto a la media.

En la práctica, se promedian los cuadrados de las desviaciones (los cuadrados son siempre positivos), y luego se toma la raíz cuadrada

2.2 Técnica de Jackknife.

Este método se enfoca especialmente en la parte del muestreo, ya que deja afuera una observación a la vez. Esto es, si tenemos un conjunto de observaciones $x = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$, entonces al ir tomando esta observación por separada tenemos:

$$X_i = (x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$$

Para $i = 1, 2, \dots, n$ llamados *muestreos Jackknife*. El i -ésimo muestreo consiste en el conjunto de datos con las i -ésimas observaciones removidas.

De esta manera, podemos obtener el peso de la varianza de cada uno de los n valores y estimar el peso de estos valores con respecto al universo de datos obtenidos.

2.3 Coeficiente de Correlación

El coeficiente de correlación es el grado de la relación entre las variables que se estudian para determinar en que medida una ecuación lineal o de otro tipo describe o explica de una forma adecuada la relación entre variables.

Si todos los valores de las variables satisfacen exactamente una ecuación, se dice que las variables están correlacionadas perfectamente o que hay una correlación perfecta entre ellas.

La expresión matemática está dada por el parámetro r la cual se expresa como:

$$r = \pm \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

donde:

y_j = valores teóricos obtenidos mediante la recta de regresión.

y_i = valores de la muestra.

\bar{y} = valores promedio

N = número total de muestras.

2.4. Análisis estadístico en las redes de monitoreo.

El objetivo principal de una red de monitoreo es estimar un parámetro adecuado para realizar mediciones. Ejemplos de parámetros son:

- Un promedio espacial.
- Una tendencia en el tiempo.
- Interpolación espacial.

La diferencia entre el valor verdadero de este parámetro y su estimado es el error de estimación. Si se consideran mas mediciones, se tendrá una menor estimación del error. En la práctica el valor verdadero de este parámetro se desconoce, por lo que la estimación del error también se desconoce. En una aproximación hidrogeológica para diseñar una red, partiendo de un conocimiento previo a las propiedades hidrodinámicas, al conocimiento de la elevación de los niveles estáticos y dinámicos de los pozos, a la transmisividad, etc., se puede dar una estimación intuitiva de la distribución del error. En una aproximación estadística, la estimación del error se cuantifica por sus características estadísticas, en la mayoría de los casos por la varianza. Esta varianza es dependiente en el diseño de la red (densidad de la red y frecuencia de las mediciones) y las propiedades estadísticas de los parámetros medidos. A manera de calcular el error de la varianza, las

propiedades estadísticas tienen que ser evaluadas a partir de mediciones disponibles o estimadas como un primer paso. Si no hay suficientes datos, la aproximación debe de ser la hidrogeológica.

Dependiendo de los parámetros a evaluar, los métodos estadísticos que pueden ser aplicados se dividen en:

➤ **Estadística clásica.** Se aplica en el caso de que el parámetro a evaluar se formule en términos de características generales. Tales como un valor de referencia en el espacio o un valor promedio en el tiempo.

➤ **Geostatística.** Se aplica cuando el parámetro a evaluar se formula como una función o espacio, en particular la interpolación espacial. El diseño de la red se enfoca a la densidad y localización de los puntos de muestreo.

➤ **Series de tiempo.** Se aplican si los parámetros a evaluar se formulan como una función del tiempo. Por ejemplo, una tendencia. Aquí el diseño se enfoca a las mediciones de frecuencia y a la longitud de los periodos de muestreo.

□ **Estadística clásica**

Se utiliza en todas las aplicaciones de arreglo u orden de la información, como una media, varianza, etc., pero también para hacer pruebas de hipótesis paramétricas y no paramétricas. Se aplica también para características espaciales y temporales. Estas características generales proporcionan una descripción concisa de un conjunto de datos en términos de:

a. Medidas de tendencia central.

La media de la muestra es probablemente la medida común más representativa del centro de un conjunto de datos. Existen algunas variaciones tales como la media aritmética, geométrica y armónica.

b. Medidas de variabilidad o extensión.

La varianza o su raíz cuadrada (desviación estándar) es la medición más común para medir la variabilidad o esparcimiento de la información. Es de vital importancia y está ligada directamente a la incertidumbre o exactitud de la estimación. Como la media, la varianza está fuertemente influenciada por los valores remotos.

Para el diseño de una red de monitoreo, se requiere la relación entre el número de muestras y la estimación del error de la varianza.

En resumen, las mediciones estadísticas como las series de funciones de correlación, semivariogramas, etc., pueden ser consideradas como características generales también. Estas funciones se pueden utilizar como una cuantificación más precisa de la relación entre la frecuencia de muestreo y la estimación de la varianza. Con estas funciones se puede definir una medida que cambia y que debe ser incluida en las mediciones.

□ **Geoestadística**

En geoestadística, la propiedad variable se visualiza como una función espacial aleatoria. Tal función se ha denominado como una variable regionalizada. Una variable regionalizada se observa como una de muchas realizaciones de un campo espacial aleatorio. La variable en este campo aleatorio no es una variable clásica aleatoria sin ninguna estructura espacial, pero se considera que exhibe una dependencia espacial estadística. Los valores de las muestras en las localidades vecinas tienden a ser más semejantes que aquellos valores que se colectan en localidades distantes. Estas estructuras de correlación están representadas por las funciones de covarianza y/o semivariogramas. La incorporación de la estructura de correlación espacial es una característica importante en el análisis geoestadístico.

Las técnicas geoestadísticas para el diseño de redes de monitoreo de agua subterránea pueden agruparse en tres clases:

1. Simulación aproximada.
2. Varianza.
3. Riesgo basado en aproximaciones.

- **Simulación aproximada**

Una simulación aproximada se hace a través de la generación de múltiples campos sintéticos de la variable a medir. Estos campos sintéticos se derivan de las propiedades estadísticas. Con estas propiedades estadísticas y relaciones entre los números, se evalúan las localidades de los puntos de las muestras, así como la calidad de confianza de la estimación de la propiedad.

- **Aproximación basada en la Varianza.**

La geoestadística ofrece varios algoritmos de estimación, el Kriging proporciona una interpolación espacial que incluye la correspondiente estimación del error de la varianza. Esta estimación de la varianza puede ser contemplada como una medida de la aproximación del valor estimado. El objetivo en este método es el de minimizar la estimación de la varianza. Esto se debe al hecho que la efectividad de la reducción de la incertidumbre de cualquier esquema de muestreo depende sólo del número y localidades de los sitios de medición y no de los valores de medida y magnitud de esos sitios.

- **Aproximación basada en la probabilidad.**

Este método da más prioridad a los puntos con alta variación sin tomar en cuenta sus valores estimados. Tales criterios no son convenientes para una actividad típica de monitoreo de calidad, donde se requiere de información sobre áreas donde la variable presenta valores críticos, por tanto es necesario tomar en cuenta tanto los valores de la variación como de sus valores estimados para poder definir mejor los sitios de estudio.

- *Análisis de series de tiempo y frecuencia de muestreo.*

También existe otro método, el de análisis de señales, el cual puede ser efectivo, pero tiene diversas desventajas, entre ellas la falta de un seguimiento continuo de los niveles piezométricos de los pozos, por lo que también resulta poco atractivo, es costoso operacionalmente.

En la estadística clásica la aproximación de las observaciones o muestras se consideran como un número aleatorio de mediciones, mientras que en las series de tiempo las mediciones muestran un orden a través del tiempo y pueden tener una correlación serial.

Los objetivos típicos relacionados a las series de tiempo y a la detección de tendencias, funciones de respuesta de entrada, es la descomposición de las series en componentes. Para el monitoreo el principal objetivo es deducir los requerimientos de la frecuencia de las mediciones y los periodos de observación. Esta relación depende sumamente de la varianza y de la correlación de las series .

Se distinguen tres categorías de los métodos de análisis.

1. Análisis de regresión y detección de otras técnicas de tendencia.
2. Modelos de promedio integrado autorregresivo.
3. Análisis espectral.

- **Análisis de regresión y detección de otras técnicas de tendencia**

Muchas de las tendencias de detección paramétricas y no paramétricas se han desarrollado para series de tiempo. Estas técnicas dan la estimación más deseada del cambio en el tiempo y el correspondiente intervalo de confianza, el cual depende del número de mediciones y de los periodos de monitoreo. Esta dependencia se usa para diseñar la frecuencia de las mediciones.

- **Modelos auto regresivo**

El punto inicial en esta clase de métodos es la descripción del comportamiento de las series de tiempo en términos de la respuesta de una función de entrada con estas funciones, los pronósticos pueden hacerse o descomponerse de las series arregladas.

Los parámetros en las funciones respuesta de entrada son estimadas estadísticamente a partir de la incertidumbre en el parámetro estimado y los pronósticos son dependientes de la frecuencia de la medición y de aquí se obtiene una relación donde la frecuencia de la medición se puede evaluar.

En resumen, las series de tiempo para niveles de agua subterránea se usan a partir de la precipitación, niveles de agua superficial y extracciones de agua como información adicional.

- **Análisis espectral**

En esta situación las series de tiempo se descomponen de acuerdo a la duración o longitud de los intervalos donde ocurren variaciones. El análisis espectral se conoce también como análisis armónico, análisis de Fourier y análisis de frecuencia. Los modelos básicos de señales no periódicas lo constituyen funciones limitadas en el tiempo. Esta limitación temporal puede ser estricta, cuando la función es nula fuera de un intervalo de tiempo determinado, o real, puesto que todas las señales que tienen existencia física son observadas en un periodo finito de tiempo para el caso del acuífero del valle de Querétaro se tiene la restricción en cuanto al tiempo, este análisis no puede ser desarrollado, debido a que no existe un control de mediciones, necesario para crear una señal continua por lo que en este momento no puede realizarse, aunque con base en la red de monitoreo que se va a proponer se podrá generar una señal continua con un control en la toma de datos en los niveles de los pozos de una manera consecutiva, por lo tanto se podría realizar un análisis espectral, e identificar mejor los sitios de muestreo.

Para el análisis espectral, lo más normal es realizar transformaciones del dominio del tiempo al de la frecuencia. Con esto se trata de evaluar como se distribuye la energía en función de la frecuencia. La conmutación entre ambos dominios se realiza mediante la Transformación de Fourier.

La técnica se basa en la teoría de Fourier la cual establece que cualquier función continua, valuada sencillamente puede ser representada por una serie de sinusoides de diferentes amplitudes, longitudes de onda y puntos de inicio.

Para obtener la transformada se considera una señal periódica $x(t)$ de periodo P , cuyo desarrollo en serie será:

$$x(t) = \sum_n c_n e^{jn\omega t} \quad \text{con } \omega = \frac{2\pi}{P} \quad \text{y} \quad c_n = \frac{1}{P} \int_{-P/2}^{P/2} x(t) e^{-jn\omega t} dt$$

Por tanto puede escribirse:

$$x(t) = \sum_n \left[\frac{1}{P} \int_{-P/2}^{P/2} x(z) e^{-jn\omega z} dz \right] e^{jn\omega t} \quad \text{como } f_0 = \frac{1}{P} \quad \text{es: } x(t) = \sum_n \left[\int_{-P/2}^{P/2} x(z) e^{-jn\omega z} dz \right] e^{jn\omega t} f_0$$

Ahora bien, si se hace crecer P hacia infinito, la función $x(t)$ quedaría limitada a un solo pulso y además, f_0 tendería a cero, pudiéndose interpretar $f_0 = inc(f)$ 'incremento' de modo que el armónico de frecuencia nf_0 se corresponda con la frecuencia f , lo que permite pasar del espectro discreto al continuo.

$$x(t) = \sum_n \left[\int_{-P/2}^{P/2} x(z) e^{-jn\omega z} dz \right] e^{jn\omega t} \Delta f$$

haciendo ahora el paso al límite es $\Delta f = df$ y el sumatorio es una integral.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(z) e^{-jn\omega z} dz \right] e^{jn\omega t} df$$

Esta relación se conoce como identidad de Fourier.

La transformación de Fourier se define entonces como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{y además admite inversa que es: } x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j\omega t} df$$

$X(f)$ es en general una función compleja, es decir:

$$X(f) = |X(f)| e^{j\theta(f)} = R(f) + jI(f)$$

en la que R representa la parte real e I la parte imaginaria.

$$\text{Su módulo es: } |X(f)| = [R^2(f) + I^2(f)]^{1/2}$$

$$\text{y su argumento: } \theta(f) = \arctg \frac{I(f)}{R(f)} \text{ define su espectro de fase.}$$

Si se considera que $x(t)$ es una función real se tiene que:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) [\cos \omega t - j \sin \omega t] dt$$

$$\text{en la que: } R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \text{ e } I(f) = - \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt$$

Las series de tiempo se descomponen en sus partes constituyentes llamadas armónicas. Estas armónicas tienen amplitudes las cuales se pueden expresar en términos de varianza y una vez descompuestas pueden ser consideradas como la suma de muchas funciones sinusoidales, la varianza de las series de tiempo está compuesta por la suma de la varianza de estas armónicas. Las varianzas de las armónicas sucesivas pueden ser graficadas en un peridiograma o una línea de potencia espectral o densidad espectral.

Se define la densidad espectral $S_x(\omega)$ del proceso $x(t)$, como la transformada de Fourier de su función de autocorrelación $R_x(\tau)$, que vendrá dada por:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

por lo que la función de autocorrelación podrá expresarse como la transformada inversa del espectro:

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

$S_x(\omega)$ es una función continua de la frecuencia angular ω , y sus propiedades más importantes son:

a) dado que $S_x(\omega)$ puede expresarse en términos de sus partes real e imaginaria

$$S_x(\omega) = A(\omega) - iB(\omega)$$

si el proceso $x(t)$ es real, se puede demostrar que

$$S_x(\omega) = A(\omega)$$

donde:

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cos\omega\tau d\tau$$

es decir, que $S_x(\omega)$ es una función real de ω . Esta es otra razón por la que interesa abordar el estudio de la estructura frecuencial de los procesos reales $x(t)$ a través de su espectro $S_x(\omega)$ y no de su transformada de Fourier $X(\omega)$, dado que esta última es siempre una función compleja más difícil de manejar e interpretar.

b) de a) puede deducirse que $S_x(\omega)$ es una función par, es decir, que $S_x(-\omega) = S_x(\omega)$, es decir, es una función simétrica positiva.

c) por último, de su definición puede deducirse que:

$$R_x(\tau=0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega = \langle x^2 \rangle$$

por lo que el valor cuadrático medio de un proceso $\langle x^2 \rangle$ viene dado por el área comprendida bajo el gráfico de la densidad espectral $S_x(\omega)$ (Figura 4.1). Las unidades de $S_x(\omega)$ son las de (valor cuadrático medio)/(unidad de frecuencia).

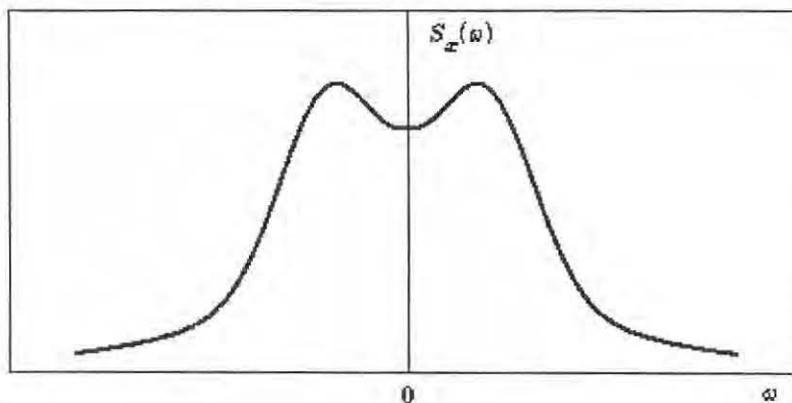


figura 2.1. Densidad espectral para un proceso $x(t)$.

El peridiograma se usa para determinar las frecuencias dominantes en la serie de tiempo y también cual fracción de la varianza total se explica por estas frecuencias. De aquí que el peridiograma ofrece una cuantificación de la relación entre las mediciones de frecuencia y el grado en el cual la varianza de la serie de tiempo actual se captura con las mediciones.

La frecuencia más alta que es capturada por la medición determina la frecuencia de muestreo mínima aceptable. Un criterio bien conocido a este respecto es la frecuencia de Nyquist donde la frecuencia $f_s = 2\omega$ se le denomina frecuencia de Nyquist y al intervalo de muestreo T_s intervalo de Nyquist.

Como corolario del teorema puede afirmarse que dada una colección discreta de valores $x(n/2\omega)$ existe una función $x(t)$ y solo una de banda limitada a ω que pasa por todos los puntos dados y que se construye mediante la fórmula de interpolación. Existen funciones infinitas que pasan por esos puntos y son de anchura diferente de ω .

2.5 Interpolación

Para la realización del análisis estadístico, es necesario construir una malla ya que los datos están de manera dispersa dentro del espacio y es necesario tener un ordenamiento de estos datos, esta malla estará equidistante entre los pozos con una separación de 500 m, esto debido a que es el espaciamiento mínimo necesario para que no exista una interferencia en el radio de operación de los pozos en el Valle de Querétaro.

Aunque hay que aclarar que en el valle de Querétaro existen pozos con distancias menores a lo propuesto, lo que ha originado una interferencia entre pozos, profundización del nivel dinámico, incremento en los costos de operación y disminución en el rendimiento de los pozos. En la **figura 1.13** del capítulo 1 se puede ver la distribución de los pozos.

El método de interpolación utilizado fue kriging en su forma simple, el cual es un método de interpolación exacto y local que pondera el peso de cada punto muestral X_i en el valor interpolado en un punto no muestral X_0 según una función de la distancia entre dichos puntos. Su fundamento conceptual deriva de la teoría de las variables regionalizadas, tratándose, en esencia de un método geoestadístico consistente en la búsqueda de unos interpoladores óptimos que producen unos residuos insesgados y con mínima varianza.

Para el cálculo de las varianzas se tuvo el apoyo del paquete de cómputo SURFER 7.0 de la empresa Golden Software Inc. Para estas configuraciones se hizo una malla de 25000 X 25000 m, con espaciamientos de 500 x 500 m, por medio de la función de kriging de forma sencilla, ya que sólo utilizamos esta función para poder tener una interpolación sencilla, debido a que la base de este trabajo radica en la estadística y no la geoestadística, por ello no es necesario aplicar otro tipo de kriging.

Una forma de esquematizar la forma de este método empleado en el programa Surfer consiste en crear un radio de interpolación el cual se mantiene constante para cada uno de los puntos e ir dando valores interpolados en los alrededores de este radio como se muestra en la **figura 2.2**.

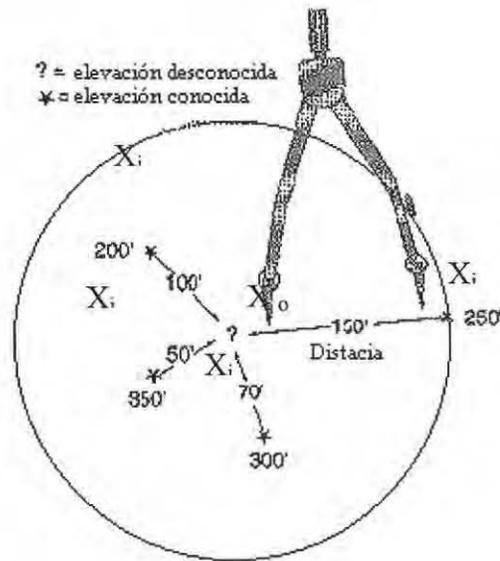
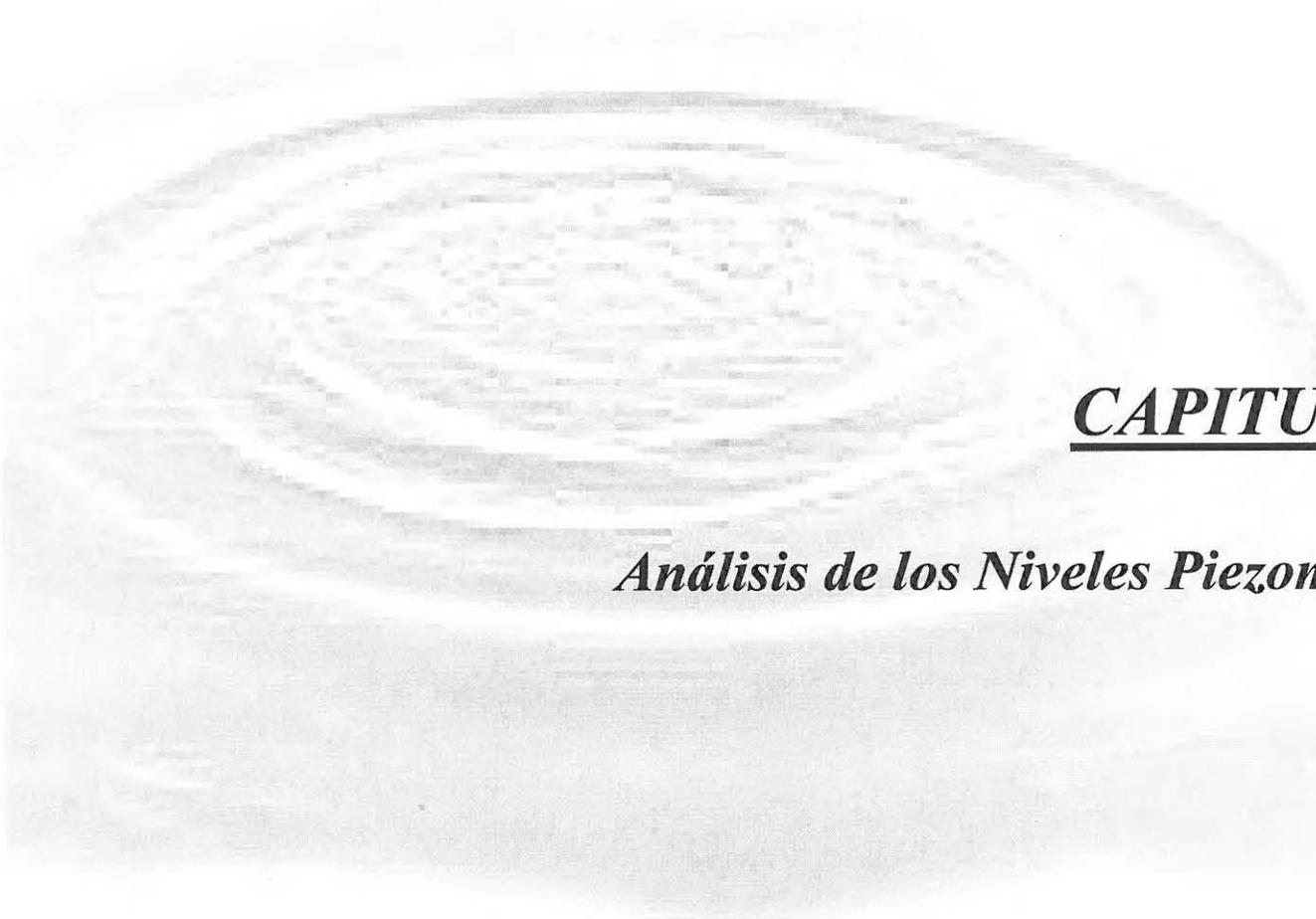


Figura 2.2 Esquema de Interpolación



CAPITULO 3

Análisis de los Niveles Piezométricos

Capítulo 3. Análisis de los Niveles Piezométricos

3.1 Introducción.

Una red de monitoreo piezométrico requiere de pozos que cuenten con información tanto de la profundidad al nivel estático como de su calidad. Como se mencionó anteriormente el monitoreo es el instrumento más importante y fiel para identificar las condiciones que guarda un acuífero, ya que de éste se pueden determinar la situación natural, las modificaciones que le ha hecho el hombre, así como conocer su situación y los usos que se le da al agua.

Un requisito indispensable para realizar un monitoreo y con ello la evaluación del acuífero es la caracterización del sistema acuífero. También es necesario conocer las condiciones que se pueden generar en sus fronteras.

En la **tabla 3.1** se describen las actividades que conllevan a la implementación de una red de monitoreo.

	ACTIVIDADES	RESULTADOS
RECOPILOCIÓN DE INFORMACIÓN	Búsqueda de información.	Marco de referencia.
CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO	-Geología. -Geofísica. -Pruebas de bombeo. -Nivelación topográfica de brocales de pozos. -Piezometría. -Hidrometría. -Muestreo y análisis de calidad del agua.	-Tipos de rocas o materiales. -Geometría del acuífero. -Estructuras del acuífero. -Posición del nivel estático. -Dirección del flujo subterráneo. -Volúmenes de extracción. -Límites del acuífero. -Zonas de recarga y descarga. -Calidad del agua. -Modelo conceptual de funcionamiento del acuífero. -Balance de aguas. -Modelación.
FUNCIONES /USOS	-Manejo de información . -Mediciones de detalle.	-Zonificación de Bombeo. -Usos del agua (agrícola, potable, industrial, abrevadero). -Calidad del agua. -Predicciones. -Abastecimiento. -Mantenimiento de los niveles del agua subterránea en una posición sustentable. -Protección de fuentes. -Prevención de subsidencia del terreno.
VULNERABILIDAD	-Manejo de información. -Implementación de una medición adecuada de posición del agua y calidad.	-Conocimiento. -Seguimiento. -Control. -Prevención.
AMENAZAS	Ubicación de sitios con problemas.	-Problemas de calidad y cantidad del agua. -Problemas internacionales, interestatales, intermunicipales. -Fuentes potenciales de contaminación. -Sobre explotación. -Fuentes superficiales de agua (arroyos, ríos, presas, canales de riego).
PROBLEMAS	Tendencias del flujo subterráneo.	-Incremento de la salinidad del suelo. -Desecación del suelo. -Subsidencia del terreno.

Tabla 3.1 Actividades que conllevan a la implementación de una red de monitoreo (Tomado de "STATE OF THE ART ON MONITORING AND ASSESSMENT OF GROUNDWATER", VOL. 4, 1999, Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO.)

Recopilación de Información:

El acuífero del valle de Querétaro se ha estudiado desde el año de 1970, fecha en que se inició la medición sistemática del acuífero. Se cuenta con información geológica, geofísica, geohidrológica y climatológica que permitió plantear el marco de referencia del acuífero descrito en el capítulo 1. En 1990 se realizó la cuantificación en cuanto a su relación recarga-descarga y de esa fecha hasta 1996 se hicieron actualizaciones anuales.

La caracterización del acuífero:

En el acuífero del valle de Querétaro se identifican dos tipos de medios geológicos por donde circula el agua subterránea.

Tenemos un medio poroso formado por depósitos aluviales del Terciario, tobas arenosas y sedimentos vulcanolacustres del Cuaternario. Se encuentran relleno la Fosa Tectónica de Querétaro, **figura 1.11**, como cuerpos lenticulares en los que es difícil determinar su extensión ya que pierden continuidad lateral, como se puede observar en la sección geofísica de la **figura 1.12**. Se les puede encontrar intercalados e interdigitados con varias secuencias de derrames volcánicos.

También encontramos un medio fracturado definido litológicamente por andesitas, andesitas alteradas, ignimbritas y riolitas del Terciario y basaltos, brechas volcánicas y tobas líticas y vítreas del Cuaternario. Forma una unidad hidrogeológica ampliamente distribuida hasta con el 70 % en superficie, ocupando desniveles topográficos en ocasiones abruptos ya que forma mesetas y en menor cantidad edificios volcánicos.

El acuífero es de tipo libre, identificándose dos tipos de sistemas de flujo: Local que funciona generalmente recargando al acuífero desde las zonas topográficamente altas; y el flujo intermedio que funciona como descarga en la zona central del valle.

En cuanto a la dinámica del acuífero se tiene: Una extracción intensiva en el valle de 109,225 millones de metros cúbicos al año (dato de 1996), con un incremento en la demanda para el uso público – urbano exponencial, dado el crecimiento poblacional que se presenta en la zona (2.09% de crecimiento anual).

Las conductividades hidráulicas en el acuífero son variantes, presentándose las mayores en el medio fracturado. Bajo esta perspectiva en este caso es necesario conocer estos valores para poder estimar la velocidad con que circula el agua, sobre todo si se está hablando de contaminación.

Otro aspecto no menos importante son sus fronteras. El acuífero del valle de Querétaro se limita al oriente con el acuífero del valle de San Juan del Río, están dentro de un mismo territorio estatal, mientras que al poniente limita con el estado de Guanajuato, en esta situación se pueden presentar problemas interestatales.

En México los criterios que se han aplicado para definir los límites de un acuífero varían de acuerdo a la situación geográfica, económica, geológica y política donde se encuentra.

La ley de Aguas Nacionales en su artículo 3º, inciso II, define a un acuífero como “*Cualquier formación geológica por la que circulan o almacenan aguas subterráneas que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento*”. Pero uno de los aspectos que más involucran en la delimitación de un

acuífero es el aspecto legal, con este criterio se intenta impedir que se transfieran derechos de extracción de una cuneca a otra, o bien, de un acuífero de una zona poco explotada a una zona sobre explotada.

En el Diario Oficial de la Federación, con fecha del 31 de enero del 2003, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales publicó el acuerdo por el que se dan los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para definir su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización.

El acuífero del Valle de Querétaro se ubica en la región Hidrológico – Administrativa VIII “*Lerma – Santiago- Pacífico*” (2201) y sus coordenadas geográficas son:

Vértice	Longitud Oeste			Latitud Norte			Observaciones
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos	
1	100	32	56.4	20	44	9.6	
2	100	24	18	20	44	20.4	
3	100	20	42	20	40	4.8	
4	100	20	6	20	36	18	
5	100	16	44.4	20	36	28.8	
6	100	21	0	20	33	50.4	
7	100	20	9.6	20	32	2.4	
8	100	27	50.4	20	26	34.8	
9	100	29	16.8	20	28	4.8	Del 9 al 1 por el límite estatal
1	100	32	56.4	20	44	9.6	

Tabla 3.2 Coordenadas geográficas del acuífero 2201 Valle de Querétaro

La dirección del flujo subterráneo va de NE-SW, presentando las zonas de recarga en la zona sur, norte y en la parte oriente del valle. Las zonas de descarga de agua subterránea se llevan a cabo a través del bombeo de 216 pozos, por el escurrimiento superficial del Río Querétaro y Pueblito, además por el flujo subterráneo hacia el Estado de Guanajuato, así como por evapotranspiración en las áreas verdes que aún quedan.

Para el año de 1996, gobernados por la distribución espacial de la recarga, del bombeo, y la variación litológica, se observa que los niveles de agua subterránea descendieron progresivamente. Dentro del periodo comprendido entre 1990 a 1996 la velocidad anual de abatimiento es de 3.5 m.

Con base en la información del censo de aprovechamientos, evolución de los niveles de agua subterránea, usos del agua, volúmenes de extracción y las direcciones de flujo subterráneo se pudo conocer el grado de desbalance que se encuentra el acuífero. La recarga total es de 42 Mm³ al año, El porcentaje deficitario de hasta el 60% en el balance hidráulico se manifiesta en la formación de depresiones piezométricas formadas en las localidades de baja permeabilidad y en las de máxima densidad de pozos..

En cuanto a la calidad del agua se tuvieron concentraciones de fluoruro con un rango de 2.1 a 0.6 mg/l siendo la norma de 1.5 mg/l. Las concentraciones de 0.6 mg/l, a 1.4 mg/l están en la parte sureste y suroeste del área, zona donde se concentra el bombeo para abastecimiento de agua a la población.

Las Funciones y Usos:

De los 216 pozos activos para el periodo de 1996 se extrae un total de 109.25 Mm³ de los cuales el sector de mayor consumo es el potable con el 61%, seguido del agrícola con el 29.3% y el industrial con 8.6%. El 1.1% del volumen restante es utilizado para las actividades de abrevadero y recreativas.

El mantenimiento de los niveles del agua subterránea en una posición sustentable, como se ha descrito, va a la baja, debido al aumento poblacional que crece de forma exponencial y por tanto no puede tener un nivel de posición sustentable específicamente para la actividad agropecuaria.

Con base en todos estos datos obtenidos se puede predecir, que con estos regímenes de extracción, para el año de 2005 el acuífero del Valle de Querétaro estará en colapso. Esta aseveración se basa en las predicciones obtenidas con el modelo de flujo hidráulico subterráneo realizado por la CNA en el “Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Optimo de la Red de Observación en los Acuíferos de Aguascalientes y Querétaro, 1996”.

Las únicas fuentes alternas económicamente viables, por el momento, son las locales y de la región de Chichimequillas. En el corto tiempo los niveles de agua subterránea para el sector agrícola ya no serán sustentables, lo que ocasionará que las tierras de cultivo se conviertan en zona urbana o industrial.

No existe una protección de fuentes así como la falta de una prevención a la subsidencia del terreno, provocado por un abatimiento acelerado dando como resultado movimientos diferenciales muy fuertes en el terreno.

Vulnerabilidad:

Para este caso no se tiene un programa del manejo de vulnerabilidad, pero se sabe que el acuífero es vulnerable debido a que existen zonas con grietas en donde puede haber infiltración de contaminantes que afecte a los acuíferos.

Amenazas:

Debido a que existen varias zonas con agrietamientos y que las aguas superficiales están contaminadas, se tiene la amenaza de contaminación del acuífero, aunado a que la cantidad de agua considerada potable esta siendo sobre explotada y no se tiene un control para el tratamiento de éstas una vez utilizadas.

Otra de las amenazas son problemas interestatales, debido a que el acuífero afecta a otro Estado, Guanajuato, provocando conflictos en cuanto a la cantidad y calidad de la misma, sobre todo, porque el límite se comporta algunas veces como parte aguas y la dirección del flujo oscila dependiendo el grado de extracción que se mueve en Querétaro o en el estado de Guanajuato.

Problemas:

La amenaza de la sobreexplotación ha provocado movimientos diferenciales del terreno la cual está ya afectando la infraestructura urbana. El agrietamiento del terreno origina que los volúmenes de agua superficial contaminen directamente el acuífero.

Por todo lo antes expuesto, el monitoreo del agua subterránea viene a ser la herramienta más útil e imprescindible para apoyar la caracterización del acuífero y conocer su evolución.

3.2 Ciclo del Monitoreo.

Este se refiere a diseñar un procedimiento con especificaciones necesarias que permitan llevar el control del agua, y a partir de esto establecer las bases de un monitoreo sistemático y continuo.

Este monitoreo se debe de ver como una serie de actividades que inician con la definición de la información y terminan con el uso de esta información.

Para el trabajo que se está desarrollando, la definición de actividades ya está planteada y ahora se requiere de establecer el procedimiento para llevar a cabo el monitoreo. En la **figura 3.1** se presenta un esquema de cómo debe implementarse

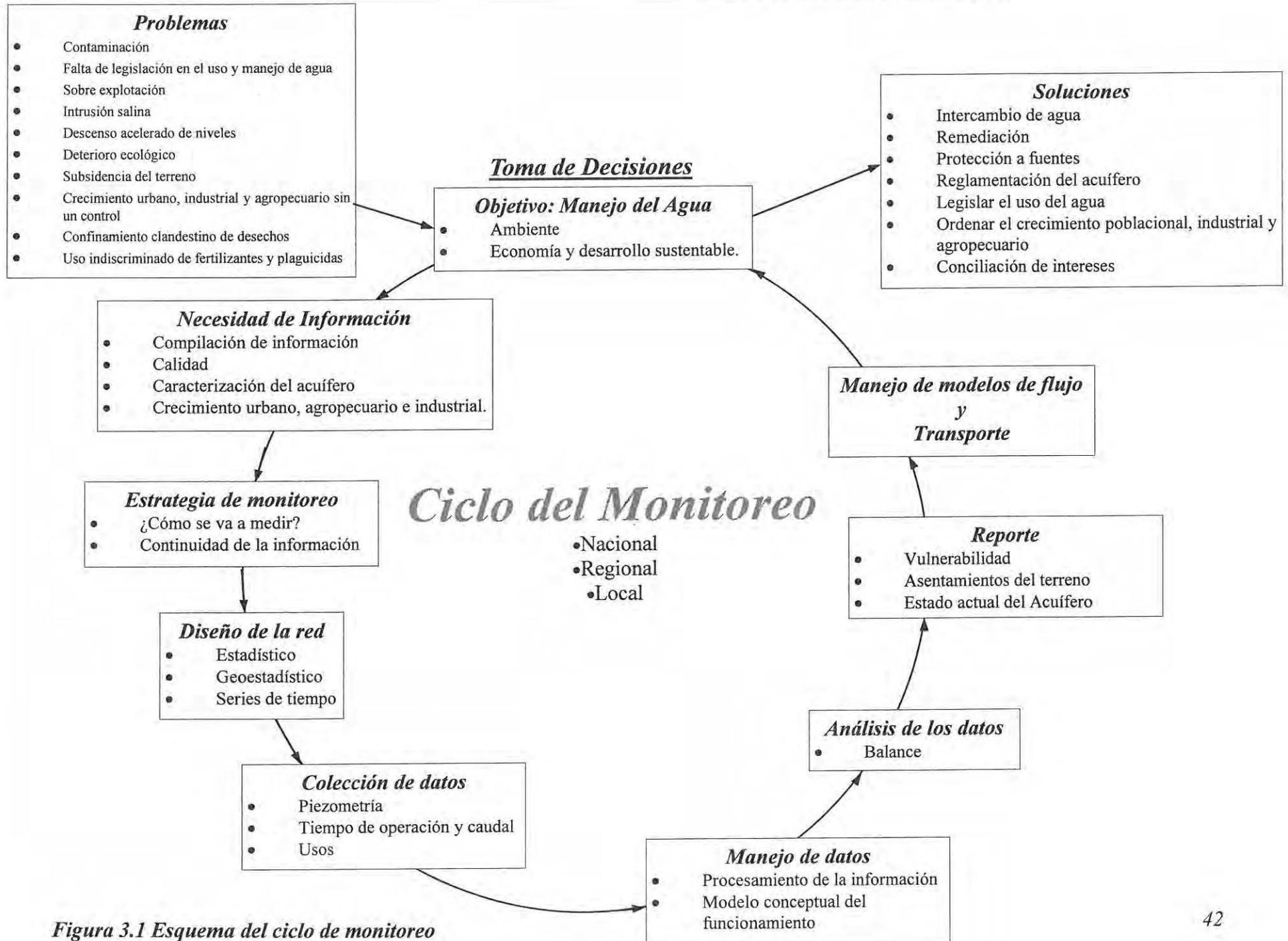


Figura 3.1 Esquema del ciclo de monitoreo

El diseño de la red de monitoreo, para el acuífero del valle de Querétaro, se enfocará únicamente a la definición de los puntos de medición óptimos que se requieren para llevar el seguimiento de la evolución de los niveles del agua subterránea y apoye a la detección de contaminantes. El nivel de referencia de este monitoreo será de tipo operacional y de vigilancia (de acuerdo a la **tabal A.1**), para obtener una fotografía tridimensional del sistema de flujo del agua subterránea.

La caracterización de este sistema se referirá únicamente al conocimiento del nivel del agua subterránea y a la determinar de las tendencias temporales y anuales de los niveles, definirá la periodicidad de las mediciones.

3.3 Análisis del comportamiento histórico de los niveles piezométricos.

Con base en la información disponible es necesario conocer la evolución de los niveles del agua subterránea y relacionarlas con los factores que influyen en el comportamiento del acuífero.

En la **figura 3.2** se presenta la evolución de las perforaciones que se han realizado en el acuífero del Valle de Querétaro.

Evolución de pozos perforados en el Valle de Querétaro

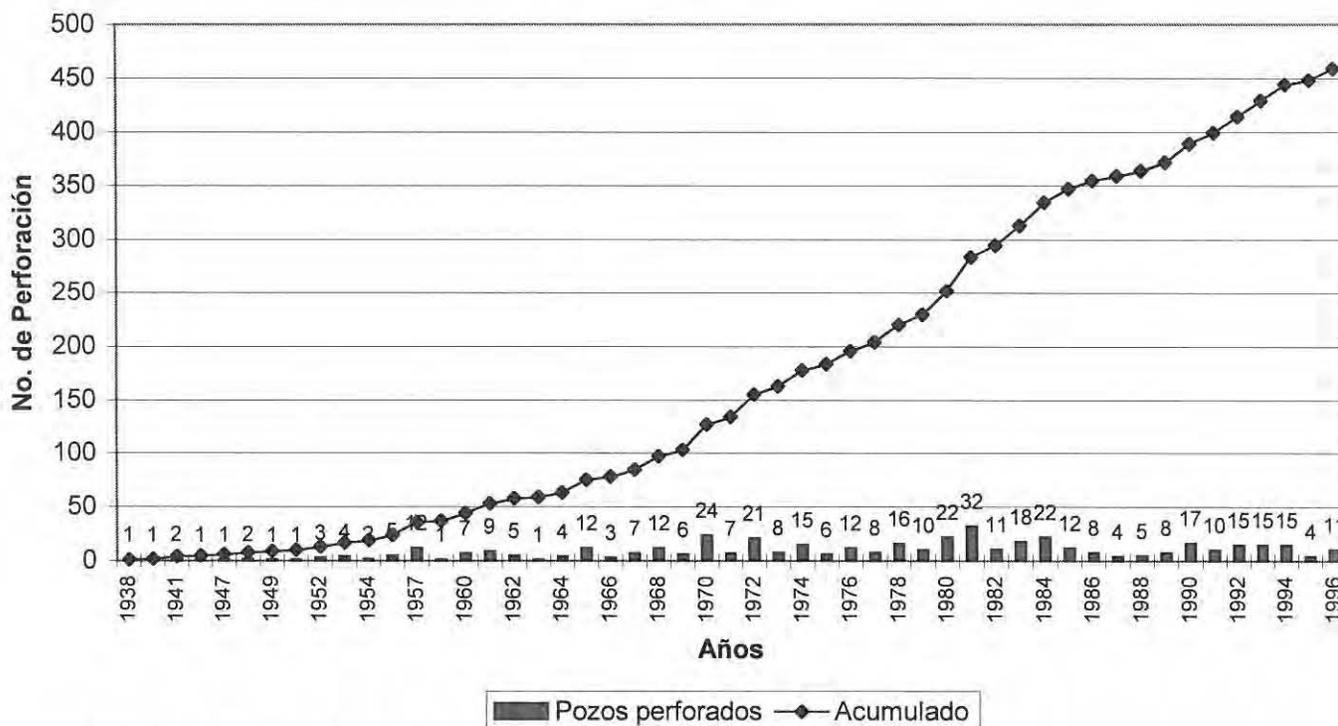


Figura 3.2 Evolución de los pozos perforados en el Valle de Querétaro

Y en la **figura 3.3** se presenta la evolución de la distribución de dichas perforaciones en periodos de 10 años.

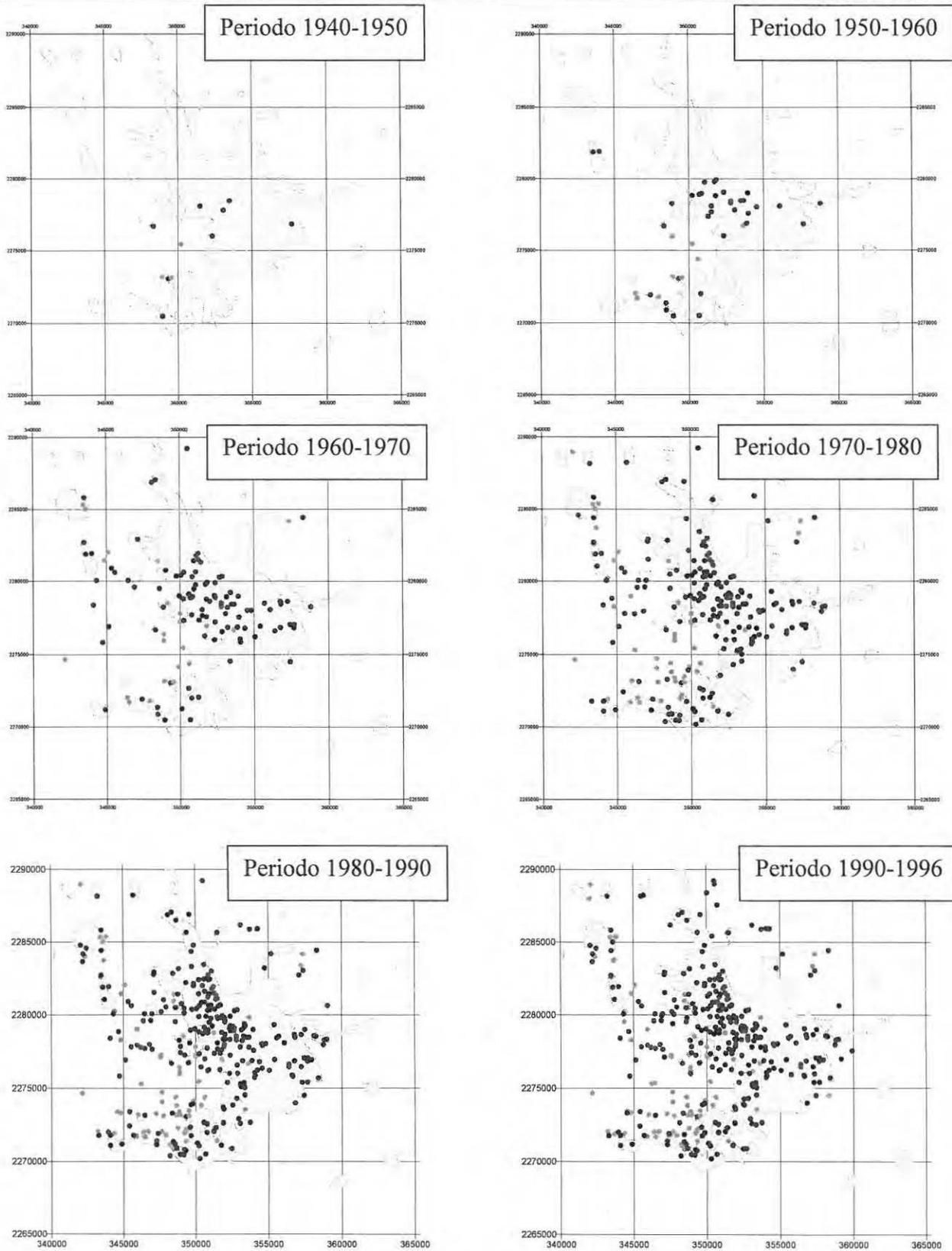


Figura 3.3 Evolución de perforaciones acumuladas.

En cuanto a los niveles medidos, se tiene información desde el año de 1970. en la **figura 3.4** se presenta el historial de las mediciones de los niveles.

Historial de los pozos medidos.

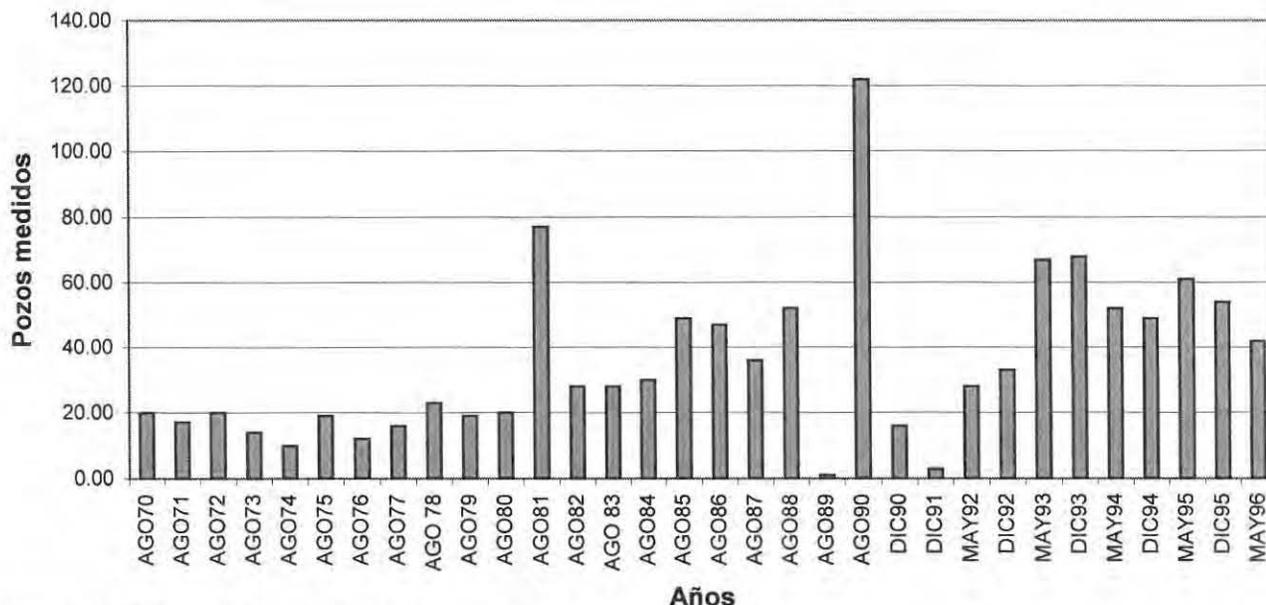


Figura 3.4 Historial de los pozos medidos

De esta figura se puede observar que las mediciones han sido continuas, sin embargo del análisis de la información se determina que no se hicieron en la mayoría de los casos en el mismo pozo, situación que no permite tener un conocimiento puntual de la evolución del acuífero, sin embargo, con el apoyo de las configuraciones se puede estimar en buena forma su comportamiento y la dirección preferencial del flujo.

En este trabajo se utilizaron las distribuciones de los pozos para los años agosto de 1990 y diciembre de 1995, ya que estos presentan una mayor cantidad de datos y tener un mejor historial de sus profundidades y brocales.

En la **figuras 3.5** y **3.6** se observa la distribución de los usos de pozos para los años 1990 y 1995. Estos se concentran en la parte central del valle. Para el caso del sector agropecuario se observa que han disminuido, no así para los sectores industrial y urbano.

Es importante destacar que los pozos industriales se encuentran concentrados en la zona industrial Benito Juárez. En el caso de la ganadería, no se han movido, al contrario, sólo ha desaparecido una pequeña zona de la parte norte de la ciudad y se han mantenido dos en estas áreas.

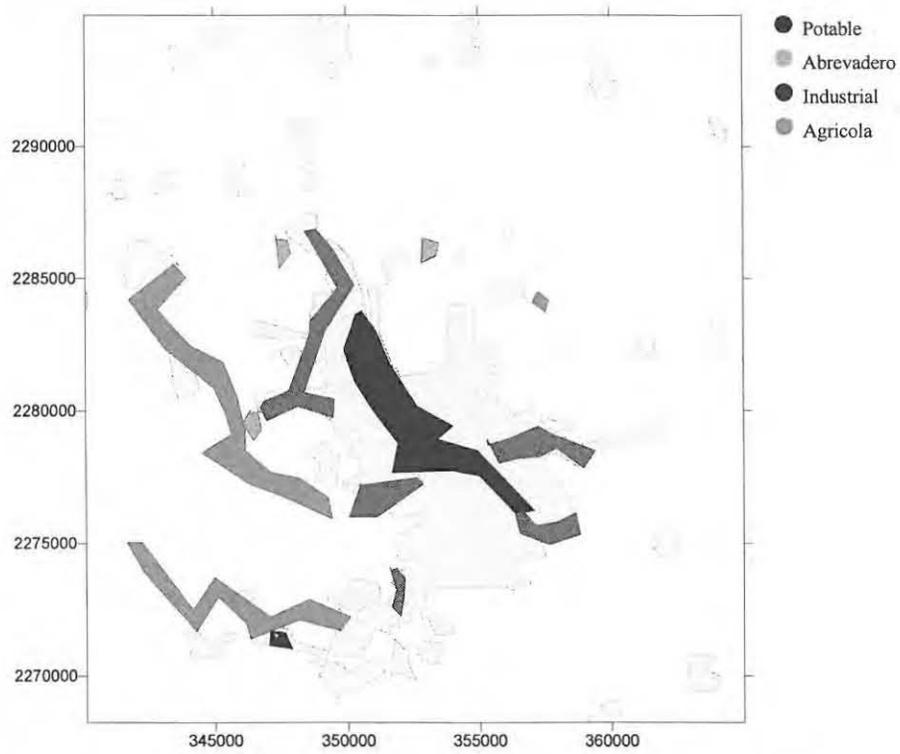


Figura 3.5 Mapa de área de usos del agua en agosto de 1990

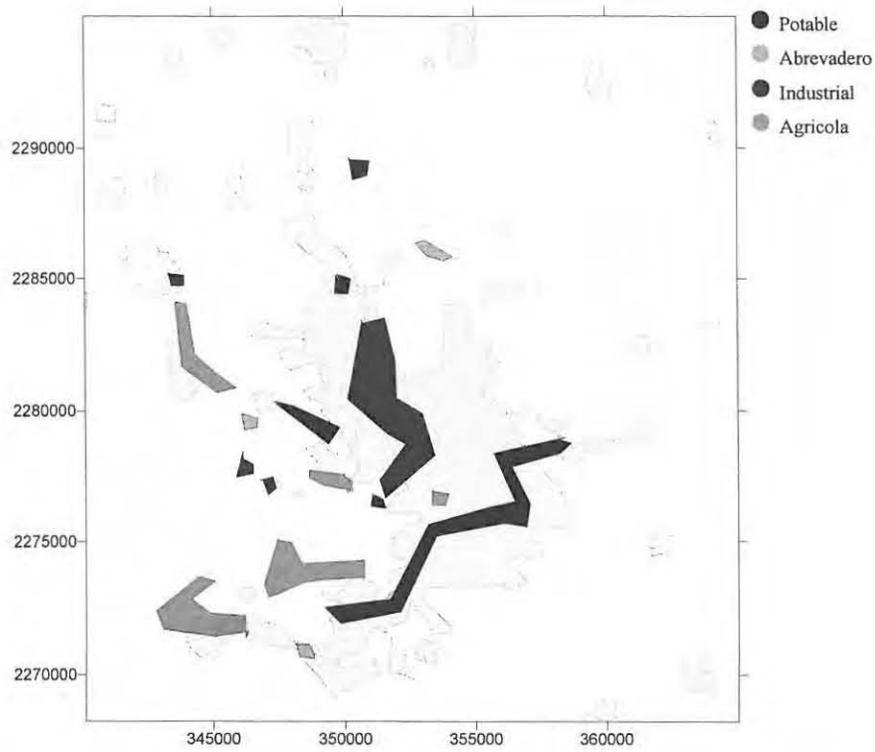


Figura 3.6 Mapa de área de usos del agua en diciembre de 1995

Se puede apreciar que para los dos periodos la mayoría de los pozos se encuentran en la parte central, el tipo de roca que se presenta son depósitos aluviales con intercalaciones de basalto con un espesor de aproximadamente 240 m.

Existe una gran cantidad de bombeo en esta zona, con pozos que se encuentran a distancias menores a 300 m entre sí, provocando grandes abatimientos del nivel, interferencia entre los pozos y poco rendimiento de los mismos, sin embargo, los costos económicos de extracción todavía son sustentables, pero por otra parte se presentan en esta zona movimientos diferenciales del terreno importantes, que ponen en riesgo la infraestructura urbana e industrial, como se puede apreciar en la **figura 3.7**.

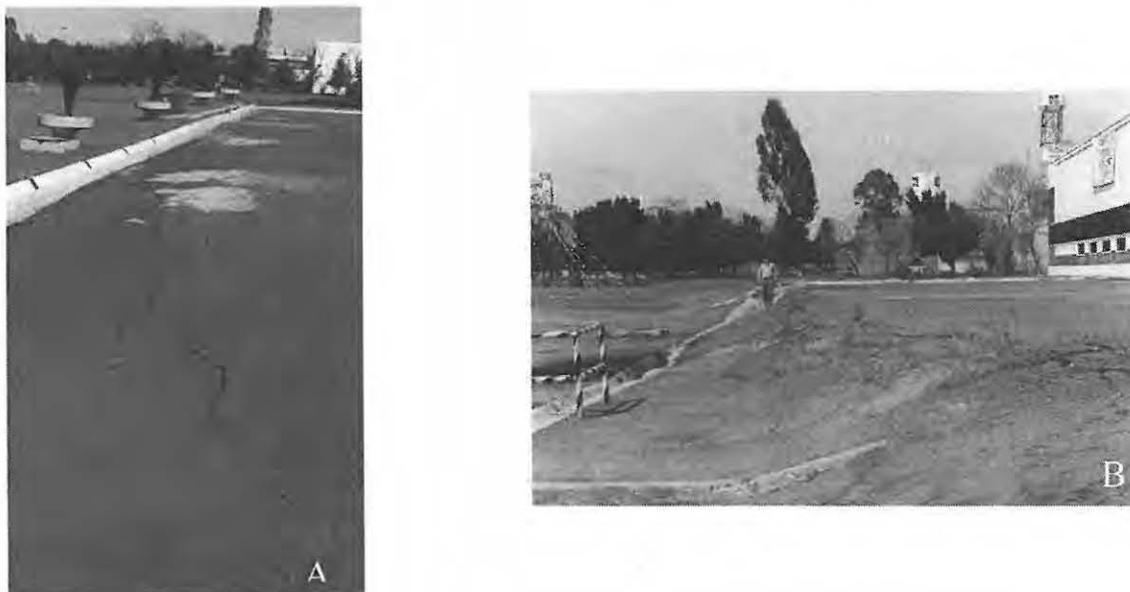


Figura 3.7. *Fotografías tomadas en la Zona Industrial Benito Juárez, en el mismo sitio, pero en fechas diferentes. Se puede apreciar como en la foto A existe una grieta, principio de un movimiento diferencial en el año de 1990, para 2002 en la fotografía B se observa claramente como ha descendido el terreno a causa de un bombeo intensivo.*

En cuanto al área de extracción de agua potable, se aprecia que la distribución es en casi todo el valle, concentrándose en la parte centro sur, y al poniente de la zona industrial y dispersa en la zona norte especialmente en localidades que requieren agua.

La zona agrícola se encuentra en la parte poniente y sur poniente, la cual ha disminuido, cediendo sus terrenos para uso industrial o urbano, ya que estos sectores pueden pagar la extracción del agua, que se encuentra cada vez a una mayor profundidad y por tanto el sector agrícola no puede costear.

En cuanto a la concentración de pozos de bombeo, como se describió en el capítulo 1, la mayor concentración se encuentra en la parte central, siendo el sector urbano el que tiene una mayor demanda de agua potable como se puede apreciar en la **figura 3.8**

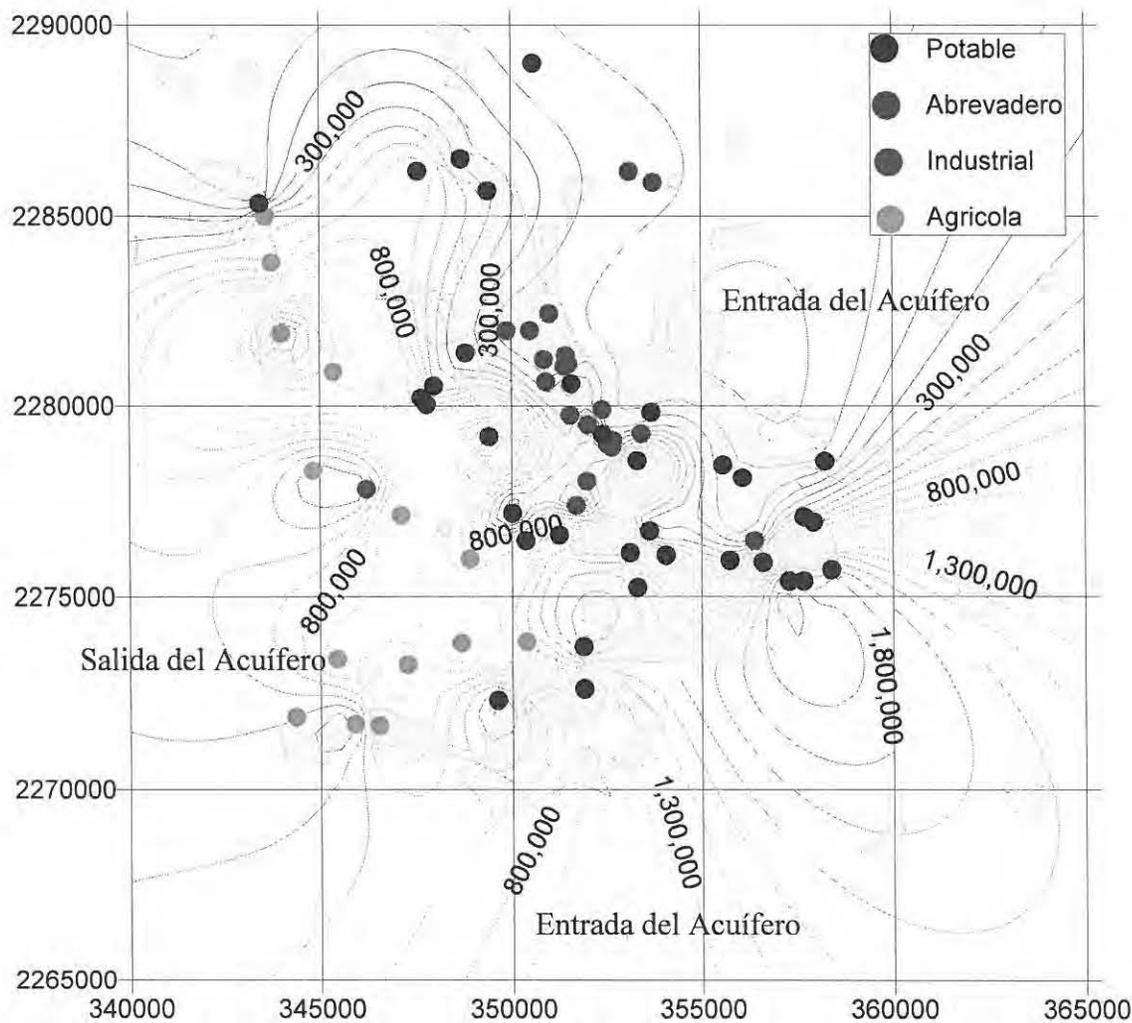


Figura 3.8 Configuración de pozos piloto con mayor bombeo en el periodo de 1996

Cabe mencionar que los pozos para uso urbano tienen un funcionamiento continuo, por lo que son en estas zonas donde se presenta un mayor índice de bombeo, son zonas a las que se tendrá que dar una prioridad en el diseño de la red de monitoreo. Además, estos pozos son las más susceptibles a contaminarse por infiltraciones de agua superficial, y por presentar movimientos diferenciales del terreno.

3.4 Variaciones de los Niveles a Corto Plazo.

Este aspecto es importante, ya que es necesario correlacionar el efecto de la infraestructura en relación a la posición de los niveles, con la precipitación y las fuentes naturales de recarga de los acuíferos.

Para poder realizar este análisis se requiere de información de niveles piezométricos en intervalos de tiempo cortos. En este trabajo se carece de dicha información, lo que es más, se carece de un seguimiento continuo, por lo que se toman aquellos pozos en donde se cuenta con un mayor número de datos de su historial piezométrico, y que estén dentro del radio de observación de 7 km de una estación metereológica (figura 3.9).

De esta forma la construcción de los hidrógrafos permite identificar cual es la influencia que tiene la precipitación con respecto a la recarga de los acuíferos.

En estos hidrógrafos se compara la precipitación total anual, con las diferentes profundidades del nivel estático para cada uno de los pozos cercanos a la estación. **Figuras 3.10 a 3.13.**

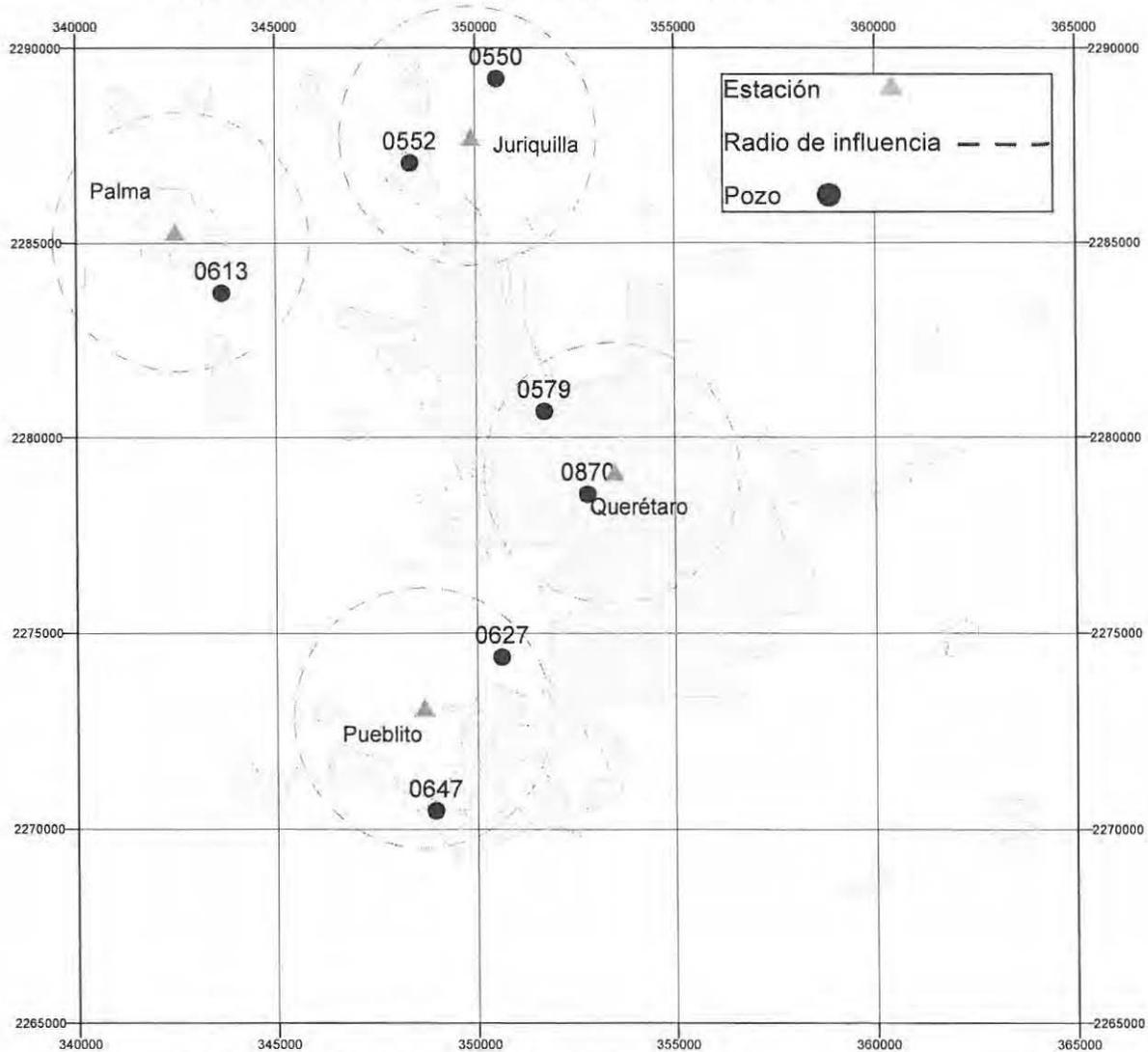


Figura 3.9 Mapa de distribución de las estaciones Meteorológicas

a. Estación Juriquilla. Se tiene información de 1984 a 1995. Los pozos más cercanos a esta estación son el 0550 y el 0552. En la **figura 3.10** ambos pozos tienen una misma tendencia a lo largo del tiempo a ir abatiéndose, esto sin importar las épocas donde ha habido importantes periodos de lluvia.

La línea roja representa la precipitación media anual de 548.8 mm, de esta forma se puede ver que los años donde hubo una mayor precipitación, son 1985, 1988, 1989, 1992 y 1994. Y los periodos de más sequía se presentan en los años de 1986, 1987, 1990 y 1993. En cuanto a la posición de los niveles del agua subterránea en por lo menos en estos pozos, 0550 y 552, se ve un abatimiento continuo, producto de la sobre explotación del acuífero.

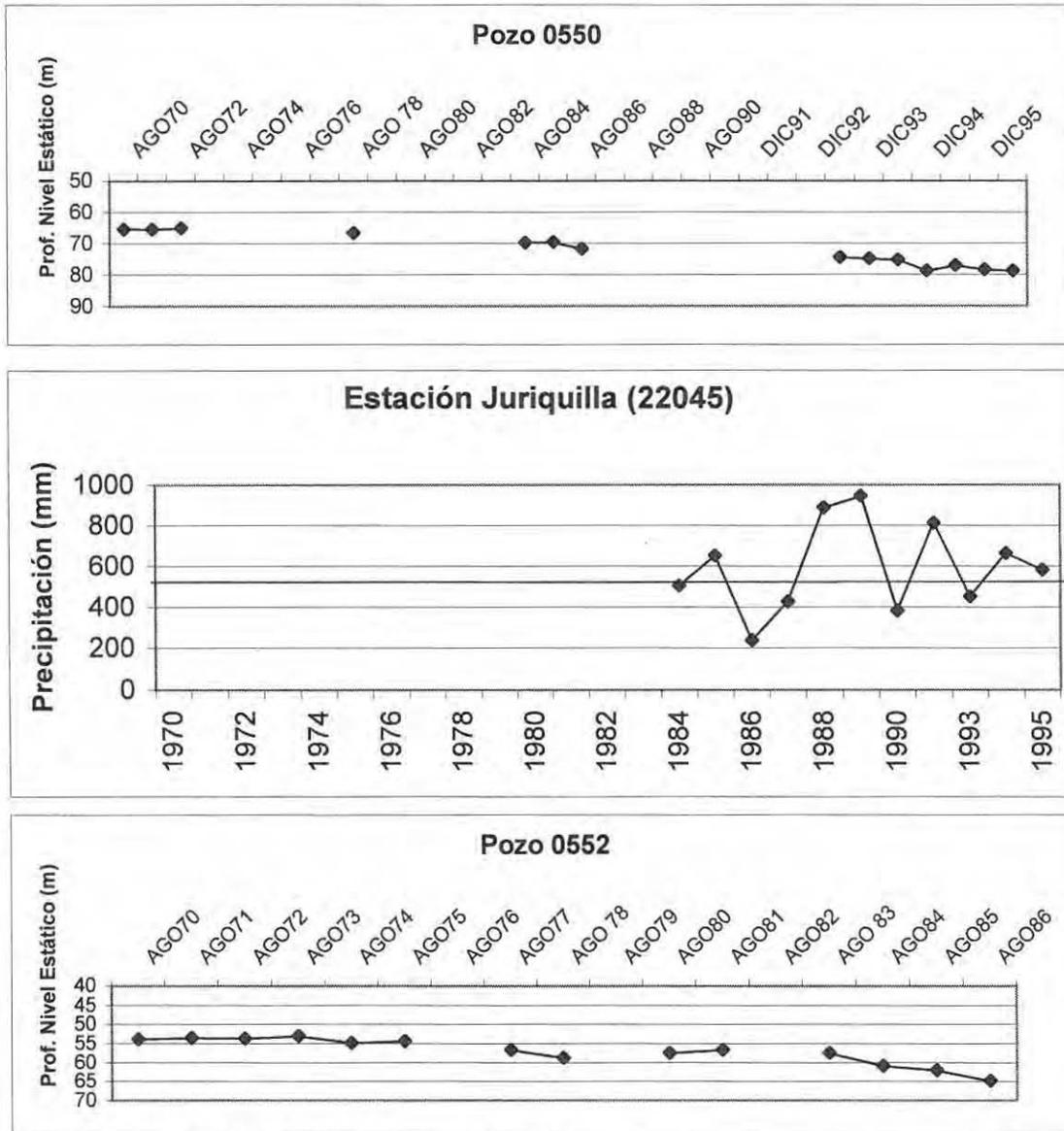


Figura 3.10 Estación Juriquilla y pozos 0550 y 0552

En un análisis más detallado se observa que el pozo 550 para el año de 1994 sufrió un mayor abatimiento lo cual se relaciona a que en el año anterior se presentó un periodo de sequía. Para el año de 1994 se presentó un periodo extraordinario de lluvias habiendo una recuperación mínima para ese mismo año en la posición de los niveles. De este análisis, aunque no continuo de la información se puede decir a grandes rasgos que el acuífero responde rápido a cualquier variación a que se le someta. (Recarga – Extracción)

En cuanto al pozo 552, la información es muy pobre pero se identifica que el pozo va a la baja en el periodo de sequía 1986.

Tanto el pozo 550 y 552 son para uso potable, pero en una zona donde no existe una concentración tan fuerte de pozos como en el centro de la ciudad.

b. Estación Palma . Para esta estación se tienen únicamente el pozo 0613. **Figura 3.11**

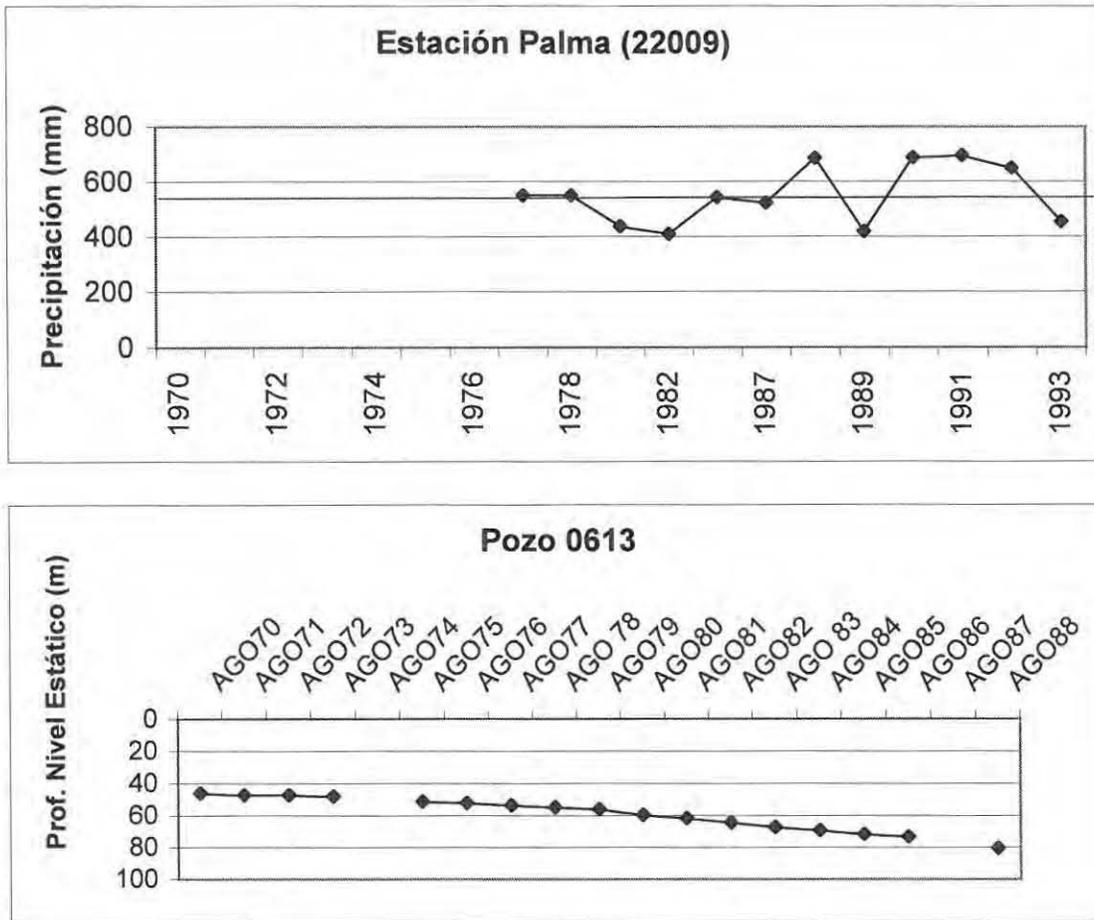


Figura 3.11 Estación La Palma y pozo 0613.

El promedio de precipitación dentro del Valle de Querétaro es de 548.8 mm de agua como se había comentado. En esta estación recopila información desde 1977 a 1993, observándose periodos de sequía en los años de 1979, 1982, 1989 y 1993.

El pozo que se tiene dentro del radio de influencia de dicha estación es el 0613, el cual está destinado para uso agrícola. Se puede observar en su historial, que ha mantenido una baja no muy pronunciada pero continua del abatimiento, aunque en los periodos de 1970 a 1973 se mantuvo bastante constante, pero después de este periodo ha ido aumentando.

Desafortunadamente no se cuenta con un historial después de 1988, pero se puede inferir que seguirá bajando, a pesar de que en ese mismo año hubo una época de lluvias extraordinarias, el abatimiento es mayor que lo que pudiera recuperarse. Esto se debió a que el pozo se encuentra cerca de otros que tiene periodos de operación continuo, provocando que el cono de abatimiento afecte de manera significativa el rendimiento del pozo 0613.

c. Estación Pueblito . De los pozos 0627 y 0647, se puede ver también una marcada tendencia a ir disminuyendo los niveles estáticos, teniendo una pendiente suave a lo largo del tiempo, con periodos de

sequías en 1979,1982,1986,1987 y 1988. Además, se presentan épocas de lluvias extraordinarias en 1977, 1985 y 1991. **Figura 3.12**

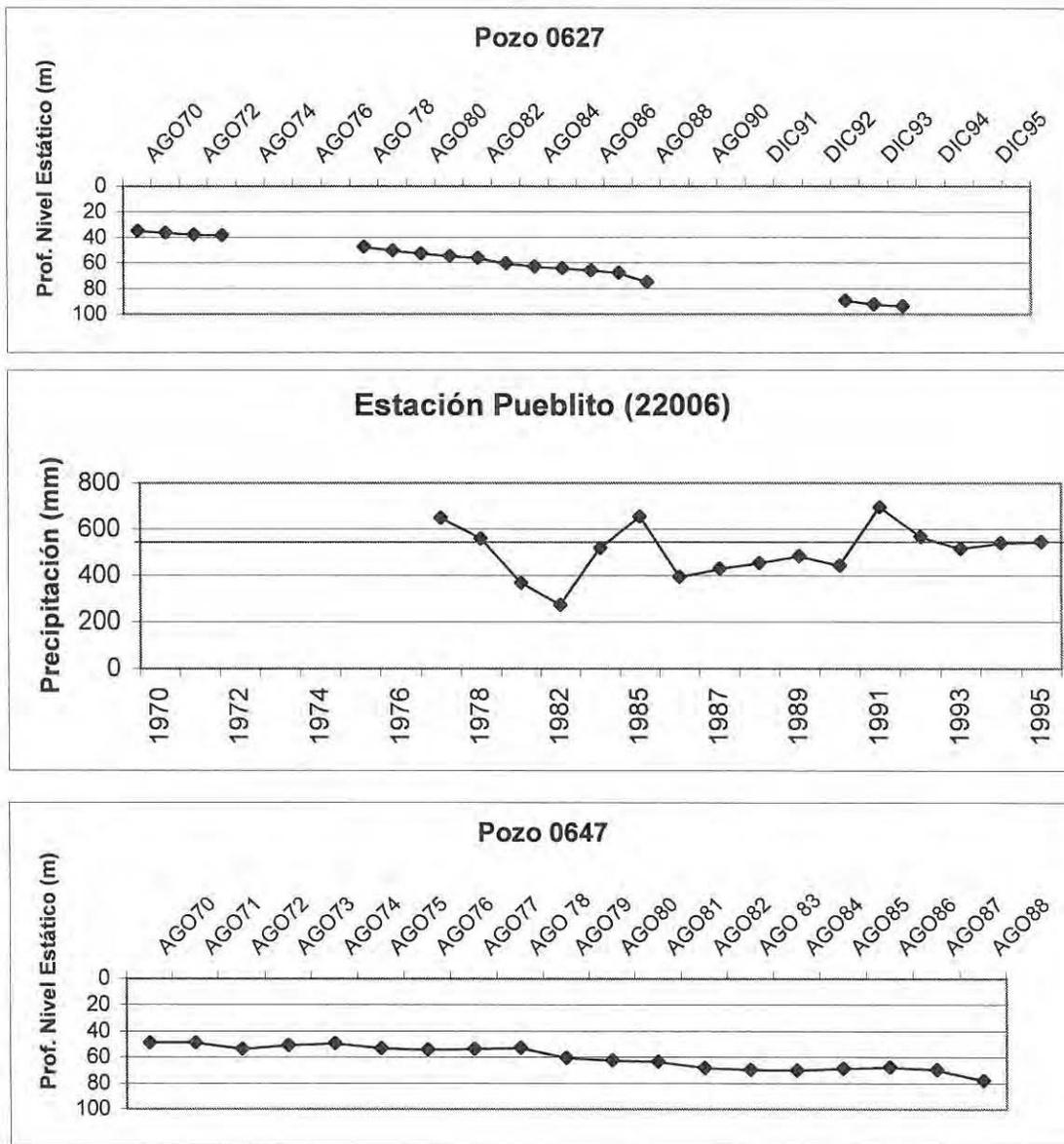


Figura 3.12 Estación Pueblito y pozos 0627 y 0647.

El pozo 0627, con uso agrícola, se observa que en el periodo de 1988 hay una mayor disminución del nivel estático debido a que en los periodos 1986 y 1987 se presentaron sequías. También se puede ver que no existe una recuperación entre 1985 y 1986 a pesar de haber ocurrido un periodo de lluvias extraordinarias anteriores; así como en los periodos de 1992 y 1993, por una falta de información no se puede decir si hubo una recuperación aunque fuera mínima.

En el pozo 0647, con uso potable, se tiene la mayor cantidad de información del nivel estático, y como se observa, existe esta pendiente continua y suave a lo largo del tiempo, presentando ligeros periodos de recuperación, no muy significativas, ya que la cantidad de bombeo ha ido aumentando de forma gradual. Dentro de estos periodos se puede ver el de 1978, donde se presentan lluvias anteriores a este año y

recuperándose, pero después se tiene una baja moderada, pero continua teniendo una ligera recuperación hasta 1986 tras de un periodo de lluvias anteriores a este año volviéndose a abatir.

En ambos pozos se puede apreciar que se tiene una mayor extracción el pozo 0647 por su uso potable, siendo que el agrícola sólo se emplea agua en ciertos periodos del año, caso contrario que el potable, además, que el área de influencia de este último está afectado por otros pozos cercanos a él.

d. Estación Querétaro . Esta estación es muy representativa, debido a que se encuentra en la parte central de la ciudad de Querétaro y es en esta zona donde se ubican los mayores abatimientos. Los pozos que se escogieron debido a su cantidad de información son el 0579 y 0870. **Figura 3.13**

En la estación se observa que hay periodos de lluvia en los años de 1985 y 1992, habiendo una mayor cantidad de periodos de sequía como 1982, 1984, 1989, y 1993. El historial de información de esta estación es muy reducido pero es de las más representativas e importantes para el análisis de recargas del acuífero.

Para el pozo 0579 con uso potable, se puede decir que se mantiene algo constante hasta 1980 pero no se puede correlacionar con las lluvias debido a la falta de información de la estación. Se observa que hay una baja considerable en 1982, esto debido a que existió un periodo de sequía muy fuerte, pero se mantuvo hasta 1984, después de esto existen sólo datos aislados, pero que dan una idea de que los niveles han continuado bajando.

Para el pozo 0870 de uso industrial, se puede ver que se mantenía estable de 1982 a 1985 pero para 1986 existe una baja considerable, provocada por una sequía de años anteriores. Luego vuelve a ser estable en 1993 presentándose un nuevo desnivel producto de un periodo de sequías.

Estos pozos se encuentran dentro de una zona muy afectada por los pozos aledaños teniendo profundidades mayores de extracción y siendo las zonas donde se deberá tener mayor atención dentro del diseño de la red de monitoreo.

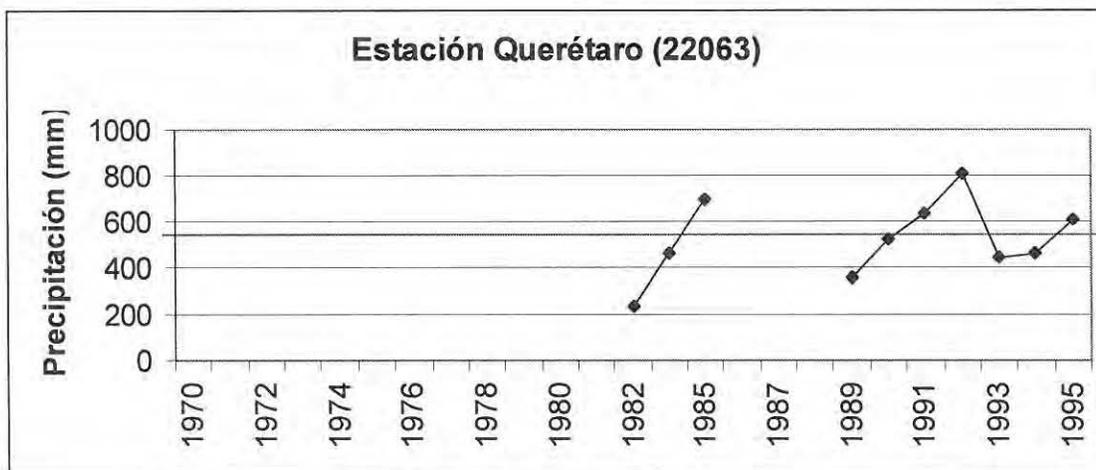
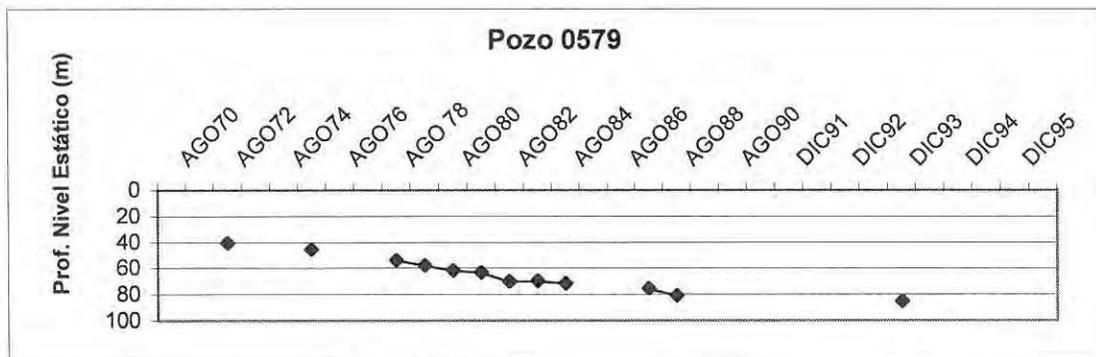


Figura 3.13 Estación Querétaro y pozos 22063 y 0870.

Faltan un número importante de datos a través del tiempo, pero se puede ver en general una pendiente más pronunciada que en las anteriores pozos, sobretodo en los años de 1982 y 1988, que corresponden a años donde las precipitaciones han estado por debajo del nivel medio anual.

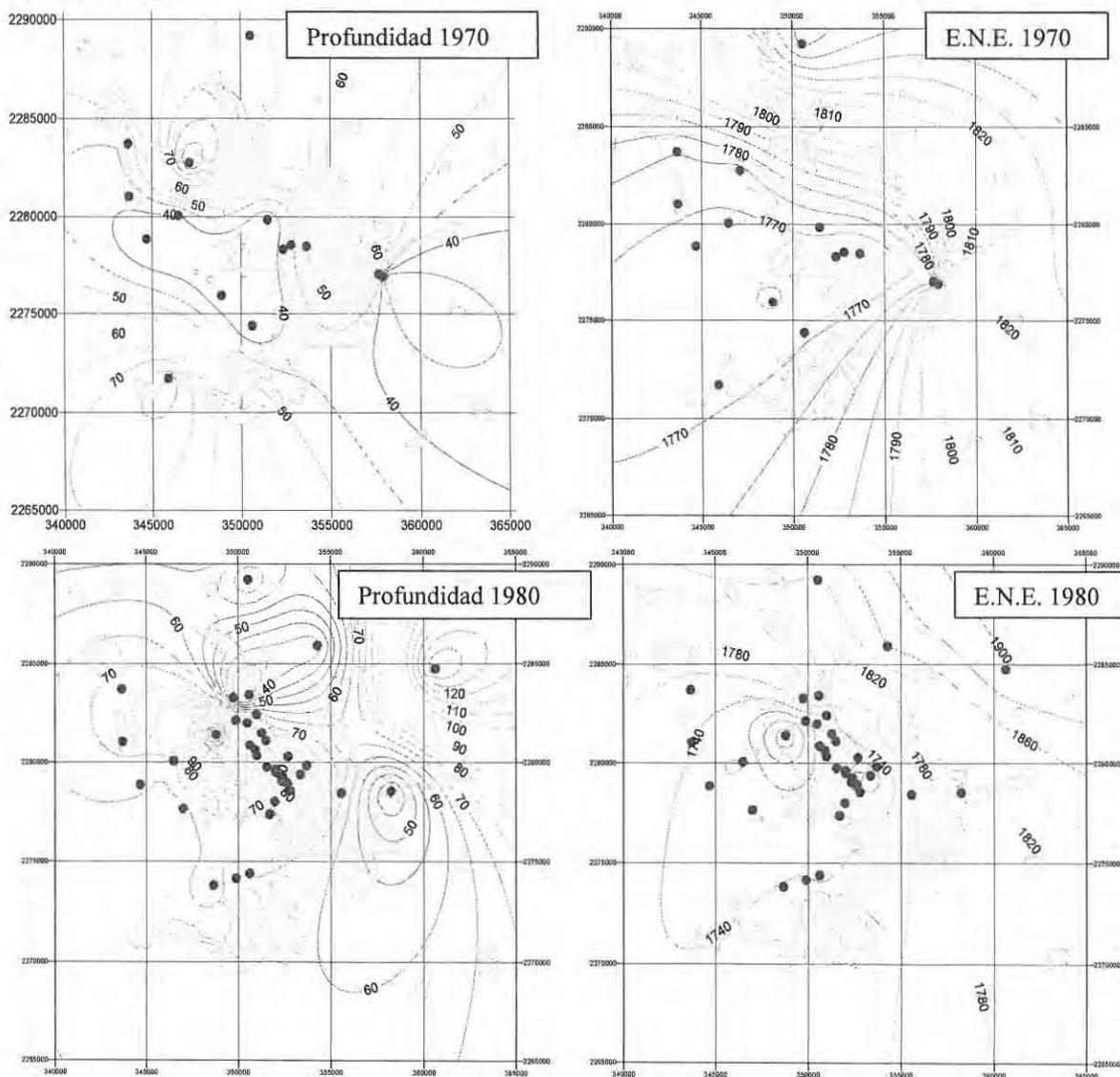
Un factor importante que hay que considerar entre todas las estaciones es el hecho que existe una falta de información en varios periodos, así como la influencia de los microclimas, esto debido a las características topográficas y de vegetación que influyen tanto en la precipitaciones, la humedad y por tanto en la recarga del acuífero.

3.5 Variaciones a Largo Plazo.

Para este caso se tomó en consideración toda la piezometría que se tiene del acuífero, ésta recopilación de datos es escasa, ya que existen varios pozos en los que falta información, así como valores de estaciones climatológicas, y por tanto no se puede hacer una correlación entre los periodos de lluvia y los niveles estáticos de una forma continua, existe un grado de incertidumbre demasiado grande entre datos, por lo que no es posible por algún método interpolar los resultados entre los datos que hacen falta.

En forma general, retomando las **figuras 3.10 a 3.13**, se puede apreciar una tendencia hacia la baja en la posición de los niveles del nivel estáticos. De 1970 a 1996 el abatimiento del acuífero es de 55.39 m.

A continuación se muestra en la **figura 3.14** como ha ido aumentando la profundidad y la elevación del nivel estático (E.N.E.).



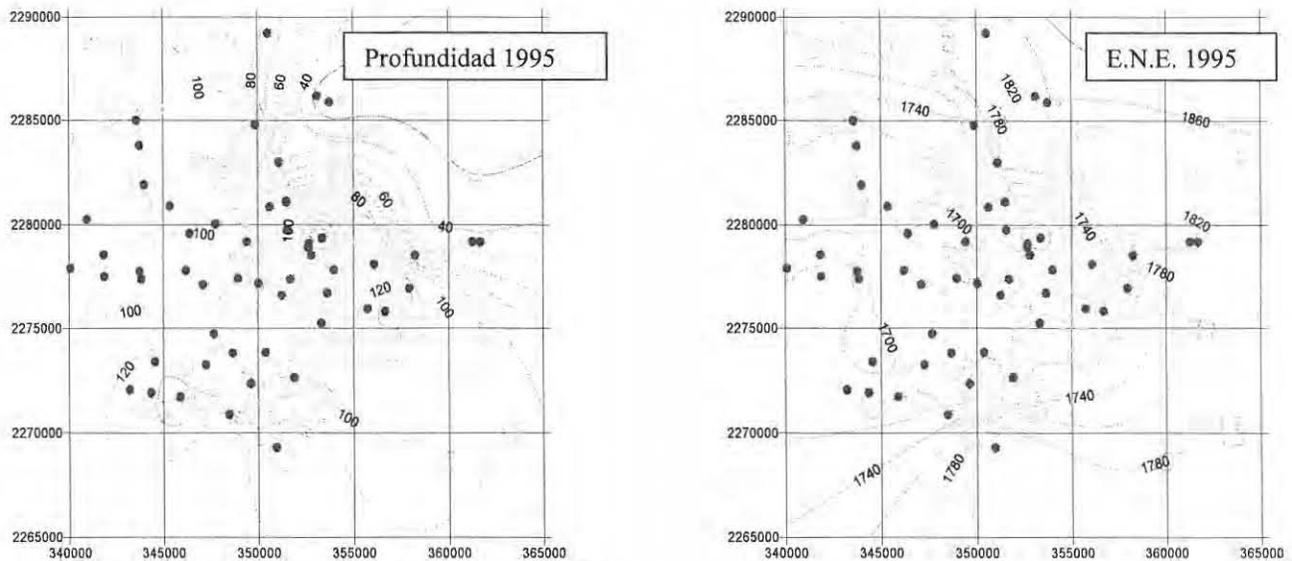


Figura 3.14 Historia de profundidad y E.N.E.

Como se puede apreciar, para 1970, se tenía una cantidad de pozos muy dispersa, siendo el sector agrícola el que demandaba una mayor cantidad de agua. De acuerdo a la información histórica, es en esta fecha donde se inicia el desequilibrio del acuífero (mayor extracción que recarga). La profundidad máxima registrada era de 86 metros de profundidad. Solo existían dos pozos que generaban una mayor extracción destinándose estos para uso potable.

Observando la E.N.E. se puede ver que las zonas donde hay una mayor elevación, es en la parte NE teniendo un flujo hacia el SW y teniendo en la mayoría un nivel homogéneo, sin presentar curvas demasiado cerradas.

En 1980 a medida que fue creciendo la mancha urbana y la zona industrial, se concentraron los pozos en la parte centro sur de la ciudad, habiendo un aumento considerable en la profundidad al nivel estático de hasta 140 metros. La configuración de la E.N.E. sigue la misma dirección, aunque las líneas tienden a ir cerrándose hacia la parte central de la ciudad, por la cantidad de pozos para uso industrial.

Dentro del conjunto de pozos que tienen las mayores profundidades, ahora son los destinados a uso industrial, siendo los potables los que ocupan un segundo plano.

Para 1995 la cantidad de pozos se extiende en la ciudad, las profundidades se quedan hasta los 153 metros y los pozos más predominantes son de uso industrial, como también vuelve haber una gran cantidad de pozos para uso potable.

Existe una mayor concentración de pozos, lo que afecta en gran medida las profundidades, generando las curvas de nivel muy cerradas. Esto provoca que los niveles del agua subterránea ya no se puedan recuperar, sino que siguen hacia la baja como se observó anteriormente en el historial piezométrico, además, empieza haber una serie de movimientos diferenciales provocados por esta explotación concentrada de pozos.

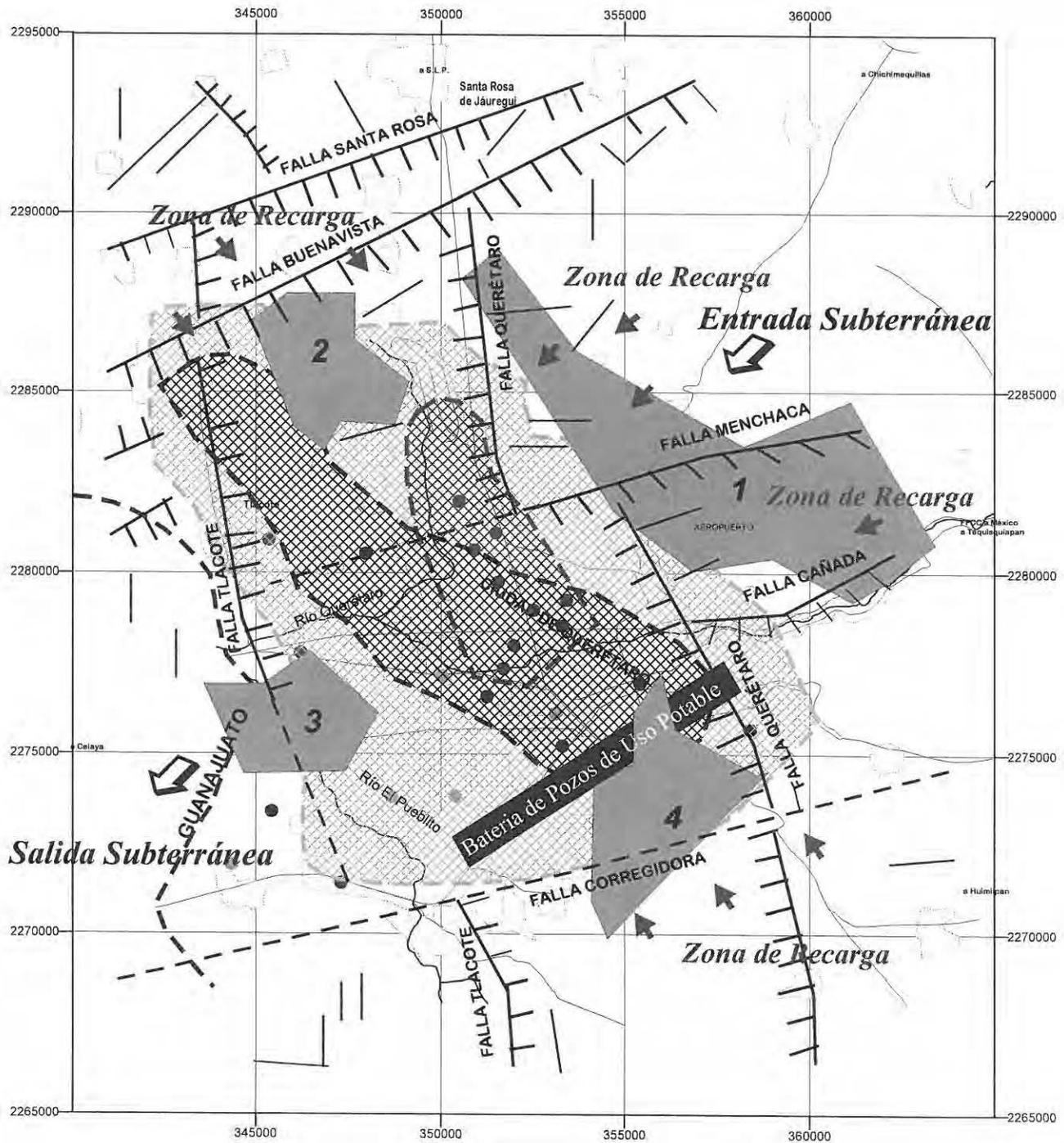
Las líneas del E.N.E. mantienen una dirección similar en cuanto al flujo, aunque se han cerrado más al norte de la ciudad y aumentado la E.N.E. en diferentes sectores de la ciudad, siendo en este caso los pozos para agua potable los que demandan una mayor cantidad de líquido.

Es importante analizar también en esta parte las zonas donde no se tiene información piezométrica y que puede ser útil en un futuro cercano dado el crecimiento poblacional, además, dado que el objetivo de establecer una red de monitoreo, está relacionado con el comportamiento del agua subterránea y los usos presentes y futuros que se hagan de la misma, es necesario, identificar las zonas socioeconómicas.

En este sentido, para el diseño de la red de monitoreo, resulta necesario identificar aquellos sitios donde es importante conocer el comportamiento del agua subterránea, dadas sus características hidrogeológicas o donde se tienen aprovechamientos importantes o estratégicos en el presente o se tienen planeados hacia futuro. Para ello es necesario analizar:

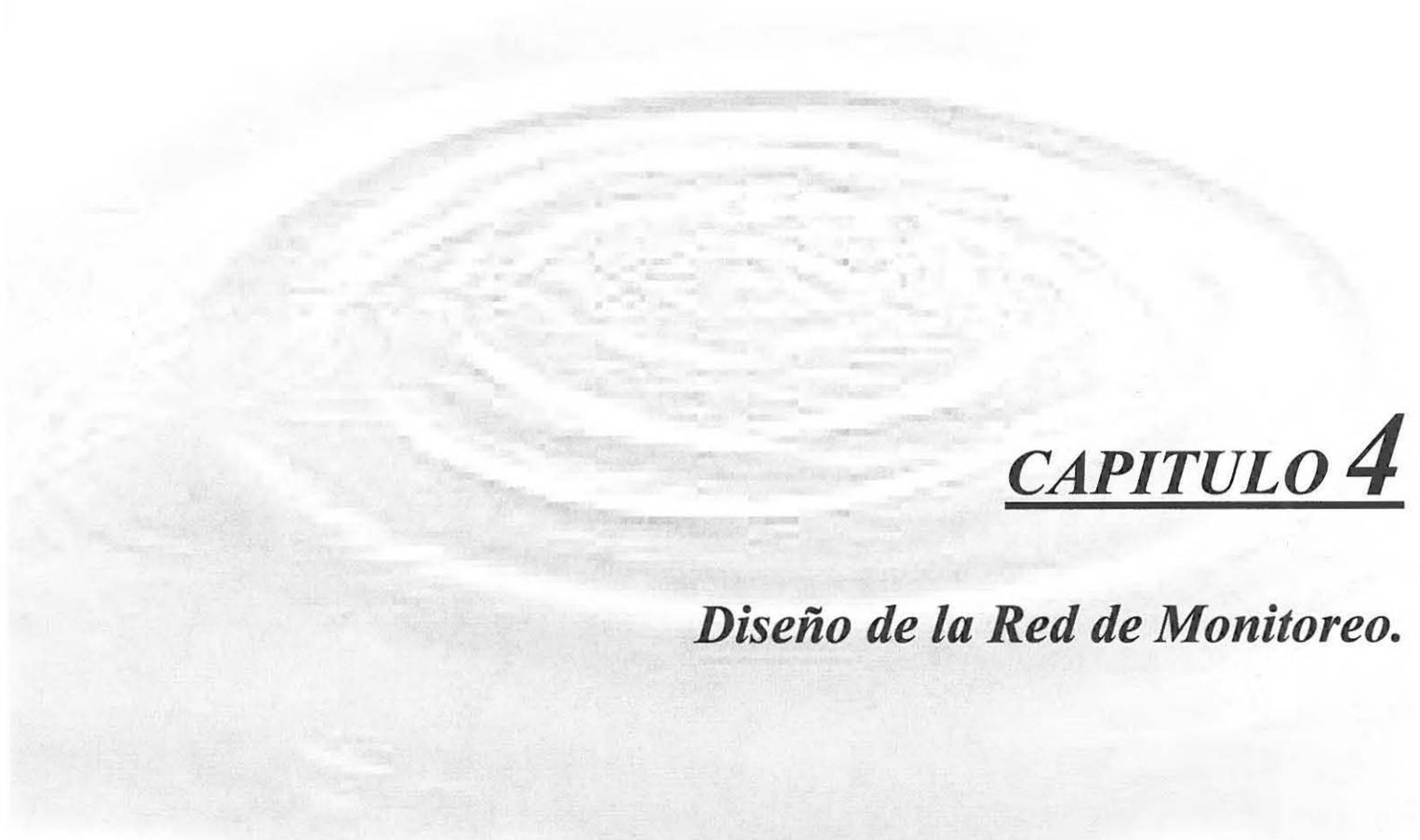
- Zonas con baterías de pozos de agua potable, en relación con los principales centros urbanos establecidos en el área de estudio.
- Zonas con concentración de bombeo, en relación con los diferentes usos y su correspondencia con la configuración de la evolución del nivel piezométrico.
- Zonas de desarrollo futuros orientados a nuevas baterías de pozos.
- Zonas de recarga del acuífero, a partir del análisis del comportamiento de la elevación del nivel estático se puede establecer la ubicación de los principales zonas de recarga por la infiltración de las aguas originadas de los excedentes de riego, pérdidas en las redes de agua potable y de drenaje, la infiltración del agua de lluvia en la porción central de una cuenca, las componentes de flujo del agua subterránea proveniente de otras porciones de la cuenca.
- Zonas de descarga del acuífero. La red de flujo de agua subterránea, establecida a partir de las configuraciones del nivel piezométrico, permite identificar la descarga del acuífero que ocurre a través de los ríos que funcionan como efluentes, además de, la descarga por flujo subterráneo hacia otras cuencas.

Dado que ya se ha hablado de estas cuestiones, en esta parte sólo se presenta un mapa (**figura 3.15**), donde se concentran estas consideraciones, con fines de tener un marco de referencia para la ubicación de los sitios donde se requiera realizar mediciones de los niveles del agua subterránea, así como su calidad.



SIMBOLOGÍA			
Fallas		Zona Industrial	
Fracturas		Zona de Bombeo Intensivo	
Ciudad		Mancha Urbana	
Curvas de nivel		Batería de Pozos	
Río		Zona con deficiencia de datos	
Limite Estatal			
Carreteras			

Figura 3.15 Resumen de información.



CAPITULO 4

Diseño de la Red de Monitoreo.

Capítulo 4. Diseño de la Red de Monitoreo

4.1 Introducción.

El diseño de una red de monitoreo, además de apoyar a conocer el comportamiento hidrogeológico del sistema acuífero, debe tener bien claros los objetivos que se persiguen para su establecimiento, así como los sitios y los aspectos importantes que se necesitan medir.

El ciclo del monitoreo presentado en el capítulo anterior constituye el esqueleto para el proceso de diseño. En principio todas las etapas presentadas deben de ser consideradas, descritas, designadas y documentadas.

El diseño de una red de monitoreo depende de:

a. Información.

Se debe de contar con información confiable y veraz, para asegurar la calidad y objetivos técnicos, los cuales pueden ser:

- 1) De acuerdo a las características. La información es el producto final del análisis de datos, donde estos son interpretados e integrados para proveer información de alto nivel. Para muchos propósitos, la información necesaria se obtiene en términos de las características generales con respecto a su cantidad y calidad.
- 2) De acuerdo a la representación continua. La determinación de las tendencias espaciales y temporales las cuales son a menudo uno de los objetivos más importantes de un sistema de monitoreo. Estas tendencias pueden indicar cambios deseados o indeseados sobre las condiciones del agua subterránea.

b. Estrategia del Monitoreo.

Define la aproximación y criterios necesarios para el diseño de un programa de monitoreo. Se debe de apoyar en el marco conceptual de funcionamiento del acuífero y en el modelo de simulación matemática de flujo y transporte, según sea el caso.

Definiendo la estrategia se puede optimizar el uso de los aspectos técnicos, legales, financieros y recursos humanos para encontrar la información requerida.

Si la información existente y la infraestructura no satisfacen las necesidades, se debe de diseñar un sistema de monitoreo acorde a la estrategia y técnicas planteadas en el párrafo anterior. La red de monitoreo debe de enfocarse a la selección del tipo y densidad de las estaciones de monitoreo, a los parámetros de medición y a la frecuencia de las mediciones. Además, deben tomarse en consideración el diseño de los puntos de medida, los materiales usados y los procedimientos operacionales para las medidas y campañas de muestreo, análisis de laboratorio y manejo de los datos.

La estrategia debe de plantear los siguientes cuestionamientos y aspectos:

- Información existente.
- Valoración requerida. Se refiere al conocimiento del marco conceptual en el cual deben de verse aspectos sobre la situación natural o antecedente que se tiene sobre los usos y funciones, posición de los niveles del agua subterránea y de contaminación, evaluación de riesgos con relación a la salud pública y/o ambiente, y a una prevención anticipada.
- Técnicas de monitoreo. ¿Cuáles son las técnicas de monitoreo disponibles y convenientes? (agua superficial, climatología, percepción remota, niveles del agua subterránea, métodos geofísicos, sistemas de registro continuo, contaminación, etc.).
- Sistemas de monitoreo e información disponible. Pueden existir sistemas de monitoreo e información que proporcionan información para ajustar la operación de estos sistemas. Para esto, se hacen los siguientes cuestionamientos: ¿Es posible usar las bases de datos existentes? o ¿Se requiere desarrollar un nuevo sistema de monitoreo?.
- Tipo de monitoreo. (¿manual o automatizado?)
- Exactitud del monitoreo. ¿Cómo debe de realizarse el monitoreo: regional, local o detalle?
- Responsabilidades. ¿Quién es el responsable de la red?
- Recursos financieros y humanos. ¿Cuál es la disponibilidad del presupuesto? y ¿Cuáles son los recursos humanos disponibles? Se debe de garantizar el monitoreo por un largo plazo.

c. *Objetivos del Manejo del Agua Subterránea.*

En este aspecto se deben de plantear objetivos acordes a:

- La situación histórica y actual del acuífero.
- Recurso económico disponible.
- La capacidad de financiamiento.
- La evolución de la posición de los niveles del agua subterránea.
- La calidad del agua subterránea.

d. *Establecimiento del Sistema de Monitoreo.*

Una vez hecha la valoración de la red, es necesario seleccionar en campo los puntos de observación. Las actividades de perforación e instalación deben de contar con un criterio para asegurar la ejecución de los trabajos y el uso apropiado de los materiales, para establecer un punto de observación el cual será representativo de la situación particular definida en el diseño de la red. Los responsables del mantenimiento, operación y manejo de la red e información deben de ser operativos. Los datos de entrada, control y procedimientos de manejo deben de estar establecidos y documentados, así como el almacenamiento de los datos, su procesamiento, intercambio y procedimientos de presentación.

e. *Operación y Mantenimiento del Sistema de Monitoreo.*

Involucra la implementación de los procedimientos diseñados, la ejecución de las medidas y los procedimientos de muestreo, análisis de laboratorio, así como los procedimientos de mantenimiento de acuerdo a los objetivos y criterios establecidos. El resultado de esta etapa es la generación de una lista de datos, gráficos, mapas, etc.

f. Manejo de los Datos.

Se refiere a la operación de una base de datos y un sistema de información (SIG) para facilitar el procesamiento, análisis y presentación de los datos.

g. Evaluación.

En esta parte se hacen las cuantificaciones, mapas de distribución y comportamiento para conocer la situación que guarda el acuífero.

h. Comunicación.

Esta parte involucra darlo a conocer a la sociedad en términos no técnicos, de manera que sea entendible para cualquier persona.

La integración de las actividades por razones de costo beneficio en una etapa temprana del ciclo del monitoreo puede causar una sobre o bajo dimensión de la red.

4.2 Metodología Empleada para el Establecimiento de la Red de Monitoreo del Acuífero del Valle de Querétaro.

Para el caso de la red de monitoreo del acuífero del valle de Querétaro, se cuenta con mucha información dispersa y en la mayoría de los casos no validada, situación que dificulta la implementación, sin embargo, con base en la información disponible se plantea su inicio y se proponen las actividades complementarias para el establecimiento de la red de monitoreo.

4.2.1 Análisis Estadístico de los Datos Piezométricos.

En esta etapa se elaboraron las configuraciones de la elevación del nivel estático con todos los pozos medios para los periodos de agosto de 1990 y diciembre de 1995, la cual sirvió como configuración inicial o base para todo el proceso consecuente. **Figura 4.1**

Hay que hacer mención que en este trabajo se tomaron en cuenta dos periodos debido a que el monitoreo que se realizó en esa época no se hizo en los mismos pozos, situación que modificó el comportamiento puntual de las configuraciones. Por otra parte, las fechas aunque desfasadas, representan el fin de la época de lluvias.

El método de interpolación que se efectuó fue kriging, ya que genera la mejor interpretación sobre todos los puntos que abarca, como se describió en el capítulo 2 sección 2.4, para la configuración de los periodos agosto de 1990 y diciembre de 1995 se obtuvieron radios de 13,600 m y 14,700 m respectivamente.

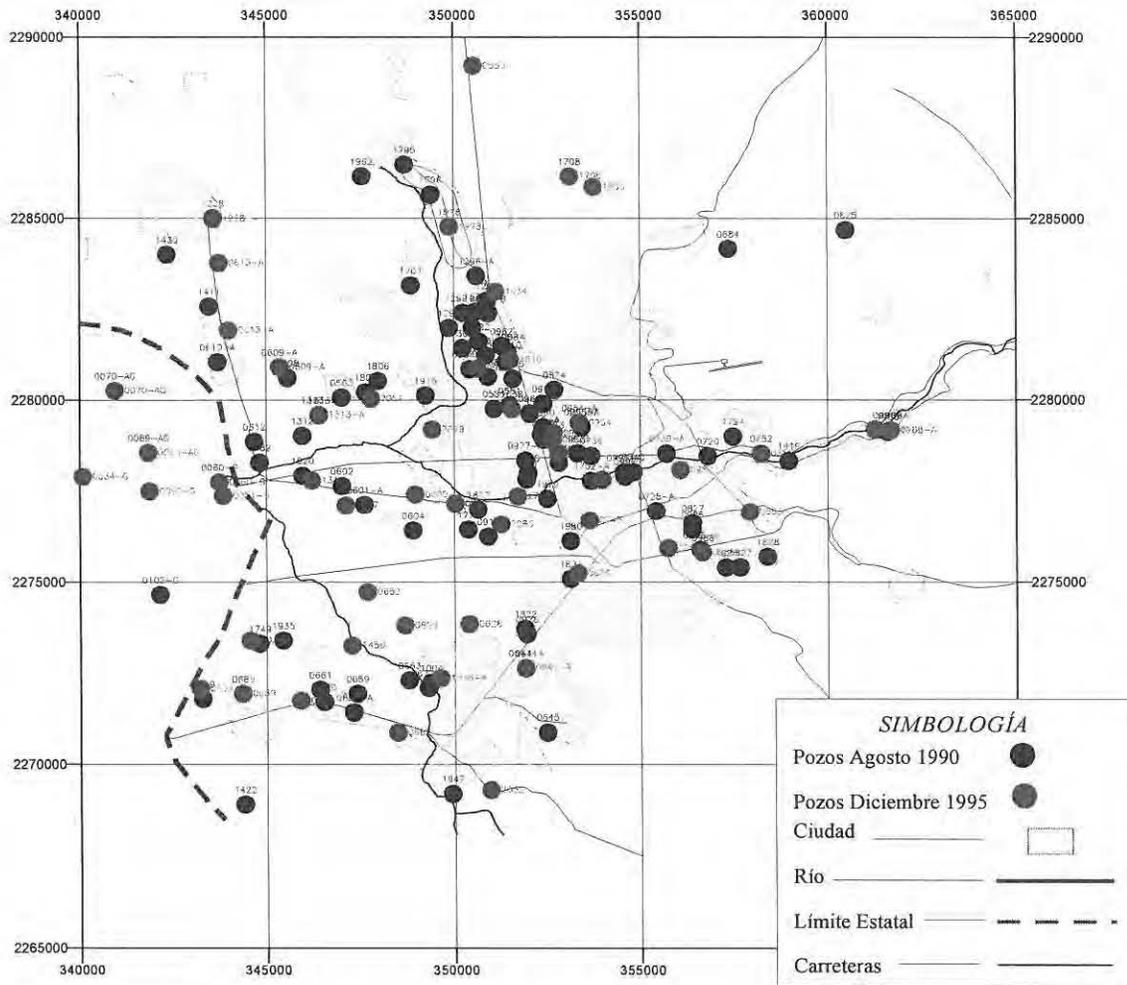


Figura 4.1 Distribución de los pozos para los periodos de 1990 y 1995

Al observar el plano, se aprecia que existe una mayor densidad de pozos para el periodo de agosto de 1990 que en diciembre de 1995, pero la distribución en ambos periodos se mantiene a lo largo de los ríos principales de la ciudad, manteniendo un área bastante extensa dentro del acuífero.

Se observa que la mayor densidad de pozos dentro de los dos periodos, se encuentra en la parte norte y centro de la ciudad, esto debido al crecimiento de la industria que se ubica en esta zona, pero también se ubican zonas en las que no se tienen pozos.

Para obtener dicha configuración se realizaron los siguientes pasos:

- Bajo una base de datos establecida se buscaron los pozos que tenían un historial piezométrico.
- Después, se seleccionaron los periodos que tenían mayor cantidad de datos piezométricos.
- Dentro de estos periodos, se ubicaron los pozos que no tenían elevación topográfica de brocal y se estimó su valor mediante una interpolación, por medio del programa SURFER, donde obtenido el valor del brocal, se resta el dato piezométrico para obtener la elevación del nivel estático.

- Obtenidas todas la elevaciones del nivel estático de ambos periodos, se creó una base de datos donde se quitó un pozo a la vez. Esto con el fin de ver cuanto varía este pozo con respecto del universo de pozos y poder ver el peso de este pozo en toda la configuración.
- Teniendo estas nuevas configuraciones se empezará hacer un análisis de sus varianzas, de esta forma se obtuvieron los pozos que tenían una mayor varianza y por tanto mayor peso en la configuración para poder determinar, desde la dirección de flujo de una forma regional, hasta poder establecer los criterios suficientes para establecer una red de monitoreo.

Para el periodo de agosto de 1990 se cuenta con 115 pozos de los cuales se obtuvo que el promedio de Elevación del Nivel fue de 1726.53 m.s.n.m., con un promedio de las varianzas de 9.60, y una desviación estándar de 1.19 m; Mientras que para el periodo de diciembre de 1995 se cuentan con 54 pozos, con un promedio de elevación del nivel estático de 1707.97m.s.n.m., un promedio de varianzas de 13.93 y una desviación estándar de 1.31 m. Como se puede apreciar, en un periodo de 5 años el nivel bajó un promedio de 3.7 metros por año.

Posteriormente se elaboraron 115 configuraciones para el periodo de agosto de 1990 y 54 configuraciones para diciembre de 1995, en las que en cada una de ellas se eliminó uno de los puntos medidos, esto para ver el peso o la variabilidad de cada uno de los pozos con respecto a toda la población muestral de pozos. Una vez hecho esto se compararon con la configuración inicial. Dicha comparación se expresó como el volumen diferencial entre las dos configuraciones.

Para cada una de las comparaciones se obtuvo la varianza calculada con apoyo del programa Excel, utilizando la ecuación descrita en el capítulo 2 sección 2.1.2.

Una vez obtenido el valor de las varianzas para cada uno de los puntos de medición, se jerarquizó su importancia en porcentaje dentro de la red y se graficaron para identificar los pozos que presentan mayor error y que de alguna manera son representativos en las configuraciones, **figura 4.2 y 4.4**

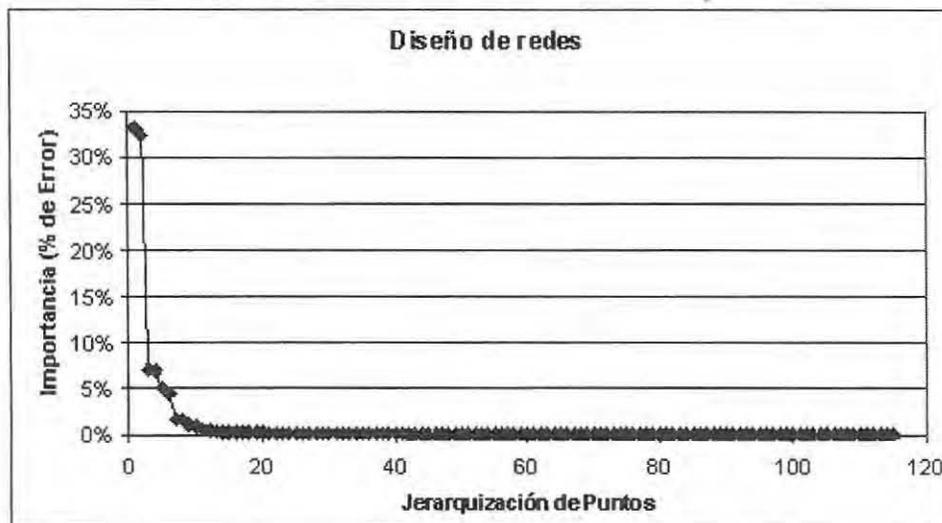


Figura 4.2 Número de puntos de medición contra varianza expresada en error porcentual, para el periodo de 1990.

En la **figura 4.2** se observa que 6 de las muestras presentan los mayores rangos de error entre 4% y 33%, siendo las demás menores al 1%.

En esta situación los pozos, registrados con los números 0825 y 1422 presentan las mayores varianzas, y representan la parte más alta y más baja del acuífero determinando un gradiente hidráulico el cual se puede apreciar en la siguiente **figura 4.3**

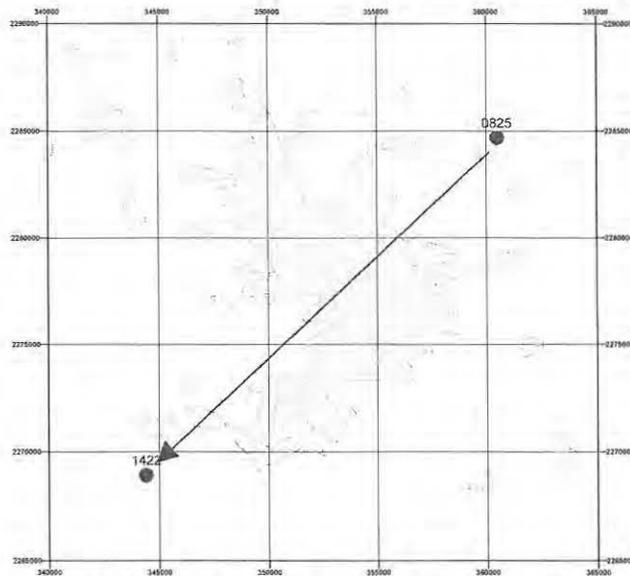


Figura 4.3 Dirección de gradiente hidráulico agosto 1990.

Para el periodo de Diciembre de 1995, se puede apreciar de la **figura 4.4**, que también hay 6 muestras que presentan los mayores rangos de error, entre 2% y 82% siendo las demás menores al 1%.

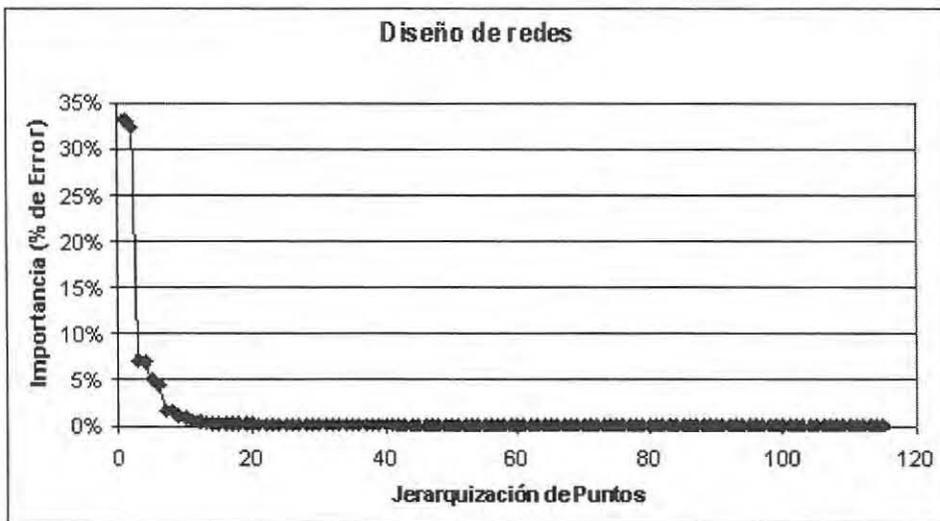


Figura 4.4 Número de puntos de medición contra varianza expresada en error porcentual, para el periodo de diciembre de 1995.

Para el periodo de diciembre de 1995 se tienen registrados los pozos con mayor varianza con los números 2052 y 0609-A y representan la parte más alta y más baja del acuífero determinando el gradiente hidráulico del mismo el cual se puede apreciar en la siguiente **figura 4.5**

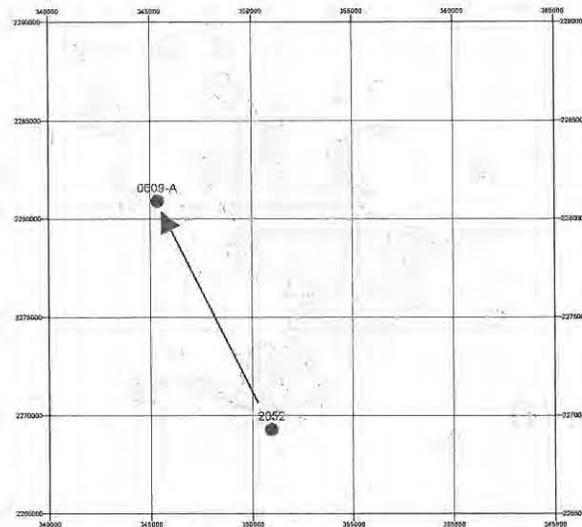


Figura 4.5 Dirección de gradiente hidráulico Diciembre 1995

De las **figuras 4.3 y 4.5** se aprecia un cambio en la dirección de la tendencia, esto es debido tan solo a que las Elevaciones del Nivel Estático para el periodo de diciembre de 1995 son mucho menores y existe una ligera pendiente en este sentido, no así en el caso de agosto de 1990 cuya pendiente es mayor. En la **figura 4.6** se presenta un esquema en 3D para mostrar dichas pendientes y por tanto la forma del gradiente hidráulico, los puntos en azul representan los pozos del periodo de agosto de 1990 y los de rojo los pozos del periodo de diciembre de 1995.

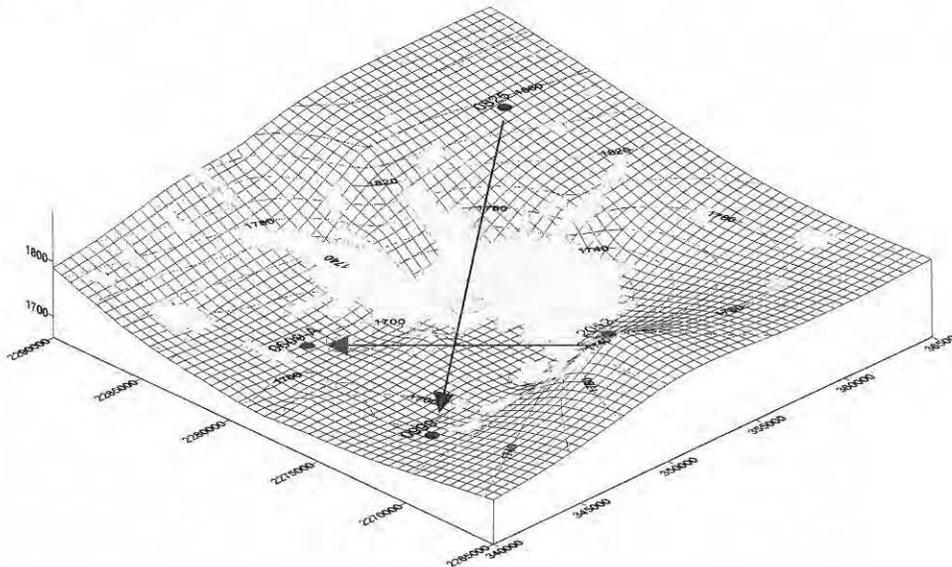


Figura 4.6 Gradiente hidráulico en los periodos de 1990 (azul) y 1995 (rojo)

Como se puede apreciar en esta figura se presentan dos tendencias preferenciales, las cuales se interpretan: Para el periodo 1990 la mayor influencia del flujo subterráneo proviene del valle de San Juan del Río, mientras que para 1995 la mayor influencia proviene de la zona sur del valle, sin embargo, se puede apreciar que la dirección preferencial va hacia el estado de Guanajuato.

Entre ambos periodos, como se ha ido mencionado a lo largo del presente trabajo, existe una deficiencia en la toma de muestras de datos, por lo que la falta de dicha continuidad de información en un solo periodo obliga a que se tenga que buscar en varios periodos los pozos que cuentan con una mayor cantidad de información y de esta manera, como se maneja en el presente trabajo, poder ver la variabilidad que existe; así como el apoyo de criterios hidrogeológicos para poder establecer la red de monitoreo más congruente a la situación que guarda el acuífero.

Otro análisis que se realizó fue el de la varianza, la cual de igual forma se jerarquizó por valor. **Figura 4.7 y 4.8**

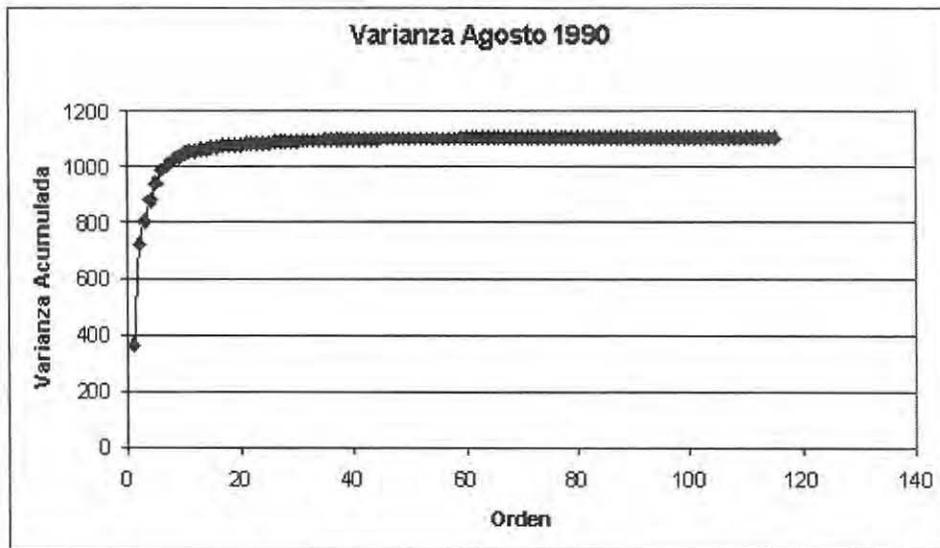


Figura 4.7 Varianza acumulada en el periodo de agosto 1990

Para la **figura 4.7** la cantidad de puntos, seis, que están fuera de la línea de tendencia horizontal representan una varianza acumulada menor a 987, el resto de las muestras tienden a uniformizarse en un valor de varianza de 1005 a 1105.

De la **figura 4.8** la cantidad de puntos, nueve, que están fuera de la línea de tendencia horizontal representan una varianza acumulada menor a 740, el resto de las muestras tienden a uniformizarse en un valor de varianza de 742 a 752.

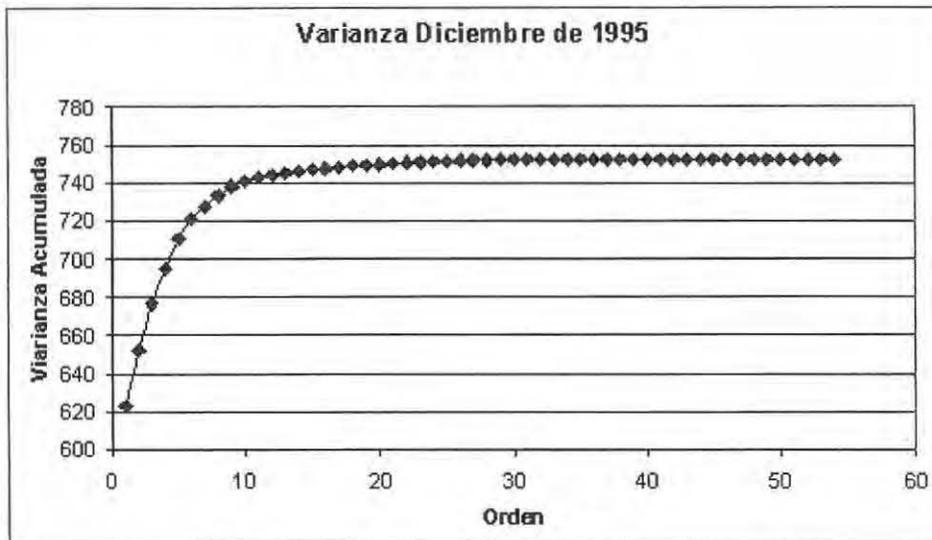


Figura 4.8. Varianza acumulada periodo de diciembre 1995

4.3 Ecuación de Regresión y Puntos Mínimos a Medir

Para establecer el número adecuado de puntos de medición se aplicó un modelo matemático a la distribución de porcentajes obtenida mediante el error porcentual acumulado de la varianza por orden de importancia de los puntos, **figura 4.9 y 4.10.**, para obtener una ecuación de regresión representativa de dicha distribución. Para el caso que nos ocupa se ajustó a una ecuación logarítmica por ser la más representativa. Este modelo de regresión es una alternativa cuando el modelo lineal no logra un coeficiente de determinación apropiado, o cuando el fenómeno en estudio tiene un comportamiento que puede considerarse potencial o logarítmico.

La ecuación que se ajusta a la **figura 4.9.** correspondiente al periodo de agosto de 1990 está dada por:

$$Y = 6.2883 \ln(x) + 73.97$$

Con un coeficiente de correlación de 0.5709.

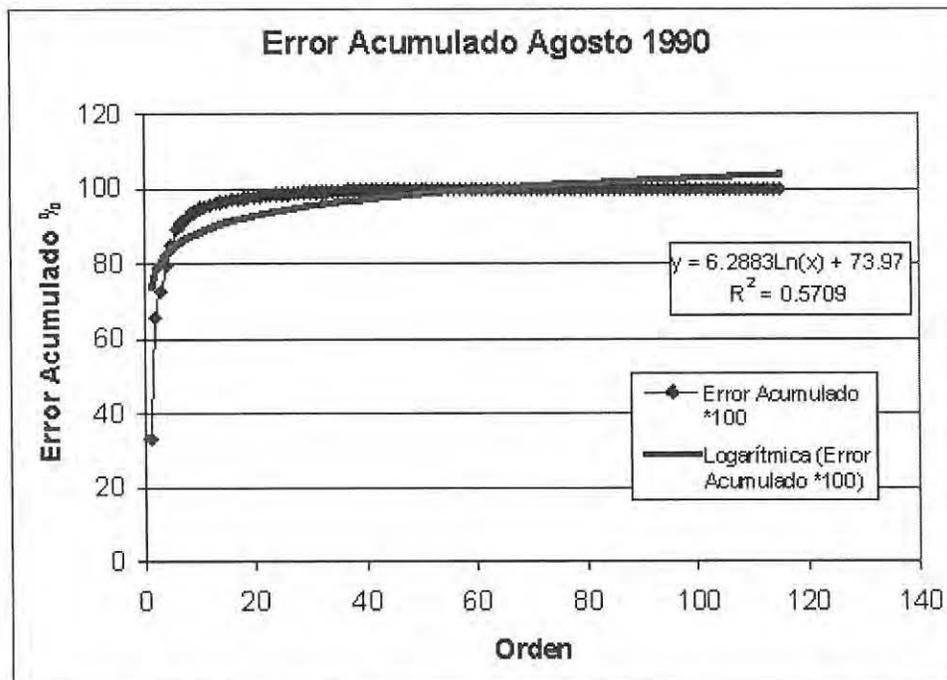


Figura 4.9. Ajuste de la función de distribución de errores acumulados

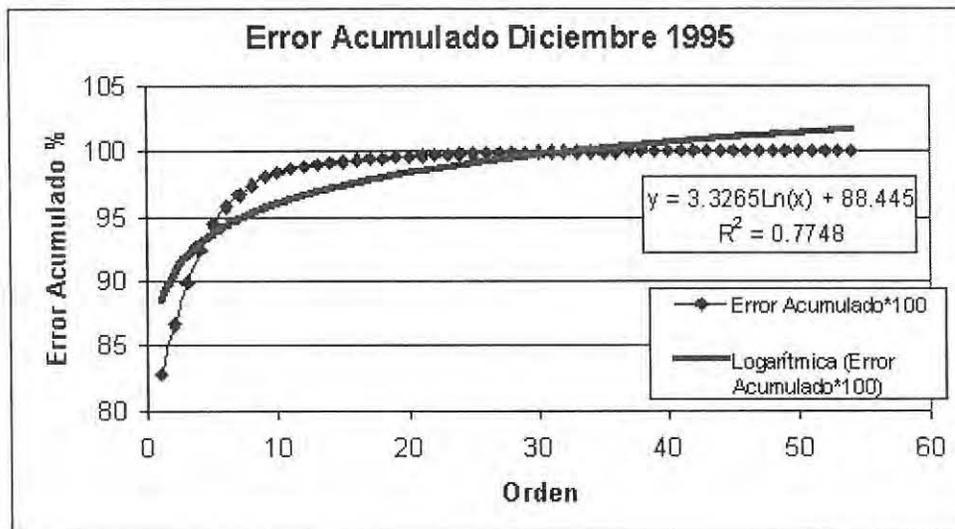


Figura 4.10. Ajuste de la función de distribución de errores acumulados

La ecuación que se ajusta a la figura 4.10, que corresponde al periodo de diciembre de 1995 está dada por:

$$Y = 3.3265 \ln(x) + 88.445$$

Con un coeficiente de correlación de 0.7748.

La ecuación que describe la función de distribución de errores acumulados sirvió para definir el número de puntos mínimos para reconstruir la distribución de las cargas. Para ello se obtuvo la primera derivada de dicha ecuación, con el propósito de obtener el punto de inflexión, este valor fue para el periodo de agosto de 1990 igual a $x = 6$, y para el periodo de diciembre de 1990, $x = 3$, e indica que los primeros 6 puntos para agosto de 1990 y 3 puntos para diciembre de 1995 de observación corresponden a los puntos mínimos

necesarios de la red de monitoreo y los más importantes. En la **figura 4.11** y **4.12** se observan las distribuciones de los puntos en el plano, así como la configuración que se genera. Los puntos en rojo son los pozos que corresponden a los valores de las derivadas para cada uno de los periodos.



Figura 4.11 *Puntos mínimos necesarios para agosto 1990*

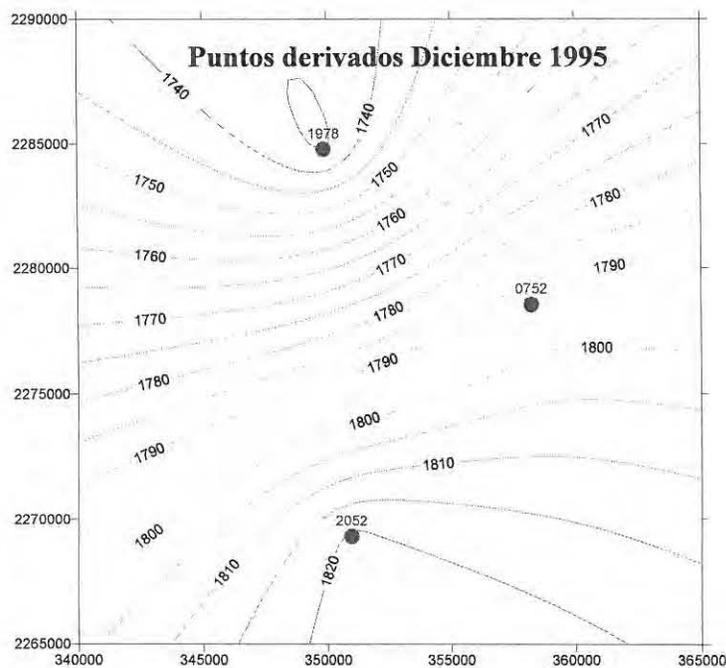


Figura 4.12 *Puntos mínimos necesarios para diciembre de 1995*

La desviación estándar se puede observar en la **figura 4.13**

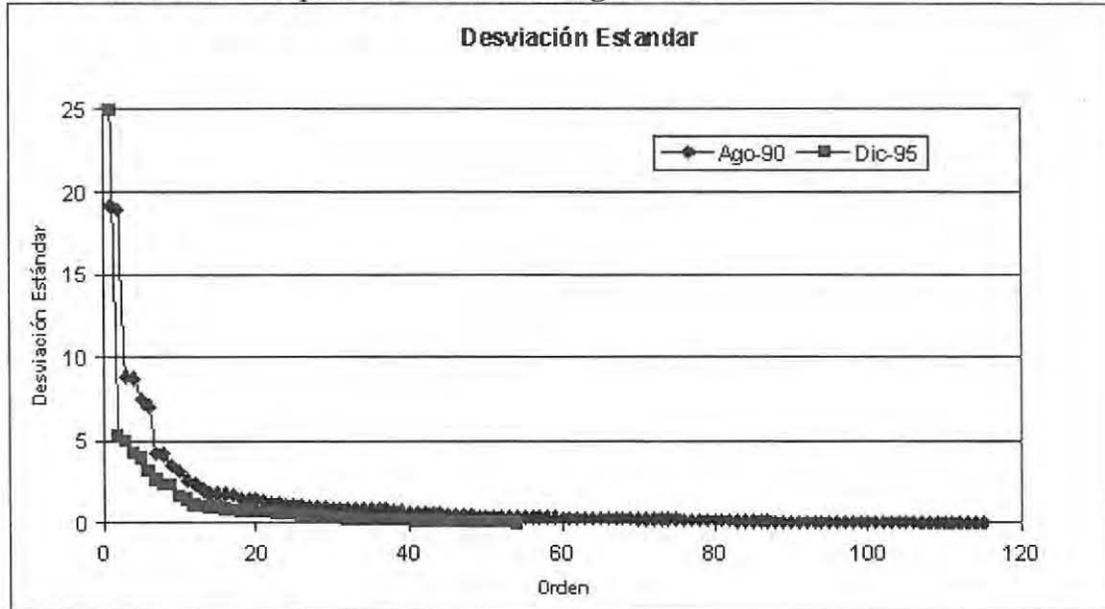


Figura 4.13 Gráfico de desviación estándar

De este análisis se puede observar cuánta es la desviación o dispersión de los valores con respecto a la media, y como se puede apreciar, para el periodo de diciembre de 1995 se presenta una mayor desviación en un solo punto, no así en el periodo de 1990 donde es un poco menor. Aunque en ambos casos es solo una pequeña fracción de datos por lo que es una desviación mínima.

4.4 Identificación de Zonas con Deficiencia de Datos.

Previo al análisis hidrogeológico es importante identificar las zonas donde no existen puntos de medición piezométrica. Con base en las varianzas utilizadas para elaborar la ecuación de regresión se elaboró un mapa para identificar las zonas donde se carece de información piezométrica. **Figura 4.14**

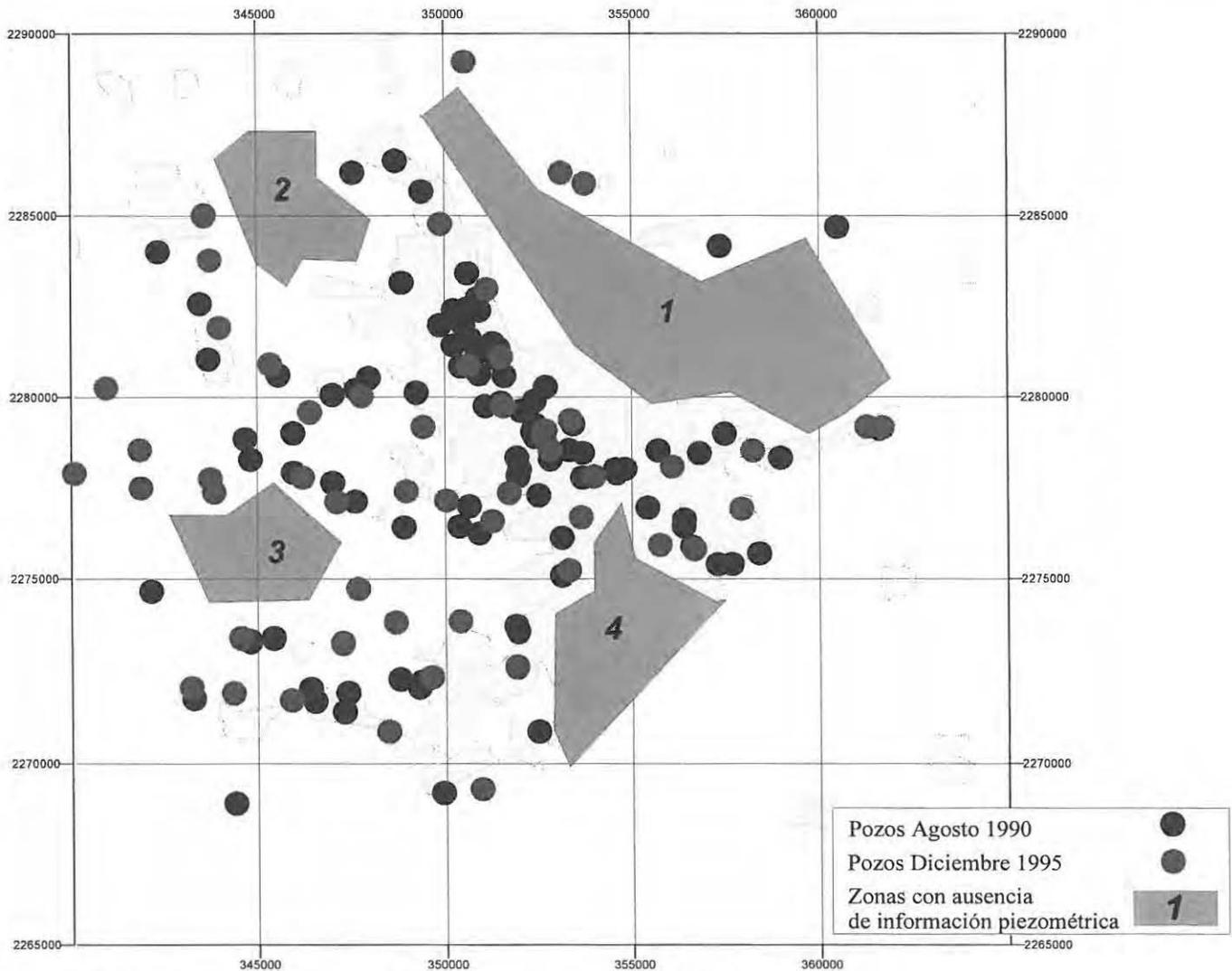


Figura 4.14 Mapa de ausencia de información piezométrica

Se puede observar que existen cuatro áreas en las que se puede dividir las zonas de ausencia de información. Aunque al observar el mapa de ambos periodos no existe una continuidad de pozos debido a que en estas zonas no se han explotado como en las partes centrales de la ciudad y a los lados de los ríos que la atraviesan. De estas configuraciones se pueden empezar a determinar las zonas y la ubicación para el diseño de la red de monitoreo.

La zona 1 se refiere a la parte nororiente del valle, esta parte representa el bloque estable la falla Querétaro, se considera una zona eminentemente de recarga por su posición topográfica, sin embargo, es de interés contar con información piezométrica dado que este bloque separa el acuífero del valle de Querétaro con el de Chichimequillas y pudiera presentarse un flujo subterráneo, actualmente no definido.

La zona 2 representa la parte occidental de Jurica, se ha evaluado geohidrológicamente, en esta parte se encuentra a profundidad un estrato potente de roca arcillosa alterada, situación que no permite tener pozo para producir agua.

La zona 3 representa la parte agrícola del valle de Querétaro y la salida de agua subterránea, el área aprovecha principalmente el agua que se extrae del Río Querétaro.

La zona 4 representa otra parte topográficamente alta, es la ladera del Cerro Cimatarío, es una zona eminentemente de recarga, sin embargo, el crecimiento urbano está cubriendo esa parte. El tipo de roca que se presenta en el subsuelo es andesita.

Es de esta forma que a partir del análisis estadístico de los pozos, se obtiene una población representativa de datos, con la cual se pueden hacer las inferencias en los métodos estadísticos.

4.5 Distribución de Pozos para Diseño de Red de Monitoreo.

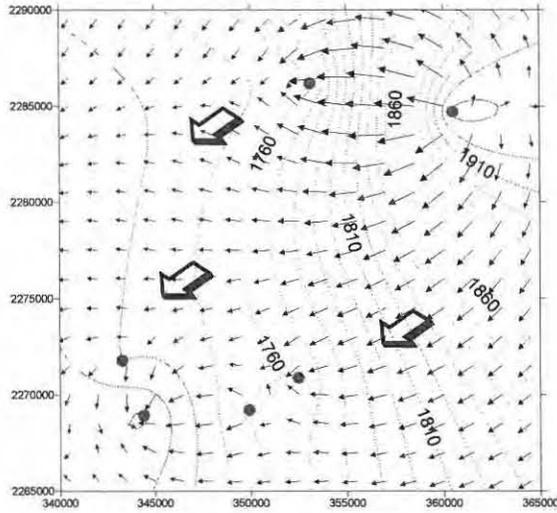
4.5.1 Selección de los Puntos de Medición.

Una vez realizado el análisis estadístico de los diferentes pozos, se observan sus varianzas, de las cuales se tomarán aquellos puntos de inflexión obtenidos de la derivada de la regresión logarítmica donde se establezca la recta.

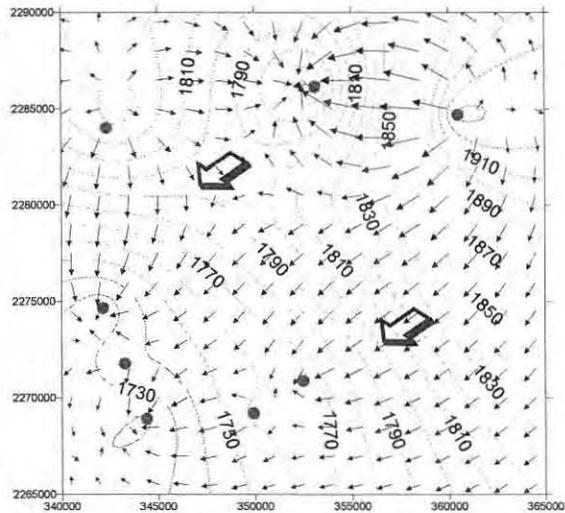
Para este trabajo se tomaron puntos con el 98% de grados de libertad, estos se utilizarán para el diseño de la red de monitoreo y así poder colocar los piezómetros necesarios en donde exista ausencia de información.

Para el caso de agosto del 1990 se tienen las siguientes configuraciones: **figura 4.15.**

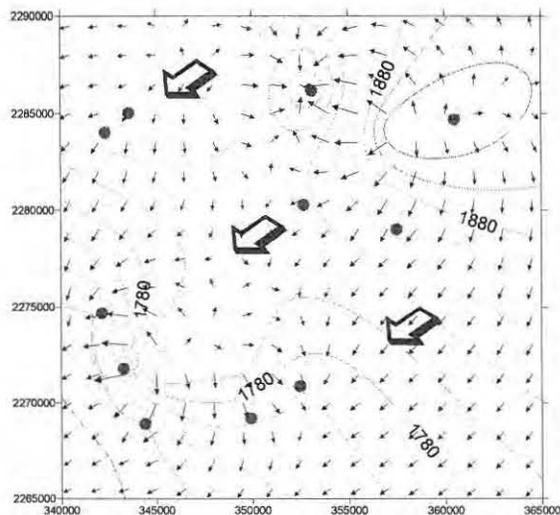
De esta configuración se aprecia que al tomar mayores valores en los grados de libertad, se abarcan mayores áreas dentro de nuestra zona de estudio, no así con solo las obtenidas con las derivadas. De la misma forma se puede observar con las configuraciones para el periodo de diciembre de 1995. **Figura 4.16.** Sin embargo, como no se tiene la misma cantidad de pozos y no se repiten entre los periodos, esto genera que el análisis estadístico presente las variaciones que se observan entre periodos. La mayor influencia de esta configuración está referida al flujo local.



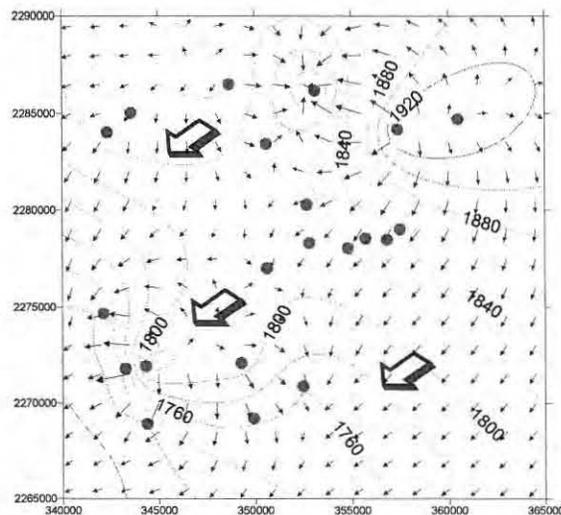
Resultado de la derivación de pozos con 82% de grado de libertad



Configuración con 92% de grado de libertad



Configuración con 95% de grado de libertad



Configuración con 98% de grado de libertad

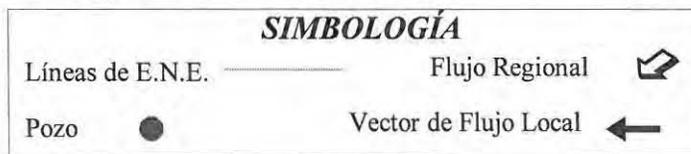
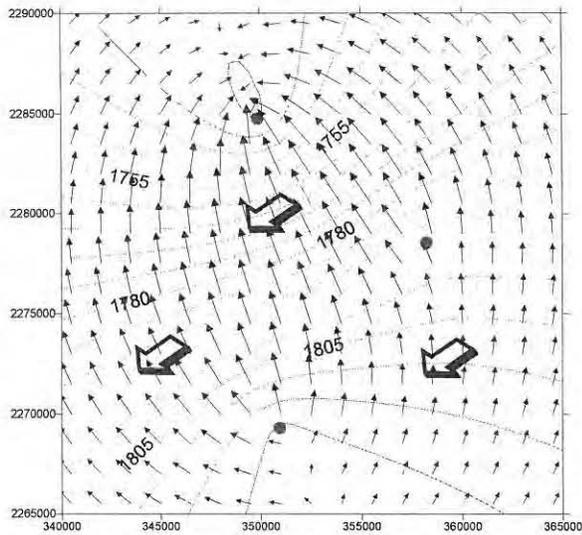
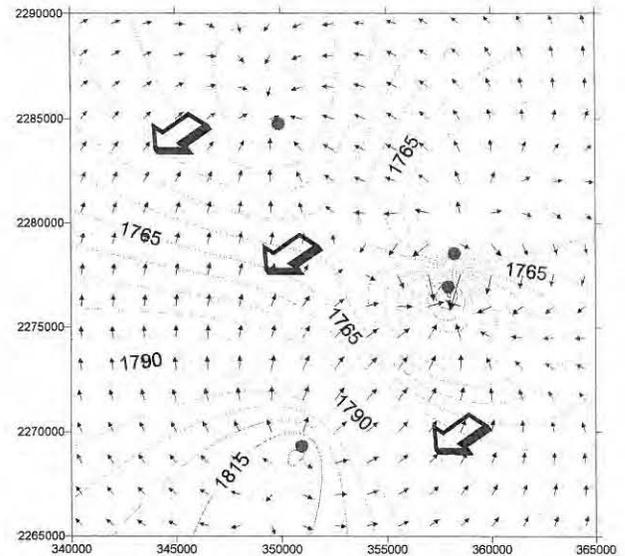


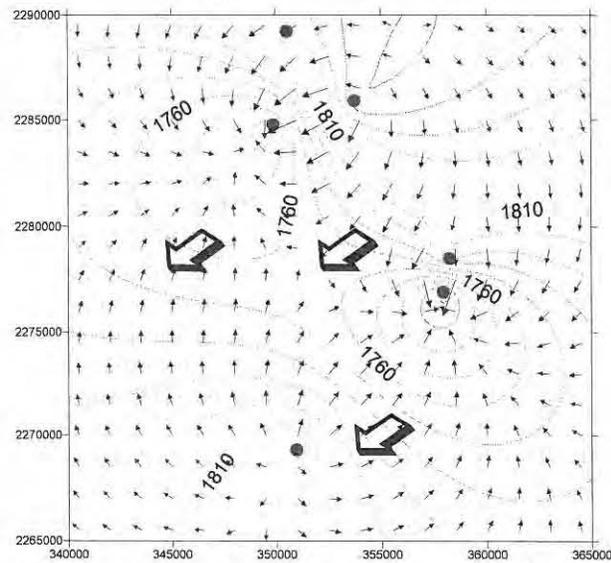
Figura 4.15 Configuración de derivada y grados de libertad para el periodo de agosto de 1990



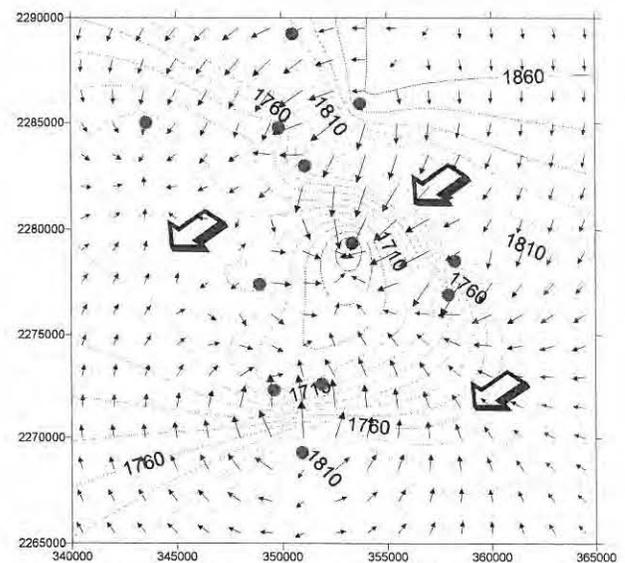
Resultado de la derivación de pozos con 82% de grado de libertad



Configuración con 92% de grado de libertad



Configuración con 95% de grado de libertad



Configuración con 98% de grado de libertad

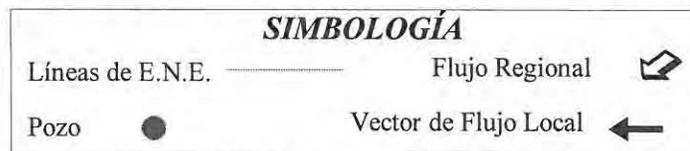


Figura 4.16 Configuración de derivada y grados de libertad para el periodo de diciembre de 1995

En estas configuraciones, la tendencia del flujo preferencial del agua subterránea es contraria a las de flujo regional, esto debido a que los abatimientos son mucho más fuertes en la parte central como en las zonas de uso urbano, ya expuesto en el capítulo 1.12.

De estas configuraciones se hizo una resta entre ambos periodos y se obtuvo una nueva configuración que englobó a ambos, para así poder definir con mayor precisión las zonas donde se van a proponer los pozos para la configuración de la red, así como la ubicación de nuevos pozos. **Figura 4.17**

Retomando la **figura 4.14**, en cuanto a las zonas con deficiencias de datos, podemos inferir que hace falta una mayor disposición de pozos, de los cuales se proponen en la siguiente **figura 4.17**.

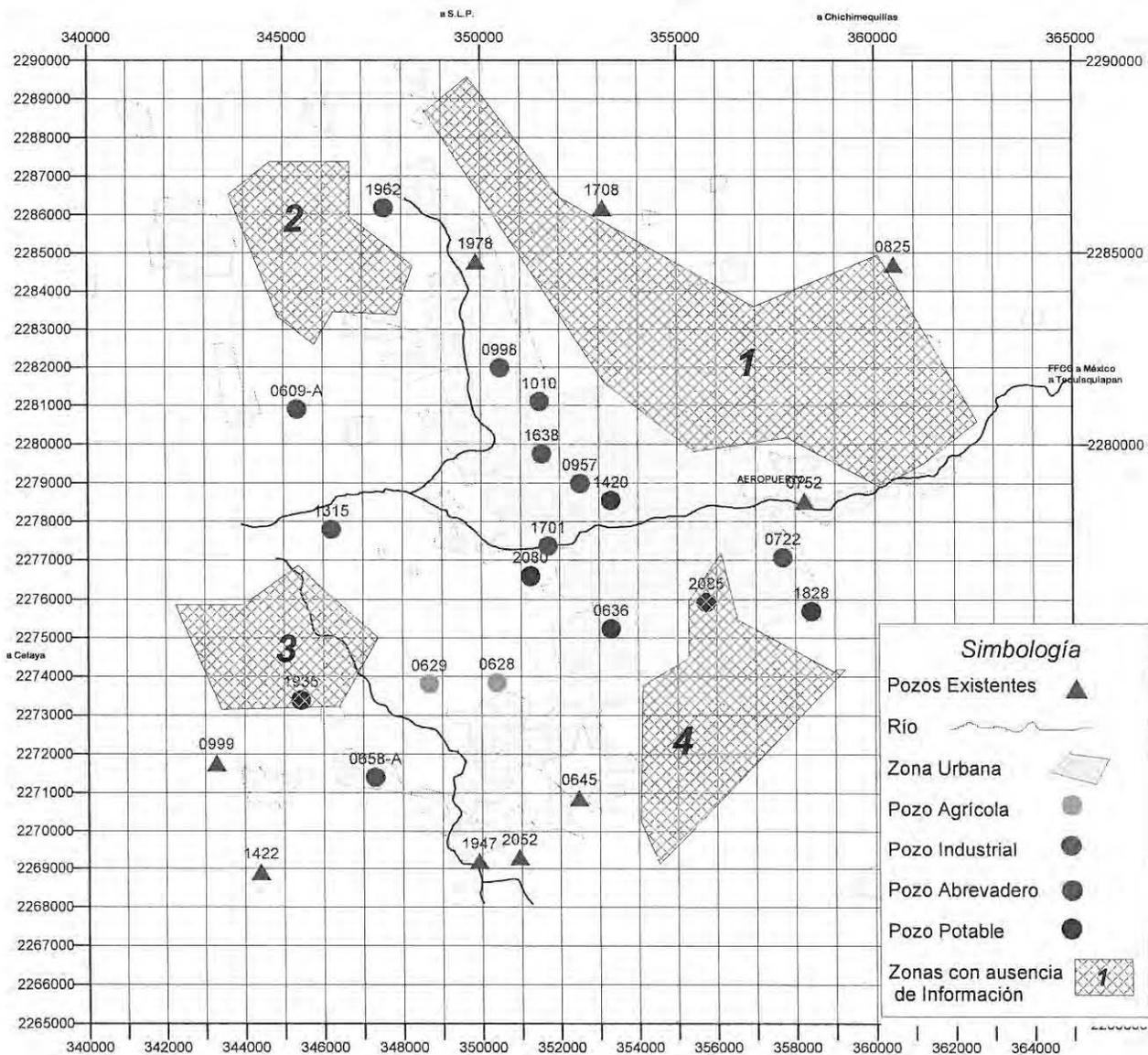


Figura 4.17 Red de Monitoreo

Esta figura muestra la red de monitoreo con 27 pozos obtenidos del análisis estadístico. Los 12 pozos restantes se ubicaron en zonas donde no existen pozos o no son utilizados para realizar mediciones.

Algunos pozos como se puede apreciar en la **figura 4.16** no han sido tomados en cuenta en la nueva configuración de la **figura 4.17**, esto debido a que se encontraban demasiado juntos y el objetivo es abarcar el mayor área posible con un número mínimo de pozos. Para seleccionar el mejor pozo en estos casos, se tomó el criterio de cual de los dos se contaba con un mayor historial y que contara con una profundidad total mayor, dando como resultado un mayor tiempo de vida útil del pozo.

Como se puede observar en la **figura 4.17**, las zonas de recarga y descarga están bien representadas, así como también las zonas en donde se concentran las captaciones.

En la **figura 4.18** se muestra el uso y ubicación de los pozos con los nuevos piezómetros que serán integrados a la red.

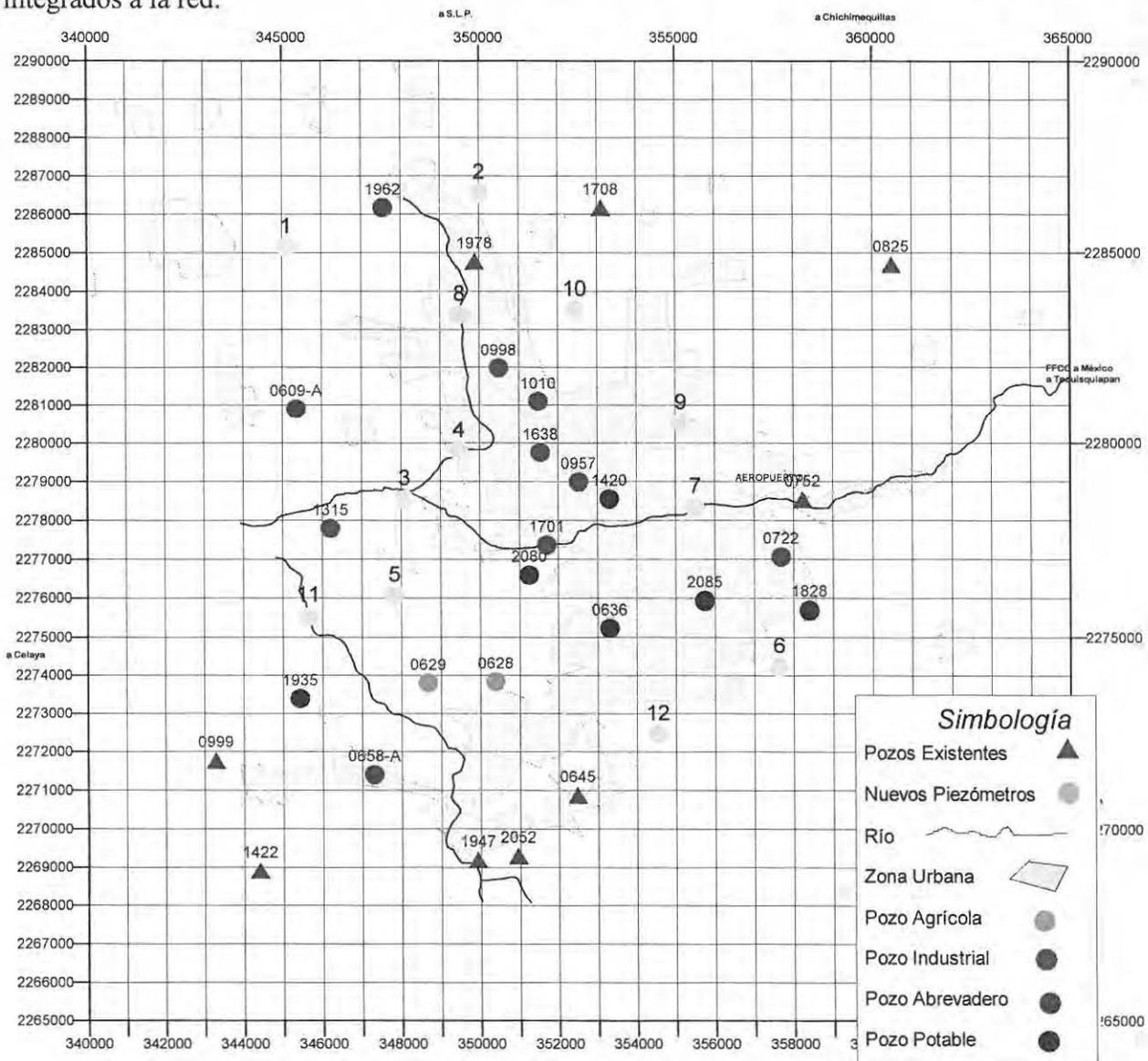


Figura 4.18 Ubicación y usos de pozos y piezómetros que integran la red de monitoreo.

La justificación para la creación de nuevos piezómetros consiste en cubrir con mayor detalle el acuífero y así poder tener un conocimiento más amplio y detallado de su comportamiento. Como en el caso de los piezómetros 8, 4, y 3, los cuales se sitúan a la salida de la zona industrial, por consiguiente son necesarios para saber la cantidad de agua que están utilizando así como la calidad de la misma y evitar que se contaminen los pozos que sirvan para fines agropecuarios o potable.

Otros piezómetros necesarios como 5, 11 y 1, se utilizan para saber el estado del agua a la salida del acuífero, sobretodo que es un medio poroso, monitoreando que cantidad y calidad de agua se le entrega a otros estados en cuanto a las aguas superficiales, como las subterráneas.

Los piezómetros que corresponden a la entrada del acuífero, como el 2, 10, 9, 7, 6, y 12, nos ayudarán a saber la cantidad de agua que entra en él, siendo esta parte en general un medio fracturado, y así poder tener una relación entre la entrada del líquido como la salida, de esta forma poder tomar acciones en aquellos periodos de secas.

4.6 Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia de medición estará dada dependiendo del objetivo que se desea buscar, en este caso los principales objetivos son un monitoreo de alerta, de prevención y de tendencia.

Estos objetivos estarán definidos de acuerdo a las zonas marcadas en la **figura 4.19**.

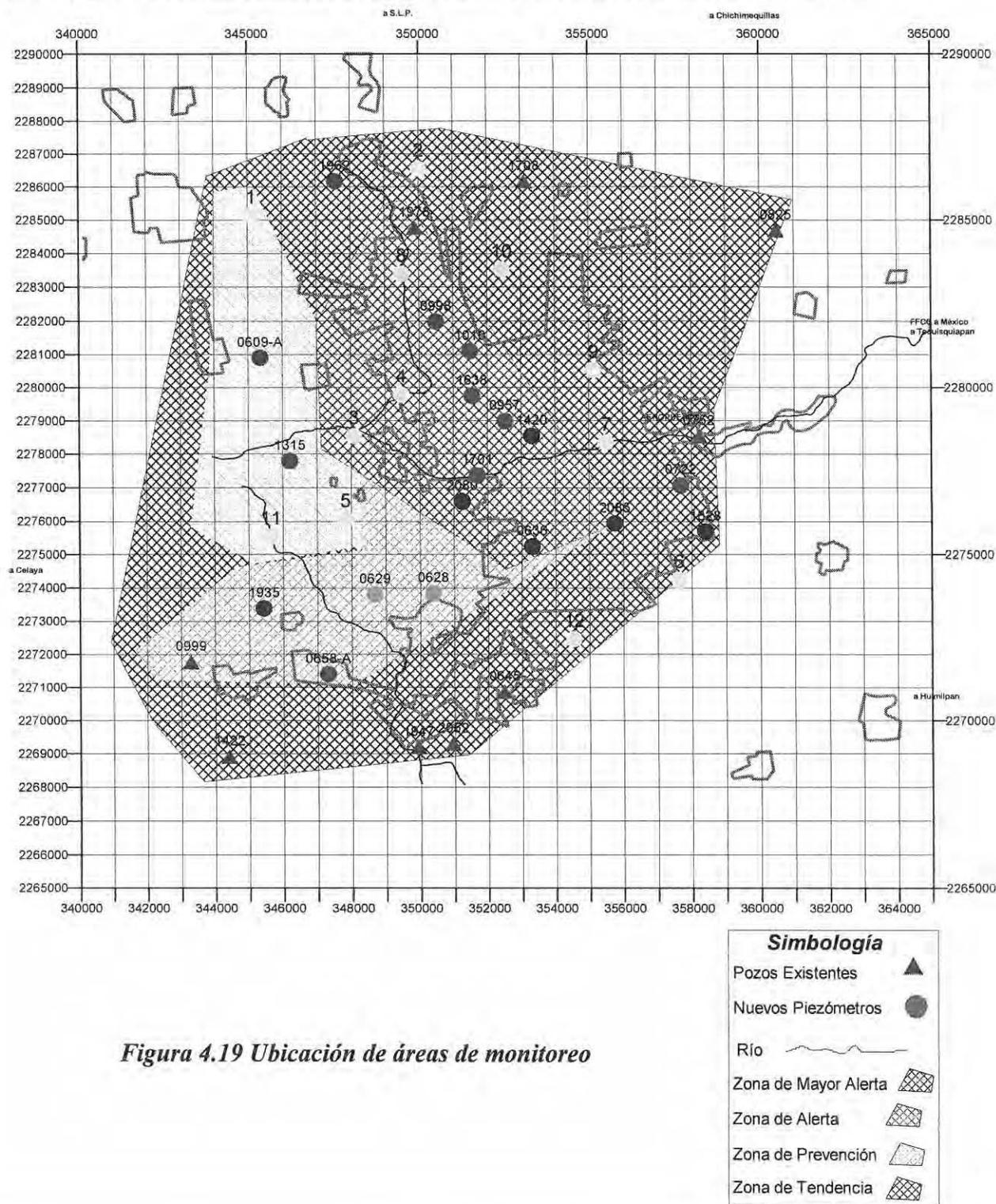


Figura 4.19 Ubicación de áreas de monitoreo

La frecuencia de los puntos de medición depende del objetivo propuesto, en la **tabla 4.1** en la cual se indica la forma en que deberá medirse la red de monitoreo.

Pozo	Latitud	Longitud	Uso	Objetivo del Monitoreo	Frecuencia de medición
2085	2275930	355744	Potable	Mayor Alerta	Mensual
2080	2276589	351251		Mayor Alerta	Mensual
1701	2277361	351701	Industrial	Mayor Alerta	Mensual
1638	2279746	351547	Agrícola	Mayor Alerta	Mensual
1422	2268905	344401	Agrícola	Mayor Alerta	Mensual
1420	2278544	353310	Potable	Mayor Alerta	Mensual
1010	2281098	351497	Potable	Mayor Alerta	Mensual
0998	2281980	350491	Industrial	Mayor Alerta	Mensual
0957	2278984	352524	Industrial	Mayor Alerta	Mensual
0636	2275233	353309		Mayor Alerta	Mensual
1978	2284771	349884	Potable	Mayor Alerta	Mensual
1935	2273386	345429	Industrial	Alerta	Bimestral
0999	2271767	343285	Industrial	Alerta	Bimestral
0658-A	2271399	347302	Industrial	Alerta	Bimestral
0629	2273801	348670	Potable	Alerta	Bimestral
0628	2273837	350387		Alerta	Bimestral
1315	2277790	346209	Industrial	Prevención	Semestral
0609-A	2280898	345355	Abrevadero	Prevención	Semestral
1962	2286169	347556	Abrevadero	Tendencia	Anual
1947	2269193	349922		Tendencia	Anual
1828	2275692	358400	Potable	Tendencia	Anual
1708	2286168	353113		Tendencia y Prevención	Semestral
0825	2284687	360493		Tendencia	Anual
0752	2278528	358235		Tendencia y Prevención	Semestral
0722	2277059	357685	Industrial	Tendencia y Prevención	Semestral
0645	2270868	352475	Potable	Tendencia y Prevención	Anual
2052	2269300	350950		Tendencia y Prevención	Semestral
Piezómetros Nuevos					
1	2285141.37	345105.667		Prevención	Semestral
2	2286547.39	350004.367		Tendencia y Prevención	Semestral
3	2278534.45	348080.352		Prevención	Semestral
4	2279785.76	349467.948		Mayor Alerta	Mensual
5	2276054.58	347823.226		Prevención	Semestral
6	2274234.49	357633.925		Tendencia y Prevención	Semestral
7	2278338.79	355497.117		Tendencia	Anual
8	2283384.98	349490.114		Mayor Alerta	Mensual
9	2280532	355133.593		Tendencia	Anual
10	2283516.94	352438.2		Tendencia y Prevención	Semestral
11	2275531.31	345642.085		Prevención	Semestral
12	2272455.36	354535.11		Tendencia y Prevención	Semestral

Tabla 4.1 Frecuencia de medición de la red de pozos piloto.

De las frecuencias de monitoreo se asignaron zonas con mayor alerta a aquellas donde las mediciones deben ser mensuales, ya que abarca la zona industrial, y se debe tener un control tanto de calidad como de cantidad.

Las zonas marcadas como de alerta deberán monitorearse bimestralmente con la misma consideración de control tanto de cantidad como de calidad.

Las zonas marcadas como de prevención, se ubican en las salidas del acuífero, tanto para cuidar el agua en la parte superficial, como la salida del flujo subterráneo, por lo que también se tendrá que monitorear la calidad como la cantidad de agua, su medición deberá ser semestral.

Las zonas de tendencia, las cuales abarcan a los otros grupos anteriores, servirán para mantener el control de extracción tanto de las entradas como de las salidas y poder determinar los niveles de abatimiento y las zonas donde se tiene una mayor extracción de lo permitido, su medición deberá ser en forma anual, de preferencia en los meses de mayo y julio, debido a que en estas fechas es cuando se cuenta con el mayor historial piezométrico, siendo conveniente continuar con esta tendencia.

4.7 Comparación con el Método Geoestadístico.

Dentro del trabajo realizado bajo un esquema geoestadístico de la CNA (“ESTUDIO DE SIMULACION HIDRODINAMICA Y DISEÑO OPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DE AGUASCALIENTES Y QUERETARO”,1996), retomando los análisis de varianza y comparando con los resultados obtenidos en el presente trabajo tenemos que:

Los criterios utilizados para el diseño de la red bajo el esquema geoestadístico fueron apoyados por procedimientos técnicos, sin perder de vista el panorama real hidrogeológico del área de estudio, para la discriminación de los pozos que han sido propuestos para integrar la red óptima de monitoreo.

La red propuesta bajo el esquema geoestadístico está formada por 73 pozos, con una varianza de 3170.01 para el periodo de 1990 y 2016.83 para el periodo de 1995.

Retomando los valores de las **figuras 4.7 y 4.8** se tiene que para el periodo de 1990 se tiene una varianza máxima acumulada de 1105, mientras que para el periodo de 1995 se maneja una varianza máxima acumulada de 752.

Para el caso geoestadístico sus resultados para el periodo de 1990 son de 47 pozos con una varianza de 3170.01 y para el periodo de 1995 tenemos una varianza de 2016.83, teniendo para el análisis geoestadístico y estadístico, tenemos 10 pozos de los cuales se repiten entre ambos periodos, pero no son significativos para poder crear una red de monitoreo.

Retomando los objetivos de los métodos geoestadísticos y estadísticos del capítulo 2 sección 2.3, se tiene que:

- El método **geoestadístico** se aplica cuando el parámetro a evaluar se formula como una función o espacio, en particular la interpolación espacial. El diseño de la red se enfoca a la densidad y localización de los puntos de muestreo.
- Mientras que **la estadística** se aplica en el caso de que el parámetro a evaluar se formule en términos de características generales. Tales como un valor de referencia en el espacio o un valor promedio en el tiempo, como en el presente trabajo.

Dentro de la configuración de la red de monitoreo, se pueden ver las diferencias entre los resultados obtenidos entre la red de monitoreo propuesta por métodos geoestadísticos, estadísticos y el caso ideal del método estadístico.

Para el caso del método geoestadístico fue necesario colocar 73 pozos, aumentando solo 5 pozos, pero su varianza es de 316.05, mientras que por el método estadístico propuesto para el presente trabajo muestra una varianza de 242.14 integrando 39 pozos .

La varianza ideal para el método estadístico es de 207.87 con 48 pozos separados equidistantemente con una separación de 2500 m entre si. **Figura 4.20**

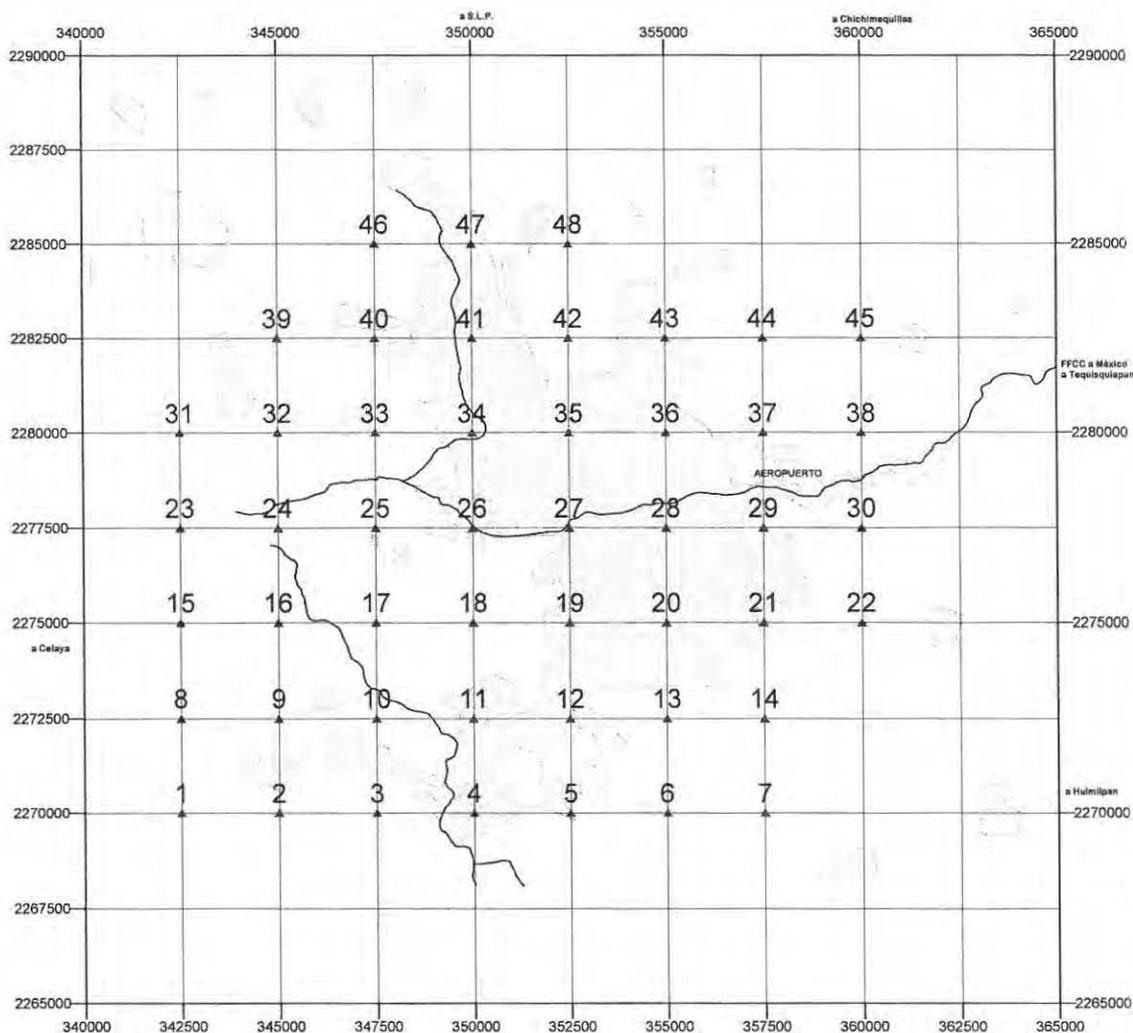


Figura 4.20 Red de monitoreo bajo un esquema ideal.

Este esquema ideal no se puede llevarse a la práctica debido a que varios de los pozos, no se pueden hacer ya que existen zonas construidas y por tanto resultaría incosteable tal distribución, sin embargo, ayuda a calibrar con el esquema propuesto con el enfoque estadístico, teniendo un 85% comparado con el ideal y una mayor cobertura de monitoreo.

4.8 Análisis de Costos

El diseño de la red debe involucrar también su costo económico, situación por la cual se hace un análisis. La red actual de monitoreo como se ha podido ver es muy variable y dispersa, específicamente para los periodos analizados en este trabajo, no hay continuidad.

La red propuesta para este trabajo está integrado por 39 pozos, de los cuales se proponen 12 nuevos, ubicados en sitios donde no existen pozos o bien las condiciones de los que hay no son favorables para que operen como pozos piloto.

En la tabla del **Anexo 1** se presenta el catálogo de conceptos, elaborado con base en el tipo de maquinaria, materiales promedio a encontrar y la tubería de ademe que servirá para realizar tanto las mediciones de cantidad como de calidad, por lo que se propone que estos piezómetros tengan un diámetro de 8” y una profundidad de 200 m. La vida útil de éstos será de acuerdo al comportamiento del acuífero de cuando menos 10 años. En el **Anexo 3** presento de forma gráfica la propuesta de la construcción de piezómetros. De acuerdo a lo anterior se requiere de una inversión a valor actual de \$5,543,626.32 para la perforación y equipamiento de los 12 pozos.

Por otra parte es necesario también mencionar la necesidad de integrar una cuadrilla de personal con el equipo necesario para realizar dichas mediciones. En la tabla del **Anexo 2** se representa el costo unitario para realizar la medición del nivel estático y obtener una muestra del agua. Para el caso de calidad, sólo se hace el análisis *in situ* de la conductividad eléctrica, pH, temperatura y redox, que son los elementos básicos para determinar una posible contaminación. En los casos que los pozos cuentan con equipos de bombeo, muchos de las veces hay que costear el gasto de energía eléctrica. En este caso el costo para las diferentes frecuencias de medición están dadas de la siguiente forma (**tabla 4.2**)

Objetivo del Monitoreo	Frecuencia de Medición	Costo
Tendencia	Anual	\$226,256.55
Prevenición	Semestral	\$75,418.85
Alerta	Bimestral	\$522,130.05
Mayor alerta	Mensual	\$678,769.65
	Costo anual	\$1,502,575.1

Tabla 4.2 Análisis de costos

A este costo habría que agregarle el costo de los análisis específicos del procesamiento, análisis, interpretación y resultados de las mediciones.

Conclusiones

1. El análisis estadístico, con el apoyo del criterio hidrogeológico sustentado, permitió definir una nueva red de monitoreo piezométrica y de calidad del agua para el Acuífero del Valle de Querétaro, la cual está integrada por 39 pozos. De éstos, 27 son pozos existentes y 12 se tendrán que perforar. La red anterior de monitoreo, por lo menos hasta 1996, estaba integrada por 73 pozos en los cuales no siempre fue posible medir debido a cuestiones técnicas, de acceso, o bien no estaban operando en el periodo de las mediciones.
2. La importancia de una red de monitoreo radica en la operación y vigilancia que permita obtener información necesaria para una toma oportuna de decisiones sobre el ambiente, el desarrollo sustentable y la protección de las fuentes tanto de agua subterráneas como superficiales.
3. La metodología utilizada para esta propuesta está orientada a la falta de información continua, por lo que en el análisis estadístico a partir de ciertos criterios, permitió ir eliminando pozos hasta tener aquellos que presentan las mayores varianzas y con estos poder definir una nueva red, la cual estaría complementada con nuevos piezómetros. Estos pozos abarcarían una mayor extensión dentro del acuífero y cubrirían aquellas zonas donde no existiera información. De esta forma no se tendría incertidumbre en la información.
4. Dentro de la red geoestadística, con los mismos periodos de 1990 y 1995, dado a que son los periodos que cuentan con una mayor información piezométrica, se tiene una varianza de 316.05 con un total de 73 pozos propuestos. Además, con el criterio geoestadístico se hace un análisis en cuanto a su posición espacial y por ende es de una forma puntual en cuanto al manejo de sus datos. No así la estadística, la cual se obtuvo para los mismos periodos una varianza de 242.14 con 39 pozos, pero en este caso el criterio de la estadística maneja a los pozos de una forma regional.
5. El costo de esta nueva propuesta esta fundamentada con los beneficios a corto plazo, ya que en estos momentos al no haber un seguimiento de la información de calidad y cantidad de agua, al 2003 el panorama actual dentro de la infraestructura del acuífero se ha tenido que profundizar más para encontrar el líquido, aumentando el costo por este y no haber un control y legislación para el mismo; además, se han incrementado los movimientos diferenciales y deteriorando la infraestructura urbana y en consecuencia la economía y patrimonio de la Ciudad de Querétaro.
6. Para un óptimo desempeño de una red de monitoreo es imprescindible el seguimiento continuo y sistemático de la toma de información para tener un seguimiento histórico y de esta manera tomar las medidas necesarias en las épocas de estiaje.

Recomendaciones.

A pesar del análisis realizado, es necesario que se tome conciencia en cuanto a la necesidad de realizar el monitoreo continuo con las frecuencias propuestas, ya que la experiencia que se tiene de estas mediciones no se ha hecho con el criterio adecuado, por lo que la historia piezométrica presenta una gran variación de mediciones en el tiempo y de las cuales no hay continuidad en el mismo sitio.

Hacer un estudio para identificar con mayor precisión las zonas de mayor contaminación y un estudio de vulnerabilidad y definir un programa de protección de fuentes, así como de instrumentar un modelo de transporte de contaminantes.

Bibliografía

1. Arnold, G.E., Christel, R. y Novak, V., September 1990, Application of models, Volume 3, UN/ECE Task Force on Monitoring & Assessment, Lelystad, páginas 12 y 37.
2. Comisión Nacional del Agua, Subdirección Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas Términos de referencia para realizar el “Estudio de Simulación Hidrodinámica en el Acuífero de Janos, Chih”.
3. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas., 1996, Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación de los acuíferos de Aguascalientes y Querétaro, Tomo III,
4. Davis , J.C., 1986. Statistics and data analysis in geology. John Wiley, Second Edition, página 646.
5. D.R. Helsel, R.M. Hirsch., 1995, Statistical Methods in Water Resources, Studies in Environmental Science 49, Elsevier, página 529.
6. Driscoll, Fletcher G., Groundwater and Wells, 1989, Jhonson Filtration System Inc. Secon Edition, St. Paul, Minnesota, página 725.
7. E. Custodio y Manuel Ramos Llamas, 1967 Hidrología Subterránea, Tomo 1 Sección 3 “Nociones de estadística aplicada a la hidrología”, Ediciones Omega, Barcelona, páginas 127-132; 164-169.
8. Efron Bradley y Tibshirani Robert J., 1993, Monographs on Statistics and Applied Probability #57, “An Introduction to the Bootstrap”, Chapman and Hall/CRC, páginas 141-143.
9. Kitanidis P.K., 1997, Introduction to Geostatistics Applications in Hydrology, Cambridge University Press, páginas 65-72.
10. Palmer, Christopher K., 1992, Principles of Contaminant Hidrology, Lewis Publishers, Michigan
11. Philip D. Meyer y E. Downey Brill, Jr., August 1988, A method for locating well in a Groundwater Monitoring Network Under Conditions of Uncertainty., Water Resources, Vol. 24, No. 8, páginas 1277-1282.
12. Roberson, Jhon A., Cassidy, Jhon J., Chaundry, M.Hanif., 1988, Hydraulic Engineering., Houghton Mifflin, páginas 109-121.
13. S.C. Nixon, Y.J Rees, A Gendebien y S.J., June 1996, Ashley. Requirements for water monitoring, European Topic Center on Inland Waters.
14. Uil H., F.C. Van Geer, J.C. Gehrels y F.H. Kloosterman, 1999, State of the Art on Monitoring and Assessment of Groundwater, Vol. 4, Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO, 48 páginas.
15. Walpole, Ronald E. y Raymond H. Myers., 1996, Probabilidad y Estadística, Cuarta Edición (tercera edición en español), McGraw-Hill, páginas 45-80, 143, 373-419.

16. Yamane, Taro., 1973, Estadística, Editorial Harla, México, página 94.

17. Zavala Sánchez Gabriela, Vanessa., Junio del 2000, Tesis Profesional “Modelo Geoelectrico del Valle de Querétaro”

Anexo 1

CONCEPTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PIEZÓMETROS

TESIS PROFESIONAL
CARLOS GONZÁLEZ LEÓN

Valle de Querétaro

CATALOGO DE CONCEPTOS					
PARTIDA	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE EN
				UNITARIO	
PERFORACIÓN POZO PROFUNDO					
TRABAJOS PRELIMINARES					
1	MOVIMIENTO DEL EQUIPO DE PERFORACION MOD 2500 CON HERRAMIENTAS Y BOMBA DE LODOS CON CARACTERÍSTICAS ADECUADAS O SIMILARES	LOTE	1	\$ 29,936.77	29,936.77
2	INSTALACION Y DESMANTELAMIENTO DE EQUIPO DE PERFORACIÓN TIPO ROTARIO MODELO 2500	LOTE	1	\$ 16,979.51	16,979.51
3	EXCAVACIÓN Y RELLENO DE FOSAS PARA LODOS DE 3X4X2 MTS, INCLUYE RENTA, OPERACIÓN DE MAQUINARIA NECESARIA ASI COMO LA MANO DE OBRA.	LOTE	1	\$ 5,753.40	5,753.40
4	EQUIPO DE PERFORACION ROTARIO MODELO 2500. INACTIVO EN ESPERA DE ORDENES DE LA DEPENDENCIA	HORA	24	\$ 234.69	5,632.59
5	EQUIPO DE PERFORACIÓN ROTARIO MODELO 2500 TRABAJANDO EN LIMPIEZA DE POZO EXCEPTO PERFORACIÓN (LAVADO Y PISTONEO)	HORA	48	\$ 646.70	31,041.60
PERFORACIÓN EXPLORATORIA					
6	PERFORACIÓN EXPLORATORIA DE POZOS DE 30.48 CM (121/4") DE DIÁMETRO, EN MATERIAL I, DE 0.00 A 100.0 MTS	METRO	20	\$ 278.33	5,566.66
7	PERFORACIÓN EXPLORATORIA DE POZOS DE 30.48 CM, (121/4") DE DIAMETRO, EN MATERIAL TIPO I, DE 100.00 A 200.00 MTS	METRO	30	\$ 290.58	8,717.34
8	PERFORACIÓN EXPLORATORIA DE POZOS DE 30.48 CM, (121/4") DE DIAMETRO, EN MATERIAL TIPO II, DE 0.00 A 100.00 MTS	METRO	30	\$ 358.03	10,741.02
9	PERFORACIÓN EXPLORATORIA DE POZOS DE 30.48 CM, (121/4") DE DIAMETRO, EN MATERIAL TIPO II, DE 100.00 A 200.00 MTS	METRO	20	\$ 371.75	7,434.91
10	PERFORACIÓN EXPLORATORIA DE POZOS DE 30.48 CM, (121/4") DE DIAMETRO, EN MATERIAL TIPO III, DE 0.00 A 100.00 MTS	METRO	50	\$ 674.28	33,713.77
11	PERFORACIÓN EXPLORATORIA DE POZOS DE 30.48 CM, (121/4") DE DIAMETRO, EN MATERIAL TIPO III, DE 100.00 A 200.00 MTS	METRO	50	\$ 694.64	34,732.05
AMPLIACIÓN					
12	AMPLIACION DE AGUJERO DE 30.48 CM (12 1/4") A 37.46 CM (14 3/4") DE DIAMETRO NOMINAL, EN MATERIAL CLASE I, DE 0.00 A 100.0 MTS.	METRO	20	\$ 284.74	5,694.80
13	AMPLIACION DE AGUJERO DE 30.48 CM (12 1/4") A 37.46 CM (14 3/4") DE DIAMETRO NOMINAL, EN MATERIAL CLASE II, DE 0.00 A 100.0 MTS.	METRO	30	\$ 352.41	10,572.30
14	AMPLIACION DE AGUJERO DE 30.48 CM (12 1/4") A 37.46 CM (14 3/4") DE DIAMETRO NOMINAL, EN MATERIAL CLASE III, DE 0.00 A 100.0 MTS.	METRO	10	\$ 495.08	4,950.80
SUMINISTROS Y COLOCACION					
15	COLOCACIÓN DE TUBERÍA PARA ADEME DE 8" DE DIÁMETRO, SOLDANDO LAS JUNTAS CON DOBLE CORDÓN AL ARCO ELÉCTRICO, UTILIZANDO SOLADURA E-7018	METRO	200	\$ 81.77	16,355.00
16	SUMINISTRO DE TUBERÍA DE ACERO LISO PARA ADEME DE 8" DIAMETRO PARED DE 1/4", CLASE ASTM-A53, GRADO "B", CON COSTURA LONGITUDINAL, PUESTA EN OBRA	METRO	110	\$ 526.52	57,916.80

Anexo 2

17	SUMINISTRO DE TUBERÍA DE ACERO PARA ADEME DE 12" DIAMETRO PARED DE 1/4", ABERTURA 3 MM AREA DE "INFILTRACIÓN 1100 CM2/M. TIPO CANASTILLA. CLASE ASTM-A53. GRADO "B", PUESTA EN OBRA	METRO	90	\$ 689.42	62,047.85
18	SUMINISTRO DE BENTONITA Y PREPARACION DE LODOS DE PERFORACION, INCLUYE: MANIOBRAS DE CARGA Y DESCARGA, DESPERDICIOS Y ACARREOS AL SITIO DE LA OBRA	M3	400	\$ 100.29	40,117.04
19	SUMINISTRO DE AGUA LIMPIA EN CAMION TANQUE, INCLUYE : ACARREO, VACIADO Y DESPERDICIO AL SITIO DE LA OBRA	M3	300	\$ 31.34	9,403.26
20	SUMINISTRO Y COLOCACION DE GRAVA DE CANTO RODADO DE 1/4" (ARENA SÍLICA) LAVADA Y CRIBADA PARA FILTRO DE POZO DE 1/8 A 1/4 " DE DIÁMETRO, COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE 2.5, PUESTA EN OBRA	M3	20	\$ 564.72	11,294.31
21	SUMINISTRO Y APLICACIÓN DE DISPERSOR DE ARCILLAS PARA LIMPIEZA DE POZO, INCLUYE: REPOSO DE 24 HORAS	LTS	200	\$ 32.07	6,414.42
22	CEMENTACIÓN ENTRE LA PARTE ANULAR DE LA PERFORACIÓN Y EL TUBO DE CONTRADEME	MT3	0.5	\$ 2,555.39	1,277.70
TRABAJOS COMPLEMENTARIOS					
23	REGISTRO ELECTRICO PARA OBTENER CURVAS: RESISTIVIDAD NORMAL CORTA, RESISTIVIDAD NORMAL LARGA RESISTIVIDAD LATERAL, POTENCIAL NATURAL, RAYOS GAMMA NATURALES, RESISTENCIA, RESISTIVIDAD DE FLUIDO, TEMPERATURA, GRADIENTE DE TEMPERATURA, INCLUYE INFORME Y RECOMENDACIONES	LOTE	1	\$ 10,661.81	10,661.81
24	EQUIPO DE BOMBEO PARA DESARROLLO Y AFORO DE POZO PARA EXTRAER UN CAUDAL DE 16 LPS CON UNA LONGITUD DE COLUMNA DE 180 MTS, INCLUYE: INSTALACIÓN, DESMANTELAMIENTO Y 72 HORAS DE BOMBEO, DESARROLLO 48 HORAS Y AFORO 24 HORAS. PARA OBTENER EL VALOR DE LA TRANSMISIVIDAD.	LOTE	1	\$ 46,763.17	46,763.17
25	VÍDEO DE POZO	LOTE	1	\$ 4,500.00	4,500.00
26	CONSTRUCCIÓN DE BROCAL DE POZO, INCLUYENDO CEMENTO, GRAVA Y VARILLA	LOTE	1	\$ 1,850.00	1,850.00
27	NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA DE BROCAL CON POSICIONADOR SATELITAL	LOTE	1	\$ 1,550.00	1,550.00
28	TAPA DE ACERO CON ROSCA	PIEZA	1	\$ 350.00	350.00
				SUBTOTAL	481,968.86

Anexo 3

PROPUESTA DE CONSTRUCCIÓN DE PIEZÓMETROS

