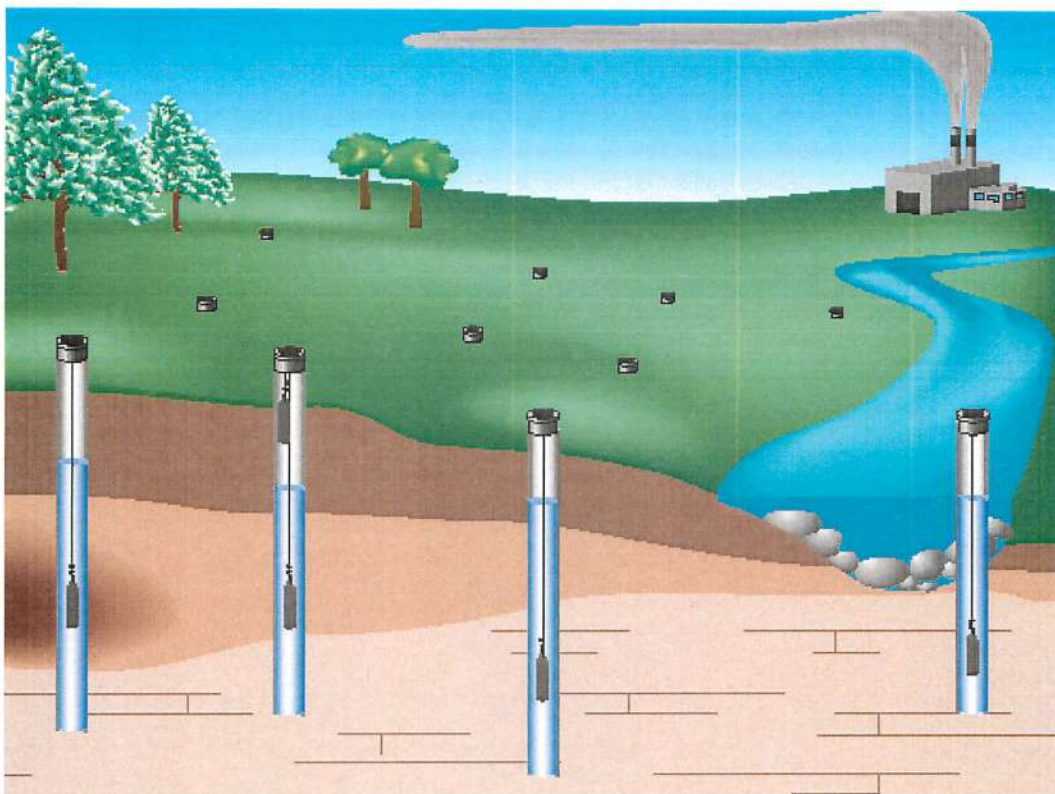


## SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

### Gerencia de Aguas Subterráneas

# Manual de monitoreo piezométrico de acuíferos



México, D.F. septiembre de 2015

## Manual de monitoreo piezométrico de acuíferos

ELABORÓ



EL SUBGERENTE DE EXPLORACIÓN Y  
MONITOREO GEOHIDROLÓGICO  
ING. PEDRO R. SOTO NAVARRO

APROBÓ



EL GERENTE DE AGUAS  
SUBTERRÁNEAS  
ING. RUBÉN CHÁVEZ GUILLÉN

AUTORIZÓ



EL SUBDIRECTOR GENERAL TÉCNICO  
DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER  
YAMANAKA

Manual de monitoreo fitosanitario de cultivos

AVANCE

LABOR

El presente manual  
sustentado en  
las investigaciones  
realizadas en el  
campo

El presente manual  
sustentado en  
las investigaciones  
realizadas en el  
campo

EL DIRECTOR GENERAL TÉCNICO  
DEL INSTITUTO NACIONAL  
DE INVESTIGACIONES  
AGROPECUARIAS Y PESQUERAS  
CONAGU

## ÍNDICE

*Página*

### INTRODUCCION

1	CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.....	4
1.1	Distribución del agua en el subsuelo .....	4
1.2	Capas confinantes y acuíferos .....	4
1.3	Determinación de los niveles de agua subterránea .....	7
1.4	Profundidad y elevación del nivel estático .....	8
1.5	Dispositivos para la medición de niveles de agua subterránea .....	11
1.6	Carga hidráulica y gradiente hidráulico.....	15
1.7	Profundidad del nivel en pozos con presencia de hidrocarburos.....	18
1.8	Ley de Darcy.....	20
1.9	Dirección del flujo subterráneo .....	23
1.10	Trazo de las curvas de nivel.....	24
1.11	Errores en la elaboración e interpretación de mapas piezométricos .....	27
1.12	Mapas de elevación del nivel estático .....	35
1.13	Redes de flujo.....	38
2	FLUCTUACIONES DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	39
2.1	Variación del nivel estático .....	41
2.2	Tipos de oscilaciones piezométricas .....	41
2.3	Oscilaciones asociadas a cambios de presión atmosférica.....	41
2.4	Oscilaciones asociadas a cambios de nivel de agua superficial.....	46
2.5	Oscilaciones asociadas a la evapotranspiración .....	49
2.6	Variaciones del nivel piezométrico por extracción de agua .....	50
2.7	Variación de los niveles piezométricos debido a la recarga .....	51
2.8	Oscilaciones de los niveles piezométricos en acuíferos con conexión hidráulica con cuerpos de agua superficial.....	55
2.9	Fluctuaciones de gran periodo de niveles piezométricos. ....	55
3	MEDICIONES DEL NIVEL DE LARGO PLAZO. ELEMENTOS DE UN PROGRAMA DE MONITOREO .....	57
3.1	Objetivos de las redes .....	57



3.2	Selección de pozos de observación .....	59
3.3	Distribución de los puntos de medición .....	62
4	FRECUENCIA DE MEDICION .....	65
4.1	El uso e importancia de datos de niveles de agua.....	67
4.2	Reporte de datos piezométricos .....	69
5	TRANSDUCTORES DE PRESIÓN .....	71
6	BIBLIOGRAFÍA .....	83

**INDICE DE FIGURAS**

	<i>Página</i>
1 Representación de la extracción de agua mediante un pozo en un acuífero libre.....	5
2 Distribución de niveles “colgados” de agua subterránea con respecto al nivel regional de un acuífero libre.....	6
3 Representación de la extracción de agua mediante un pozo en un acuífero libre.....	7
4 Dispositivos para medir el nivel del agua subterránea. (McWhorter and Sunada, 1976).....	9
5 El nivel del agua en cada pozo indica la carga hidráulica que existe en el intervalo donde se mide ésta (EPA, 1976).....	10
6 Medición del nivel estático en un pozo mediante cinta métrica (Roscoe, 2002).....	12
7 Medición del nivel estático en un pozo a través de transductores de presión o “datalogger” (Roscoe, 2002).....	13
8 Medición del nivel estático en un pozo mediante sonda eléctrica (Roscoe, 2002).....	14
9 Sección transversal mostrando el nivel estático registrado en diversos piezómetros terminados a diferente profundidad (Mills et al., 1985).....	16
10 Registro de la profundidad del nivel estático en pozos y determinación de la dirección del flujo subterráneo en sección. Sección esquemática sin escala.....	17
11 Medición del nivel estático en un pozo con presencia de hidrocarburos (producto libre). (Cortesía de II-UNAM, 2009).....	18
12 Variación del nivel estático y del espesor de producto libre en un pozo. (Cortesía II-UNAM, 2009).....	20
13 Representación gráfica de la Ley de Darcy en Laboratorio.....	22
14 Representación gráfica de la Ley de Darcy en condiciones de campo.....	23
15 La dirección del flujo subterráneo se determina a través de la medición del nivel estático en al menos tres pozos con la misma profundidad. (Health and Trainer, 1983).....	24
16 Mapa de elevación del nivel estático en la parte norte del acuífero de la Península de Yucatán. ( CNA, 2002).....	26
17 Mapa de elevación del nivel estático en los acuíferos del Estado de Guanajuato.....	27
18 Efecto de la medición de los niveles en áreas de recarga y descarga: a) Configuración incorrecta considera niveles en pozos que no son	

	representativos de la superficie piezométrica. b) Configuración correcta después de eliminar mediciones de nivel no re .....	29
19	Error en la configuración de mapas de elevación del niveles debida a la presencia de depresiones topográficas ocupadas por cuerpos de agua superficial (Davis and DeWiest, 1966).....	30
20	.....	31
21	.....	32
22	Error en la configuración de mapas de elevación por presencia de zonas de alta conductividad originadas por una falla geológica ( Davis and DeWiest, 1966).....	33
23	Error en la determinación de la superficie piezométrica debido a la combinación de niveles estáticos de dos acuíferos confinados con diferente carga hidráulica. (Davis and De Wiest, 1966).....	34
24	Mapa de elevación del nivel estático en el acuífero de Santo Domingo, BCS .....	37
25	Relación entre presión atmosférica y nivel piezométrico en un acuífero costero. El gráfico de variación de la presión atmosférica se ha dibujado invertido y multiplicado por la eficiencia barométrica (EB = 0,75) para mostrar así el paralelismo. (Modifica de Robinson, 1939).....	43
26	Variación de la presión atmosférica y elevación del nivel freático en un acuífero costero, durante Octubre de 1973 en Devonshire Post Office, Bermuda. Note que la relación de variación es inversa, un incremento en presión está asociado con un descenso del nivel freático (Vacher, 1978) .....	44
27	Hidrograma del pozo Margaux, cerca de Burdeos y barograma. Se muestran las fluctuaciones de período corto y período largo. (Según Besbes, 1969).....	46
28	Oscilaciones periódicas en un acuífero inducidas por las oscilaciones de marea en el estuario de un río. Se observa la disminución de la amplitud con la distancia, así como el retraso que se produce en la onda. En el esquema anexo se aclara el fenómeno mostrando el nivel piezométrico en un instante dado .....	48
29	Oscilaciones piezométricas en el acuífero confinado del delta del río Llobregat a 30 m de la costa, en marea viva y en marea muerta. Se calcula el período medio y la amplitud media. (Tomado de los archivos de la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental).....	49
30	Relación entre la elevación del nivel estático vs el volumen de extracción en un acuífero del Estado de Sonora .....	51
31	Evolución de la elevación del nivel estático durante la ocurrencia de lluvias ciclónicas en la Barra de Teacapan, Sinaloa.....	53
32	Variación de la elevación del NE vs la precipitación en la barra de Teacapan, Sinaloa.....	54

33	Relación entre la precipitación derivada de lluvias ciclónicas vs la elevación del nivel estático en el acuífero de San José del Cabo, BCS .....	56
34	Selección de la frecuencia de medición en función de las características hidrogeológicas de cada acuífero. (USGS, 2002); <b>Error! Marcador no definido</b>	
35	Hidrógrafos de pozos ubicados en el acuífero del valle de Aguascalientes mostrando la evolución del nivel estático de 1970-2000 .....	70
36	Información de la terminación de un pozo seleccionado para la instalación de un transductor .....	74

**INDICE DE TABLAS**

	<i><b>Pagina</b></i>
1 Técnicas de medición del nivel de agua subterránea .....	11
2 Profundidad real del nivel estático en pozo con presencia de producto libre .....	19
3 Resume las condiciones que generan la fluctuación del agua subterránea .....	40
4 Objetivos de las redes de medición .....	59
5 .....	68
6 Datos extraídos del sensor .....	80

## **INTRODUCCIÓN**

El monitoreo de los niveles piezométricos es una actividad esencial para la administración y conservación del agua subterránea. En México, las mediciones de niveles iniciaron en la década de los 60's, principalmente en aquellos acuíferos de gran importancia para el abastecimiento de agua potable y el desarrollo agrícola. En los años 70's, debido a restricciones económicas los recorridos piezométricos disminuyeron, lo que motivó que éstos se realizaran en periodos más largos y en casos más críticos se suspendieran temporalmente.

A partir de la creación del Programa de Modernización del Manejo del Agua (PROMMA) en 1995, la Comisión Nacional de Agua (CNA) a través de la Gerencia de Aguas Subterráneas, inició una nueva etapa de reactivación y actualización de las redes de monitoreo. En una primera etapa se incluyeron 144 acuíferos (de un total de 654 clasificados) para su reactivación, considerando aquellos de mayor importancia en extracción para el país. El 90% de los acuíferos reactivados se clasifican como sobre-explotados.

La reactivación de las redes ha permitido actualizar, clasificar y almacenar un volumen considerable de información, misma que se utiliza entre otros, para determinar la disponibilidad del agua subterránea en los acuíferos; evaluar los efectos de sobreexplotación, y apoyar los programas para el manejo sostenible del recurso hídrico. Asimismo, el monitoreo aporta los siguientes beneficios técnicos siguientes:

Determinar el nivel de agua de los acuíferos.

Aportar datos técnicos para estimar la disponibilidad de agua subterránea.

Registrar la evolución de los niveles con fines preventivos para evitar la explotación intensiva de los acuíferos.



Comunicar a los usuarios y a la sociedad en general los efectos que genera la explotación no controlada del agua subterránea.

Determinar la evolución que presentan los niveles de agua como resultado de esfuerzos inducidos por las condiciones de recarga y extracción en los acuíferos.

La Subdirección General Técnica, a través de la Gerencia de Aguas Subterráneas, tiene dentro de sus atribuciones el diseñar, operar y reactivar las redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos con objeto de aportar información básica para el conocimiento de los acuíferos, y en particular, para el cálculo de la disponibilidad del agua subterránea. Para ello, se realizan estudios y recorridos piezométricos en más de 9,600 pozos de monitoreo distribuidos en 252 acuíferos del territorio nacional.

Debido a la gran diversidad de ambientes geológicos en los que se localizan los acuíferos y pozos de monitoreo, es necesario contar con un manual técnico que permita a los especialistas en agua subterránea y a los usuarios en general, conocer y aplicar las técnicas para recopilar, analizar e interpretar los datos piezométricos que se obtienen en campo. Asimismo, dado el avance tecnológico en el almacenamiento automático de información, se requiere contar con guías para instrumentar los acuíferos a través de la instalación de sondas automáticas.

Actualmente, la Gerencia de Aguas Subterráneas cuenta con lineamientos y términos de referencia para apoyar la recopilación de datos piezométricos y su interpretación. Esta información requiere integrarse en un documento accesible para los especialistas en el tema y para los diversos usuarios de las aguas subterráneas. Por lo anterior, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través de la Gerencia de Aguas Subterráneas, elaboró el presente manual. Éste tiene como objetivo explicar de forma



práctica y accesible las técnicas para la recolección y análisis de datos piezométricos. Por ello, se han omitido, en lo posible, formulaciones matemáticas y se optó por un formato con gráficas, tablas y figuras de interpretación sencilla, apoyados de ejemplos y condiciones hidrogeológicas presentes en el país.

## **1 CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA**

La dificultad para estudiar el comportamiento del agua subterránea radica en que ésta se encuentra por debajo de la superficie del terreno y no se puede observar directamente, en comparación con el agua superficial. Bajo esta limitación podemos decir que el agua subterránea "*no se puede ver, pero sí se puede medir*", y es a partir de los principios hidrológicos que gobiernan su ocurrencia, movimiento y calidad, que se pueden generar predicciones sobre su comportamiento.

### **1.1 Distribución del agua en el subsuelo**

El agua bajo la superficie del terreno se localiza en dos regiones: i) la zona no saturada y ii) la zona saturada. En la zona no saturada (zona vadosa), la mayor parte de los espacios entre los poros de una roca están ocupados por aire y agua que se presentan en forma de humedad y en la franja capilar que se extiende por el límite superior de la zona saturada. En esta zona, el agua se encuentra a una presión hidráulica negativa, es decir, menor a la atmosférica.

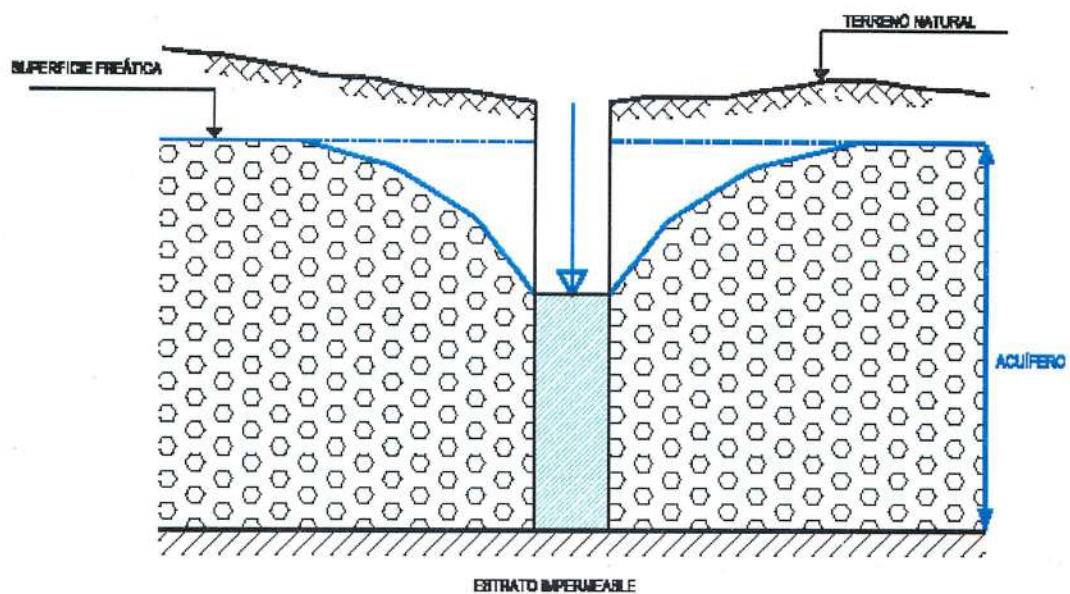
En la zona saturada el agua ocupa completamente los poros de la roca y se encuentra a una presión mayor o igual que la atmosférica.

### **1.2 Capas confinantes y acuíferos**

Las capas geológicas en el subsuelo pueden dar origen, desde el punto de vista hidrogeológico, a unidades confinantes o acuíferos (Figura 1). Una unidad confinante se caracteriza por su baja permeabilidad, la cual limita el flujo subterráneo a través de ésta. Un buen ejemplo son las capas de materiales como arcillas y limos. Las capas

confinantes llegan a constituir acuitardos, son porosas, y con capacidad de almacenar importantes volúmenes de agua, pero con muy baja transmisividad.

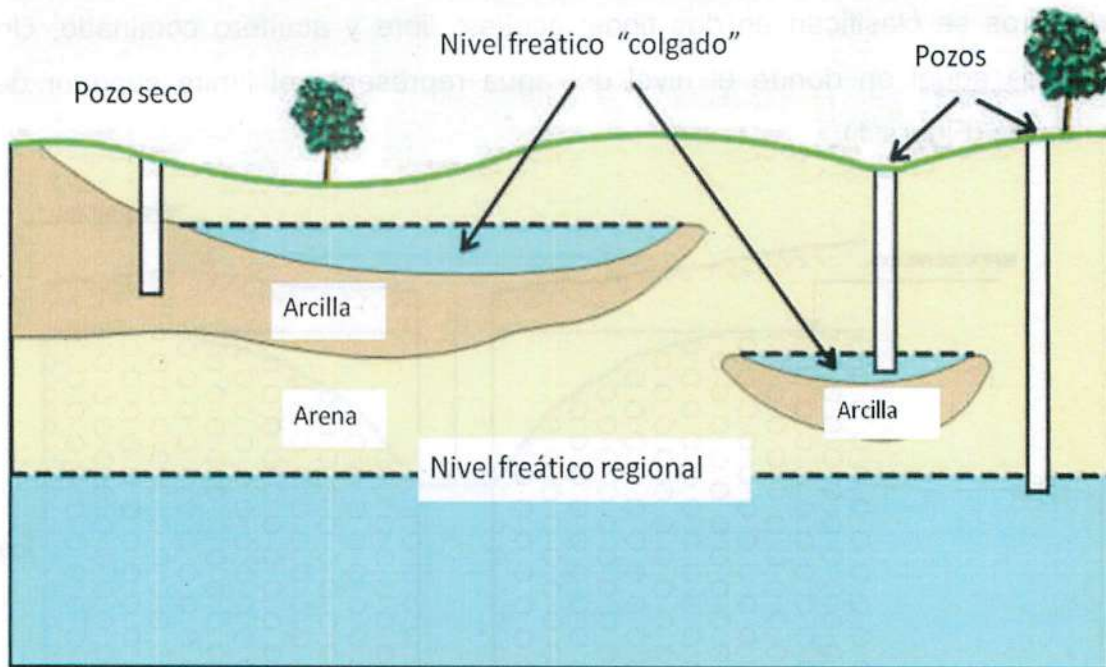
Por su parte, un acuífero es una formación geológica con capacidad para almacenar y transmitir flujo subterráneo en cantidades importantes para su aprovechamiento. Los acuíferos se clasifican en dos tipos: acuífero libre y acuífero confinado. Un acuífero libre es aquel en donde el nivel del agua representa el límite superior de la zona saturada (Figura 1).



**Figura 1** Representación de la extracción de agua mediante un pozo en un acuífero libre

En ocasiones, el nivel en los acuíferos libres se puede presentar como del “tipo colgado” o regional. El nivel “colgado” es aquel que descansa sobre una capa de baja permeabilidad la cual a su vez, se ubica dentro de la zona no saturada (Figura 2). En los acuíferos regionales el agua se desplaza hacia la zona saturada hasta alcanzar el nivel regional del acuífero. La mayor parte del agua subterránea se integra al nivel

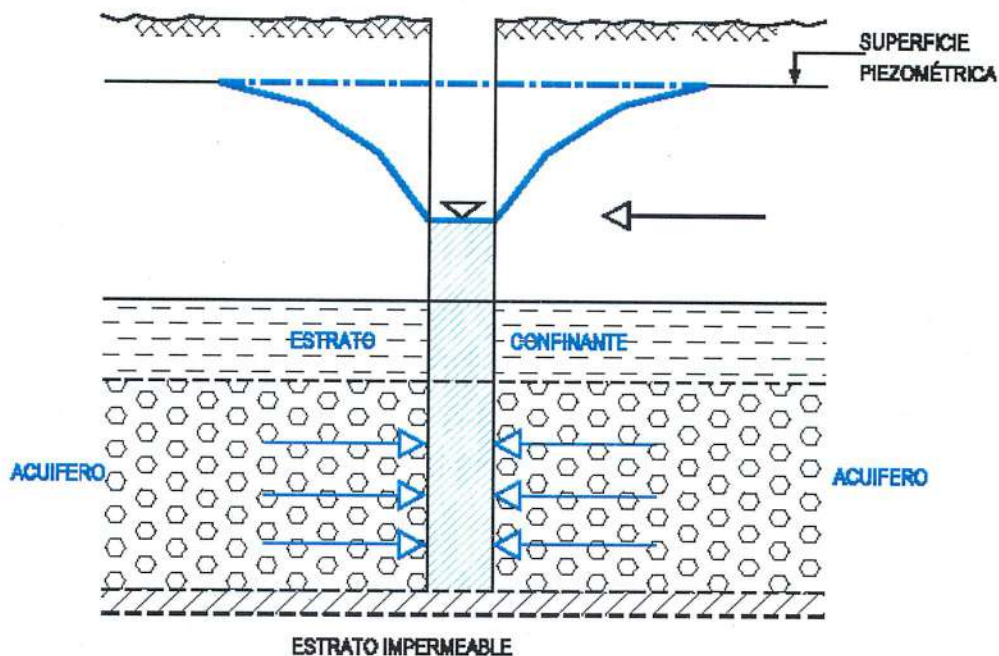
regional, aunque en algunas ocasiones, se transporte a través de diferentes capas antes de alcanzar este nivel final.



**Figura 2** Distribución de niveles “colgados” de agua subterránea con respecto al nivel regional de un acuífero libre.

Los acuíferos confinados están limitados en su parte inferior y superior por una capa confinante. Debido a esta condición, el agua posee suficiente presión para elevarse por arriba de la base de dicha capa en caso de que se realizara una perforación (*Figura 2*). En estos casos, cuando el agua posee suficiente carga para elevarse por arriba de la superficie del terreno, da origen a pozos denominados “brotantes” o artesianos.





**Figura 3** Representación de la extracción de agua mediante un pozo en un acuífero libre

### 1.3 Determinación de los niveles de agua subterránea

La única forma para medir el nivel en un acuífero es mediante una perforación que permita acceso directo desde la superficie del terreno al agua subterránea. En general, las mediciones del nivel se realizan a través de pozos existentes, excavaciones del terreno que alcancen el nivel del agua y piezómetros construidos exclusivamente para este propósito. La construcción de piezométricos es costosa, y en general debe reducirse a un mínimo indispensable.

En acuíferos alojados en material no consolidado y a profundidad somera, los piezómetros se instalan mediante penetración directa en forma rápida y a bajo costo. Sin embargo, en acuíferos profundos o en rocas consolidadas se precisa de maquinaria con mayor capacidad de penetración y por ende costo. Un piezómetro se dice que es

puntual cuando registra el nivel en un punto específico, es decir, cuando sólo está en comunicación con el acuífero en una longitud muy corta. Por el contrario, si el piezómetro está en comunicación con el acuífero en toda su longitud, se obtiene el nivel medio representativo del espesor atravesado. En este caso, los piezómetros contruidos con ademe ranurado en todo o gran parte de su ademe, registran valores promedio de nivel, ya que dentro de éstos se establece una circulación de agua que va de las zonas de mayor a las de menor carga. Para determinar el nivel del agua subterránea se debe aprovechar cualquier presencia de ésta, ya sea de origen natural o antropogénico. En el caso de manifestaciones naturales como: manantiales, zonas de inundación, lagunas..., éstas señalan el nivel base si son permanentes. En ocasiones, el registro de los niveles da origen a errores de interpretación cuando las manifestaciones son resultado de acuíferos colgados. Por lo anterior, se deben seleccionar manantiales de caudal importante, de geología conocida y preferentemente ubicados en zonas de surgencia cercanas a los ríos. La superficie de los arroyos y los cuerpos de agua superficial, tales como lagos, lagunas, y áreas topográficas inundadas, también se consideran como expresiones superficiales del agua subterránea. El nivel en un acuífero se puede establecer aprovechando la existencia o construcción de obras civiles como: pozos de extracción, galerías o canales, que están en comunicación directa con el agua subterránea.

#### **1.4 Profundidad y elevación del nivel estático**

La medición apropiada del nivel del agua es un factor fundamental para estimar la dirección y la magnitud del gradiente hidráulico. La elevación del nivel del agua se determina a partir de la profundidad de ésta en pozos de observación, pozos de explotación o piezómetros (Figura 4). En cada una de estas obras, el nivel puede ser diferente, por ello la medición del nivel en pozos con diferente profundidad es probable que refleje el nivel de uno o más acuíferos por los que atraviesa. Los piezómetros son dispositivos especialmente contruidos para medir la carga hidráulica a una



profundidad. Su construcción se realiza generalmente en diámetros pequeños. Los piezómetros tradicionalmente son utilizados en trabajos de geotecnia para medir la carga hidráulica en áreas cercanas de presas o embalses. Por su parte, los pozos son el principal dispositivo para medir los niveles de agua. Difieren de los piezómetros ya que son diseñados para extraer volúmenes explotables de agua, por lo que generalmente presentan un diámetro mayor lo que permite la instalación de una bomba de extracción.

Las mediciones del agua subterránea se realizan generalmente a través de piezómetros o pozos. La mayoría de las redes de monitoreo están compuestas por pozos, ya que éstos permiten la extracción del agua y determinar su calidad.

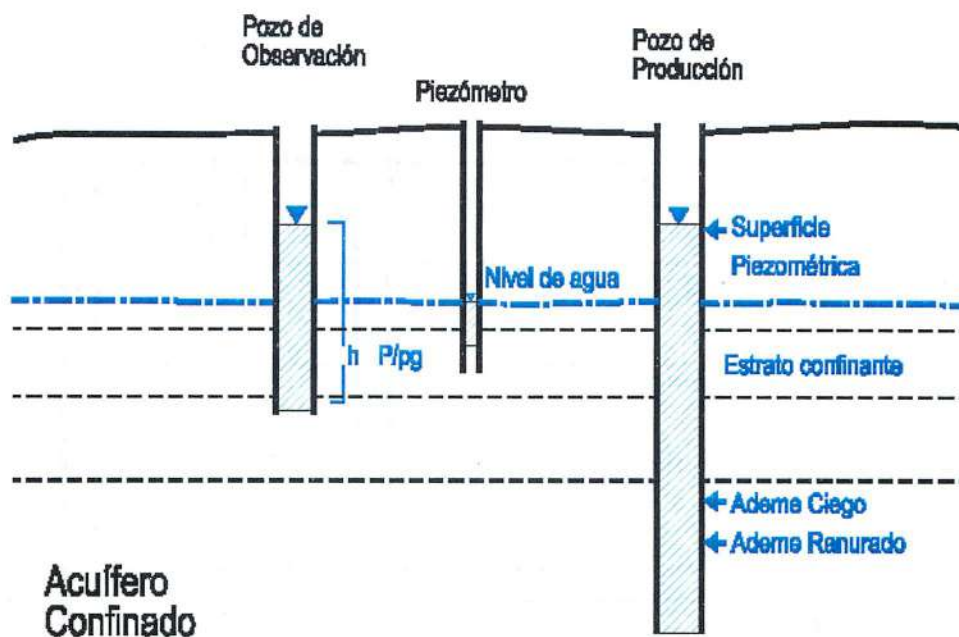


Figura 4 Dispositivos para medir el nivel del agua subterránea. (McWhorter and Sunada, 1976)



La Figura 5 muestra la elevación del nivel en cada pozo perforado a diferente profundidad. Debido a que la carga hidráulica varía con la profundidad, es muy importante considerar su terminación y profundidad total. En cada sitio se establece un nivel estático diferente; sin embargo, el nivel freático del acuífero somero sólo puede ser reconocido como tal en el pozo número 2. Mientras que los pozos número 1, 3 y 5, cortan diversos estratos con ademes ranurados en diferente intervalo, por lo cual, cada uno capta agua de una capa diferente. El nivel del agua en cada pozo refleja la carga hidráulica en el intervalo ranurado de éste. Una condición diferente ocurre en el pozo número 1, el que por su diseño constructivo y el filtro de grava, capta agua de todas las capas atravesadas. En este caso, el nivel del agua representa un promedio de los diferentes niveles por los que atraviesa el pozo.

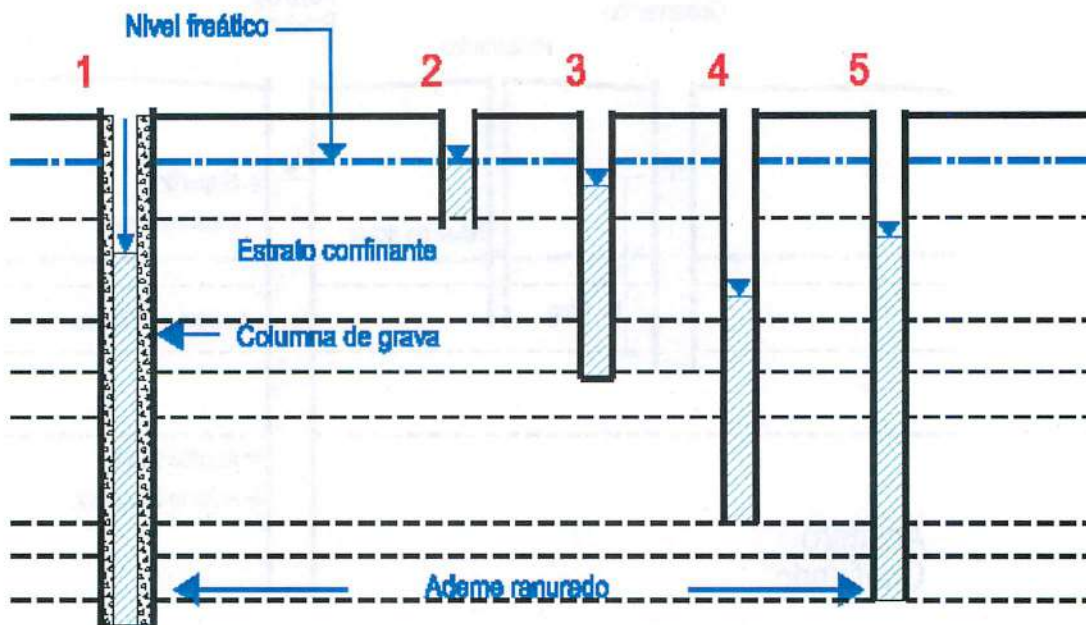


Figura 5 El nivel del agua en cada pozo indica la carga hidráulica que existe en el intervalo donde se mide ésta (EPA, 1976)

## 1.5 Dispositivos para la medición de niveles de agua subterránea

Existen diversos dispositivos para registrar la profundidad del nivel del agua subterránea, los cuales varían de acuerdo al principio básico de medición. Un sólo método de medición no se puede aplicar a todas las condiciones de monitoreo, ya que éstas dependen de las condiciones físicas de cada pozo y de la precisión con que se deseen obtener los resultados. En la práctica, el personal encargado del monitoreo debe estar familiarizado con las diferentes técnicas de medición a fin de aprovechar las ventajas y limitaciones en cada caso. A continuación se listan los dispositivos más utilizados (Tabla 1).

**Tabla 1 Técnicas de medición del nivel de agua subterránea**

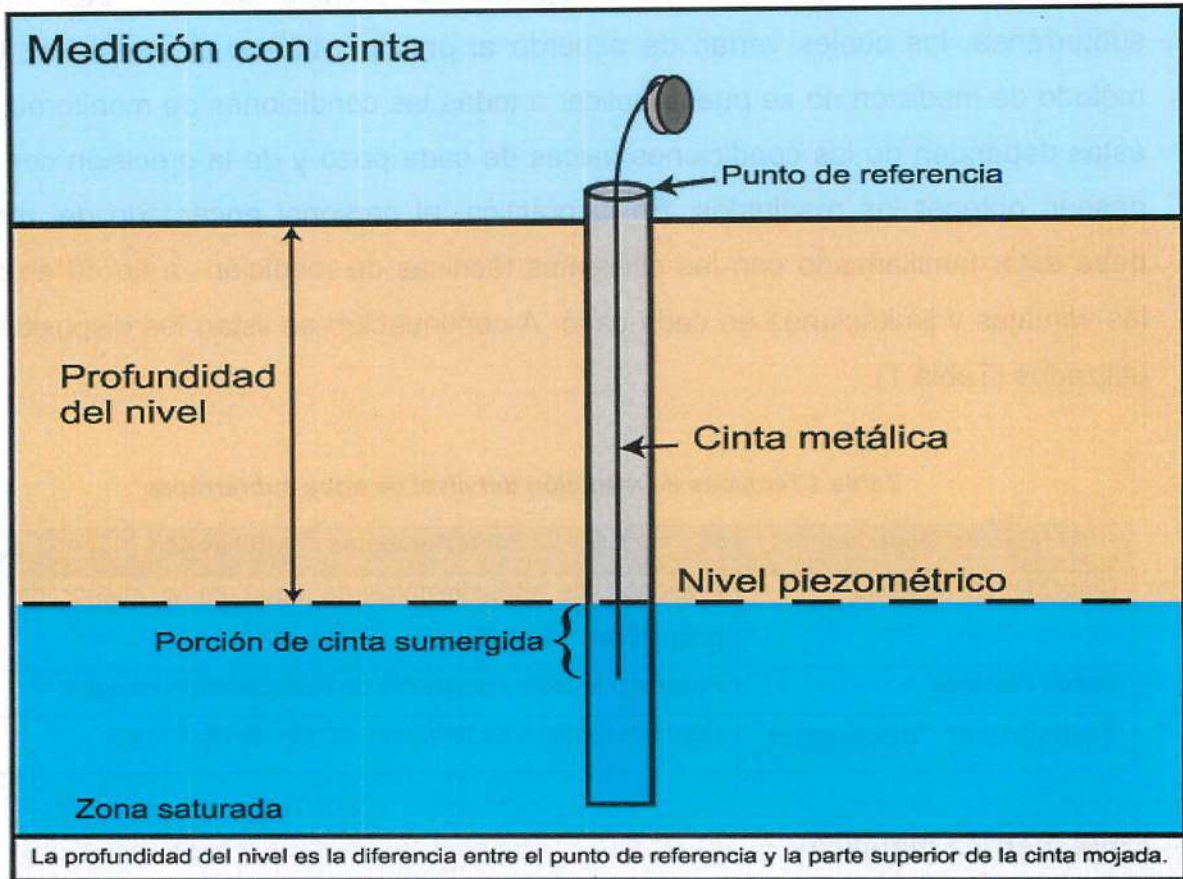
Tipo de Medición	Interferencias / limitaciones
Cinta Métrica Metálica	Presencia de escurrimientos de agua en el interior del pozo/ profundidad del nivel
Sonda Eléctrica	Fallas en el cable / presencia de hidrocarburos en agua.
Transductor "datalogger"	Cambios bruscos de temperatura, deriva electrónica.

### Cinta métrica metálica

La Figura 6 muestra el dispositivo de medición mediante cinta metálica. El equipo necesario para la medición del nivel consiste en una cinta métrica metálica, lápiz de gis y una pesa. El registro del nivel se lleva a cabo restando la distancia de la cinta sumergida, indicada por la ausencia del color de gis, al punto de referencia en superficie o la parte más alta del pozo. Una limitante en el uso de la cinta se presenta cuando la profundidad del agua se desconoce y se requiere marcar con gis una longitud muy grande. Asimismo, la presencia de humedad o goteo dentro de las



paredes del pozo provoca que las marcas en la cinta desaparezcan y generen errores en la medición.



**Figura 6** Medición del nivel estático en un pozo mediante cinta métrica (Roscoe, 2002)

### Transductor o "datalogger"

La técnica consiste en introducir un transductor de presión por debajo del nivel de agua. La carga o columna de agua sobre el mismo, genera una señal eléctrica que se registra en superficie, indicando la presencia de un nivel de agua (Figura 7).

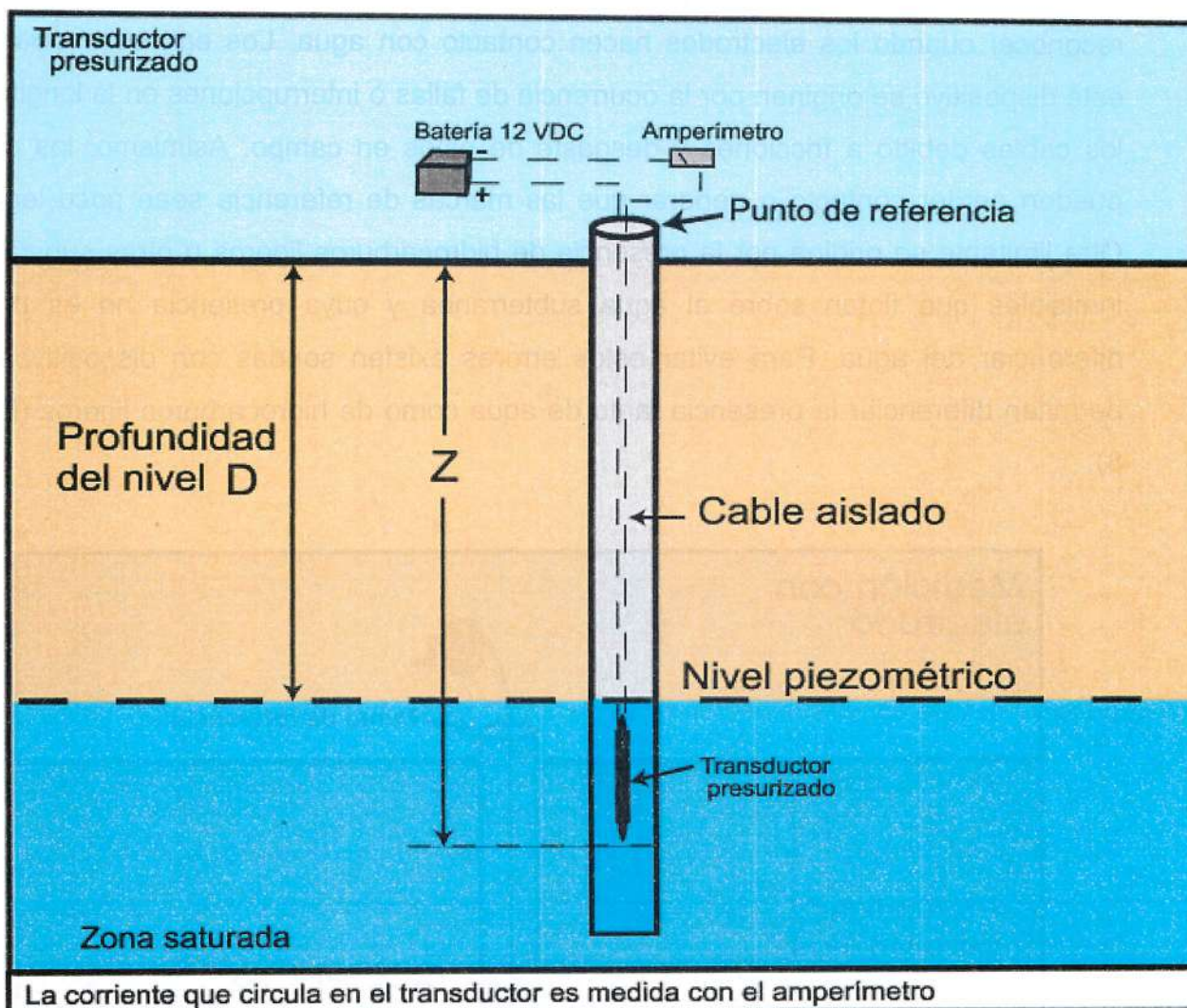


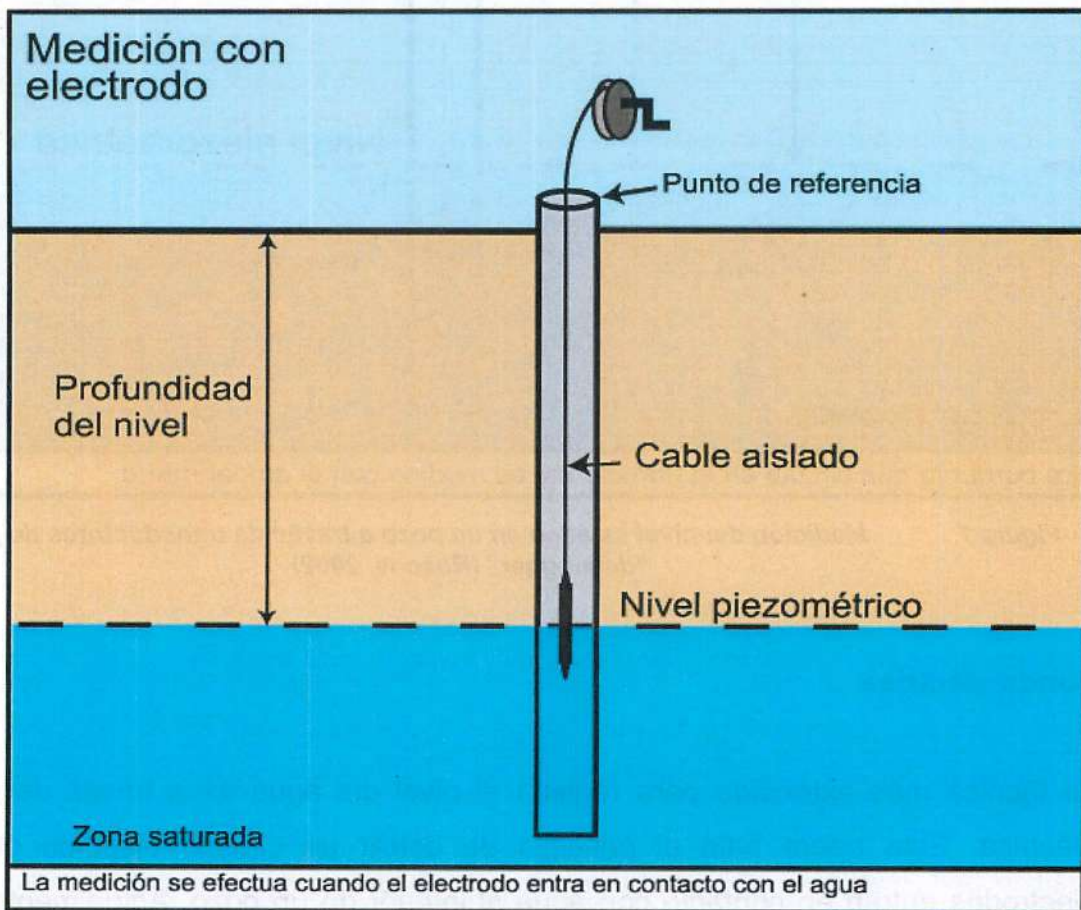
Figura 7 Medición del nivel estático en un pozo a través de transductores de presión o "datalogger" (Roscoe, 2002)

### Sonda eléctrica

La técnica más extendida para registrar el nivel del agua es a través de una sonda eléctrica. Ésta opera bajo el principio de cerrar un circuito eléctrico cuando dos electrodos entran en contacto con agua al interior de un pozo. Actualmente, este tipo de sondas cuentan con un sistema de alerta (luz o sonido) mismo que permite



reconocer cuando los electrodos hacen contacto con agua. Los errores asociados a este dispositivo se originan por la ocurrencia de fallas o interrupciones en la longitud de los cables debido a fricciones y desgaste de éstos en campo. Asimismo, los cables pueden perder contacto o generar que las marcas de referencia sean poco legibles. Otra limitante se origina por la presencia de hidrocarburos ligeros u otras sustancias inmisible que flotan sobre el agua subterránea y cuya presencia no es posible diferenciar del agua. Para evitar estos errores existen sondas con dispositivos que permiten diferenciar la presencia tanto de agua como de hidrocarburos ligeros (Figura 8).



**Figura 8** Medición del nivel estático en un pozo mediante sonda eléctrica (Roscoe, 2002)

## 1.6 Carga hidráulica y gradiente hidráulico

La elevación del nivel estático en un pozo o piezómetro, se expresa comúnmente en metros sobre el nivel medio del mar (msnm) y representa la carga hidráulica total ( $H_t$ ) en el punto de medición, la cual está integrada por una carga de presión ( $h_p$ ) y una carga de elevación ( $h_e$ ), de acuerdo con la siguiente relación:

$$H_t = h_e + h_p$$

Donde:

$H_t$  = Carga hidráulica total (L)

$h_e$  = Carga de elevación (L)

$h_p$  = carga de presión (L)

*Carga de elevación ( $h_e$ ).* Se refiere a la energía potencial que posee el agua subterránea debido a su posición o elevación topográfica, con respecto a un dato de referencia representado por el nivel medio del mar.

*Carga de presión ( $h_p$ ).* Se refiere a la fuerza que ejerce el agua en el punto de medición debido a la altura de la columna de agua sobre el punto. Se hace notar que la medida de la carga de presión se realiza en el interior del pozo o piezómetro y corresponde a la distancia entre la profundidad total del pozo y el nivel superior del agua. También se conoce como columna o tirante de agua.

*Carga hidráulica total ( $H_t$ ).* Se refiere a la suma de la carga de elevación más la carga de presión ( $H_t = h_e + h_p$ ).

Generalmente, por razones económicas, los pozos de monitoreo no se construyen a diferente profundidad en un mismo punto. En su caso, un perfil topográfico es un indicador muy valioso de las áreas de descarga/descarga, ya que en general en superficies topográficamente altas ocurre la recarga, mientras que en las bajas ocurre la descarga. La construcción de una gráfica de profundidad del nivel estático vs profundidad de los pozos, es una herramienta de gran utilidad para indicar si un punto de medición corresponde a un área de recarga o descarga.

En una zona de recarga, la carga de presión decrece con la profundidad, mientras que en una zona de descarga ésta se incrementa. Este fenómeno se ilustra en la Figura 9, donde el nivel del agua en el punto (B) es más bajo que el nivel de la superficie freática. Esto se debe a que el pozo presenta un ademe ranurado en la línea equipotencial más baja que el nivel freático. Por el contrario, los pozos (D) y (E), ubicados en la zona de descarga, registran la carga por arriba de la superficie freática. Los pozos (D) y (E) se manifiestan como pozos artesianos, aún y cuando éstos no atraviesen una capa confinante.

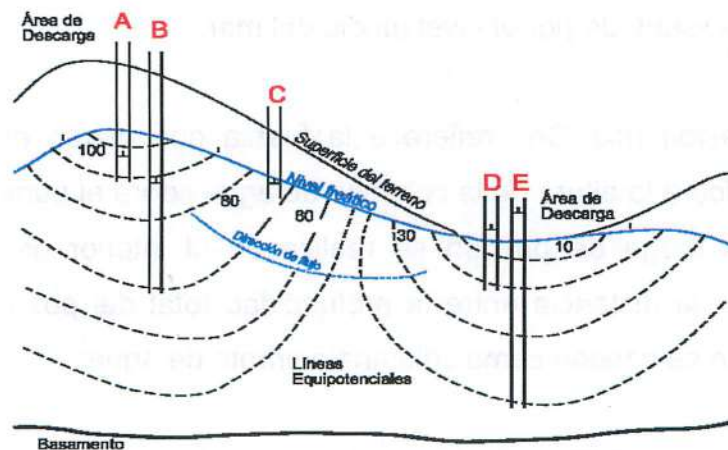


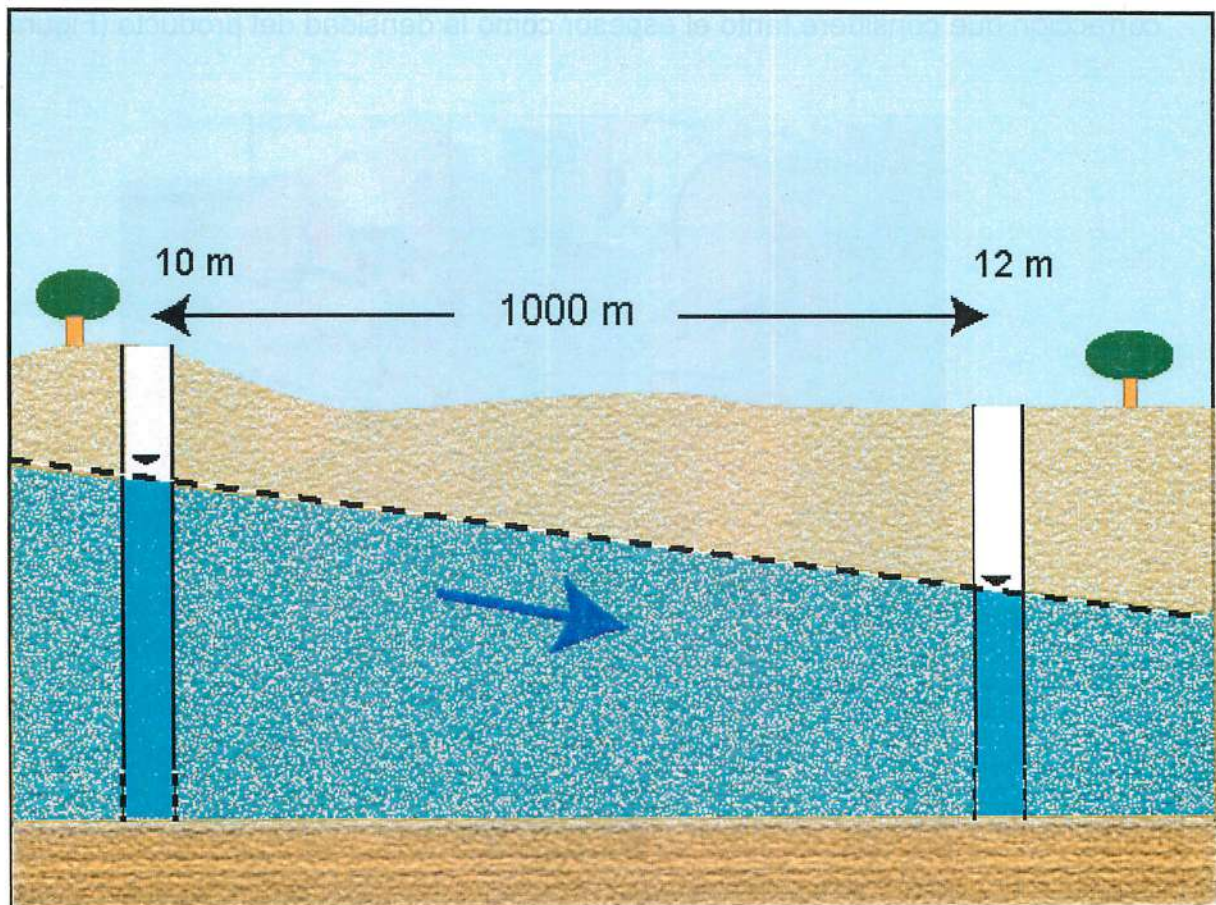
Figura 9 Sección transversal mostrando el nivel estático registrado en diversos piezómetros terminados a diferente profundidad (Mills et al., 1985)



## Gradiente Hidráulico

El gradiente hidráulico es la pendiente del nivel piezométrico y representa el cambio en el nivel del agua por unidad de longitud, a lo largo de la dirección de máxima disminución de carga hidráulica. El gradiente se determina en el campo midiendo la profundidad del nivel del agua en varios puntos. Ejemplo: la Figura 10 muestra el registro de la profundidad del agua en dos pozos separados, 1,000 m entre sí. El gradiente hidráulico entre ambos será:

$$dh/dx (i) = (12 \text{ m} - 10 \text{ m}) / 1,000 \text{ m} = 2 \text{ m} / 1000 \text{ m} = 0.002$$



**Figura 10** Registro de la profundidad del nivel estático en pozos y determinación de la dirección del flujo subterráneo en sección. Sección esquemática sin escala



## 1.7 Profundidad del nivel en pozos con presencia de hidrocarburos

En algunos pozos se llega a registrar la presencia de hidrocarburos ligeros, menos densos que el agua, conocidos como producto libre. En zonas cercanas a éstos se han registrado derrames o fugas de hidrocarburo ligero conocido por sus siglas en inglés como LNAPL's. Cuando en los pozos de monitoreo, además del agua subterránea también se registra la presencia de otro fluido con propiedades fisicoquímicas diferentes a las del agua, la medición del nivel estático no representa la posición real de la carga hidráulica (H). En este caso, a las mediciones del nivel se les debe aplicar una corrección que considere tanto el espesor como la densidad del producto (Figura 11).



**Figura 11** *Medición del nivel estático en un pozo con presencia de hidrocarburos (producto libre). (Cortesía de II-UNAM. 2009)*

La corrección se aplica mediante la siguiente relación:

$$H_c = H_m - ( H_o * (\rho_o / \rho_w) ) \text{ donde :}$$

Donde:

$H_c$ = Profundidad de carga Hidráulica corregida (m);

$H_m$ = Profundidad de la interface hidrocarburo libre / agua (m);

$H_o$ = Espesor del la capa de hidrocarburo (m);

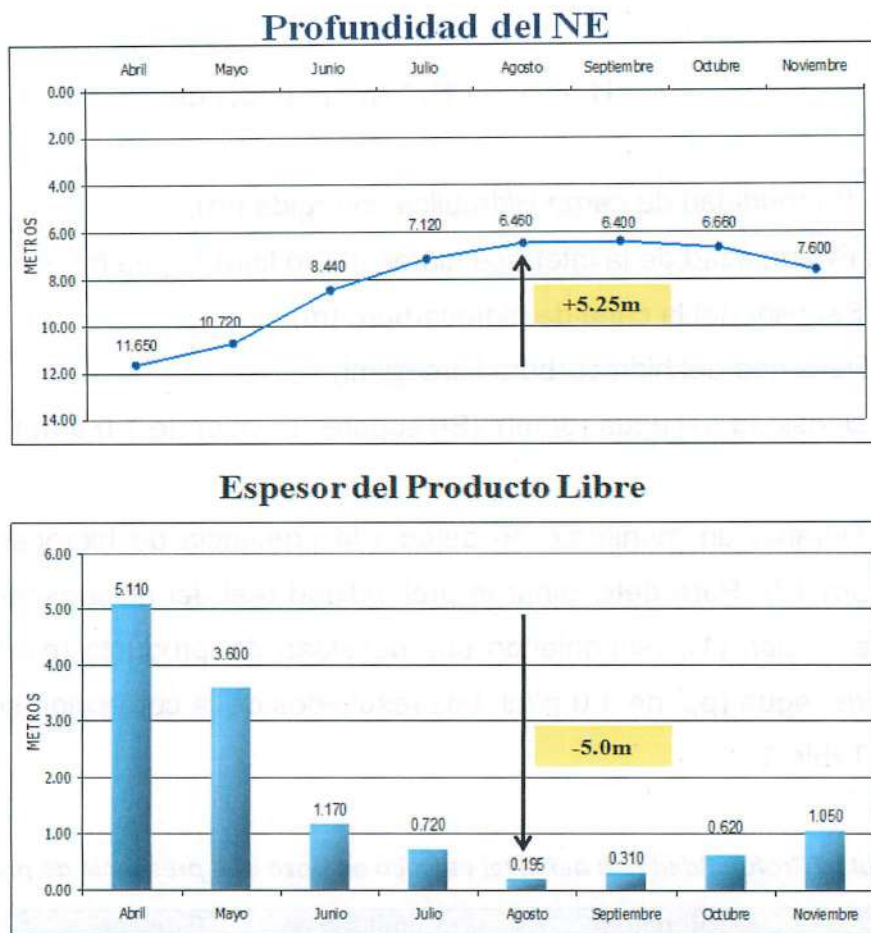
$\rho_o$ = Densidad del hidrocarburo libre (g/ml); y

$\rho_w$ = Densidad del agua (g/ ml). (Se supone un valor de 1.0 g/ml).

Ejemplo: Durante un monitoreo se detectó la presencia de hidrocarburo ligero en el pozo (Figura 12). Para determinar la profundidad real del nivel estático en el pozo se aplicó la ecuación (1), suponiendo una densidad del producto ( $\rho_o$ ) de 0.87 g/ml y la densidad del agua ( $\rho_w$ ) de 1.0 g/ml. Los resultados de la corrección se presentan en la siguiente Tabla 2.

**Tabla 2 Profundidad real del nivel estático en pozo con presencia de producto libre**

No. de Pozo	Profundidad del Producto Libre (m)	Profundidad del Nivel Estático (m)	Espesor del Producto Libre (m)	Profundidad Real del Nivel Estático (m)
MT-61	8.643	10.39	1.747	8.84



**Figura 12** Variación del nivel estático y del espesor de producto libre en un pozo. (Cortesía II-UNAM, 2009)

### 1.8 Ley de Darcy

La ley de Darcy es el principio básico que rige el movimiento de las aguas subterráneas. Esta se aplica para calcular el volumen de flujo que atraviesa determinada área en el acuífero y se expresa como:

$$Q = A q = A k i$$

Donde:

$Q$  = Caudal ( $L^3/T$ );

$A$  = Área transversal a través de la cual fluye el agua ( $L^2$ );

$K$  = Conductividad Hidráulica ( $L/T$ );

$i$  = Gradiente Hidráulico ( $L/L$ );

$q$  = Velocidad de Darcy ( $L/T$ ).

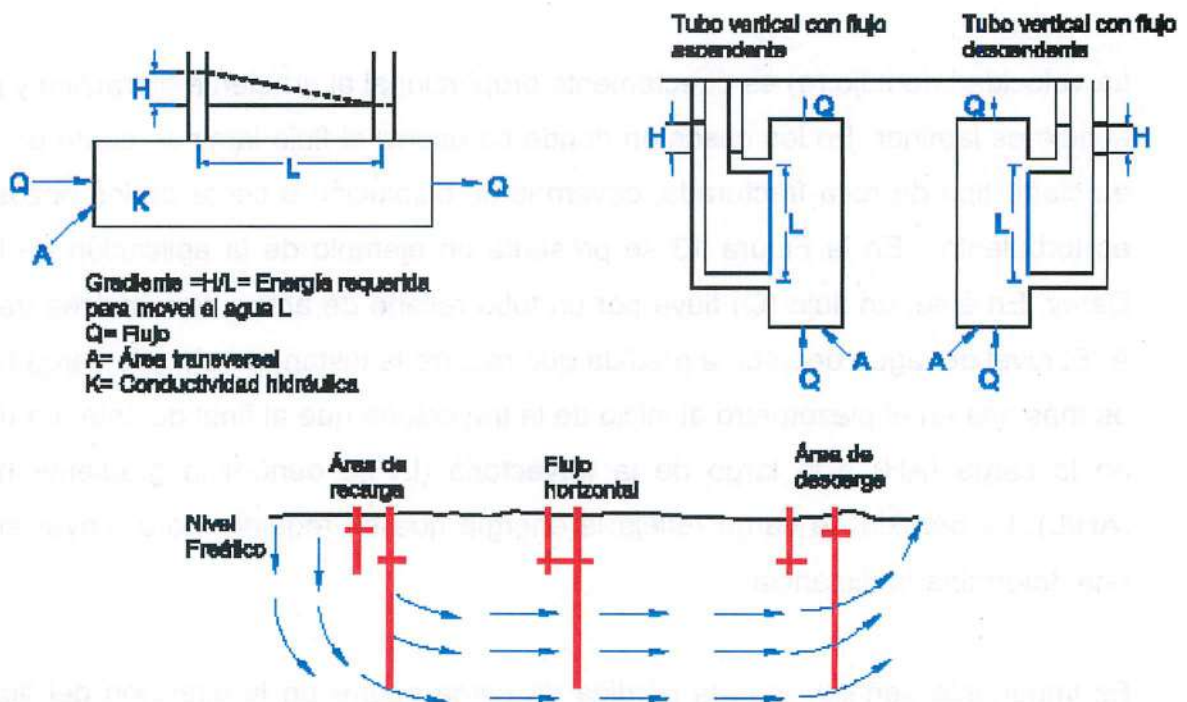
La velocidad de flujo ( $q$ ) es directamente proporcional al gradiente hidráulico y por tanto el flujo es laminar. En los casos en donde no ocurre el flujo laminar, como por ejemplo en cierto tipo de roca fracturada, cavernas de disolución o cerca de los pozos, el flujo es turbulento. En la Figura 13 se presenta un ejemplo de la aplicación de la ley de Darcy. En éste, un flujo ( $Q$ ) fluye por un tubo relleno de arena con un área transversal  $A$ . El nivel del agua decrece a medida que recorre la distancia ( $L$ ), y la carga hidráulica es más alta en el piezómetro al inicio de la trayectoria que al final de ésta. La diferencia en la carga ( $AH$ ) a lo largo de la trayectoria ( $L$ ) se denomina gradiente hidráulico ( $AH/L$ ). La pérdida de carga refleja la energía que se requiere para mover el fluido a una determinada distancia.

Es importante señalar que la pérdida de carga ocurre en la dirección del flujo. En la Figura 14, el flujo en el tubo se ha invertido y el flujo fluye de la parte inferior a la superior, mientras  $Q$ ,  $K$ ,  $A$  y  $i$  permanecen constantes.

Lo anterior, ilustra que un pozo profundo en condiciones de campo, tiene carga más alta que uno somero cuando el agua se mueve en forma ascendente, y que esta condición se invierte cuando el flujo es descendente. Cabe mencionar que los piezómetros son considerados como pozos.



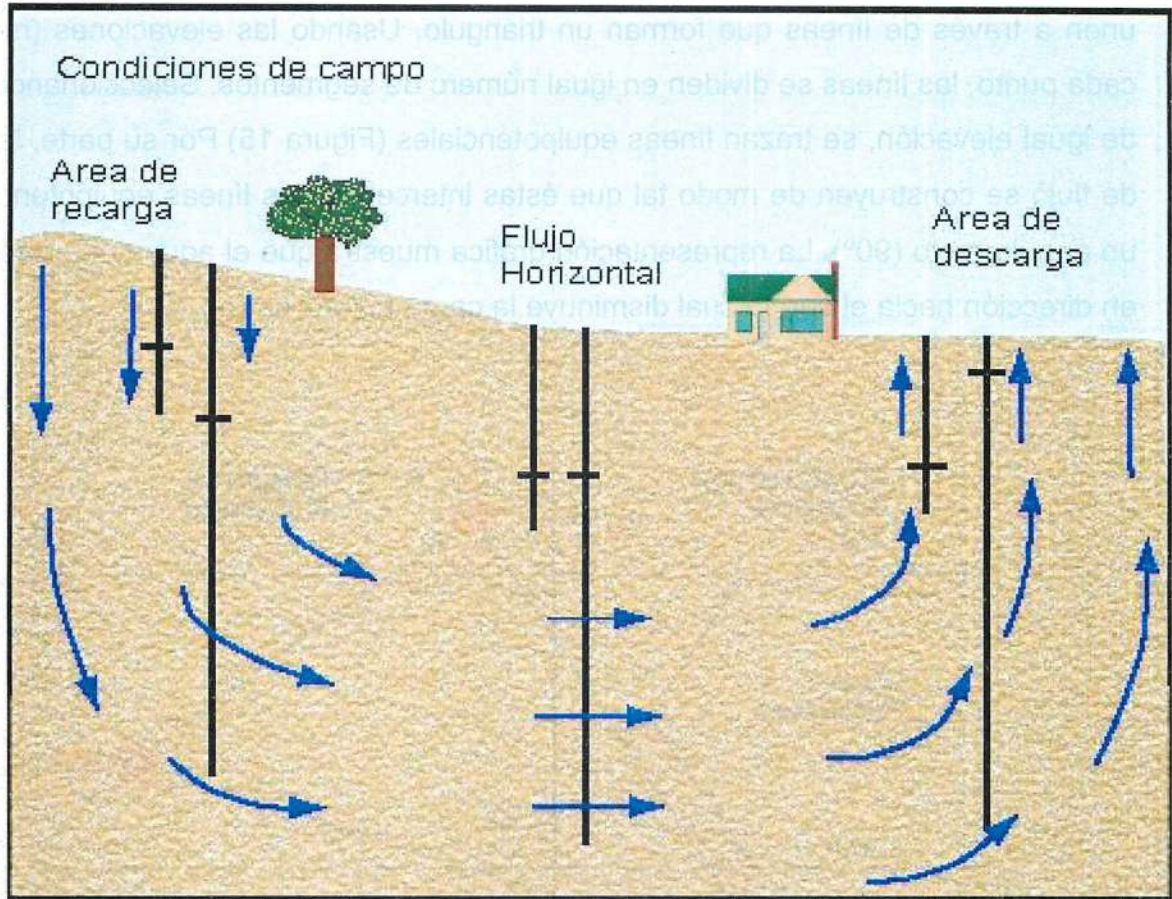
Pozos cercanos con diferente profundidad y niveles de agua indican la existencia de zonas de recarga o descarga. En zonas de recarga, los pozos someros tendrán mayor carga hidráulica que los profundos, en zonas donde el flujo es horizontal no se aprecian diferencias de carga importantes, y en las áreas de descarga, los pozos más profundos tendrán mayor carga hidráulica.



Condiciones de campo

## Explicación gráfica de la ley de Darcy.

Figura 13 Representación gráfica de la Ley de Darcy en Laboratorio



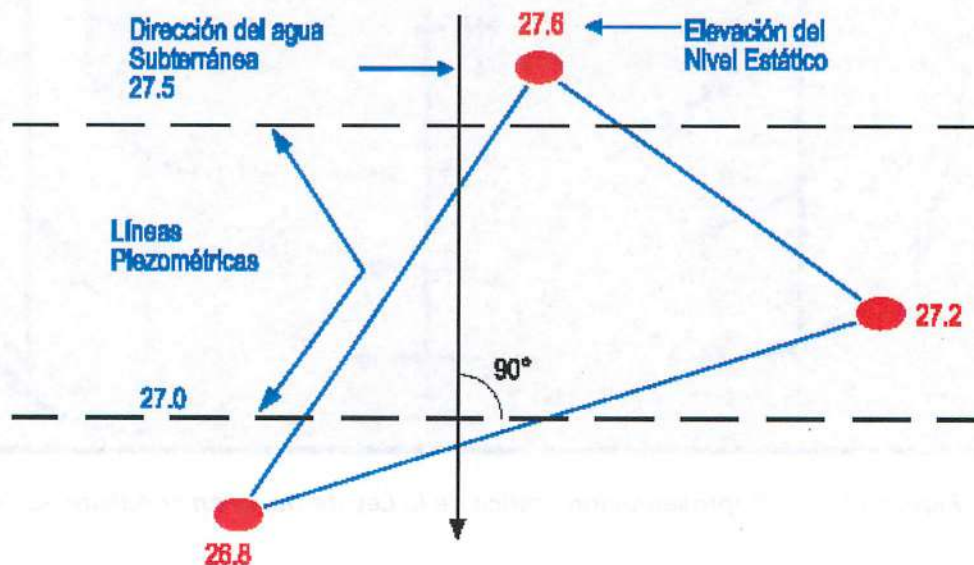
**Figura 14** Representación gráfica de la Ley de Darcy en condiciones de campo.

### 1.9 Dirección del flujo subterráneo

La dirección del flujo subterráneo, en un medio homogéneo e isótropo, es perpendicular a las líneas equipotenciales. Debido a que la superficie piezométrica forma un plano, la dirección de flujo y el gradiente hidráulico se establecen a partir de al menos tres puntos de monitoreo (Figura 15). Estos deben de atravesar un mismo acuífero y tener similar profundidad e intervalo de ademe ranurado para que las mediciones sean representativas. Aplicando el método de interpolación de los tres puntos, las elevaciones de nivel se calculan en cada sitio y se toma una referencia topográfica de nivel, el cual generalmente es el nivel medio del mar. Los puntos de igual elevación se



unen a través de líneas que forman un triángulo. Usando las elevaciones (msnm) de cada punto, las líneas se dividen en igual número de segmentos. Seleccionando puntos de igual elevación, se trazan líneas equipotenciales (Figura 15) Por su parte, las líneas de flujo se construyen de modo tal que éstas intercepten las líneas equipotenciales en un ángulo recto ( $90^\circ$ ). La representación gráfica muestra que el agua subterránea fluye en dirección hacia el sur, lo cual disminuye la carga hidráulica ( $h$ ).



**Figura 15** La dirección del flujo subterráneo se determina a través de la medición del nivel estático en al menos tres pozos con la misma profundidad. (Health and Trainer, 1983)

### 1.10 Trazo de las curvas de nivel

Sólo es posible obtener valores de la elevación del nivel en una serie de puntos dispersos en la superficie que forma un acuífero, y es a partir de éstos que se trazan curvas de nivel para definir la superficie o mapa piezométrico.

El punto de inicio para configurar curvas de elevación de nivel es un plano topográfico. Este permite localizar los puntos de monitoreo, conocer su elevación en msnm y las características geográficas, geológicas e hidrográficas del sitio. Las curvas equipotenciales deben ser normales a los límites impermeables y paralelas a las superficies y líneas de nivel constante como: río, lagos, mares..., que tengan conexión con el acuífero y reflejen los cambios de permeabilidad.

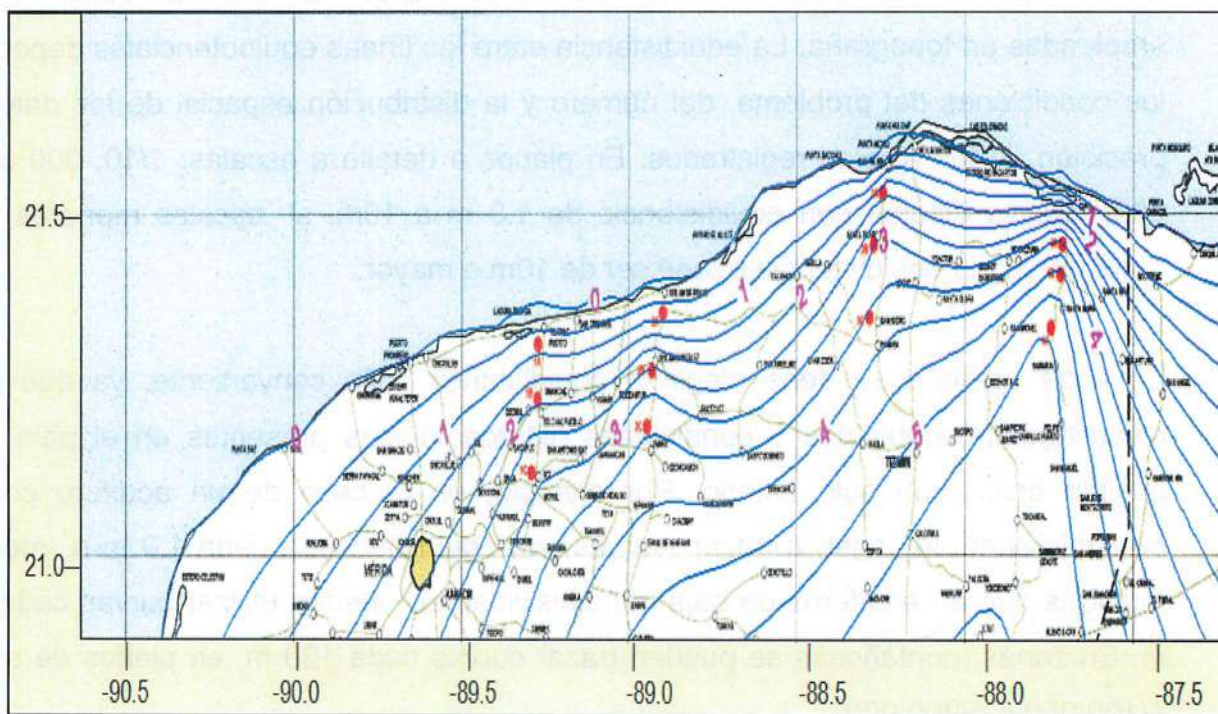
En principio, la construcción de las curvas se realiza con técnicas similares a las empleadas en topografía. La equidistancia entre las líneas equipotenciales depende de las condiciones del problema, del número y la distribución espacial de los datos y la precisión de los niveles registrados. En planos a detalle a escalas: 1/10, 000 o 1/25, 000; que se dibujan con equidistancia de 1.0 m a 10m, a escalas menores, hasta 1/2000,000; la equidistancia puede ser de 10m o mayor.

En cada acuífero se debe elegir la equidistancia más conveniente, ya que por la diversidad de ambientes y condiciones hidrogeológicas presentes en el país no es posible aplicar un sólo criterio. Por ejemplo, en el caso de un acuífero con alta transmisividad se llegan a trazar curvas con equidistancia a cada 1.0 m o menores, mientras que en acuíferos de baja transmisividad se pueden utilizar curvas cada 1.ó 5 m. En zonas montañosas se pueden trazar curvas cada 100 m, en planos de escalas 1/100,000 o 1/200,000.

Por otra parte, a la fecha existen diversos programas de cómputo para la configuración automática de curvas de nivel. Sin embargo, en el caso de mapas de elevación del nivel estático, el uso de estas herramientas no necesariamente representa la mejor opción, ya que la configuración automática no discrimina las variaciones por efecto de la topografía, cuerpos de agua superficial, datos piezométricos de distinto origen, entre otros. Como alternativa para la

configuración se recomienda elaborar un mapa en forma manual comparar los resultados con un método automático.

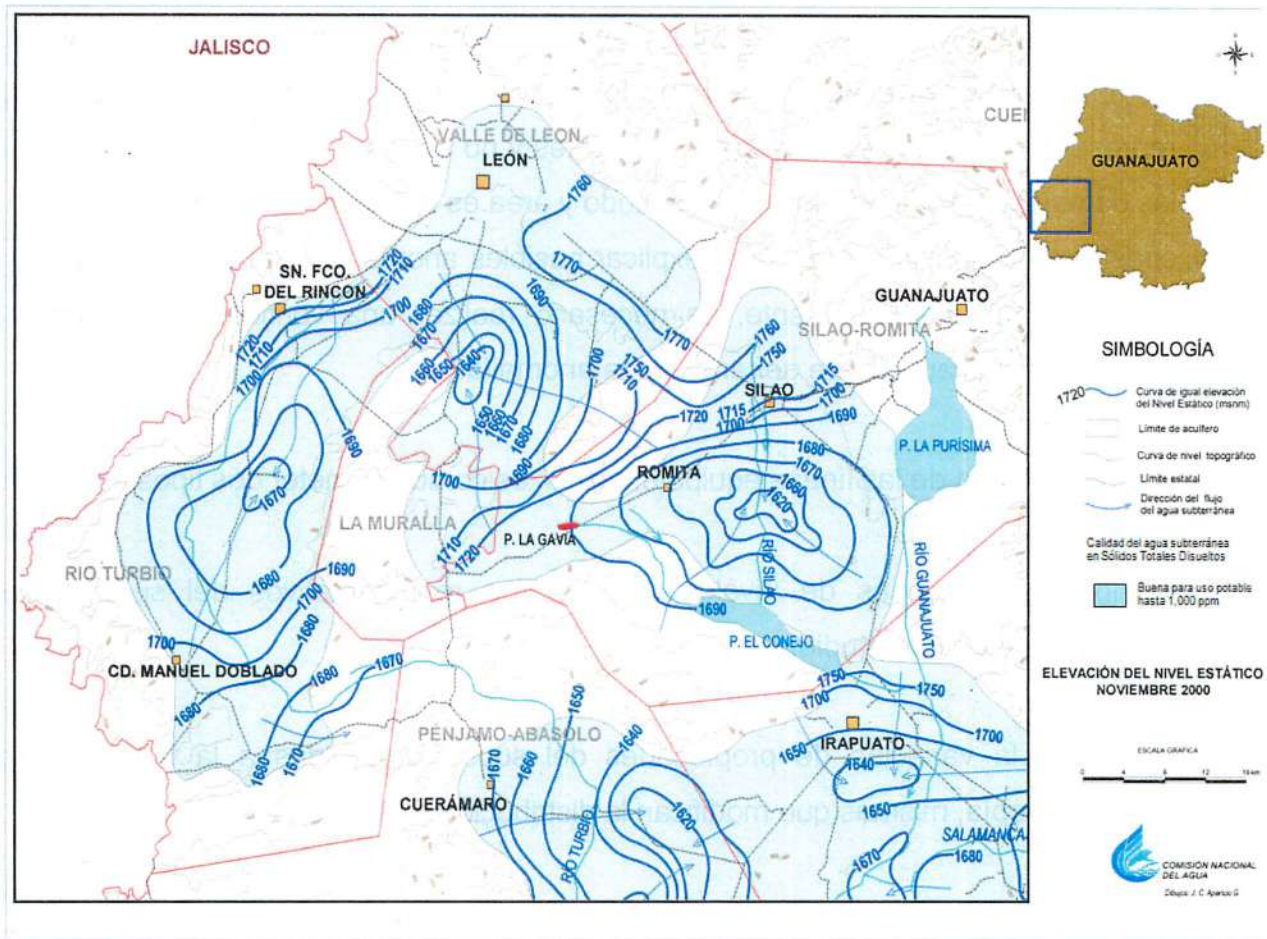
La Figura 16 ilustra el mapa de elevación en la porción norte del acuífero de Yucatán, en donde dada su alta transmisividad, las líneas equipotenciales están separadas cada metro en distancias superiores a varias decenas de kilómetros.



**Figura 16** Mapa de elevación del nivel estático en la parte norte del acuífero de la Península de Yucatán. ( CNA, 2002)

La Figura 17 muestra un mapa de elevación del nivel de varios acuíferos en el Estado de Guanajuato. Debido a la escala, número y extensión de cada acuífero, y características hidrogeológicas, las curvas de elevación están equidistantes a intervalos de 10m hasta 50m. De 10m en los acuíferos de Río Turbio y en Pénjamo-Abasolo, y de 50m en Irapuato, respectivamente.





**Figura 17** Mapa de elevación del nivel estático en los acuíferos del Estado de Guanajuato

### 1.11 Errores en la elaboración e interpretación de mapas piezométricos

El estudio del movimiento del agua subterránea en cualquier acuífero, precisa del conocimiento de la superficie piezométrica, la cual la convierte en una herramienta esencial que debe construirse e interpretarse correctamente.



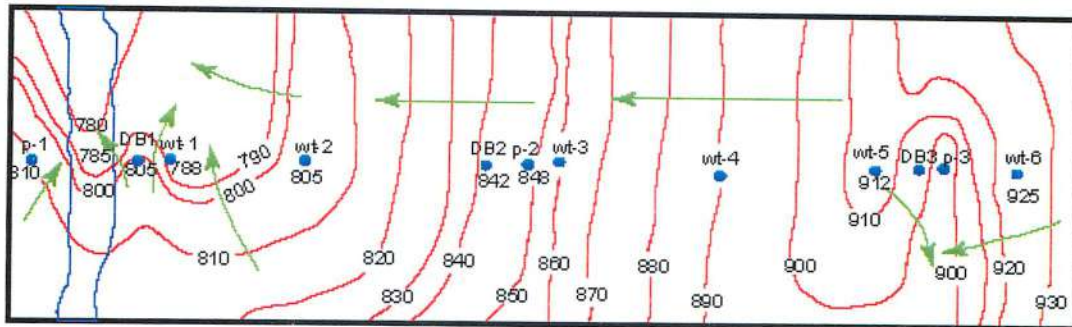
La configuración de un mapa no es una tarea mecánica ya que en su elaboración se requieren aplicar diversos criterios para decidir la configuración que mejor represente la elevación del nivel, particularmente cuando los datos no siguen un patrón definido. Por ejemplo, si los niveles provienen de sitios distantes entre sí, los datos pueden representar condiciones geológicas diferentes y no ser comparables. Al mismo tiempo, si los datos se colectan en un mismo periodo y área es necesario conocer las características constructivas de cada pozo para explicar posibles anomalías. Si un dato anómalo no se puede identificar rápidamente, es necesario realizar una verificación en campo para determinar las causas que generan dicha anomalía.

Durante el trazo de las líneas equipotenciales es común cometer dos tipos de errores:

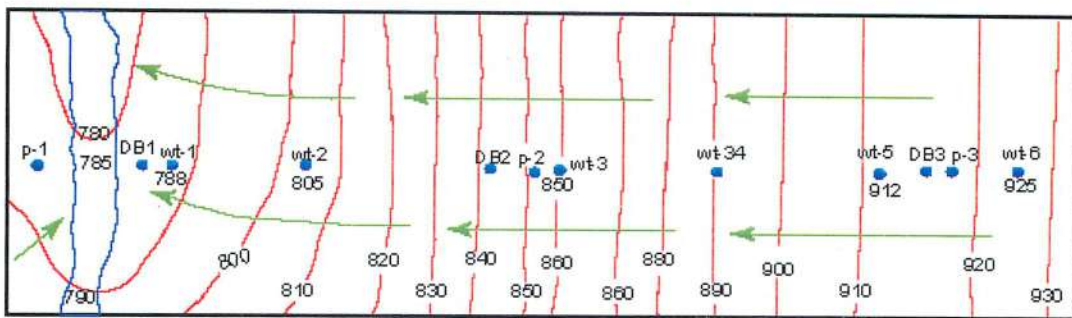
- a) Incluir mediciones de niveles que no son representativos del sistema de flujo subterráneo en estudio, y
- b) Omitir la variación de propiedades del subsuelo debidas a la heterogeneidad y anisotropía, mismas que modifican la distribución de las líneas equipotenciales.

A continuación se ilustran ejemplos de este tipo de errores:

Combinar mediciones de nivel de sitios ubicados en zonas de recarga o descarga, con niveles correspondientes a áreas de gradiente horizontal (Figura 18)



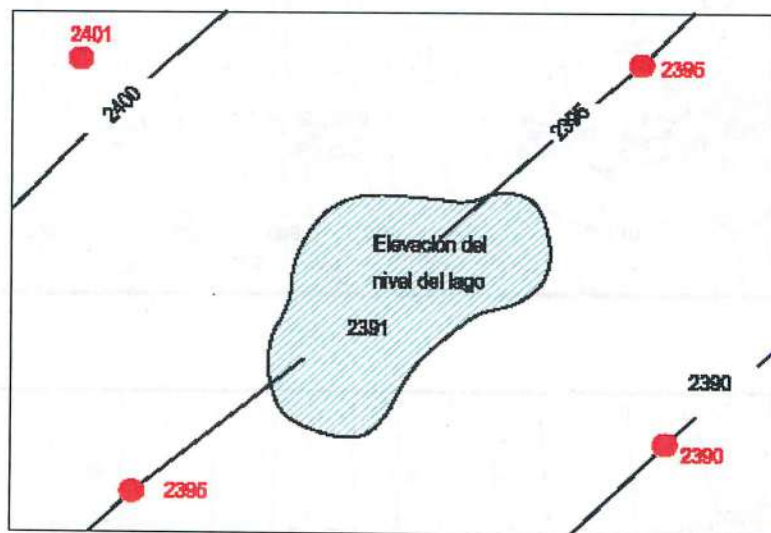
(a)



(b)

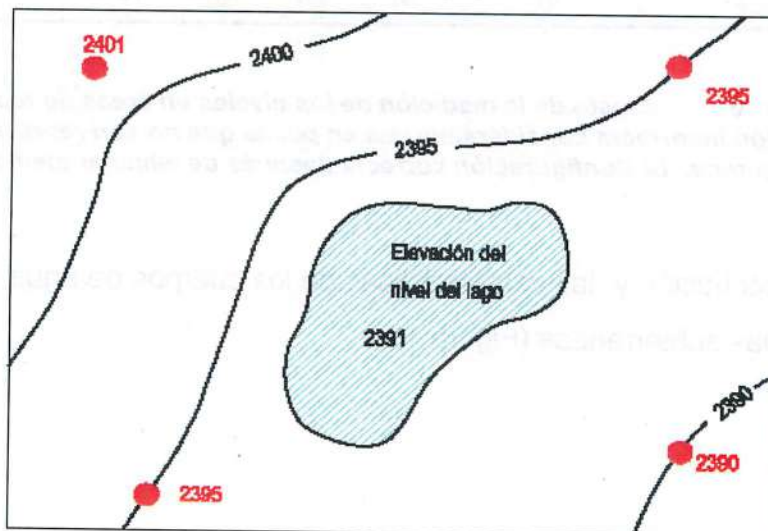
**Figura 18** Efecto de la medición de los niveles en áreas de recarga y descarga: a) Configuración incorrecta considera niveles en pozos que no son representativos de la superficie piezométrica. b) Configuración correcta después de eliminar mediciones de nivel no re

Omitir la distribución y las características de los cuerpos de agua superficial y su relación con las aguas subterráneas (Figura 19).



Incorrecto

(a)



Correcto

Figura 19 Error en la configuración de mapas de elevación del niveles debida a la presencia de depresiones topográficas ocupadas por cuerpos de agua superficial (Davis and DeWiest, 1966)

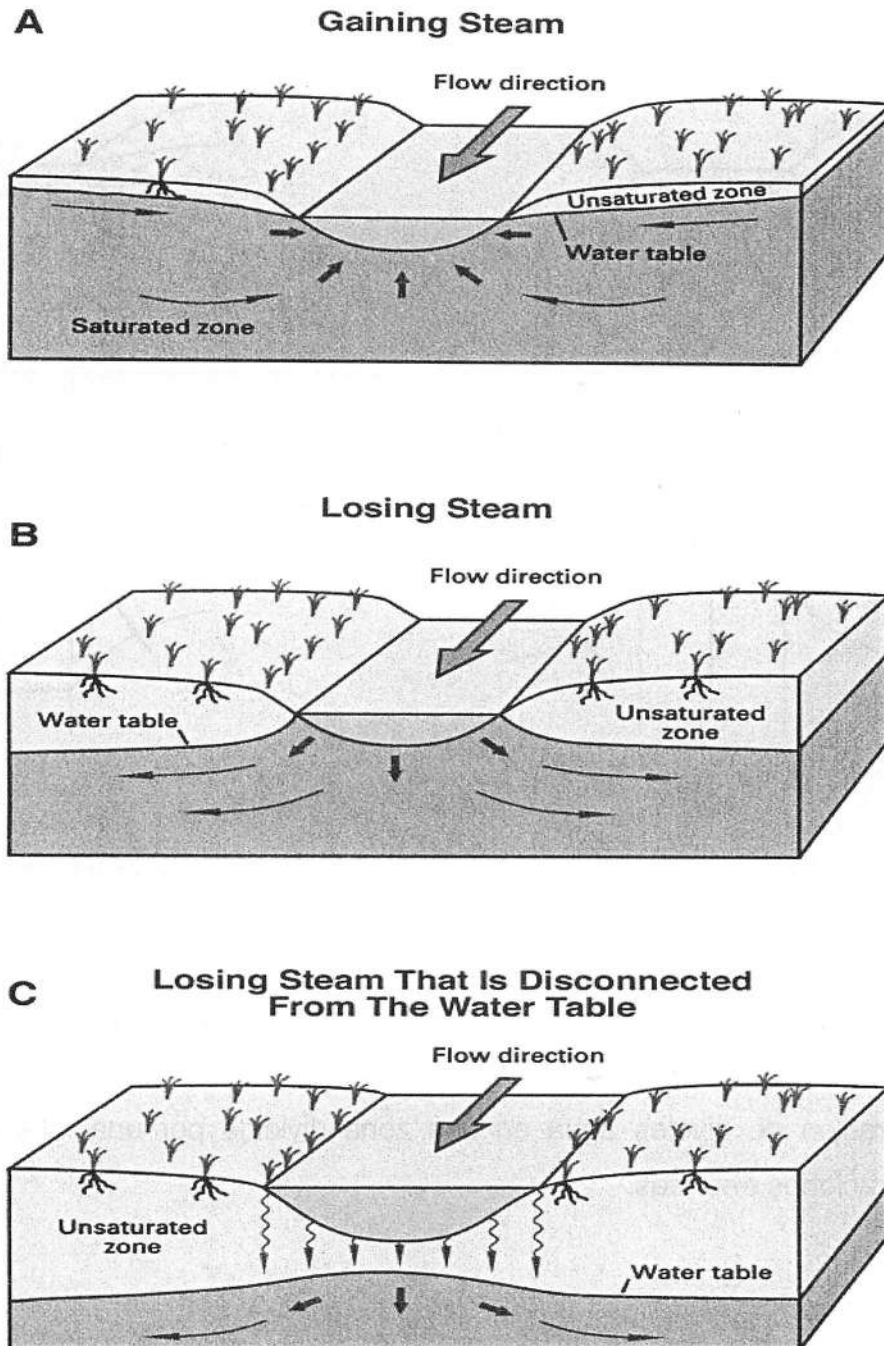
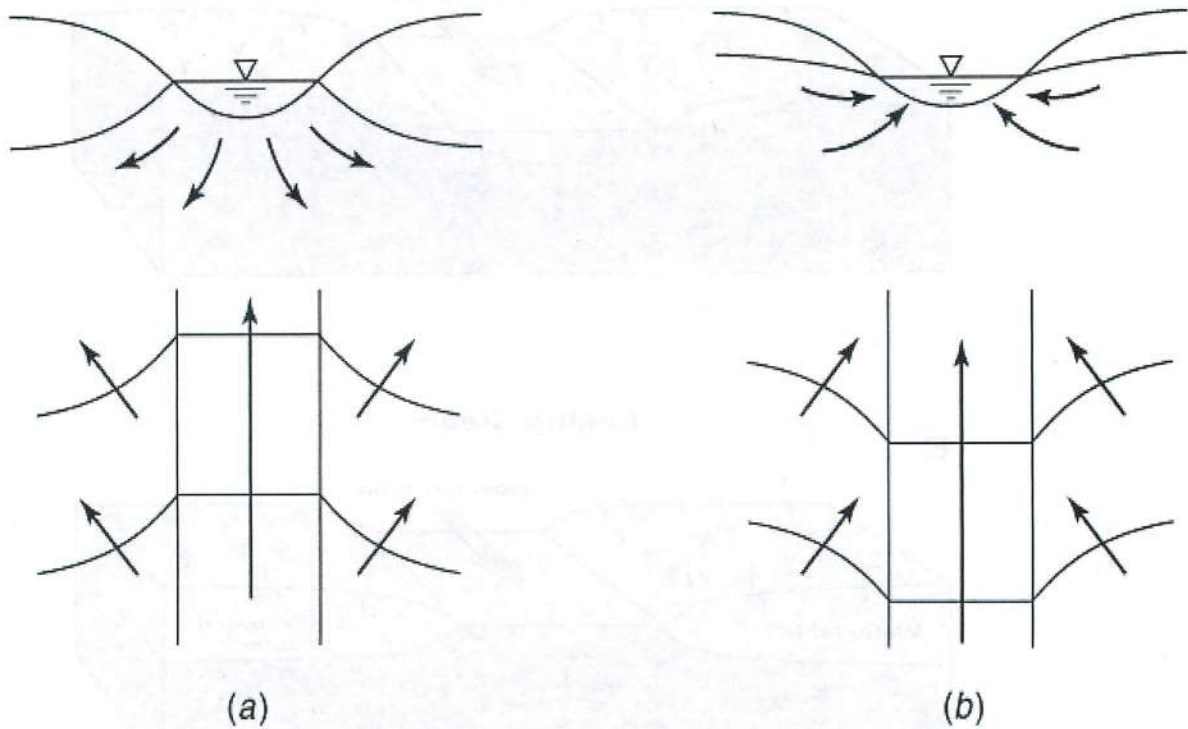


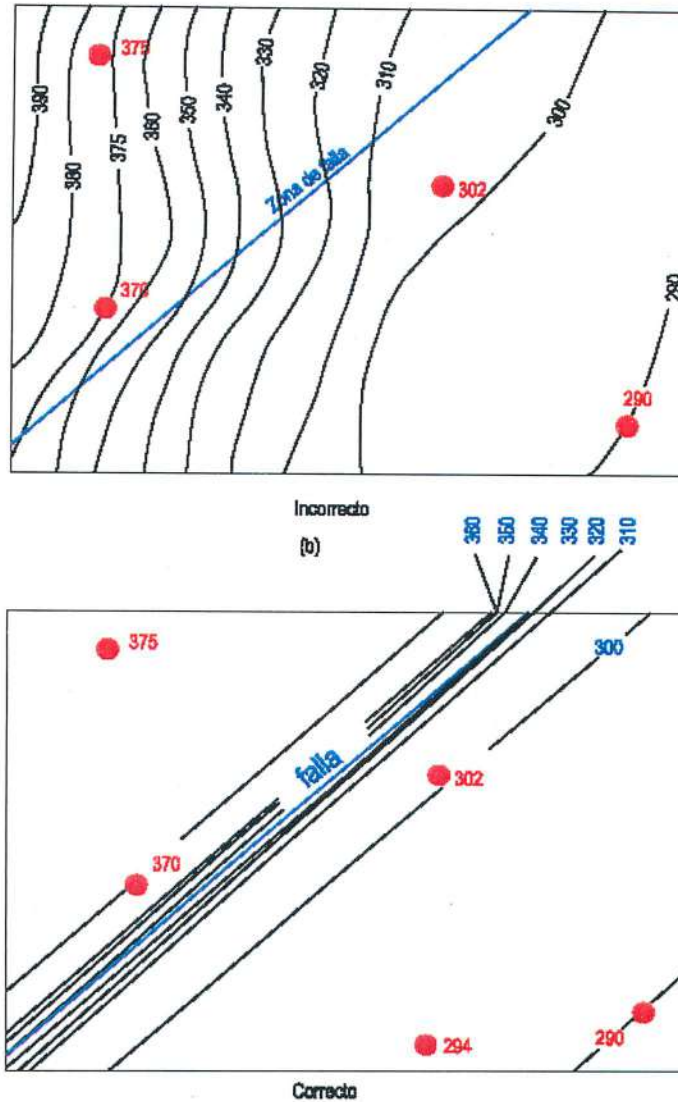
Figura 20





**Figura 21**

Omitir la presencia y efecto de estructuras o rasgos geológicos como fallas o discontinuidades. La Figura 22 muestra cómo los métodos convencionales de configuración de niveles agua en una zona dividida por una falla geológica generan configuraciones erróneas.



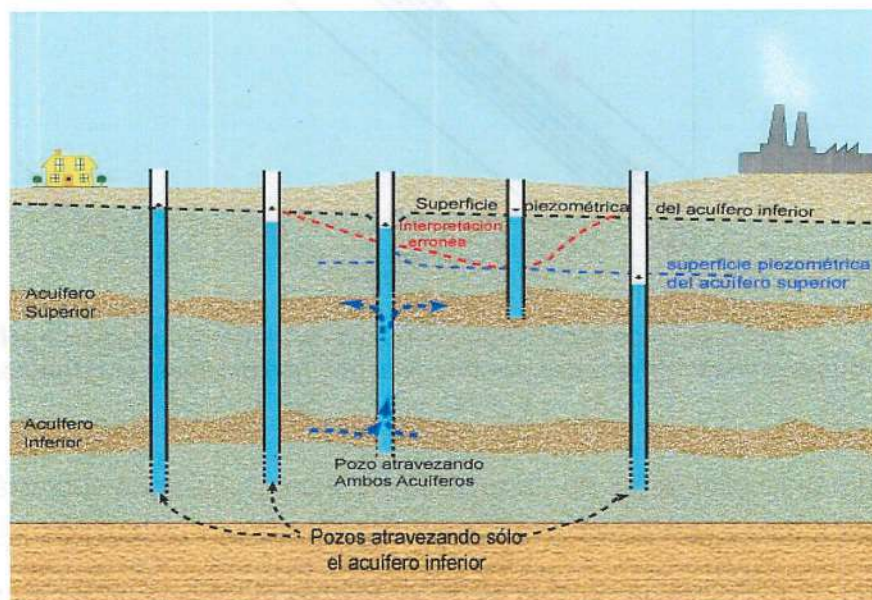
**Figura 22** Error en la configuración de mapas de elevación por presencia de zonas de alta conductividad originadas por una falla geológica ( Davis and DeWiest, 1966).

Omitir anomalías generadas por la recarga o descarga de agua subterránea derivadas de actividades antropogénicas. Por ejemplo, los pozos en operación provocan conos de abatimiento modificando la pendiente del gradiente hidráulico. Por otra parte, los retornos de riego en zonas agrícolas, la infiltración de aguas residuales o fugas en los sistemas de

agua potable, generan “domos” o superficies con elevación positiva del nivel, contraria a los observados en las zonas de bombeo.

Omitir variaciones estacionales y fluctuaciones de corto tiempo que afectan la superficie piezométrica. Si un acuífero es sensible a las variaciones en época de lluvia o estiaje, se provocará un incremento o disminución del nivel. En este caso, las mediciones de elevación no serán representativas a menos que éstas se realicen dentro de un mismo periodo de medición.

Combinar mediciones del nivel en pozos que atraviesan diferentes acuíferos. En los pozos de monitoreo con ademe ranurado de varios metros y que atraviesan diferentes acuíferos, el nivel no es representativo de un solo acuífero. En este caso, el nivel refleja la interacción de los diferentes acuíferos o estratos saturados y representa el promedio de la carga hidráulica en todo un intervalo.



**Figura 23** Error en la determinación de la superficie piezométrica debido a la combinación de niveles estáticos de dos acuíferos confinados con diferente carga hidráulica. (Davis and De Wiest, 1966)



### **1.12 Mapas de elevación del nivel estático**

Un mapa piezométrico es la representación gráfica del flujo subterráneo y gradiente hidráulico y se elabora ubicando los valores del nivel estático y uniendo puntos de igual elevación. Este se representa mediante líneas de igual elevación de forma similar a una superficie topográfica. Los mapas son parte esencial de cualquier estudio de las aguas subterráneas, ya que permiten indicar la dirección del flujo subterráneo y estimar el gradiente hidráulico, lo que a su vez permite calcular la velocidad del flujo. La superficie piezométrica representa el límite de saturación de un acuífero libre y coincide con la superficie correspondiente a los puntos situados en el límite de saturación. En acuíferos libres la superficie no puede estar más alta que el terreno topográfico, con excepción de los puntos que representen partes profundas del acuífero en zonas de descarga (Figura 24)

En los acuíferos confinados, el agua tiene el potencial para elevarse a una cierta posición, pero en realidad sólo lo podrá hacer si la capa confinante es atravesada por un pozo. Por lo tanto, la superficie piezométrica de un acuífero confinado representa una línea imaginaria. Estas superficies son más elevadas que el techo de los mismos, excepto en las proximidades de captaciones que producen un gran descenso del nivel del agua.

En varios casos la superficie equipotencial representa planos verticales en especial, teniendo en cuenta que las dimensiones horizontales son mucho mayores que las verticales. Sin embargo, existen casos en que el potencial varía notablemente en la vertical, como en las zonas de recarga o en las proximidades de captaciones de agua. En este caso las superficies equipotenciales son planos inclinados, y es posible dibujar una infinidad de superficies según la profundidad que se considere (Figura 24). Cuando

existe presencia de flujos verticales que provocan que la superficie no sea única, se pueden elaborar superficies complementarias por cada estrato en estudio.

Cuando se cuenta con pocos puntos para definir una superficie y ésta es muy irregular por la presencia de áreas de drenaje o bombeo, es preciso efectuar una adaptación de las formas con base en el reconocimiento de cada sitio, lo que implica dar un carácter subjetivo a su traza final (Figura 24)

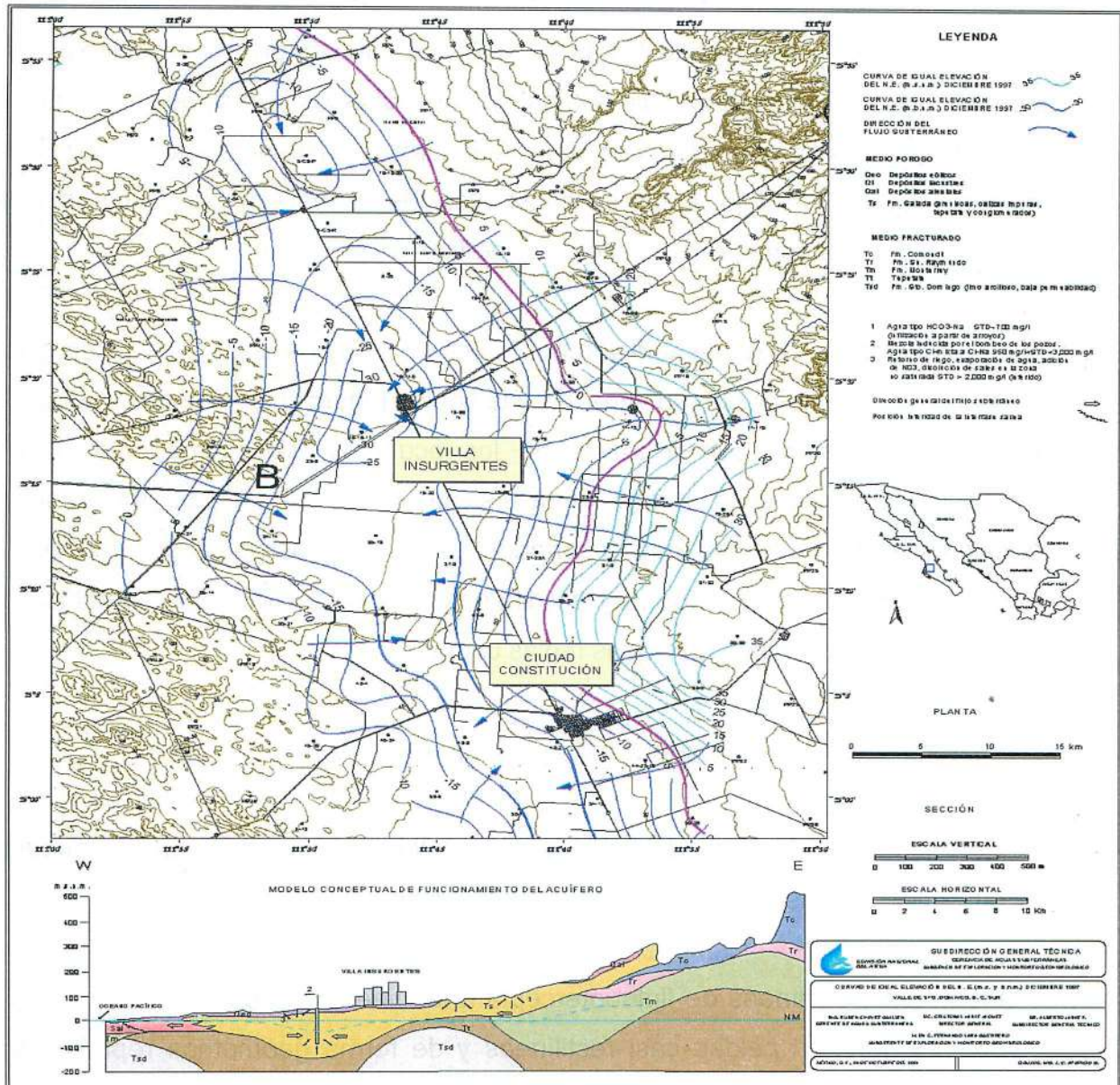
Las curvas interpoladas que están apoyadas sólo en deducciones más que en mediciones reales, se indican como inferidas mediante líneas interrumpidas. Es importante verificar que todos los datos de niveles correspondan a un mismo acuífero y que dentro de éste correspondan a una misma capa, en caso de que exista una notable estratificación.

En los mapas de elevación se debe indicar la dirección del flujo y la existencia de parte aguas subterráneas. Asimismo, en el mapa se incluyen todos aquellos detalles que influyen en la medición del nivel y flujo subterráneo como: límites impermeables, cuerpos de agua superficial, estructuras civiles como canales, presas, pozos, línea de costa y accidentes geológicos de interés hidrogeológico.

En la Figura 24 se muestra un mapa de elevación del nivel estático en el acuífero del Valle de Santo Domingo, BCS. En éste se muestran líneas equipotenciales separadas cada 5 m. En la zona Oeste se destaca que las líneas equipotenciales corresponden a la zona de intrusión salina donde los niveles se ubican por debajo del nivel medio del mar con cotas de nivel negativas. En la parte Este las líneas equipotenciales corresponden al acuífero con agua dulce y con cotas de elevación del nivel positivas. Con objeto de tener una mejor interpretación del funcionamiento del acuífero, el mapa



de elevación se acompaña de una sección que representa el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero.



**Figura 24** Mapa de elevación del nivel estático en el acuífero de Santo Domingo, BCS



### 1.13 Redes de flujo

Un mapa que represente a la superficie piezométrica se puede transformar en una red de flujo subterráneo construyendo líneas de flujo que interceptan a las equipotenciales en ángulos rectos. Las líneas de flujo son caminos imaginarios que siguen las partículas del agua cuando se desplazan por el acuífero. Aún cuando existe un número infinito de líneas equipotenciales y de flujo, éstas se construyen de tal manera que la combinación de ambas genera una serie de cuadrados casi perfectos.

La construcción de redes de flujo y la aplicación de la ley de Darcy, permiten calcular el volumen que atraviesa por un área del subsuelo (Figura 14). Por otra parte, el agua subterránea no solo fluye a través de los acuíferos, sino también en las capas confinantes. En este caso el flujo lateral es muy pequeño; sin embargo, la infiltración vertical en ellos puede ser muy importante. La representación de una red de flujo se puede realizar de diferente forma y en diferentes escalas: horizontal y vertical. Para su elaboración se han propuesto ciertas reglas como:

- La escala vertical y horizontal deben ser iguales;
- Seleccionar un conjunto de unidades de medida consistentes para la conductividad hidráulica, líneas de flujo y líneas equipotenciales.
- El conjunto de líneas de flujo intercepta a las líneas equipotenciales, de tal forma que se generan celdas casi rectilíneas y de forma geométrica representado por formas en cuadros o rectángulos.

## **2 FLUCTUACIONES DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

Las fluctuaciones del nivel del agua durante un ciclo hidrológico se manifiestan como respuesta natural a los cambios en la recarga y la descarga de los acuíferos. Muchos de estos cambios son de corta duración y provocados por cargas sobre el acuífero que comprimen las capas, o por el incremento de la descarga en un arroyo o río. Otros están relacionados con la variación de la presión barométrica, elevaciones de la marea, e incluso ocurrencia de temblores.

La fluctuación de nivel de un acuífero confinado se caracteriza a través de su eficiencia barométrica; es decir, la relación de cambio en la carga con la presión atmosférica. Este radio generalmente se ubica de 0.020 a 0.75; las fluctuaciones del nivel que involucran cambios en su almacenamiento y que son de largo alcance. La recarga de agua subterránea genera que el nivel del agua ascienda, seguido de este periodo de uno a dos meses, el nivel del agua desciende en respuesta a la descarga natural. Aunque el mayor periodo de recarga ocurre en un periodo determinado, otros eventos de mayor duración ocurren en otros tiempos.

Las actividades humanas también provocan fluctuaciones en los niveles de agua. El bombeo del agua subterránea reduce los niveles; mientras que la irrigación, recarga artificial, infiltración de agua en lagos, lagunas y rellenos sanitarios, tiende al incremento de los niveles en forma local.

Los efectos de la evapotranspiración sobre los acuíferos someros ocurren en forma temporal y diaria. Las plantas funcionan como diminutos sistemas de bombeo que extraen agua de la superficie capilar o inclusive dentro del nivel estático durante varias horas del día y de la noche.

La Tabla 3 resume las condiciones que generan la fluctuación del agua subterránea en respuesta a nevadas, cambios en el régimen de humedad, superficie de drenaje, grados de pendiente y espesor de la zona de aireación. Todos estos factores deben ser considerados en la toma de datos de nivel en un pozo de monitoreo.

**Tabla 3 Resume las condiciones que generan la fluctuación del agua subterránea**

Origen de la Variación	Tipo de acuífero		Origen de la variación		Duración				Influencia climática
	Libre	confinado	Natural	Antropogénica	Corta	diurna	Estacionaria	Larga	
Recarga de agua subterránea	X		X						
Aire atrapado durante la recarga	X		X		X		X		X
Evapotranspiración	X								X
Efecto de almacenamiento en arroyos o ríos	X		X			X			
Efecto de mareas	X	X	X				X		X
Efectos de presión atmosférica	X	X	X			X			
Carga externa a un acuífero confinado		X		X	X	X			X
Sismos		X	X		X				
Bombeo de agua subterránea	X	X		X				X	
Inyección de profundidad de agua subterránea		X		X				X	
Recarga artificial o drenaje diferido	X			X				X	
Irrigación/ drenaje	X			X				X	X
Drenaje Geotécnico	X			X				X	

## **2.1 Variación del nivel estático**

El nivel de las aguas subterráneas varía con el tiempo de forma muy diversa. En general, se trata de pequeñas variaciones en acuíferos no explotados, pero pueden ser importantes en acuíferos sujetos a un intenso bombeo, en particular tratándose de acuíferos confinados.

Algunas oscilaciones tienen un carácter científico como las provocadas por las mareas, cambios de la presión atmosférica y sobrecargas rápidas. Mientras que otras, poseen un valor práctico, ya que pueden llegar a afectar la explotación de un acuífero por la disminución del nivel en los pozos, en el acuífero, o generando una mayor elevación para el bombeo.

## **2.2 Tipos de oscilaciones piezométricas**

En general se distinguen dos tipos de oscilaciones:

Oscilaciones de corta duración, que varían de menos de un minuto a 24 h,

Oscilaciones de largo período, que se repiten con base a un ciclo semianual, anual, o de varios años.

## **2.3 Oscilaciones asociadas a cambios de presión atmosférica.**

En acuíferos confinados se aprecia un descenso de nivel como respuesta de un incremento en la presión atmosférica y un ascenso de nivel por una disminución en la



misma (Figura 25 y Figura 26). El incremento de carga se genera por un aumento de la presión atmosférica que se reparte entre el terreno y el agua. Es decir, que aumenta la presión intergranular y la presión del agua. Si  $h_o$  es la columna de agua que equilibra la presión  $p$  del agua en un cierto punto del acuífero, debe cumplirse que  $p = h_o \cdot \gamma + P_a$  siendo  $P_a$  la presión atmosférica. Si se produce un aumento de presión atmosférica  $\Delta P_a$ , el aumento de presión en el punto considerado en el acuífero es  $f \cdot \Delta P_a$ , siendo  $f$  un valor entre 0 y 1 y que depende de cómo se reparte la sobrecarga entre el agua y el terreno.

En el pozo de observación se produce un incremento de nivel  $\Delta h$  tal que:

$$p + f \cdot \Delta p_a = (h_o + \Delta h) \gamma + p_a + \Delta p_a$$

Y restándole la ecuación anterior y despejando  $\Delta h$

$$\Delta h = - \frac{\Delta p_a}{\gamma} (1 - f)$$

Muestra que a un descenso de presión corresponde un incremento de nivel. Se conoce como eficiencia barométrica  $EB$  al cociente entre el cambio de nivel del agua y el cambio de presión atmosférica expresado en altura de agua. Al prescindir del signo

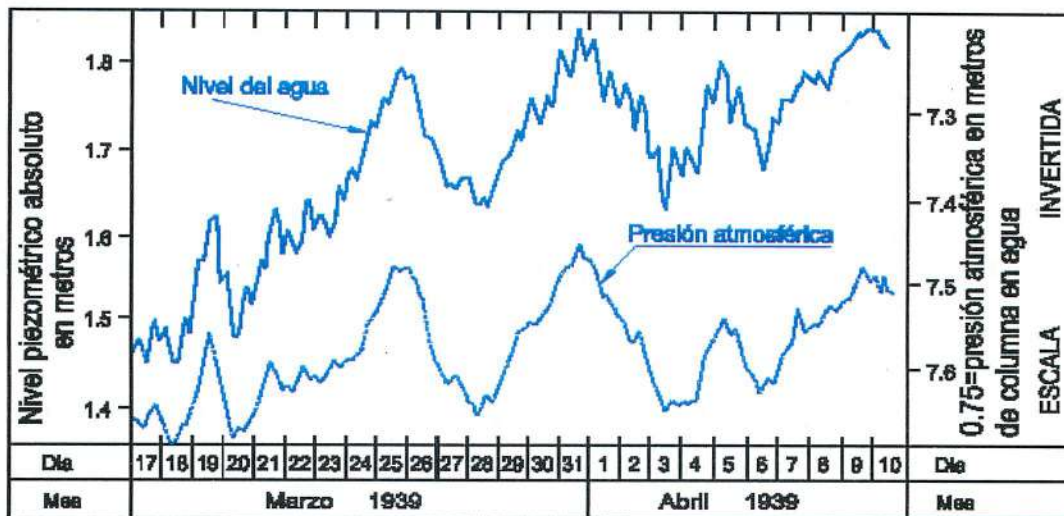
$$EB = \frac{\Delta h}{\Delta p_a / \gamma} = \frac{\gamma \cdot \Delta h}{\Delta p_a} = 1 - f$$

Puede demostrarse que

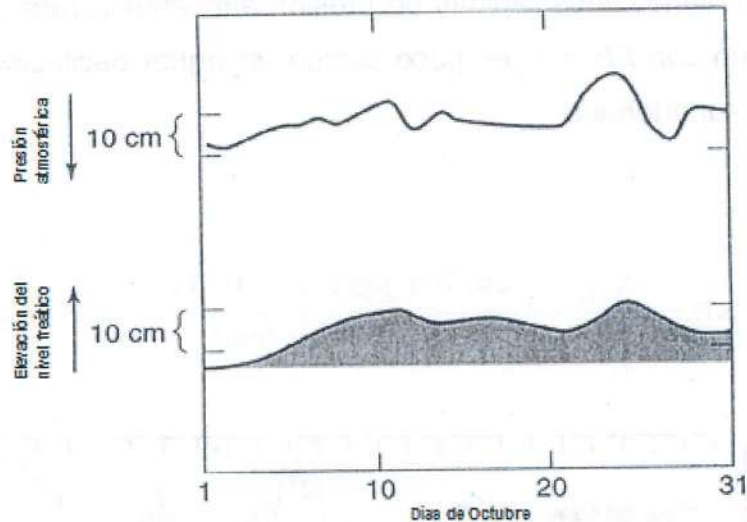
$$EB = \frac{m \cdot \beta}{\alpha + m \beta}$$

Donde  $m$  es la porosidad,  $\alpha$  la compresibilidad del medio, y  $\beta$  la compresibilidad del agua. Como las variaciones rápidas de presión atmosférica rara vez superan 20 mm. de mercurio, aún con  $EB = 1$ , es poco común encontrar oscilaciones de nivel rápidas por esta causa superiores a

$$\Delta h = \frac{\Delta p_a}{\gamma} = \frac{20/760 \text{ kg/cm}^2 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{m}^2}{1000 \text{ kg/cm}^3} = 0,26 \text{ m}$$



**Figura 25** Relación entre presión atmosférica y nivel piezométrico en un acuífero costero. El gráfico de variación de la presión atmosférica se ha dibujado invertido y multiplicado por la eficiencia barométrica ( $EB = 0,75$ ) para mostrar así el paralelismo. (Modifica de Robinson, 1939)



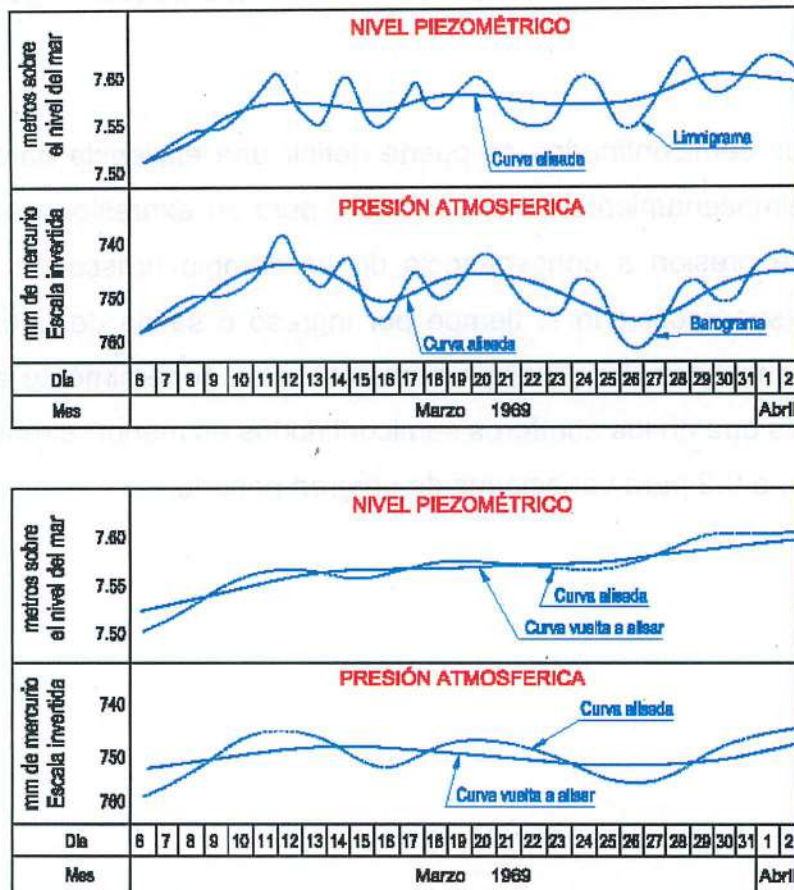
**Figura 26. Variación de la presión atmosférica y elevación del nivel freático en un acuífero costero, durante Octubre de 1973 en Devonshire Post Office, Bermuda. Note que la relación de variación es inversa, un incremento en presión está asociado con un descenso en el nivel freático (Vacher, 1978).**

Los acuíferos libres teóricamente no deben mostrar el efecto barométrico ( $EB = 0$ ), ya que una variación de presión actúa tanto sobre el punto de observación, como en toda el agua del acuífero. Sin embargo, en la práctica también muestran una cierta eficiencia barométrica, en particular si en el terreno que cubre la formación existe una zona saturada que propicia que la variación de presión no se transmita directamente al acuífero. También aparece una cierta eficiencia barométrica con nivel de agua profunda debida a deficiencias en la transmisión de la variación de presión a través del aire que satura los poros del medio no saturado. Si el acuífero es libre pero está separado del exterior por una capa poco permeable, el efecto barométrico también se manifiesta. Sin



embargo, la eficiencia barométrica es normalmente pequeña, generalmente menor de 0,05.

En acuíferos semiconfinados se puede definir una eficiencia barométrica teniendo en cuenta el almacenamiento en el acuitardo, pero su expresión es más complicada. La variación de presión a consecuencia de un cambio brusco de presión atmosférica, tiende a desaparecer con el tiempo por ingreso o salida de agua del mismo. En los acuíferos confinados, la eficiencia barométrica es generalmente alta, de alrededor de 0.8, mientras que en los acuíferos semiconfinados es menor, alrededor de 0.4, llegando a descender a 0.2 para variaciones de un gran periodo.



**Figura 27** Hidrograma del pozo Margaux, cerca de Burdeos y barograma. Se muestran las fluctuaciones de período corto y período largo. (Según Besbes, 1969)

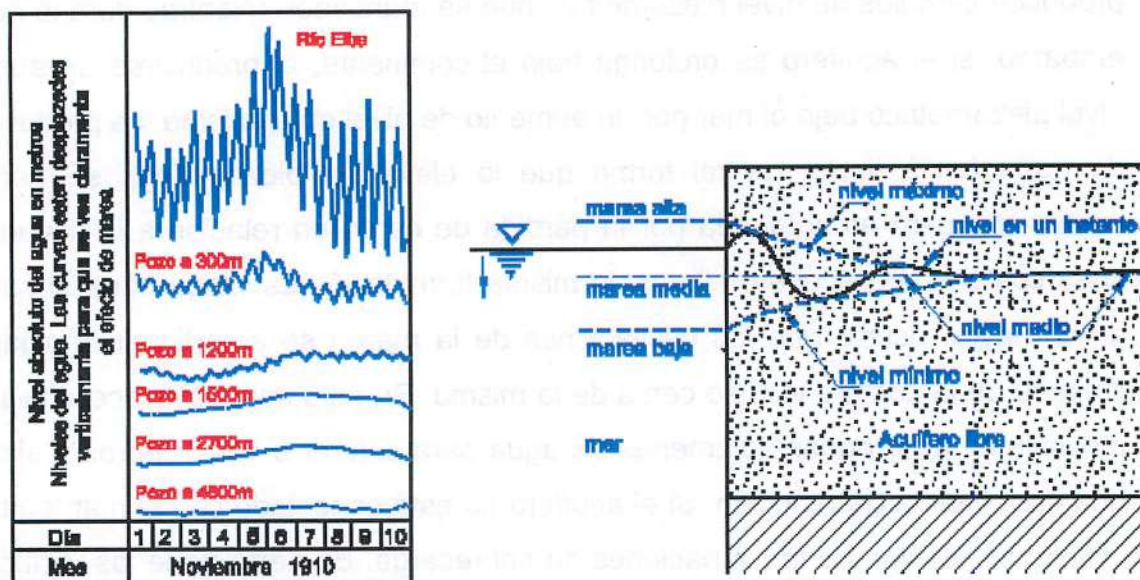
## 2.4 Oscilaciones asociadas a cambios de nivel de agua superficial

En el caso de la presencia de un acuífero confinado bajo cualquier masa de agua superficial extensa (gran lago o embalse), toda elevación del nivel del agua libre supone una sobrecarga, la cual se reparte entre el terreno y el agua, lo que aumenta la presión intergranular y la presión del agua. En el caso de un pozo, el nivel en el mismo aumenta a consecuencia de la elevación del agua libre para equilibrar el incremento de

presión del agua. En un acuífero confinado y sumergido, los cambios de nivel del mar producen cambios de nivel piezométrico que se mantienen mientras dura la acción; sin embargo, si el acuífero se prolonga bajo el continente, al producirse un aumento de nivel piezométrico bajo el mar por un aumento de nivel en el mismo, se produce un flujo de agua hacia tierra, de tal forma que la elevación piezométrica se transmite al continente, pero amortiguada por la pérdida de carga en relación a la distancia de la línea costera. En acuíferos libres, la misma formulación es válida pero, al ser el valor de  $S$  mayor, ocurre que las oscilaciones de la marea se amortiguan rápidamente al alejarse de la costa e incluso cerca de la misma. En este caso, el proceso requiere del movimiento de grandes volúmenes de agua para saturar o vaciar poros y ello supone una gran inercia de reacción. Si el acuífero no está conectado con el mar, sufre bajo el mismo los efectos de las variaciones de sobrecarga. En tierra firme las variaciones se propagan a través de pequeños movimientos de agua en los acuíferos confinados, de modo que a semejanza de lo que se acaba de exponer se tiene una amplitud de oscilación y un desfase.

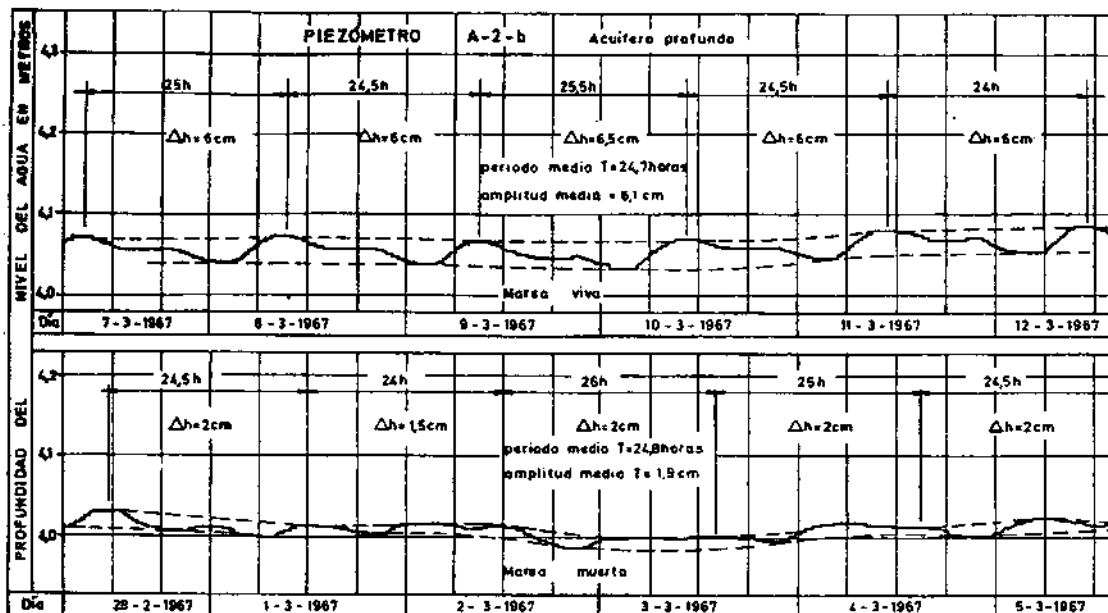
Figura 28 Oscilaciones periódicas en un acuífero inducidas por las oscilaciones de marea en el estuario de un río. Se observa la disminución de la amplitud con la distancia, así como el retraso que se produce en la onda. En el esquema anexo se aclara el fenómeno mostrando el nivel piezométrico en un instante dado.





**Figura 28** Oscilaciones periódicas en un acuífero inducidas por las oscilaciones de marea en el estuario de un río. Se observa la disminución de la amplitud con la distancia, así como el retraso que se produce en la onda. En el esquema anexo se aclara el fenómeno mostrando el nivel piezométrico en un instante dado

En la Figura 28 se representan dos porciones de limnigrama de un piezómetro costero en un acuífero confinado no comunicado directamente con el mar; se ve la diferencia entre marea viva y marea estática. Para asegurar que es un efecto de marea, basta comprobar que el período entre cada dos oscilaciones completas es superior a 24 h. En dicha figura se calcula 24,7 h y 24,8 h, donde el valor teórico es de 24,84 h. Admitiendo una marea viva de 0,6 m y una marea muerta de 0,30 m. La eficiencia a la marea varía entre  $EM = 0,10$  y  $EM = 0,066$ .



**Figura 29** Oscilaciones piezométricas en el acuífero confinado del delta del río Llobregat a 30 m de la costa, en marea viva y en marea muerta. Se calcula el período medio y la amplitud media. (Tomado de los archivos de la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental)

## 2.5 Oscilaciones asociadas a la evapotranspiración

Los acuíferos libres con nivel freático somero o sujeto a la acción de plantas freatofitas, sufren un efecto de evaporación y evapotranspiración directa que alcanza un máximo valor durante el día y mínimo por la noche. Ello produce una fluctuación de niveles de 24 h. Por efecto de histéresis, el nivel freático mínimo se produce hacia la puesta del sol y el máximo se produce hacia medio día. El efecto de evapotranspiración directa es despreciable, excepto cuando el nivel freático está a menos de 2.0 m de la superficie. No obstante, el efecto de evapotranspiración puede alcanzar a superficies freáticas situadas a más de 10m de profundidad cuando existen plantas freatofitas.

Alteraciones muy violentas, tales como los terremotos con epicentro próximo y las explosiones subterráneas muy intensas (volcanes) o artificiales, pueden producir

asentamientos rápidos en materiales no consolidados con la consiguiente expulsión de agua, la cual puede manifestarse y registrarse en pozos.

En acuíferos confinados próximos a masas de agua, cuyo nivel puede variar, se observan reacciones elásticas debidas al cambio del peso del agua que soportan. Si la masa de agua que cambia de nivel es un río, embalse o lago pequeño; existe un ascenso de nivel piezométrico en las inmediaciones, en respuesta a una subida del agua libre, pero la acción desaparece cuando se establece un flujo de agua subterránea que restablece las condiciones de presión iniciales. En igualdad de condiciones, la desaparición del efecto es más rápida cuanto más permeable y extenso es el acuífero confinado en consideración.

En el caso de ríos, lagos pequeños o embalses, si los cambios de nivel son lentos y el acuífero confinado es muy permeable, éste no registra ningún cambio de nivel piezométrico apreciable.

Lo anterior, se refiere a acuíferos aislados hidráulicamente de las masas de agua que varían de nivel. Cuando el acuífero esté conectado directamente en alguno de sus límites, las variaciones del nivel repercuten en el acuífero a una cierta distancia, de acuerdo con su coeficiente de almacenamiento y capacidad de transmitir agua. La perturbación se amortigua al alejarse del lugar en que se ha producido la variación y al mismo tiempo sufre un retraso debido al coeficiente de almacenamiento.

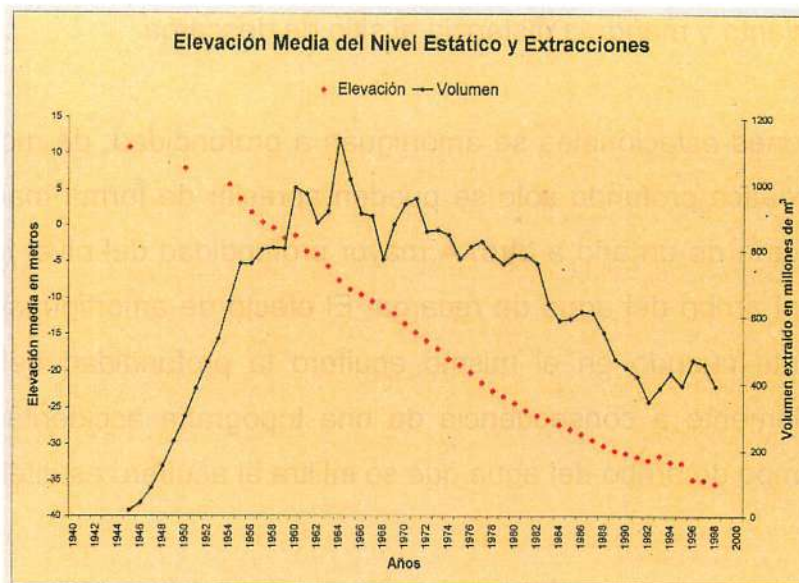
## **2.6 Variaciones del nivel piezométrico por extracción de agua**

La construcción de pozos, drenes y galerías para extracción de agua en un acuífero, produce un descenso de nivel piezométrico. Lo anterior, se refiere a la observación de niveles en el acuífero donde se realiza el bombeo. Si éste se realiza en un acuífero



superior y los niveles se miden en un acuífero inferior confinado, los niveles tienden a subir al iniciar el bombeo para luego volver al valor inicial, y de la misma forma tienden a bajar al pararse el bombeo.

Si el acuífero en explotación es libre, existe una disminución en el almacenamiento que carga al acuífero profundo, y éste tiende a disminuir su nivel piezométrico oponiéndose al efecto anterior. Si el acuífero profundo no está confinado con respecto al acuífero en explotación; al ceder agua aquél a éste, su nivel piezométrico descenderá paulatinamente.



**Figura 30** Relación entre la elevación del nivel estático vs el volumen de extracción en un acuífero del Estado de Sonora

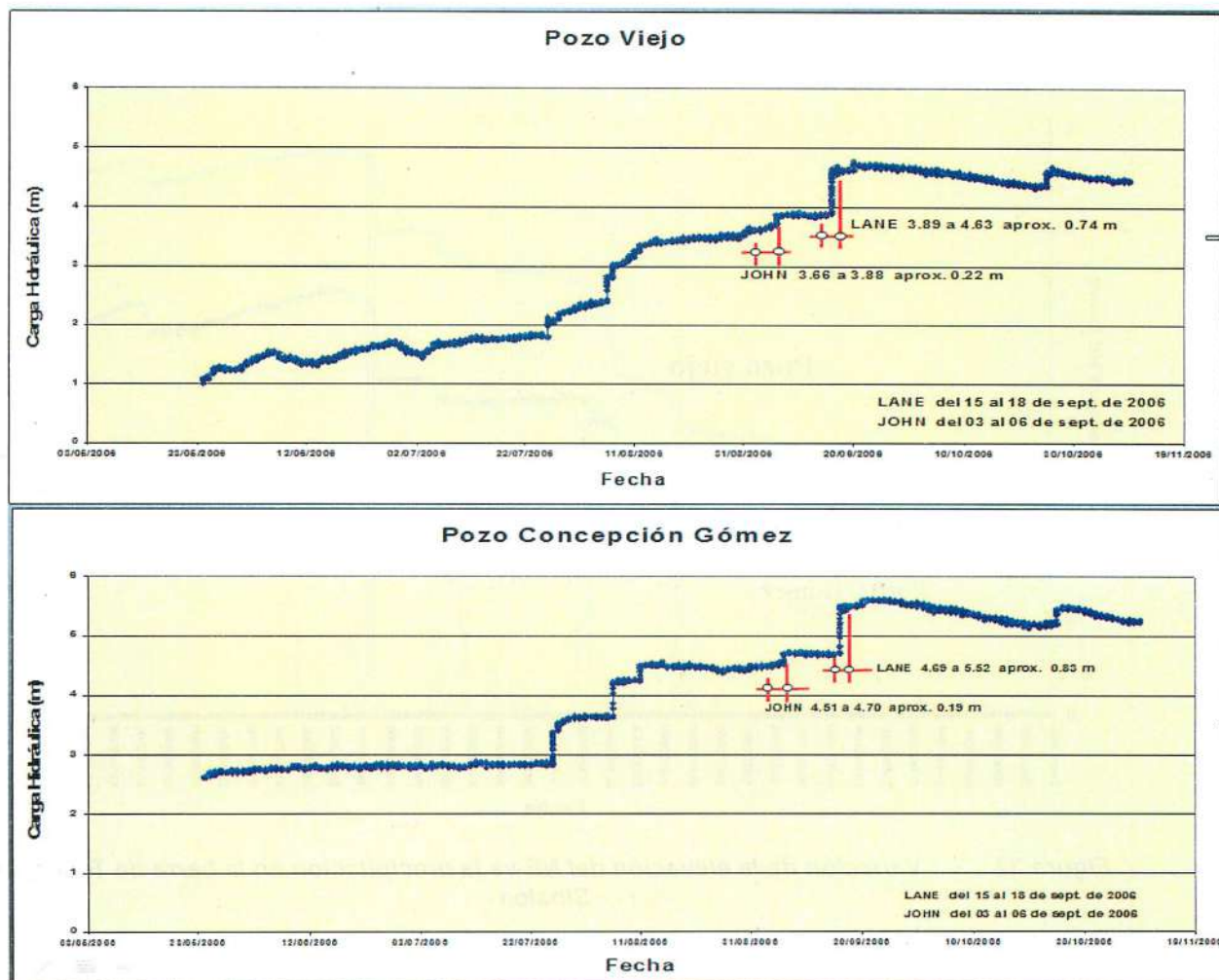
## 2.7 Variación de los niveles piezométricos debido a la recarga

La principal fuente de recarga a los acuíferos es la infiltración del agua de lluvia y ésta tiene un carácter intermitente. La recarga se produce de forma discontinua y variable, con mayor intensidad en una época que en otra. En algunas zonas las lluvias son casi

inexistentes o insuficientes para producir recarga durante varios meses, con lo cual aparecen claramente las estaciones en que se produce recarga y otras en las que no se produce.

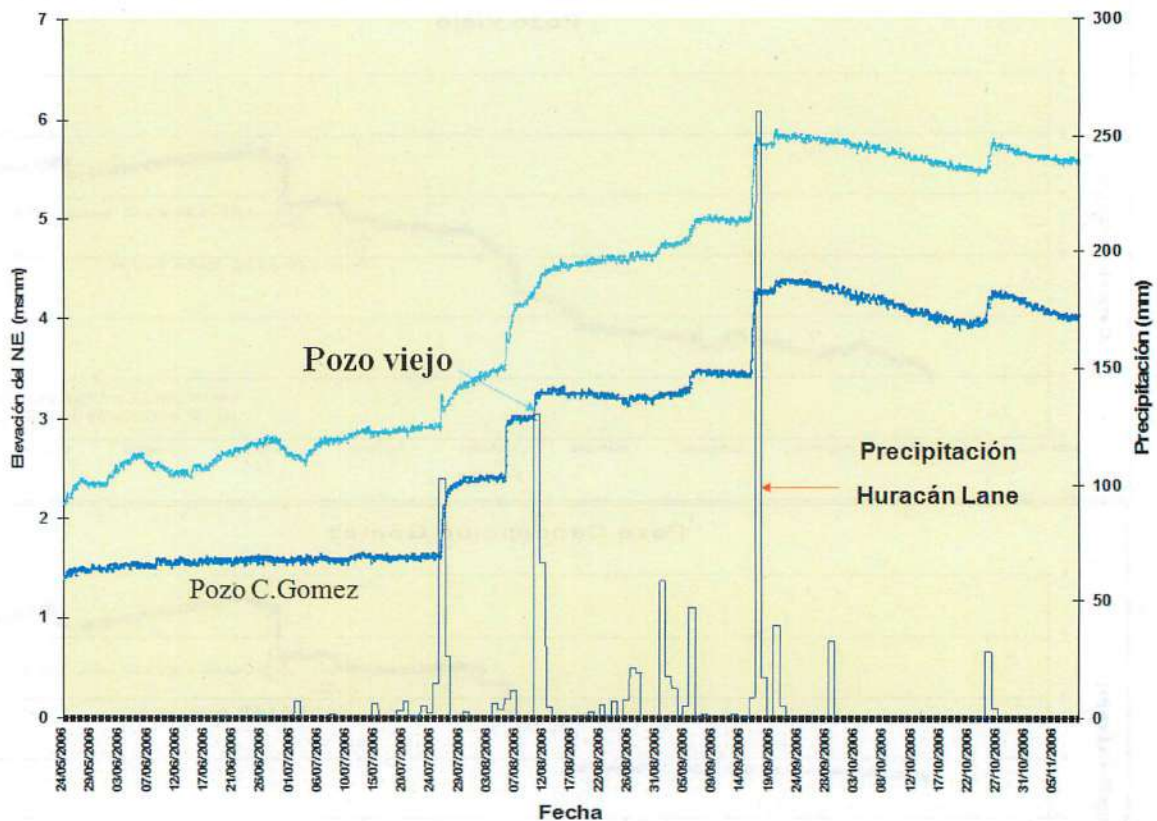
La recarga origina una elevación del nivel y posteriormente el flujo subterráneo circula hacia los puntos de descarga dando origen a un descenso de niveles que se mantiene hasta el siguiente período de recarga. En la figura 28 (Sinaloa), se muestra el efecto de recarga en un acuífero libre a consecuencia de lluvias ciclónicas, y también se aprecia el período de recesión. Las curvas de recesión tienen una forma exponencial y son más pronunciadas cuanto mayor es la transmisividad, menor el coeficiente de almacenamiento y menor la distancia al sitio de descarga.

Las variaciones estacionales se amortiguan a profundidad, de modo que en acuíferos con nivel freático profundo sólo se pueden apreciar de forma marcada las diferencias en pluviometría de un año a otro. A mayor profundidad del nivel freático, existe mayor retraso en el arribo del agua de recarga. El efecto de amortiguación sobre la recarga es importante cuando en el mismo acuífero la profundidad del nivel freático varía considerablemente a consecuencia de una topografía accidentada, ya que en cada lugar, el tiempo de arribo del agua que se infiltra al acuífero es diferente.



**Figura 31** Evolución de la elevación del nivel estático durante la ocurrencia de lluvias ciclónicas en la Barra de Teacapan, Sinaloa





**Figura 32** Variación de la elevación del NE vs la precipitación en la barra de Teacapan, Sinaloa

El efecto amortiguador es mucho menor cuando la profundidad del nivel freático es menor y constante en todo el acuífero. En acuíferos libres, con nivel poco profundo y en materiales arcillosos, la lenta circulación del agua de recarga en el medio no saturado debería producir un efecto lento de recarga y diferido. No obstante, en ocasiones en épocas húmedas se observa una respuesta inicial muy rápida (que no se explica en terrenos de baja permeabilidad), y que se asocia a la infiltración preferencial a través de discontinuidades creadas por raíces o grietas.

## **2.8 Oscilaciones de los niveles piezométricos en acuíferos con conexión hidráulica con cuerpos de agua superficial**

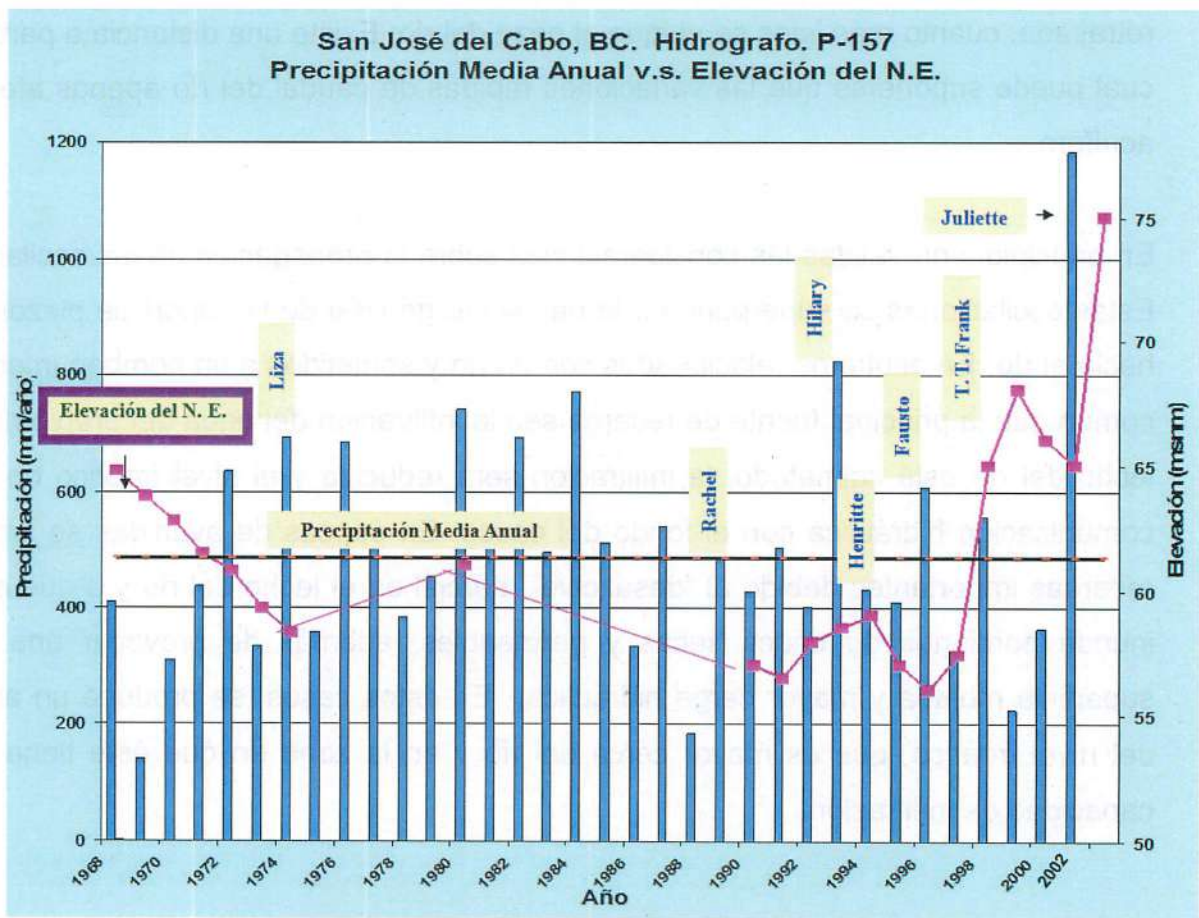
En acuíferos comunicados hidráulicamente con un río, los niveles del agua oscilan de acuerdo con el tirante del mismo. La magnitud de la oscilación será tanto menor y más retrasada, cuanto más lejos se ubique el pozo del río. Existe una distancia a partir de la cual puede suponerse que las variaciones rápidas de caudal del río apenas afectan al acuífero.

En principio, son válidas las consideraciones sobre la propagación de las oscilaciones. Estas oscilaciones se superponen a la pendiente general de la superficie piezométrica hacia el río. En acuíferos relacionados con un río y sometidos a un bombeo intenso, es común que la principal fuente de recarga sea la infiltración del agua del propio río. Si el lecho del río está colmatado, la infiltración será reducida y el nivel freático no tendrá comunicación hidráulica con el fondo del cauce. En épocas de avenidas se producen recargas importantes debido al "desazolve" parcial en el lecho del río y a que el agua inunda porciones de cauce secas y permeables, además de provocar una mayor superficie mojada y mayor carga hidráulica. En estos casos, se produce un ascenso del nivel freático, que es mayor cerca del río y en la zona en que éste tiene mayor capacidad de infiltración.

## **2.9 Fluctuaciones de gran período de niveles piezométricos.**

Debido a que, hidrológicamente, no todos los años son iguales, los niveles del agua subterránea varían de acuerdo con las características de cada ciclo. En ocasiones las variaciones anuales son pequeñas ya que, en general, los acuíferos tienen un almacenamiento elevado. La sucesión de varios años secos o de varios años húmedos

puede simular que los niveles tienen una tendencia a ascender o descender. Esta tendencia se apreciaría más claramente si se contará con un registro de niveles de 30 o más años. Los acuíferos con explotación intensiva pueden tener una tendencia al descenso de niveles piezométricos cuando la recarga es inferior a la extracción.



**Figura 33** Relación entre la precipitación derivada de lluvias ciclónicas vs la elevación del nivel estático en el acuífero de San José del Cabo, BCS

### **3 MEDICIONES DEL NIVEL DE LARGO PLAZO. ELEMENTOS DE UN PROGRAMA DE MONITOREO**

Un programa de monitoreo está integrado por cuatro elementos básicos:

- 1).- Objetivo de la red,
- 2).- Selección de pozos de monitoreo,
- 3).- Selección de la frecuencia de medición, e
- 4).- Instalación de un sistema de calidad y reporte de información

#### **3.1 Objetivos de las redes**

De acuerdo con Heath (1976), las redes de monitoreo se pueden clasificar en tres tipos de acuerdo con su objetivo: Red hidrológica, Red de administración y Red de referencia o Línea base. Para cumplir con los objetivos de cada programa el autor define los objetivos de cada red con la siguiente clasificación:

##### *Red hidrológica*

Tiene como objetivo conocer la condición del almacenamiento en un acuífero, mismo que se establece comparando la evolución del nivel mediante dos mapas de elevación elaborados en diferente periodo, generalmente de uno a más años. Esta red esta integrada por pozos de monitoreo espaciados sobre un área, la cual puede alcanzar a cubrir un municipio o inclusive varios estados. La elevación del nivel estático se mide simultáneamente en todos los pozos del acuífero. La densidad de los pozos requerida, es decir el número de pozos por unidad de área, depende de la complejidad de cada acuífero y del nivel de detalle requerido. Este puede variar en más de 100 pozos por



cada 2,590 km<sup>2</sup> (100/2590 km<sup>2</sup>) para un área compleja y detalle considerable, a dos pozos por cada 2,590 km<sup>2</sup> (2 /2590 km<sup>2</sup>) para superficies muy extensas.

#### *Red de administración del agua*

Su objetivo es determinar el efecto de la extracción por bombeo en los niveles del acuífero. Para ello, se requiere contar con pozos localizados cerca del centro o centros de bombeo. Esta red proporciona información de la respuesta de los niveles de agua a la extracción, así como datos del nivel de agua necesarios para la toma de decisiones. El número de pozos necesarios difiere de un sitio a otro dependiendo del tipo de acuífero, y del número y magnitud de los pozos de extracción. Como un mínimo, al menos un pozo de observación se debe colocar cerca de cada centro de bombeo o cono de abatimiento. Lo anterior implica que el pozo debe estar lo suficientemente cercano al centro de bombeo para mostrar la magnitud del abatimiento y al mismo tiempo mantenerse alejado de la influencia por la operación de los pozos.

Los pozos de monitoreo cercanos a los centros del bombeo, deben construirse con ademes ranurados en los mismos intervalos de las zonas productoras y a diferentes distancias a partir del centro de bombeo.

#### *Red de referencia o Línea base*

Las dos clases de redes mencionadas anteriormente están orientadas a evaluar el impacto de las actividades antropogénicas en el acuífero. No obstante, también se requiere conocer el comportamiento de los niveles en áreas que no estén afectadas por el bombeo u otras actividades antropogénicas. A este tipo de red se le conoce como red de referencia o línea base.

Los datos recabados tienen como objetivo mostrar la respuesta natural de los niveles de agua ante las variaciones climáticas y otro tipo de fenómenos naturales. Estos resultados aportan información necesaria para la interpretación, tanto de las redes de manejo, como las hidrológicas.

**Tabla 4 Objetivos de las redes de medición**

Tipo de Red	Objetivo	Resultados Esperados
Hidrológica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condición del almacenamiento</li> <li>- Determinar los límites del acuífero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapas de elevación, profundidad y evolución del Nivel Estático</li> </ul>
De Administración de Agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacto del bombeo en el almacenamiento</li> <li>- Propiedades hidráulicas del acuífero</li> <li>- Grado de confinamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapas de elevación y profundidad del Nivel estático a nivel local</li> <li>- Hidrógrafos de pozos</li> <li>- Evolución del NE v.s. bombeo</li> </ul>
De referencia o línea base	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinar el impacto de las variaciones climáticas en el acuífero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hidrógrafos mostrando la evolución natural del NE en diferentes regiones climáticas</li> </ul>

### 3.2 Selección de pozos de observación

Los programas de monitoreo dependen de una red de puntos de medición seleccionados expresamente para medir del nivel del agua. Por ello, se requiere especial atención en seleccionar el número y la ubicación de los puntos de monitoreo que conforman una red. En condiciones ideales los pozos seleccionados para una red deben proporcionar datos representativos del acuífero en el cual se están registrando las mediciones. Asimismo, se requiere determinar la distribución espacial de los pozos

y su profundidad; y considerar las fronteras físicas y geológicas de los acuíferos en estudio.

Una red de monitoreo para un acuífero heterogéneo, tipo multicapas, requiere la medición de niveles a diferente profundidad y en diferentes unidades geológicas. Por su parte, acuíferos de gran extensión de tipo regional que se extienden más allá de los límites estatales, requieren de la ubicación de puntos de observación en grandes extensiones. Si el objetivo de la red es monitorear las condiciones del agua subterránea o los efectos del cambio climático, se requiere que las mediciones no estén influenciadas por pozos en operación.

Por lo anterior, estas consideraciones deben ser tomadas en cuenta para el diseño de la red de acuerdo al objetivo de la misma. Si los pozos se localizan cerca de cuerpos de agua superficial como río, lagos y/o arroyos, también se requerirá de información relativa a los gastos de agua que transitan por éstos y establecer la posible conexión hidráulica entre el agua subterránea y el agua superficial.

El registro de los niveles de agua subterránea se realiza generalmente a través de piezómetros o pozos de producción o monitoreo. Aún cuando la medición en estos dispositivos representa la forma ideal de medir el nivel, una red integrada exclusivamente por éstos representa una alta inversión debido a los costos de construcción. Por ello, en la mayoría de los casos las redes piezométricas utilizan una combinación de pozos de producción, de monitoreo, o abandonados como puntos de medición.

En el caso de los pozos, la toma de niveles representa varias ventajas, ya que el registro se realiza en obras existentes que al mismo tiempo permiten la extracción de agua y conocer su calidad fisicoquímica. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de

los acuíferos y a las diferencias en la construcción de los pozos, la medición del nivel se ve afectada por diversos factores como:

- i) la longitud del ademe ranurado,
- ii) la profundidad del pozo,
- iii) la superficie, topografía, y
- iv) la presencia de uno o más acuíferos.

Por lo anterior, niveles que se obtienen en pozos de explotación o abandonados requieren de un análisis cuidadoso a fin seleccionar únicamente aquellos que representen apropiadamente la superficie piezométrica.

La medición de niveles en pozos permite conocer la condición del acuífero a una escala regional con una precisión razonable para fines prácticos. Sin embargo, en casos especiales donde se requiere obtener resultados a menor escala o de mayor precisión, es necesario construir con piezómetros como dispositivos de medición.

Por otra parte, los acuíferos del país se localizan en ambientes geológicos muy diversos de origen sedimentario, metamórfico, ígneo y terrenos de tipo cárstico, y a diferentes elevaciones topográficas. Por ello, el comportamiento del nivel puede diferir entre cuencas de manera significativa. Asimismo, debido a la extensión de los acuíferos y el uso del agua subterránea, el nivel de conocimiento hidrogeológico en cada uno varía notablemente. Existen acuíferos que se han estudiado de forma continua, mientras que otros solamente cuentan con información básica descriptiva. Por ello, en la propuesta de la red es necesario recopilar y homogeneizar la información hidrogeológica para generar un modelo hidrogeológico conceptual que sirva de apoyo a la definición de la red.



El modelo hidrogeológico conceptual debe considerar:

- i) la recarga, ocurrencia, movimiento y descarga del agua subterránea,
- ii) el tipo de acuífero en estudio,
- iii) su condición de explotación,
- iv) la configuración de la elevación del nivel estático y su evolución,
- v) la profundidad y las características de las zonas saturadas y acuitardos, y
- vi) la probable dirección de flujo subterráneo, así como los fenómenos que pueden modificar los niveles estáticos como: profundidad del pozo, ocurrencia de cuerpos de agua superficial, fallas geológicas, y variación topografía entre otros.

Los datos meteorológicos, así como de los cuerpos de agua superficial, generalmente están disponibles en bases de datos especializadas. De no ser el caso, algunas variables de monitoreo, tales como flujo base o precipitación, deberán ser recabadas en los sitios de estudio. Asimismo, datos relativos al uso del agua, volúmenes de bombeo, uso del agua y diámetros de los pozos, deben de ser recabados para apoyar la interpretación de los datos piezométricos con respecto al tiempo.

### **3.3 Distribución de los puntos de medición**

En la medición de niveles se considera el criterio de medir en el mayor número de sitios posibles. No obstante, el hecho de contar con un gran número de mediciones no implica necesariamente un mejor conocimiento del acuífero cuando las mediciones son cercanas entre sí, o no corresponden a un mismo acuífero. La aplicación de este criterio puede ser poco práctico e incrementar sustancialmente el costo del monitoreo.

La distribución de los puntos de monitoreo depende en gran parte de la complejidad hidrogeológica del acuífero y el nivel de información requerido. En sitios con una alta heterogeneidad geológica se requiere una red de monitoreo de mayor detalle y cobertura, comparada con aquellos que presenten una condición más homogénea. En la selección del espaciamiento se consideran tres variables básicas:

- i) las características hidrogeológicas del acuífero (grado de explotación, extensión...),
- ii) la escala de los mapas piezométricos y el espaciamiento entre las curvas,
- iii) y las condiciones locales que afectan la medición y configuración de la superficie piezométrica.

La densidad de puntos que forman una red puede variar de acuerdo con las características de cada acuífero, de un rango de 100 pozos por cada 2,590 km<sup>2</sup> (100/ 2,590) en zonas heterogéneas, a 2 pozos por cada 2,590 km<sup>2</sup> (2 / 2,590) en áreas homogéneas de gran extensión. El mínimo de puntos para construir una superficie y estimar la dirección del flujo subterráneo son tres. Ya que, con éstos se construye un mapa piezométrico. Sin embargo, este caso es una excepción ya que en la práctica existen variaciones laterales y verticales de conductividad hidráulica, presencia de zonas de recarga natural o inducida, y concentración del bombeo; factores que distorsionan sustantivamente la superficie piezométrica.

Como guía para apoyar la selección de puntos de monitoreo se sugiere aplicar una malla formada por triángulos equiláteros con vértices distantes de 3 a 6 km. Este espaciamiento es indicativo y sólo busca distribuir el mayor número de puntos, principalmente en acuíferos de gran extensión. En casos en que las condiciones de explotación han generado conos de abatimiento, o en zonas de gran heterogeneidad, la distancia entre los vértices se reduce hasta que éstos reproduzcan la superficie

piezométrica. En la aplicación de esta técnica se proyecta la red sobre un censo de pozos actualizado y se recopila información de los aprovechamientos existentes próximos al vértice teórico con una tolerancia de 1 km de radio alrededor de éste.

La ubicación de los puntos en coordenadas geográficas se realiza mediante geoposicionador satelital (GPS). En cada pozo de la red se consideran sus condiciones físicas, corte litológico, características constructivas, geológicas, y elevación del brocal. Con esta información se seleccionan aquellos que cumplen con el mayor número de condiciones para constituir un punto de medición de largo plazo (>15 años de vida útil). Cada sitio debe contar con vías de acceso, preferentemente vehiculares, y ser reconocido en mapas topográficos (1:50,000 INEGI).

#### **4 FRECUENCIA DE MEDICION**

La frecuencia de medición de los niveles es uno de los puntos más importantes en el programa de monitoreo. Aun cuando este punto está limitado por factores económicos, ésta se debe determinar de forma que considere la variabilidad de las fluctuaciones del nivel y los datos necesarios para caracterizar el comportamiento de un acuífero en un ciclo hidrológico completo. El registro de datos del nivel requiere de una o más décadas para completar un ciclo hidrológico que incluya las fluctuaciones y tendencias de los niveles con respecto al tiempo.

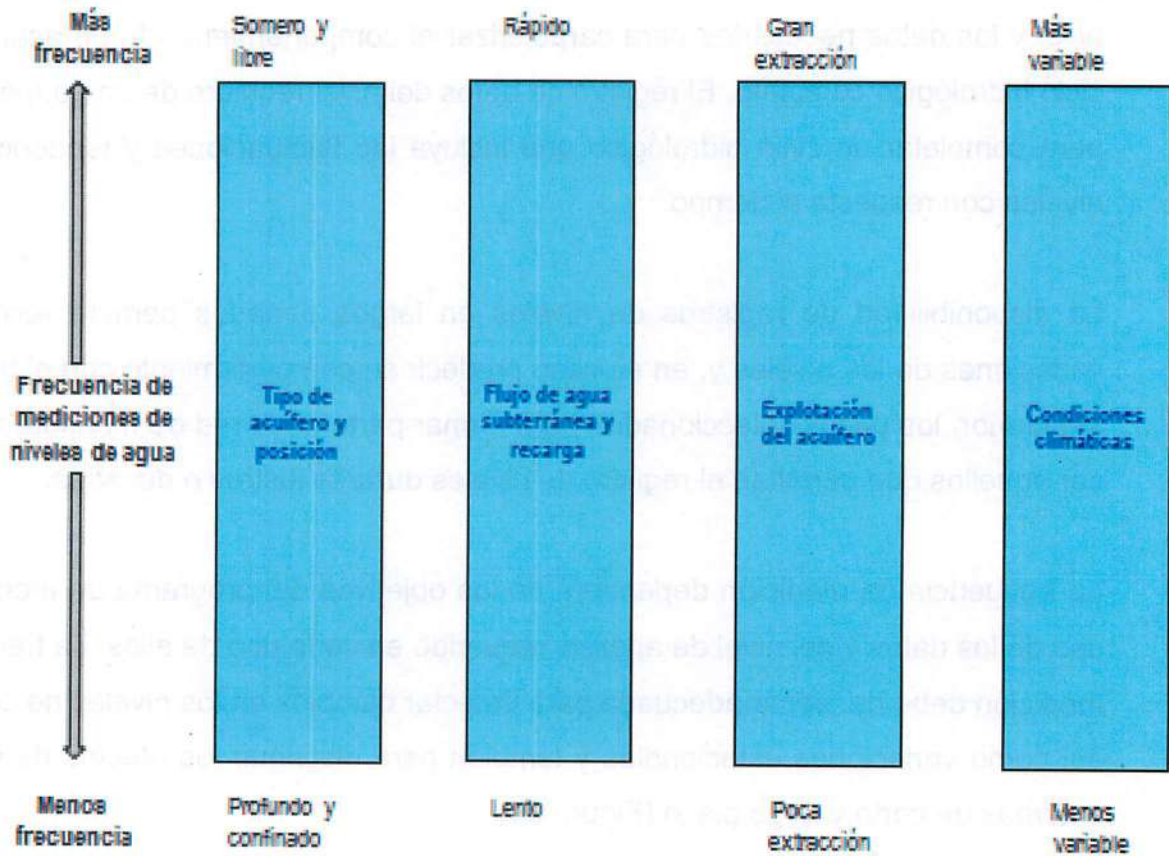
La disponibilidad de registros de niveles en largos periodos permite reconocer las variaciones de los niveles y, en su caso predecir su comportamiento con el tiempo. Por lo anterior, los pozos seleccionados para formar parte de la red de monitoreo deben de ser aquellos que permitan el registro de niveles durante lustros o décadas.

La frecuencia de medición dependerá de los objetivos del programa de monitoreo, del uso de los datos y del nivel de análisis requerido en cada uno de ellos. La frecuencia de medición debe de ser la adecuada para detectar cambios en los niveles de corto plazo, así como variaciones estacionales y también para distinguir los efectos de influencias externas de corto y largo plazo (Figura 34).

El monitoreo de niveles puede realizarse de manera continua o periódica. Las mediciones del tipo continuo incluyen la instalación de dispositivos automáticos dentro del pozo que se programan para medir los niveles a una determinada frecuencia de tiempo. El monitoreo continuo permite conocer las fluctuaciones en los niveles del agua. Hidrógrafos contruidos a partir de mediciones continuas se utilizan para identificar los efectos de explotación en un acuífero y proporcionan de manera precisa las variaciones máximas y mínimas de los niveles. Por lo anterior, se recomienda que



todo nuevo pozo de monitoreo sea inicialmente equipado con dispositivos de monitoreo a fin de identificar las magnitudes y la frecuencia en las fluctuaciones del nivel.



**Figura 34.** Selección de la frecuencia de medición en función de las características hidrogeológicas de cada acuífero. (USGS, 2002)

#### **4.1 El uso e importancia de datos de niveles de agua**

Los datos de niveles de agua se registran en función de los objetivos para los cuales serán utilizados. Datos en periodos cortos como días, semanas, o meses, permiten realizar un determinado tipo de estudio. Por ejemplo, pruebas de bombeo para determinar las propiedades hidráulicas de un acuífero, requieren del registro de niveles en periodos de horas o días. Por su parte, las mediciones para elaborar mapas de elevación y profundidad del nivel, requieren ser registradas en el menor tiempo posible, de tal manera que los niveles sean representativos de la misma condición hidráulica. Los datos de niveles también se registran en periodos de días o semanas dependiendo de la logística y disponibilidad de acceso a los sitios de monitoreo. La Tabla 5 muestra los diferentes intervalos para el registro de niveles de acuerdo con el objetivo para el que se utilizarán los datos.

La disponibilidad de datos de largo plazo es fundamental para el conocimiento y solución de la mayoría de los problemas relacionados con la disponibilidad y uso sostenible del agua subterránea. Los periodos de tiempo que involucran años y décadas son indispensables para evaluar los efectos de los cambios climáticos, monitorear los efectos de la extracción en acuíferos regionales, o para tener suficientes datos de análisis de la tendencia de los niveles del agua. La mayoría de los datos de largo plazo involucran el uso de herramientas analíticas y computacionales. De tal forma que las mediciones de los niveles son esenciales para la calibración de los modelos de agua subterránea.

**Tabla 5**

Objetivo de la medición	Periodo requerido para el registro de los datos			
	Días/ semanas	Meses	Años	Décadas
Determinar las propiedades hidráulicas del acuífero	√	√		
Elaborar mapa de profundidad y elevación del nivel freático	√	√		
Registro de cambios de corta duración durante eventos de recarga	√	√	√	
Registro de efectos del cambio climático			√	√
Registro de efectos regionales provocados por la explotación de las aguas subterráneas			√	√
Análisis estadístico de las tendencias de niveles			√	√
Monitoreo en los cambios de dirección del flujo subterráneo	√	√	√	√
Monitoreo de la interacción del agua superficial y subterránea	√	√	√	√
Modelación de flujo y transporte de solutos	√	√	√	√

Cuando la respuesta hidráulica del acuífero es muy lenta, o cuando la frecuencia y magnitud de los cambios de nivel no sean grandes, no es necesario un monitoreo continuo del nivel. El monitoreo continuo es una de las técnicas más apropiadas para registrar fluctuaciones en los niveles en épocas de sequía o de recarga rápida, o cuando la extracción del agua puede provocar cambios significativos del nivel en corto tiempo.

Las mediciones periódicas son aquellas que se realizan a intervalos de tiempos establecidos tales como semana, meses o años y son generalmente utilizadas para el mapeo de la superficie piezométrica y para reducir los costos del monitoreo de largo plazo. Las mediciones periódicas se realizan con dispositivos manuales de medición. Es muy probable que durante las mediciones puedan ocurrir variaciones de corto plazo y que éstas no puedan ser registradas en su momento, por lo que existe el riesgo de que se pierda información.

Los recorridos piezométricos, ya sea de tipo mensual, semestral o anual, son mediciones especiales en los cuales todos los pozos de monitoreo involucrados se miden al mismo tiempo. Este tipo de recorridos permite determinar en tiempo y espacio, la condición de la superficie piezométrica en un acuífero y establecer un mapa piezométrico, gradiente hidráulico o determinar fronteras hidráulicas. Estas mediciones también se utilizan como componente de monitoreo de largo plazo y para complementar las mediciones realizadas en un número más reducido de pozos.

#### **4.2 Reporte de datos piezométricos**

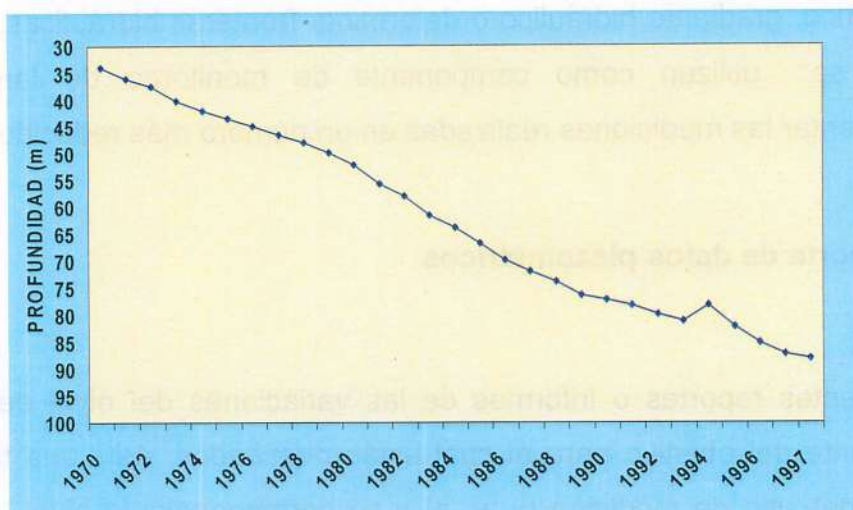
Los diferentes reportes o informes de las variaciones del nivel del agua, dependen básicamente del objetivo para el cual están destinados. Así una tabla incluyendo la posición del sitio de medición (x, y, z) y su correspondiente nivel, son datos básicos para determinar la condición de los niveles en un acuífero. En otros casos se requerirá que estos datos tomados en el mismo sitio en diferentes periodos, sean comparados entre sí a fin de mostrar alguna evolución en la tendencia de los datos provocada por variaciones en la precipitación, uso del agua u otro factor hidrológico.

Los hidrógrafos de pozos son gráficas que muestran las variaciones de los niveles respecto al tiempo, y son una de las formas más simples y útiles para la representación de datos piezométricos. Estos gráficos permiten una descripción visual del rango de las fluctuaciones de los niveles de las variaciones estacionales y de los efectos acumulados en el corto y largo plazo. En general, el valor y la confiabilidad de la información mejoran a medida que se incrementan las mediciones de la frecuencia y el periodo de medición.

Los hidrógrafos que se construyen a partir de datos espaciados en tiempo o que presentan ausencia de datos en ciertos periodos, son difíciles de interpretar o pueden

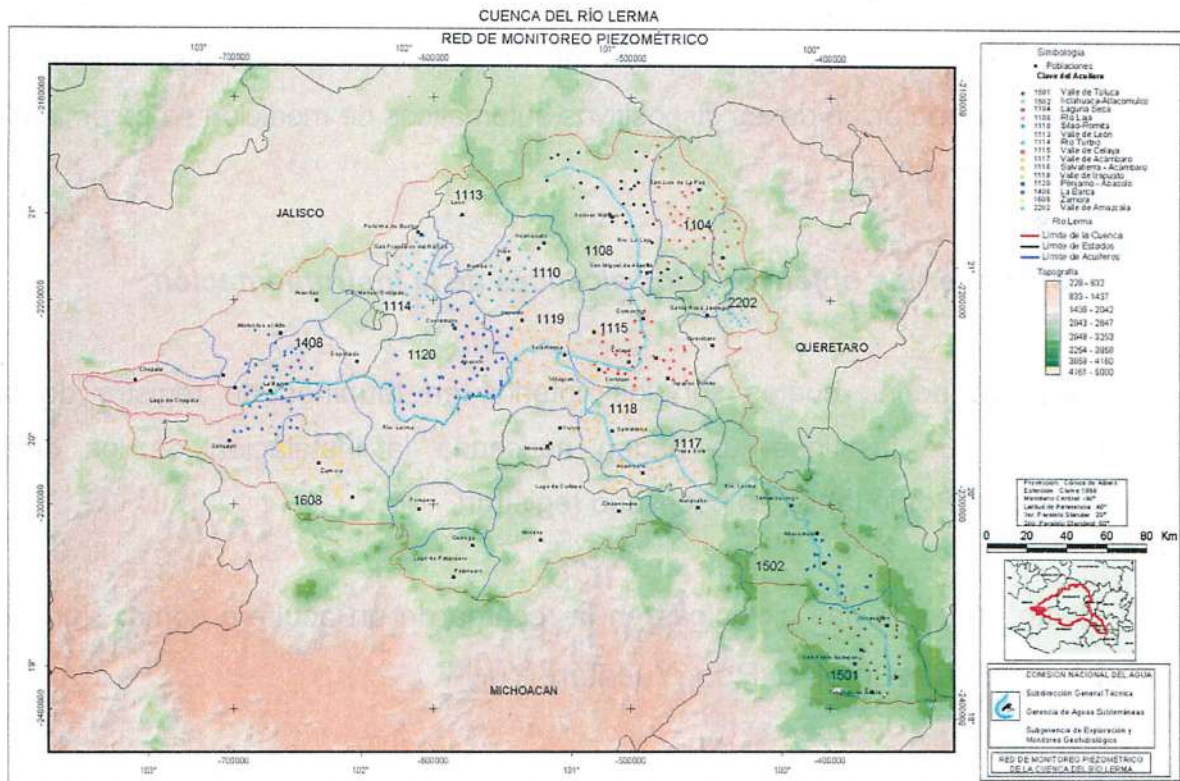


mostrar falsas tendencias sobre el comportamiento de los niveles. Dependiendo de la frecuencia y periodo de medición, los hidrógrafos se pueden construir para mostrar el comportamiento histórico de los niveles, comparar su tendencia actual y a futuro, y la evolución de los datos.



**Figura 34** *Hidrógrafos de pozos ubicados en el acuífero del valle de Aguascalientes mostrando la evolución del nivel estático de 1970 a 2000*

El acceso a los datos de niveles y su reporte se pueden mejorar sustancialmente mediante la incorporación de sistemas de información geográfica (GIS) que permiten visualizar tanto los puntos de medición, como otras características hidrológicas y geográficas de cada sitio. La disponibilidad de transferencia de información mediante Internet, aumenta sustantivamente la capacidad de trasmisión y almacenamiento de datos, de tal forma que hidrógrafos de pozos, mapas de elevaciones y profundidades, tablas con mediciones de nivel y otro tipo de información se puede configurar y mostrarse de manera inmediata en Internet. Lo anterior, permite que la información esté disponible a todos los usuarios en tiempo real.



**Ubicación de pozos de monitoreo en los acuíferos de la Cuenca Lerma Santiago**

## 5 TRANSDUCTORES DE PRESIÓN

La medición de niveles de agua de largo plazo es una componente necesaria para muchos estudios hidrogeológicos. Una técnica utilizada para ello es mediante el uso de *dataloggers*, los cuales consisten de microprocesadores conectados a traductores que se instalan por debajo del nivel del agua para monitorear. Los microprocesadores instalados en estos dispositivos permiten el registro automático de la variación de los niveles en diferentes periodos de tiempo, que van de segundos, minutos, horas, o días o inclusive años. El uso de este tipo de dispositivos cada vez es más frecuente y existe una gran variedad de modelos a nivel comercial



El objetivo de la instrumentación de las redes de monitoreo es recabar y generar información piezométrica para apoyar el manejo sostenible de los acuíferos. Para la instalación y operación de los dispositivos automáticos de medición se recomienda seguir las siguientes etapas:

**1. Establecer los objetivos y los alcances de la instrumentación**

Se requiere definir cuáles son los criterios en términos de registro de la carga hidráulica, que justifiquen o hagan necesaria la instalación de los dispositivos automáticos. Por lo tanto, es necesario registrar:

El efecto de las lluvias ciclónicas en la recarga de un acuífero como: San José del Cabo, BCS, Cozumel, Q.Roo, Yucatán, Yuc.

Variación de niveles en acuíferos de gran superficie o con pozos de monitoreo distantes entre sí (>10 km) como: Acuíferos de Chihuahua, Coahuila, Sonora

La variación de niveles en zonas montañosas, aisladas o de difícil acceso como: Saltillo-Monterrey, Conejos Medanos, Chih.

La evolución del nivel en acuíferos con altos ritmos de abatimientos (>3 m/año), en zonas urbanas o agrícolas como: Costa de Hermosillo, Son., Sto. Domingo, B.C., Comarca Lagunera, San Luis Potosí, SLP, Aguascalientes, Ags.

La variación del nivel en áreas de reserva ecológica o zonas naturales protegidas como Valle del Hundido, Coah., Zona Norte de Quintana Roo

La comunicación hidráulica entre las aguas subterráneas con cuerpos de agua superficial como: ríos, arroyos, lagos, lagunas, o manantiales.

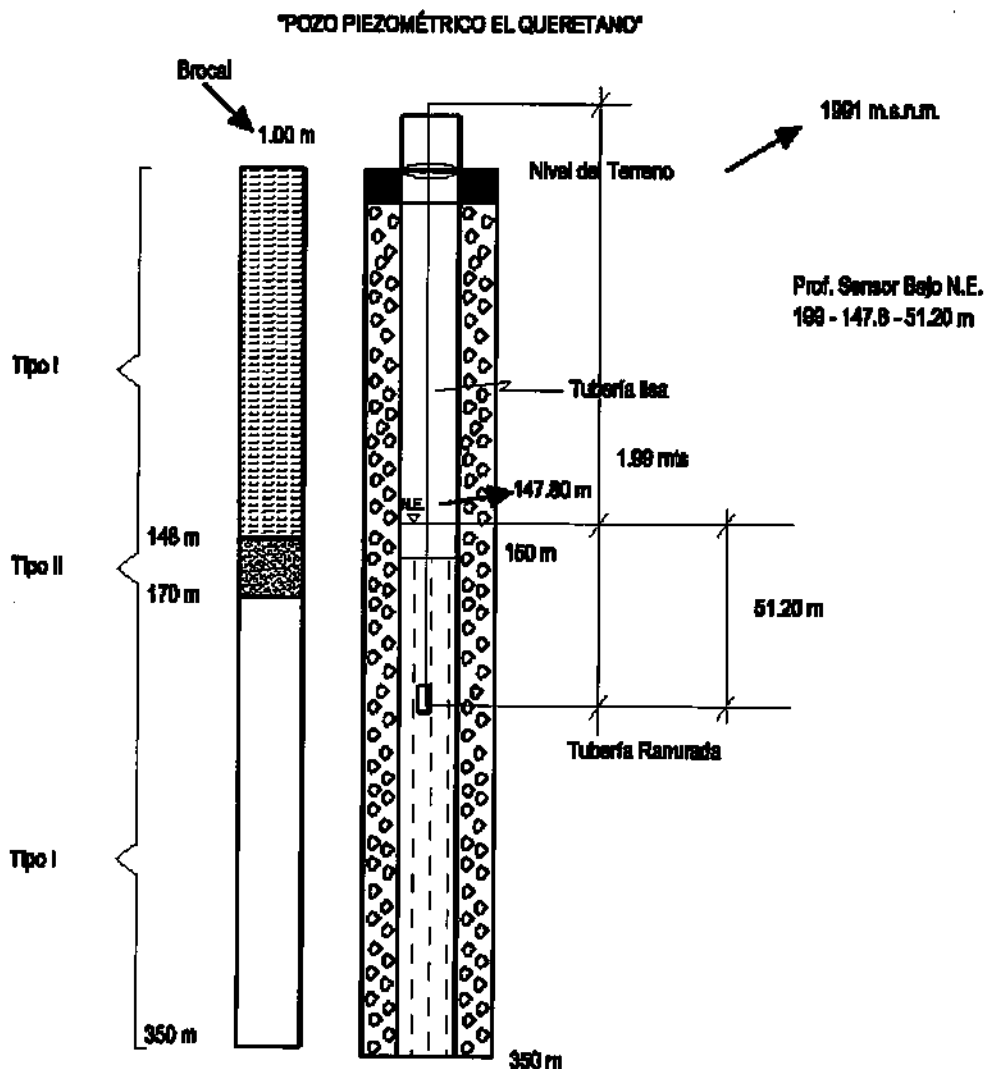
La evolución de intrusión salina o deterioro de la calidad del agua subterránea en términos de carga hidráulica.

**2. *Recabar y analizar la información disponible del acuífero, de los pozos a instrumentar***

Se requiere revisar la información de los pozos que comprenden redes piezométricas con objeto de seleccionar aquellas susceptibles a instalarles los transductores. Cada pozo requiere contar con los datos siguientes:

- i) ubicación del sitio en coordenadas geográficas,
- ii) corte litológico o registro eléctrico,
- iii) croquis de la terminación del pozo, incluyendo; diámetro de perforación y ademe, ampliaciones, tipo de ademe, longitud de los tramos de tubería lisa y ranurada, tipo de engravado, cementado,
- iv) calidad del agua subterránea,
- v) videograbación del pozo (si está disponible ), e historial piezométrico (hidrógrafos). (Figura 35)





**Figura 35** Información de la terminación de un pozo seleccionado para la instalación de un transductor

### 3. Visita de campo a los pozos susceptibles de instrumentar.

Los pozos de la red o piezómetros propuestos se deberán visitar para conocer directamente las condiciones físicas de los mismos y su ubicación; e identificar aquellos aspectos técnicos y administrativos que representen un obstáculo para la

instrumentación de los pozos. En particular se requiere reconocer al propietario del pozo y predio, y determinar las condiciones de seguridad para el resguardo de las sondas de acciones de vandalismo, o protección contra fenómenos meteorológicos extremos

**4. Realizar las adaptaciones físicas a pozos a instrumentar, así como en las instalaciones a los alrededores**

A partir de los recorridos de campo se realizarán adaptaciones a los pozos seleccionados para instalar los transductores de presión, con especial énfasis en su seguridad y colocación, Estas adaptaciones varían de acuerdo con las condiciones físicas del sitio, las características del pozo y el tipo de transductor a instalar. Pueden incluir desde una caseta, hasta una tapa abatible en el brocal del pozo. Ver ejemplos:

**5. Selección de transductores (dataloggers)**

Actualmente se cuenta con dispositivos electrónicos que permiten el registro de niveles de forma automática y continua. En general, existen dos tipos de instrumentos de medición:

*Tipo A.* Está conformado por un gabinete en donde se localiza el sistema que programa y almacena la información del transductor conjuntamente con una batería que lo alimenta, y el transductor de presión con su respectivo cable.

*Tipo B.* El transductor o datalogger es una sola pieza que contiene todo el sistema electrónico, sensores y batería en un solo instrumento. Este se programa y permite el almacenamiento de la información. Existen versiones que permiten el cambio de baterías, y otras en las cuales las baterías no se remplazan hasta alcanzar su vida útil, misma que es de aproximadamente 10 años.

## **6. *Instalación y Prueba de Operación del Traductor***

Una vez adquiridos los instrumentos, éstos se deben colocar en los sitios seleccionados previamente con el apoyo de equipo complementario según sea el caso (carretes con cable de acero inoxidable, tornillos, rondanas y sujetadores de acero inoxidable, tapa-pozo con candado conforme a los diámetros de ademe de los pozos). Se debe seleccionar el modelo del transductor y la profundidad a la que se colocará, éste dependerá de la profundidad y rango de fluctuaciones del nivel en cada acuífero.

Para cada pozo piloto se seleccionará la longitud del cable apropiada. Para descender el instrumento se requiere de un carrete con cable de acero inoxidable y tapa-pozo con candado conforme a los diámetros de ademe. Se debe contar con una computadora portátil (Lap-top), con el software instalado para programar los intervalos de medición lineal y recuperar la información en las etapas de prueba después de la instalación.

Las pruebas se realizarán en pozos no equipados o piezómetros donde el transductor debe descender libremente a la profundidad deseada. En el caso de realizar alguna prueba en pozos equipados, se debe colocar un tubo de PVC. De 5cm a 10 cm de diámetro entre el ademe y la del equipo de bombeo, con una adaptación para sostener el cable de acero inoxidable que sujetará al transductor de presión

Antes de iniciar las pruebas de instalación, se revisará que los transductores cuenten con los accesorios y el equipo complementario para su funcionamiento y serán bajados con las maniobras necesarias a la profundidad que se haya aprobado, por debajo del nivel estático. Una vez colocados los transductores a la profundidad deseada, el lector óptico de éstos se conectará a la computadora portátil y se procederá a programar los intervalos de medición a cada 24 h (el intervalo de medición dependerá del tipo de

acuífero a monitorear), en cada uno de los pozos y/o piezómetros con el propósito de descartar el posible efecto del bombeo diario sobre los niveles estáticos y poder relacionar eventos de lluvia con recarga a los acuíferos. Después de la programación se registrará una lectura para verificar el buen funcionamiento de los equipos y se hará una comparación a partir de una medición del nivel estático en cada pozo y/o piezómetro, que se deberá realizar previamente con una sonda eléctrica manual.

Si las condiciones de los pozos no son las adecuadas, se ubicarán nuevos sitios que reúnan las condiciones necesarias, ya que las metas de la instrumentación de la red piezométrica será la de establecer la cantidad de pozos piloto que se requieren para colocar dichos transductores en los mismos y tener una red automatizada total en el acuífero.

#### ***7. Recuperación de los datos almacenados.***

La técnica de extracción de los datos almacenados en las sondas depende del modelo y marca de cada uno de éstos. Se extraerán los datos almacenados por el transductor mediante una Lap-top y se reprogramará según sea el tipo de transductor para liberar la memoria de almacenamiento.

#### ***8. Problemas comunes en la instalación de los transductores.***

Es necesario realizar un video de los pozos piloto o piezómetros en los que se vayan a instalar los transductores a fin de conocer el estado físico de éstos. Ya que en el caso de pozos fuera de operación en periodos o años, pueden presentar azolve u obstrucciones con algún objeto. También se pueden presentar problemas de corrosión debido a la calidad del agua subterránea, por ello se deben utilizar ganchos, tornillos, sujetadores y cables, todos ellos de acero inoxidable.



Cuando se tenga conocimiento de la presencia de agua dura, con concentraciones altas de sólidos suspendidos, contaminación biológica o productos químicos en la calidad del agua subterránea, se requiere limpiar uno de los agujeros de circulación del transductor utilizando productos para la remoción de escamas del agua dura y de contaminación bacteriológica o química. Cuando los pozos piloto o piezómetros no cuentan con protección, se deberá elaborar una tapa de fierro con adaptaciones para sostener el cable de acero y colocar candados de seguridad.

*Ejemplo. Extracción de los datos almacenados por el Levellogger en el pozo piezométrico.*

Location:						
AICM-35						
LEVEL						
Unit						
cm						
Offset						
-0.84 cm						
Altitude						
2234 m						
TEMPERATURE						
Unit						
Deg C						
	Date	Time	100 ms	LEVEL	TEMPERATURE	
1	08/06/2009	17:11:29	0	0.9776	20.764	
2	08/06/2009	17:11:34	0	0.9631	20.764	
3	08/06/2009	17:11:39	0	0.868	20.769	
4	08/06/2009	17:11:44	0	0.8986	20.776	
5	08/06/2009	17:11:49	0	0.8475	20.787	
6	08/06/2009	17:11:54	0	0.8546	20.802	
7	08/06/2009	17:11:59	0	7.1125	20.817	
8	08/06/2009	17:12:04	0	8.7442	20.82	
9	08/06/2009	17:12:09	0	9.0596	20.771	
10	08/06/2009	17:12:14	0	9.162	20.679	

11	08/06/2009	17:12:19	0	9.3821	20.554
12	08/06/2009	17:12:24	0	9.4103	20.41
13	08/06/2009	17:12:29	0	9.4975	20.256
14	08/06/2009	17:12:34	0	2.9225	20.093
15	08/06/2009	17:12:39	0	2.7553	19.937
16	08/06/2009	17:12:44	0	3.4645	19.788
17	08/06/2009	17:12:49	0	2.8523	19.647
18	08/06/2009	17:12:54	0	3.0913	19.519
19	08/06/2009	17:12:59	0	5.9727	19.403
20	08/06/2009	17:13:04	0	5.3853	19.299
21	08/06/2009	17:13:09	0	7.7846	19.195
22	08/06/2009	17:13:14	0	7.5603	19.097
23	08/06/2009	17:13:19	0	1.9127	18.997
24	08/06/2009	17:13:24	0	2.2103	18.907

Cálculo de la Instrumentación del Pozo "El Queretano" ubicado en el Acuífero de Laguna Seca, Guanajuato.

Datos:

Profundidad del Nivel Estático: 147.80 mts.

Profundidad del sensor: 199.00 mts.

Profundidad del sensor debajo del nivel estático: 51.20 mts.

Elevación del terreno en metros sobre el nivel del mar: 1991.0

Elevación del terreno - Profundidad del sensor =  $1991 - 199 = 1792$  msnm; 1792 msnm es el punto de referencia que se toma para sumar los valores de nivel del sensor y quede en elevación sobre el nivel del mar.

## Cálculo

**Tabla 6 Datos extraídos del sensor**

Fecha	Hora	Nivel (cms)	T °C
2004/04/30	16:00:00.0	5181	31.49
2004/04/30	17:00:00.0	5180	31.49
2004/04/30	18:00:00.0	5177	31.47
2004/04/30	19:00:00.0	5175	31.43
2004/04/30	20:00:00.0	5176	31.47
2004/04/30	21:00:00.0	5177	31.44
2004/04/30	22:00:00.0	5176	31.45
2004/04/30	23:00:00.0	5177	31.40
2004/05/01	00:00:00.0	5176	31.39
2004/05/01	01:00:00.0	5175	31.41
2004/05/01	02:00:00.0	5175	31.37
2004/05/01	03:00:00.0	5175	31.37

**Ejemplo 1:**

- Datos sondas:

2004/04/30 17:00 hrs. 5181 cms. 31.49°C

- Compensación barométrica:

Datos de la presión barométrica de la estación meteorológica Presa Allende, Gto., que es la más cercana al pozo.

$$814.00 \text{ g/cm}^2 = 814 \text{ cms.}$$

Datos de la presión barométrica para la altitud del sitio según manual del levellogger:

$$\text{Altitud} = 1991 \text{ msnm}$$

$$950 \text{ cms} (1991/1000) = 950 - 199 = 751 \text{ cms.}$$

Compensación Barométrica =  $814 - 751 = 63$  cms.

Por lo tanto:

Nivel de sonda – Compensación Barométrica = Columna de agua real.

$$5181 \text{ cms} - 63 \text{ cms} = 5118 \text{ cms} = 51.18 \text{ mts.}$$

**Ejemplo 2:**

- Datos sondas:

2004/05/01 01:00 hrs. 5175 cms. 31.41°C

- Compensación barométrica:

Datos de la presión barométrica de la estación meteorológica Presa Allende, Gto., que es la más cercana al pozo.

$$816.00 \text{ g/cm}^2 = 816 \text{ cms.}$$

Datos de la presión barométrica para la altitud del sitio según manual del levellogger:

Altitud = 1991 msnm

$$950 \text{ cms} (1991/1000) = 950 - 199 = 751 \text{ cms.}$$



Compensación Barométrica =  $816 - 751 = 65$  cms.

Por lo tanto:

Nivel de sonda – Compensación Barométrica = Columna de agua real.

$5175$  cms –  $65$  cms =  $5110$  cms =  $51.10$  mts.

## **6 BIBLIOGRAFÍA**

- Custodio E. y Llamas M.R., 1983. Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Segunda Edición, Tomos I y II. Barcelona, España.
- Díaz-Viera M., Aspectos Metodológicos y Prácticos para el Diseño Óptimo de Redes de Monitoreo en Aguas Subterráneas con Fines de Manejo, 1er Seminario de Simulación Numérica de Acuíferos, U.A.M., México, D.F., 5-6 de octubre de 1999.
- Domenico, P.A., and Schwartz, F.W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology. NY, John Wiley and Sons, 824 p.
- Davis, S.N., and De Wiest, R.J.M., 1996, Hidrogeología. NY John Wiley and Sons, 463 pp
- Heath, R.C., 1976, Design of Ground Water level Observation Well Programs, Groundwater, Vol. 14 , No.2, pp. 71-77
- Heath, R.C., 1983, Basic Groundwater Hydrology, USGS, Water Supply Paper 2220
- Fetter, C.W., 2002. Applied Hydrogeology. 3da. Edición. Columbus. Merril Publishing
- Freeze, R Allen and John A. Cherry. 1979. Groundwater. Englewoo. New Jersey.

- Nielsen, D., M., 1991. Practical Handbook of Groundwater Monitoring . Lewis Publisher. Cap. 9. Acquisition and Interpretation of water level data. ISBN 0-87371-124-6
- McWhorter, B.D., and Sunada, K., D., 1977, Groundwater Hydrology and Hydraulics Water Resources Publications. P.O. Box 303. Fort Collins, CO, USA
- Saines, M., 1981, Errors in Interpretation of Groundwater level data. Groundwater Monitoring Review, Vol. 1, No. 1, pp 56-61
- USEPA, 1990. Groundwater Vol. 1 and II. Groundwater and contamination. EPA/625/6-90/016.

## **ANEXO I**

### **Pasos a seguir en el Rediseño o Reactivación de una Red de Monitoreo Piezométrico.**

#### **1.- Censo de pozos localizados en un plano.**

A partir de un plano que contenga el censo de pozos que constituye una red de monitoreo piezométrico que históricamente se ha sido utilizada para efectos de medición, se realiza el rediseño o reactivación de una nueva red. Esta nueva red debe ser más eficiente al incluir menos pozos, abatiendo costos de medición, a la vez que su número sea suficiente para la determinación estadísticamente confiable (mínimo error) y representativa de la posición a nivel regional del nivel estático del agua subterránea. Así, con base a la metodología geoestadística propuesta por Olea (1982, 1984), se presenta el caso del acuífero Soconusco ubicado en el estado de Chiapas. En este acuífero se ha levantado un censo de 385 pozos piloto, de los cuales 312 contienen información del nivel estático, dentro de una superficie de 3,081 km<sup>2</sup> (Figura A1).



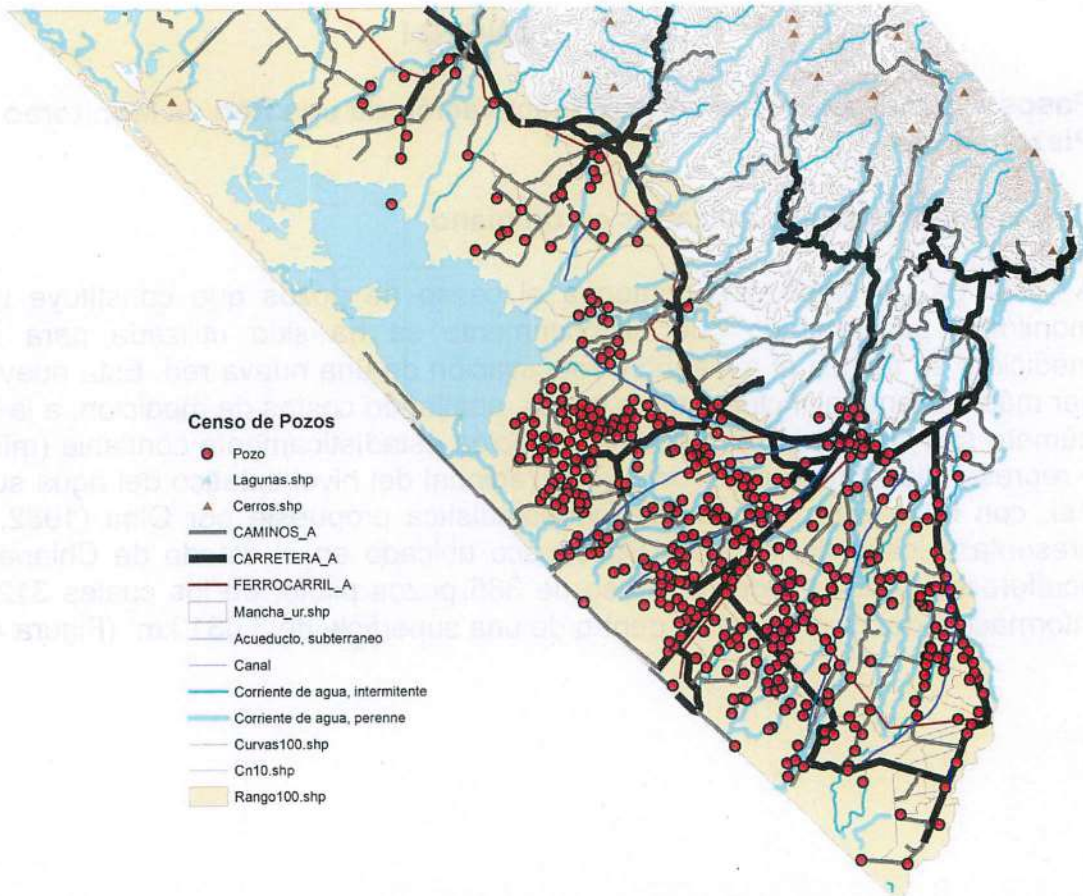


Figura A1. Censo de 385 pozos piloto, de los cuales 312 tienen información del nivel estático, con una superficie de 3,081 Km<sup>2</sup>.

**2.- Rediseño de la red.**

Para el rediseño de la red, se traza en papel albanene una malla triangular (triángulos equiláteros), máxima de 6 km por lado a una escala que concuerde con la del plano del censo (e.g.: 1:50,000). Esta malla se sobrepone en el plano del censo a fin de que en la intersección de los vértices se defina un punto de medición o pozo piloto (nodo). De no ser esto posible se toma en cuenta el pozo (nuevo nodo) más cercano a la intersección. Este pozo (nodo) seleccionado de preferencia deberá ser un pozo abandonado sin equipo de bombeo o en su defecto, de estar equipado deberá contar con el espacio suficiente entre la tubería de ademe y la columna de bombeo con el fin de que se pueda introducir la sonda eléctrica manual para llevar a cabo la medición del nivel estático respectivo. Se debe contar como mínimo con la siguiente mínima información: croquis de terminación, corte litológico, registro eléctrico, y datos hidráulicos como profundidad al nivel estático (NE), profundidad al nivel dinámico (ND), caudal en lps, así como su historial piezométrico. En dado caso que no cumpla con la información mencionada se buscarán otras alternativas dentro de un radio máximo de 2 km, a fin de

encontrar un pozo que cumpla con las características mencionadas y quede lo más cerca posible de la intersección. Para el ejemplo del acuífero del Soconusco, Chiapas, y por la densidad de pozos piloto, se diseñó una malla triangular de 6 km por lado, analizándose la distribución espacial de los aprovechamientos en el plano de ubicación del censo de aprovechamientos y tomando en cuenta la topografía del área, la geología y la hidrogeología, entre otras características. Es importante mencionar que de acuerdo a lo anterior, pueden presentarse casos en que se haga necesario incrementar o reducir la longitud de la malla triangular, a fin de aumentar o disminuir el número de pozos piloto (nodos). De esta manera, la longitud de 6 km no constituye una distancia definitiva para el diseño de una nueva red, debido a que ésta es función de las características hidrogeológicas particulares que se puedan presentar en el área de trabajo.

Por otra parte, la red deberá ser rediseñada a fin de que las observaciones a realizar permitan: I) ser representativas del nivel piezométrico del acuífero en estudio, II) conocer el comportamiento actual y a largo plazo (>10 años); III) predecir su evolución futura en respuesta a las acciones naturales o antropogénicas; IV) coleccionar muestras y constituir un plan maestro para la recolección de información. Los sitios de monitoreo seleccionados para formar parte de la red de monitoreo piezométrico deberán garantizar que las mediciones se puedan realizar de forma continua durante largos periodos (>10 años).

Al mismo tiempo deberá indicar los criterios para la selección de sitios de monitoreo, así como los utilizados para verificar las mediciones piezométricas (Figura A2).



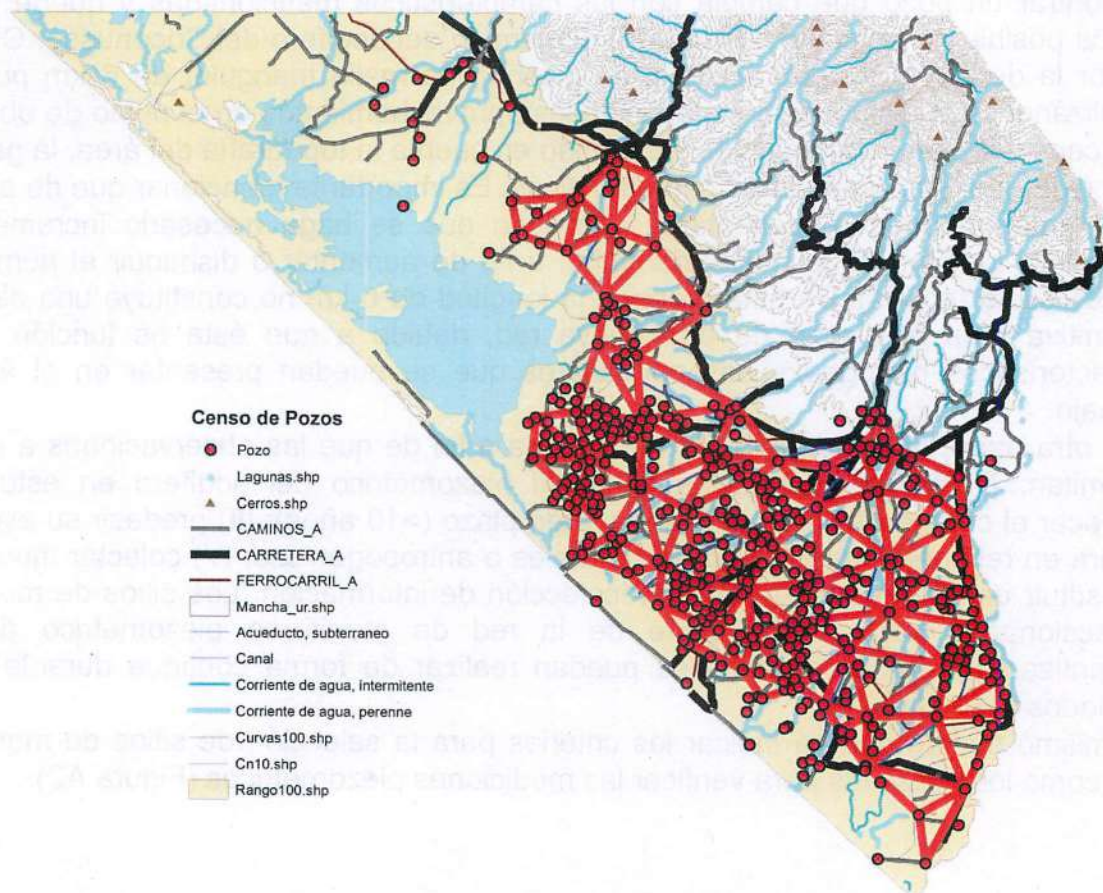


Figura A2. Malla triangular de un máximo de 6 km por lado.

### 3.- Resultado preliminar del rediseño de la red

El resultado preliminar del rediseño de la red, se plasma en una distribución de 65 pozos piloto (nodos) marcados en círculos de color verde seleccionados dentro del acuífero que conforman la nueva red de monitoreo piezométrico (Figura A3).

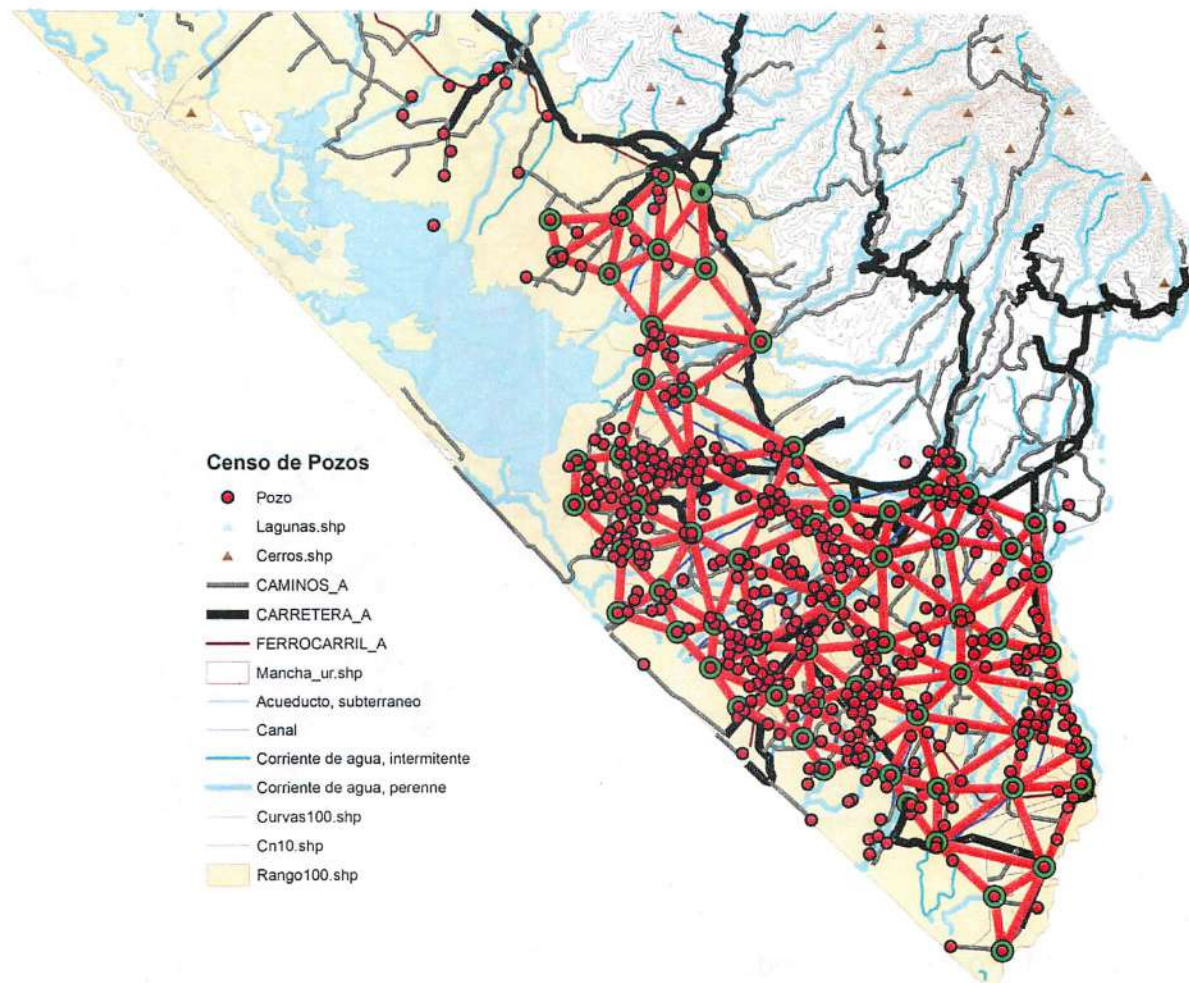


Figura A3. Definición de nodos (color verde) representando un total de 65 pozos piloto.

#### 4.- Resultado preliminar de la nueva red de monitoreo.

Los pozos piloto (nodos) del resultado preliminar del diseño de una nueva red, se unen por medio de líneas rojas, dando lugar a la nueva distribución, para la medición piezométrica (Figura A4).



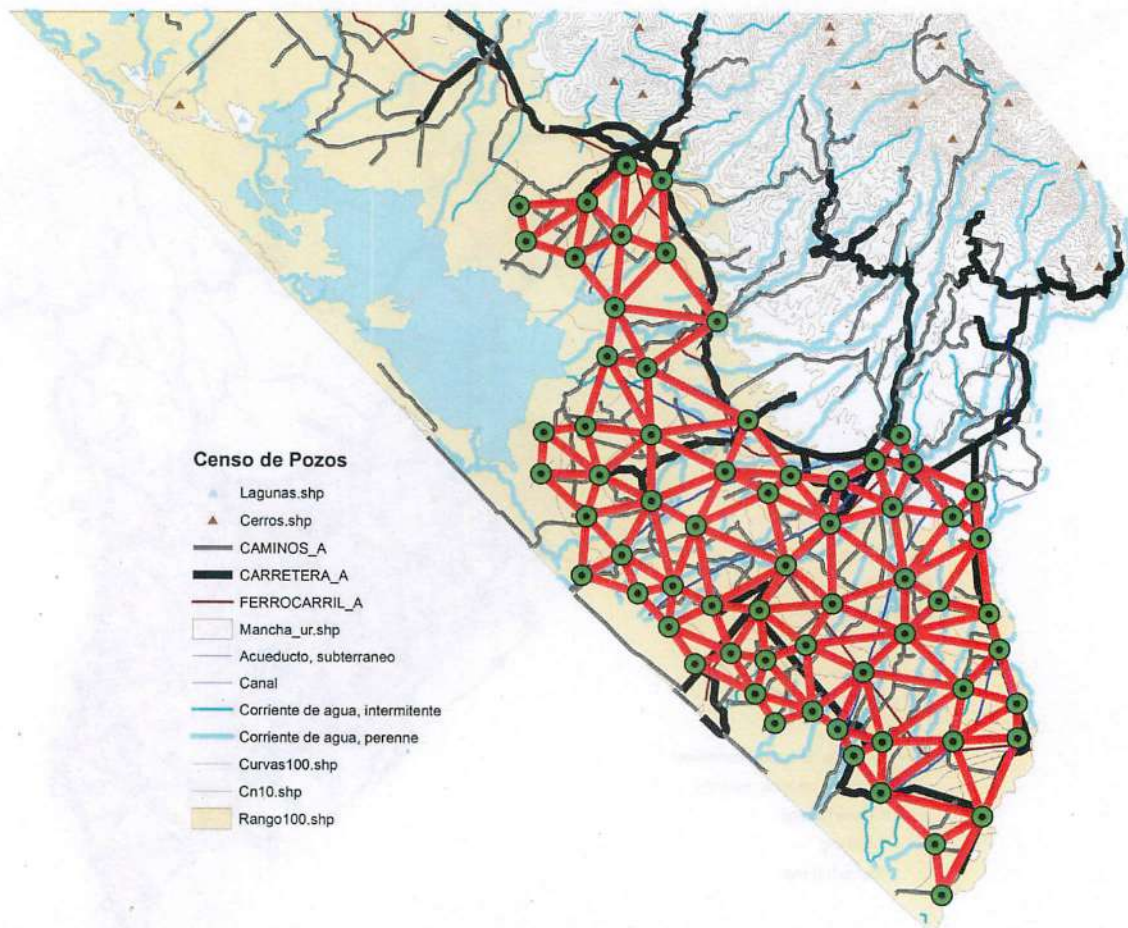


Figura A4. Pozos piloto (nodos) que conforman la nueva red de monitoreo piezométrico.

### 5.- Resultado final del rediseño de la red de monitoreo.

Al final se muestra el nuevo rediseño de la red de monitoreo piezométrico en que los pozos piloto (nodos) se marcan en círculos color verde (Figura A5).

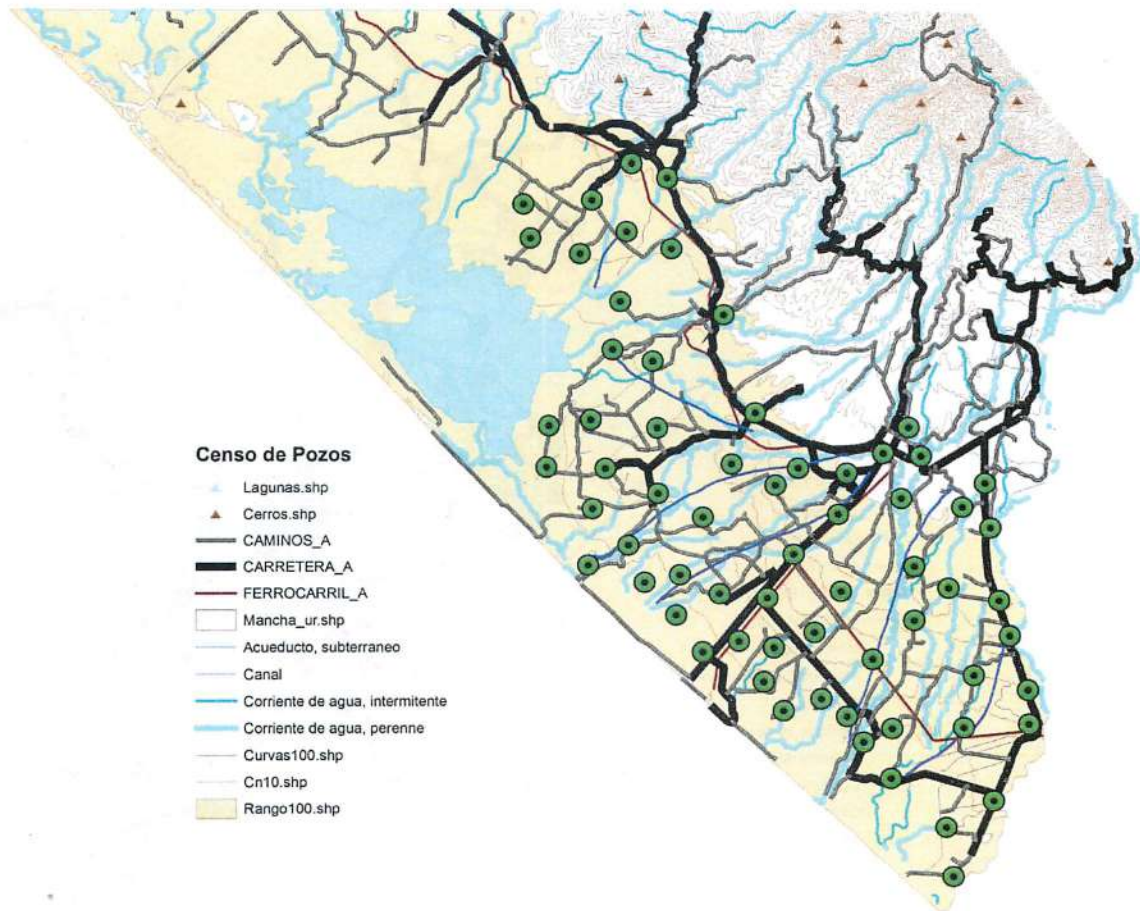


Figura A5. Nueva red de monitoreo piezométrico.

**6.- En las siguientes figuras se muestran diferentes configuraciones del acuífero estudiado.**

Las configuraciones de la profundidad al nivel estático y de su elevación generadas a partir de la información obtenida mediante la red de monitoreo piezométrico, se muestran en las Figuras A6 y A7.



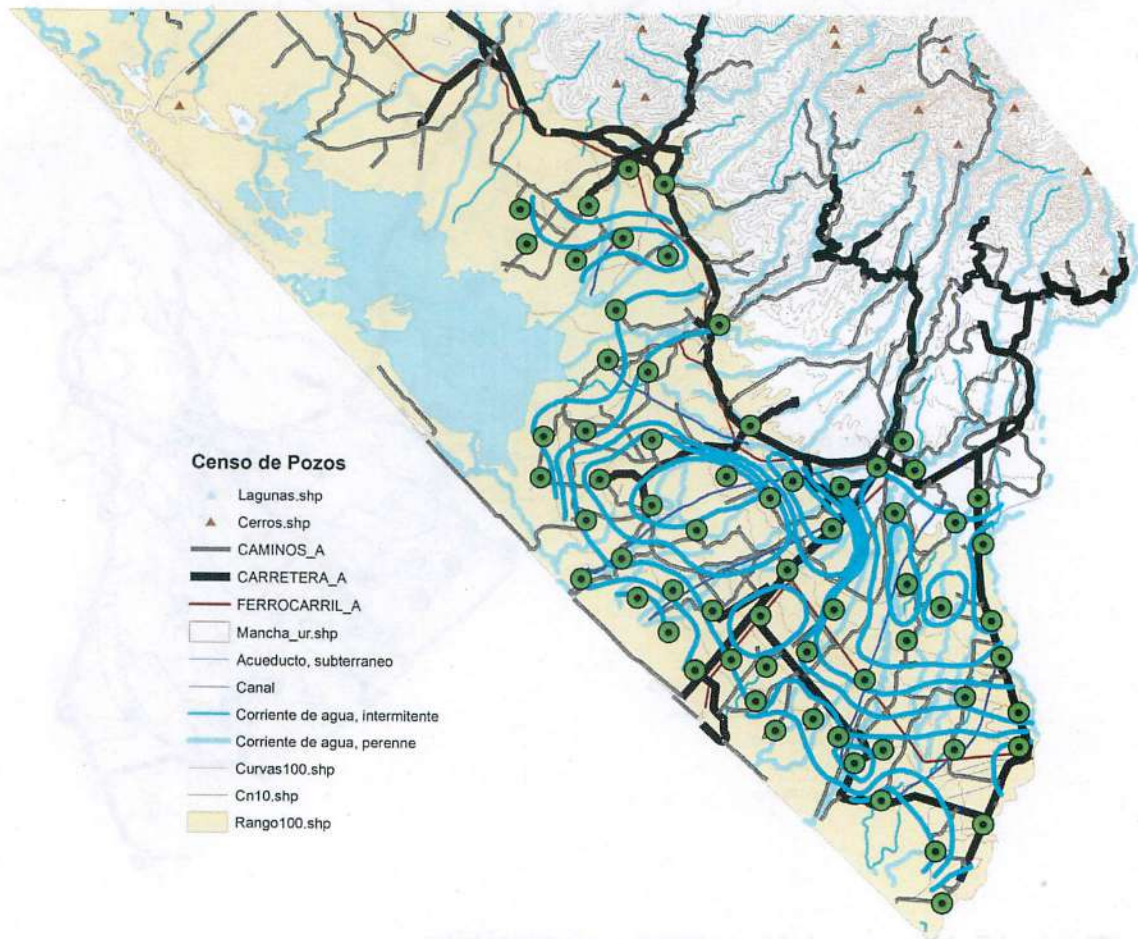


Figura A6. Configuración de la profundidad al nivel estático obtenida de la nueva red de monitoreo piezométrico.

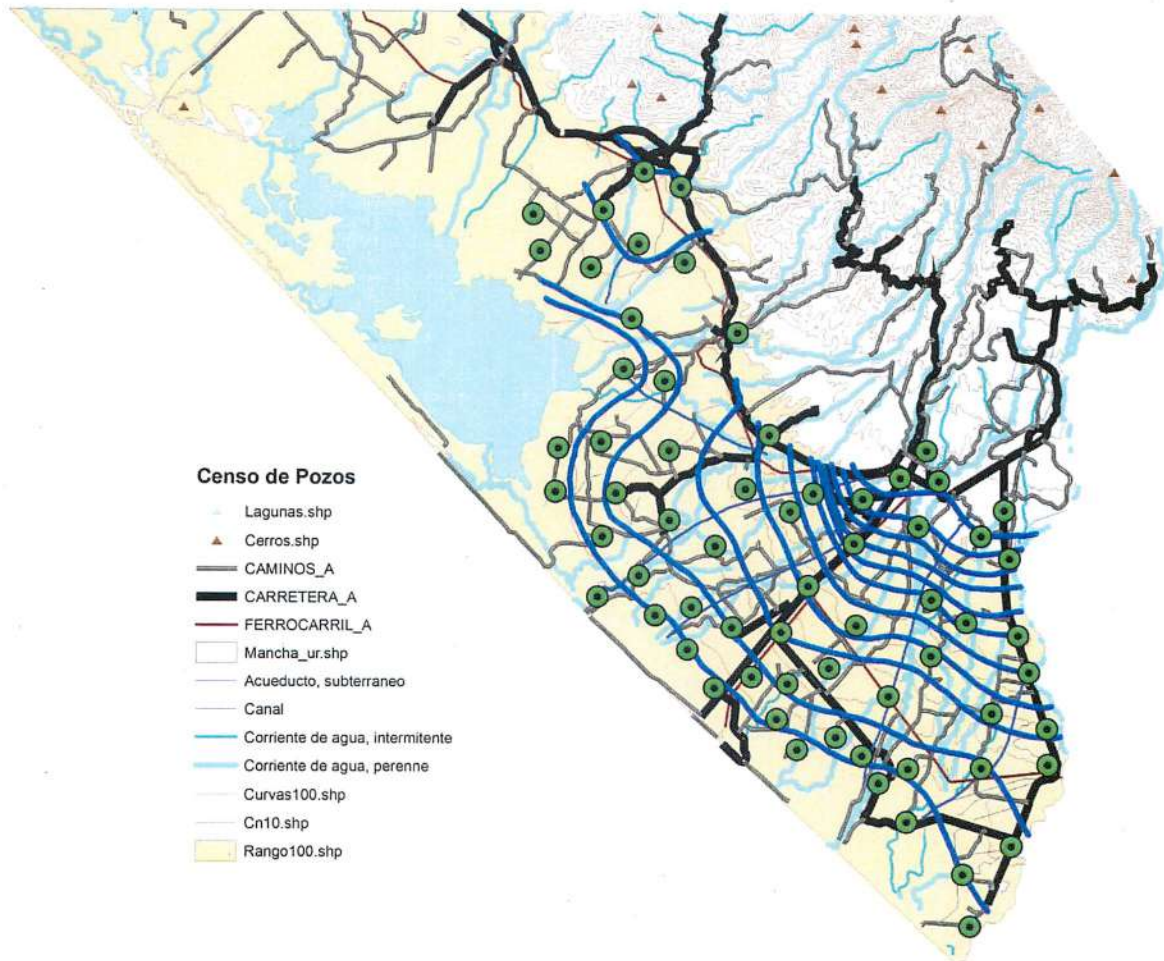


Figura A7. Configuración de la elevación del nivel estático obtenida de la nueva red de monitoreo piezométrico.