

- pozo principal).— Generalmente se mide con equipo de nivelación (exactitud necesaria  $\pm 0.5\text{cm}$ )
- s: Profundidad del nivel piezométrico debajo del cero de medición.— Se puede medir con
- sonda de luz (exactitud  $\pm 0.5\text{cm}$ )
  - sonda acústica (silbato de pozo, exactitud  $\pm 0.5\text{cm}$ )
  - flotador con cordel (poca exactitud)
  - sonda automática con almacenamiento de datos (exactitud hasta  $\pm 0.1\text{mm}$ )

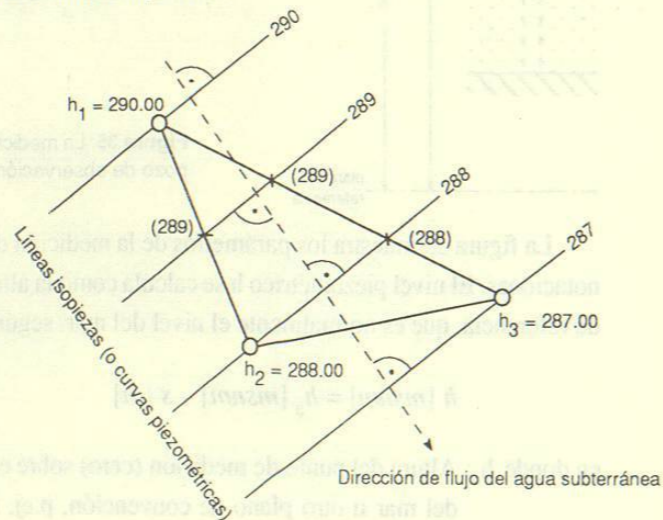
**La carta piezométrica y su construcción. Cálculo del gradiente piezométrico**

La configuración espacial del nivel piezométrico de un acuífero se presenta por cartas piezométricas, las cuales proporcionan las siguientes informaciones valiosas sobre el agua subterránea:

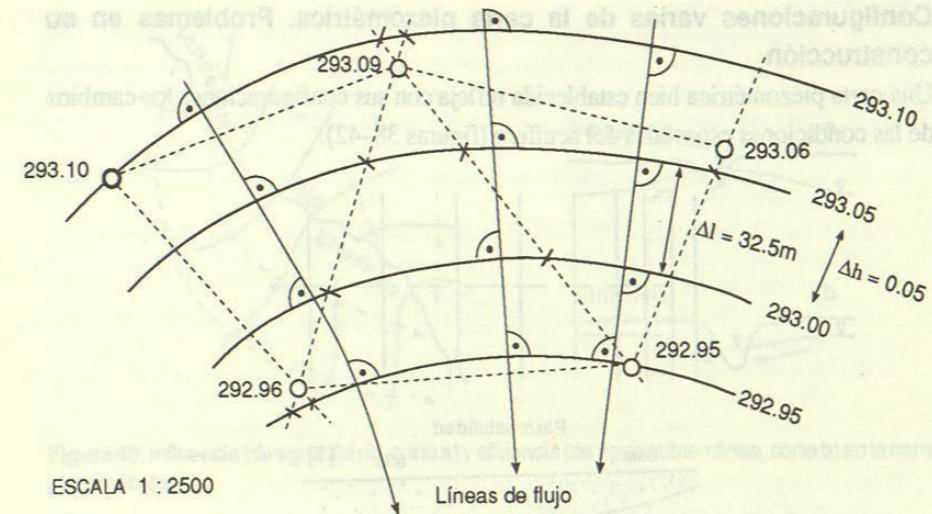
- las direcciones de su flujo, que son de importancia para la colocación de pozos y para el reconocimiento de caminos de contaminación, entre otros aspectos
- los gradientes de su flujo (gradiente piezométrico), que se necesitan para el cálculo del caudal y de la velocidad del agua subterránea en base a la ley de DARCY (pág. 57, ecuación (14)).

El nivel piezométrico es un plano más o menos corvado, que se representa en la carta por curvas de mismo nivel (isopiezas).

La base de la construcción exacta de una carta piezométrica es la interpolación lineal en el *triángulo hidrológico* (figura 36). Las líneas rectas construidas por varios triángulos individuales tienen que ser suavizadas (figura 37). Ya que el agua siempre sigue al gradiente más pronunciado, la *dirección* de su flujo, marcada por flechas o líneas de flujo, es *perpendicular a las isopiezas*.



**Figura 36:** Triángulo hidrológico. Todas las alturas en msnm. Los vértices consisten en 3 pozos nivelados, con nivel piezométrico medido. Utilizando la regla de tres, los lados del triángulo se dividen según las diferencias de altura entre  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$



ESCALA 1 : 2500

**Figura 37:** Parte de un plan piezométrico con isopiezas y líneas de flujo, caso curvo, construidas en base a varios triángulos hidrológicos. Las líneas de flujo tienen que ser perpendiculares a las isopiezas

La carta piezométrica siempre tiene que contener la escala y (por las variaciones temporales del nivel piezométrico) la fecha de medición.

La superficie freática (en el caso del acuífero libre) y el nivel de presión (en el caso del acuífero confinado) están inclinadas rumbo al flujo del agua subterránea. Esta inclinación está determinada por el *gradiente piezométrico*  $i$  (figuras 52–54):

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \text{ [ sin dim. ]}$$

donde  $\Delta h$  [m] = distancia vertical y  
 $\Delta l$  [m] = distancia horizontal entre dos puntos del nivel

La figura 37 muestra como se saca el gradiente  $i$  de la carta piezométrica:

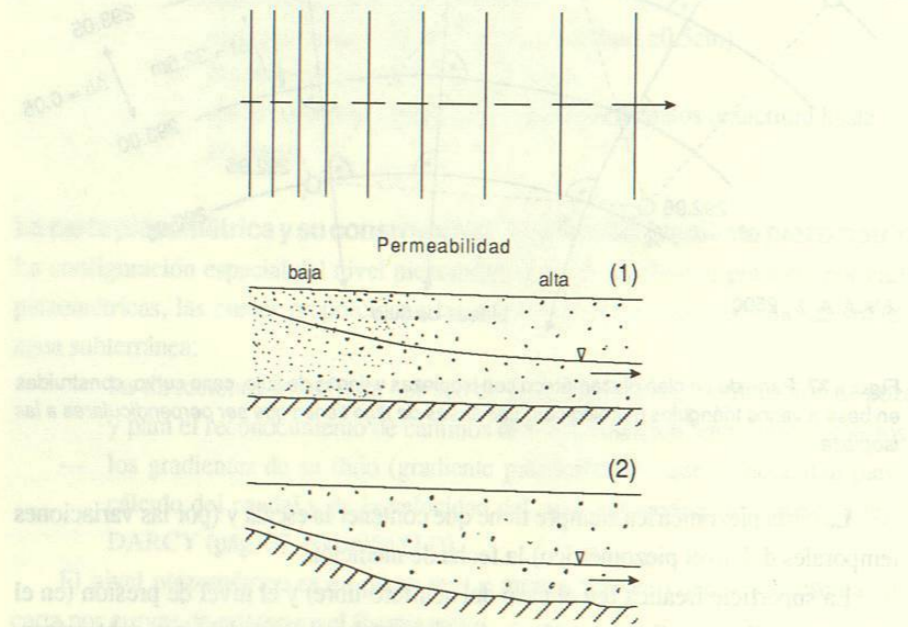
- Medir la distancia entre 2 isopiezas a lo largo de una línea de flujo
- Leer la diferencia de altura  $\Delta h$  entre las mismas isopiezas
- Calcular el gradiente según la ecuación anterior.

**Ejemplo figura 37:**  $i = 0.05 \text{ m} / 32.5 \text{ m} = 0.0015 (= 1.5 \text{‰})$ .

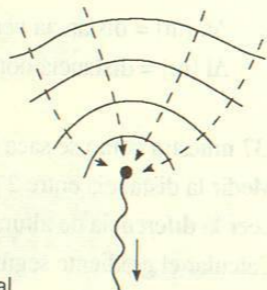
Se puede repetir esta operación en varios lugares de la carta para obtener un valor medio estadístico.

**Configuraciones varias de la carta piezométrica. Problemas en su construcción**

Una carta piezométrica bien establecida refleja con sus configuraciones los cambios de las condiciones espaciales del acuífero (figuras 38-42).



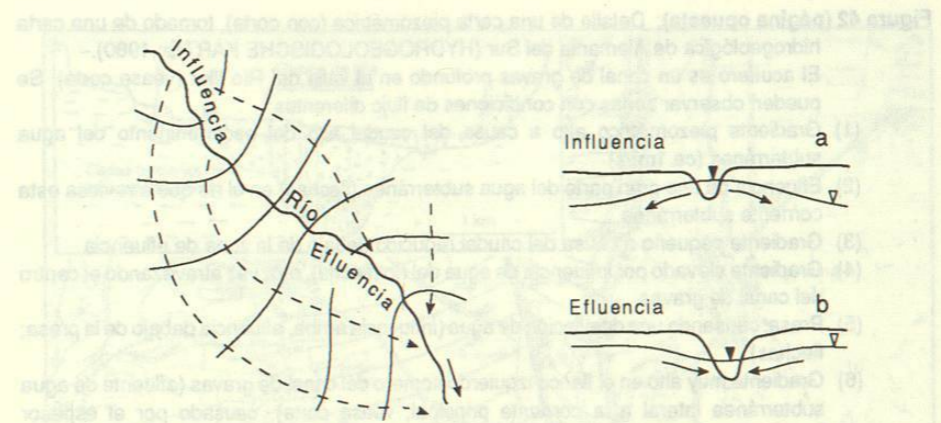
**Figura 38:** Un cambio de distancia entre las isopiezas puede ser causado (1) por un cambio de la permeabilidad según la ley de DARCY (el gradiente se aumenta con permeabilidad disminuyendo; véase págs. 45-48) o (2) por un cambio de espesor del acuífero.



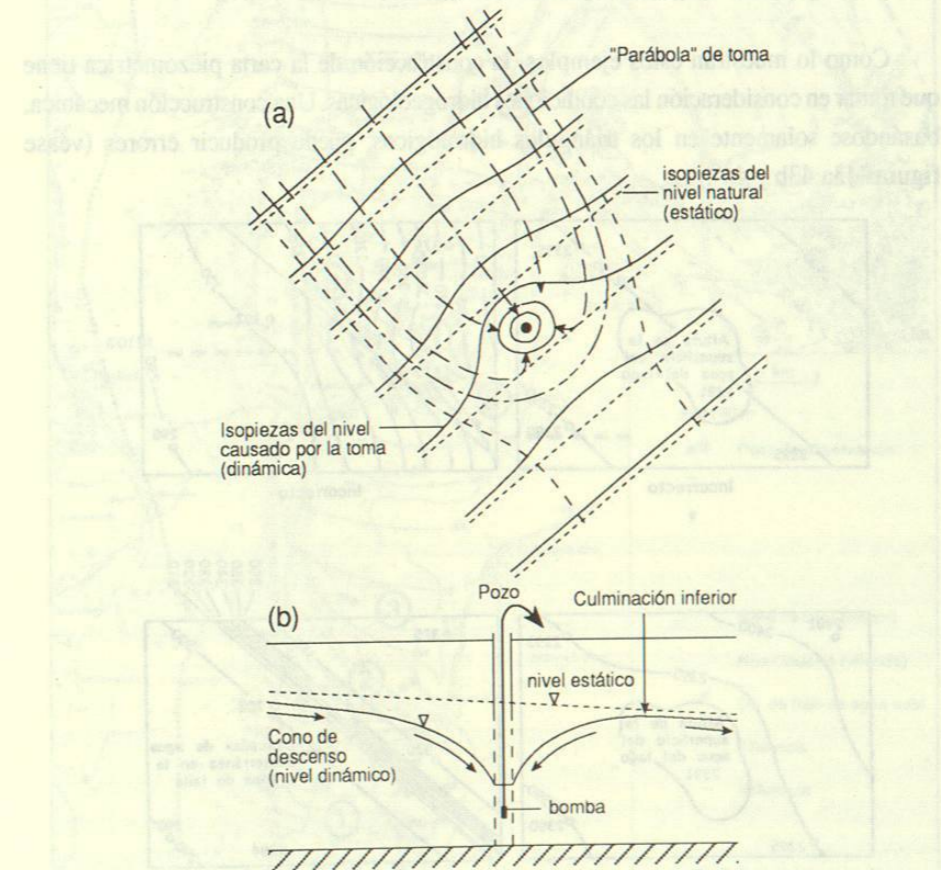
**Figura 39:** Flujo del agua subterránea hacia un manantial

Las inhomogeneidades y la anisotropía de los acuíferos de grietas se pueden reflejar en la carta piezométrica (figura 88).

En los valles de ríos a menudo se observa un intercambio de agua alternando entre el cauce del río y el acuífero: *Influencia* (o *infiltración*) y *efluencia* (o *exfiltración*). Véase figura 40 y carta figura 42.



**Figura 40:** Influencia (de agua del río, corte a) y efluencia (de agua subterránea, corte b) en la carta piezométrica



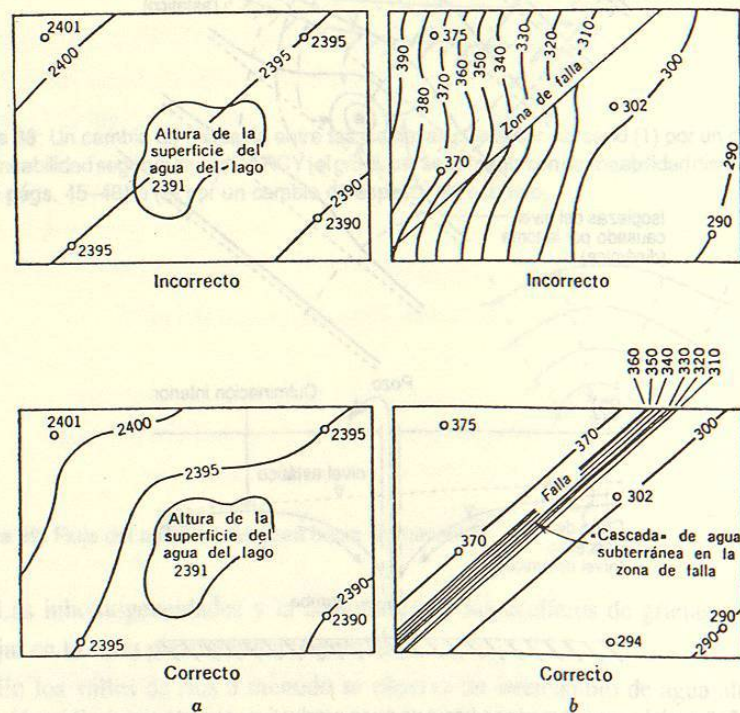
**Figura 41:** El flujo del agua subterránea hacia un pozo productivo: a) carta piezométrica, b) corte longitudinal. Véase pág. 65. — La "parábola" de toma es el parteaguas entre el agua alcanzada al pozo y el agua pasada por el mismo. No es parábola auténtica, ya que sus ramas son paralelas

**Figura 42 (página opuesta):** Detalle de una carta piezométrica (con corte), tomado de una carta hidrogeológica de Alemania del Sur (HYDROGEOLOGISCHE KARTE, 1980).—

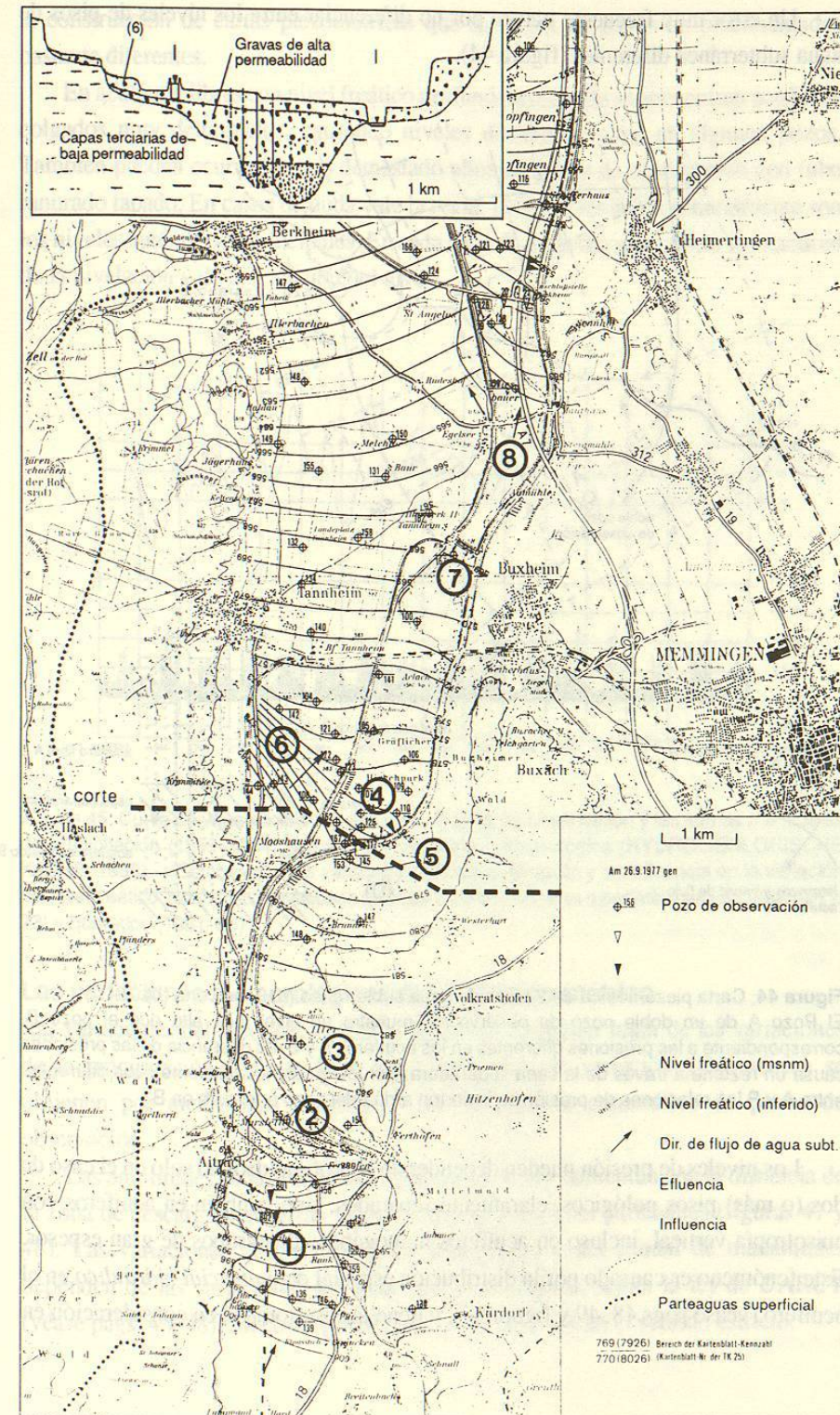
El acuífero es un canal de gravas profundo en el valle del Río Iller (véase corte). Se pueden observar zonas con condiciones de flujo diferentes:

- (1) Gradiente piezométrico alto a causa del caudal alto del escurrimiento del agua subterránea (ca  $1\text{m}^3/\text{s}$ )
- (2) Efluencia de una gran parte del agua subterránea (flechas) en el río que atraviesa esta corriente subterránea
- (3) Gradiente pequeño a causa del caudal reducido debajo de la zona de efluencia
- (4) Gradiente elevado por influencia de agua del río (flecha), otra vez atravesando el centro del canal de gravas
- (5) Presa, causando una desviación de agua (influencia arriba, efluencia debajo de la presa; flechas)
- (6) Gradiente muy alto en el flanco izquierdo somero del canal de gravas (afluente de agua subterránea lateral a la corriente principal, véase corte), causado por el espesor pequeño, la inclinación alta de la base del acuífero y la permeabilidad reducida en esta parte
- (7) Efluencia del agua subterránea en un canal debajo de una planta hidroeléctrica (flechas)
- (8) Influencia de agua por fugas del Canal (flechas)

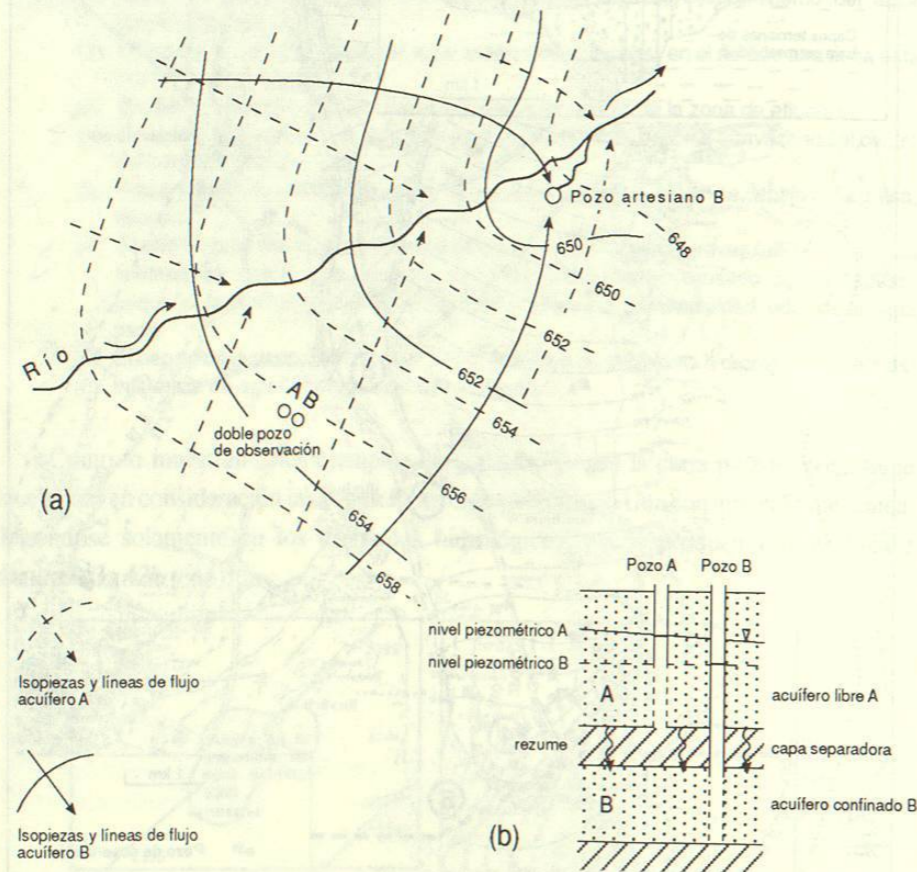
Como lo muestran estos ejemplos, la construcción de la carta piezométrica tiene que tomar en consideración las condiciones hidrogeológicas. Una construcción mecánica, basándose solamente en los triángulos hidrológicos, puede producir errores (véase figuras 43a 43b y 44).



**Figura 43:** Errores más frecuentes encontrados en las cartas de superficies freáticas en zonas de depresiones topográficas ocupadas por lagos (a) y en zonas con fallas de permeabilidad reducida (b).— Tomado de DAVIS & DE WIEST (1971)



Un error muy frecuente ocurre por no diferenciar entre los niveles de pisos de agua subterránea diferentes (figura 44).

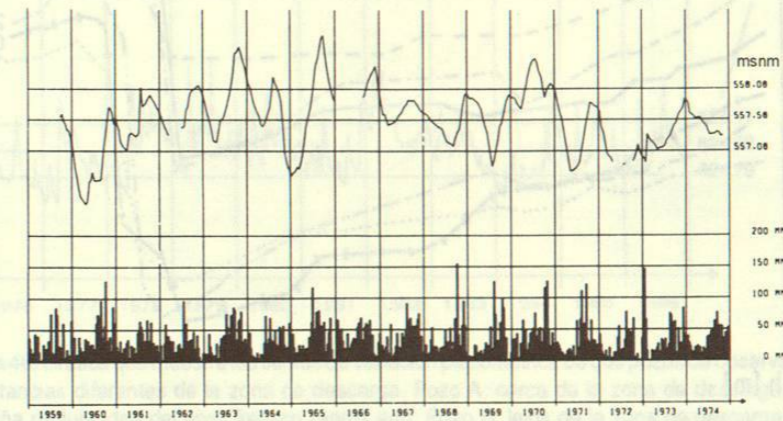


**Figura 44:** Carta piezométrica de 2 pisos de agua subterránea (a), y en corte (b).— El Pozo A de un doble pozo de observación muestra un nivel más alto que el pozo B, correspondiente a las presiones diferentes en los acuíferos A y B. La diferencia de las presiones causa un rezume a través de la capa separadora. Por los gradientes piezométricos diferentes entre A y B las relaciones de presión se invierten arriba del pozo artesiano en B

Los niveles de presión pueden depender de la profundidad, no solo en el caso de dos (o más) pisos geológicos, claramente separados, sino también en acuíferos con anisotropía vertical, incluso en acuíferos homogéneos e isótropos de gran espesor. Este fenómeno es causado por la distribución espacial del potencial hidráulico en el acuífero (véase págs.48, 49 y figura 55), y tiene que ser tomado en consideración en

la construcción de cartas piezométricas que se basan en pozos de profundidades bastante diferentes.

En acuíferos libres con nivel freático profundo a menudo se encuentran acuíferos colgados muy delimitados, causando niveles demasiado altos en algunos pozos. También pueden ocurrir niveles demasiado altos en pozos de observación con tubo ranurado tapado. En casos de duda vale la regla: Los niveles bajos generalmente son los niveles auténticos o principales. En cada caso de duda hay que checar la exactitud de la nivelación y de la medición del nivel.

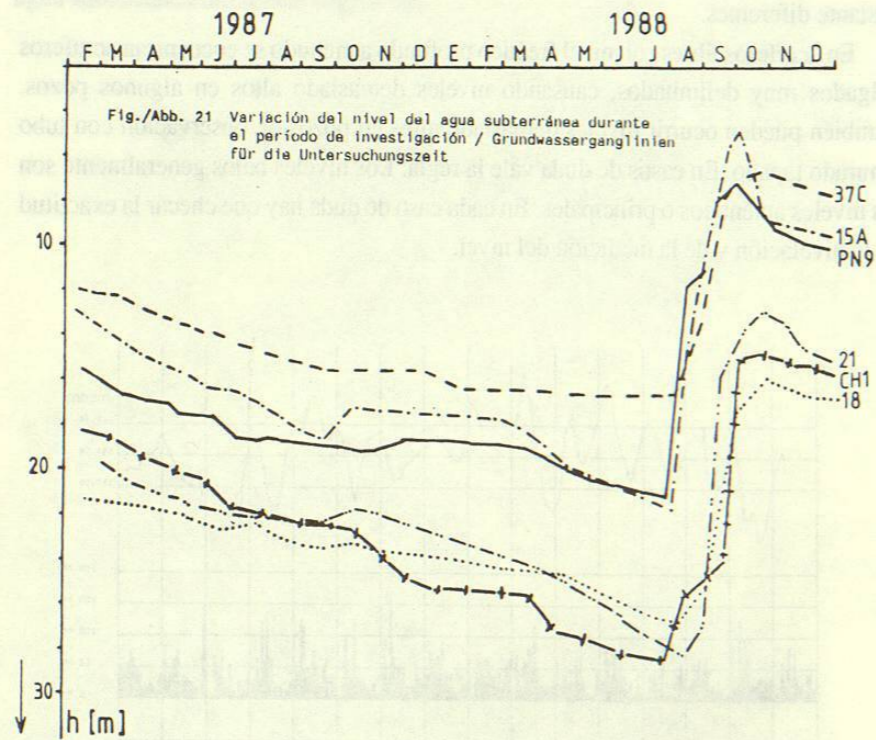


**Figura 45:** Curva de variación piezométrica de un pozo de observación y las sumas mensuales de precipitación (1959–1974), tomado de una carta hidrogeológica (HYDROGEOLOGISCHE KARTE, 1980).— Se observan las variaciones de la precipitación y su influencia en la variación del nivel freático. Notese las variaciones anuales así como los años o períodos secos (1959, 1972/73) y húmedos (1961–66)

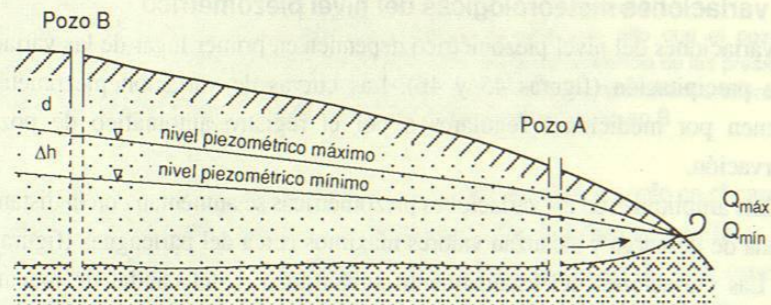
**Las variaciones meteorológicas del nivel piezométrico**

Las variaciones del nivel piezométrico dependen en primer lugar de las variaciones de la precipitación (figuras 45 y 46). Las curvas de variación piezométrica se obtienen por mediciones regulares o por el registro automático de pozos de observación.

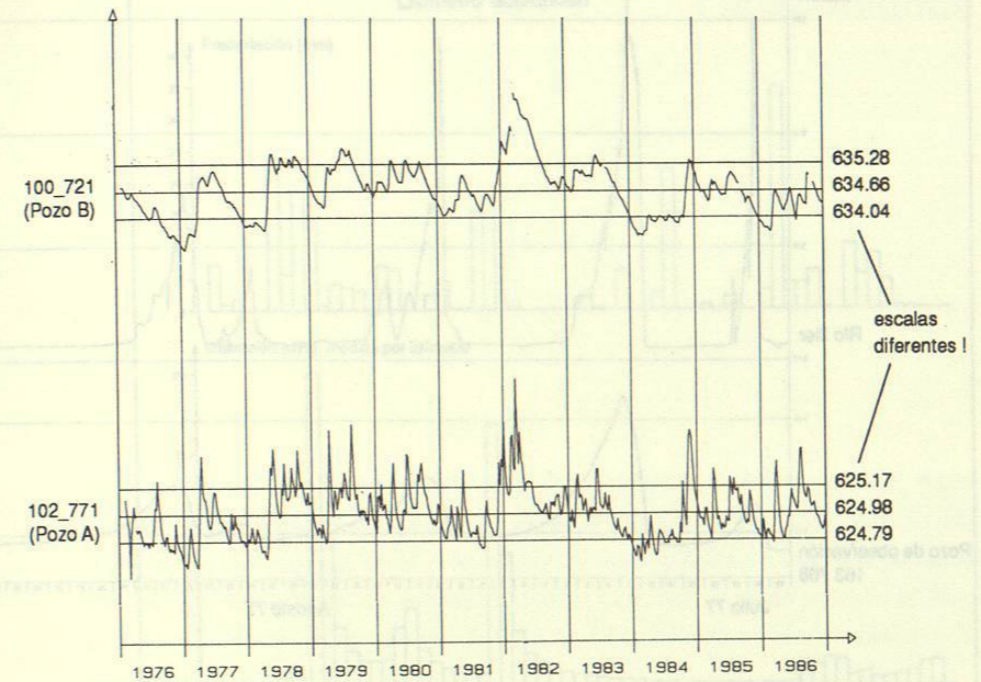
Las amplitudes de las variaciones piezométricas se aumentan con la distancia de la zona de descarga y alcanzan valores máximos cerca del parteaguas (figuras 47 y 48). Las variaciones del escurrimiento subterráneo y del caudal de manantiales dependen de las variaciones del gradiente piezométrico, según la ley de DARCY (véase págs. 45–48), así como por el espesor del acuífero en el sentido estricto.



**Figura 46:** Influencia de las torrenciales lluvias del huracán Gilberto (16–17 Sept. 1988) en el nivel piezométrico del acuífero fracturado de las lutitas de la Formación Méndez del Cretácico Superior, medido en 6 pozos de observación (Linares N.L., México). Las precipitaciones alcanzaron la cantidad enorme de 280 mm/24 h. En total, la precipitación en los meses Agosto y Septiembre subió a 762 mm. Estas precipitaciones extremas causaron un ascenso del nivel piezométrico de 15–17 m. En el año 1987 las precipitaciones de Agosto–Septiembre habían estado tan débiles, que la tendencia del nivel piezométrico a la baja apenas se interrumpía.— Tomado de RANGEL (1989)



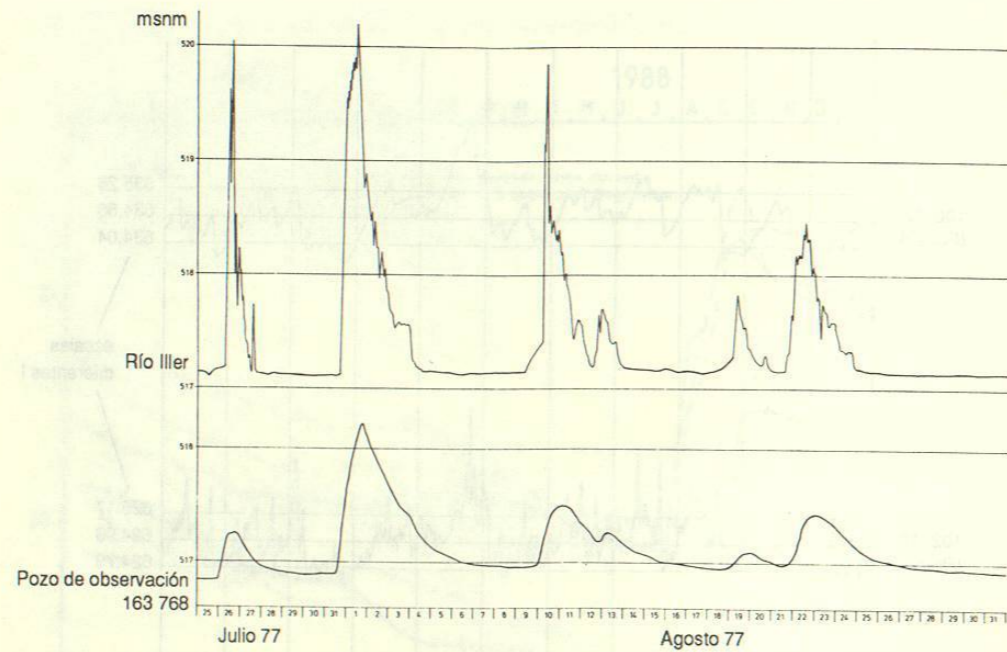
**Figura 47:** Corte esquemático mostrando las amplitudes diferentes del nivel piezométrico cerca de la descarga (Pozo A) y lejos de la misma (Pozo B).—  
 d: Distancia entre el nivel piezométrico y la superficie  
 Δh: Variación del nivel piezométrico



**Figura 48:** Gráfica que muestra las curvas de variación piezométrica de dos pozos de observación de distancias diferentes de la zona de descarga. Pozo A: cerca de la zona de descarga, con pequeña profundidad del nivel freático (aprox. 4m); Pozo B: lejos de la zona de descarga, con mayor profundidad del nivel freático (aprox. 14m). Se observa que la curva del pozo B tiene variaciones más grandes, sin embargo más equilibradas que las del pozo A, debido a la amortiguación por la filtración lenta del agua a través de la zona no saturada de gran espesor.— Tomado de una carta hidrogeológica (HYDROGEOLOGISCHE KARTE, 1989)

En la cercanía de ríos las variaciones piezométricas de los pozos de observación dependen de las variaciones del nivel del río (figuras 49 y 65).

Las variaciones del nivel piezométrico dependen no solamente de las variaciones meteorológicas, sino también de otros factores locales, como lo es el almacenamiento de agua en el suelo o por el consumo de agua por la vegetación (figura 50).



**Figura 49:** Variaciones piezométricas de un pozo de observación (abajo), causadas por las variaciones del nivel del río infiltrando en el acuífero (arriba). Se ve una reacción casi espontánea en las avenidas, sin embargo se presenta un retraso después de cada evento.— Tomado de una carta hidrogeológica (HYDROGEOLOGISCHE KARTE, 1989)

**Figura 50 (página opuesta):** Influencia de eventos de precipitación en la cantidad de infiltración, medida con un lisímetro (fig. 10), y en el nivel piezométrico, medido por un pozo de observación cerca del lisímetro. Se observa que las precipitaciones de Mayo causaron infiltraciones y ascensos marcados del nivel piezométrico, mientras que las precipitaciones de la primer mitad de Junio causaron poca infiltración, ya que, contrario a Mayo, la alta capacidad de campo del suelo seco y la evapotranspiración de la vegetación desarrollada consumían casi todo el agua precipitada.— Tomado de una carta hidrogeológica (HYDROGEOLOGISCHE KARTE, 1980)

