

Efecto de la inyección de agua en un acuífero confinado.

Guillermo Hernández * José Alfredo Ramos †
Luz de Teresa ‡

23 de febrero de 1998

Abstract

Desde finales del siglo pasado se detectó un hundimiento en distintas construcciones del centro de la ciudad de México. Una de las causas principales de este hundimiento es la extracción de agua del subsuelo que provoca la consolidación de éste. Además, hay que señalar que esta consolidación no es uniforme por lo que el hundimiento es diferencial. Esto es importante pues gran parte de los edificios coloniales del centro de la ciudad de México no sólo se están hundiendo, sino que el hundimiento diferencial está provocando graves daños en las estructuras.

Se han propuesto diversas soluciones para este problema y se ha trabajado en cada edificio de manera particular. En los años setenta, un grupo de ingenieros coordinados por G. Moreno Pecero propusieron la siguiente solución para el Palacio Nacional: Inyectar agua en el subsuelo de manera que se lograran equilibrar las presiones internas y de esta forma conseguir, al menos, un hundimiento uniforme y que de esta manera los daños en el edificio se minimicen. Actualmente, la empresa Ingeniería Experimental S.A. de C.V., está utilizando la técnica en “La casa del Marqués del Apartado”.

*Instituto de Geofísica, UNAM

†Instituto de Geofísica, UNAM

‡Instituto de Matemáticas, UNAM

1 Introducción

Este trabajo aborda el efecto de la inyección en acuíferos confinados como el que subyace a la cuenca de México. Este acuífero entre otras características presenta en su parte superior una capa arcillosa con un contenido de humedad tal que las hace altamente compresibles. Esta capa arcillosa presenta intercalaciones de material arcillo-arenoso y arenoso con permeabilidades altas, a diferencia de la baja permeabilidad de los horizontes arcillosos. Subyaciendo a esta capa arcillosa se presenta una capa arenosa conocida como "capa dura" cuyo espesor promedio al centro es de 10 m y constituye un acuífero propiamente. El flujo en la arcilla es predominantemente vertical y por la baja conductividad cede muy poca agua al acuífero; en la capa dura predomina el flujo horizontal y por su alta conductividad permite el flujo y extracción de volúmenes explotables de agua.

La explotación intensiva del acuífero de la cuenca de México produjo abatimientos del nivel piezométrico del agua subterránea, de 40 metros en este siglo [3], y para 1990 a una razón de 4 m/año [4], de tal forma que se ha generado diferencias de presiones entre la parte inferior de las arcillas sobreyacentes al acuífero y la parte superior del acuífero. Siendo menores las presiones en el acuífero, se presenta un fenómeno de escurrimiento (*leakage*) de las arcillas al acuífero y en consecuencia la consolidación de las arcillas, que al ceder agua varían su volumen dando lugar a un efecto de hundimiento en la superficie del terreno. El hundimiento ocurre de manera diferencial, y alcanza profundidades totales de 9 metros en la zona del centro de la ciudad y afectando a los edificios en su estructura.

Para lograr estabilizar el hundimiento y su efecto dañino a los edificios, sobre todo los más antiguos, se han propuesto varias soluciones. Entre ellas sobresale la propuesta para el edificio del Palacio Nacional consistente en la inyección de agua al las capas más permeables dentro del paquete arcilloso. El efecto observado en el hundimiento fue de un menor avance de la parte más afectada del edificio. Con el fin de un estudio más amplio, que incluye instrumentación y monitoreo intensivo de los efectos de la inyección se lleva a cabo otra inyección en un edificio cercano de características similares en el edificio de "La Casa del Marqués del Apartado".

El objetivo de este trabajo es, hacer un análisis de las ecuaciones de flujo de agua subterránea, proponer un modelo del efecto de la inyección de agua en el subsuelo, por medio de pozos y su efecto en el hundimiento del terreno

para un acuífero confinado. En este reporte consideramos como primera aproximación el estado estacionario.

2 Ecuaciones de Flujo Subterráneo

Consideremos un acuífero confinado en un medio poroso formado por capas horizontales de alta y baja conductividad hidráulica (Figura 1); y considerando h como la carga piezométrica y v la velocidad del agua en dicho medio, entonces h y v satisfacen las siguientes ecuaciones [2]:

$$\begin{aligned} v &= -\overline{K}\nabla h && \text{(Ley de Darcy)} \\ \operatorname{div}(v) &= 0 && \text{(Continuidad)} \\ \Rightarrow \Delta h &= 0 && \text{si } K \text{ es constante.} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde \overline{K} es el tensor de conductividad hidráulica y para medios isotrópicos \overline{K} es una diagonal principal.

Describiendo las ecuaciones de Laplace de flujo estacionario en coordenadas cartesianas se obtiene [1]:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

donde K_x , K_y y K_z son las componentes de conductividad hidráulica del acuífero en las direcciones x , y , z .

2.1 Condiciones de frontera

Cada una de estas condiciones de frontera puede actuar sobre un segmento o sobre toda la frontera de la *iésima* capa permeable (B_{1i}, B_{2i}) (Figura 1). Las condiciones de frontera fueron dadas en términos de:

Condiciones de Dirichlet (tipo 1) $h_i(x, y) = g_i(x, y)$ para (x, y) en $\partial\Omega_{1i}$, donde $g_i(x, y)$ es una función conocida, aunque esta función se describe como una función continua, se entiende que los datos de entrada son datos discretos de esta función en los nodos de la frontera.

Condiciones de Newman (tipo 2) $(T_i, \nabla h_i) \cdot n = q_i(x, y)$ para (x, y) en $\partial\Omega_{2i}$, en la que $q_i(x, y)$ es una función conocida definida en la frontera $\partial\Omega_{2i}$ de la *iésima* capa, T_i es el tensor de transmisividades con los

Cuando $r = R$ el cambio de presiones es muy pequeño y por tanto se puede despreciar. Esto nos da condiciones de frontera $h(R) = 0$. Por otro lado para $r = R_w$ (radio del pozo de inyección) tenemos que $h(R_w) = B$ (espesor del acuífero). Para el caso que necesitamos analizar es necesario considerar las siguientes condiciones de frontera para dos pozos:

Cuando $R_1 = R_2$, $h = h_1 = B + h_o$,

Cuando $R_2 = R_w$, $h = h_2 = B + h_w$.

donde h_1 es la carga hidráulica provocada por el pozo 1; h_2 es la carga hidráulica provocada por el pozo 2; R_1 es el radio de influencia dado por el pozo 1; R_2 es el radio de influencia dado por el pozo 2; h_w es la carga hidráulica por encima del acuífero en el pozo; h_o es la carga hidráulica cuando la influencia del pozo es nula.

Al considerar dos pozos, obtenemos que el cambio de nivel piezométrico entre dos pozos con radio de influencia R_1 y R_2 está dado por la diferencia de cargas s :

$$s = h_1 - h_2 = \frac{-Q}{2\pi BK} \left(\ln \frac{R_1}{R_w} + \ln \frac{R_2}{R_w} \right). \quad (5)$$

Con base en las especificaciones técnicas proporcionadas para el área del Palacio Nacional se utilizaron los siguientes datos: diámetro de la tubería del pozo de inyección = 0.1 m; elevación de la carga hidráulica de inyección = 62 m (10 m del acuífero, más 40 m de la arcilla, más la elevación del tubo desde la superficie del terreno, de 22 m); para mantener una carga hidráulica por encima de la capa del acuífero confinado, se propuso una carga de 15 m para cumplir con la condición de $R_1 = R_2$. Entonces tenemos $h_o = 5$ m, $h_1 = 15$ m, $h_2 = 15$ m, y en el pozo $h_w = 52$ m. También se tiene que: $Q = 0.0004$ m³/s, $T = BK = 10^{-5}$ m²/s, $R_w = 0.1$ m. Con estos datos se calculó una distancia óptima entre dos pozos de inyección de 40.3 m.

La gráfica resultante de hacer el cálculo con la ecuación anterior está dada en la figura 3.

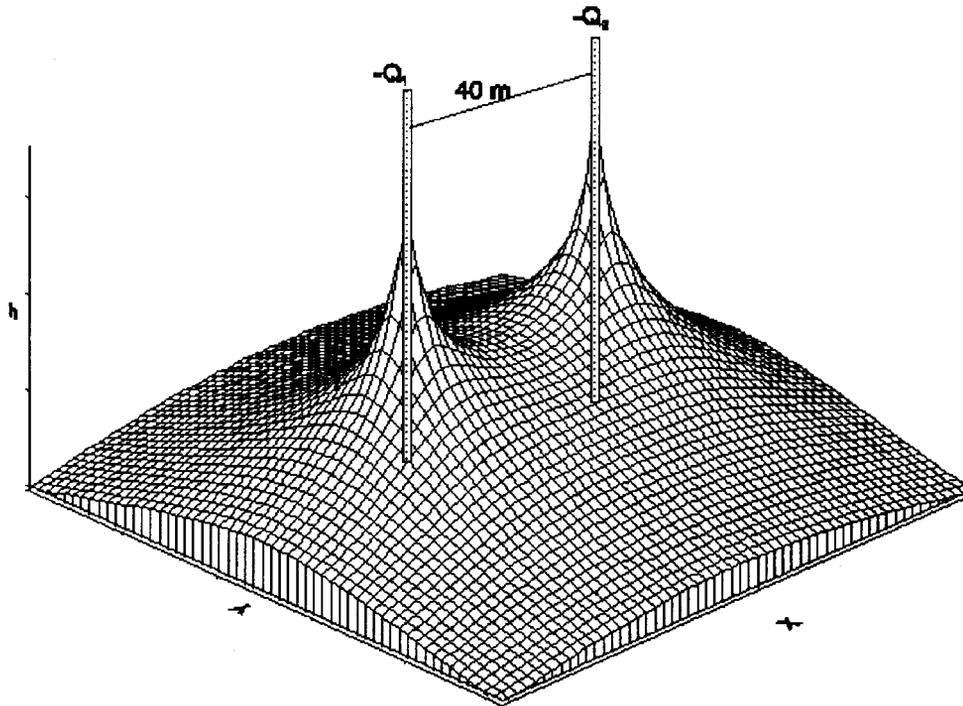


Figura 3. Efecto de inyección en dos pozos

2.4 Análisis para un sistema multicapas

Para las condiciones en particular de este trabajo, de flujo estacionario en el área de estudio, se utilizaron las siguientes suposiciones (figura 4):

1. El flujo de las capas permeables principales es en dos dimensiones (plano horizontal). Las variaciones del espesor de las capas son mucho más pequeñas que las dimensiones horizontales. Con estas condiciones el flujo en las capas permeables puede ser considerado casi verticalmente uniforme.
2. La dirección del flujo en la capa confinante es vertical.
3. las principales capas permeables son hidráulicamente conectadas a través de infiltración en las capas confinantes, pero la diferencia de conduc-

tividades hidráulicas entre las capas permeables y capas confinantes es grande.

- Las capas permeables y confinantes son generalmente homogéneas e isotrópicas.

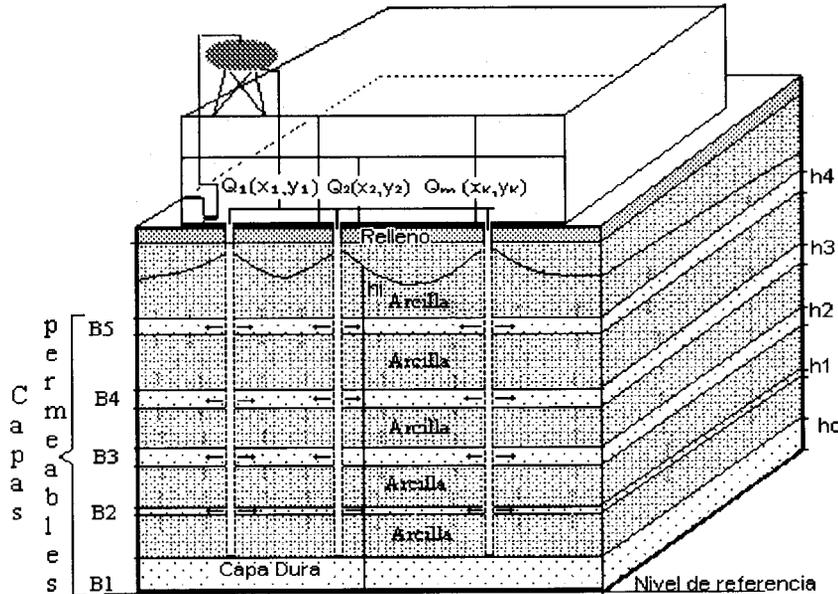


Figura 4. Efecto de inyección en dos pozos

Con base en estas suposiciones la ecuación diferencial parcial que representa al problema puede representarse de la siguiente forma numérica [1]:

$$T_{xi} \frac{\partial^2 h_i}{\partial x^2} + T_{yi} \frac{\partial^2 h_i}{\partial y^2} + \frac{(h_{i+1} - h_i)}{r_{i+1}} + \frac{(h_{i-1} - h_i)}{r_i} - \sum_{p=1}^n Q_i(x_p, y_p) = 0. \quad (6)$$

donde $i = 1, 2, \dots, m$, y m es el número de capas, y $p = 1, 2, \dots, n$, y n es el número de pozos; T_{xi}, T_{yi} , son las transmisividades de las capas permeables, $T = KB$, siendo B el espesor de la capa; $r_i = \frac{B_i}{K_i}$ es la resistencia hidráulica o coeficiente de infiltración, B_i es el espesor de la i ésima capa y K_i es la

conductividad hidráulica de la capa confinante en la dirección vertical; Q_i es el gasto de recarga del pozo en la capa permeable i , en la posición x_p, y_p .

Para el caso el caso que se está analizando Q_i es un parámetro de inyección que se puede controlar y es un dato constante en la ecuación. Con base en las suposiciones iniciales de homogeneidad e isotropía, T_{xi} y T_{yi} son tratadas como la constante T en la ecuación.

3 Conclusiones

En el análisis para dos pozos de inyección, la solución es posible mediante la aplicación del método analítico; en el caso del sistema multicapas con varios puntos de inyección se propone una solución numérica ya que se hace muy complejo el tratamiento analítico. En ambos casos las capas que reciben el efecto de la inyección son los estratos permeables y permiten una mejor estabilización del hundimiento, disminuyéndolo efectivamente.

El efecto visto en planta se puede describir como un cono invertido con las mayores presiones en el centro y contiguo al pozo y que se atenúa en dirección radial cuyo perfil es la solución a las ecuaciones. El efecto de dos pozos contiguos se suma por superposición. El efecto de una batería de pozos de inyección genera una envolvente cuyo efecto es un domo o meseta en el campo de presión y reduce de manera más rápida y uniforme en los diferentes horizontes permeables el hundimiento.

Como se puede apreciar en la ecuación el caso 1 el radio óptimo puede depender de parámetros como Q , h_w y R_w principalmente, los cuales se escogen con base en las condiciones del terreno.

References

- [1] Aral, Mustafa M., *Groundwater Modeling in Multilayer Aquifers, Steady Flow*, Lewis Publisher, Michigan, 1990.
- [2] Marsily, G. de, *Quantitative Hydrogeology* Academic Press, Londres, 1986.
- [3] Figueroa, German, *Piezometría en el área urbana del Valle de México*, Simposio sobre el Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el área Urbana del Valle de México, Soc. Mex. de Mec. de suelos, 1978

- [4] Lesser Illades, J. M., Sánchez Díaz, F., González Posadas, D., *Aspectos Geohidrológicos de la Ciudad de México*, Ingeniería Hidráulica en México, enero-abril 1990
- [5] Moreno Pecero, G., *Refoundations Research of Mexico's National Palace*. Memorias del Congreso de Modelación, Mecánica de Suelos e Ingeniería de Sistemas, Estocolmo, Suecia, 6-16-0568, pp 28024-28007, 1981.
- [6] Peña, S., *Hidrología subterránea, curso introductorio*. Colegio de Post-graduados, Centro de Hidrociencias, 1993.