

La modelación matemática en la explotación de acuíferos costeros

INTRODUCCIÓN

Por todos es conocido que al realizar la modelación matemática de un acuífero se están integrando todas las bases de datos disponibles del sistema, lo cual permite realizar la simulación de su comportamiento ante la presencia de diferentes escenarios que modifiquen las entradas y salidas sobre el mismo.

Desde hace más de dos décadas en Cuba se ha estado aplicando la tecnología AQUIMPE para la modelación del flujo de las aguas subterráneas con diferentes objetivos, principalmente para evaluar el comportamiento de los acuíferos como respuesta a diferentes obras de ingeniería y en la evaluación de los recursos hídricos subterráneos en las zonas estudiadas. No obstante lo anterior, hasta la actualidad no se ha logrado utilizar esta herramienta para realizar políticas de asignación de la explotación global ni a corto ni mediano plazo según una primera metodología propuesta por el autor en su tesis doctoral y que se muestra en Hernández. et al. (2001).

Los avances obtenidos con las modificaciones a la versión del software AQUIMPE sobre Windows, WinAQE, permiten evaluar no solo el comportamiento regional del acuífero, sino también los efectos locales de los pozos y campos de pozos, aspecto de gran importancia sobre todo en los acuíferos costeros, donde no solo es importante controlar los recursos explotables, sino también donde y como estos se explotan, (Pérez Franco 2004; Hernández y Llanusa 2006; Hernández 2008).

En el presente trabajo se demuestra mediante la simulación matemática como es insuficiente la utilización de los sistemas de monitoreo de los niveles de las aguas subterráneas para controlar los peligros a que está expuesto el sistema en los acuíferos costeros ante la presencia de los conos de depresión locales que se producen alrededor de los pozos de bombeo, aunque sea posible detectar conos de depresión regional y no se conside-

Resumen / Abstract

La simulación matemática demuestra como insuficiente la utilización de sistemas de monitoreo de niveles de las aguas subterráneas para controlar peligros que afecten acuíferos costeros. Debe vincularse la metodología del diseño de campo de pozos con la modelación matemática del acuífero para poder considerar la heterogeneidad del medio acuífero, la interferencia entre pozos y los efectos regionales de alimentación y descarga. Las técnicas de optimización, contemplando descensos locales en los pozos de bombeo, se aplican refinando la malla con la tecnología AQUIMPE sobre Windows, ubicando nodos en los pozos de bombeo y expresiones que determinan las cargas correspondientes a partir de los valores simulados. Estos factores se relacionan con la transmisividad del elemento donde está el nodo y el gasto específico del pozo correspondiente.

Palabras clave: campo de pozos, acuíferos costeros, simulación, optimización.

Mathematical modelling shows that the use of ground water levels monitoring systems is not sufficient to control the dangers that may affect coastal aquifers. Well field design methodology must be associated with aquifer mathematical modelling in order to consider aquifer heterogeneity, well interference and regional effects of recharge and discharge. Optimization techniques can be applied with AQUIMPE technology over Windows by mesh refinement so as to consider local drawdown in pumping wells. This is accomplished by locating nodes in pumping wells. Then expressions are developed to obtain corresponding head values from simulated values. These expressions are related to node transmissivity and specific discharge of the well.

Keywords: well field, coastal aquifer, simulation, optimization

Dr. Armando O. Hernández Valdés, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE

email: ahernandez@cih.cujae.edu.cu,

Dra. Haydee Llanusa Ruiz, Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE;

email: hllanusa@tesla.cujae.edu.cu

re por ello en peligro el sistema.

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN CAMPO DE POZOS

Generalmente el gasto a extraer para un fin determinado no puede ser posible por una misma captación, razón por la cual se deben utilizar varias captaciones para satisfacer la demanda deseada, siempre y cuando el acuífero lo permita. Como caso alternativo y de interés para este documento se tratarán las baterías de pozos que conforman los conocidos campos de pozos.

Se han desarrollado numerosos estudios sobre el comportamiento de los pozos durante su funcionamiento, así también como los efectos de la anisotropía, heterogeneidad, gradientes naturales y estados del régimen de flujo en el acuífero y hacia el pozo, pero de forma individual. Según cita Pérez Franco, D. (2001) lo poco que se ha estudiado y referido a los conjunto de pozos es a la interferencia, fenómeno que se refiere a la acción de cada pozo en particular sobre los demás, alterando así los caudales y abatimiento del conjunto como sistema.

Para concebir el diseño de un campo de pozos se proponen los siguientes criterios, según Pérez Franco, D. (2001):

- Las posibilidades del acuífero para suministrar el caudal requerido, teniendo en cuenta los recursos disponibles y las afectaciones causadas por la explotación existente.
- Conformación de los mapas de isopiésticas del acuífero, si es posible, para época de seca y de lluvias, y sus variaciones hiperanuales.
- Las características geométricas del acuífero, extensión, profundidad, espesor, etcétera.
- Las características y propiedades hidrogeológicas del acuífero (grado de confinamiento, valores de k, C y E o de sus propiedades asociadas).
- Cualquier situación que pudiera imponer restricciones a la explotación, por ejemplo, la posibilidad de intrusión salina.

El mismo autor también plantea para el diseño:

- Tener en cuenta la existencia del gradiente natural y los efectos cualitativos y cuantitativos que de ello se derivan sobre el patrón de flujo hacia los pozos.
- Situar los pozos en una línea perpendicular a la dirección del flujo en el acuífero (de hecho, sobre una línea isopiéstica o hidroisohipsa).
- Separar los pozos de modo que sus zonas de influencia no se solapen, lo que garantiza que no se interfieran entre sí.

De acuerdo con los criterios anteriores, se requiere de un conjunto de información no siempre disponible, pero en caso de tenerla la metodología que a continuación se expone presenta algunas inconsistencias al aplicarla a

situaciones reales según se verá en lo que sigue.

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE CAMPOS DE POZO

Atendiendo a los criterios expuestos en el epígrafe anterior, se presenta a continuación la síntesis del proceso metodológico de diseño según Pérez, Franco D (2001):

1. Determinación del abatimiento máximo permisible en el pozo de bombeo ($S_{pm\acute{a}x.}$).

- De acuerdo con restricciones técnicas, económicas o ambientales.
- En acuíferos costeros abiertos; el nivel dinámico no debe tener cotas menores de 1 metro sobre el nivel medio del mar (N. M. M.).

$$S_{pm\acute{a}x.} = h_d - 1m \quad (1)$$

donde h_d : cota del nivel estático sobre el N. M. M.

Nota: Entre esta última condición y la anterior se utilizará el menor valor para definir el abatimiento máximo admisible en un acuífero costero abierto.

2. Diámetro del pozo de bombeo.

Si no está definido por otras condiciones el diámetro de los pozos de bombeo, se comenzará tanteando con $\phi_p = 0.5m$ y se calcula el caudal admisible. Se compara el caudal obtenido con el diámetro recomendable según la tabla 1 y se repite el proceso hasta lograr dicha correspondencia.

Tabla 1. Relación de caudales y diámetros.

Caudal (lps)	Diámetro recomendable (m)
< 100	0,40
100 - 200	0,50
200 - 350	0,60
> 350	Lo determina el tipo de bomba

3. Radio de influencia (r_0).

Si se conocen las propiedades del acuífero se puede obtener por la siguiente expresión:

$$r_0 = \left(\frac{2.246T_D t}{E} \right)^{1/2} \quad (2)$$

utilizando $t = 24$ h en acuífero confinado o $t = 72$ h en acuífero libre

4. Obtención del caudal de diseño.

Se puede obtener por las siguientes expresiones:

$$Q = \frac{-B_p + \sqrt{(B_p)^2 + 4D_p S_p}}{2D_p} \quad (3)$$

$$\text{donde: } B_p = \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_o}{r_p}\right)}{2\pi T_D} \quad D_p = \frac{1}{4\pi^2 T_T^2 r_p}$$

Dicho caudal se compara con los valores de diámetro recomendado y se repite el proceso de ser necesario.

5. Determinación de la separación entre pozos para no interferencia.

Para poder determinar la separación entre pozos (W) para no interferencia considerando el efecto del gradiente natural, se requiere aplicar el principio de superposición de efectos entre el flujo natural y el flujo inducido hacia el pozo, por lo que deben cumplirse las siguientes condiciones:

Régimen de flujo en el acuífero lineal. $I_o \leq I_{crd}$ donde

$$I_{crd} = 0.05 \left(\frac{T_T}{T_D} \right)^2 \text{ y flujo lineal hacia el pozo de bombeo}$$

a partir de la divisoria o sea si el Radio de Darcy (RD) es menor que la distancia al punto de estancamiento.

$$r_D = \frac{Q}{0.1\pi} \cdot \frac{T_D}{T_T^2} \leq \frac{Q}{2\pi T_D I_o}$$

Si se cumplen las condiciones anteriores, entonces la separación entre pozos se obtiene por:

$$W = \frac{Q}{T_D I_o}$$

y se comprueba el radio de influencia utilizado (r_0)

con el siguiente valor $r_0' = \frac{W}{2}$

- Si $r_0 \geq r_0'$ no existe ningún problema y el diseño queda determinado por el caudal obtenido inicialmente y la separación W entre ellos.

- Si $r_0 < r_0'$ se repite todo el proceso utilizando como r_0 el valor de r_0' obtenido anteriormente. El caudal será menor que el anterior obtenido así como la nueva separación. (no será necesario volver a chequear el radio de influencia pues se cumplirá que $r_0' > r_0''$).

Observaciones sobre la metodología anterior.

En la metodología anterior se extrapolan los efectos de un pozo bombeando en un acuífero con gradiente natural, considerando al medio homogéneo y conocidas sus propiedades hidrogeológicas, hipótesis que raramente se cumplen. Por otra parte se propone evitar la interferencia entre pozos, lo que desde el punto de vista práctico no es

factible.

En cuanto a la existencia del gradiente natural, ¿se escogería el correspondiente a un estado crítico del acuífero o al promedio entre los estados más y menos desfavorables o simplemente basta con tomar el existente en un momento cualquiera? Durante el funcionamiento del campo de pozos se inducen mayores gradientes aguas arriba de este y mucho menores aguas abajo, por lo que se reduce la descarga subterránea hacia el mar a causa de la explotación y por lo tanto un avance de la cuña de intrusión salina.

La determinación de los posibles conos de intrusión producto de los bombeos individuales de cada pozo, las interferencias entre ellos, los efectos de las variabilidades espaciales de las propiedades hidrogeológicas, así como las variaciones temporales de la recarga y su consecuente influencia en los gradientes naturales, no es posible contemplarla y aplicarla sin la ayuda de otras herramientas como la modelación matemática que a continuación se ilustra.

SIMULACIÓN DE POZOS BOMBEANDO EN UN ACUÍFERO CON GRADIENTE NATURAL

Se realizó la discretización de un área de **4000m** de ancho y **10000m** de longitud con una malla telescópica alrededor del punto de coordenadas **P (2000,2000)**, con distancias a este desde **0.25m** hasta **300m**, ver Figura 1 tomada de Cabrera y Hernández (2009).

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de la red de flujo en un acuífero con gradiente natural se generó el estado natural con un gradiente **$I_0=0.001$** sin bombeo en un acuífero de **$T_D=10000 \text{ m}^2/\text{d}$** y coeficiente de almacenamiento **$E=0.01$** , imponiendo cargas fijas de **30m** y **40m** en los extremos longitudinales del área simulada durante **30 días**.

A los nodos correspondientes al radio de un pozo de bombeo se les asignó en una primera variante un caudal de **180 lps** y posteriormente para evaluar el efecto de la interferencia se le adicionaron dos nodos a 300m con caudales cada uno de **140 lps**, en ambos casos se representan los efectos al cabo de **42 días** de bombeo continuo.

Las cargas obtenidas en un perfil longitudinal por el pozo de bombeo en la simulación numérica y la solución analítica correspondiente para el primer caso aparecen representadas en la Figura 2, observándose muy buena coincidencia y solo para distancias alejadas se manifiestan los efectos de frontera impuestos al modelo numérico.

Punto de estancamiento en el primer caso sería:

$$x_0 = \frac{-Q}{2\pi T_D I_0} = 247,5\text{m}, \text{ valor coincidente con lo si-}$$

mulado numéricamente.

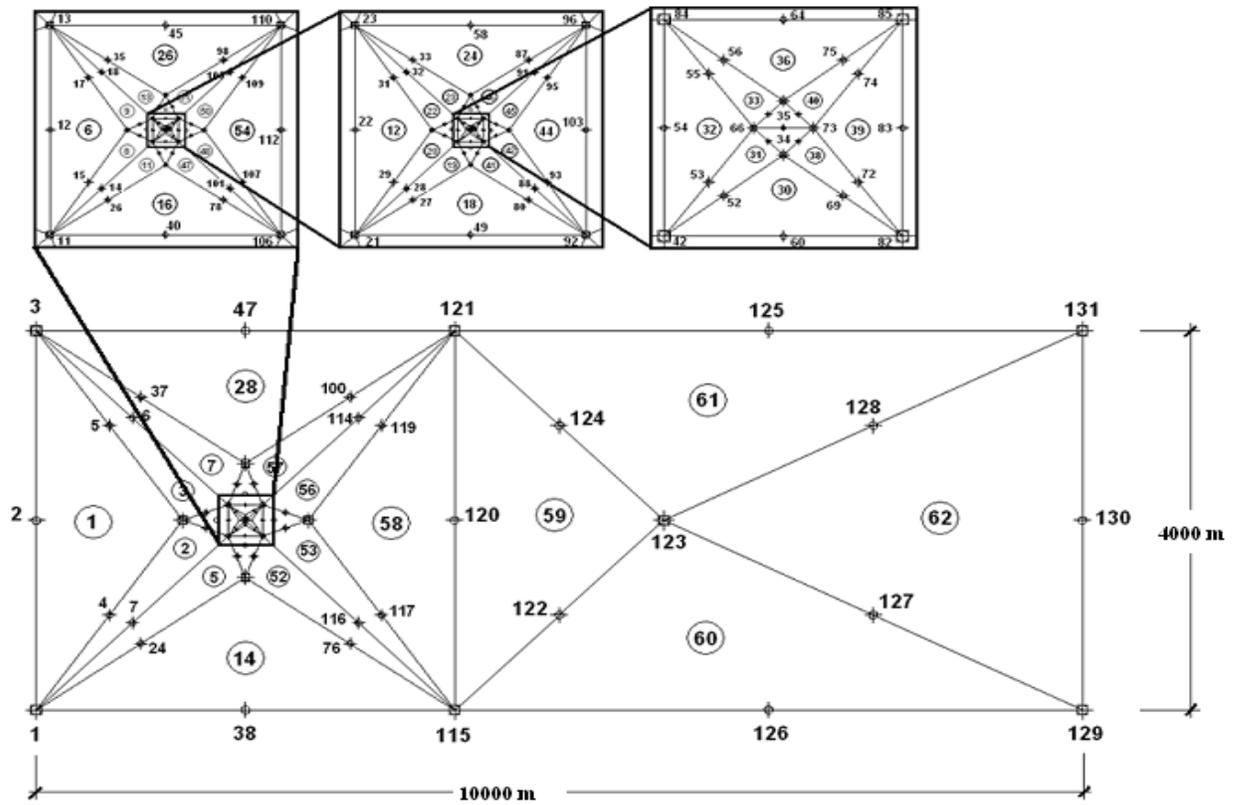


Figura 1. Discretización desde el pozo de bombeo.

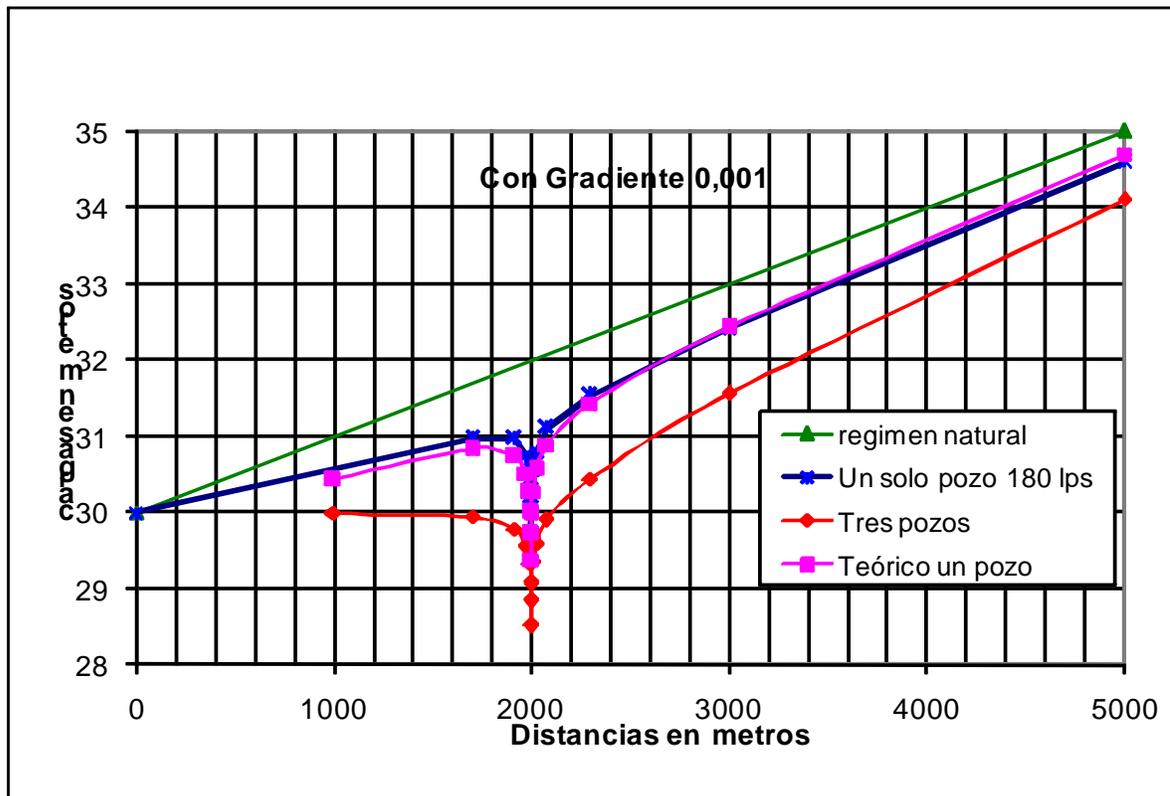


Figura 2. Perfiles longitudinales por el pozo de bombeo central en las dos variantes.

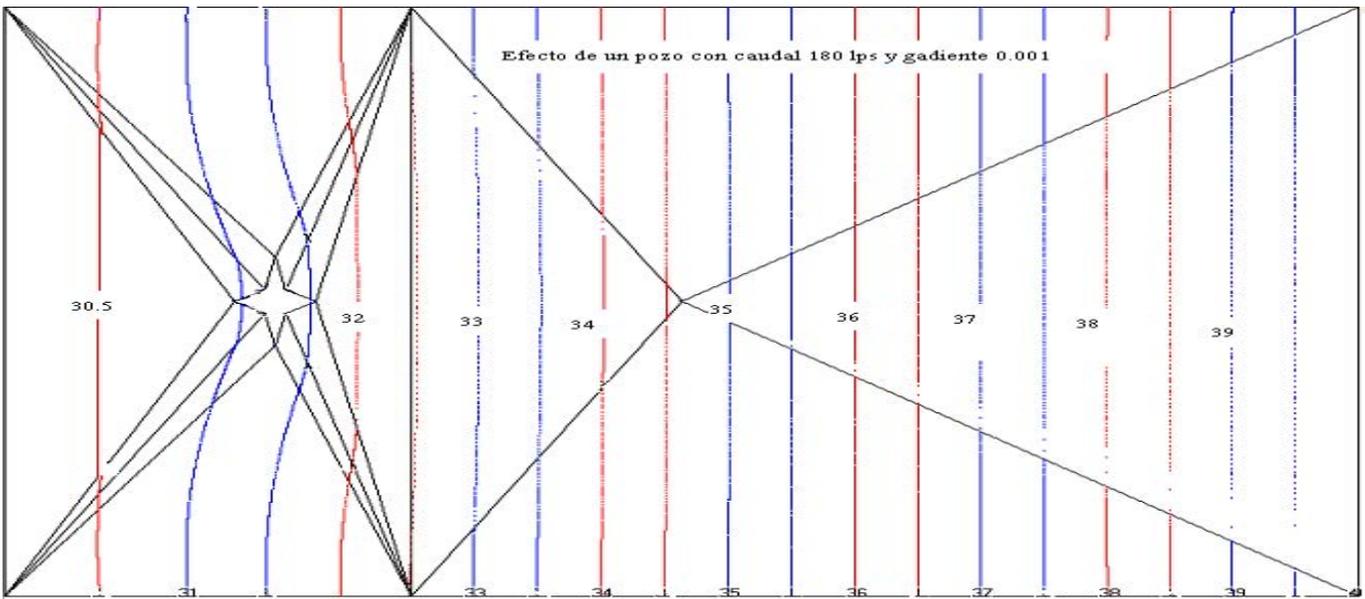


Figura 3. Efecto regional del bombeo de un pozo con gradiente natural.

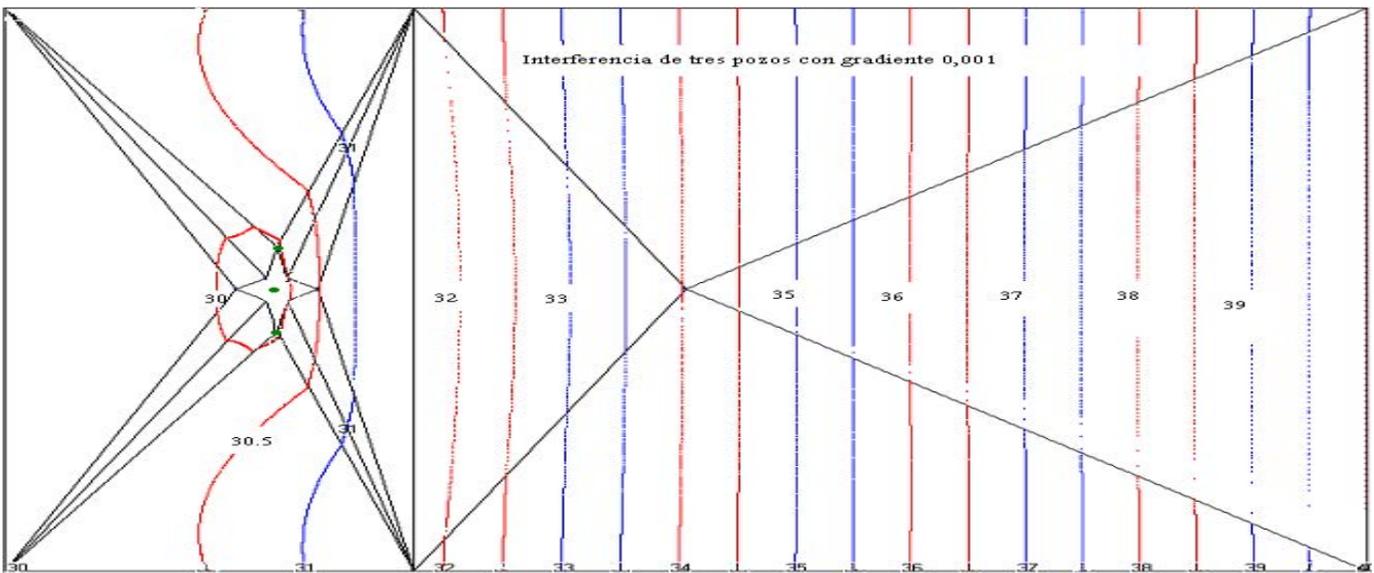


Figura 4. Efecto regional del bombeo de tres pozos con gradiente natural.

En el segundo caso se puede determinar que antes del bombeo el caudal de circulación era de **462 lps**, al imponérsele una extracción de **460 lps** se obliga a inducir un gasto aguas arriba de **555 lps** y se mantiene una descarga de **95 lps** como resultado de la simulación numérica.

Los efectos locales de los dos pozos adicionados no es posible observarlo en la figura, ya que la discretización no lo permite, sin embargo el efecto de la interferencia si se manifiesta en el pozo central y se puede observar en la propia figura se presenta la solución analítica, obteniéndose en el pozo de bombeo para **42 días** de bombeo un abatimiento de **2,61 m** correspondiente a un radio de influencia de **9712m** y el valor obtenido de la simulación sería de **2.19m**. El efecto de la interferencia de los pozos que bombean **140 lps** sería de **1,34m**, por lo que el resultado analítico sería de un abatimiento total de **3,95m** y de acuerdo con la simulación **3,46m**.

En la Figura 3, se puede apreciar el efecto regional del primer caso, con el incremento del gradiente aguas arriba y su disminución aguas abajo. Solo con los datos locales alrededor del pozo de bombeo, se podrían observar los conos de abatimiento que dicho pozo induce.

En la Figura 4, se aprecia el cono de depresión regional que se induce cuando están bombeando los tres pozos y aunque aparentemente por la equidistancia utilizada entre hidroisohipsas no hay descarga aguas abajo, esta si existe como se dijo en un párrafo anterior

Para ilustrar la aplicación de lo anteriormente desarrollado en un caso real, se muestran los resultados de la simulación regional con un refinamiento de malla, realizada por Uranga y Calle (2006), en el acuífero de Cuenca Sur de la Habana para evaluar el efecto del campo de pozos del acueducto de igual nombre.

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS ANTERIORES CON SIMULACIÓN DE UN CASO REAL

Las propiedades utilizadas en esta simulación se corresponden con los resultados de la calibración del modelo regional de este tramo realizada por Llanusa et al. (1990), que para la zona de los pozos que se ilustra se obtuvieron las siguientes:

$K_D= 145 \text{ m/d}$, $K_T=70 \text{ m/d}$, $E=0.01$ y 70m de espesor de acuífero

Gradiente natural generado para condiciones sin explotación y con recarga correspondiente a un año del 75%, **$I_0= 4 \times 10^{-4}$**

En la Figura 5 se aprecia el comportamiento de las hidroisohipsas inducido por el campo de pozos, utilizando el efectote de cinco pozos bombeando cada uno 214 lps y

admitiendo interferencia, ubicados en los nodos (72, 73, 74, 75 y 76), con distancias aproximadas entre ellos de 550 m, semejantes a las reales.

Se puede apreciar el efecto del cono de depresión regional, de manera similar a los mapas de hidroisohipsas reales de diferentes periodos en dicha zona Dilla y Llanusa (2005).

De los resultados anteriores se puede concluir, que la red de observación sistemática que se utiliza para la construcción de los mapas de hidroisohipsas, es insuficiente para controlar los conos de bombeo y por consiguiente los conos de intrusión salina asociados a estos en los acuíferos costeros abiertos y sin protección geológica como es el caso ilustrado de Cuenca Sur de la Habana, esto trae como consecuencias que el acuífero se encuentre muy vulnerable a la contaminación si los usuarios utilizan la dilución del agua con otros pozos que tengan mejor calidad y sino se controlan sistemáticamente los niveles dinámicos en los pozos de bombeo y la calidad del agua de cada uno de ellos.

ABATIMIENTOS EN LOS POZOS DE BOMBEO Y LA SIMULACIÓN REGIONAL

En los procesos de simulación regional de acuíferos, por la escala de trabajo se realiza la calibración utilizando la red de pozos de observación sistemática, por lo que los mapas de hidroisohipsas tanto reales como simulados no tienen en cuenta los descensos que se producen en los pozos de bombeo, en tal sentido cuando se calculan los recursos posibles a extraer del acuífero no se consideran las restricciones en los descensos en los pozos de bombeo, aspecto de gran importancia sobre todo en los acuíferos costeros donde se pueden producir conos de depresión y conos de intrusión como consecuencia de los anteriores que pueden llegar a inutilizar pozos y sectores importantes del acuífero. En tal sentido y en trabajos anteriores, Cabrera y Hernández (2009), se ha estado insistiendo en la necesidad de considerar los descensos en los pozos de bombeo y se propuso la variante de realizar un mallado en forma telescópica alrededor de cada pozo de bombeo para tratar de obtener dichos descensos, indudablemente, esto obliga a incrementar significativamente el número de elementos del modelo de simulación y complica en gran medida el empleo de los modelos de administración para definir políticas óptimas de explotación, Dilla (2004).

Una variante alternativa en lugar de tal refinamiento de la malla es refinar la malla hasta hacer coincidir los pozos de explotación con nodos, lo que implicaría que las cargas obtenidas seguirían siendo las correspondientes a un modelo regional, pero que se podrían estimar las cargas correspondientes a cada pozo de bombeo a partir de los resultados de un experimento numérico realizado utilizando AQUIMPE, válido no solo para régimen lineal, sino extensivo a régimen no lineal para considerar el efecto de

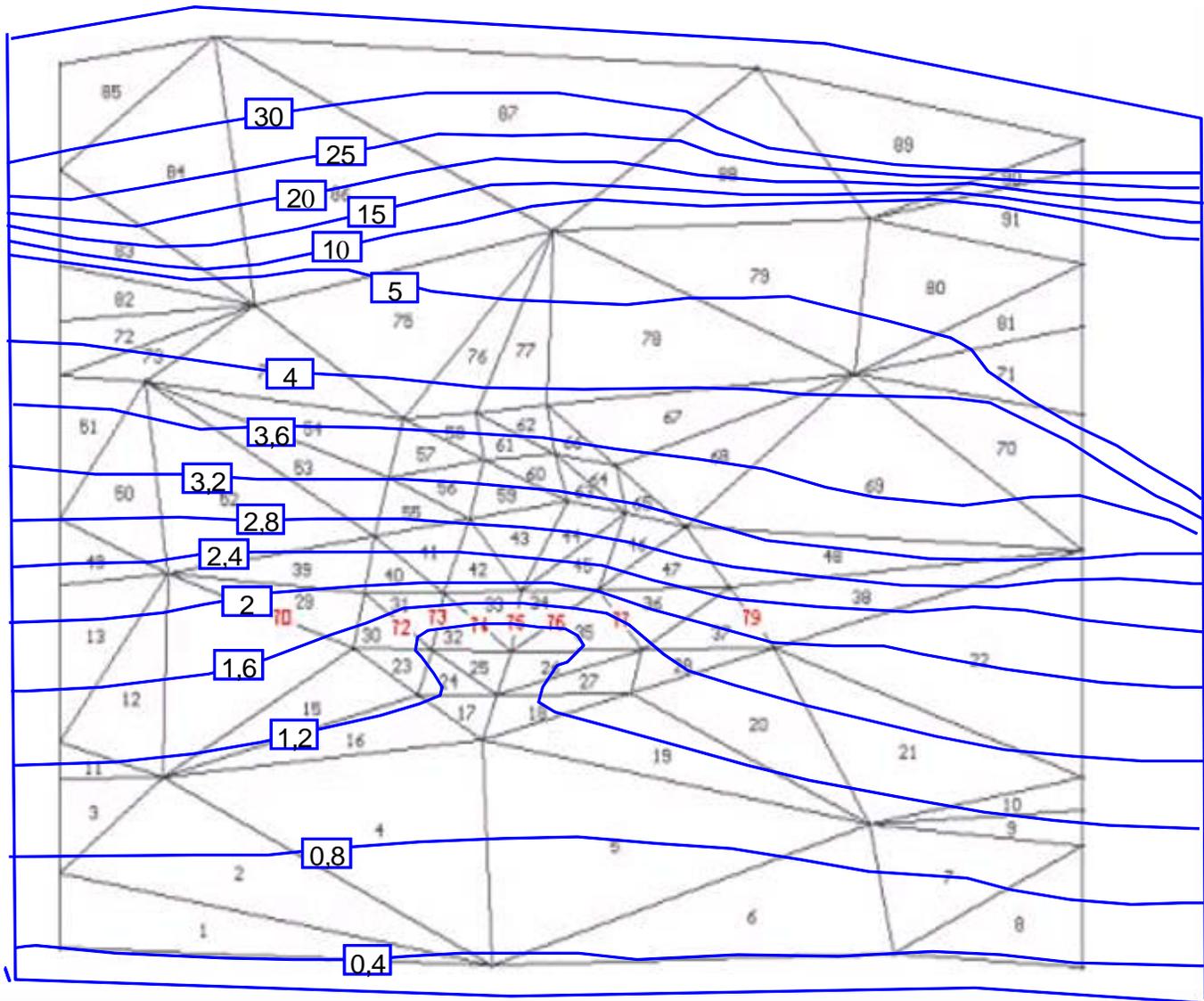


Figura 5. Comportamiento regional del campo de pozo de Cuenca Sur Habana

la no linealidad del flujo que se manifiesta en las proximidades del pozo de bombeo.

La ecuación del abatimiento en un pozo de bombeo considerando el régimen no lineal se expresa por:

$$S_{p_r} = 0,366 \frac{Q}{T_D} \log\left(\frac{r_o}{r_p}\right) + \left(\frac{Q}{2\pi T_T}\right)^2 \frac{1}{r_p} \dots\dots(4)$$

La ecuación anterior puede ser transformada en función del radio de Darcy definido por Pérez Franco como:

$$r_D = \frac{Q}{0,1\pi T_D} * \left[\frac{K_D}{K_T}\right]^2 \dots\dots(5)$$

Sustituyendo (5) en (4) y sacando factor común se obtiene la siguiente ecuación:

$$S_{p_r} = \left(0.366 * 86.4 * \log\left(\frac{r_0}{r_p}\right) + \frac{8.64 * R_D}{4\pi r_p} \right) * \frac{Q}{T_D}$$

$$= \left(31.62 * \log\left(\frac{r_0}{r_p}\right) + 0.6875 * \frac{R_D}{r_p} \right) * \frac{Q}{T_D}$$

La ecuación anterior representa el abatimiento unitario que analíticamente se obtendría en cada pozo de bombeo.

En la simulación de un pozo de bombeo por un nodo a escala regional al que se le asignara el mismo caudal, se obtendría un descenso al aplicar el Método de los Elementos Finitos con triángulo cuadrático que depende del refinamiento de la malla y que en un experimento numérico realizado se pudo obtener una expresión analítica en

función de las áreas de los elementos que contribuyen al nodo y que de acuerdo con la ecuación de ajuste en la Figura 6, responde a la siguiente expresión:

$$S_{reg} = (70/\sqrt[3]{Area(hectárea) + 37}) * \frac{Q}{T_D} \dots\dots\dots (6)$$

Por lo que para obtener las cargas en los pozos de bombeo, bastaría con obtener la carga simulada en dicho nodo y restarle la diferencia entre el descenso analítico y el de la simulación regional, de donde se obtendría la siguiente expresión:

$$h_{pi} = h_{si} - \left((31.62 * \log(\frac{r_0}{r_p}) + 0.6875 * \frac{R_D}{r_p}) - (70/\sqrt[3]{Area(hectárea) + 37}) * \frac{Q_i}{T_{Di}} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$h_{pi} = h_{si} - (Factor) * \frac{Q_i}{T_{Di}} \dots\dots\dots (8)$$

En todas las fórmulas anteriores el caudal se expresa en litros por segundo Q (lps) y la transmisividad TD en (m²/d).

En la Figura 7, aparece cómo influyen las diferentes componentes que integran al Factor para considerar el

efecto local, para ello se varió el radio de influencia de 800 a 8000 metros, el Radio de Darcy desde el radio del pozo de bombeo, donde el régimen es lineal hasta 120 metros del centro del pozo de bombeo y las áreas de contribución al nodo desde 100 hectáreas hasta 1200 hectáreas. Los resultados obtenidos muestran que las mayores influencias la determina el régimen no lineal y que el Factor (adimensional), tiene un rango de variación de 86 a 450.

Para estimar la magnitud del Factor pudiera hacerse mediante un procedimiento de calibración con datos de niveles reales observados en los pozos de bombeo, pero su orden de magnitud es equivalente a dividir la transmisividad darciana entre el gasto específico Q_s (lps/m) de cada pozo de bombeo.

$$Factor = \frac{T_D}{Q_s}$$

Observe que para el caso de régimen lineal, pozo perfecto y sin considerar las pérdidas por estructuras, la T_D se puede estimar como 100 veces el gasto específico, lo que daría un valor equivalente al obtenido en la propia Figura 7.

Los anteriores resultados permiten entonces reducir de manera significativa la cantidad de elementos en el modelo regional y que sea factible en determinados casos considerar como restricciones del modelo de administración los niveles que se producirían en los pozos de bombeo en función del caudal de bombeo en estos y de las

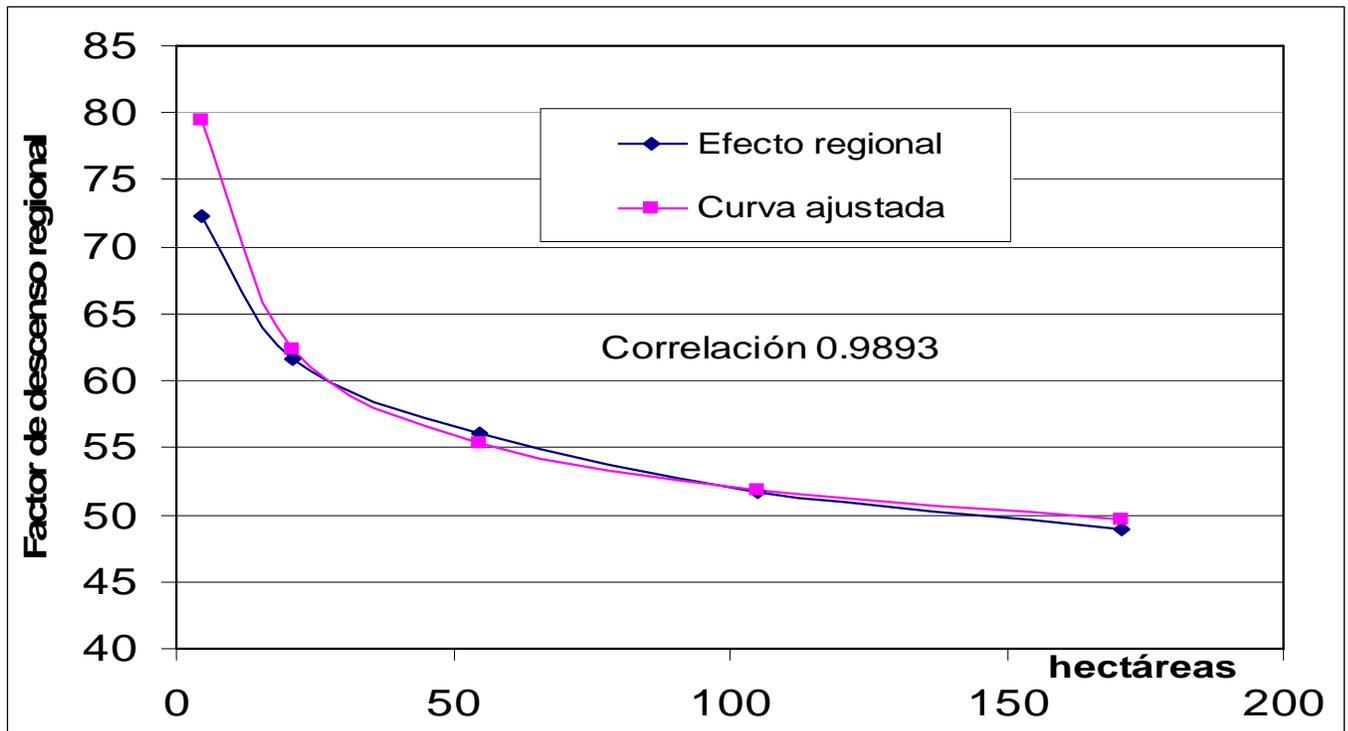


Figura 6. Influencia de la discretización en el Factor para obtener el efecto local.

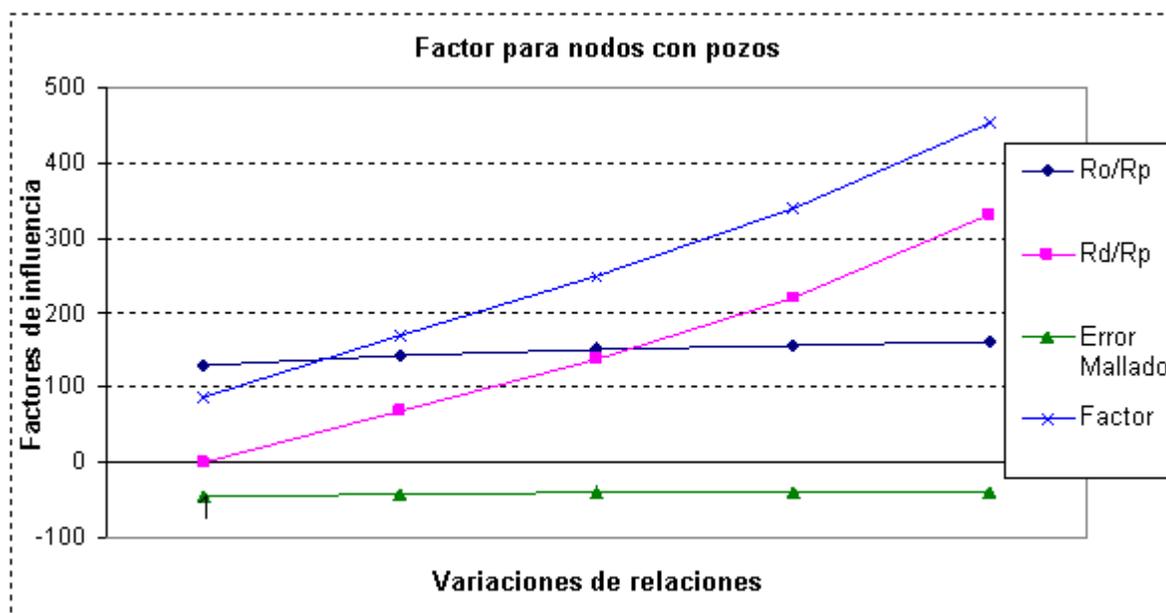


Figura 7. Factor para determinar el nivel en los pozos de bombeo.

cargas obtenidas por el modelo de simulación regional.

La relación entre la simulación regional de acuíferos y los pozos de bombeo fue estudiada por Pérez Monteagudo (1995), sin embargo, los resultados de este trabajo permiten discrepar de algunas consideraciones realizadas en ese momento y concluir lo siguiente:

- No basta con hacer coincidir los pozos de bombeo con nodos, pues sigue siendo un modelo regional refinado.

- No existe un basamento teórico ni práctico que sustente el concepto de radio equivalente para determinar las diferencias entre la carga simulada en un nodo que represente a un pozo de bombeo con la correspondiente a este.

- Por lo general, a la distancia a la que se encuentran los pozos de bombeo no se manifiesta el efecto cuadrático, solo la del propio pozo de bombeo, por lo que no es necesario la superposición de las componentes no lineales.

- Los efectos de la interferencia entre pozos se logra con el modelo regional, refinado y los efectos locales solo son los del propio pozo de bombeo.

- No es necesario realizar y calibrar dos modelos, ya que no hay información para esto, lo que si es necesario es calibrar el parámetro que representa a los efectos locales, por tal motivo no vale la pena diferenciar las causas que originan las diferencias entre las cargas simuladas y las observadas, donde estarían: las de penetración parcial, refinamiento de la malla, régimen no lineal, pérdidas por estructuras, tipo de acuífero, anisotropía, heterogeneidad local, etc

CONCLUSIONES

La explotación sostenible de los acuíferos costeros es una tarea de primer orden para los gestores del recurso

hidráulico en estas fuentes. La utilización de la modelación matemática representa un indiscutible apoyo a este objetivo por las siguientes razones que se desprenden de este trabajo:

- ◆ Permite complementar las metodologías de diseño de campo de pozos teniendo en cuentas las variaciones espaciales de las propiedades hidrogeológicas, características de las obras de captación, efectos de interferencia entre pozos, etc.

- ◆ Se demuestra que no basta con la red de observación sistemática, que utiliza los pozos de observación y la construcción de los mapas de hidroisohipsas, para evaluar el estado del acuífero, ya que en estos no se incluyen los efectos locales de los pozos de bombeo que pueden provocar conos de intrusión salina y la salinización del acuífero.

- ◆ Las políticas de asignación de la explotación con el Plan del Uso del Agua no pueden quedarse a nivel de empresas y conjuntos de pozos, aunque se haya realizado el cálculo de los recursos disponibles para un año determinado, sino que se requiere en algunos lugares restringir la extracción a nivel de pozo de bombeo.

- ◆ Cuando el objetivo del modelo del acuífero sea el de la gestión de la explotación del sistema, en la definición del modelo conceptual del acuífero, debe evaluarse la necesidad de representar cada pozo de bombeo por un nodo, calibrar propiedades con la red de observación sistemática y posteriormente determinar para cada nodo coincidente con el pozo, el factor que permite determinar la carga en el pozo en dependencia de la carga simulada regionalmente y de la relación entre el caudal de bombeo del mismo y la transmisividad hidráulica.

- ◆ Para poder optimizar la explotación del acuífero de acuerdo con los anteriores planteamientos, se requiere de

la utilización de la modelación matemática y su vinculación con los modelos de administración, para lo cual se pueden seguir los procedimientos sugeridos en este trabajo.

REFERENCIAS

1. Dilla, F. (2004). "Modelos de administración óptima de acuíferos costeros". Memorias del Primer Taller sobre vulnerabilidad de los acuíferos costeros en el Caribe Insular. CUJAE. Ciudad de la Habana.
2. Dilla, F. y Llanusa, H. (2005). "Modelación matemática del flujo y la salinidad en la Subcuenca HS-3 de la Cuenca Sur". Informe Técnico. CIH. ISPJAE.
3. Cabrera, E. y Hernández, A. O. (2009). "Modelación del agua subterránea a escala regional con refinamiento local de la malla. Planteamiento y validación del algoritmo". (Enviado a la Revista Ingeniería Hidráulica de México).
4. Hernández, A. O.; Martínez, J. B.; Dilla, F.; Llanusa, H. (2001). "Modelación de Acuíferos". Texto de la Maestría de Ingeniería Hidráulica. CIH, ISPJAE,
5. Hernández, A. O. y Llanusa, H. (2006). "La Intrusión Salina y el Manejo de los Recursos Hidráulicos en los Acuíferos Costeros". Monografía. Red CYTED. (En edición).
6. Hernández, A. O. (2008). "The sustainable management of the coastal aquifers to face the climatic change". UNESCO GRAPHIC Project. "Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change" Launching of Andros Case Study. Nassau, March 17-19,
7. Llanusa, H. y otros. (1990). "Modelo Matemático del acuífero costero del Sur de La Habana". Informe Técnico. CIH. ISPJAE. Cuba.
8. Pérez Franco, D. (2001). "La explotación del agua subterránea: un nuevo enfoque". Ed. Félix Varela. La Habana.
9. Pérez Franco, D. (2004). "Nuevo enfoque en el tratamiento de la intrusión salina en los acuíferos costeros". Memorias del Primer Taller de expertos en vulnerabilidad de acuíferos costeros en el caribe insular. CUJAE. Ciudad de la Habana. Cuba. Octubre 12-15.
10. Pérez Monteagudo F. (1995). "La hidráulica de captaciones y la modelación matemática regional de acuíferos". Tesis Doctoral en Ciencias Técnicas. ISPJAE.
11. Uranga, B. Y. y Calle G. Y. (2006). "Uso de la Simulación numérica en el diseño y explotación sustentable de acuíferos costeros". III Seminario Internacional del Uso Integral del Agua. C. de la Habana. Cuba.

Recibido: Septiembre del 2010
Aprobado: Octubre del 2010