

Delimitación de perímetros de protección de pozos en un acuífero libre con conductividad hidráulica vertical variable

José Luis Expósito-Castillo
Jaime M. Gárfias-Soliz
Roberto Franco-Plata
María V. Esteller-Alberich

Universidad Autónoma del Estado de México

La delimitación de los perímetros de protección de pozos es un importante componente en la protección de las aguas subterráneas, sin embargo, asumir en estos cálculos que el medio es homogéneo, cuando en realidad no lo es, puede provocar errores significativos y consecuentemente poner en riesgo la salud de las personas y la propia inversión. En el presente trabajo se ha elaborado una comparación entre diferentes variantes analíticas para el cálculo de los perímetros de protección y el modelo numérico VisualModflow como un método de mayor precisión, demostrándose la importancia de considerar en los cálculos la heterogeneidad del medio. Se discuten las causas de las discrepancias en los resultados obtenidos y se propone modificar las variantes analíticas mediante la introducción del valor de la conductividad hidráulica más elevado determinado en la serie litológica del pozo. La modificación propuesta mejora en más de un 30% los resultados obtenidos, lo que favorece su aplicación en las condiciones analizadas.

Palabras clave: heterogeneidad de acuíferos, método analítico, modelación numérica, perímetros de protección de pozos.

Introducción

Antecedentes

La mayoría de las fuentes cubanas de abasto de agua subterránea a la población se localizan en acuíferos libres de marcada heterogeneidad. En tal sentido, y con el objetivo de salvaguardar la calidad de sus aguas, el Instituto Cubano de Recursos Hidráulicos establece en 1990 la obligatoriedad de la implementación de perímetros de protección alrededor de los pozos destinados al consumo humano (NC 93-01-209, 1990). Un punto básico dentro de dicha implementación es precisamente la dificultad de la delimitación de los perímetros en acuíferos heterogéneos (Hirata y Reboucas, 1999; López, 2002; Expósito *et al.*, 2004).

Los métodos usados para la predicción de los perímetros de protección varían desde simples métodos analíticos, donde las propiedades hidráulicas son descritas por un único valor promedio, hasta la modelación

numérica, la cual permite más acertadamente representar las heterogeneidades del acuífero. Sin embargo, a pesar de las limitaciones de los métodos analíticos, éstos continúan usándose (Foster *et al.*, 2003; Martínez y García 2003; Williams y Fenske, 2004), dada la dificultad de justificar los costos asociados con la obtención de grandes bases de datos de campo necesarias para el empleo de la modelación numérica, sobre todo en el caso de fuentes que abastecen a localidades pequeñas.

De lo anterior se deriva la importancia de valorar, siempre que los datos de campo lo permitan, la exactitud de las delimitaciones efectuadas por los métodos analíticos para diferentes condiciones hidrogeológicas, teniendo en cuenta que dicha exactitud es de extrema importancia a la hora de considerar el riesgo potencial de contaminarse la fuente y las restricciones del uso del suelo.

El objetivo del presente estudio fue delimitar, mediante el empleo de diferentes metodologías, las zonas de protección sanitaria para un pozo de agua mineral ubicado en un acuífero con conductividad hidráulica vertical

variable. Este análisis permitió detectar, para las condiciones analizadas, las limitaciones que presentan las variantes analíticas utilizadas y proponer modificaciones con el objetivo de mejorar su precisión a tal grado que permitan su utilización con mayor certidumbre como herramienta de delimitación de perímetros de protección de pozos previa a la modelación numérica.

Descripción del área de estudio

Características generales

El área de estudio está ubicada en la parte central de la República de Cuba, en el municipio Camajuaní, perteneciente a la provincia de Villa Clara (ilustración 1). El relieve es ondulado, con alturas máximas que alcanzan los 180 msnm. Las temperaturas promedio oscilan entre 20 y 25° C, llegando en ocasiones a valores extremos de 27° C, siendo la temperatura promedio de 24.7° C.

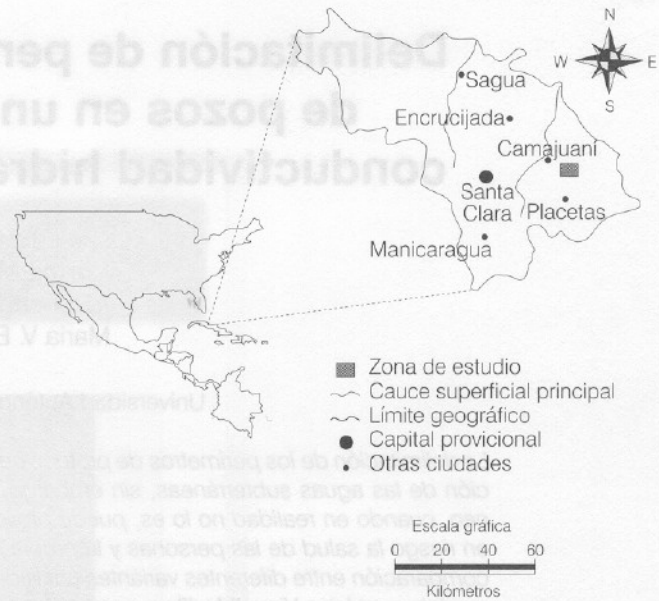
El régimen de lluvias está bien diferenciado a lo largo del año hidrológico: un periodo lluvioso de mayo a octubre, y otro seco de noviembre a abril. Durante el periodo seco, la cantidad de lluvia es relativamente constante de 400-500 mm, lo que representa el 25-35% del volumen anual de lluvias. Durante el periodo húmedo, las precipitaciones alcanzan los 1,000 mm. La mayor cantidad de precipitaciones coincide con los meses de mayo, septiembre y octubre (Expósito, 1993).

Características hidrogeológicas

La zona de los trabajos se ubica en el área estructurofacial Camajuaní (Vasielivich, 1989). A esta zona pertenecen los sedimentos carbonatados de las formaciones Margarita y Vega, de edad Cretácico Inferior y Paleógeno, respectivamente (ilustración 2). La formación Margarita está conformada principalmente por calizas arcillosas de capa fina. Las calizas son de color beige-amarillento. El espesor de la formación se estima que fluctúa entre 200 y 250 m. El acuífero desarrollado en esta formación es el de mayor interés del área de estudio, por ser donde se localiza el pozo PH-1, objeto de esta investigación.

Con base en los trabajos experimentales realizados en el pozo PH-1 (bombeos por intervalos y geofísica de pozos) perforado hasta los 95 m de profundidad, y en perfecta concordancia con las características hidráulicas de este tipo de acuífero, fue posible diferenciar tres capas con diferentes conductividades hidráulicas: la primera de 3 a 30 m, con una conductividad hidráulica de 6 m/d; la segunda de 31 a 70 m, con una conductividad hidráulica de 3 m/d, y la tercera de 71 a 95 m, con una conductividad hidráulica de 0.4 m/d.

Ilustración 1. Ubicación del área de estudio. Se muestran además las principales localidades de la provincia de Villa Clara, Cuba.



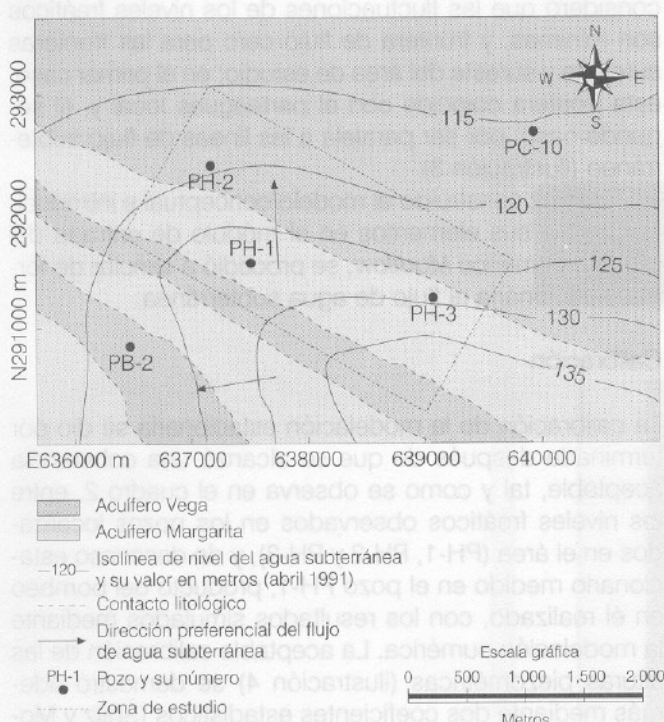
La formación Vega está representada por brechas carbonatadas consolidadas, calizas, areniscas, margas y arcillas. De acuerdo con trabajos previos (Vasielivich, 1989), se estima que el espesor de esta formación alcanza unos 500 m. Los trabajos experimentales realizados en los pozos PH-2 y PH-3 localizados en esta formación (Expósito, 1993) permitieron diferenciar dos capas de acuerdo con el valor promedio de su conductividad hidráulica: una superficial de 0.4 m/d y una segunda de 0.1 m/d. La conductividad hidráulica de este acuífero es más baja que la del acuífero Margarita debido a su menor grado de agrietamiento.

Ambos acuíferos son no confinados, donde el escurrimiento subterráneo se produce principalmente a través de las fisuras.

Delimitación de los perímetros de protección

Los métodos utilizados en la delimitación de los perímetros de protección de pozos se agrupan en seis clases (USEPA, 1993): 1) radio fijo arbitrario, 2) radio fijo calculado, 3) catálogo de formas simples, 4) método analítico, 5) mapeo hidrogeológico y 6) modelos numéricos de flujo y transporte. De los métodos anteriormente mencionados, dos fueron los seleccionados para este trabajo. En primer lugar se seleccionó el método de modelación numérica, en particular el modelo *Modflow* (McDonal y Harbaugh, 1988) y en segundo lugar, el método analítico con cuatro variantes: 1) variante de Wyssling (Moreno y Martínez, 1991),

Ilustración 2. Esquema hidrogeológico del área de estudio. Se muestra la distribución de los acuíferos en el área y la superficie piezométrica que los caracteriza.



2) variante de Minkin (Oradoskaia y Lapchin, 1987), 3) variante de la norma cubana vigente (NC 93-01-209, 1990) y 4) variante de Pérez Monteagudo (Pérez, 1995, 2003).

El método analítico seleccionado, a pesar de ser uno de los más difundidos, está previsto para ser utilizado solamente en acuíferos homogéneos e isotrópicos. Por tal motivo, tanto dicho método como el de la modelación numérica se aplicaron en condiciones de medio poroso equivalente, dado que el área cumple con los criterios que para este fin establece la U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 1991): a) alta densidad de fracturas, b) orientación de fracturas no uniforme, c) apertura de fracturas relativamente uniformes y d) área de estudio mayor en cien veces al espacio medio entre fracturas.

Para la selección del modelo numérico se analizó primeramente que se contase con la calidad y cantidad de los datos necesarios para su ejecución y calibración y, en segundo lugar, el hecho de que el método permitiese tomar en cuenta el flujo tridimensional, la distribución espacial de los parámetros hidráulicos y la heterogeneidad del acuífero, entre otros factores. Todo esto permitió considerar que el modelo proporciona resultados más próximos a la realidad que los obtenidos al aplicar otros métodos.

En cuanto a la selección de las variantes del método analítico debe destacarse que la primera variante fue seleccionada por ser una de las que más se ha utilizado durante muchos años en diferentes países de Europa (Martínez y García, 2003). Las tres variantes restantes fueron seleccionadas por ser las que durante diferentes etapas se han usado en Cuba. Debe destacarse que los perímetros de protección de pozos se dividen generalmente en tres zonas (NC 93-01-209, 1990; Pérez, 2003; Martínez y García, 2003):

Zona I. Área alrededor del pozo en la cual se prohíben todas las actividades, excepto las relacionadas con el funcionamiento y mantenimiento de las instalaciones de bombeo. El criterio de delimitación suele ser un tiempo de tránsito de 24 horas o un área fijada de forma arbitraria de pequeña extensión (100-400 m²).

Zona II. Sitio alrededor de la zona I, cuya finalidad fundamental es proteger la captación de la contaminación bacteriológica. Se delimita generalmente en función de un tiempo de tránsito de cincuenta a sesenta días.

Zona III. Sector destinado a proteger la captación frente a la contaminación de larga persistencia. Se delimita generalmente en función de un tiempo de tránsito de dos a diez años.

De las tres zonas comentadas en el presente trabajo sólo se procedió a la delimitación de las zonas II y III, ya que para la delimitación de la zona I se utilizó un radio fijo arbitrario de 400 m².

Método de la modelación numérica

Para la delimitación de las zonas II y III de protección se combinó el modelo numérico *Modflow*, específicamente en su variante *VisualModflow* (Guiguer y Franz, 2001), con el código de seguimiento de partículas *Modpath* (Pollock, 1989), y así simular el sistema local de flujo de las aguas subterráneas para finalmente delimitar la zona de captura del pozo investigado.

Construcción del modelo conceptual y modelación del flujo

El área del modelo se estableció para una superficie compuesta por un rectángulo con dimensiones de 3,000 por 1,500 m, obteniéndose una superficie total de 4.5 km², la cual cubre adecuadamente el área de estudio (ilustración 3). Sobre el dominio del modelo se conformó una malla primaria de 30 x 30 m; posteriormente dicha malla fue refinada en la parte central del área de estudio, considerada la región de mayor interés, con el objetivo

Ilustración 3. Modelo conceptual del área de estudio, mostrando la localización de los acuíferos, la distribución de las capas modeladas, y las variables de entrada y salida de agua al sistema.



de detectar de forma adecuada variaciones del flujo de aguas subterráneas en los alrededores de la captación objeto de estudio. La malla refinada generó celdas de 15 x 15 m.

El dominio se consideró formado por dos acuíferos de tipo libre, uno caracterizado por dos capas y otro caracterizado por tres capas de acuerdo con las propiedades hidrodinámicas de los materiales (ilustración 3). La síntesis de los parámetros hidrogeológicos incorporados al modelo se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros de las capas en las que se basó la simulación del flujo.

Parámetros	Capas utilizadas					
	1	2	3	4	5	6
Recarga (mm)	450	-	480	-	-	-
K_{xx} (m/d)	0.4	0.01	6	3	0.4	
K_{yy} (m/d)	0.4	0.01	6	3	0.4	Considerada impermeable
K_{zz} (m/d)	0.04	0.001	0.6	0.3	0.04	
S_y	0.05	0.05	0.08	0.08	0.05	
n	0.05	0.05	0.08	0.08	0.05	

S_y = almacenamiento específico.

n = porosidad efectiva.

K = conductividad hidráulica.

En el área modelada se utilizaron dos condiciones de frontera; se impuso una carga constante para las fronteras noreste y noroeste del área de estudio, donde se consideró que las fluctuaciones de los niveles freáticos son mínimas, y frontera de flujo cero para las fronteras suroeste y sureste del área de estudio; en el primer caso, esta frontera coincide con el parteaguas local y, el segundo caso, por ser paralela a las líneas de flujo subterráneo (ilustración 3).

Una vez construido el modelo conceptual e introducidos todos sus elementos en el módulo de entrada del modelo numérico *Modflow*, se procedió a simular de forma estacionaria el flujo de agua subterránea.

Calibración

La calibración de la modelación estacionaria se dio por terminada después de que se alcanzó una coherencia aceptable, tal y como se observa en el cuadro 2, entre los niveles freáticos observados en los pozos localizados en el área (PH-1, PH-2 y PH-3), y de descenso estacionario medido en el pozo PH-1, producto del bombeo en él realizado, con los resultados simulados mediante la modelación numérica. La aceptable calibración de las alturas piezométricas (ilustración 4) se demostró además mediante dos coeficientes estadísticos (Spitz y Moreno, 1996): el coeficiente de determinación (CD) y el coeficiente de masa residual (CRM), de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (2)$$

donde \bar{O} es el valor observado, \bar{o} es la media de los valores observados, P es el valor obtenido por la modelación y n es el número de valores. Se obtuvo un CD de 1.02 y un CRM de 0.0044 (para la calibración perfecta, CD tiende a uno y CRM tiende a cero).

Delimitación de las zonas II y III de protección sanitaria

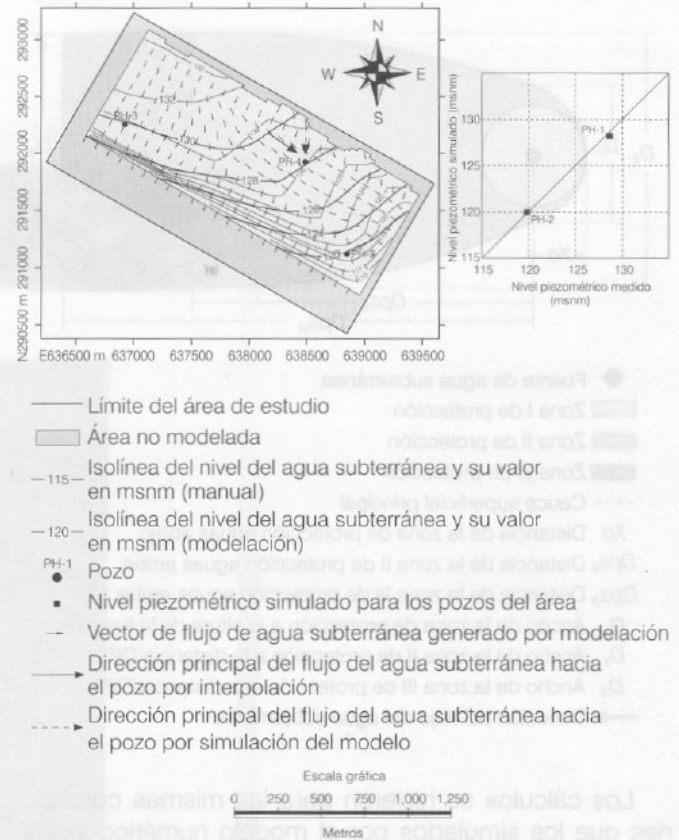
Una vez superadas las etapas anteriores se realizó la simulación final del flujo y se llevó a cabo el trazado de partículas hacia atrás. Los tiempos de tránsito utilizados son los establecidos en la norma cubana para tales efectos (NC 93-01-209): cien días para la zona de protección II y 1,825 días (cinco años) para la zona de protección III. El pozo se consideró abierto de 3 a 95 m de acuerdo con su propio diseño (perforado hasta los 95 m de profundidad, y encamisado y cementado hasta los 3 m de profundidad).

Debe destacarse, además, que en el proceso de modelación realizada fue necesario efectuar algunas suposiciones, como considerar al medio homogéneo e isotrópico en dirección horizontal para cada una de las capas delimitadas, y que la recarga por lluvia es uniforme para toda el área de estudio. Estas generalizaciones, aunque consecuentes con la información disponible (Expósito, 1993), crean algún grado de incertidumbre en los resultados alcanzados. Por tal motivo, es de uso común la multiplicación de los resultados obtenidos por coeficientes de seguridad o introducir dicho coeficiente en las fórmulas de cálculo. En la presente investigación se utilizó en las fórmulas de cálculo un coeficiente de seguridad de 1.3 de acuerdo con las indicaciones de la U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 1994).

Cuadro 2. Resultados de la calibración obtenida.

Pozos	Calibración por piezometría		Calibración por abatimientos estacionarios (Δh)			
	Piezometría observada (msnm)	Piezometría simulada (msnm)	Bombeo de 0-30 m		Bombeo de 70-95 m	
			(Δh) real (m)	(Δh) simulado (m)	(Δh) real (m)	(Δh) simulado (m)
PH-1	128.27	128.22	2.77	2.90	18.28	18.20
PH-2	119.86	120.00				
PH-3	129.85	129.93				

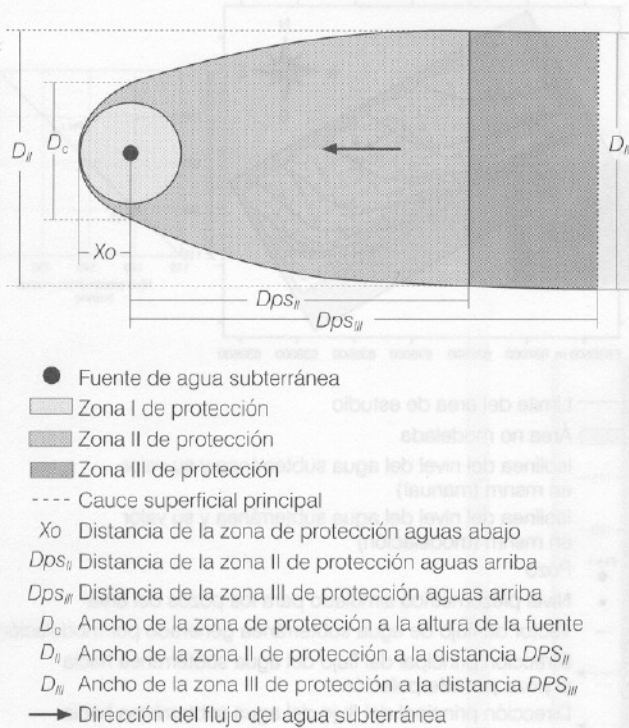
Ilustración 4. Mapa de niveles piezométricos medidos y simulados por la modelación para el área de estudio y la relación gráfica de ambos niveles.



Método analítico

Los cálculos estuvieron dirigidos a determinar las dimensiones de las zonas II y III de protección. En tal sentido, se calcularon los siguientes parámetros: distancia aguas arriba para las zonas II y III de protección (Dps_{II} y Dps_{III}) y aguas abajo de la fuente (X_o); ancho del perímetro a la altura de la captación (D_c) y a las distancias Dps_{II} y Dps_{III} (D_{II} y D_{III}), respectivamente (ilustración 5).

Ilustración 5. Representación esquemática de las zonas de protección, mostrando la distribución de las zonas de protección que se incluyen generalmente dentro del perímetro, y la simbología de los elementos a calcular.



Los cálculos se hicieron para las mismas condiciones que los simulados por el modelo numérico *Visual-Modflow*, es decir, para el pozo abierto de 3 a 95 m y utilizando un coeficiente de seguridad de 1.3, similar a lo establecido en Cuba (NC 93-01-209, 1990).

Se realizaron dos opciones de cálculo para cada una de las variantes analíticas. La primera consistió en aplicar los métodos analíticos en su forma original, considerando el medio hidrogeológico homogéneo e isotrópico, y utilizando la conductividad hidráulica ponderada de las capas perforadas ($K = 3.17$ m/d). La segunda opción de cálculo se deriva del hecho de que, en un acuífero libre multicapa, la velocidad máxima del flujo subterráneo horizontal ocurre en la capa de la mayor conductividad hidráulica (Cheng, 2000).

Para esta segunda opción de cálculo se propuso una adecuación a las variantes analíticas utilizadas, la cual consiste en mantener la conductividad hidráulica ponderada en las fórmulas que definen el ancho y la distancia aguas abajo de las zonas de protección (ecuaciones 4, 8, 9, 20, 21, 24 y 25), e introducir la conductividad hidráulica más elevada (6 m/d) en las fórmulas que definen la distancia aguas arriba de la fuente (Dps_{II} y Dps_{III}) (ecuaciones 3, 10, 14, 15 y 28), dado que el valor de esta con-

ductividad hidráulica define el menor tiempo de llegada del contaminante y, consecuentemente, la distancia aguas arriba para las zonas II y III de protección.

Al utilizar la segunda forma de cálculo se pretendió demostrar que, en un acuífero con variación vertical de la conductividad hidráulica, la conductividad hidráulica que debe utilizarse es la más alta y no la obtenida por ponderación.

A continuación se presenta la metodología de cada una de las variantes seleccionadas. El cuadro 3 presenta una síntesis de los parámetros utilizados en los cálculos.

Variante de Wyssling

Este método se desarrolló de la siguiente forma. Primero se calculó el radio de llamada (A), que posteriormente se utilizó en las fórmulas (6) y (7), después se determinó el ancho del perímetro a la altura de la captación (D_c), posteriormente se establecieron las dimensiones del perímetro aguas arriba (Dps_{II} y Dps_{III}) y abajo (X_o) de la captación, y finalmente se calculó el ancho del perímetro a las distancias Dps_{II} y Dps_{III} (D_{II} y D_{III}), respectivamente. Para los cálculos se utilizaron las siguientes expresiones (Martínez y García, 2003):

$$A = \frac{Q}{2 * \pi * K * h * l} \quad (3)$$

$$D_c = \frac{Q}{2 * K * h * l} \quad (4)$$

donde Q es el caudal de explotación previsto para la fuente, multiplicado por el coeficiente de seguridad 1.3; K , la conductividad hidráulica; h , el espesor del acuífero, e l es el gradiente hidráulico natural del agua subterránea.

Posteriormente se calculó la distancia aguas abajo (X_o) y aguas arriba de las zonas II y III de protección (Dps_{II} y Dps_{III}). Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes (Martínez y García, 2003):

$$L = Vr_1 * T \quad (5)$$

$$Dps = \frac{+L + \sqrt{L(L+8A)}}{2} \quad (6)$$

$$X_o = \frac{-L + \sqrt{L(L+8A)}}{2} \quad (7)$$

donde L es la distancia aguas arriba de las zonas de protección tomando solamente las características del flujo natural, Vr_1 es la velocidad real del agua subterránea en

Cuadro 3. Parámetros del área de estudio que se utilizaron en los cálculos de las zonas de protección por el método analítico.

Parámetros	Símbolos	Unidad de medida	Valor
Caudal de bombeo	Q	m ³ /d	345.6
Espesor de acuífero	h	m	92
Porosidad efectiva	n	adimensional	0.08
Gradiente hidráulico natural	l	adimensional	0.004
Gradiente hidráulico en el radio de influencia del bombeo	lc	adimensional	0.06
Capa 1 (3-30 m)	K ₁		6
Conductividad Capa 2 (30-70 m)	K ₂		3
hidráulica Capa 3 (70-95 m)	K ₃	m/d	0.4
Ponderada	K		3.17
Tiempo de tránsito (Zona II)	T ₂ ¹	d	100
Tiempo de tránsito (Zona III)	T ₃ ¹	d	1,825
Velocidad real del flujo sin influencias del bombeo (tomando K)	Vr ₁	m/d	0.16
Velocidad real del flujo sin influencias del bombeo (tomando K ₁)	Vr ₂	m/d	0.3
Velocidad real del flujo en el radio de influencia del pozo (tomando K)	Vri ₁	m/d	2.38
Velocidad real del flujo en el radio de influencia del pozo (tomando K ₁)	Vri ₂	m/d	4.5
Tiempo en que se estabiliza el radio de influencia	t	d	0.25

¹ Tiempo de tránsito establecido por las normativas cubanas (NC 93-01-209, 1990 y RLM, 1995).

la zona no influenciada por el bombeo utilizando la conductividad hidráulica ponderada K (para la adecuación se utilizó la conductividad más elevada del corte, K₁) y T es el tiempo de tránsito (T₂ para la segunda zona y T₃ para la tercera zona).

Finalmente se calculó el ancho del perímetro a las distancias Dps_{II} y Dps_{III}. Para esta variante, el valor calculado del ancho del perímetro de protección (D_{II} y D_{III}) a ambas distancias será el mismo.

$$D_{II} = D_{III} = \frac{Q}{K * h * l} \quad (8)$$

Variante de Minkin

A pesar que este método fue propuesto para acuíferos confinados (Oradoskaia y Lapchin, 1987), en Cuba se utilizó también para acuíferos libres, en los que el abatimiento causado por el bombeo fuese pequeño en relación con el espesor del acuífero. Partiendo de esta última simplificación se aplicó esta variante al pozo investigado.

Inicialmente se calculó el límite aguas abajo de la zona de captura del pozo (X_p) y seguidamente el parámetro indirecto de cálculo (T*):

$$X_p = \frac{Q}{2 * \pi * K * h * l} \quad (9)$$

$$T^* = \frac{K * l * T}{n * X_p} \quad (10)$$

Una vez obtenido el parámetro indirecto de cálculo (T*), mediante el empleo de tablas se identifican los demás parámetros indirectos de cálculo, R*, r* y d*, los cuales se utilizaron directamente en las fórmulas para determinar las distancias aguas arriba de las zonas II y III de protección (Dps_{II} y Dps_{III}), aguas abajo (X_o) y el ancho del perímetro de protección a la altura de la captación (D_C):

$$Dps = R^* * X_p \quad (11)$$

$$X_o = r^* * X_p \quad (12)$$

$$D_C = 2 * d^* * X_p \quad (13)$$

Para la variante Minkin, al contrario de la variante Wyssling, el valor calculado del ancho de la zona de protección sanitaria a la altura de la captación (D_C) es el mismo que el obtenido para el ancho de la zona de protección sanitaria a las distancias Dps_{II} y Dps_{III}.

Variante de la norma cubana

La metodología seguida fue la siguiente (NC 93-01-209, 1990):

Primero se calculó el radio de influencia del pozo durante su bombeo (R_o) y la velocidad real del agua subterránea en el radio de influencia del pozo (Vri₁):

$$R_o = 1.5 \sqrt{\frac{K * h * t}{n}} \quad (14)$$

$$Vr_i = \frac{K * lc}{n} \quad (15)$$

donde t es el tiempo que se considera tarda el radio de influencia en estabilizarse, que en el presente caso de estudio es de 0.25 días (Expósito, 1993); n es la porosidad efectiva del acuífero, e lc es el gradiente crítico del agua subterránea en la zona de influencia del pozo (aguas arriba).

Una vez conocidas las dimensiones del radio de influencia provocado por la explotación y el valor de la velocidad real del agua subterránea dentro del radio de influencia, se continuó con el cálculo de los siguientes parámetros: tiempo en que una partícula de agua tarda en recorrer el radio de influencia y llegar al pozo (Tr), tiempo de tránsito de la partícula con flujo natural (Tn), distancia a proteger en la zona no alterada por el bombeo (Dn), distancias aguas arriba de las zonas II y III de protección de la fuente (Dps_{II} y Dps_{III}), y distancia del perímetro aguas abajo (Xo):

$$Tr = \frac{Ro}{Vri} \quad (16)$$

$$Tn = T - Tr \quad (17)$$

$$Dn = Tn * Vr \quad (18)$$

$$Dps = Dn + Ro \quad (19)$$

$$Xo = \frac{Q}{2 * \pi * K * h * l} \quad (\text{similar a la ecuación 1})$$

Para la determinación del ancho de la zona de protección a la altura del pozo (Dc) y a las distancias Dps_{II} y Dps_{III} , se tomó como base para los cálculos la delimitación de la llamada "línea neutra", la cual funciona como frontera de la zona de captura del pozo y que a la vez limita el perímetro de protección. En tal sentido, considerando en un sistema de coordenadas rectangulares la coordenada X como perpendicular al flujo subterráneo y la Y como la que sigue la dirección de ese flujo, se puede definir esa "frontera" utilizando la siguiente expresión (Kennedy y Lennox, 1999; Gonzáles, 2002):

$$-\frac{Y}{X} = \tan \left(\frac{2 * \pi * K * h * l * \gamma}{Q} \right) \quad (20)$$

A partir del caudal de explotación Q conocido y el "gasto por unidad de ancho del acuífero" q_e , se utilizaron los "criterios de Minkin" para fijar los "puntos notables" de la

parábola definida por la ecuación (20) (Oradaskaia y Lichin, 1987; Gonzáles, 2002), donde se establece que

$$q_e = K * h * l$$

y

$$\beta = \frac{Q}{q_e}$$

se puede obtener el ancho de la zona de captura a la altura de la captación Dc mediante la expresión:

$$Dc = 0.5 * \beta$$

Para la determinación del ancho de la zona de captura a las distancias Dps_{II} y Dps_{III} , se utilizó la ecuación (20). Para el caso del ancho de la zona de captura a la distancia Dps_{II} , se consideró que el valor de X es igual a la distancia Dps_{II} ; mientras que para el caso del ancho de la zona de captura a la distancia Dps_{III} , se consideró que el valor de X es igual a la distancia Dps_{III} . De este análisis se desprenden las siguientes expresiones:

$$Y_{II} = Dps_{II} * \tan \left(\frac{2 * \pi * K * h * l * Y_{II}}{Q} \right)$$

$$Y_{III} = Dps_{III} * \tan \left(\frac{2 * \pi * K * h * l * Y_{III}}{Q} \right)$$

Una vez resueltas las expresiones anteriores por aproximaciones se obtienen D_{II} y D_{III} , teniendo en cuenta que

$$D_{II} = 2 * Y_{II}$$

$$D_{III} = 2 * Y_{III}$$

Variante de Pérez Montegudo

Pérez (1995, 2003) presentó modificaciones al método anteriormente descrito; específicamente en el cálculo de la distancia del perímetro aguas arriba de la fuente, manteniendo idénticas las demás fórmulas.

Según este investigador, los parámetros: (Ro), radio de influencia, (t), tiempo de estabilización del radio de influencia, abatimiento del pozo e (lc), gradiente crítico, son difíciles de estimar con precisión, sobre todo en aguas captaciones ya existentes, por lo que propone otra ecuación, independiente de estos parámetros, para delimitar las zonas de protección aguas arriba (Dps_{II} y Dps_{III}):

$$Dps = \sqrt{\frac{Q}{\pi * h * n} T + rp} + \frac{K * l * T}{n}$$

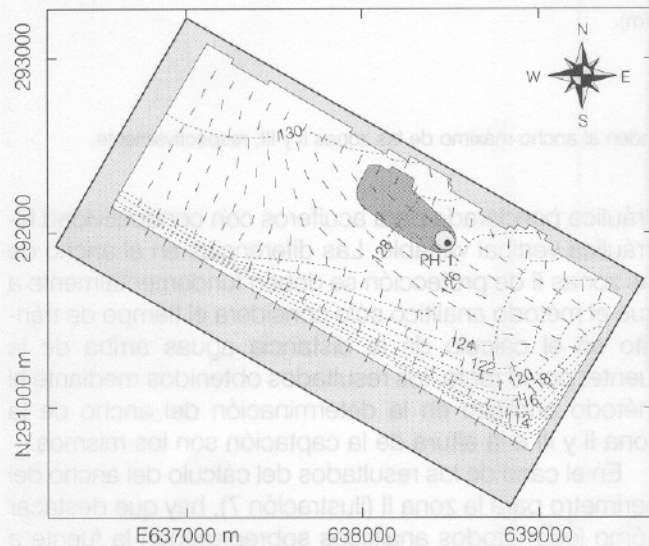
donde rp es el radio del pozo (m).

Los resultados corresponderán a Dps_{II} o Dps_{III} , dependiendo del tiempo de tránsito utilizado, T_2 o T_3 , respectivamente.

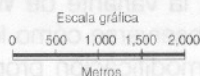
Resultados y discusión

Los resultados alcanzados tanto por la modelación numérica como por las variantes analíticas originales y con la modificación propuesta, se representan en las ilustraciones 6, 7 y 8, y se resumen en el cuadro 4. La ilustración 7 muestra los resultados obtenidos en la delimitación de la zona II de protección, tanto por las variantes seleccionadas del método analítico como por el modelo numérico *VisualModflow*. La ilustración 7a muestra los resultados obtenidos mediante las variantes en su forma original, considerando el medio homogéneo e isotrópico, y utilizando

Ilustración 6. Zonas de protección II y III obtenidas mediante la modelación numérica, mostrando la superficie piezométrica y los vectores de flujo generados por el modelo para el área de estudio.



- Zona II de protección (tiempo de tránsito $T=100$ días)
- Zona III de protección (tiempo de tránsito $T=1,825$ días)
- Límite del área de estudio
- Área no modelada
- Isolinéa del nivel del agua subterránea en mnsn
- Vector de flujo de agua subterránea
- Pozo



para los cálculos la conductividad hidráulica ponderada de todo el espesor del acuífero perforado.

La ilustración 7b, por su parte, muestra los resultados de las modificaciones propuestas en el presente estudio

Ilustración 7. Zona II de protección obtenida mediante diferentes variantes del método analítico y el modelo numérico; a) aplicación de las variantes originales y b) aplicación de las variantes con las modificaciones propuestas. Se observa cómo las variantes modificadas mejoran considerablemente su precisión aguas arriba de la fuente.

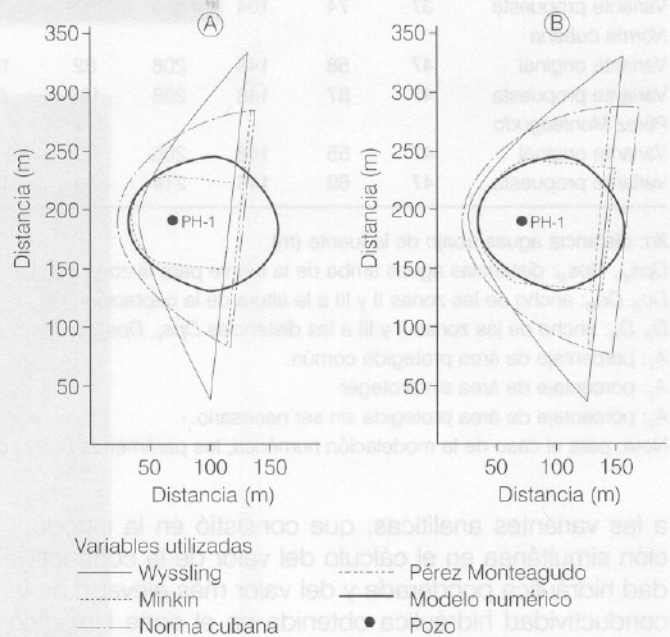
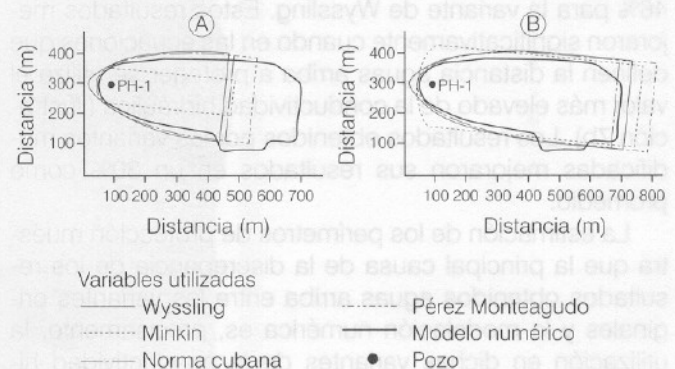


Ilustración 8. Zona III de protección obtenida mediante diferentes variantes del método analítico y el modelo numérico; a) aplicación de las variantes originales y b) aplicación de las variantes con las modificaciones propuestas. Se observa cómo las variantes modificadas mejoran considerablemente su precisión aguas arriba de la fuente.



Cuadro 4. Comparación de los resultados obtenidos por las variantes del método analítico y la modelación numérica.

Métodos y variantes	Zonas de protección y sus dimensiones														
	Zona II de protección							Zona III de protección							
	X_o	Dps_{II}	Dc_{II}	D_{II}	A_1	A_2	A_3	X_o	Dps_{III}	Dc_{III}	D_{III}	A_1	A_2	A_3	
Modelo numérico	38	86	113	113	100	0	0	42	620	137	246	100	0	0	
Wyssling															
Variante original	32	47	148	296	67	33	57	75	364	148	296	55	45	13	
Variante propuesta	40	70	148	296	92	8	101	82	630	148	296	98	2	13	
Minkin															
Variante original	37	50	75	75	52	48	0	47	393	119	119	34	66	1	
Variante propuesta	37	74	104	104	92	8	8	47	670	264	264	97	3	34	
Norma cubana															
Variante original	47	58	148	208	82	18	61	47	372	148	278	58	42	9	
Variante propuesta	47	87	148	208	100	0	110	47	605	148	290	96	4	15	
Pérez Monteagudo															
Variante original	47	55	148	206	79	21	57	47	455	148	278	72	28	9	
Variante propuesta	47	69	148	214	88	12	77	47	713	148	292	98	2	37	

X_o : distancia aguas abajo de la fuente (m).

Dps_{II} , Dps_{III} : distancias aguas arriba de la fuente para la zona II y III, respectivamente (m).

Dc_{II} , Dc_{III} : ancho de las zonas II y III a la altura de la captación (m).

D_{II} , D_{III} : ancho de las zonas II y III a las distancias Dps_{II} , Dps_{III} , respectivamente (m).

A_1 : porcentaje de área protegida común.

A_2 : porcentaje de área sin proteger.

A_3 : porcentaje de área protegida sin ser necesario.

Nota: para el caso de la modelación numérica, los parámetros D_{II} , D_{III} corresponden al ancho máximo de las zonas II y III, respectivamente.

a las variantes analíticas, que consistió en la introducción simultánea en el cálculo del valor de la conductividad hidráulica ponderada y del valor más elevado de la conductividad hidráulica obtenida en el corte litológico de la captación.

Una comparación entre los resultados obtenidos mediante las variantes analíticas y la modelación numérica para la zona II (ilustración 7a) muestra que las variantes del método analítico seleccionadas no permiten la protección correcta aguas arriba. Las inexactitudes en los resultados obtenidos por estas variantes oscilan desde un 33% para la variante de la norma cubana hasta un 46% para la variante de Wyssling. Estos resultados mejoraron significativamente cuando en las ecuaciones que definen la distancia aguas arriba a proteger se utiliza el valor más elevado de la conductividad hidráulica (ilustración 7b). Los resultados obtenidos por las variantes modificadas mejoraron sus resultados en un 30% como promedio.

La estimación de los perímetros de protección muestra que la principal causa de la discrepancia de los resultados obtenidos aguas arriba entre las variantes originales y la modelación numérica es, precisamente, la utilización en dichas variantes de la conductividad hi-

dráulica ponderada para acuíferos con conductividad hidráulica vertical variable. Las diferencias en el ancho de las zonas II de protección se deben fundamentalmente a que el método analítico sólo considera el tiempo de tránsito en el cálculo de la distancia aguas arriba de la fuente; por lo tanto, los resultados obtenidos mediante el método analítico en la determinación del ancho de la zona II y III a la altura de la captación son los mismos.

En el caso de los resultados del cálculo del ancho del perímetro para la zona II (ilustración 7), hay que destacar cómo los métodos analíticos sobreprotegen la fuente a sus lados. Esto es consecuencia de la influencia en estos resultados de la recarga por infiltración, considerada en la modelación numérica y no en las demás variantes analíticas.

En la ilustración 8 se presentan los resultados en la delimitación de la zona III de protección. En este caso, en la ilustración 8a se muestran las inexactitudes en los resultados obtenidos por estas variantes analíticas, en comparación con el modelo numérico, las cuales oscilan desde un 27% para la variante de Pérez Monteagudo, hasta un 41% para la variante de Wyssling. En la ilustración 8b puede observarse cómo los resultados obtenidos mediante la modificación propuesta mejoran, en

promedio, en más de un 30% (cuadro 4), alcanzándose una notable similitud con los resultados de la modelación numérica.

Tomando como patrón de comparación los siguientes elementos: porcentaje de área protegida común (A_1), porcentaje de área sin proteger (A_2) y porcentaje de área protegida sin ser necesario (A_3), en relación con los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de la modelación numérica, pueden observarse en el cuadro 4 las mejoras significativas obtenidas por las variantes propuestas. Destacan los resultados logrados mediante la variante Wyssling para la zona III, donde el porcentaje de área protegida común (A_1) se eleva de 55 a 98% una vez que se utiliza la variante modificada con el valor máximo de la conductividad hidráulica, manteniéndose la sobreprotección en sólo un 13%.

De forma general puede afirmarse que las variantes analíticas originales no protegen adecuadamente la fuente aguas arriba de la captación. Esta insuficiente protección aguas arriba es considerada grave, pues puede poner en riesgo la salud del consumidor y la continuidad de la inversión.

Conclusiones

La adecuada base de datos disponibles en el área de estudio para la construcción y calibración exitosa del modelo numérico *Modflow* permitió no sólo delimitar eficazmente el perímetro de protección para el pozo objeto de estudio, sino, además, servir de patrón de comparación para demostrar la exactitud de las diferentes variantes analíticas de delimitación de perímetros bajo condiciones de un acuífero con conductividad hidráulica vertical variable.

Bajo estas condiciones, el método analítico en sus diferentes variantes originales de delimitación de perímetros de protección proporciona inexactitudes significativas (hasta de un 41%) en las distancias a proteger aguas arriba de la fuente, lo cual implica la existencia de una determinada área sin proteger, en relación con los resultados obtenidos con la modelación numérica. Las causas fundamentales de estas diferencias radican en que el método analítico considera al acuífero homogéneo e isotrópico, no considera la recarga en la zona de captura y además no toma en cuenta todos los parámetros que pueden influir en las variaciones del campo de flujo en el área próxima a la captación.

Se propone adecuar el método analítico en sus diferentes variantes mediante la utilización, en las ecuaciones de cálculo, de la conductividad hidráulica del estrato más permeable del corte hidrogeológico, en lugar de la conductividad hidráulica ponderada. Esta modifica-

ción permite obtener mejores resultados (en más de un 30%), lo que facilita el uso de dichas variantes analíticas en condiciones parecidas a las analizadas, con una mayor seguridad, como método previo a la modelación numérica, si ésta finalmente se considera necesaria.

Para el caso específico del contexto hidrogeológico analizado (acuífero libre con variaciones verticales de la conductividad hidráulica), y cuando no se cuente con los datos necesarios para realizar la modelación numérica, se recomienda como primera opción el uso de la variante analítica modificada de Wyssling.

Recibido: 18/10/2005

Aprobado: 05/09/2006

Referencias

- CHENG, A.H.D. *Multilayered Aquifer Systems*. New Cork: Marcel Dekker, Inc, 2000, 284 pp.
- EXPÓSITO, J.L., GARFIAS, J.M., FRANCO, R. y VELÁSQUEZ, A. Delimitaciones de zonas de protección sanitaria; consideraciones sobre la exactitud de los métodos utilizados en Cuba en el ejemplo del acuífero Margarita. *Revista Minería y Geología*. Vol. XIX, núm. 1-2, 2004, pp. 15-22.
- EXPÓSITO, J.L. Informe presentado a la Oficina Nacional de Fondo Geológico sobre los resultados de la prospección preliminar de aguas de mesa en el norte de Villa Clara, zona Camajuani, Cuba Central. Santa Clara: Empresa Geomina del Centro, 1993, 73 pp.
- FOSTER, S., HIRATA, R., GOMEZ, D., DELIA, M. y PARIS, M. *Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para las empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington, D.C.: Banco Mundial, 2003, 115 pp.
- GONZÁLES, A. Notas de clases de la asignatura protección de acuíferos, Sexto curso internacional de aguas subterráneas y medio ambiente. La Habana, Cuba, 10-23 noviembre, 2002.
- GUIGUER, N. y FRANZ, T. *VisualModflow v. 2.8.1*. Ontario, Canadá: I Waterloo hydrogeologic Inc., 2001.
- HIRATA, R. y REBOUCAS, A. La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 4, Madrid, 1999, pp. 423-436.
- KENNEDY, C.A. y LENNOX, W.C. Screening model for the contamination of a well in a uniform flow field. *Water Resources Research*. Vol. 35, núm. 9, 1999, pp. 2871-2875.
- LÓPEZ, F. Estrategias para la protección de las aguas subterráneas de la contaminación. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*. Núm. 2, Brasil, 2002, pp. 9-16.
- RLM. MINBAS. Ley de Minas de la República de Cuba. La Habana: Ministerio de la Industria Básica, 1995, 48 pp.

- MCDONAL, M.G. y HARBAUGH, A.W. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, USGS, 1988, 586 pp.
- MARTÍNEZ, C. y GARCÍA, A. Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. *Boletín Geológico y Minero*. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Núm. 10. Madrid, 2003, pp. 273.
- MORENO, L. y MARTÍNEZ, C. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. Madrid: Instituto Tecnológico Geomínero de España, (ITGE), 1991, 290 pp.
- NC 93-01-209. Norma Cubana. Procedimiento de cálculo para la determinación de la zona de protección sanitaria. La Habana: Instituto de Normalización de la República de Cuba, 1990, 43 pp.
- ORADOSKAIA, A.M. y LAPCHIN, N.N. *Protección sanitaria alrededor de los pozos de aguas subterráneas*. Moscú: Nedra, (en ruso), 1987, 168 pp.
- PÉREZ, F. Consideraciones sobre los métodos de cálculo de las zonas de protección sanitaria en los acuíferos cársicos cubanos. Evento provincial de la Asociación Cubana de Ingeniería Sanitaria, Ciudad de la Habana, 1995, marzo 12-15, 12 pp.
- PÉREZ, F. Criterios para una explotación sustentable del agua subterránea. 2. Aspectos cualitativos y estrategias para el manejo de acuíferos. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVIII, núm. 1, 2003, pp. 5-20.
- POLLOCK, D.W. Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the USGS modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. USGS, Open-File Report. Denver, 1989, 188 pp.
- SPITZ, K. y MORENO, J. *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. New York: John Willey & Sons. Inc., 1996, 461 pp.
- USEPA. *Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks*. EPA 570/9-91-009. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency, 1991, 144 pp.
- USEPA. *Guideline for delineation of wellhead protection*. EPA 440/5-93-001. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency, 1993, 122 pp.
- USEPA. *Ground Water and Wellhead Protection*. EPA 625/R-904/001, Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency, 1994, 102 pp.
- VASIELIVICH, B. *Levantamiento geológico del norte de Las Villas, Cuba*. Archivos. Santa Clara: Oficina Nacional de Recursos Minerales, 1989, 130 pp.
- WILLIAMS, M. y FENSKE, B. *Demonstrating Benefits of Wellhead Protections Programs*. Denver: AWWA Research Foundation y American Water Works Association, 2004, 90 pp.

Abstract

EXPÓSITO-CASTILLO, J.L., GÁRFÍAS-SOLÍZ, J.M., FRANCO-PLATA, R. & ESTELLER-ALBERICH, M.V. Delineation of the wellhead protection area in an unconfined aquifer with variable vertical hydraulic conductivity. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXII, no. 2, April-June, 2007, pp. 55-67.

Delineation of wellhead protection areas is an important component of groundwater contamination protection programs. However, the calculations to determine these areas assume that the medium is homogeneous, when in fact it is not. In this paper we compared different analytic variants used to calculate the areas of sanitary protection, with the VisualModflow numeric model, which offers greater precision. The results show the importance of aquifer heterogeneity in the delimitation of wellhead protection areas. The causes of the discrepancies in the results were discussed, and we propose an adaptation to the analytic variants that improve their results more than 30% for the analyzed conditions. This adaptation allows to use the maximum value of the hydraulic conductivity of the aquifer for heterogeneous media.

Keywords: aquifer heterogeneity, analytical methods, numerical modeling, wellhead protection areas.

Dirección institucional de los autores:

M.C. José Luis Expósito-Castillo
Dr Jaime M. Gárfías-Solíz
Dra. María V. Esteller-Alberich

Centro Interamericano de Recursos del Agua,
Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma del Estado de México,
Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, 50110 Toluca,
Estado de México, México,
teléfono: + (52) (722) 296 5550,
fax: + (52) (722) 296 5551,
exposito@uaemex.mx,
jgarfias@uaemex.mx,
esteller@uaemex.mx

M.C. Roberto Franco-Plata

Facultad de Geografía,
Universidad Autónoma del Estado de México. México.
Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, 50110 Toluca,
Estado de México, México,
Teléfono: + (52) (722) 214 3182,
fax: + (52) (722) 215 0255,
rtp@uaemex.mx