

# DELIMITACIÓN DE ZONAS DE PROTECCIÓN SANITARIA: CONSIDERACIONES SOBRE LA EXACTITUD DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS EN CUBA EN EL EJEMPLO DEL ACUÍFERO MARGARITA

*Delimitation of the wellhead protection areas: considerations about accuracy of methods used in Cuba in the example of Margarita aquifer*

José Luis Expósito Castillo

Jaime M. Garfias Soliz  
Roberto Franco Plata  
Amparo Velásquez Velásquez

E-mail: [exposito@uaemex.mx](mailto:exposito@uaemex.mx)

Universidad Nacional Autónoma de México  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad Universitaria, Toluca, México  
Instituto Superior Minero Metalúrgico

## RESUMEN

El establecimiento de zonas de protección sanitaria en los acuíferos es una técnica ampliamente utilizada en Cuba para preservar las fuentes de aguas subterráneas tanto (de abastecimiento público y minerales). Son muchos los factores que inciden en la exactitud de la delimitación de tales zonas, por lo que asumir que las calculadas coinciden exactamente con las que en realidad deberían ser protegidas provoca una falsa sensación de seguridad que puede poner en riesgo la salud de la población y la propia inversión. En el acuífero Margarita, al norte de la provincia de Villa Clara, se realizó un estudio que revela algunas limitaciones de los métodos utilizados actualmente en Cuba para delimitar áreas de protección sanitaria. El modelo numérico VisualModflow se utilizó como método comparativo por considerarse de mayor precisión. Se discuten las causas de las discrepancias en los resultados obtenidos y se proponen modificaciones a los métodos utilizados. Las modificaciones propuestas mejoran en más de un 30% los resultados, lo que justifica su aplicación en las condiciones analizadas.

**PALABRAS CLAVE:** Aguas subterráneas, métodos analíticos, Cuba, protección sanitaria, acuíferos.

## ABSTRACT

The establishment of wellhead protection areas it is a technique of aquifer protection broadly utilized in Cuba, so much for the sources of ground waters for public supply, like for those considered as minerals, however, they are many the causes that impact in the accuracy in its delimitation, therefore, to assume that the calculated areas coincide exactly, with those that in fact should be protected they cause a false sensation of security that can put in risk the health of the population and the own investment. In such a sense, a study has been elaborated in the aquifer Margarita, located in the north of the provincia Villa Clara that shows the limitations of the methods of delimitation of the wellhead protection areas used at the moment in Cuba, using as comparative method to the numeric models VisualModflow to consider occurs bigger precision. Are discussed the causes of the discrepancies in the obtained results and they intend modifications to the methods used in Cuba. The proposed modificacióneses improve in more than 30% the obtained results, what favors their application under the analyzed conditions.

**KEY WORDS:** Groundwaters, analytic methods, Cuba, sanitary protection, aquifers.

## INTRODUCCIÓN

La generación de gran cantidad de desechos como consecuencia de la actividad humana provoca perturbaciones en el ciclo hidrológico y consecuentemente en la circulación de las aguas subterráneas. Con frecuencia, el resultado es la contaminación de las aguas, que en ocasiones llega a ser irreversible, por lo que han de adoptarse medidas preferentemente protectoras: regulando, ordenando o prohibiendo determinadas potencialmente nocivas. Ello es especialmente importante en acuíferos y captaciones destinadas al consumo humano, a fin de evitar que sean alcanzados por agentes contaminantes.

La mayoría de los países de Europa, los Estados Unidos, la ex Unión Soviética, entre otros (Expósito, 2001) reconociendo la problemática de la contaminación antrópica desarrollaron, hace ya algunas décadas, programas de protección para las aguas subterráneas. Entre las metodologías para preservar este importante recurso destaca el establecimiento de zonas de protección sanitaria que no son más que áreas alrededor de los pozos en las cuales, de forma gradual, se restringen o prohíben según sea el caso, las actividades o instalaciones que puedan alterar cualitativamente las aguas (Foster, 2003).

En Latinoamérica, algunos países han hecho también significativos esfuerzos en este sentido en los últimos años. En marzo de 1990, se aprueba en Cuba la primera norma (NC 93-01-209, 1990), aún vigente, que establece los procedimientos de cálculo para delimitar las zonas de protección sanitaria alrededor de los pozos de abastecimiento público. Posteriormente, en 1995, es aprobada la Ley de Minas (MINBAS, 1995), donde se establece la delimitación obligatoria de perímetros de protección alrededor de todas las fuentes de aguas minerales del país. Esta última legislación introduce un avance significativo con respecto a la norma de 1990 al tener en cuenta el aspecto de protección cuantitativa.

Paralelamente, por decreto estatal, surge la Oficina Nacional de Recursos Minerales, la

cual tiene entre sus funciones aprobar e inspeccionar el funcionamiento de los perímetros de protección alrededor de las fuentes de aguas minerales.

Sin embargo, a pesar de que existe el marco normativo, la delimitación de las zonas de protección sanitaria en muchos casos puede llegar a ser compleja debido al gran número de factores que en ella inciden. Entre ellos destacan la anisotropía y la heterogeneidad del acuífero, características que pueden causar cambios radicales en las dimensiones de las zonas de protección sanitaria (Hirata y Reboucas, 1999; Rayne, *et al.*, 2001).

En relación con lo anterior y considerando que la heterogeneidad del medio es una característica común en la mayoría de los acuíferos cubanos, se hace evidente la necesidad de examinar los métodos de delimitación de las zonas de protección sanitaria en Cuba y la certidumbre de sus resultados a la luz del empleo de métodos más sofisticados como la modelación numérica.

El objetivo de esta investigación fue analizar, en un pozo ubicado en un acuífero con conductividad hidráulica variable en vertical, diferentes metodologías de delimitación de zonas de protección sanitaria con la finalidad de detectar, para las condiciones expuestas, las limitaciones de los métodos de cálculo utilizados actualmente en Cuba y proponer adecuaciones para mejorar la precisión de la metodología.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en la parte central de la isla de Cuba, en el municipio Camajuaní, perteneciente a la provincia de Villa Clara (Figura 1). El relieve es ondulado, las alturas máximas alcanzan los 180 m, con temperaturas que oscilan entre 20 y 25 °C, llegando en ocasiones a 27 °C, siendo la temperatura promedio de 24,7 °C. El régimen de lluvias está bien diferenciado en dos estaciones, una lluviosa y otra seca. Durante el período seco la cantidad de lluvia es relativamente constante entre 400-500 mm, mientras que en el húmedo

alcanza los 1 000 mm (Expósito, 1993). Desde el punto de vista hidrogeológico (Figura 2) el área se ubica en la zona estructuro-facial Camajuaní (Vasielivich, 1989), a la cual pertenecen los sedimentos carbonatados de las formaciones Margarita (Barresiano-Hauteriviano) y Vega, de edad Paleógeno.

La formación Margarita ( $K_1$  mrg.), está conformada por calizas arcillosas de capa fina, alternándose en ocasiones con calizas y calcarenitas de capas medias a gruesas. En ocasiones, se observan lentes e intercalaciones de brechas calcáreas y brechas conglomeradas, así como lentes irregulares de silicitas. Las calizas son de color beige-amarillento. El espesor de la formación se estima en unos 200-250 m. En el acuífero de esta formación se localiza el pozo PH-1, donde se desarrolló el estudio. Sus aguas son freáticas, de composición bicarbonatada-cálcica y circulan preferentemente por fisuras, con una mineralización de 0,4 a 0,6 g/L.

Con base en los trabajos experimentales realizadas en el pozo PH-1, 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.

La formación Vega ( $P_1$  - $P_2$  vga.), está representada por brechas carbonatadas, calizas, areniscas, margas y arcillas. Esta formación está constituida por una brecha compacta carbonatada, bien consolidada. El espesor es estimado en unos 500 m. Las aguas del acuífero de esta formación son de composición bicarbonatada cálcica, circulan principalmente por fisuras, son freáticas, con una mineralización que oscila entre 0,5 y 0,8 g/L.

La conductividad hidráulica de este acuífero es más baja que la del acuífero Margarita, debido al mayor grado de agrietamiento de las calizas de la formación Margarita.

Existen varios métodos para delimitar las zonas de protección sanitaria. En este trabajo se utiliza la metodología confeccionada por la USEPA (1993) que incluye, en orden ascendente en cuanto a complejidad y costos, seis métodos que a su vez pueden presentar diferentes variantes. Ellos son: 1) radio fijo arbitrario, 2) radio fijo calculado, 3) catálogo de formas simples, 4) métodos analíticos, 5) mapeo hidrogeológico y 6) modelos numéricos de flujo y transporte.

Para el presente estudio se seleccionaron dos de ellos: el método de modelación numérica, específicamente el modelo VisualModflow (Guinguer y Franz, 2001) y el método analítico, con las siguientes variantes:

- Variante de la Norma Cubana vigente (NC 93-01-209, 1990)
- Variante de Pérez Monteagudo (Pérez, 1995, 2003).

Para la selección del modelo numérico se tuvo en cuenta la calidad y cantidad de los datos y el prestigio del modelo a escala internacional, como es el caso del modelo Modflow (McDonal and Harbaugh, 1988) en su versión VisualModflow (Guinguer y Franz, 2001).

Por otra parte, los métodos analíticos fueron seleccionados por ser los que actualmente se utilizan en Cuba.

Vale destacar que la metodología de la Norma Cubana (NC 93-01-209) comenzó a utilizarse en Cuba a inicios de los años 90 y posteriormente Pérez (1995) propuso modificaciones a ésta por lo que en lo adelante se denominará variante de Pérez Monteagudo. La aplicación de esta variante modificada ha dado buenos resultados según Pérez (2003).

También hay que decir que aunque generalmente se consideran tres zonas en la protección sanitaria (Foster, 2003; Pérez, 2003), en este estudio sólo se procedió a la delimitación de las zonas II y III, ya que para la delimitación de la zona I se utilizan métodos de radios fijos arbitrarios (Expósito, 2001; González, 2002).

## **Delimitación de las zonas de protección II y III mediante la modelación numérica**

La modelación numérica es considerada la herramienta que mayor exactitud puede asegurar en la delimitación de las zonas de protección sanitarias, debido principalmente a que toma en cuenta una mayor cantidad de datos que los demás métodos (Hirata y Reboucas, 1999; Foster, 2003).

En este sentido, numerosos autores (Barlow, 1994; Livingstone *et al.*, 1996; Forster *et al.*, 1997; Rayne *et al.*, 2001 y Harrar *et al.*, 2003) han realizado en la última década, comparaciones entre diferentes modelos, con el objetivo de determinar cuál o cuáles de ellos serían más recomendables para su utilización. Estos investigadores concluyen, con base en la exactitud, facilidad de manejo, versatilidad y características de la interfase gráfica, que uno de los modelos que más ventajas presenta es el modelo numérico MODFLOW (McDonal and Harbaugh, 1988).

Dentro de las herramientas que contiene el modelo MODFLOW y específicamente en la variante que se utilizó (VisualModflow versión 2.8.1, del año 2001) se encuentra el código de seguimiento de partículas MODPATH (Pollock, 1989), el cual calcula el desplazamiento advectivo de partículas hipotéticas en un tiempo determinado dentro del flujo modelado, permitiendo mostrar la trayectoria de dichas partículas tanto hacia adelante (en el sentido del flujo) como hacia atrás. En esta última variante (trazado de partículas hacia atrás), se basó el cálculo del perímetro de protección del pozo PH-1.

### *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 x 1 500 m, obteniéndose una superficie total de 4,5 km<sup>2</sup>, la cual cubre adecuadamente el área de estudio (Figura 3). Sobre el dominio del modelo se conformó una malla primaria de 30 x 30 m, la que posteriormente fue refinada en la parte central del área de estudio, considerada la región de

mayor interés, con el objetivo de detectar de forma adecuada variaciones locales de las características del medio hidrogeológico. La malla refinada generó celdas de 15 x 15 m.

El dominio del modelo se consideró formado por dos acuíferos de tipo libre, uno caracterizado por dos capas y otro por tres, de acuerdo con sus propiedades hidrodinámicas (Figura 3). La síntesis de los parámetros hidrogeológicos incorporados al modelo puede consultarse en la Tabla 1.

En el área modelada se utilizaron dos condiciones de frontera, carga constante (carga específica, condición tipo 1 o de Dirichlet) para las fronteras noreste y noroeste del área de estudio, donde se consideró constante el nivel freático, y frontera de flujo cero (flujo establecido, condición tipo 2 o de Neuman) para las fronteras suroeste y sureste del área de estudio. En el primer caso, la frontera coincide con el parteaguas local y en el segundo, es paralela a las líneas de flujo (Figura 3).

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

### *Calibración*

La calibración de la modelación estacionaria se consideró óptima cuando se alcanzó una coherencia aceptable, tal y como se observa en la Tabla 2, entre los valores de las alturas piezométricas reales de los pozos presentes en el área (PH-1, PH-2 y PH-3), y de los abatimientos medidos en el pozo PH-1 producto del bombeo realizado, según los resultados obtenidos mediante la modelación numérica.

### *Delimitación de las zonas de protección*

Se realizó la simulación final del flujo y se llevo a cabo el trazado de partículas hacia atrás. Para la zona de protección II se utilizó un tiempo de tránsito de 100 días, mientras que para la zona III este tiempo fue de 1 825 días (5 años). El pozo se consideró abierto de 3 a 95 m de acuerdo con su propio diseño (perforado

hasta los 95 m y encamisado y cementado hasta los 3 m).

Debe destacarse además que en el proceso de modelación se plantearon algunas suposiciones, tales como:

- El medio es homogéneo e isotrópico en dirección horizontal para cada una de las capas delimitadas
- La recarga por lluvia es uniforme para todo el área de estudio.

Estas generalizaciones, aunque consecuentes con la información disponible, crean cierto grado de incertidumbre en los resultados, por tal motivo los resultados se multiplican por coeficientes de seguridad o se introduce dicho coeficiente en las formulas de cálculo.

En este caso se utilizó las indicaciones de la *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA, 1994). En dicho documento se establece multiplicar el caudal de explotación previsto por 1,3 por lo tanto en el caso de estudio, el caudal de explotación de 3 L/s, se elevó a 4 L/s, para ser introducido en el modelo.

### **Delimitación de las zonas II y III de protección mediante las variantes analíticas**

Los cálculos estuvieron dirigidos a determinar las dimensiones de la zona II y III de protección sanitaria. En tal sentido se calcularon los siguientes parámetros: distancia aguas arriba para las zonas II y III de protección sanitaria ( $Dps_{II}$  y  $Dps_{III}$ ) y aguas abajo de la fuente ( $X_0$ ), 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 (Figura 4).

Los cálculos se realizaron para las mismas condiciones que los simulados por el modelo numérico VisualMODFLOW, es decir, para el pozo abierto de 3-95 m y un caudal de 4 L/s, lo que significa un coeficiente de seguridad de 1,3 similar a lo establecido en Cuba por la norma NC 93-01-209, 1990.

Se realizaron dos formas de cálculo para cada una de las variantes analíticas, la primera consistió en aplicar las formulas de cálculo tal y como se han venido utilizando en Cuba,

considerando el medio hidrogeológico homogéneo e isotrópico, utilizando la conductividad hidráulica ponderada de las capas perforadas ( $K=3,17$  m/d).

La segunda forma de cálculo, es una adecuación propuesta en este estudio, que consistió en mantener la conductividad hidráulica ponderada en las formulas que definen el ancho y la distancia aguas abajo de las zonas de protección sanitaria (formulas 7, 8, 9, 12 y 13) 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  $Dps_{III}$ ) (fórmulas 1, 2, 16), pues será el valor de esta conductividad hidráulica, el que defina el menor tiempo de llegada del contaminante y consecuentemente la distancia, aguas arriba, que se necesita proteger.

Al utilizar la segunda forma de cálculo se pretendió demostrar, que en un acuífero con variación vertical de la conductividad hidráulica, características ampliamente distribuidas en Cuba, la conductividad hidráulica que debe utilizarse en la determinación de la distancia a proteger aguas arriba de la fuente, es la más alta y no la obtenida como resultado de los bombeos realizados en toda la longitud del corte.

Es obvio por lo tanto, que para llevar a cabo este tipo de análisis se necesita, como requisito indispensable, evaluar de forma diferenciada los valores de conductividad hidráulica en profundidad.

A continuación se presenta la metodología seguida en cada una de las variantes seleccionadas para la realización de los cálculos. Los parámetros utilizados en las diferentes variantes se resumen en la Tabla 3.

#### *Variante de la norma cubana*

Esta variante cuenta con diferentes casos (NC 93-01-209). Se utilizó el caso que implica conocer la velocidad real del agua subterránea en la zona de gradiente natural y la posterior determinación por cálculos de la velocidad del agua subterránea en el área de influencia del pozo.

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

- Cálculo del radio de influencia del pozo durante el bombeo ( $R_o$ );

$$R_o = 1.5 \sqrt{\frac{K * h * t}{n}} \quad (1)$$

donde  $t$  es el tiempo que se considera tarda el radio de influencia en estabilizarse, para este caso 0,25 días (Expósito, 1993), y  $n$  es la porosidad efectiva del medio.

Es necesario destacar que en la selección del parámetro tiempo  $t$ , existe un amplio rango de valores posibles a utilizar, entre ellos se ha planteado considerar desde el tiempo que dura el bombeo (NC), seis meses según González, (2002), hasta siete años, considerando el periodo más crítico de años secos continuos que se ha producido en Cuba (Menéndez y Guerra, 1997). Sin embargo, de acuerdo al conocimiento de las características hidrogeológicas del área de estudio (Expósito, 1993) y al reducido caudal de explotación (4 l/s), dichos tiempos no se consideraron para ser utilizados y se introduce un nuevo criterio, el de la estabilización del radio de influencia, considerando que el bombeo se realizó en el período más seco del año.

- Determinación de la velocidad real del agua subterránea en la zona de influencia del pozo ( $V_{ri}$ ),

$$V_{ri} = \frac{K * I_c}{n} \quad (2)$$

donde  $I_c$  es el gradiente crítico del agua subterránea en la zona de influencia del pozo (aguas arriba).

- Cálculo de otros parámetros ( $Tr$ ,  $Tn$ ,  $Dn$ ,  $Dps$ ,  $Xo$ ):

$Tr$  es el tiempo que una partícula de agua tarda en atravesar el radio de influencia y llegar al pozo:

$$Tr = \frac{R_o}{V_{ri}} \quad (3)$$

$Tn$  es el tiempo de tránsito con flujo natural :

$$Tn = T - Tr \quad (4)$$

La distancia a proteger en la zona no alterada por el bombeo es  $Dn$ :

$$Dn = Tn * Vr \quad (5)$$

$Dps_{II}$  y  $Dps_{III}$  son las distancias aguas arriba de las zonas II y III de protección sanitaria de la fuente:

$$Dps = Dn + R_o \quad (6)$$

$X_o$  es la distancia del perímetro aguas abajo

$$X_o = \frac{Q}{2 * \pi * K * h * I} \quad (7)$$

Ancho de la zona de protección a la altura del pozo ( $D_c$ ) 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 las zonas de protección sanitaria. 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, puede definirse esa “frontera” utilizando la siguiente expresión (Kennedy y Lennox, 1999; González, 2002):

$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2 * \pi * K * h * I}{Q} * Y\right) \quad (8)$$

Como se conoce el caudal de explotación  $Q$  y el gasto por unidad de ancho del acuífero  $q_e$ , se utilizaron los criterios de Minkin para fijar los puntos notables (Oradoskaia y Lapchin, 1987; González, 2002) de la parábola definida por la ecuación (17). Por lo tanto, si:

$$q_e = K * h * I \quad (9)$$

y si se hace que

$$\beta = \frac{Q}{q_e} \quad (10)$$

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

$$D_c = 0.5 * \beta \quad (11)$$

Para la determinación del ancho de la zona de captura a las distancias  $Dps_{II}$  y  $Dps_{III}$ , se utilizó la ecuación (17). 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:

$$Y_{II} = Dps_{II} = \tan\left(\frac{2 * \pi * K * h * I}{Q} * Y_{II}\right) \quad (12)$$

$$Y_{III} = Dps_{III} = \tan\left(\frac{2 * \pi * K * h * I}{Q} * Y_{III}\right) \quad (13)$$

Una vez resueltas las anteriores expresiones por tanteo, se puede obtener ( $D_{II}$  y  $D_{III}$ ), conociendo que:

$$D_{II} = 2 * Y_{II} \quad (14)$$

y  $D_{III} = 2 * Y_{III} \quad (15)$

#### Variante de Pérez Monteagudo

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 formulas.

Según este investigador, los parámetros radio de influencia ( $R_o$ ), tiempo de estabilización del radio de influencia ( $t$ ), abatimiento del pozo y el gradiente crítico ( $I_c$ ), son difíciles de estimar con precisión, sobre todo en aquellas captaciones ya existentes, por lo que propone otra fórmula, que no depende de estos parámetros, para delimitar las zonas de protección aguas arriba ( $Dps_{II}$  y  $Dps_{III}$ );

$$Dps = \sqrt{\frac{Q}{\pi * h * n} T + rp} + \frac{K * I}{n} T \quad (16)$$

donde  $rp$  es el radio del pozo (m).

## 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 Figuras 5, 6 y 7, y se resumen en la Tabla 4.

La Figura 6, 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. En la Figura 6A, los resultados muestran a las variantes en su forma original, medio homogéneo e isotrópico por lo que en su análisis sólo se utilizó la conductividad hidráulica ponderada de todo el espesor del acuífero perforado.

En la Figura 6B, por su parte, se muestran los resultados de las modificaciones propuestas en el presente trabajo a las variantes analíticas; que consistió en la introducción simultánea en el cálculo de la conductividad hidráulica ponderada y del valor más elevado del corte litológico de la captación.

Una comparación de los resultados obtenidos, mediante las variantes analíticas y la modelación numérica y representados en la Figura 6A, muestra, que las variantes seleccionadas del método analítico no permiten la protección correcta aguas arriba; las inexactitudes en los resultados obtenidos fueron de un 33 % para la variante de la norma cubana y un 36 % para la variante de Pérez Monteagudo. Esta situación mejoró significativamente, cuando en las ecuaciones que definen la distancia aguas arriba a proteger, se utilizó la más alta conductividad hidráulica del corte y no la ponderada (Figura 6B).

Los resultados obtenidos por las variantes adecuadas mejoraron sus resultados hasta un 80 % para la variante de Pérez Monteagudo, hasta un 100 % para la variante de la norma cubana. Estos resultados demuestran que la principal causa de la discrepancia de los resultados obtenidos entre las variantes originales y la modelación numérica es, precisamente, la utilización de la conductividad hidráulica ponderada para acuíferos con conductividad hidráulica variable en el corte. Puede verse además, que aun considerando en los cálculos

del ancho la utilización de los puntos notables de Minkin, el ancho de la zona de protección II calculado por la modelación numérica es menor que el obtenido por las variantes de la Norma Cubana y de Pérez Monteagudo. Esto puede encontrar explicación en el hecho de que la modelación matemática considera la recarga por lluvia y las demás variantes no lo hacen.

La Figura 7 muestra los resultados en la delimitación de la zona III de protección. En este caso, las inexactitudes en los resultados fueron de un 27 % para la variante de Pérez Monteagudo y de un 40 % para la variante de la Norma Cubana (Figura 7A).

En la Figura 7B se observa la mejoría considerable que significa la modificación propuesta, pues los resultados mejoraron hasta un 97 % para la variante de la Norma Cubana y hasta un 75 % para la de Pérez Monteagudo, aunque para ésta última la inexactitud es por sobreprotección, situación mucho más favorable que la protección inadecuada de la captación.

De forma general, puede afirmarse que las variantes analíticas para las condiciones analizadas conducen a dos tipos de inexactitudes: sobreprotegen al pozo a sus lados y aguas abajo, pero no lo protegen adecuadamente aguas arriba. La sobreprotección moderada a los lados y aguas abajo de la captación no genera, por lo general, conflictos, pero la insuficiente protección aguas arriba es considerada grave, pues puede poner en riesgo la salud del consumidor y la continuidad de la inversión.

## CONCLUSIONES

En las condiciones de un acuífero con conductividad hidráulica vertical variable el método analítico, en sus diferentes variantes de delimitación del perímetro de protección, arroja inexactitudes en los valores de las distancias a proteger aguas arriba de la fuente, en relación con los resultados obtenidos por la modelación numérica. Las causas fundamentales de esas diferencias radican en que el método analítico considera al acuífero homogéneo e isotrópico,

no considera la recarga en la zona de captura, ni toma en cuenta todos los parámetros que pueden influir en las variaciones del campo de flujo a medida que éste se acerca a la captación.

El método analítico en las variantes analizadas proporciona resultados más adecuados si se utiliza, en los cálculos, la conductividad hidráulica más elevada del corte hidrogeológico en lugar de la conductividad hidráulica ponderada. Estas adecuaciones permiten que en condiciones parecidas a las analizadas el método analítico pueda utilizarse de forma transitoria y con una mayor seguridad, hasta tanto se realice la modelación numérica, si ésta fuese necesaria.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por el apoyo prestado para el desarrollo de esta investigación. Asimismo a la Oficina Nacional de Recursos Minerales de la República de Cuba (ONRM) y a la Empresa Geólogo-Minera del Centro, por proporcionar la información base.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARLOW, P.M. (1994). "Two-and Tree-Dimensional Pathline Analysis of Contributing Areas To Public-Supply Wells of Cape Cod, Massachusetts" *Ground Water*. 32 (3) :399-410.
- EXPÓSITO, J. L. (1993). "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." 73 pp.
- EXPÓSITO, J. L. (2001). "Delimitación de los perímetros de protección de pozos mediante las técnicas numéricas y el método analítico, acuífero Margarita, Cuba". Tesis de Maestría, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. México. 119 pp.
- FORSTER, C. B., LACHMAR, E. T. Y OLIVER, D.S. (1997). "Comparison of Models for Delineating Wellhead Protection Areas in Confined to Semiconfined Aquifers in Alluvial Basins". *Ground Water*. 35 (4) : 689-697.



- GONZALEZ, A. (2002). "Notas de clases de la asignatura protección de acuíferos". Sexto curso internacional de aguas subterráneas y medio ambiente. La Habana, Cuba, 10-23 noviembre.
- GUINGUER, N. y FRANZ, T. "VisualModflow v. 2.8.1." Waterloo hydrogeologic Inc., Ontario, Canadá 2001.
- HARRAR, W. G., SONNENBORG, T. O. y HENRIKSEN, H. J. (2003). "Capture zone, travel time, and solute-transport predictions using inverse modeling and different geological models". *Hydrogeology Journal*. 11:536-548.
- HIRATA, R. y REBOUCAS, A. (1999). "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*. 4 : 423-436.
- KENNEDY, C. A. Y LENNOX, W. C. (1999). "Screening model for the contaminación of a well in a uniform flow field". *Water Resources Research*, 35 (9) :2871-2875.
- LIVINGSTONE, S., FRANZ, T. y GUINGUER, N. (1996). "Managing Grund-waters Resources Using Wellhead Protection Programs". *Geoscience Canada*, 22 :121-128.
- MINBAS (1995). "Ley de Minas de la República de Cuba". Ministerio de la industria básica. 48 pp.
- MCDONALD, M.G. y HARBAUGH, A.W. (1988). "A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model". US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. 06-A1, 528 pp.
- MENÉNDEZ A. Y GUERRA M. (1997). "Zona II de protección sanitaria y las morfoestructuras asociadas en los acueductos el Gato y Cuenca Sur de la Habana, Provincia Habana, Cuba". En: Investigaciones hidrogeológicas de Cuba. pp. 184 – 196.
- NC 93-01-209 (1990). Norma Cubana. "Procedimiento de cálculo para la determinación de la zona de protección sanitaria". Instituto de normalización de la República de Cuba. 43 pp.
- ORADOSKAIA, A. M. Y LAPCHIN, N. N. (1987). *Protección Sanitaria alrededor de los pozos de aguas subterráneas*. Nedra, Moscú (en ruso). 168 pp.
- PÉREZ, F. (1995). "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, Marzo.
- PÉREZ, F. (2003). "Criterios para una explotación sustentable del agua subterránea. 2. Aspectos cualitativos y estrategias para el manejo de acuíferos". *Ingeniería Hidráulica en México*, XVIII (1) :5-20.
- POLLOCK, D. W. (1989). "Documentation of computer programs to compute and display pathline using results from the U.S. Geological Survey modular three- dimensional finite-difference ground-water flow model": U.S. Geological Survey Open-File Report 89-381, 188 pp.
- RAYNE, T.W., BRADBURY, K.R. Y MULDOON, M.A. (2001). "Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA" *Hydrogeology Journal* 9 : 432-450.
- (USEPA). UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1993). "Guideline for delineation of wellhead protection". EPA 440/5-93-001. Washington (DC). 122pp.
- (USEPA). UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994). "Ground Water and Wellhead Protection". EPA 625/R-904/001.
- VASIELIVICH, B. (1989). "Levantamiento geológico del Norte de Las Villas. Cuba" Archivos, Oficina Nacional de Recursos Minerales. 130 pp.

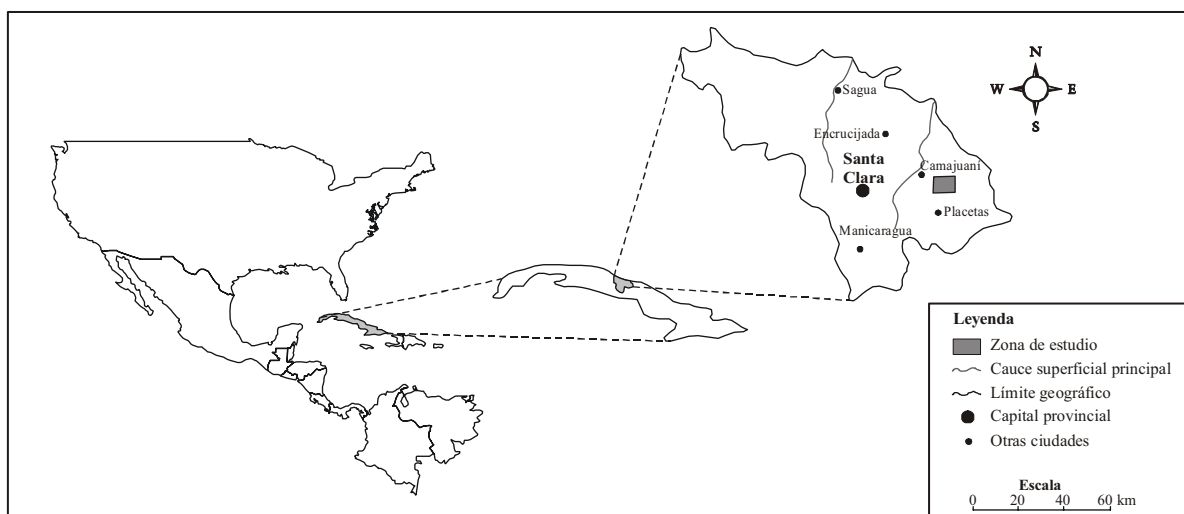


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

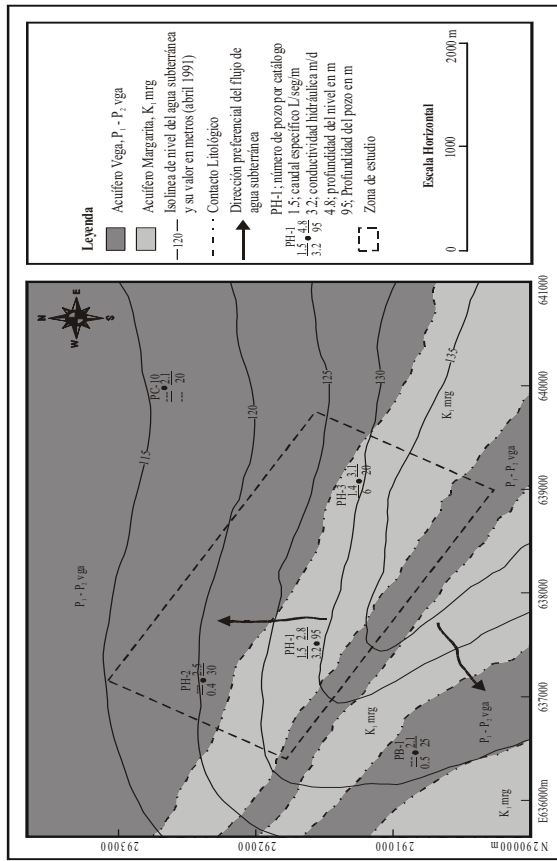


Figura 2. Esquema hidrogeológico del área de estudio.

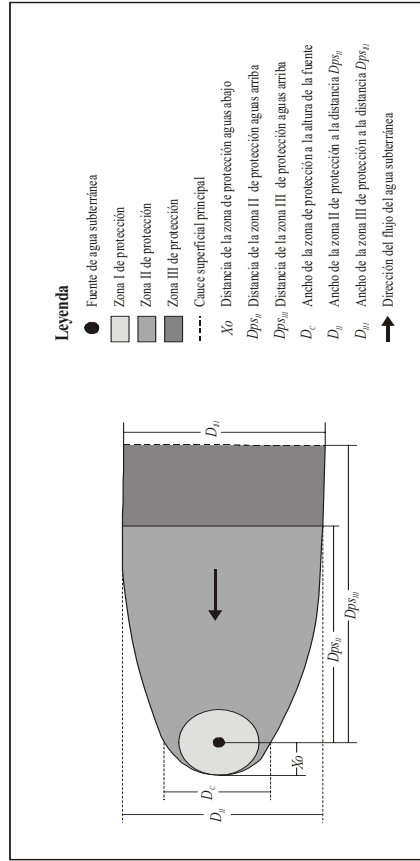


Figura 4. Representación esquemática de las zonas de protección sanitaria

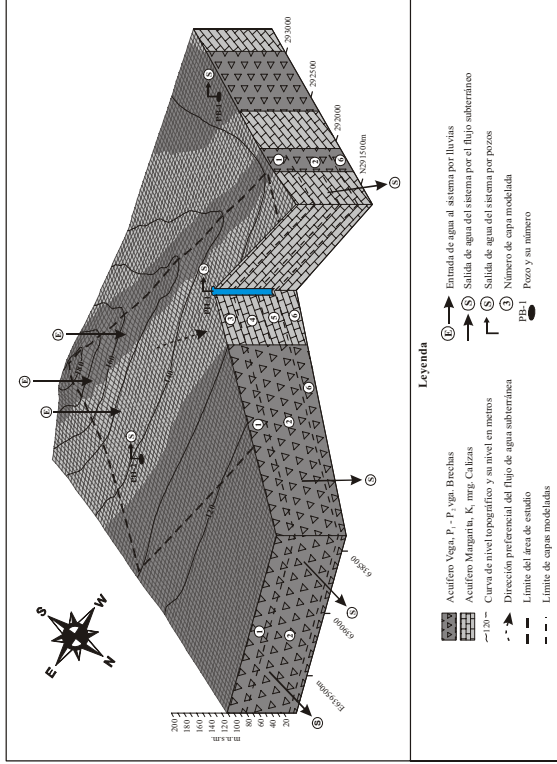


Figura 3. Modelo conceptual del área de estudio.

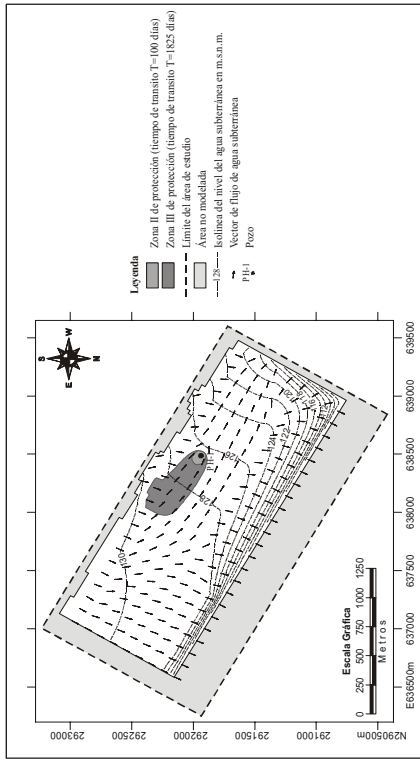


Figura 5. Zonas de protección sanitaria obtenidas mediante modelación numérica

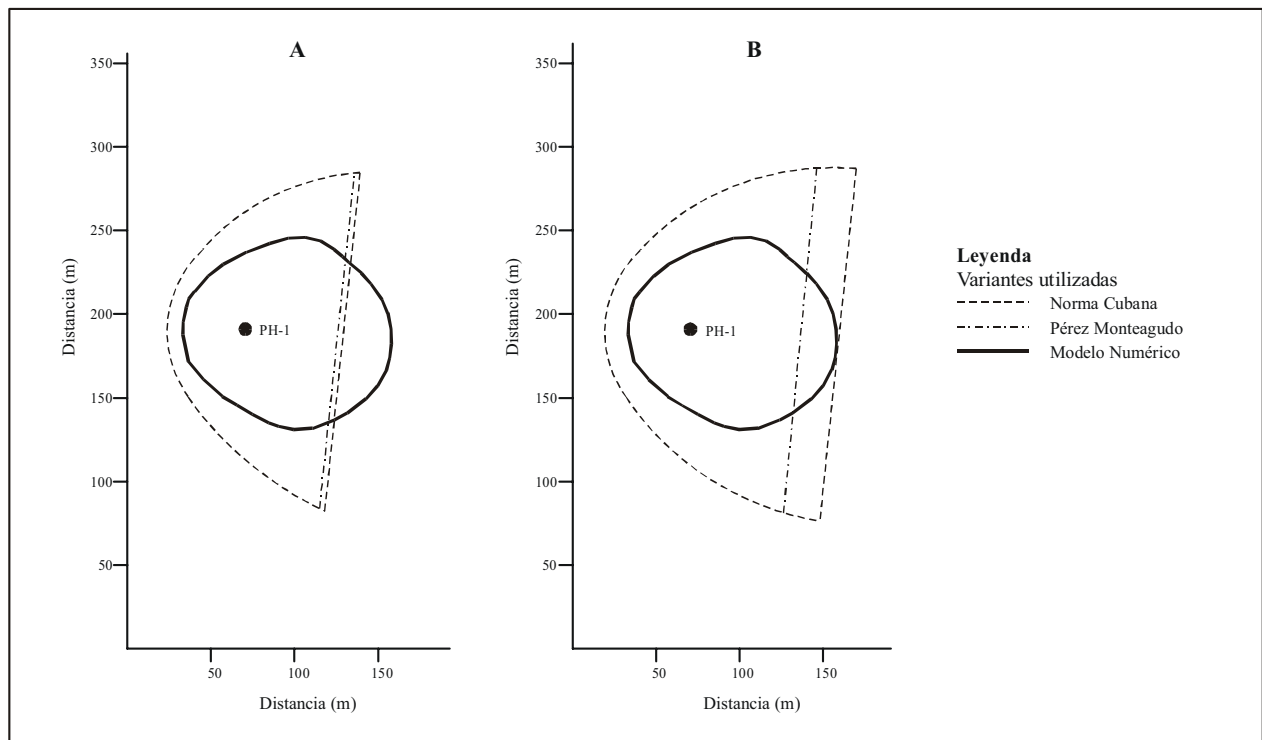


Figura 6. Zona II de protección sanitaria obtenida mediante diferentes variantes del método analítico. A) Aplicación de las variantes originales. B) Aplicación de las variantes con las modificaciones propuestas.

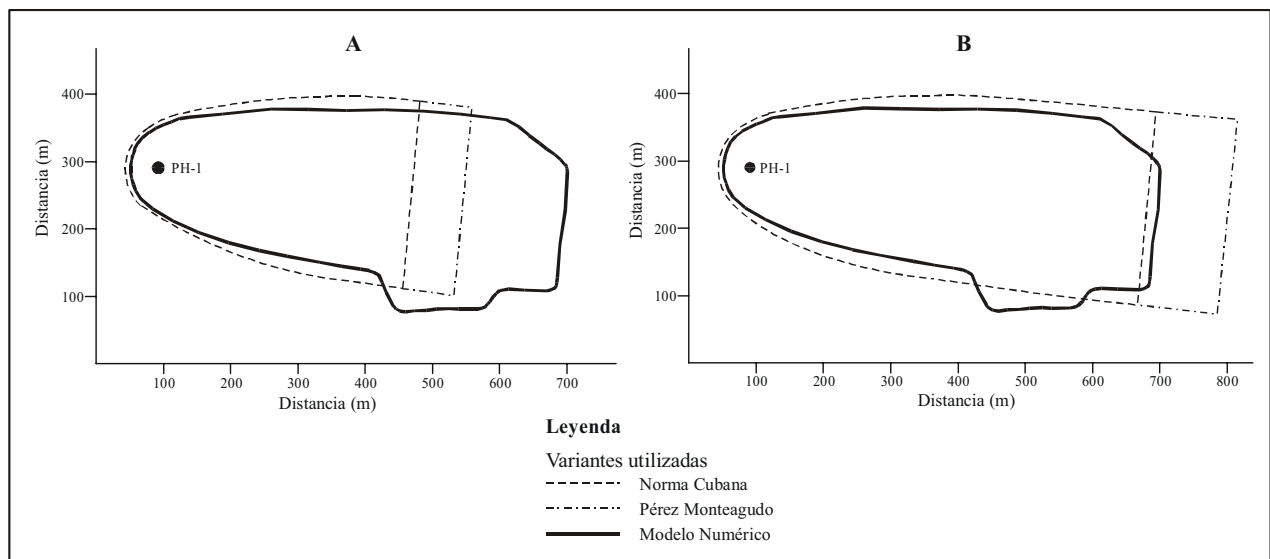


Figura 7. Zona III de protección sanitaria obtenida mediante diferentes variantes del método analítico. A) Aplicación de las variantes originales. B) Aplicación de las variantes con las modificaciones propuestas.

Parámetros	Capas utilizadas					
	1	2	3	4	5	6
Recarga (mm)	480	...	480	...	...	Considerada impermeable
$K_{xx}$ (m/d)	0,4	0,01	6	3	0,4	
$K_{yy}$ (m/d)	0,4	0,01	6	3	0,4	
$K_{zz}$ (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	

Pozos	Calibración por piezometría		Calibración por abatimientos ( $\Delta h$ )			
	Piezometría observada (m.s.n.m.)	Piezometría simulada (m.s.n.m.)	Bombeo de 0-30 m		Bombeo de 70-95 m	
			( $\Delta h$ ) real (m)	( $\Delta h$ ) simulado (m)	( $\Delta h$ ) real (m)	( $\Delta h$ ) simulado (m)
<i>PH-1</i>	128,27	128,22	2,77	2,90	18,28	18,20
<i>PH-2</i>	119,86	120,00	...	...	...	...
<i>PH-3</i>	129,85	129,93	...	...	...	...

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	$I$	adimensional	0,004
Gradiente hidráulico en el radio de influencia del bombeo	$I_c$	adimensional	0,06
Conductividad hidráulica	Capa 1 (3-30 m)	m/d	6
	Capa 2 (30-70 m)		3
	Capa 3 (70-95 m)		0,4
	Promedio		3,17
Tiempo de tránsito (Zona II)	$T^*$	d	100
Tiempo de tránsito (Zona III)	$T_3^*$	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 $K_l$ )	$Vr_2$	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 $K_l$ )	$Vri_2$	m/d	4,5
Tiempo en que se estabiliza el radio de influencia	$t$	d	0,25

**TABLA 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 (m)							
	Zona II de protección				Zona III de protección			
	$X_o$	$Dps_{II}$	$Dc_{II}$	$D_{II}$	$X_o$	$Dps_{III}$	$Dc_{III}$	$D_{III}$
<u>Modelo numérico</u>	38	86	113	113	42	620	137	246
<u>Norma Cubana</u>								
Variante original	47	58	148	208	47	372	148	278
Variante propuesta	47	87	148	208	47	605	148	290
<u>Pérez Monteagudo</u>								
Variante original	47	55	148	206	47	455	148	278
Variante propuesta	47	69	148	214	47	713	148	292

$X_o$ : Distancia aguas abajo de la fuente

$Dps_{II}$ ,  $Dps_{III}$ : Distancias aguas arriba de la fuente para la zona II y III respectivamente

$Dc_{II}$ ,  $Dc_{III}$ : Ancho de las zonas II y III a la altura de la captación

$D_{II}$ ,  $D_{III}$ : Ancho de las zonas II y III a las distancias  $Dps_{II}$ ,  $Dps_{III}$  respectivamente

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.