

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



**DELIMITACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN
DE POZOS MEDIANTE LAS TÉCNICAS NUMÉRICAS Y EL
MÉTODO ANALÍTICO, ACUÍFERO MARGARITA, CUBA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA**

**PRESENTA:
JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JAIME MAX GÁRFIAS SOLIZ**

DEDICATORIAS

A MI FAMILIA

Con mucho cariño y con la ilusión de poder reparar en algo, las horas que estuve ausente de ustedes. Gracias por brindarme su apoyo en la culminación de esta meta.

AL DR. JAIME MAX GARFIAS SOLIZ

Por todos los conocimientos aportados para la culminación de este trabajo, por su paciencia y preocupación infinita porque seamos cada día mejores. Gracias.

AGRADECIMIENTOS

A las siguientes instituciones;

Oficina Nacional de Recursos Minerales de la República de Cuba

Empresa Geólogo-Minera del Centro

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Centro Interamericano de Recursos del Agua

Waterloo Hydrogeologic Inc.

A todos los profesores y trabajadores del CIRA que estuvieron relacionados directa o indirectamente con la culminación de mis estudios.

A todos mis compañeros de estudio, especialmente a Roberto Franco Plata por su ayuda invaluable en la confección de las figuras presentes en esta tesis.

A todos mis amigos cubanos y mexicanos por sus palabras de aliento en los momentos en que más lo necesité.

RESUMEN

La popularidad de los perímetros de protección de pozos como herramienta importante en la protección de las aguas subterráneas para el consumo humano, incluyendo por supuesto las aguas minerales embotelladas, a aumentado considerablemente en los últimos años, viéndose reflejada en numerosos documentos de diverso alcance, destacándose frecuentemente que no todos los métodos de delimitación de perímetros de protección de pozos dan resultados satisfactorios.

En este sentido, el objetivo principal del presente trabajo fue, delimitar de la forma más precisa posible, el perímetro de protección alrededor de una importante fuente de agua mineral para embotellar, ubicada en el acuífero Margarita, región central de Cuba.

En la delimitación se utilizaron dos de los métodos de más amplio uso internacional, el analítico, en cuatro de sus variantes y el numérico, mediante el modelo VisualMODFLOW.

Se muestra como bajo las condiciones analizadas (acuíferos heterogéneos, anisotrópicos y de extensión local), los resultados entre ambos métodos pueden diferir en más del 100%, siendo varias las causas que provocan tales diferencias, entre las que destacan, la influencia de la recarga por las precipitaciones y el aporte de agua subterránea de las partes del acuífero que se ubican por debajo de la máxima profundidad del pozo.

Se presenta además un mapa de gestión de los recursos hídricos subterráneos del área de estudio, donde se establece como y donde deben explotarse los recursos de aguas subterráneas, sin que se afecte las dimensiones calculadas del perímetro de protección, ni el caudal de explotación del pozo de mayor importancia.

Finalmente, se proponen adecuaciones en las variantes utilizadas del método analítico, las cuales pueden mejorar considerablemente los resultados alcanzados bajo las condiciones hidrogeológicas analizadas.

De cualquier forma, se subraya las grandes limitaciones que presenta el método analítico para delimitar los perímetros de protección de pozos en las condiciones analizadas y las potencialidades ilimitadas que para este fin, poseen los modelos numéricos.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo principal.....	5
1.2.2. Objetivos intermedios.....	5
1.3. Metodología.....	6

CAPÍTULO 2

EL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE POZOS COMO HERRAMIENTA DE PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS.....	8
2.1. Introducción.....	8
2.1.1. Zonación de los perímetros de protección y restricción de actividades.....	9
2.1.2. Estudios previos.....	16
2.2. Protección de calidad.....	17
2.2.1. Criterios para la delimitación de perímetros.....	17
2.2.2. Elección del criterio.....	21
2.3. Métodos para la delimitación del perímetro.....	22
2.3.1. Incertidumbres en el trazado de los perímetros de protección de pozos.....	26
2.3.2. Selección del método de delimitación del perímetro.....	28
2.3.3. Consideraciones técnicas y económicas que se deben considerar en la selección del método de delimitación del perímetro.....	31
2.4. Protección de la cantidad.....	34
2.5. Peculiaridades de los perímetros de protección de las aguas minerales.....	36
2.6. La protección cualitativa y cuantitativa de las aguas minerales.....	37

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	39
3.1. Ubicación, características geográficas y económicas de la zona.....	39
3.2. Características geológicas.....	41
3.3. Características hidrogeológicas.....	43
3.4. Selección del área de estudio.....	45

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE POZOS EN EL ACUÍFERO MARGARITA.....	46
4.1. Introducción.....	46
4.2. Cálculo del perímetro de protección de pozos mediante el modelo numérico VisualMODFLOW.....	48
4.2.1. Introducción.....	48
4.2.2. Implementación del modelo.....	50
4.2.2.1. Construcción del modelo conceptual y modelación del flujo.....	50

4.2.2.2. Calibración.....	54
4.2.3. Simulación de posibles escenarios en la delimitación del perímetro de protección de calidad alrededor del pozo de agua mineral PH-1	57
4.2.4. Delimitación del perímetro de protección de cantidad alrededor del pozo de agua mineral PH-1	69
4.2.5. Análisis de sensibilidad.....	71
4.2.6. Limitaciones y suposiciones de la modelación.....	73
4.3. Cálculo de las zonas II y III del perímetro de protección de calidad mediante el método analítico.....	75
4.4. Cálculo del perímetro de protección de cantidad mediante el método analítico	95
CAPÍTULO 5	
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	96
5.1. Introducción	96
5.2. Pozo abierto de 3-95 m	96
5.3. Pozo abierto 3-70 m.....	102
5.4. Pozo abierto 3-30 m.....	102
CAPÍTULO 6	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
6.1. Conclusiones.....	111
6.2. Recomendaciones	113
BIBLIOGRAFÍA	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Situación geográfica. Límites de la Provincia Villa Clara y ubicación de la zona de estudio.	40
Figura 3.2. Mapa geológico esquemático de la zona de los trabajos y su corte por la línea A-A' (Expósito, 1993).	42
Figura 3.3. Mapa hidrogeológico esquemático de la zona de los trabajos (Expósito, 1993).	44
Figura 4.1. Pasos utilizados en la modelación numérica.	49
Figura 4.2. Área modelada, malla y fronteras utilizadas en la modelación. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	51
Figura 4.3. Modelo conceptual del área de estudio.	53
Figura 4.4. Comparación entre la piezometría obtenida por la modelación y la interpretación manual de las observaciones de campo. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	56
Figura 4.5. Comparación de los vectores de flujo de agua subterránea simulados para el periodo seco y húmedo. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	59
Figura 4.6. Comparación de las dimensiones de la zona II de protección simuladas para el periodo seco y húmedo.	60
Figura 4.7. Resultados de la simulación realizada para la obtención de las zonas II y III de protección con el pozo abierto de 3-95 m. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	61
Figura 4.8. Resultados de la simulación realizada para la obtención de las zonas II y III de protección con el pozo abierto de 3-70 m. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	62
Figura 4.9. Resultados de la simulación realizada para la obtención de las zonas II y III de protección con el pozo abierto de 3-30 m. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	63
Figura 4.10. Representación de las trayectorias de las partículas hipotéticas contaminadas con el pozo entubado hasta los 30 m de profundidad. Corte de oeste a este por el área de estudio.	64
Figura 4.11. Representación de las diferencias existentes entre los vectores de flujo de agua subterránea y de escurrimiento superficial. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	66

Figura 4.12. Representación del canal perimetral de desagüe de las aguas de escurrimiento superficial que pudiesen entrar al perímetro delimitado. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	67
Figura 4.13. Representación de las zonas de protección II y III teniendo en cuenta la influencia de la topografía. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	68
Figura 4.13. Zonación de las restricciones de explotación de aguas subterráneas en el área de estudio. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	70
Figura 4.15. Representación del análisis de sensibilidad de la modelación para la zona II de protección.....	72
Figura 4.16. Representación del análisis de sensibilidad de la modelación para la zona III de protección.....	72
Figura 4.17. Esquema de la zonación del perímetro de protección de calidad.....	76
Figura 4.18. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 95 m.	87
Figura 4.19. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 95 m.	87
Figura 4.20. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 95 m.....	88
Figura 4.21. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 95 m.....	88
Figura 4.22. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 70 m.	89
Figura 4.23. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 70 m.	89
Figura 4.24. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 70 m.....	90
Figura 4.25. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 70 m.....	90
Figura 4.26. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 30 m.	91
Figura 4.27. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante método analítico original. Pozo abierto de 3 – 30 m.	91

Figura 4.28. Representación de la influencia de la piezometría simulada y la interpretada por los datos de campo en las delimitaciones del perímetro de protección. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.	94
Figura 5.1. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 95 m.	97
Figura 5.2. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 95 m.	97
Figura 5.3. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 95 m.	98
Figura 5.4. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 95 m.	98
Figura 5.5. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 70 m.	103
Figura 5.6. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 70 m.	103
Figura 5.7. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 70 m.	104
Figura 5.8. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 70 m.	104
Figura 5.9. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 30 m.	107
Figura 5.10. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 30 m.	107
Figura 5.11. Representación mediante la distribución de las líneas de flujo de la entrada de agua al pozo desde las capas inferiores a las perforadas. Corte de oeste a este por el área modelada.	110

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1. Zonación de los perímetros de protección en diferentes países europeos, Cuba y EUA.....	10
Cuadro 2.2. Relación entre los criterios que pueden emplearse en la delimitación de perímetros de protección y los procesos físicos que controlan	18
Cuadro 2.3. Valoración de los criterios utilizados en la delimitación de los perímetros de protección en función de consideraciones técnicas	22
Cuadro 2.4. Criterio empleado por diferentes métodos de delimitación del perímetro de protección	29
Cuadro. 2.5. Selección del método sobre la base de consideraciones técnicas	32
Cuadro 4.1. Parámetros de las capas en las que se basó la simulación del flujo.....	54
Cuadro 4.2. Resultados de la calibración obtenida	55
Cuadro 4.3. Dimensiones de los perímetros de protección de calidad determinadas mediante el modelo numérico VisualMODFLOW	65
Cuadro 4.4. Resultados del análisis de sensibilidad para el pozo abierto de 3–30 m	73
Cuadro 4.5. Parámetros del área de estudio que se utilizaron en los cálculos del perímetro de protección por el método analítico	78
Cuadro 4.6. Valores de los parámetros, R^* , r^* , y d^* en dependencia del parámetro indirecto de cálculo T^*	82
Cuadro 4.7. Resultados de los cálculos realizados por el método analítico	92
Cuadro 5.1. Comparación de los resultados obtenidos para el escenario del pozo abierto 3-95 m.....	99
Cuadro 5.2. Comparación de los resultados obtenidos para el escenario del pozo abierto 3-70 m.....	105
Cuadro 5.3. Comparación de los resultados obtenidos para el escenario del pozo abierto 3-30 m.....	108

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Las actividades humanas producen gran cantidad de desechos y provocan perturbaciones en el ciclo hidrológico y en la circulación de las aguas. El resultado es, con frecuencia, una contaminación de las mismas, unas veces de forma depurable mientras que otras prácticamente irreversible.

La contaminación de las aguas de superficie es muy visible y por ello, capaz de poner en movimiento acciones y remedios para evitarla o, por lo menos, para tratar de paliarla. No sucede normalmente lo mismo con las aguas subterráneas que, al no ser visibles y estar su explotación muy distribuida, la acción protectora o paliadora llega con frecuencia tarde y ello en el supuesto de que llegue a producirse. Además, cuando la contaminación se hace perceptible, usualmente ya ha alcanzado un importante desarrollo en extensión.

Por lo tanto, las medidas contra la contaminación de las aguas subterráneas deben ser preferentemente protectoras: regulando, ordenando o prohibiendo determinadas actividades en diferentes zonas, o bien, estableciendo ciertas medidas de seguridad sobre actividades potencialmente nocivas. Ello es especialmente importante en acuíferos y captaciones que sirven para el abastecimiento público, a fin de evitar que diferentes agentes contaminantes alcancen el agua extraída.

Consciente de ello, la mayor parte de los países de la Comunidad Económica Europea, Estados Unidos, Europa oriental, ex URSS, etc., se plantearon esta problemática hace ya algunas décadas, desarrollando programas de protección de las aguas subterráneas ante la contaminación antrópica. Entre las metodologías de protección de las aguas subterráneas, destaca el establecimiento de "perímetros de protección de pozos" (PPP), que mediante el estudio del medio físico, de las características de explotación de la captación y del comportamiento de los contaminantes permite establecer áreas, alrededor de los pozos, en las cuales de forma graduada, se restringen o prohíben, según sea el caso, las actividades o instalaciones que puedan alterar cualitativa o cuantitativamente (que puedan afectar el caudal de extracción previamente determinado) el agua subterránea extraída (RLM^C. Art.57).

La utilización de los perímetros de protección, como instrumento para la protección de las aguas subterráneas, no sólo ocurre cuando estas aguas son destinadas al abastecimiento público, si no también y, con mayor importancia aún, en los acuíferos cuyas aguas hayan sido evaluadas como minerales. Esto se debe a que este tipo de agua, para su utilización, no permite tratamientos que puedan alterar su composición química primaria (NC. 2: 1995). Esto significa que el agua subterránea, evaluada como mineral, debe ser sana en el punto de extracción, por lo que la protección del acuífero es la única vía posible para su conservación.

La necesidad de proteger los acuíferos de aguas minerales mediante los perímetros de protección de pozos (PPP), surge con anterioridad a la necesidad de protección de acuíferos de aguas de abastecimiento a la población. Las primeras experiencias para proteger este último tipo de agua ocurrieron en Europa a inicios de la década de 1930 (Oradoskaia y Lapchin, 1987), mientras que en lo relativo a las aguas minerales estos trabajos se remontan al año 1868 (Moreno y Martínez, 1991).

En Latinoamérica, aunque con más atraso en el tema, hay países que han hecho significativos esfuerzos en este sentido en los últimos años. Por ejemplo, en marzo de 1990, se aprueba en Cuba la primera norma, aún vigente, (NC 93-01-209, 1990) que establece los procedimientos de cálculo para la determinación de las zonas de protección sanitaria alrededor de los pozos de abastecimiento público, siendo utilizada también en las delimitaciones de los PPP en acuíferos de aguas minerales.

Posteriormente, en 1995, es aprobada la Ley de Minas (LM. 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 cubana de 1990, el hecho de 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 el marco normativo existe, la delimitación de los perímetros de protección, en muchos casos, y debido a los numerosos problemas que en ello inciden, puede convertirse en un problema complejo.

Hirata y Reboucas (1999), resumen los principales problemas que inciden en la delimitación de los PPP de la manera siguiente:

- La anisotropía del medio, asociada principalmente a la conductividad hidráulica de las litologías. La obtención de datos confiables para esta variable es bastante difícil causando, muchas veces, cambios radicales en las dimensiones del perímetro de protección delimitado.
- La heterogeneidad del medio, continuidad de los estratos permeables y menos permeables, grados de confinamiento y de fracturación del acuífero, así como el desconocimiento de la porosidad efectiva del acuífero y su distribución espacial.
- La influencia del descenso de otros pozos de bombeo en la región. El crecimiento sin una planificación adecuada, típico de las ciudades de Iberoamérica, acaba generando la construcción de varios pozos en un área específica. Muchas veces, la red de pozos es tan densa que cualquier trazado de un PPP terminaría por abarcar todo el espacio urbano, impidiendo o dificultando su ocupación. Además, el régimen de bombeo de estas obras causaría deformaciones de los PPP de los pozos vecinos.
- La geometría del acuífero, y condiciones de frontera, como ríos y drenajes, y sus relaciones con el acuífero.

- La estacionalidad de los niveles de agua y de las superficies potenciométricas, así como la ocurrencia de variaciones en la dirección del flujo en el acuífero durante el año.
- Desconocimiento de la capacidad asimilativa del acuífero. Normalmente, para la determinación de los perímetros de protección de pozos no se considera la capacidad de degradación del medio, ni tampoco la dispersión.

Los problemas enunciados en los párrafos anteriores se ven claramente reflejados en la realidad cubana. Esta situación se ha debido fundamentalmente a la complejidad hidrogeológica de la mayoría de los yacimientos de este tipo de aguas subterráneas y, en otras ocasiones, a la falta de conocimientos y herramientas adecuadas para adaptar los métodos de cálculo de los PPP a las características de los diferentes medios donde se ubica la fuente de agua mineral.

Esta situación ha llevado a que en la mayoría de las delimitaciones de los PPP de aguas minerales del país se hayan realizado sobre la base de significativas simplificaciones del medio, lo que crea una sensación de inseguridad en los cálculos, la cual se trata de eliminar en muchos casos con su sobredimensionamiento, situación que influye negativamente en la economía de la región circundante.

En otras ocasiones, a la complejidad hidrogeológica señalada se le suma un entorno socioeconómico complicado, situación que exige la máxima exactitud a la hora de proceder a la delimitación de los perímetros de protección de pozos. Un ejemplo real de este tipo de caso, lo tenemos en el área de estudio seleccionada para la presente investigación, ubicada en el acuífero Margarita, provincia Villa Clara, Cuba. En esta área fue necesario delimitar el perímetro de protección alrededor de un futuro pozo de explotación de aguas minerales y a la vez, identificar los recursos de aguas subterráneas restantes con vistas a otros usos, previendo que no se alteren las dimensiones del perímetro delimitado ni se afecte el caudal de explotación del pozo de agua mineral.

En el presente trabajo, luego de un análisis de las técnicas de delimitación de PPP más usadas en la actualidad, se definieron las más efectivas para solucionar la problemática planteada en el párrafo anterior.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Con base en la problemática planteada, y en relación con los principales avances obtenidos en este campo, el objetivo principal de esta investigación fue *delimitar, de la forma más precisa posible, el perímetro de protección alrededor del futuro pozo de explotación de agua mineral, a ubicarse, en el acuífero Margarita, región central de la República de Cuba*. Implementando, por esta vía, una herramienta adecuada para la gestión de los recursos hídricos subterráneos localizados en el área.

1.2.2. OBJETIVOS INTERMEDIOS

- a) Conocimiento del funcionamiento hidráulico del área de estudio ubicada en el acuífero Margarita, a partir de:
 - Recopilación de la información bibliográfica y de los datos climatológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de la zona de estudio.
 - Definición de las propiedades de interés del acuífero, estudiando sus características geométricas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas.
 - Estudio del flujo de agua subterránea, su evolución y análisis del comportamiento de los patrones, así como variaciones temporales que se pudieran presentar.

- b) Cálculo del perímetro de protección alrededor del futuro pozo de agua mineral, sobre la base de los métodos numéricos, analizando los efectos que, sobre estos resultados, podrían tener factores como recarga del acuífero, grado de penetración del pozo e incertidumbre de los principales parámetros hidrogeológicos que inciden sobre las dimensiones del perímetro.

- c) Selección entre los métodos tradicionales (Radio fijo arbitrario, Radio fijo calculado, Catálogo de formas simples, Método analítico, Mapeo hidrogeológico), el más adecuado para el cálculo del perímetro de protección.
- d) Comparación de los resultados obtenidos, y en caso de obtenerse diferencias señalar las causas que las provocan.
- e) Establecimiento en el área, mediante la delimitación del perímetro de protección, de una herramienta adecuada que permita la explotación futura del área de la forma más racional posible.

1.3. METODOLOGÍA

Para la consecución de la serie de objetivos presentados en el apartado anterior se siguió la siguiente metodología:

a) Revisión bibliográfica

Se realizó una profunda investigación documental tomando como enfoque principal las posibilidades de aplicación de los diferentes métodos de delimitación de los perímetros de protección de pozos, así como aquellos factores que pueden influir en tal delimitación.

b) Revisión y análisis de los datos obtenidos durante las campañas de campo realizadas en el área que se consideren necesarios para la presente investigación.

Se trató, en esencia, de la suma, revisión y análisis de toda la información disponible sobre la región de estudio, lo que permitió establecer una tipología básica del funcionamiento del acuífero.

En este punto, se realizó la digitalización de las cartas topográficas a escalas 1:50 000 y 1:10 000, así como de los mapas y cortes hidrogeológicos y geológicos relacionados con el área de estudio, también se recalcularon los parámetros hidrogeológicos del acuífero con el apoyo del software Aquifer Test (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1998). Esta información, en su conjunto permitió el análisis y definición de las principales características del acuífero (gradiente hidráulico, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, caudal

específico y espesor) y su variabilidad espacial, así como, establecer las fronteras hidrogeológicas presentes en el área.

- c) Delimitación del perímetro de protección del futuro pozo de explotación de agua mineral localizado en el área de estudio, con base en el método numérico.

Primeramente, y tras el análisis de las características hidrogeológicas del área, descritas en los párrafos anteriores, se procedió al desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual, éste permitió representar los rasgos hidrogeológicos que son especialmente importantes en el control del flujo del agua subterránea.

Posteriormente, se abordó la modelación del flujo subterráneo en régimen estacionario, con objeto de reproducir la situación actual del acuífero, y una vez calibrados los diferentes parámetros hidráulicos que intervienen en el proceso, se pasó a determinar las dimensiones del perímetro de protección de acuerdo a los diferentes escenarios simulados. Esta etapa contó con el apoyo de la Empresa Waterloo Hydrogeologic, Inc., que facilitó el software necesario (VisualMODFLOW y Aquifer Test).

- d) Delimitación del perímetro de protección del futuro pozo de explotación de agua mineral localizado en el área de estudio, con base en el método tradicional seleccionado.

Con base en las características hidrogeológicas del área, se efectuó la selección del método más adecuado entre los métodos tradicionales más utilizados en la delimitación de los PPP. La selección correspondió al método analítico, el cual se utilizó, en cuatro de sus variantes (Wyssling, Minkin, Norma Cubana y Pérez y Menéndez), de acuerdo a los mismos escenarios simulados en las delimitaciones del perímetro de protección mediante el modelo numérico.

- e) Comparación de los resultados obtenidos.

Se realizó una comparación exhaustiva entre los resultados obtenidos por ambos métodos, señalándose las causas de las diferencias en los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

EL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE POZOS COMO HERRAMIENTA DE PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS

2.1. INTRODUCCIÓN

La forma más segura de conseguir la protección absoluta de una captación a favor de su calidad y cantidad, sería impedir todo tipo de actividad potencialmente contaminante o extractiva sobre el área de recarga de la misma y sus alrededores. No obstante éste es un planteamiento imposible de llevar a la práctica, por las implicaciones técnicas y sobre todo económicas que supondría, por lo que se considera más adecuado definir los perímetros de protección, que no es más que, el establecimiento de un sistema de zonas rodeando la captación, en el interior de las cuales se restringen o se prohíben, de forma graduada (en función de la proximidad a la misma) las actividades susceptibles de modificar la calidad y cantidad del agua subterránea.

En el caso de la protección cualitativa, el perímetro de protección debe garantizar que la calidad del agua no se verá afectada, y no sobrepasará en ningún caso los límites establecidos en su composición por la legislación vigente en cada país. Si se produce una contaminación, la consecución de este objetivo se logra mediante tres procesos:

- Dilución. El contaminante al discurrir por el seno del acuífero se diluye al mezclarse con el agua que contiene.

- Degradación o inactivación, ya sea mediante reacciones químicas con el oxígeno disuelto (especialmente en la zona no saturada) o con los materiales del acuífero, o en el caso de bacterias y otros organismos vivos al morir, por no encontrarse en un medio adecuado.
- Instalación de un sistema de vigilancia y control que permite tomar medidas ante la contaminación o detener el bombeo de la captación amenazada antes de que llegue a ella el agente contaminante.

Al delimitar el perímetro de protección debe conseguirse, considerando la influencia que tenga los factores antes citados, un compromiso entre una protección adecuada y suficiente del recurso y el respeto, en la medida de lo posible, de la actividad socioeconómica de la región circundante.

2.1.1. ZONACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN Y RESTRICCIÓN DE ACTIVIDADES.

A pesar, de que cada país posee sus particularidades en la delimitación de los perímetros de protección de pozos (cuadro 1), todos, por lo general, coinciden en dividir el perímetro en diversas zonas alrededor de la captación, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuestas sobre ellas. Las principales características de estas zonas son:

Zona inmediata o de restricciones absolutas (Zona I).

Es la más próxima a la captación, su fin primordial consiste en proteger ésta, y sus instalaciones contra las inclemencias climatológicas y la acción de animales; asimismo, impide los vertidos e infiltraciones directas sobre la captación.

El criterio de delimitación suele ser un tiempo de tránsito de 24 horas (ver apartado 2.2.1) o un área fijada de forma arbitraria de pequeña extensión (100-400 m²) que comprende: la captación propiamente dicha, la caseta de transformación o del motor, depósitos de agua o de combustible, etc. Esta deberá estar delimitada con una valla o construcción que impida el acceso a personas no autorizadas. Las restricciones sobre esta superficie serán absolutas impidiéndose cualquier tipo de actividad.

Cuadro 2.1. Zonación de los perímetros de protección en diferentes países europeos, Cuba y EUA

PAÍSES	ZONAS DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN			OBSERVACIONES
Alemania	Zona I, rodeando el pozo 10-100 m	Zona II, 50 días	Zona III, se divide en III A hasta 2 Km. y III B, hasta el límite de alimentación	En medios kársticos la zona III por lo general no se divide en A y B
Austria	Zona de protección inmediata	Zona de protección 50 días	Zona de protección parcial, se extiende hasta el límite de alimentación	
Finlandia	Zona de protección inmediata 20-25 m	Protección próxima 60 días	Zona de protección exterior, se extiende hasta el límite de alimentación	
Holanda	Alrededor del pozo	Área de captación 50 - 60 días	Zona de protección, se divide en dos zonas una de 10 y otra de 25 años	En caso necesario, se divide una cuarta zona, denominada área de recarga alejada, que se extiende hasta el límite de alimentación
Francia	Zona de protección inmediata 10 - 20 m	Protección próxima	Zona de protección alejada, se extiende hasta el límite de alimentación	Para la zona de protección próxima, no tiene tiempo de tránsito establecido
Suiza	Zona I 5 - 20 m	Zona II 10 días o 100 m	Zona III 200 m	La zona III puede dividirse en IIIA y IIIB
Checoslovaquia	Zona de protección sanitaria 10 - 50 m	2 ^{da} zona de protección sanitaria	Zona de protección externa. Se extiende hasta el límite de alimentación	Para la 2 ^{da} zona de protección sanitaria, no tiene tiempo de tránsito establecido
Hungría	Zona de protección	Protección próxima 60 días	Protección hidrogeológica 25 - 100 años	
Suecia	Zona alrededor del pozo	Protección próxima 60 días o 100 m como mínimo	Zona de protección externa, se extiende hasta el límite de alimentación	
Gran Bretaña	Zona de protección inmediata			No hay zonas fijas, se limita en función de las características del área.

Cuadro 2.1. Zonación de los perímetros de protección en diferentes países europeos, Cuba y EUA (continuación)

PAÍSES	ZONAS DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN			OBSERVACIONES
Noruega	Zona alrededor del pozo 10 - 30 m	60 días	Zona de infiltración, se extiende hasta el límite de alimentación	
Ex - URSS	Zona I 10 - 50 m	Zona II 100 - 400 días	Zona III 25 - 50 años	Oradoskaia y Lapchin, (1987)
Bélgica	Zona I 24 horas < 100 m	Zona II 60 días	Zona III 2000 m	
España	Zona inmediata o de restricciones absolutas, 24 horas	Zona próxima o de restricciones máximas, 60 días	Zona alejada o de restricciones moderadas, 10 años	Si es necesario se dividen dos zonas más, las zonas satélites de protección y la zona de protección contra la intrusión salina. El perímetro de protección deberá proteger contra afecciones cualitativas y cuantitativas
EUA	Zona I Zona de control 15 - 30 m	Zona II Zona de protección especial 250 días - 3 años	Zona III Zona de protección regional 5 - 15 años	Cada estado legisla independiente sobre las características de sus perímetros, existiendo significativas diferencias en las dimensiones de las zonas. USEPA, (1993).
Cuba	Aguas de abastecimiento público			El perímetro de protección solo está diseñado para protección cualitativa NC. 93-01-209
	Zona I o de régimen estricto 5 - 25 m	Zona II o de limitaciones grandes 70 - 100 días	Zona III o de limitaciones menores, hasta el límite de la zona de alimentación	
	Aguas minerales			Si es necesario se dividen dos zonas más, las zonas satélites de protección y la zona de protección contra la intrusión salina. El perímetro de protección deberá proteger contra afecciones cualitativas y cuantitativas RLM. Art.-57
Zona I o de régimen estricto 30 - 50 m	Zona II o de limitaciones grandes 70 - 200 días	Zona III o de limitaciones menores 5 años		

Fuente: Modificado de Moreno y Martínez, (1991). Los países agregados a este cuadro presentan sus referencias bibliográficas.

Para la puesta en práctica de estas premisas sería recomendable el cumplimiento de los siguientes apartados (Baeza, 1994):

- Incidir en la importancia de aislar el área del perímetro inmediato vallando y limitando el acceso únicamente al personal de mantenimiento.
- Esta área será minuciosamente limpiada eliminando los restos de suciedad, plantas y materia orgánica que pudiera descomponerse e infiltrarse en el subsuelo.
- En los casos en los que el suelo y la zona no saturada bajo la zona de protección inmediata posean una permeabilidad vertical media (K_v) y un espesor conjunto (e) tales que $K_v/e > 10^{-8}$ m/s, será necesario, si las condiciones del lugar lo permiten, depositar sobre el suelo de la misma una capa de arcilla compactada de al menos 50 cm de espesor.
- Por medio de una tapia, y/o un drenaje perimetral, debe impedirse que las aguas de escorrentía accedan y se acumulen en el interior de esta zona de protección. Asimismo, y aplicando el procedimiento más adecuado a cada situación, la propia captación debe ser protegida de la entrada directa del agua de la lluvia.
- Cuando sea posible se situará el emboquillado del sondeo un poco elevado respecto del terreno circundante.
- El revestimiento del pozo debe sobresalir del terreno y estar rodeado por una superficie impermeable cuyo drenaje en caso de derrame accidental irá fuera del pozo.
- Se impermeabilizará el espacio anular de los primeros metros del sondeo y se cementará y entubará con tubería ciega todos los niveles en los cuales no se vaya a captar el acuífero evitando así mezclas de aguas.

Zona próxima o de restricciones máximas (Zona II)

Representa el cuerpo principal del perímetro. Comprende un área de extensión variable pero suficiente para proteger el agua contra su contaminación, ya sea asegurando la inactivación,

eliminación o dilución del contaminante, o permitiendo una alerta a tiempo para tomar las medidas adecuadas antes que la sustancia extraña llegue a la captación.

El dimensionado de la zona próxima se hace generalmente en función de un criterio de tiempo de tránsito, el cual es variable según cada país (cuadro 2.1), pretendiendo con ello proteger totalmente contra la contaminación microbiológica y, lo más posible, contra la química.

Zona alejada o de restricciones moderadas (Zona III)

Debe proteger la captación frente a contaminantes de larga persistencia, básicamente contaminación química no degradable o difícilmente degradable (metales pesados, hidrocarburos, compuestos orgánicos, etc.). La filosofía de protección en esta área se basa, por tanto, en los procesos de dilución o de alarma, además de los de degradación o inactivación.

El criterio empleado en su determinación suele ser el tiempo de tránsito (5-100 años) o, más frecuentemente, un criterio hidrogeológico, abarcando así toda el área de alimentación de la captación (cuadro 2.1).

La imposición de fuertes restricciones en una superficie de tales características, sólo sería viable en acuíferos de muy pequeña extensión, sin actividad económica desarrollada, por ello en esta zona normalmente sólo se regulan actividades que dado su especial impacto o peligrosidad provocarían un proceso contaminante imposible de controlar, aun cuando éste se produjera en un lugar alejado de la captación que se desea proteger.

En ciertas circunstancias pueden definirse áreas de restricción llamadas "zonas satélites de protección" (Moreno y Martínez, 1991), que delimitan superficies alejadas de la captación y situadas fuera del perímetro anteriormente descrito, pero que presentan una conexión hidráulica directa o preferente a través de conductos o fisuras con el punto de captación del agua. Estas "zonas satélites de protección" cobran especial relevancia en acuíferos kársticos y fisurados, donde sus especiales características estructurales facilitan la aparición de estos fenómenos.

Conviene recordar la utilidad que presenta en estos casos la realización de estudios mediante trazadores a fin de comprobar esa pretendida conexión hidráulica.

En regiones costeras, donde los procesos de intrusión marina pueden ser causa de fenómenos de salinización del agua subterránea, el perímetro debería incluir una "zona de protección contra la intrusión salina" (RLM.^c Art. 57, Moreno y Martínez, 1991) en la cual estarían restringidos los bombeos, a un nivel que impidiese la degradación de la calidad del agua por efecto del avance del frente salino (situación poco frecuente en el caso de aguas minerales).

En su interior se limitarán las extracciones de agua de todas aquellas actividades que pueden modificar la posición del frente salino. Su determinación se realizará sobre la base de criterios hidrogeológicos.

En el caso de Cuba la regulación de actividades en las diversas zonas en que se dividen los perímetros (NC 93-01-209), puede resumirse de la siguiente forma;

Se consideran dañinos y generalmente no admisibles en la zona III las siguientes actividades;

- El desarrollo de viviendas, hospitales y edificaciones industriales, si los efluentes no son completamente extraídos de la zona por alcantarillados.
- El desarrollo de campos de aviación, maniobras militares, así como instalaciones militares propiamente dichas.
- La perforación de pozos petroleros, de gas natural, o de aguas no condicionadas.
- La construcción de pozos para el drenaje pluvial vertical de campos o ciudades, o de los destinados para la recarga artificial del acuífero.
- La acumulación de abonos y pesticidas.
- El uso de abonos y/o pesticidas sin un conocimiento del período "activo" de los mismos, y de la geología de la zona.

Se consideran dañinos y generalmente no admisibles en la zona II las siguientes actividades;

- El almacenamiento abierto y la aplicación incorrecta de fertilizantes inorgánicos u orgánicos, aunque en dependencia del suelo estos últimos (los orgánicos) pudiesen aplicarse bajo un control estricto.

- La construcción de edificios e industrias, así como centros agrícolas y caseríos de pequeños agricultores o cooperativas.
- La construcción de carreteras, vías férreas, calles, pistas deportivas, lugares de acampamiento, cementerios.
- Las excavaciones de arenas, gravas, margas y suelos en general.
- Las canteras de piedra.
- El abandono de pozos sin liquidar.
- Todo lo señalado en la zona III.

Además, se prohíbe toda intrusión dentro del suelo, por lo cual la zona activa del mismo puede ser dañada o su espesor disminuido y sólo se permite la normal forestación y agricultura.

Se consideran dañinos y generalmente no admisibles en la zona I las siguientes actividades;

- Todo lo previsto para las dos anteriores.
- El tránsito de peatones y la apertura de caminos.
- Todo uso agrícola o aplicación de agentes químicos y pesticidas.
- La introducción directa o indirecta de residuales domésticos así como el desarrollo de labores agrícolas.

Además la zona se cubrirá de césped fino, el cual se deberá mantener bajo y parejo y se prohibirá la existencia de árboles de 20 m o más de altura.

Hasta ahora sólo hemos considerado la zonación del perímetro desde el punto de vista de la protección de la calidad, no obstante en países como España y Cuba (cuadro 2.1), en el área delimitada por el perímetro de protección y en sus alrededores, deben ser reguladas además las extracciones de agua del acuífero a fin de garantizar la cantidad del recurso, para lo cual se define la "zona de protección de la cantidad".

La metodología a aplicar en esta zona difiere notablemente de la empleada en las anteriores y será abordada en el apartado 2.3

2.1.2. ESTUDIOS PREVIOS

Para poder delimitar un perímetro de protección es necesario, en primer lugar, realizar una serie de estudios que proporcionen la información necesaria, para aplicar posteriormente los métodos de valoración existentes.

Baeza (1994), resume los estudios previos necesarios de la siguiente forma:

- Inventario de otros puntos acuíferos existentes en la zona a proteger. Nos proporciona datos de interés como evoluciones piezométricas, calidad del agua, acuíferos captados, etc.
- Inventarios de posibles focos de contaminación. A fin de determinar el origen y naturaleza de los contaminantes.
- Cartografía geológica e hidrogeológica, que nos permitirá conocer el tamaño de los acuíferos, sus límites, así como las características litoestratigráficas y tectónicas del área.
- Ensayos de bombeo. Nos proporcionan los parámetros hidrodinámicos necesarios para aplicar los métodos de valoración existentes.
- Análisis físico-químicos de las aguas. Se realiza con el objetivo de conocer la calidad natural de las aguas de los acuíferos, a fin de identificar con rapidez y seguridad, cualquier proceso contaminante.
- Determinación isotópica. Se realiza cuando el estudio hidrogeológico e hidroquímico plantea dudas respecto al origen del agua. Estas técnicas también permiten identificar la existencia de mezclas de aguas con diferentes orígenes.

Los datos de los estudios y análisis anteriormente indicados, proporcionan la información necesaria para, posteriormente, aplicar el método que se considere más apropiado en función del tipo de acuífero y de los datos disponibles del punto acuífero a proteger.

Además son necesarios una serie de comprobaciones (como existencia de barreras hidrogeológicas, aportes laterales etc.), a fin de ajustar el perímetro en función de la hidrogeología o de otros condicionantes, como los topográficos y distribución de la recarga, entre otros.

2.2. PROTECCIÓN DE CALIDAD

2.2.1. CRITERIOS PARA LA DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS

En el cuadro 2.2 se relacionan los cinco criterios existentes con el proceso físico que controlan. Se analizará detalladamente cada uno de estos:

A. DISTANCIA

Consiste en delimitar un área definida por un círculo con centro en la captación. Sus dimensiones se definen frecuentemente como una media de las obtenidas al aplicar en diferentes casos otros criterios más complejos.

Es el más elemental de los existentes, pudiendo valorarse como poco eficaz, puesto que no incorpora ninguna consideración sobre las condiciones de flujo del agua subterránea, ni respecto a los procesos implicados en el transporte de los contaminantes en cada caso particular.

B. DESCENSO

Se basa en considerar que en el área en la cual desciende el nivel del agua subterránea, debido al efecto de bombeo, se producen cambios en la dirección del flujo subterráneo y un aumento de la velocidad con la que el agua llega a la captación, debido al incremento del gradiente hidráulico, produciendo o acelerando la migración del contaminante hacia esta.

Cuadro 2.2. Relación entre los criterios que pueden emplearse en la delimitación de perímetros de protección y los procesos físicos que controlan

Criterio	Distancia	Descenso	Tiempo de tránsito	Criterios hidrogeológicos	Poder autodepurador del terreno
Proceso físico					
Advección		*	*	*	
Dispersión hidrodinámica			*		*
Interacción sólido-soluto (reacciones químicas de adsorción)			*		*

Fuente: USEPA, 1993

Ha sido mal aplicado en numerosas ocasiones debido a la idea errónea de que el área de alimentación y el área de influencia coinciden. Esto sólo es cierto en aquellas zonas en las cuales antes de comenzar a bombear no haya gradiente hidráulico o éste sea despreciable.

Cuando éstas circunstancias no se dan, lo que es normal en prácticamente la totalidad de las situaciones, no toda el área de influencia (área en la que se produce un descenso del nivel piezométrico producto del bombeo) queda englobada en el área de alimentación (área en la que todas las líneas de flujo del agua subterránea terminan en el pozo de explotación) y, por otra parte, la contaminación producida fuera del área de influencia, pero por dentro del área de alimentación, podrá alcanzar la captación en un período de tiempo variable, que es función de la distancia a la misma.

C. TIEMPO DE TRÁNSITO

Mediante este criterio se evalúa el tiempo que un contaminante tarda en llegar a la captación que se pretende proteger.

Los cálculos para la determinación del tiempo de tránsito se realizarán considerando principalmente el proceso de advección, que es el más conocido y el que tiene mayor importancia en acuíferos con alta velocidad de flujo, si bien también toman en cuenta la dispersión hidrodinámica y la interacción sólido-soluto, que adquieren mayor relevancia en aquellos acuíferos en los que la velocidad de flujo es menor.

Es uno de los criterios más exactos que existen puesto que considera diversos factores que afectan a la evaluación del proceso (cuadro 2.2).

En definitiva, el objetivo, que se pretende con su aplicación, es definir zonas alrededor de las captaciones con la suficiente amplitud para que el resultado de una actividad contaminante tarde en llegar a la misma, un tiempo determinado que permita su degradación, o proporcione una capacidad de reacción que haga posible un cambio temporal en la fuente de suministro a la población, hasta que la degradación de la calidad de las aguas extraídas disminuya a límites aceptables.

La mayor parte de los países han escogido como criterio para definir la zonación del perímetro un tiempo de tránsito de 1 día en la zona inmediata, 50-60 días en la zona próxima y 5-50 años en la zona alejada (cuadro 2.1).

D. CRITERIOS HIDROGEOLÓGICOS

Su elección se fundamenta en la suposición de que una contaminación que se produjese en el área de alimentación de una captación podría alcanzarla transcurrido un cierto período de tiempo, por lo que debe delimitarse ésta y protegerla en su totalidad.

Se trata por tanto de identificar los límites hidrogeológicos que delimitan el área en la cual el agua procedente de la precipitación, después de infiltrarse, podría llegar a alcanzar la captación. Estos son de diversos tipos, pudiendo actuar como tales: ríos, canales, lagos, divisorias piezométricas, materiales impermeables, etc.

La aplicación de este criterio va a implicar la protección de un área mayor de la necesaria, por lo que se utilizará principalmente al realizar una primera determinación del perímetro, especialmente en los acuíferos constituidos por materiales kársticos y rocas fracturadas que poseen elevadas velocidades de flujo. Su empleo es también muy usual en acuíferos pequeños, en los que el tiempo de tránsito hasta los límites es muy reducido, por lo que disminuye notablemente el área sobreprotegida.

En cualquier caso es sumamente recomendable su utilización en conjunción con otros criterios, tanto para valorar si los límites hidrogeológicos existentes van a restringir su

utilización, como para modificar cuando sea preciso los resultados que éstos puedan proporcionar.

E. PODER AUTODEPURADOR DEL TERRENO

Consiste en utilizar la capacidad que poseen los diferentes terrenos para atenuar la concentración de los contaminantes que los atraviesan, como criterio para definir la extensión de éstos que debe recorrer un agua contaminada hasta alcanzar una calidad admisible para el consumo humano.

En esta capacidad depuradora del terreno intervienen procesos físicos, químicos y biológicos que actúan de modo diferente para cada contaminante, por lo cual deben realizarse estudios previos que permitan evaluarlos convenientemente.

El estudio requiere el análisis detallado del perfil edafológico y de la zona de aireación, textura, estructura, composición mineralógica, porosidad, etc., así como las características propias de cada contaminante que sea preciso considerar.

Los diversos criterios comentados tratan de garantizar la calidad del agua, poniendo en funcionamiento uno o varios de los siguientes mecanismos (USEPA, 1993):

- Evitar que debido al bombeo en la captación (al producirse variaciones en el flujo del agua subterránea en las inmediaciones de ésta), se provoque la llegada de sustancias indeseables a la misma. Los criterios empleados son la distancia y el descenso del nivel piezométrico.
- Asegurar que la contaminación será inactivada en el trayecto entre el punto de vertido y su lugar de extracción. Se toma como criterio el poder autodepurador del terreno, el tiempo de tránsito y la distancia.
- Garantizar la protección de la calidad de las aguas subterráneas en la totalidad del área de alimentación de una captación. Se toman los criterios hidrogeológicos.

2.2.2. ELECCIÓN DEL CRITERIO

Para elegir entre los criterios anteriormente expuestos el que se necesite utilizar en cada caso, se debe tener en cuenta tanto consideraciones técnicas como el impacto socioeconómico que planteará su aplicación.

Por lo que respecta a los aspectos técnicos, en el cuadro 2.3 se refleja dicha selección en función del análisis de los siguientes conceptos (USEPA, 1993):

- **Facilidad de aplicación.** Indica si su empleo requiere una capacidad técnica mayor o menor. No debe representar un problema al suponerse que los organismos encargados de su realización poseen personal técnico suficientemente calificado.
- **Facilidad de cuantificar.** Conlleva la posibilidad de utilizar métodos matemáticos en su aplicación.
- **Adaptable a cambios.** Consiste en evaluar si es posible adaptarlo a modificaciones que se produzcan en el futuro, como por ejemplo variaciones en el régimen de bombeo.
- **Facilidad de verificación.** Indica si sus resultados pueden ser comprobados directamente en el propio terreno mediante estudios de detalle.
- **Capacidad de considerar el poder autodepurador del terreno.** Se trata de evaluar con que fiabilidad refleja las características intrínsecas del terreno.
- **Concordancia con el modelo hidrogeológico general.** Al considerar este concepto se pretende valorar si las asunciones que debieron realizarse al aplicar el criterio son admisibles respecto a las consideraciones hidrogeológicas regionales.
- **Capacidad de considerar procesos físicos.** Refleja si el criterio elegido incorpora los procesos físicos envueltos, los cuales ya fueron señalados previamente.

El cuadro 2.3 se realizó evaluando el criterio empleado en 900 casos reales, en su mayoría correspondientes a acuíferos libres en medios porosos en EUA, y se obtuvo que el criterio mejor valorado al realizar dicho análisis es el tiempo de tránsito.

Cuadro 2.3. Valoración de los criterios utilizados en la delimitación de los perímetros de protección en función de consideraciones técnicas

Consideraciones técnicas	Criterios				
	Distancia	Descenso	Tiempo de tránsito	Criterios hidrogeológicos	Poder autodepurador del terreno
Facilidad de aplicación	A	M	M	M	B
Facilidad de cuantificar	A	A	M	N/A	B
Adaptable a cambios	A	B	B	A	A
Facilidad de verificación	A	A	B	A	B
Capacidad de considerar el poder autodepurador del terreno	N/A	N/A	M	N/A	A
Concordancia con el modelo hidrogeológico general	B	A	A	M-A	M-A
Capacidad de considerar procesos físicos	B	B	A	M	M
Clasificación (1-5)	1	2	5	3	3

B: Bajo

M: Medio

A: Alto

N/A: No aplicable

Fuente: USEPA, 1993

NOTA: Clasificación (1-5): 1 Mínima puntuación

5 Máxima puntuación

2.3. MÉTODOS PARA LA DELIMITACIÓN DEL PERÍMETRO

Según USEPA (1993), los principales métodos de cálculo del perímetro de protección de calidad (en orden ascendente en cuanto a complejidad y costos), pueden resumirse en seis, los cuales pueden presentar diferentes variantes de acuerdo al criterio elegido. Estos métodos son:

- a) Radio fijo arbitrario
- b) Radio fijo calculado
- c) Catálogo de formas simples
- d) Método analítico

- e) Mapeo hidrogeológico
- f) Modelos numéricos de flujo y transporte

A continuación se comentan las principales características de estos métodos.

a) Radio fijo arbitrario.

Consiste en el establecimiento de un área circular, de radio fijo, con centro en la captación que pretende protegerse. El tamaño que debe tener dicho radio es una decisión arbitraria aunque, por lo general, suele definirse sobre la base de las dimensiones que tiene el obtenido al usar métodos más complejos en otras captaciones del área estudiada. Éste es un método rápido sencillo y de bajo costo, pero, al no incorporar condiciones hidrogeológicas, está sujeto a grandes errores.

No obstante, en la actualidad es muy utilizado en muchos países, como una vía para disponer temporalmente de los perímetros de protección, mientras se realizan estudios técnicos para su determinación de forma más precisa (Moreno y Martínez, 1991), o aceptados de forma definitiva con ciertas condiciones. Por ejemplo, en EUA, puede establecerse definitivamente si la captación abastece menos de 500 personas (Oregon Health Division, 1992).

b) Radio fijo calculado.

Consiste en delimitar un área circular, cuyo radio se define en función del volumen extraído del pozo y del valor de la porosidad del acuífero. Es un método rápido, sencillo y de bajo costo (USEPA, 1993). Sin embargo, aunque la utilización de este método aumenta la precisión respecto al uso del radio fijado arbitrariamente descrito anteriormente, sigue siendo un método que proporciona poca exactitud, puesto que considera un número muy limitado de factores, no teniendo en cuenta aspectos importantes como el gradiente hidráulico, fronteras de flujo y otros, por lo que en unos casos proporciona sobreprotección y en otros las captaciones tendrán un área de protección menor que la requerida (Moreno y Martínez, 1991).

c) Catálogo de formas simples.

Este método consiste en elegir qué figura, de las representadas en un catálogo de formas de perímetros de protección, es la que se ha obtenido empleando parámetros hidrogeológicos similares a los existentes en el caso analizado. Una vez escogida, sólo resta orientarla en la captación, en función de la dirección y sentido del flujo subterráneo (Hirata y Reboucas, 1999). Según Boulding (1995), la gran ventaja que tiene este método es que, una vez creado el catálogo, se aplica fácilmente con un costo muy reducido, obteniéndose en numerosas ocasiones resultados suficientemente precisos. La principal limitante es que no considera las fronteras hidrogeológicas o heterogeneidades que pudiese presentar el acuífero.

d) Método analítico.

El método analítico, se basan en el uso de las ecuaciones que definen el flujo de agua subterránea (en el acuífero y en los alrededores del pozo) y el transporte de contaminantes, estas ecuaciones, combinadas con un tiempo de tránsito establecido, permiten, con bastante exactitud, el cálculo del perímetro de protección en condiciones hidrogeológicas simples.

Posiblemente es el método más ampliamente usado (Hirata y Reboucas, 1999, USEPA, 1993), debido a que introduce varios parámetros hidrogeológicos como: trasmisibilidad, porosidad efectiva, conductividad hidráulica y gradiente hidráulico, lo que lo hace más preciso que los tres métodos descritos con anterioridad.

Este método cuenta con innumerables variantes, entre éstas tenemos, las propiamente analíticas: Hofmann y Lillich, Wysling (Baeza, 1994), Minkin (Oradoskaia y Lapchin, 1987), González y Hecheverría, Pérez y Menéndez (Pérez, 1998) y Grubb (Grubb, 1993). También de este método se derivan los métodos gráfico-analíticos, entre los cuales tenemos: Jacobs y Bear, Nomogramas de Van Waegningh y Nomografo de Pettyjon (Baeza, 1994).

Una de las ventajas del método analítico, es que puede desarrollarse con la ayuda de las computadoras, lo que ha provocado la aparición en diferentes países, de variados modelos analíticos. En EUA por ejemplo, se han desarrollado algunos como; GWPATH (Shafer, 1990), DREAM (Bom y Rounds, 1990), WHPA (Blanform y Huyakon, 1990), CAPZONE, (Bair et al., 1992), ROSE (Lerner, 1992). En España tenemos los modelos analíticos TRISOCRONO y

UNISOCRONO (López, 1992), mientras que en Cuba se utiliza el PROTZONE (Batista, 1994).

A pesar de que este método es superior a los tres descritos anteriormente, aún presenta una serie de limitaciones para representar fielmente el medio hidrogeológico real. Estas limitaciones podrían resumirse de la siguiente forma (Grubb, 1993; Springer y Bair, 1992):

- Solo considera acuíferos homogéneos e isotrópicos
- Solo trabaja en 2 dimensiones
- La mayoría de las variantes no considera la recarga
- Considera el pozo abierto en todo el espesor del acuífero
- Asume solo flujo horizontal
- Considera solo flujo estacionario
- Se define un flujo constante de bombeo
- La mayoría de las variante no permiten su calibración

e) Mapeo hidrogeológico.

Este método se basa en un profundo conocimiento del acuífero en el cual se asienta la captación, los materiales que lo forman, sus parámetros hidrodinámicos (porosidad, trasmisibilidad y coeficiente de almacenamiento) y su estructura (espesor del acuífero, límites hidrogeológicos, etc.). Además, se debe conocer con detalle la climatología de la zona, en especial, el régimen de precipitaciones (Baeza, 1994).

Estos métodos son especialmente útiles cuando se pretende proteger captaciones situadas en acuíferos kársticos o en rocas fisuradas, en los cuales no son aplicables la mayor parte de los procedimientos descritos previamente, al ser acuíferos heterogéneos y anisótropos. Su empleo es también muy usual en acuíferos pequeños, en los que el tiempo de tránsito hasta los límites

es muy reducido, por lo que disminuye notablemente el área sobreprotegida que su aplicación conlleva.

Según Moreno y Martínez (1991), el principal inconveniente que plantea este método es la necesidad de contar con técnicos muy especializados y que puede suponer unos costos muy elevados, si no existe una cartografía hidrogeológica previa o es necesario recurrir al apoyo de técnicas geofísicas, efectuar campañas piezométricas, etc. Sin embargo, según Boulding (1995), la principal deficiencia de este método radica en su poca efectividad en acuíferos confinados.

f) Modelos numéricos de flujo y transporte.

Los modelos numéricos permiten simular el flujo del agua subterránea y/o el transporte de solutos resolviendo numéricamente las ecuaciones que lo definen (Moreno y Martínez, 1991). El empleo de modelos numéricos es especialmente útil para la determinación de perímetros de protección cuando existen condiciones de fronteras y condiciones hidrogeológicas complejas. También son útiles para predecir los posibles cambios de tamaños de los perímetros que será necesario realizar en ellos, debido a las variaciones de las condiciones utilizadas cuando se calcularon, tales como: incremento de los bombeos, variaciones de la recarga, etc. Proporcionan resultados con un elevado grado de exactitud.

Según Hirata y Reboucas (1999), el mayor inconveniente que plantea el empleo de este método es que se requiere de técnicos con alta especialización, siendo los costos de su aplicación elevados. Por esta razón, tienden a usarse principalmente cuando se requiere una gran exactitud ante la complejidad del problema o por los posibles desembolsos elevados que implicaría la aplicación del perímetro propuesto, lo que haría indispensable proteger solamente el terreno estrictamente necesario, reduciendo así la necesidad de realizar expropiaciones.

2.3.1. INCERTIDUMBRES EN EL TRAZADO DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE POZOS

La sensibilidad del trazado de los perímetros de protección mediante los métodos descritos, ha sido analizada por diversos autores, sobre todo, en el sentido de las dificultades que pueden causar la heterogeneidad de los acuíferos, y la falta de información precisa. Entre estos

autores, destacan Cleary (1992) y Varljen y Shafer (1992) quienes discuten las influencias del gradiente regional, la trasmisibilidad, la anisotropía, la heterogeneidad de la conductividad hidráulica, la recarga inducida de los ríos y la porosidad efectiva en la forma y dimensión del perímetro calculado. Así como, Bradbury y Muldon (1994), que determinaron los efectos de la densidad de fracturamiento y anisotropía de los acuíferos fracturados, en el aumento considerable del área a proteger por los perímetros de protección, remarcando la necesidad de utilizar adecuados coeficientes de seguridad en los cálculos, cuando se asume un medio fracturado como medio poroso.

Por su parte Zlotnik (1997), Bair y Lahm (1996) y Faybishenko et al., (1995) analizaron la influencia del grado de penetración del pozo en el acuífero, sobre la geometría de los PPP. Learner (1992) plantea los efectos de la recarga por lluvias sobre las dimensiones de los PPP trazados en acuíferos libres. La National River Authority (1991) define las dificultades operativas asociadas a estos parámetros hidrogeológicos mientras que Foster y Hirata (1988) discuten algunos problemas de la alta concentración de los perímetros de protección en áreas intensamente urbanizadas. Por su lado, la USEPA (1991b) analiza la importancia de la determinación exacta del grado de confinamiento del acuífero y de la determinación de la edad de las aguas subterráneas, sobre las dimensiones de los perímetros de protección en acuíferos confinados.

Otros trabajos han estado orientados a comparar los resultados obtenidos en las delimitaciones de los perímetros de protección como resultado de la aplicación de diferentes métodos. USEPA (1991a) evaluó varias metodologías en dos acuíferos fracturados de los EUA. No obstante que los formatos obtenidos para los perímetros de protección fueron similares, el tiempo de tránsito resultante en el caso del *modelo numérico de flujo* alcanzó un orden de magnitud mayor en comparación con el obtenido por el método *analítico*, debido a que este último no tiene en cuenta la fracturación del medio. El método de *mapeo hidrogeológico* dio áreas hasta un 100% mayores que el *numérico* y hasta un 200% superiores al usar el *analítico*. En la ciudad de Sao José dos Campos, Brasil, Hirata, (1994) obtuvo resultados aún más distantes entre sí. El autor identificó, entre otros problemas, el efecto de la recarga en la zona de captura del pozo como uno de los factores responsables.

Los resultados alcanzados en las investigaciones comentadas, permiten subrayar, la alta complejidad que existe a la hora de calcular correctamente los PPP y la imposibilidad real de eliminar todas las incertidumbres que se deriven de estos cálculos.

2.3.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE DELIMITACIÓN DEL PERÍMETRO

En el apartado 2.2.1 se presentaron los criterios que permiten dimensionar los perímetros de protección. Su correcta elección reviste una especial importancia pues determinará, de forma substancial, las características espaciales del perímetro. La selección del método requiere tanto de consideraciones de carácter técnico y económico, como de la evaluación del impacto social que supondrá la implantación del perímetro.

Se relacionan en el cuadro 2.4 algunos de los métodos más usados para la delimitación de perímetros, junto a los criterios que en ellos se aplican. Además, en el tipo de materiales se analiza la adecuación de cada uno de éstos a las características del acuífero (medios porosos y asimilables o fisurados).

Se aprecia, como todos los métodos son aplicables sobre medios porosos y asimilables (el de Bolsenkotter no es más que una adaptación del de Rehse, a materiales kársticos o fisurados) (López et al., 1996) y es, sin embargo, reducido el número de los que pueden ser aplicados en acuíferos kársticos o fisurados (sensu stricto).

Teniendo en cuenta entonces, la importancia que tiene el medio donde se desarrollan los acuíferos en la delimitación de los perímetros, vale hacer algunas consideraciones respecto a los acuíferos en materiales carbonatados.

Los estudios, y sobre todo la explotación de los acuíferos existentes en dichos materiales, resulta imprecisa (López et al., 1996), debido a que se engloban acuíferos muy dispares en su comportamiento, existiendo una gradación con numerosos estados intermedios entre aquellos que funcionan de una manera similar a los acuíferos en medios porosos, en los cuales puede aplicarse la ley de Darcy, hasta aquellos en los que el agua circula por una auténtica red hidrográfica subterránea.

Cuadro 2.4. Criterio empleado por diferentes métodos de delimitación del perímetro de protección

Método/Criterio		Distancia	Descenso	Tiempo de tránsito	Criterios hidrogeológicos	Poder autodepurador	Tipo de materiales		
							Porosos y asimilables	Kársticos y Fisurados (sensu stricto)	
Radio fijo arbitrario		***					***	***	
Radio fijo calculado	En función del tiempo			***			***		
	En función del descenso		***				***	***	
Catálogo de formas simples			***	***			***		
Métodos analíticos	Propiamente analíticos	Hoffman y Lillich		***	***		***		
		Wyssling		***	***		***		
	Gráficos	Sauty y Tyeri			***			***	
		Jacobs y Bear			***			***	
		Waegningh			***			***	
		Pettyjon			***			***	
Mapeo hidrogeológico					***		***	***	
Modelos numéricos			***	***	***		***	***	
Otros métodos y técnicas complementarias	Rehse					***	***		
	Bolsenkotter					***		***	
	Trazadores				***	***	***	***	***
	Tritio				***		***	***	***

Fuente: Modificado de Moreno y Martínez, (1991)

El diferente funcionamiento observado en los acuíferos existentes en materiales carbonatados se debe a las variaciones en la estructura del medio acuífero, su régimen hidráulico y la capacidad de almacenamiento de agua, por lo que el análisis minucioso de dichos aspectos será por tanto básico para la elección de la metodología de estudio que debe aplicarse.

Según, Bradbury et al., (1991) en una primera aproximación a estos acuíferos, puede aceptarse que:

- a) Existen medios con una saturación general en los cuales la fisuración, la microfisuración y la eventual porosidad intergranular cumplen a la vez las funciones de almacenamiento y conducción, siendo perfectamente continuos desde el punto de vista hidráulico, por lo que pueden ser asimilables a un medio poroso.
- b) Medios en los que el almacenamiento en la matriz rocosa es prácticamente inexistente, carecen de continuidad hidráulica y de saturación general. En estas el agua procedente de la recarga circula por una red hidrográfica bien jerarquizada que se establece en el macizo rocoso (kársticos sensu stricto).
- c) Por último, existen otros medios intermedios en los que las microfisuras, porosidad intergranular, etc., tienen funciones de almacenamiento mientras que el drenaje se realiza a través de conductos (fracturas, discontinuidades ensanchadas, juntas de estratificación, contactos erosionales, etc.).

Los medios señalados constituyen en cierta manera los dos grandes grupos de acuíferos en rocas carbonatadas descritos en la literatura anglosajona, es decir, los sistemas de flujo difuso y los sistemas de flujo por conductos, con una frontera no definida sino gradual.

Recientemente se han aplicado los métodos de Wyssling, y Jacobs y Bear en acuíferos calizos del levante español, comprobándose mediante estudios complementarios la idoneidad de los perímetros definidos (López et al.,1996).

La aplicabilidad de los métodos inicialmente desarrollados para medios porosos a determinados acuíferos carbonatados (acuíferos de flujo difuso), con garantía de proteger adecuadamente el recurso hídrico, se han puesto de manifiesto en la determinación de diversos

perímetros de protección en calizas en el sur de Inglaterra, empleando el catálogo de formas simples con resultados satisfactorios (Hirata y Reboucas, 1999).

2.3.3. CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y ECONÓMICAS QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE DELIMITACIÓN DEL PERÍMETRO

En el cuadro 2.5, se ha reflejado la relación existente entre los diferentes métodos y algunas consideraciones técnicas como son:

- La facilidad de aplicación. Se ha tenido en cuenta tanto la necesidad de contar con técnicos especialistas, como de apoyo informático, cantidad de datos requeridos, etc.
- Complejidad de los datos requeridos. Evaluando si es posible obtener los datos de un estudio hidrogeológico general, de una base de datos o de estudios preexistentes o es necesario realizar ensayos de bombeo, campañas piezométricas o de muestreo, etc.
- Adaptabilidad al modelo hidrogeológico regional, es decir, hasta que nivel el método empleado considera la singularidad de cada caso adaptándose a él, explicando cualquier hecho particular que pudiera surgir, o si es generalizable o extrapolable a otros casos similares.
- Precisión. ¿En qué medida el perímetro que se obtiene se ajusta al ideal?; si, por ejemplo, se utiliza un criterio de tiempo calculando una isocrona determinada ¿qué tanto por ciento del área encerrada en la isocrona calculada lo estaría en la isocrona real?.

Para poder evaluar correctamente la precisión que tienen los distintos métodos es muy importante compararlos con algún caso, en el que la abundancia de información sobre los parámetros hidrogeológicos permitan aplicar aquellos de los que se tiene certeza de su elevada precisión.

Se trataría de considerar estos métodos técnicamente confiables, como podría ser la utilización de modelos numéricos en algunos casos, como patrón, analizando las diferencias que respecto a este presentan los otros.

Cuadro. 2.5. Selección del método sobre la base de consideraciones técnicas

Métodos	Facilidad de aplicación	Complejidad de los datos requeridos	Adaptabilidad al modelo Hidrogeológico regional	Precisión
Radio fijo arbitrario	Alta	Baja	Baja	Baja
Radio fijo calculado	Alta	Baja	Media/Baja	1 Media/Alta 2 Baja
Catálogo de formas simples	Alta	Media	Media	Media
Métodos analíticos	Media	Media	Media	1 Alta 2 Media
Mapeo hidrogeológico	Baja	Media/Alta	Alta	1 Media/Baja 2 Media/Alta
Modelos numéricos	Baja	Alta	Alta	Alta

1 Gradiente hidráulico bajo y/o sin límites de flujo cercanos a la captación

2 Gradiente hidráulico alto y/o límites cercanos a la captación

Fuente: Modificado de Moreno y Martínez, (1991)

El perímetro de protección propuesto sobre la base de la aplicación del método elegido debe ser defendible; es decir, que proponga proteger áreas con límites claramente definidos sobre la base de sólidos argumentos científicos, lo que dificultará las posibles acciones legales que pudieran plantear los afectados.

A este respecto, los métodos de mayor complejidad técnica, como es el caso de los modelos numéricos, conllevan a un mayor costo de ejecución, pero los resultados que se obtienen de estos son más fiables y por tanto será más difícil que prosperen los recursos que puedan plantearse, que en el caso de aquellos de muy bajo costo pero de menor rigor científico como el empleo del radio fijo.

Los resultados obtenidos por los métodos menos costosos, podrían obligar a realizar expropiaciones en zonas en las que no sería necesario hacerlo, quedando otras que si debiesen protegerse fuera del perímetro o dar lugar a perímetros sobredimensionados que, si bien garantizarán la protección requerida, incrementaría notablemente los costos de su aplicación.

En cuanto a las consideraciones económicas hay que decir que es extremadamente difícil de cuantificar, de un modo general, el costo total que supone la realización de un perímetro de

protección, puesto que los trabajos que deberán ejecutarse y la repercusión socioeconómica que implicarán, son extraordinariamente variables.

Lo que sí se ha demostrado con claridad, es que es mucho más barato implementar los perímetros de protección de calidad, que enfrentarse a la descontaminación de un acuífero. Según Oregon Health Division, (1996), la experiencia de cientos de perímetros en EUA ha demostrado que el costo de implementación de un perímetro es muy variable, desde menos de 1000 dólares en algunos casos, hasta aproximadamente 20 000 dólares, mientras que el costo de investigar y descontaminar el agua subterránea en un acuífero simple, es al menos de 500 000 dólares.

El importe total de la implementación de un perímetro de protección puede dividirse en dos apartados:

a) Costos de la determinación del perímetro según los diferentes métodos.

En este apartado se tiene en cuenta el costo relacionado con los trabajos de obtención de los datos necesarios, como con el de gabinete.

b) Impacto socioeconómico de la aplicación del perímetro de protección.

En este apartado se tiene en cuenta dos tipos de costos:

1. Costo técnico objetivo

Es el derivado de la aplicación del perímetro e independiente de las características socioeconómicas del lugar donde se vaya a implantar, básicamente consiste en la obra e instalaciones en la captación, acondicionamiento de la zona inmediata o de protecciones absolutas, instalación de sistemas automatizados de control, etc.

2. Costo variable

Es producto de las posibles restricciones impuestas a la actividad socioeconómica sobre cada una de las áreas del perímetro, de donde se derivarán costos extraordinariamente variables en los cuales se engloban:

- Modificación del uso del suelo
- Expropiaciones, indemnizaciones
- Modificaciones de obras civiles
- Modificación/traslado de actividades potencialmente contaminantes (industriales, agrícolas, ganaderas, etc.)

Si, sobre la base de las consideraciones efectuadas previamente se determinase que el costo final de aplicación del perímetro de protección propuesto, fuese demasiado elevado y existieran indicios de que éste pudiera estar sobredimensionado, cabría la posibilidad de recurrir a aplicar otros métodos más exactos, recurriéndose normalmente al empleo de modelos numéricos (López et al., 1996).

En esta elección se asume que el incremento en el costo de definición quedará compensado al reducir el área a expropiar a la estrictamente necesaria, lo que en ocasiones puede suponer un ahorro considerable.

2.4. PROTECCIÓN DE LA CANTIDAD

Como se ha analizado (cuadro 2.3), la gran mayoría de los países no contempla en el perímetro de protección la protección de la cantidad, sólo España, tanto para las aguas de abastecimiento público (RDPH. Art. 173.1), como para las aguas minerales (RLM^e. Art. 41) y Cuba para las aguas minerales (RLM^c. Art. 57), tienen legislados la protección de la calidad y cantidad dentro del perímetro.

La delimitación de una "zona de protección de cantidad" tiene como objetivo impedir el descenso sostenido del nivel piezométrico o la disminución del caudal captado como consecuencia de una eventual afección provocada por posteriores captaciones en el mismo acuífero u obras de cualquier tipo que afecten a los caudales extraídos (López et al., 1996).

Cuando se pretende analizar las variaciones del caudal captado, debidas a otras captaciones; en primer lugar debe comprobarse que el caudal de extracción que se pretende garantizar sea compatible con los recursos del acuífero captado.

Para esto, hay que realizar balances hidrogeológicos detallados del área de estudio. Cuando sea posible se emplearán modelos matemáticos, lo que permitirá evaluar las modificaciones que se producirían en función de variaciones de cualquiera de los términos que intervienen en el balance.

Una vez comprobado que pueden obtenerse del acuífero los volúmenes requeridos debe analizarse si puede existir la posibilidad de afección por otras captaciones.

El problema que suele plantearse es que la distribución de las captaciones no es homogénea por lo que podrían producirse afecciones entre ellas, aunque el volumen total no supere a los recursos medios renovables del acuífero.

Los estudios necesarios para evaluar la posible afección entre diversas captaciones, y poder definir las regulaciones precisas en una zona, para garantizar el volumen extraído en la captación objeto de análisis, serán de diferente índole en cada caso, obteniéndose zonas de protección de la cantidad, de extensión muy variable.

En el caso de que el sondeo que se pretende proteger capte un acuífero en el cual las extracciones sean superiores o similares a los recursos, las restricciones a las extracciones podrán afectar a la totalidad del acuífero. No obstante, en la mayoría de los casos su extensión será mucho menor.

Para definir una zona de protección de cantidad, debe realizarse en primer lugar, y a todos los casos, un análisis hidrogeológico de detalle. Este permitirá estimar la posible interrelación entre diferentes captaciones, siendo en muchos casos el único método que podrá emplearse.

En este sentido, según Moreno y Martínez, (1991), si el análisis de un acuífero permite:

- Comportamiento local
- Tratamiento homogéneo e isotrópico
- Explotación y/o drenaje simple
- Geometría sin complicaciones

Los modelos analíticos (integración de las ecuaciones diferenciales del flujo más la teoría de las imágenes) dan una aproximación suficiente.

Si por el contrario, el acuífero no puede ser caracterizado de esa forma, tal y como sucede en la inmensa mayoría de los acuíferos, los modelos matemáticos son la única solución disponible actualmente.

En este sentido, el empleo de modelos matemáticos de flujo adquiere una gran importancia en la simulación de diferentes hipótesis de extracción de aguas subterráneas obteniendo los efectos en el acuífero. Esto nos permitirá evaluar las interrelaciones existentes entre los diferentes aprovechamientos y la influencia que tendría en su área determinada la puesta en funcionamiento de nuevas captaciones, definiendo sobre la base de esto, el área de protección y las restricciones adecuadas a cada caso.

2.5. PECULIARIDADES DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LAS AGUAS MINERALES

Según lo analizado hasta este apartado, se ha comprobado que numerosos investigadores, han publicado trabajos orientados a aumentar la exactitud de la delimitación de los perímetros de protección.

Es lógico que siendo *las aguas minerales* tan subterráneas como las demás y no habiéndose publicado prácticamente nada sobre el tema, se haya intentado aplicarles tales normas y técnicas, directamente, sin apenas adaptación. Sin embargo, son varias las circunstancias de carácter técnico-sanitario, económico, industrial y, en ocasiones, hasta puramente hidrogeológico, que obligan a dar un tratamiento especialmente exigente o "conservador" a la protección de las *aguas minerales*, comparado con el que existe un cierto consenso en dar al común de las aguas subterráneas, esto es:

- La preservación de la calidad microbiológica del agua subterránea captada para un abastecimiento público, cuenta como recurso de aplicación ya casi sistemática y generalizada con el tratamiento químico (cloración, generalmente), posibilidad que está normativamente vedada a las *aguas minerales* (RTS. Art. 22.4, y NC. 2: 1996. Art. 4.1).

- Ante un supuesto de contaminación química, la posibilidad de atenuarla por dilución en una mezcla con otras fuentes de suministro incorporables a la misma red de distribución podría ser factible en el caso de un abastecimiento público, nunca en un aprovechamiento de *agua mineral* (RTS. Art. 22.4, NC. 2: 1996. Art. 4.1).
- Una contaminación microbiológica y/o química en una captación de *agua mineral* (que no hubiese sido detectada a pesar de los previstos autocontroles diarios) podría tener consecuencias económicas y comerciales muy costosas, sino irreversibles.

2.6. LA PROTECCIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA DE LAS AGUAS MINERALES

Existe entre los hidrogeólogos que suelen ocuparse de la evaluación y preservación de las aguas minerales, una cierta tendencia a englobar los dos objetivos de los perímetros de protección, el cuantitativo y el cualitativo, cuando no ha ignorar el primero de ellos. Y sin embargo, la realidad a este respecto no justifica en absoluto tal actitud (López, 1992):

- Por una parte, las reclamaciones por afecciones cuantitativas recíprocas, que desde el pasado han dado lugar a frecuentes litigios entre utilizadores de agua subterránea, son también las que ocasionan actualmente una mayor conflictividad administrativa y judicial entre titulares de concesiones de *aguas minerales* o entre éstos y otros usuarios de aguas subterráneas.
- Por otro lado, desde un punto de vista puramente técnico, aunque los condicionantes hidrogeológicos (litología, estructura y geometría del correspondiente acuífero) e hidrodinámicos (magnitudes hidrodinámicas, condiciones de fronteras y leyes del flujo subterráneo) son comunes a la propagación de ambos tipos de afecciones, en la de tipo cualitativo intervienen además complejos mecanismos de transporte de masa ligados a fenómenos de advección, dispersión, difusión, adsorción-desorción, etc.
- Finalmente, son frecuentes en la realidad, las condiciones de captación de *aguas minerales*, que resultan prácticamente invulnerables a una contaminación de origen exterior al aprovechamiento, en las que, no obstante, sí resulta factible una afección de

tipo cuantitativo, es difícil imaginar el contexto hidrogeológico en el que pudiese darse la situación inversa.

A modo de resumen de este subcapítulo, se definen algunas cuestiones:

- El diseño del perímetro de protección para las *aguas minerales*, sólo puede ser el resultado de un trabajo de investigación y evaluación estrechamente apoyado en el terreno, para lo cual, evidentemente, resulta imposible fijar un "manual de procedimiento", ya que cada situación será un caso aparte, no abordable desde la rutina o la rigidez.
- La complejidad y multiplicidad de intereses que confluyen en el aprovechamiento y protección de las *aguas minerales* hacen que resulte particularmente conveniente que, incluso en la discusión de un tema tan "técnico" como la delimitación de perímetros, intervengan representantes de los otros sectores implicados: médicos, hidrólogos, empresarios, administración minera, gobiernos, etc. Y es que la protección de este especial e importante tipo de aguas subterráneas, resulta demasiado importante para dejarlo sólo en las manos de los hidrogeólogos.
- Debido a la importancia extrema de este tipo de recurso mineral, se hace necesario utilizar las técnicas más modernas en la delimitación de los perímetros de protección, tanto más, conociendo que la realidad existente en nuestro país no resulta particularmente tranquilizadora, ya que por su antigüedad o por diversas razones, buena parte de los perímetros de que están dotados los yacimientos de *aguas minerales* en nuestro país, no aseguran de forma satisfactoria la protección que debieran.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. UBICACIÓN, CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y ECONÓMICAS DE LA ZONA

La zona de los trabajos se encuentra ubicada en la parte central de la República de Cuba, en el municipio Camajuaní, perteneciente a la provincia de Villa Clara (figura 3.1).

El relieve es ondulado, las alturas máximas alcanzan los 180 m, y se localizan en el parteaguas de la zona, con el cual se ha hecho coincidir la frontera sudoeste del área de estudio (figura 3.2).

El clima es tropical marítimo. Se observan dos ciclos claramente diferenciados, uno relativamente fresco y otro más cálido y húmedo. Las temperaturas oscilan desde 20 a 25 °C, llegando en ocasiones a 27 °C y más, siendo la temperatura promedio de 24.7 °C. Se han registrado máximas absolutas de 40 °C y mínimas de 5 °C.

El régimen de lluvias está bien diferenciado en dos estaciones, una lluviosa, de mayo a octubre y otra seca, de noviembre a abril. Durante el período seco la cantidad de lluvia es relativamente constante 400-500 mm, lo que representa el 25-35 % del volumen anual de lluvias. Durante el período húmedo las precipitaciones alcanzan los 1000 mm. La mayor cantidad de precipitaciones coincide con los meses de mayo, septiembre y octubre (*Expósito, 1993*).

Figura 3.1. Situación geográfica. Límites de la Provincia Villa Clara y ubicación de la zona de estudio.

La economía de la zona depende de la agricultura, principalmente de la industria azucarera y de los cultivos varios.

3.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

La zona de los trabajos se ubica en la zona estructuro-facial Camajuaní (Vasielivich, 1989). A esta zona pertenecen los sedimentos carbonatados de las formaciones (Fm) Margarita (Barresiano-Hauteriviano) y Vega, de edad Paleógeno.

Fm. Margarita, K₁ 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 que sea de unos 200-250 m.

Su distribución en el área de los trabajos se observa en el extremo sureste y en forma de una franja de unos 2000-2200 m de ancho, que va del noreste al suroeste, y en la cual se ubica el área de estudio (figura 3.2).

Fm. Vega, P₁-P₂ vga.

Está representada por brechas carbonatadas, calizas, areniscas, margas y arcillas. El volumen fundamental de la formación está constituida por una brecha compacta carbonatada, bien consolidada, conocida con el nombre de brecha "Sagua". El espesor se estima en unos 500 m.

Esta formación se encuentra localizada en el noroeste y sureste de la región (figura 3.2).

Figura 3.2. Mapa geológico esquemático de la zona de los trabajos y su corte por la línea A-A' (Expósito, 1993).

3.3. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

En la zona de los trabajos se localizan dos acuíferos; el acuífero Vega y el acuífero Margarita.

Acuífero Vega, P_1 - P_2 vga.

Se desarrolla en las brechas carbonatadas, calizas, margas y conglomerados de la formación Vega (figura 3.2). Las aguas de este acuífero circulan principalmente por fisuras, son dulces, sin presión, con una mineralización que oscila entre 0.5 y 0.8 g/l y de composición bicarbonatada cálcica.

La acuosidad de este acuífero es generalmente baja, con valores de trasmisibilidad que oscilan entre 1-150 m²/d (Expósito, 1993). Su alimentación depende de las precipitaciones atmosféricas y del aporte del acuífero Margarita.

Acuífero Margarita, K_1 mrg.

Este acuífero se desarrolla en las calizas de la formación Margarita. Es el acuífero de mayor interés de la zona, localizada en él, se ubica el área de estudio (figura 3.3), objeto de las investigaciones que se realizaron en esta tesis.

Las aguas de este acuífero circulan preferentemente por fisuras, son dulces, sin presión, con una mineralización de 0.4 a 0.6 g/l y de composición bicarbonatada-cálcica.

La acuosidad de este acuífero es más alta que la del acuífero Vega, esto está dado por el mayor grado de agrietamiento de las calizas del acuífero Margarita que el de las brechas compactas del acuífero Vega.

Según los trabajos experimentales realizadas en el pozo PH-1, y en perfecta concordancia con las características hidráulicas de este tipo de acuífero, se pudo 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.

Este acuífero no cuenta con una cubierta impermeable, por lo que su alimentación fundamental procede de las precipitaciones atmosféricas.

Figura 3.3. Mapa hidrogeológico esquemático de la zona de los trabajos (Expósito, 1993).

3.4. SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La selección del área de estudio se basó, en la necesidad urgente de proteger, de la mejor forma posible, el pozo de agua mineral que en esta se ubica, debido a la importancia estratégica que tendrá en el desarrollo turístico de la costa norte Villaclareña. Esto se debe a la calidad del agua mineral, a su cercanía con el lugar de destino, y a la demanda creciente de este tipo de aguas por parte de los turistas que visitan el lugar.

En la selección de las dimensiones se tuvo en cuenta cual era la máxima área disponible a los alrededores del pozo, ya que los terrenos contiguos están en manos de otras instituciones, las cuales no permiten la puesta en explotación de ningún otro pozo. Además, es necesario señalar, que como producto de diferentes investigaciones realizadas en el lugar, se cuenta con la información necesaria para concretar la presente investigación.

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE POZOS EN EL ACUÍFERO MARGARITA

4.1. INTRODUCCIÓN

La delimitación del perímetro de protección alrededor de una o varias captaciones de agua subterránea, es la fase más importante del programa de implementación de perímetros de protección de pozos. No obstante, para proceder a la selección del método, o los métodos que se utilizarán en los cálculos, se necesita conocer si se cuenta con toda la información necesaria, y si ésta tiene la confiabilidad requerida.

En el caso analizado, producto de los trabajos geológicos, geofísicos e hidrogeológicos realizados en el área de estudio (Expósito, 1993), se cuenta con la información necesaria, y con la calidad adecuada para la toma de decisiones técnicas y/o administrativas sobre el terreno.

En el marco de este trabajo, la principal decisión técnica fue la selección adecuada del método, o de los métodos de delimitación del perímetro de protección. Conociendo, entonces, que se cuenta con la información necesaria para la utilización de los métodos más exactos, que la captación de agua mineral a proteger tiene una gran importancia económica para el país y que el entorno socioeconómico es complejo, se llegó a la conclusión de que los métodos indicados son, en primer lugar, los modelos numéricos y, en segundo lugar, el analítico.

La selección del método de los modelos numéricos se basó en que este método es uno de los más exactos de los existentes en la delimitación de los perímetros de protección de pozos, más si estos perímetros tienen como objetivo la protección cualitativa y cuantitativa de las aguas subterráneas (apartados 2.2.4.1 y 2.3). Sin embargo, en el marco de esta investigación, fue de gran importancia, determinar, además el perímetro de protección mediante el método analítico, y realizar la comparación de sus resultados con los obtenidos mediante los modelos numéricos.

Lo anteriormente expuesto, tiene su base en el hecho, de que, la gran mayoría de los perímetros de protección de pozos delimitados en Cuba, tanto para las aguas subterráneas de abastecimiento público como para las minerales, se han calculado sobre la base del método analítico y, específicamente, por las variantes de Minkin (Oradoskaia y Lapchin, 1987), González y Hecheverría (NC 93-01-209), o por las modificaciones realizadas a este último método por Pérez et al., (1998).

Por lo tanto, la oportunidad de utilizar por primera vez en el país los modelos numéricos para este fin, y comparar los resultados obtenidos por ambos métodos, nos permitirá, no sólo conocer de las limitaciones del método analítico y, por consiguiente, de las deficiencias que pudiesen existir en nuestros perímetros establecidos, sino además considerar la utilización de los modelos numéricos para este fin, como una herramienta imprescindible en muchas de las captaciones de agua subterránea del país.

En el caso analizado, el perímetro de protección será dividido en 3 zonas. La primera no necesariamente se calcula (NC 93-01-209), por lo tanto será determinada de forma arbitraria, asignándose un valor de un radio de 30 m por ser un acuífero libre no kárstico (cuadro 2.1). El cálculo de las zonas restantes (II y III), será tratado en los próximos apartados. Se utilizará primero los modelos numéricos y posteriormente el método analítico.

4.2. CÁLCULO DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE POZOS MEDIANTE EL MODELO NUMÉRICO VisualMODFLOW

4.2.1. INTRODUCCIÓN

La modelación numérica es considerada la herramienta que mayor exactitud puede brindar en la delimitación de los perímetros de protección de pozos, esto se debe, principalmente, a que tienen en cuenta una mayor cantidad de datos que los demás métodos (USEPA,1993); por tal motivo, y con vistas a delimitar, con la mayor exactitud posible, los perímetros de protección de pozos, se han desarrollado diferentes modelos para este fin.

Esto ha llevado a que, numerosos autores, tales como Forster et al., (1997), Livingstone et al., (1996), Barlow, (1994), Kinselbach et al., (1992), Bair y Roadcap, (1992) y Springer y Bair, (1992), hayan realizado comparaciones entre los resultados obtenidos en el uso de diferentes modelos, con el objetivo de determinar cual o cuales de ellos serian más recomendables para su utilización. Los investigadores señalados, en base a exactitud, facilidad de manejo, versatilidad y características de la interfase gráfica, coincidieron en que el modelo que más ventajas presenta es el modelo numérico VisualMODFLOW, de la Waterloo Hydrogeologic, Inc. Canadá.

Dentro de las herramientas que contiene el modelo VisualMODFLOW se encuentra el 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 delante (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 de agua mineral ubicado en el área de estudio, objetivo principal del presente trabajo.

En relación con lo planteado, y con vistas a obtener una modelación numérica lo más representativa posible, fácil de implementar y que permita obtener mejores resultados en la delimitación del perímetro de protección de pozos, en el presente trabajo se utilizó la última versión del modelo numérico VisualMODFLOW, la 2.8.2.52 del año 2000. Los pasos principales, utilizados para llevar a cabo la modelación numérica, se presentan en la figura 4.1

Figura 4.1. Pasos utilizados en la modelación numérica.

4.2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

4.2.2.1. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL Y MODELACIÓN DEL FLUJO

El modelo conceptual de funcionamiento de los acuíferos en una región dada, es la base y sustento de su modelación numérica; en consecuencia, es de fundamental importancia la precisión y claridad con que sea formulado. A medida en que la calidad del modelo conceptual sea mejor, será más fácil la implementación del modelo numérico.

Por esta razón, se utilizó toda la información hidrogeológica disponible, con el propósito de lograr la mayor exactitud posible en la exposición del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del área de estudio. Dentro de ese contexto, la información básica para el desarrollo del modelo conceptual es la que se describe a continuación:

- a) **Identificación del dominio del modelo.** El área del modelo se estableció para una superficie compuesta por un rectángulo con dimensiones de 3000 por 1500 m, obteniéndose una superficie total de 4.5 km^2 , la cual cubre de manera adecuada el dominio de interés (figura 4.2).

- b) **Diseño de la malla del modelo para establecer una discretización espacial.** El establecimiento de una malla del modelo uniforme proporcionará estabilidad en la realización de las diferentes corridas por efectuar. La malla en el modelo VisualMODFLOW proporciona un análisis gráfico para su diseño. Debido a que el modelo VisualMODFLOW utiliza para la solución un método de diferencias finitas, es recomendable establecer un refinamiento lo más uniforme posible, que redunde en estabilidad y convergencia de resultados. La malla conformada para el presente estudio puede verse en la figura 4.2.

Se observa un refinamiento en la parte central del área de estudio, el cual se ha hecho coincidir con la región de mayor interés, detectando de forma adecuada variaciones locales de las características del medio hidrogeológico. La malla primaria generó celdas de 30x30 m, mientras que la malla refinada generó celdas de 15x15 m.

Figura 4.2. Área modelada, malla y fronteras utilizadas en la modelación. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

Dentro de la malla del modelo, se debe considerar información básica que se correlacionará de manera directa en el diseño del modelo. Esta información es la siguiente:

Discretización vertical. Se define determinando la elevación del suelo y la topografía del lugar, por medio del establecimiento de los espesores de las diferentes capas estratigráficas presentes en el área. Para el caso del área de estudio, se considera formado por dos acuíferos de tipo libre, uno caracterizado por dos capas y otro caracterizado por tres capas de acuerdo a sus propiedades hidrodinámicas (figura 4.3).

Características geológicas e hidrogeológicas. Se integrara en el dominio del modelo las características geológicas e hidrogeológicas representadas en las figuras 3.2 y 3.3 respectivamente, y comentadas en los apartados 3.2 y 3.3. La síntesis de los parámetros hidrogeológicos incorporados al modelo pueden verse en el cuadro 4.1.

La información utilizada es producto de las investigaciones de campo realizadas en 1993, en el marco de la exploración de nuevas fuentes de aguas subterráneas en el norte de las provincias centrales de la República de Cuba, con vistas a su comercialización como agua embotellada (Expósito, 1993). La información disponible fue obtenida para determinados puntos del área de estudio, por lo que tuvo que generalizarse para todo el ámbito modelado.

Definición de celdas activas y celdas inactivas. Las celdas activas así como las celdas inactivas, son consideradas como aquellas que se encuentran situadas dentro del ámbito que comprende el área de estudio, están determinadas en el espacio por la discretización espacial y vertical del área. Sin embargo, las celdas inactivas presentan la característica de tener piezometría nula o con un valor de cero, o por estar fuera de la zona de interés del modelo. Para el caso de las celdas activas, es necesario especificar y establecer la carga o cota piezométrica a que se encuentran sujetas.

Figura 4.3. Modelo conceptual del área de estudio

Cuadro 4.1. Parámetros de las capas en las que se basó la simulación del flujo

Parámetros	Capas utilizadas											
	1		2		3		4		5			6
	PO	PU	PO	PU	PO	PU	PO	PU	PO	PU		
Recarga (mm)	450	480	-	-	450	480	-	-	-	-		
K _{xx} (m/d)	0.4	0.4	0.01	0.01	8	6	4	3	0.4	0.4	Considerada impermeable	
K _{yy} (m/d)	0.4	0.4	0.01	0.01	8	6	4	3	0.4	0.4		
K _{zz} (m/d)	0.04	0.04	0.001	0.001	0.6	0.6	0.3	0.3	0.04	0.04		
Sy	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.08	0.08	0.08	0.05	0.05		
Porosidad efectiva	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.08	0.08	0.08	0.05	0.05		

PO = Parámetro original

PU = Parámetro utilizado en la modelación

K = Conductividad hidráulica

Sy = Almacenamiento específico

Condiciones de borde. En el área modelada se utilizaron dos condiciones de borde (o de fronteras), carga constante (carga específica, condición tipo 1 o de Dirichlet), para las fronteras noreste y noroeste del área de estudio, y borde (o frontera) de flujo cero (flujo establecido, condición tipo 2 o de Neuman), para las fronteras suroeste y sureste del área de estudio (figura 4.2).

Una vez construido el modelo conceptual e introducido todos sus elementos en el módulo de entrada del modelo numérico VisualMODFLOW, se procede a simular el flujo de agua subterránea

4.2.2.2. CALIBRACIÓN

El siguiente paso en el proceso de modelación ha sido la calibración o, lo que es lo mismo, la comprobación de la validez de los datos de entrada al modelo contrastando dicha información con la evolución piezométrica en el acuífero, o comparando los abatimientos simulados en los pozos de extracción con los obtenidos en condiciones reales bajo las mismas condiciones.

En este sentido, los valores calculados por el modelo se han ajustado progresivamente a los valores reales mediante sucesivas modificaciones de las hipótesis de partida, básicamente los valores de la conductividad hidráulica y la recarga (cuadro 4.1), así como el espesor de las capas del modelo conceptual. La calibración se dio por terminada después de un cierto número de simulaciones, toda vez que se alcanzó una coherencia aceptable entre las diferentes

variables y tras verificar sus consistencias con relación a los niveles de los pozos ubicados en el área, lo que permitió obtener finalmente un modelo numérico capaz de reproducir de manera correcta la variabilidad y las respuestas del sistema frente a diferentes solicitaciones externas.

Los resultados de la calibración pueden verse en el cuadro 4.2, en el se representa, la comparación entre los niveles piezométricos promedio de los pozos del área para el período seco, con los simulados por el modelo, para el mismo periodo. Es necesario destacar que a pesar de la buena correspondencia entre las variables comparadas, esto no significó que la interpretación realizada para la confección del nivel freático del área, durante las campañas de campo en 1993 (Expósito, 1993), coincida con la generada por la modelación numérica (figura 4.4). Esto se debe a que el análisis de campo realizado no tuvo en cuenta las diferencias significativas en las propiedades hidráulicas de los diferentes acuíferos, y que no se contó con la suficiente cantidad de pozos de observación.

Las consecuencias de estas diferencias en las delimitaciones del perímetro de protección del pozo objeto de estudio, se analizarán en el apartado 4.3.

Cuadro 4.2. Resultados de la calibración obtenida

Pozos	Calibración por piezometría		Calibración por abatimientos (Δh)			
	Piezometría observada (m.s.n.m.)	Piezometría calculada (m.s.n.m.)	Bombeo de 0-30 m		Bombeo de 70-95 m	
			(Δh) real (m)	(Δh) simulado (m)	(Δh) real (m)	(Δh) 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				

Figura 4.4. Comparación entre la piezometría obtenida por la modelación y la interpretación manual de las observaciones de campo. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

4.2.3. SIMULACIÓN DE POSIBLES ESCENARIOS EN LA DELIMITACIÓN DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE CALIDAD ALREDEDOR DEL POZO DE AGUA MINERAL PH-1

El pozo PH-1, perforado con el objetivo de investigar las aguas subterráneas del área, tiene una profundidad de 95 m, y fue investigado detalladamente (métodos geofísicos de pozos, trazadores y bombeos) en tres intervalos de acuerdo a sus propiedades de filtración; de 3 a 30 m, de 31 a 70 m y de 71 a 95 m. Los tres intervalos presentaron condiciones aceptables para su explotación.

En tal sentido, antes de la construcción del pozo de explotación definitivo en el mismo lugar que el PH-1, será necesario definir la profundidad que tendrá, la cual entre otras cosas, estará en función de los costos de perforación y de las dimensiones que alcanzaría el perímetro de protección propuesto, en relación a las diferentes profundidades que el pozo pudiese alcanzar o a su intervalo abierto.

De lo anteriormente planteado se deduce que, las combinaciones posibles de explotación del pozo PH-1, entre las profundidades que podría ser perforado y sus intervalos abiertos, serían tantas que es imposible en este trabajo pretender simular todas. Por tal motivo se escogieron, con base en las construcciones de pozos más comunes en la región, 4 escenarios; con el pozo abierto de 3 a 30 m, con el pozo abierto de 3 a 70 m, con el pozo abierto de 3 a 95 m, y con el pozo abierto en el intervalo de 30 a 95 m. La última simulación se realizó con el objetivo de cuantificar la protección complementaria que significaría en las aguas extraídas, el entubamiento del pozo hasta los 30 m.

Sin embargo, antes de proceder a delimitar definitivamente el perímetro de protección alrededor del pozo PH-1, de acuerdo a los escenarios establecidos, fue necesario analizar si las dimensiones y dirección de dicho perímetro, pudiesen cambiar de acuerdo con las variaciones anuales de la recarga, teniendo en cuenta que, es precisamente la recarga, en las condiciones del área de estudio, uno de los factores de mayor importancia (Lerner, 1992). Por tal motivo, se compararon previamente los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con el pozo abierto hasta 30 m, para una recarga de 600 mm (año húmedo) y 480 mm (año seco), de

acuerdo a los datos climatológicos disponibles en el área para los años 1978 - 1988 (Oliva et al., 1989).

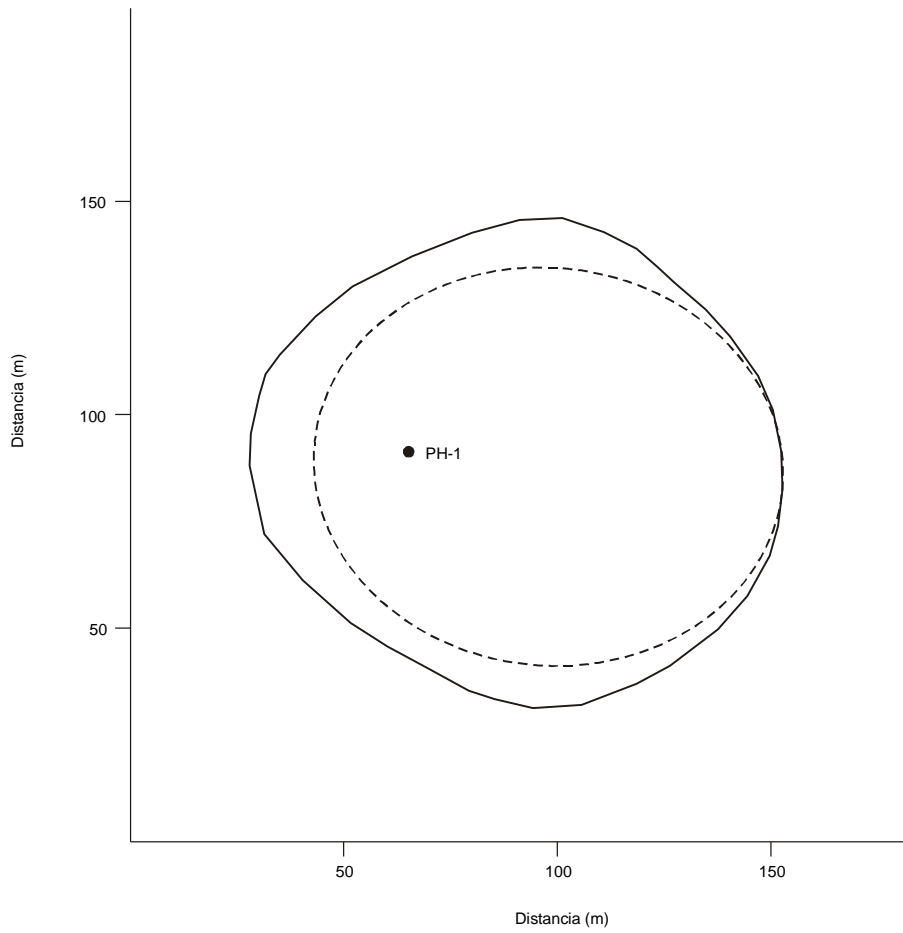
Los resultados presentados en las figuras 4.5 y 4.6 demuestran que la dirección simulada del flujo subterráneo no depende de la recarga, pero las dimensiones de la zona II de protección, si. En la figura 4.5, se observa claramente que el perímetro de protección delimitado para una recarga de 480 mm resulto mayor, por lo que consecuentemente se considero el valor de 480 mm como el momento critico de modelación y el valido para las simulaciones definitivas.

Una vez aclarado cual es el momento crítico que debe simularse, se realizaron las simulaciones previstas, los resultados obtenidos para los tres primeros escenarios pueden verse en las figuras 4.7, 4.8, 4.9, y se resumen en el cuadro 4.3, en ellos se constata, como el perímetro de protección definido se incrementa a medida que disminuye el intervalo vertical del acuífero que es explotado. La variante a elegir estará en manos de los organismos administradores de los recursos hídricos de la cuenca, quienes confrontarán el valor del uso del suelo contra el costo de perforación.

Los resultados alcanzados en la simulación del cuarto escenario previsto (ver figura 4.9) demuestran, como si se entuba el pozo hasta 30 m, ninguna de las partículas hipotéticas simuladas, provenientes desde la superficie hasta una distancia de mas de 700 m aguas arriba del pozo, alcanzaría la parte abierta del pozo, esto significa que el pozo quedaría prácticamente sin posibilidades de contaminarse por fuentes patógenas. Por tal motivo no seria necesario mantener las restricciones que caracterizan la zona II de protección. Esta variante de explotación resulta muy atractiva a la hora de seleccionar la construcción definitiva del pozo de explotación.

Sin embargo, a pesar de que los resultados mostrados en las figuras 4.7, 4.8, y 4.9, son producto del método numérico, considerado, como se ha establecido el más exacto para estos fines, hay áreas, como la analizada en esta investigación, donde ni siquiera este método por si sólo puede dar resultados satisfactorios.

Figura 4.5. Comparación de los vectores de flujo de agua subterránea simulados para el periodo seco y húmedo. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.



LEYENDA

- Límite de la zona II para un año seco
- - - Límite de la zona II para un año húmedo

Figura 4.6. Comparación de las dimensiones de la zona II de protección simuladas para el periodo seco y húmedo

Figura 4.7. Resultados de la simulación realizada para la obtención de las zonas II y III de protección con el pozo abierto de 3-95 m. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

Figura 4.8. Resultados de la simulación realizada para la obtención de las zonas II y III de protección con el pozo abierto de 3-70 m. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

Figura 4.9. Resultados de la simulación realizada para la obtención de las zonas II y III de protección con el pozo abierto de 3-30 m. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

Figura 4.10. Representación de las trayectorias de las partículas hipotéticas contaminadas con el pozo entubado hasta los 30 m de profundidad. Corte de oeste a este por el área de estudio.

Cuadro 4.3. Dimensiones de los perímetros de protección de calidad determinadas mediante el modelo numérico VisualMODFLOW

Parámetros cuantificables del perímetro de protección de calidad	Variantes simuladas		
	Pozo abierto 3-30 m	Pozo abierto 3-70 m	Pozo abierto 3-95 m
zona II de protección			
- Distancia aguas arriba (m)	125	90	87
- Distancia aguas abajo (m)	51	40	38
- Máximo ancho (m)	143	115	113
- Área (Km ²)	0.023	0.01	0.01
zona III de protección			
- Distancia aguas arriba (m)	624	624	620
- Distancia aguas abajo (m)	65	44	42
- Máximo ancho (m)	290	260	246
- Área (Km ²)	0.2	0.0143	0.14

En el área de estudio, por ejemplo, las características topográficas del área influyen decisivamente en la delimitación del perímetro de protección, lo cual se debe a que la pendiente topográfica no coincide exactamente con la dirección simulada del flujo de agua subterránea (figura 4.11), por tal motivo el escurrimiento superficial puede introducir arrastres contaminantes desde las partes más altas hacia el área delimitada por el perímetro, e infiltrarse en esta zona, provocando, que pudiesen llegar los contaminantes sin la depuración necesaria al pozo de extracción.

Para dar solución a la problemática anterior, se podrían utilizar dos soluciones, la primera consistiría en construir un canal perimetral a lo largo de la frontera sur del perímetro de protección delimitado (figura 4.12), con el objetivo de interceptar y evacuar las aguas de escurrimiento superficial hasta un punto donde no produzca ningún efecto indeseable. Otra solución consistiría en extender las zonas de protección en la dirección de la mayor pendiente topográfica, hasta el parteaguas superficial y frontera del área modelada (figura 4.13). La decisión de seleccionar una u otra variante, queda en manos del organismo que administra la cuenca, y dependerá entre otras cosas, del valor de uso del suelo que se necesitaría proteger.

Figura 4.11. Representación de las diferencias existentes entre los vectores de flujo de agua subterránea y de escurrimiento superficial. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

Figura 4.12. Representación del canal perimetral de desagüe de las aguas de escurrimiento superficial que pudiesen entrar al perímetro delimitado. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

Figura 4.13. Representación de las zonas de protección II y III teniendo en cuenta la influencia de la topografía. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

4.2.4. DELIMITACIÓN DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE CANTIDAD ALREDEDOR DEL POZO DE AGUA MINERAL PH-1

De acuerdo a lo analizado en el apartado 2.3, la delimitación de un perímetro de protección de cantidad tiene como objetivo impedir el descenso sostenido del nivel piezométrico o la disminución del caudal captado como consecuencia de una eventual afección provocada por posteriores captaciones en el mismo acuífero u obras de cualquier tipo que afecten los caudales extraídos (López et al., 1996).

En el presente trabajo, producto de analizarse un área de extensión local (4.5 km²), y donde la alimentación del acuífero sólo se produce por las precipitaciones atmosféricas, los recursos hídricos potenciales son relativamente escasos, esto significa que el nivel del agua subterránea en el pozo PH-1 será muy sensible a cualquier otra extracción que se realice en el área de estudio.

Por lo tanto, delimitar el perímetro de protección de cantidad alrededor del pozo PH-1 es una cuestión de importancia extrema y sólo posible mediante la modelación numérica. En este sentido, el primer paso fue determinar, que abatimiento complementario podría permitirse en el PH-1, producto de la posible puesta en explotación de otros pozos en el área, sin que esto signifique un aumento en las dimensiones del perímetro de protección previamente definido. Después de realizar numerosas simulaciones, se llegó a la conclusión de que, un abatimiento complementario de 0.5 m es aceptable.

Posteriormente, se decidió, con base en las simulaciones realizadas, dividir el área modelada en cuatro zonas con diferentes grados de restricción de extracciones (figura 4.14). Esta zonación no sólo permite la protección de la cantidad de los recursos hídricos subterráneos a extraer por el pozo PH-1, sino además, ofrece una herramienta adecuada para el desarrollo sustentable de las aguas subterráneas del área de estudio. En la figura 4.14 se muestran los puntos óptimos de ubicación de otras futuras explotaciones de agua subterránea, con una construcción similar a las analizadas para el pozo PH-1 abierto de 3-30 m.

Las posibles combinaciones de explotación en el área de estudio son las siguientes: en la zona I se prohíbe la puesta en explotación de cualquier otro pozo; en la zona II se permite en

Figura 4.13. Zonación de las restricciones de explotación de aguas subterráneas en el área de estudio. a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.

cualquier parte la instalación de un pozo, con una extracción de 1 l/s; en la zona III es posible extraer 2 l/s; mientras no se explote la zona II podrían trabajar dos pozos simultáneos, uno en el punto 6 y otro en el punto 8 y obtenerse así un caudal de 4 l/s, y por último, en la zona IV es posible extraer 3 l/s desde los puntos óptimos 4 o 7, además existe la posibilidad de explotarse conjuntamente los puntos 4 y 6, y así obtenerse un caudal máximo de 5 l/s.

4.2.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es un método práctico para evaluar la influencia de uno o varios parámetros que intervienen en un fenómeno, y consiste en cuantificar su impacto sobre el mismo, variando sus valores.

El objetivo de realizar un análisis de sensibilidad en este trabajo consistió en determinar que combinación de parámetros, considerados principales de acuerdo a su posible influencia sobre los resultados alcanzados, podrían variarse de forma lógica, manteniendo la calibración del modelo.

En el presente trabajo se realizó un análisis de sensibilidad para dos de los parámetros que más influencia tienen en las dimensiones del perímetro de protección delimitado; la conductividad hidráulica y la recarga.

Fueron realizadas dos combinaciones entre los parámetros señalados. En la primera combinación, se elevó la recarga de 480 a 600 mm y la conductividad hidráulica de la capa 3 (figura 4.3), de 6 a 12 m/d. En la segunda combinación, se disminuyó la recarga de 480 mm a 200 mm y las conductividades hidráulicas de las capas 3 y 4, de 6 a 3 m/d y de 3 a 2 m/d, respectivamente. Para este análisis se utilizó el escenario del pozo abierto de 3-30 m, por ser el que tuvo la mayor dimensión del perímetro de protección.

Los resultados se pueden ver en las figuras 4.15 y 4.16, y en el cuadro 4.4, donde se presentan, respectivamente, las diferencias en las dimensiones de las zonas II y III de protección del perímetro delimitado, de acuerdo a las diferentes combinaciones utilizadas. Queda demostrado, claramente, como a pesar de mantenerse una calibración adecuada en el modelo, los resultados varían significativamente, lo que nos alerta sobre la necesidad de contar en la modelación con parámetros de entrada de alta confiabilidad.

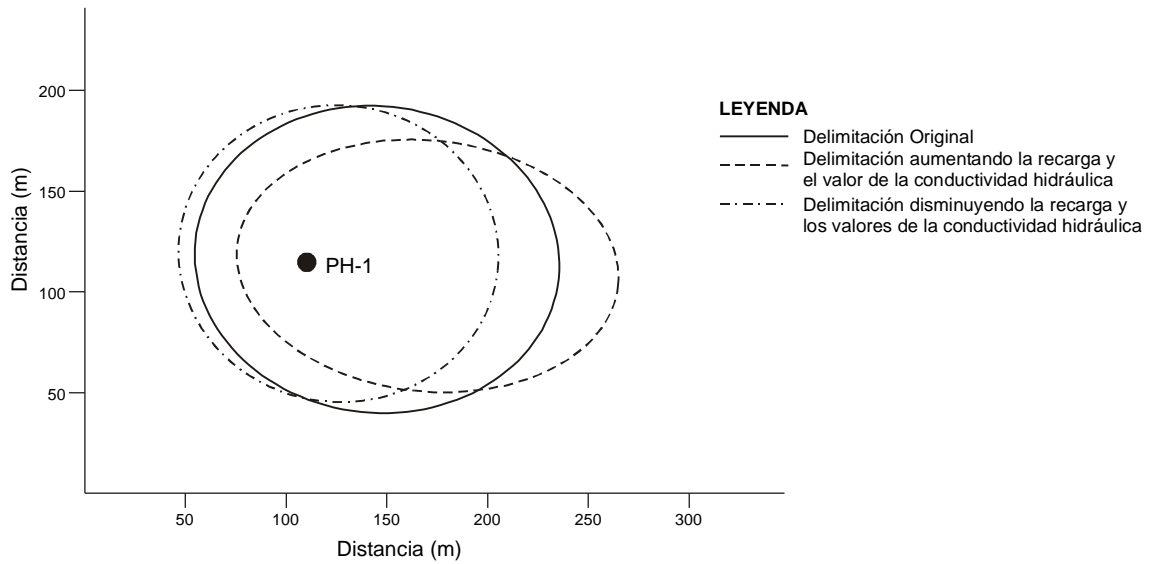


Figura 4.15. Representación del análisis de sensibilidad de la modelación para la zona II de protección.

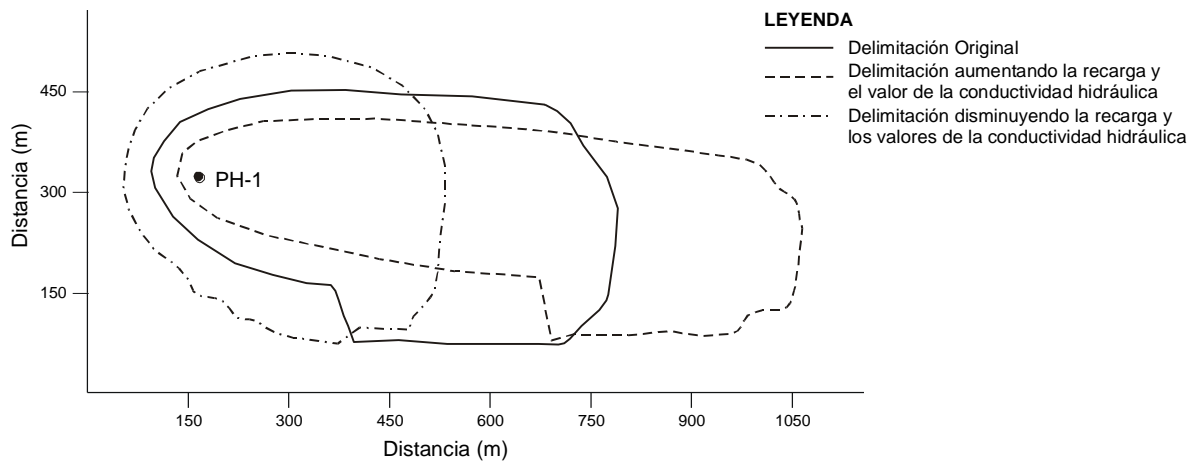


Figura 4.16. Representación del análisis de sensibilidad de la modelación para la zona III de protección.

Cuadro 4.4. Resultados del análisis de sensibilidad para el pozo abierto de 3–30 m

Parámetros cuantificables del perímetro de protección de calidad	Simulaciones		
	Modelación previa. Recarga 480mm	Aumento de la recarga y de la conductividad hidráulica	Disminución de la recarga y de la conductividad hidráulica
zona II de protección			
- Distancia aguas arriba (m)	125	196	135
- Distancia aguas abajo (m)	51	35	65
- Máximo ancho (m)	143	127	192
- Área (km ²)	0.023	0.018	0.019
zona III de protección			
- Distancia aguas arriba (m)	626	923	381
- Distancia aguas abajo (m)	65	35	115
- Máximo ancho (m)	290	306	427
- Área (km ²)	0.2	0.2	0.16

4.2.6. LIMITACIONES Y SUPOSICIONES DE LA MODELACIÓN

A pesar de haberse considerado en el presente trabajo a la modelación numérica como la herramienta de mayor precisión en la delimitación del perímetro de protección de pozos, esto no significa que sus resultados sean en realidad exactos.

Lo anterior se deriva, de que siempre existirá algún grado de incertidumbre en los parámetros de entrada al modelo, ya que no es posible contar con datos de campo en todos los lugares requeridos y, en caso de que estos se consideren adecuados en cantidad, la calidad no estaría garantizada, debido a que dichos resultados dependerán de quienes los obtuvieron.

Por tal motivo, en el proceso de modelación, el modelador se ve obligado a introducir una serie de suposiciones en cuanto a las características del área de estudio, que aunque lógicas no pueden ser comprobadas, por lo que se traducen en incertidumbres en los resultados alcanzados.

En el presente trabajo, con base en los estudios geofísicos realizados, en pozos y en superficie, a las pruebas de bombeos en los pozos del área y al análisis de los núcleos de perforación de los pozos perforados, se realizó una generalización para toda el área de estudio, de las

características hidrodinámicas y geológicas determinadas. Estas generalizaciones, aunque consecuentes con la información disponible, crean algún grado de incertidumbre en los resultados alcanzados.

Las principales suposiciones realizadas para la modelación del área de estudio, son las siguientes;

- Se asume al medio hidrogeológico como medio poroso equivalente. Esta suposición se basó al considerar, de acuerdo a la información disponible, que el área de estudio cumple con los criterios que para este fin establece la U.S. Environmental Agency (USEPA, 1991a);
 - Alta densidad de fracturas.
 - Orientación de fracturas no uniforme.
 - Aperturas de fractura relativamente uniformes.
 - Área de estudio, mayor en cien veces al espacio medio entre fracturas.
- División en profundidad del área de estudio en diferentes capas de acuerdo a sus propiedades hidrodinámicas. Es necesario subrayar que, las propiedades hidrodinámicas de estas capas no varían drásticamente, ya que los métodos geofísicos de pozos demuestran que estos cambios son transitorios, por lo que la división en capas se realizó promediando los resultados obtenidos por dichos métodos, con el objetivo de facilitar la modelación.
- Recarga uniforme por lluvias. Se tuvo en cuenta no sólo un promedio anual de lluvias en el área de 1200 mm, sino que su infiltración en el terreno fue uniforme. Esta suposición se basa en comparaciones realizadas entre las características del área de estudio y otras aledañas, donde han sido realizadas pruebas de infiltración.

Concluyendo, se puede plantear que, a pesar de haberse modelado con base en estas suposiciones, éstas fueron realizadas sobre bases lógicas, permitiendo una calibración exitosa de la modelación realizada y, por consiguiente, las incertidumbres que de ésta podrían

derivarse serán menos que las derivadas de cualquier otro método de delimitación del perímetro de protección de pozos.

Sin embargo, cualquier incertidumbre, pequeña o grande significa un riesgo a la salud humana, por tal motivo es de uso común la multiplicación de los resultados obtenidos por coeficientes de seguridad o introducir dicho coeficiente en las formulas de cálculo. En el caso analizado, se utilizó las indicaciones de la U.S. Environmental Protección Agency (USEPA, 1994), quien sugiere multiplicar el caudal de explotación previsto por 1.3, por lo tanto el caudal solicitado por el inversionista de 3 l/s se elevó a 4 l/s, para ser introducido en el modelo.

4.3. CÁLCULO DE LAS ZONAS II y III DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE CALIDAD MEDIANTE EL MÉTODO ANALÍTICO

Tal y como se planteó en el apartado 2.2.3, las variantes existentes del método analítico son innumerables, por lo tanto, para nuestro análisis solo tendremos en cuenta 4 de estas;

- Variante de Wyssling (Moreno y Martínez, 1991)
- Variante de Minkin (Oradoskaia y Lapchin, 1987)
- Variante de la Norma Cubana vigente (NC 93-01-209, 1990)
- Variante de Pérez y Menéndez (Pérez et al., 1998)

La primera de las variantes fue seleccionada por ser una de las más clásicas de las existentes para la delimitación del perímetro de protección, su grado de precisión, según López, (1992) varía desde satisfactorio hasta inaceptable, en dependencia de los datos que se le apliquen; no obstante, se ha utilizado durante muchos años en diferentes países (Moreno y Martínez, 1991).

Las tres variantes restantes fueron seleccionadas, por ser las que durante diferentes etapas, se han utilizado en Cuba para la delimitación de los perímetros de protección. El método de Minkin se utilizó frecuentemente en las captaciones de aguas minerales durante la segunda mitad de la década de los 80's, y principios de los 90's. Posteriormente, se comenzó a utilizar la Norma Cubana NC 93-01-209 de 1990 en aquellos lugares donde las condiciones lo

permitieron, y recientemente, en 1998, Pérez et al., (1998) han propuesto modificaciones a la mencionada norma, modificaciones que se denominará en lo adelante, variante de Pérez y Menéndez.

Es necesario aclarar que en el desarrollo de los métodos que veremos a continuación, se han unificado los diferentes símbolos que planteaban las formulas originales para lograr una mejor comprensión del texto.

Los cálculos estuvieron dirigidos a determinar las dimensiones de la zona II y III del perímetro. Para la zona II se determinaron los siguientes parámetros; distancia aguas arriba (Dps) y aguas abajo de la fuente (Xo), ancho del perímetro a la altura de la captación (D) y el área (figura 4.17). Para la zona III sólo se determino sus dimensiones aguas arriba (Dps) y su área, las restantes dimensiones son las mismas que las calculadas para la zona II.

Los cálculos se realizaron para las mismas condiciones que los simulados por el modelo numérico VisualMODFLOW, es decir, para los escenarios con el pozo abierto de 3-30 m , 3-70 m y 3-95 m.

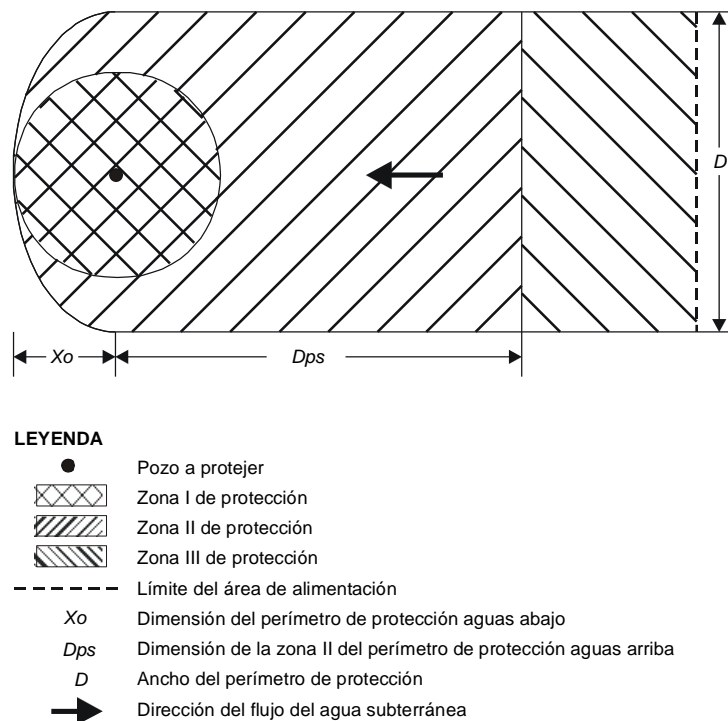


Figura 4.17. Esquema de la zonación del perímetro de protección de calidad.

Se realizaron dos variantes de cada cálculo, la primera consistió en aplicar las variables tal y como están diseñadas, considerando el medio hidrogeológico homogéneo e isotrópico, en tales circunstancias sólo se utilizó la conductividad hidráulica ponderada de las capas perforadas ($K=3.17$ m/d).

La segunda variante es una adecuación, propuesta por el autor de este trabajo, que consistió en utilizar la conductividad hidráulica ponderada en las formulas que definen el ancho (D) y la distancia aguas abajo (Xo) del perímetro (formulas 4.1, 4.2, 4.6 y 4.11) y la conductividad hidráulica más elevada (capa 1), en las formulas que definen la distancia aguas arriba de la fuente (Dps) (formulas 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 4.8, 4.12 y 4.18); pues será el valor de esta conductividad hidráulica la que decida el menor tiempo de llegada del contaminante.

Las modificaciones presentadas, basadas en la experiencia propia del autor, sólo son posibles de utilizar cuando se realizan los cálculos de forma manual. Una vez se pretenda resolver las ecuaciones por los diferentes programas de computación (PROTZONE por ejemplo, Batista, 1994), que soportan estas variantes, tendremos una sola opción de conductividad hidráulica en el modulo de entrada. Por lo tanto, cuando se utilicen programas de computación de ese tipo, por lo general se utiliza la conductividad hidráulica ponderada, que es la que se obtiene del bombeo que extrae agua de diferentes capas con diferentes valores de conductividad hidráulica. Esta opción, generalizada entre otras cosas, por falta de recursos para experimentar cada capa o por desconocimiento, puede producir errores inaceptables en la delimitación del perímetro aguas arriba.

A continuación, a modo de ejemplo, y por no considerarse necesario mostrar todos los cálculos realizados, se muestra la secuencia seguida en la delimitación de la zona II del perímetro para cada una de las variantes analíticas. Se tomo como escenario el pozo abierto de 3 a 95 m, la conductividad hidráulica ponderada y los parámetros del cuadro 4.5.

Los resultados obtenidos de todos los cálculos, donde se incluyen las dimensiones de las zonas II y III para todos los escenarios y en función solamente de la conductividad hidráulica ponderada y con las adecuaciones propuestas, se muestran en las figuras 4.18 a la 4.27 y se sintetizan en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.5. Parámetros del área de estudio que se utilizaron en los cálculos del perímetro 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		I	adimensional	0.004
Gradiente hidráulico en el radio de influencia del bombeo		I_c	adimensional	0.17
Conductividad hidráulica	Capa 1 (3-30 m)	K_1	m/d	6
	Capa 2 (30-70 m)	K_2		3
	Capa 3 (70-95 m)	K_3		0.4
	Promedio	K		3.17
Tiempo de tránsito (Zona II)		T^*	d	100
Tiempo de tránsito (Zona III)		T_3^*	d	1825
Velocidad real del flujo sin influencias del bombeo		V_r	m/d	0.3
Velocidad real del flujo en el radio de influencia del pozo		V_{ri}	m/d	3.15
Tiempo en que se estabiliza el radio de influencia		t	d	0.04

* Tiempo de transito establecido por la normativas Cubanas (cuadro 2.1)

Variante de Wyssling

Este método se desarrolla en tres pasos fundamentales, primeramente se calcula el radio de llamada (A), que posteriormente se utilizará en el paso tres, seguidamente se calcula el ancho del perímetro a la altura de la captación (D), y por último se determinan las dimensiones del perímetro aguas arriba (Dps) y abajo (Xo) de la captación.

Paso 1. Cálculo del parámetro (A).

$$A = \frac{Q}{2 * \pi * K * h * I} \quad (4.1)$$

$$A = \frac{345.6}{2 * \pi * 3.17 * 92 * 0.004}$$

$$A = 47.21m$$

Paso 2. Cálculo del ancho del perímetro de protección (D).

$$D = \frac{Q}{K * h * I} \quad (4.2)$$

$$D = \frac{345.6}{3.17 * 92 * 0.004}$$

$$D = 295.4 m$$

Paso.3. Cálculo de las dimensiones del perímetro aguas arriba (Dps) y aguas abajo (Xo) para un tiempo de tránsito T ,

Las ecuaciones que se utilizan son las siguientes;

$$L = Vr * T \quad (4.3)$$

$$Dps = \frac{+L + \sqrt{L(L + 8A)}}{2} \quad (4.4)$$

$$Xo = \frac{-L + \sqrt{L(L + 8A)}}{2} \quad (4.5)$$

Donde:

$L =$ distancia aguas arriba del perímetro en flujo natural

Para nuestro caso;

$$L = 0.159 m/d * 100 d$$

$$L = 15.9 m$$

Seguidamente se calculan las dimensiones del perímetro aguas arriba y aguas abajo de la fuente.

Aguas arriba;

$$Dps = \frac{+15.9 + \sqrt{15.9(15.9 + 8 * 47.21)}}{2}$$

$$Dps = 47.5 \text{ m}$$

Aguas abajo;

$$Xo = \frac{-15.9 + \sqrt{15.9(15.9 + 8 * 47.21)}}{2}$$

$$Xo = 31.6 \text{ m}$$

Los resultados obtenidos, una vez redondeados, (figura 4.18 y cuadro 4.7) son;

$$Dps = 47 \text{ m}, Xo = 32 \text{ m}, D = 296 \text{ m}$$

Variante de Minkin

A pesar de 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 este método al pozo de agua mineral.

La metodología a seguir es la siguiente;

Paso 1. Calcular el límite aguas abajo de la zona de captura del pozo (Xp);

$$Xp = \frac{Q}{2 * \pi * K * h * I} \quad (4.6)$$

$$Xp = \frac{345.6}{2 * \pi * 3.17 * 92 * 0.004}$$

$$X_p = 47.21 \text{ m}$$

Paso 2. Calcular el parámetro indirecto de cálculo (T^*)

$$T^* = \frac{K * I * T}{n * X_p} \quad (4.7)$$

$$T^* = \frac{3.17 * 0.004 * 100}{0.08 * 47.21}$$

$$T^* = 0.33$$

Una vez obtenido el parámetro de cálculo indirecto T^* , se busca en el cuadro 4.6 los demás parámetros indirectos de cálculo, R^* , r^* , y d^* .

Según el cuadro 4.7, para un T^* de 0.33 se obtiene que, $R^* = 1.049$, $r^* = 0.625$ y $d^* = 0.797$, siendo estos los datos que se utilizaron para el cálculo de las dimensiones del perímetro.

Primeramente, se calcula la dimensión del perímetro aguas arriba (Dps),

$$Dps = R^* * X_p \quad (4.8)$$

$$Dps = 1.049 * 47.21$$

$$Dps = 49.52 \text{ m}$$

Posteriormente, se calcula la dimensión del perímetro aguas abajo (Xo),

$$Xo = r^* * X_p \quad (4.9)$$

$$Xo = 0.625 * 47.21$$

$$Xo = 29.5 \text{ m}$$

Cuadro 4.6. Valores de los parámetros, R*, r*, y d* en dependencia del parámetro indirecto de cálculo T*.

T*	R*	r*	d*	T*	R*	r*	d*
0.01	0.149	0.135	0.142	5	7.091	0.998	2.415
0.02	0.213	0.187	0.200	6	8.222	0.999	2.522
0.05	0.351	0.284	0.325	7	9.336	1	2.605
0.1	0.517	0.384	0.445	8	10.437	1	2.670
0.2	0.773	0.506	0.626	9	11.528	1	2.722
0.3	0.987	0.589	0.762	10	12.611	1	2.765
0.5	1.358	0.699	0.973	15	17.942	1	2.895
1	2.147	0.842	1.338	20	23.186	1	2.961
2	3.506	0.948	1.789	30	33.543	1	3.025
3	4.750	0.982	2.074	50	54.008	1	3.074
4	5.937	0.994	2.271	100	104.661	1	3.109

Fuente: Oradoskaia y Lapchin, 1987.

Seguidamente, se calcula el ancho del perímetro de protección (D),

$$D = 2 * d^* * Xp \quad (5.10)$$

$$D = 2 * 0.797 * 47.21$$

$$D = 75.25 \text{ m}$$

Los resultados obtenidos una vez redondeados, (gráfico 4.18 y cuadro 4.7) son;

$$Dps = 50 \text{ m}, X_o = 30 \text{ m}, D = 75 \text{ m}$$

Variante de la norma cubana

Este método cuenta con diferentes variantes (NC 93-01-209). En el presente caso se utiliza la variante que implica conocer la velocidad real del agua subterránea sin estar alterada por el bombeo. Además se determina, por cálculos, la velocidad del agua subterránea en el área de influencia del pozo.

Paso 1. Calcular el radio de influencia del pozo durante su bombeo (R_o);

$$R_o = 1.5 \sqrt{\frac{K * h * t}{n}} \quad (4.11)$$

Donde:

$t =$ tiempo que se considera tarda el radio de influencia en estabilizarse, en nuestro caso es de 0.04 días (Expósito, 1993).

$$R_o = 1.5 \sqrt{\frac{3.17 * 92 * 0.04}{0.08}}$$

$$R_o = 18.11 \text{ m}$$

Paso 2. Calcular la velocidad real del agua subterránea en la zona de influencia del pozo, (V_{ri});

$$V_{ri} = \frac{K * I_c}{n} \quad (4.12)$$

Donde:

$I_c =$ gradiente crítico del agua subterránea en la zona de influencia del pozo (aguas arriba), su valor según Expósito, (1993), es de 0.17.

$$V_{ri} = \frac{3.17 * 0.17}{0.08}$$

$$V_{ri} = 6.7 \text{ m/d}$$

En las condiciones analizadas, el agua subterránea se movería a una velocidad real (V_r) de 0.16 m/d antes de entrar al radio de influencia del pozo, y una vez haya entrado en él, su velocidad (V_{ri}) aumentará a 6.7 m/d.

Paso 3. Calcular el tiempo que una partícula de agua tarda en atravesar el radio de influencia y llegar al pozo (T_r);

$$T_r = \frac{R_o}{V_{ri}} \quad (4.13)$$

$$T_r = \frac{18}{6.7}$$

$$T_r = 2.7 \text{ d}$$

Paso 4. Calcular el tiempo complementario (T_n),

$$T_n = T - T_r \quad (4.14)$$

$$T_n = 100 - 2.7$$

$$T_n = 97.3 \text{ días}$$

Paso 5. Calcular la distancia a proteger en la zona no alterada por el bombeo (D_n),

$$D_n = T_n * V_r \quad (4.15)$$

$$D_n = 97.3 * 0.16$$

$$D_n = 15.6 \text{ m}$$

Paso 6. Calcular la distancia total del perímetro de protección aguas arriba de la fuente (D_{ps});

$$D_{ps} = D_n + R_o \quad (4.16)$$

$$D_{ps} = 15.6 + 18.$$

$$D_{ps} = 33.6 \text{ m}$$

Paso 7. Calcular la distancia del perímetro aguas abajo (X_o) y su ancho a la altura del pozo (D).

Dimensión del perímetro aguas abajo;

$$X_o = \frac{Q}{2 * \pi * K * h * I} \quad (\text{similar a la formula 4.1})$$

$$X_o = \frac{345.6}{2 * \pi * 3.17 * 92 * 0.004}$$

$$X_o = 47.21 \text{ m}$$

Ancho del perímetro a la altura del pozo (D);

$$D = \frac{Q}{K * h * I} \quad (4.17)$$

$$D = \frac{345.6}{3.17 * 92 * 0.004}$$

$$D = 295.4 \text{ m}$$

Los resultados obtenidos, una vez redondeados, son (figura 4.17 y cuadro 4.7);

$$D_{ps} = 34 \text{ m}, X_o = 47 \text{ m}, D = 296 \text{ m}$$

Método Pérez y Menéndez

Pérez y Menéndez (1998), presentaron modificaciones al método anteriormente descrito; específicamente al cálculo de la distancia del perímetro aguas arriba de la fuente, manteniendo idénticas las demás formulas.

Según estos investigadores, los parámetros: radio de influencia (R), tiempo de estabilización del radio de influencia (t) y abatimiento del pozo, el cual se utilizo para calcular el gradiente crítico (I_c), son difíciles de estimar con precisión, sobre todo en aquellas fuentes ya existentes, por lo que se propone otra fórmula, que no depende de estos parámetros, para delimitar el perímetro aguas arriba;

$$Dps = \sqrt{\frac{Q}{\pi * h * n} T + rp} + \frac{K * I}{n} T \quad (4.18)$$

Donde:

rp = radio del pozo (m)

Por último, se cálculo la dimensión del perímetro aguas arriba (Dps);

$$Dps = \sqrt{\frac{345.6}{\pi * 92 * 0,08} 100 + (0.15)} + \frac{3.17 * 0.004}{0.08} 100$$

$$Dps = 38.67 + 15.85$$

$$Dps = 54.5 \text{ m}$$

Finalmente, se obtuvo, una vez redondeados los resultados, que la dimensión del perímetro de protección aguas arriba (Dps) deberá ser de 55 m, mientras la dimensión aguas abajo (Xo) y el ancho del perímetro a la altura de la captación serán los mismos que los obtenidos en la Norma Cubana; 47 y 296 m, respectivamente.

Las figuras donde se presentan todos los resultados obtenidos, así como el cuadro donde se resumen estos resultados, se muestran a continuación.

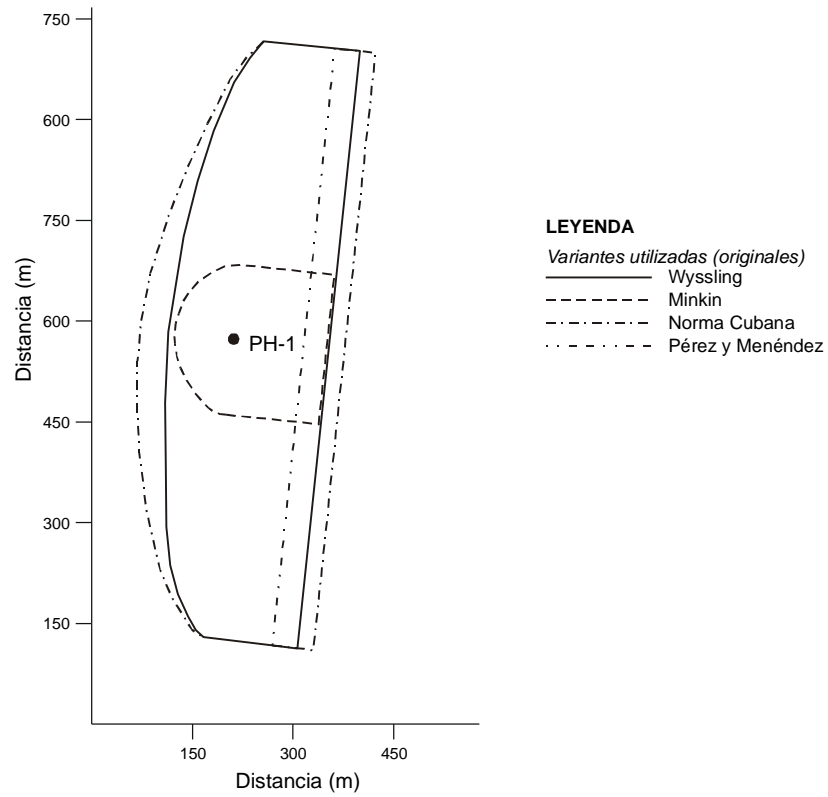


Figura 4.18. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 95 m.

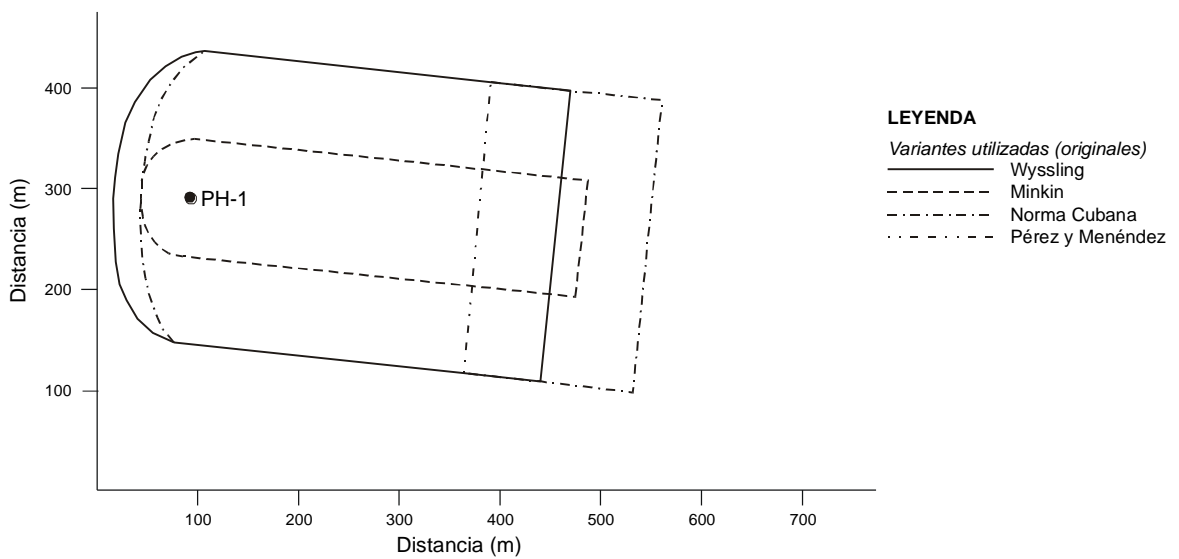


Figura 4.19. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 95 m.

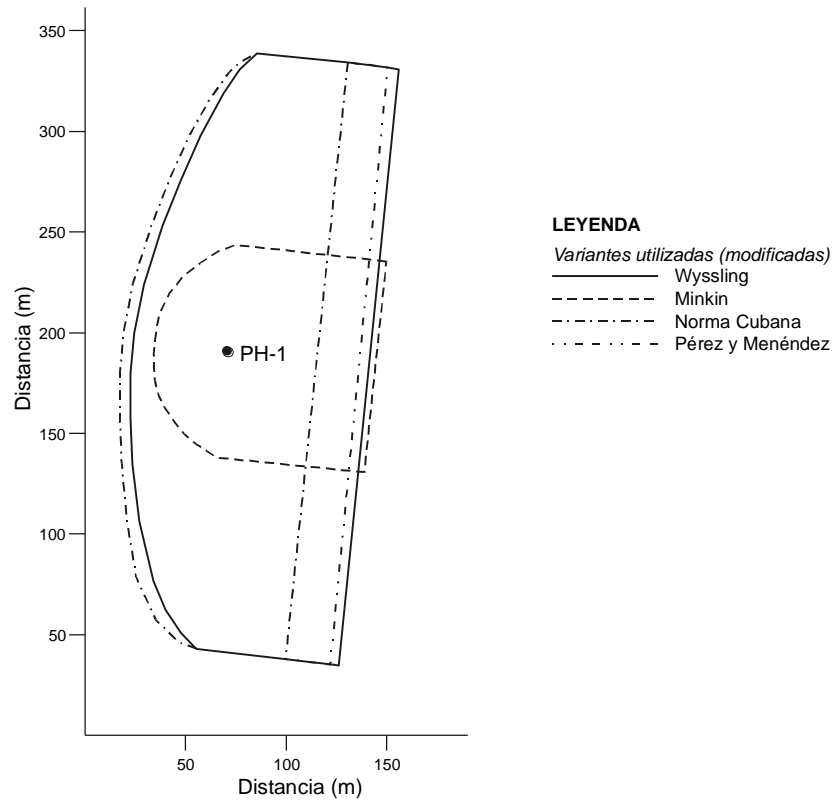


Figura 4.20. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 95 m.

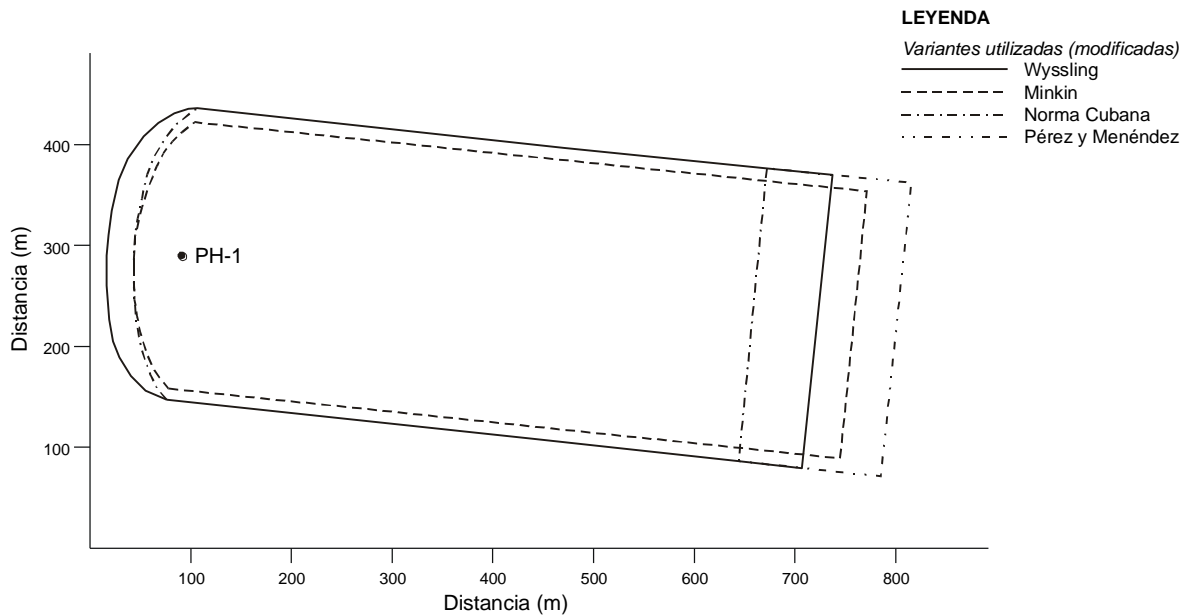


Figura 4.21. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 95 m.

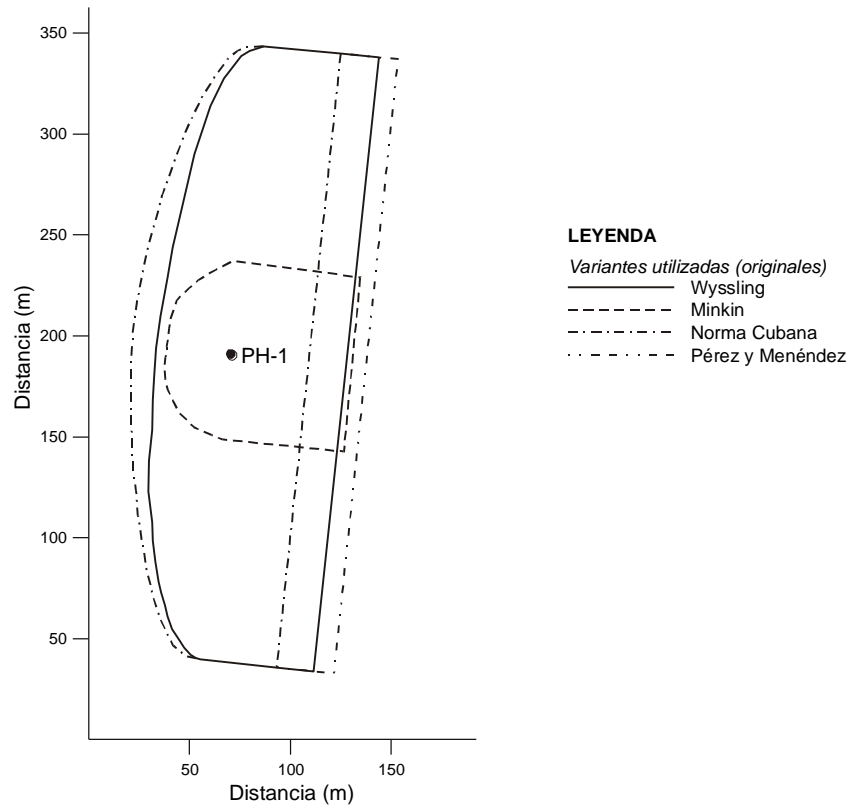


Figura 4.22. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 70 m.

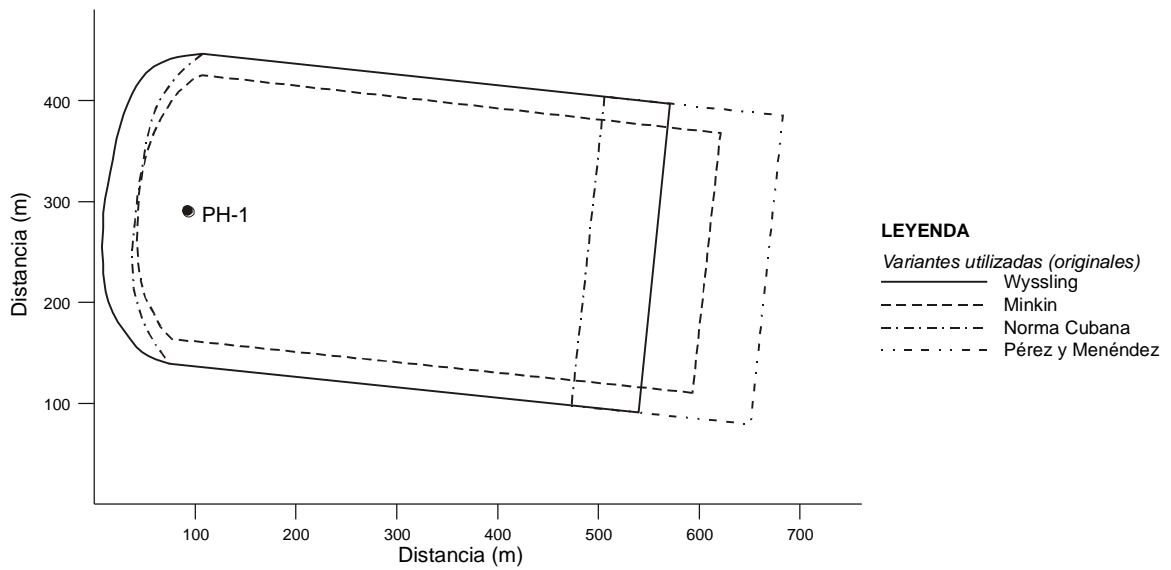


Figura 4.23. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 70 m.

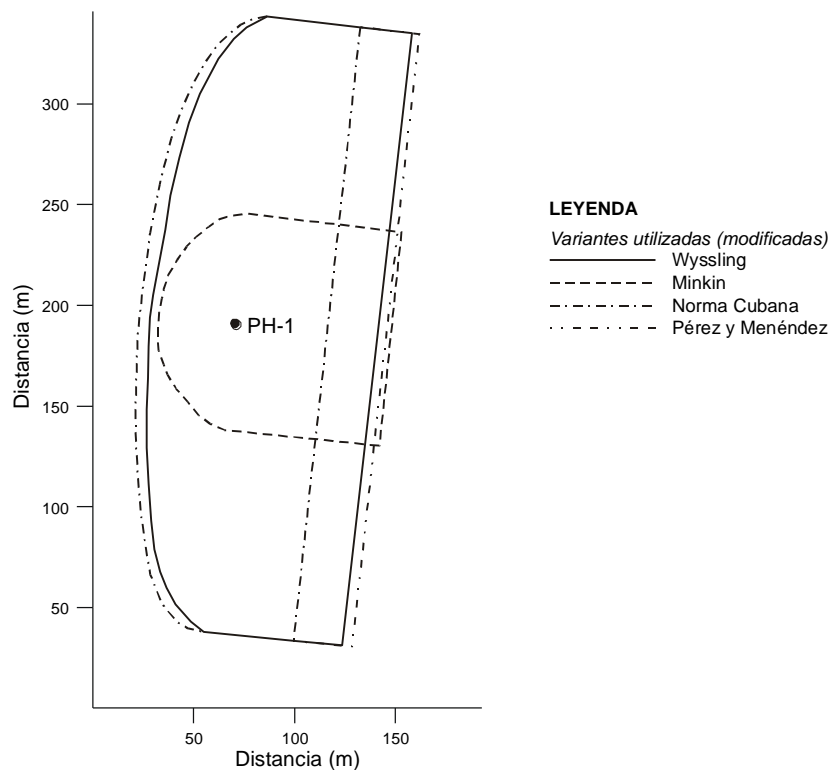


Figura 4.24. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 70 m.

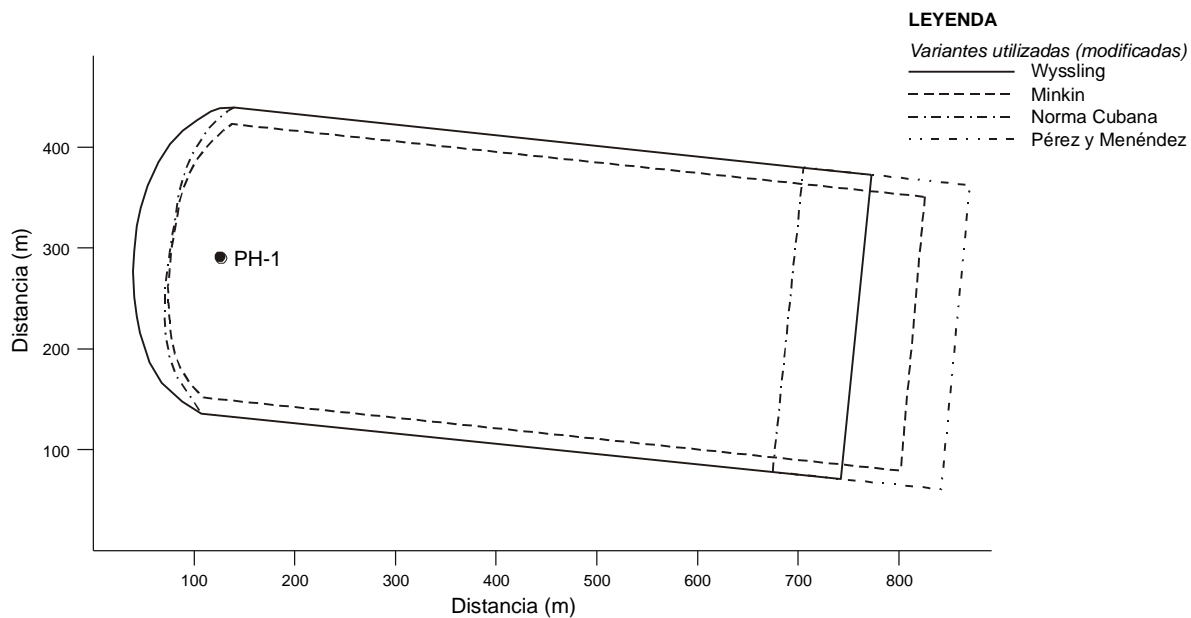


Figura 4.25. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 70 m.

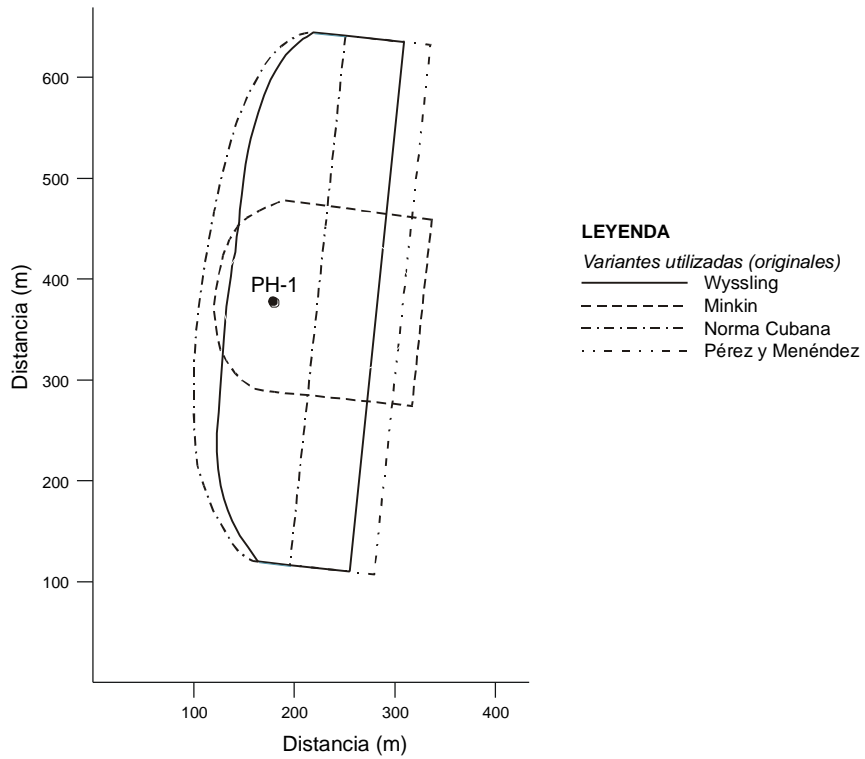


Figura 4.26. Resultados de la delimitación de la zona II de protección mediante el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 30 m.

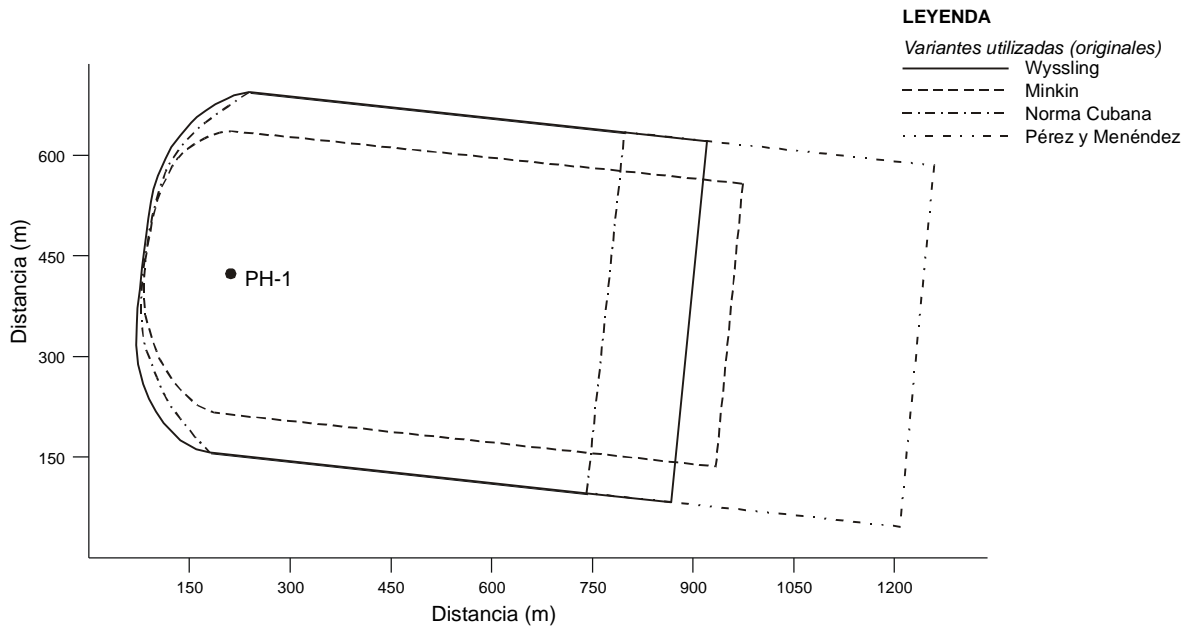


Figura 4.27. Resultados de la delimitación de la zona III de protección mediante método analítico original. Pozo abierto de 3 – 30 m.

Cuadro 4.7. Resultados de los cálculos realizados por el método analítico

Dimensiones para los diferentes escenarios	Variantes de cálculo							
	Wyssling		Minkin		Norma Cubana		Pérez y Menéndez	
	1K	2K	1K	2K	1K	2K	1K	2K
Abierto 3-95 m								
<u>Zona II</u>								
Dps	47	70	50	74	34	47	55	69
D	296	296	76	104	296	296	296	296
Xo	32	40	30	37	47	47	47	47
Área	0.021	0.031	0.005	0.01	0.017	0.025	0.026	0.031
<u>Zona III</u>								
Dps	364	630	393	670	290	572	455	713
D	296	296	119	264	296	296	296	296
Xo	75	82.1	47	47	47	47	47	47
Área	0.12	0.20	0.05	0.19	0.08	0.176	0.14	0.12
Abierto 3-70 m								
<u>Zona II</u>								
Dps	57	71	60	76	38	47	66	75
D	307	307	88	108	307	307	307	307
Xo	36	41	32	38	49	49	49	49
Área	0.026	0.03	0.008	0.01	0.0230	0.024	0.032	0.033
<u>Zona III</u>								
Dps	464	632	502	689	400	565	576	741
D	307	307	260	274	307	307	307	307
Xo	81	85	49	49	49	49	49	49
Área	0.164	0.213	0.145	0.199	0.135	0.185	0.19	0.235

1K Cálculos realizados con la conductividad hidráulica ponderada

2K Cálculos realizados por la variante propuesta por el autor

Nota: El área es en Km² y las demás dimensiones en metros

Cuadro 4.7. Resultados de los cálculos realizados por el método analítico (continuación)

Dimensiones para los diferentes escenarios	Variantes de cálculo							
	Wyssling		Minkin		Norma Cubana		Pérez y Menéndez	
	1K	2K	1K	2K	1K	2K	1K	2K
Abierto 3-30 m								
<u>Zona II</u>								
Dps	88		133		31		101	
D	533		187		533		533	
Xo	58		66		85		85	
Área	0.072		0.036		0.052		0.097	
<u>Zona III</u>								
Dps	684		740		561		853	
D	533		425		533		533	
Xo	136		85		85		85	
Área	0.43		0.38		0.36		0.61	

1K Cálculos realizados con la conductividad hidráulica ponderada

2K Cálculos realizados por la variante propuesta por el autor

Nota: El área es en Km² y las demás dimensiones en metros

En relación con los cálculos realizados y los resultados alcanzados se debe señalar algo muy importante y es que, la dirección del flujo de agua subterránea tomada para ubicar los perímetros calculados fue la simulada por el modelo utilizado y no la interpretada por los datos de campo (figura 4.4). De haberse tomado la piezometría interpretada como única disponible, los resultados hubiesen sido totalmente incongruentes (figura 4.28). Esto demuestra, en nuestro caso, que la importancia de la modelación va más allá que la delimitación del perímetro, es la base para la aplicación de cualquier otro método de cálculo del perímetro de protección.

**Figura 4.28. Representación de la influencia de la piezometría simulada y la interpretada por los datos de campo en las delimitaciones del perímetro de protección.
a) Vista en planta. b) Vista tridimensional.**

4.4. CÁLCULO DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE CANTIDAD MEDIANTE EL MÉTODO ANALÍTICO

Tal y como se analizó en el apartado 2.4, la determinación de la zona de protección de la cantidad es un proceso sumamente complejo, siendo un objetivo inabordable en la mayoría de los estudios de delimitación de perímetros de protección. Los pocos trabajos que se han hecho en este sentido, se han basado en delimitar polígonos o círculos alrededor de la captación, en su mayoría arbitrarios, donde se prohíbe la puesta en explotación de otros pozos (López, 1992).

En nuestras condiciones (anisotropía vertical, área de estudio limitada, entorno socioeconómico complejo, intereses contrapuestos, posibilidades múltiples de explotar los pozos), delimitar una zona de protección de la cantidad mediante métodos tradicionales (cálculos analíticos, o delimitación arbitraria), sería totalmente inadecuado y no defendible ante las autoridades pertinentes.

Por los motivos expuestos, en el área de estudio, la delimitación de zona de cantidad, sólo es posible mediante el uso de modelos numéricos, situación que fue analizada en el apartado 4.2.4.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior, tanto mediante el modelo numérico VisualMODFLOW como por las diferentes variantes contempladas del método analítico, se obtuvieron para posibles escenarios de explotación del futuro pozo de extracción de aguas minerales. En el mismo orden de los escenarios analizados, y considerando los resultados alcanzados por la modelación como patrón de referencia, se realizó la comparación y discusión de los resultados alcanzados.

5.2. POZO ABIERTO DE 3-95 m

La comparación de los resultados para este escenario, se muestran en las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, y se resumen en el cuadro 5.1.

Las figuras 5.1 y 5.2, muestran 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 5.1, los resultados mostrados de las variantes analíticas proceden de la utilización de estas 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.

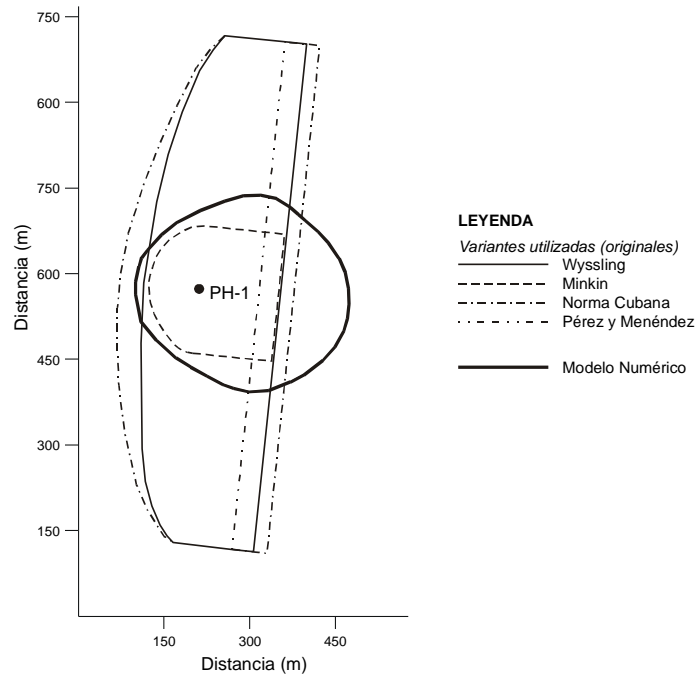


Figura 5.1. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 95 m.

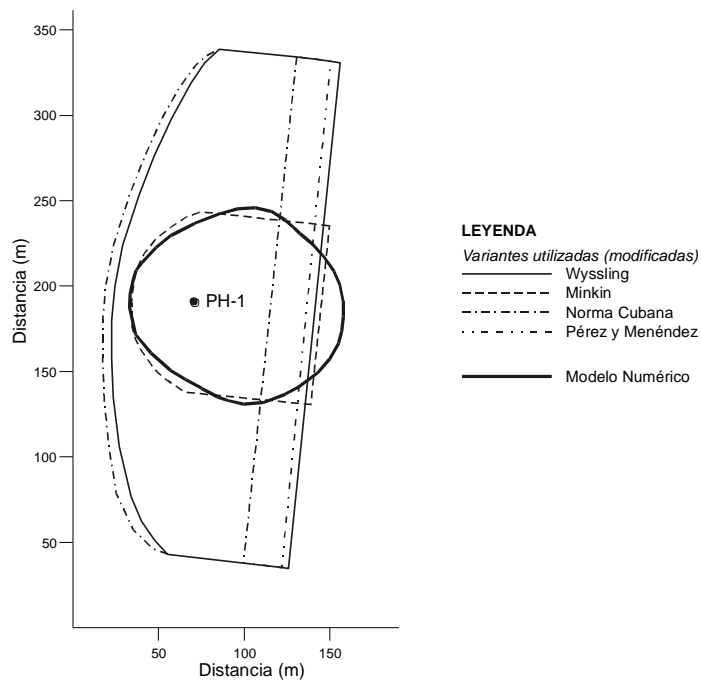


Figura 5.2. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 95 m.

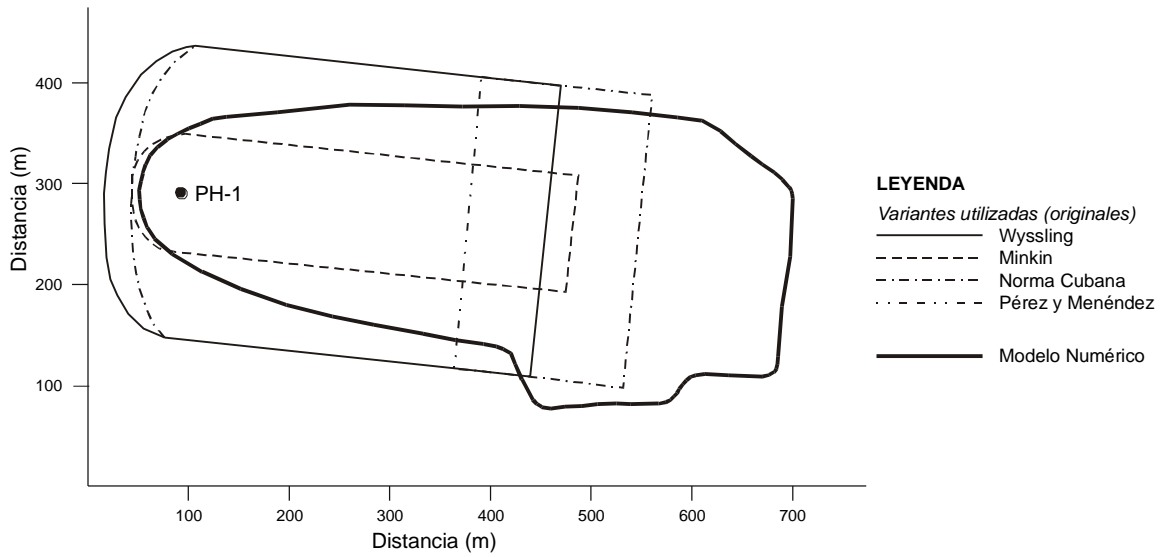


Figura 5.3. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 95 m.

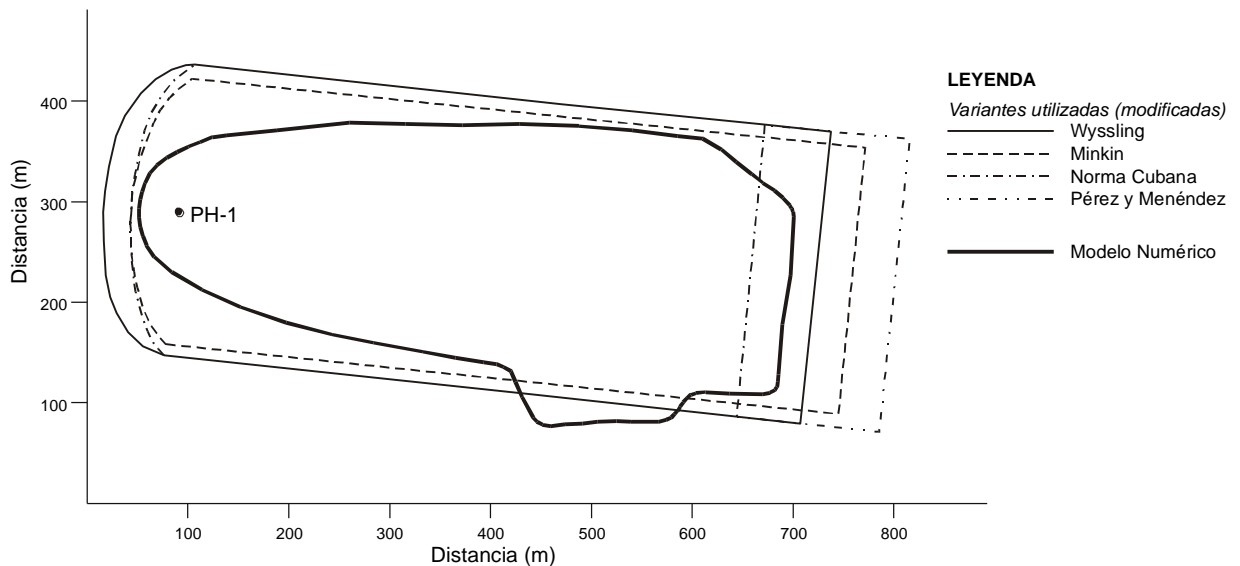


Figura 5.4. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 95 m.

Cuadro 5.1. Comparación de los resultados obtenidos para el escenario del pozo abierto 3-95 m

Métodos y variantes	Zonas de protección y sus dimensiones							
	Zona II de protección				Zona III de protección			
	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)
<i>Modelo numérico</i>	86	113	38	0.01	620	246	42	0.14
<i>Wyssling</i>								
Variante original	47	296	32	0.021	364	296	75	0.12
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	45	162	16	110	41	20	79	14
Variante propuesta	70	296	40.3	0.031	630	296	82	0.2
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	19	162	8	210	2	20	95	43
<i>Minkin</i>								
Variante original	50	75	37	0.005	3.93	119	47	0.05
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	43	33	3	50	37	51	12	64
Variante propuesta	74	104	37	0.01	670	264	47	0.19
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	15	8	3	0	8	7	12	36

Cuadro 5.1. Comparación de los resultados obtenidos para el escenario del pozo abierto 3-95 m (continuación)

Métodos y variantes	Zonas de protección y sus dimensiones							
	Zona II de protección				Zona III de protección			
	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)
<i>Modelo numérico</i>	86	113	38	0.01	620	246	42	0.14
<i>Norma Cubana</i>								
Variante original	34	296	47	0.017	290	296	47	0.08
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	61	162	24	70	53	20	12	57
Variante propuesta	47	296	47	0.025	572	296	47	0.176
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	45	162	24	150	8	20	12	26
<i>Pérez y Menéndez</i>								
Variante original	55	296	47	0.026	455	296	47	0.14
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	36	162	24	160	27	20	12	0
Variante propuesta	69	296	47	0.031	713	296	47	0.12
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	20	162	24	210	15	20	12	14

En la figura 5.2, por su parte, se muestran los resultados de las modificaciones realizadas por el autor a las variantes analíticas (introducción simultánea en el cálculo de la conductividad hidráulica ponderada y de la más elevada del corte).

Se puede ver claramente como, a pesar de existir considerables diferencias entre los resultados obtenidos por el modelo y por las variantes analíticas, la variante propuesta por el autor mejora los resultados. Esta mejora es más evidente en la variante Minkin donde prácticamente llegan a coincidir con los resultados del modelo (cuadro 5.1), mientras que en las otras variantes las mejoras sólo son visibles en las distancias de las zonas de protección II y III aguas arriba del pozo (*Dps*).

De forma general, puede afirmarse que las variantes analíticas, para este escenario conllevan a dos tipos de errores, sobreprotegen al pozo a sus lados y aguas abajo, pero no lo protegen adecuadamente aguas arriba. Este segundo error es el más grave pues puede poner en riesgo la salud del consumidor y la continuidad de la inversión.

Las causas de estas discrepancias radican, en la opinión del autor, en primer lugar en la recarga; ya que las variantes analíticas no la consideran; esto significa que toda el agua subterránea que llega al pozo proviene de un flujo de agua subterránea que viene desde más allá de las fronteras aguas arriba del perímetro delimitado. Por su parte, el modelo considera la recarga en la zona de captura y este aporte complementario de agua al sistema provoca que el ancho de la zona calculada sea considerablemente menor que los obtenidas por las variantes analíticas. La segunda causa radica en las limitaciones de las variantes analíticas para considerar las variaciones del campo de flujo de agua subterránea aguas arriba de la captación.

Por su parte, en las figuras 5.3 y 5.4, se muestran los resultados en la delimitación de la zona III de protección del perímetro calculado. De nuevo puede verse la mejoría considerable que significa la variante propuesta, sobre todo en las dimensiones aguas arriba de la captación (cuadro 5.1).

Las causas de estas diferencias radican igualmente en la recarga y en las particularidades de los métodos en el análisis del campo de flujo; sin embargo, estas diferencias son menores que las analizadas en las figuras 5.1 y 5.2 (cuadro 5.1)

5.3. POZO ABIERTO 3-70 m

La comparación de los resultados para este escenario pueden verse en las figura 5.5, 5.6, 5.7, y 5.8, y se resumen en el cuadro 5.2. Se observa, como esta disminución en la profundidad del pozo prácticamente no alteran las dimensiones de la zona II y III obtenidas por el modelo en el escenario del pozo abierto de 3-95 m.

Tampoco las dimensiones del perímetro calculado por las variantes analíticas para este escenario se incrementan considerablemente en relación al escenario anterior, por lo que, consecuentemente, se mantienen las discrepancias en el mismo porcentaje aproximadamente (cuadros 5.1 y 5.2), que en el escenario anterior. Las causas de estas diferencias son las mismas que las anteriormente analizadas.

Se destaca, igualmente, las mejoras en los resultados obtenidos mediante la variante propuesta por el autor sobre la variante original (considerando la conductividad hidráulica ponderada del espesor perforado del acuífero).

El análisis de los resultados de este escenario demuestran que perforar el pozo hasta 70 m, es preferible que hacerlo hasta 95 m, debido a que no hay un incremento significativo en las dimensiones del perímetro, mientras que los costos de perforación serán menores.

5.4. POZO ABIERTO 3-30 m

La comparación de los resultados para este escenario pueden verse en las figuras 5.9, y 5.10 y los resultados se resumen en el cuadro 5.3. Se observa como esta disminución en la profundidad del pozo altera considerablemente las dimensiones de la zona II y III en relación con las obtenidas para los anteriores escenarios. También, y aún en mayor grado, se incrementan las dimensiones obtenidas por las variantes analíticas, lo que eleva el porcentaje de discrepancia con las dimensiones obtenidas por el modelo numérico. El ejemplo más claro puede verse en las dimensiones para el ancho de la zona II, ya que si en los escenarios anteriores el por ciento de discrepancia fue de 162 y 169 %, respectivamente, en el presente escenario se elevo a 273 % (cuadro 5.3).

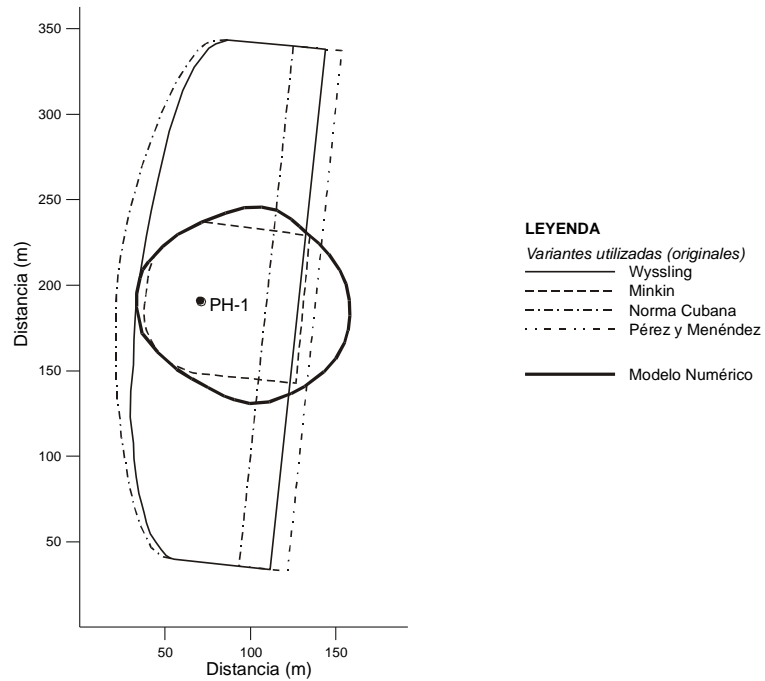


Figura 5.5. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 70 m.

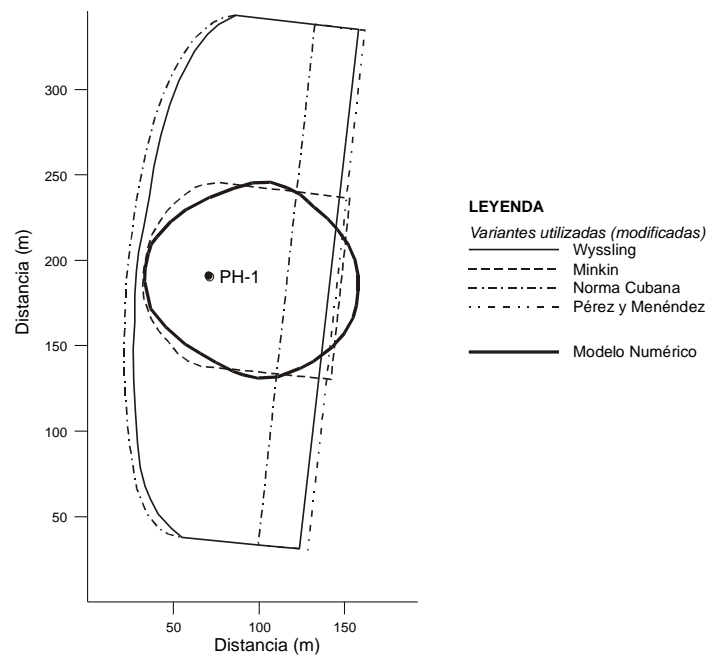


Figura 5.6. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 70 m.

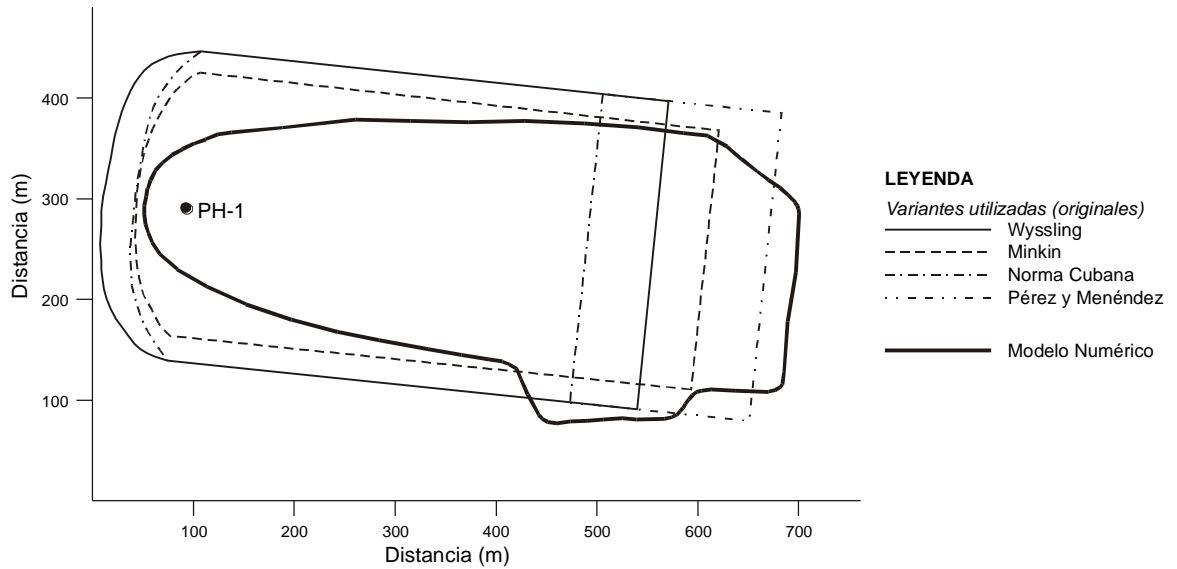


Figura 5.7. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 70 m.

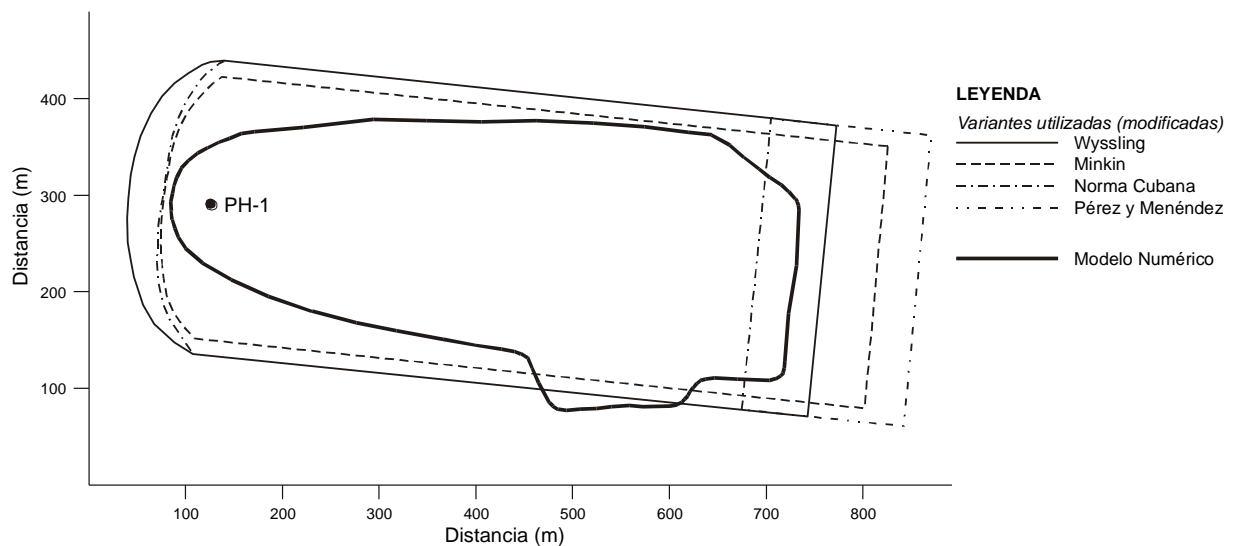


Figura 5.8. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico modificado por el autor. Pozo abierto de 3 – 70 m.

Cuadro 5.2. Comparación de los resultados obtenidos para el escenario del pozo abierto 3-70 m

Métodos y variantes	Zonas de protección y sus dimensiones							
	Zona II de protección				Zona III de protección			
	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)
<i>Modelo numérico</i>	90	114	40	0.01	626	260	44	0.143
<i>Wyssling</i>								
Variante original	57	307	36	0.026	464	307	81	0.164
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	37	169	10	160	26	18	84	15
Variante propuesta	71	307	41	0.03	632	307	85	0.213
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	21	169	2	200	1	18	93	49
<i>Minkin</i>								
Variante original	60	88	32	0.005	502	260	49	0.145
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	32	23	20	50	20	0	11	1
Variante propuesta	76	108	38	0.01	689	274	49	0.199
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	16	6	5	0	10	5	11	39

Cuadro 5.2. Comparación de los resultados obtenidos para el escenario del pozo abierto 3-70 m (continuación)

Métodos y variantes	Zonas de protección y sus dimensiones							
	Zona II de protección				Zona III de protección			
	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)
<i>Modelo numérico</i>	90	114	40	0.01	626	260	44	0.143
<i>Norma Cubana</i>								
Variante original	38	307	49	0.023	400	307	49	0.135
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	58	169	22	130	36	18	11	6
Variante propuesta	47	307	49	0.024	565	307	49	0.185
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	48	169	22	140	10	18	11	29
<i>Pérez y Menéndez</i>								
Variante original	66	307	49	0.032	576	307	49	0.19
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	27	169	22	220	8	18	11	33
Variante propuesta	75	307	49	0.033	741	307	49	0.235
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	17	169	22	230	18	18	11	64

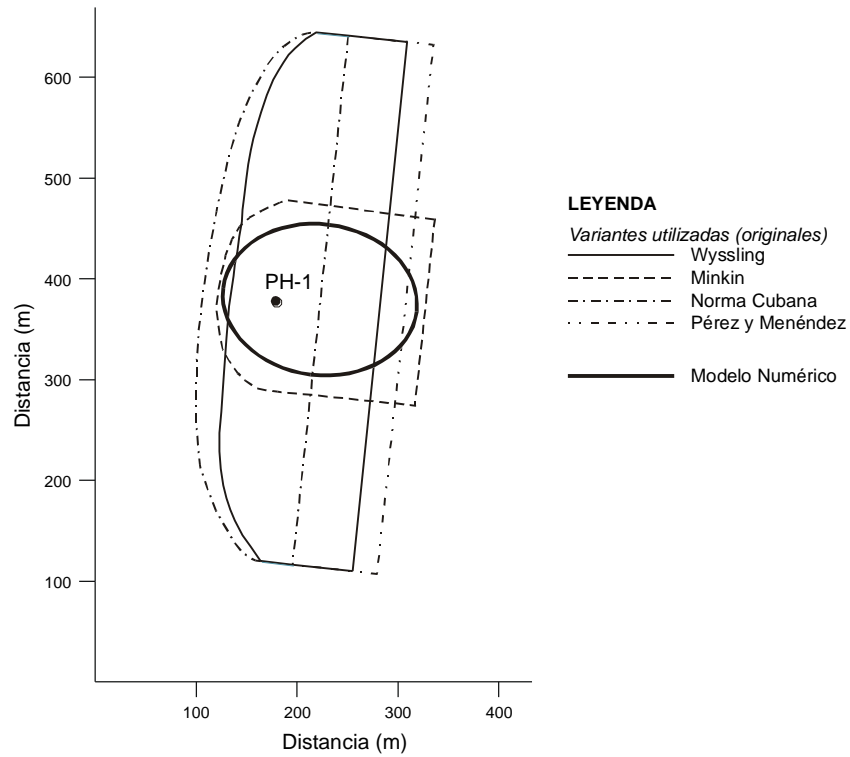


Figura 5.9. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona II de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 30 m.

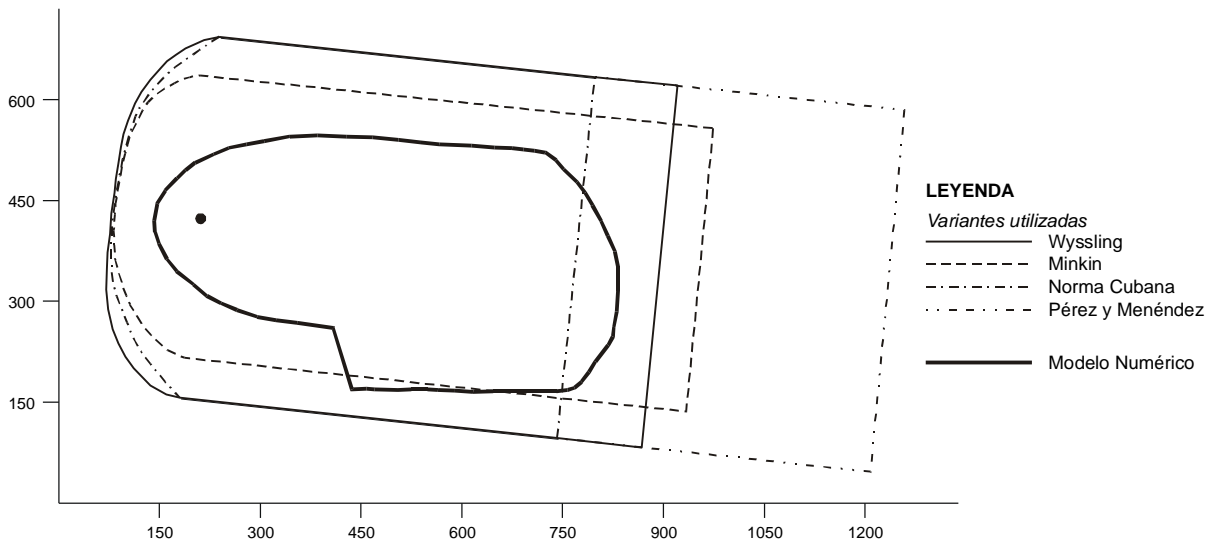


Figura 5.10. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona III de protección, mediante el modelo numérico y el método analítico original. Pozo abierto de 3 – 30 m.

Cuadro 5.3. Comparación de los resultados obtenidos para el escenario del pozo abierto 3-30 m

Métodos y variantes	Zonas de protección y sus dimensiones							
	Zona II de protección				Zona III de protección			
	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)	A. arriba <i>Dps</i> (m)	Ancho <i>D</i> (m)	Aguas abajo <i>Xo</i> (m)	Área (Km ²)
<i>Modelo numérico</i>	125	143	51	0.023	626	290	65	0.2
<i>Wyssling</i>								
Variante original	88	533	58	0.072	684	533	136	0.43
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	30	273	14	213	9	84	109	115
<i>Minkin</i>								
Variante original	133	187	66	0.036	740	425	85	0.38
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	6	30	29	56	18	47	30	90
<i>Norma Cubana</i>								
Variante original	31	533	85	0.052	561	533	85	0.36
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	75	273	67	126	10	84	30	80
<i>Pérez y Menéndez</i>								
Variante original	101	533	85	0.097	853	533	85	0.61
% de discrepancia con respecto al modelo numérico	19	273	67	321	36	84	30	205

El incremento en el porcentaje de discrepancia significa, en opinión del autor, que, en este escenario el funcionamiento de un pozo de penetración parcial juega un papel muy importante; es decir, mientras las variantes analíticas consideran que el pozo está, abierto en todo el espesor del acuífero, el modelo asume (más realmente), que el pozo recibe un aporte de agua desde la capa no perforada (figura 5.11). Este aporte es el que precisamente no permite que el ancho del perímetro obtenido por el modelo aumente proporcional a la disminución del intervalo explotado, como sucede en los resultados de las variantes analíticas.

Del anterior análisis, se desprende la importancia extrema que significa modelar este tipo de escenarios usando modelos numéricos que trabajen en tres dimensiones. Si se hubiese usado un modelo numérico que trabajase en dos dimensiones no se hubiese detectado este aporte de agua subterránea al pozo y, consecuentemente, los resultados que se hubiesen obtenido serían menos reales.

Figura 5.11. Representación mediante la distribución de las líneas de flujo de la entrada de agua al pozo desde las capas inferiores a las perforadas. Corte de oeste a este por el área modelada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal de la presente investigación fue delimitar, de la forma más precisa posible, el perímetro de protección alrededor de un futuro pozo de explotación de agua mineral, ubicado en el acuífero Margarita, región central de Cuba; implementando, por esta vía, una herramienta adecuada para la gestión de los recursos hídricos subterráneos del área.

Los métodos seleccionados para ser utilizados en la delimitación del perímetro de protección alrededor del pozo de agua mineral fueron, en primer lugar, la modelación numérica (considerado el método más exacto para este fin) y en segundo lugar, el método analítico en cuatro de sus más conocidas variantes en Cuba (Wyssling, Minkin, Norma Cubana y Pérez y Menéndez). Los resultados obtenidos por ambos métodos fueron comparados y analizadas las causas de las diferencias detectadas.

A continuación se presentan las principales conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación realizada.

6.1. CONCLUSIONES

- En las condiciones similares a las analizadas, el método analítico en sus diferentes variantes de delimitación del perímetro de protección proporciona errores de más de un cien por ciento con relación a los resultados obtenidos por la modelación numérica. Las causas fundamentales de estas diferencias radican en que el método analítico no

considera la recarga en la zona de captura, considera que el pozo está abierto en todo el espesor del acuífero, considera al acuífero homogéneo e isotrópico y no considera correctamente las variaciones del campo de flujo a medida que éste se acerca a la captación.

El método analítico proporciona resultados más adecuados si se utiliza, en los cálculos, la variabilidad de la conductividad hidráulica del corte hidrogeológico en lugar de la conductividad hidráulica ponderada. Estas adecuaciones permiten que, en condiciones parecidas a las analizadas en esta investigación, el método analítico pueda utilizarse de forma transitoria y con una mayor seguridad hasta que pueda realizarse la modelación numérica. La variante analítica que, una vez adecuada ofrece mejores resultados, es la variante Minkin.

- ❑ En condiciones similares a las analizadas, las características topográficas del área y del escurrimiento superficial, son elementos imprescindibles a tener en cuenta en la delimitación del perímetro de protección de pozos. En este sentido, se proponen dos variantes para el establecimiento final del perímetro de protección delimitado; la primera variante propone la construcción de un canal perimetral de desagüe en la frontera sur del perímetro y la segunda, la extensión de las zonas II y III de protección hasta el parteaguas del área.
- ❑ En condiciones similares a las analizadas, el único método disponible para delimitar las zonas de protección de la cantidad es la modelación numérica. Una forma adecuada de representar dicha protección es en forma de un mapa donde se representen, por zonas, las restricciones de explotación del agua subterránea a que debe someterse el área y los puntos adecuados para que éstas pudiesen llevarse a cabo.
- ❑ El entubamiento profundo de los pozos de explotación de agua subterránea ofrece una protección complementaria contra la contaminación, que sólo es posible cuantificar (en términos de profundidad necesaria de entubamiento y del tipo de contaminante que no alcanzara la parte abierta del pozo), mediante la modelación numérica.

- ❑ Se propone como variante óptima de construcción y protección del pozo de agua mineral la siguiente; que se perfore hasta los 70 m y se entube hasta los 30 m de profundidad y que, con vista a eliminar la influencia del escurrimiento superficial, el perímetro de protección delimitado se extienda hasta el parteaguas del área.

6.2. RECOMENDACIONES

Sobre la base de todo lo analizado en los capítulos anteriores, se puede definir las siguientes recomendaciones;

- ❑ Adecuar las metodologías cubanas de exploración de aguas subterráneas con el objetivo de introducir, de manera obligatoria, la experimentación por intervalos del corte hidrogeológico. Esto facilitara no solamente la modelación numérica, sino que permitirá aplicar, si fuese necesario y de manera transitoria, el método analítico de acuerdo a la variante propuesta por el autor.
- ❑ Realizar este tipo de trabajo en áreas con características diferentes a las analizadas en esta investigación, y que cuente con la información necesaria, con el objetivo de hacer extensivo este tipo de comparaciones y decidir en que zonas es más urgente el recalcu lo mediante la modelación numérica, de los perímetros establecidos en diferentes fuentes de agua subterránea del país.

BIBLIOGRAFÍA

- ❑ Baeza, J. (1994). "Consideraciones sobre los perímetros de protección en España." Instituto Tecnológico Geominero de España. (ITGE). 28 pp.
- ❑ Bair, E. S. y Lahm, T. D. (1996). "Variations in Capture-Zone Geometry of a Partially Penetrating Pumping Well in an Unconfined Aquifer. Ground Water. v. 34, no. 5, pp 842-852.
- ❑ Bair, E.S. y Roadcap, G.S., (1992). "Comparison of Models Used to Delineate Capture Zones of Wells: 1.Leaky-Confined Fractured-Carbonate-Aquifer". Ground Water. v. 30, no. 2, pp 199-211.
- ❑ Bair, E.S., Safreed. C.M.; y Berdanier, B.W. (1992). "CAPZONE—An analytical Flow Model for Simulating Confined, Leaky Confined, or Unconfined Flow to Wells with Superposition of Regional Water Level". International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO. 193 pp.
- ❑ Barlow, P.M., (1994). "Two-and Tree-Dimensional Pathline Analysis of Contributing Areas To Public-Supply Wells of Cape Cod, Massachusetts" Ground Water. v. 32, no. 3, pp 399-410.
- ❑ Batista, J., (1994). "PROTZONE. Sistema de zonas de protección". Versión 1.0. INRH, Cuba.

- ❑ Blandford, T.N., y Huyakorn, P.S. (1990). "WHPA – A modular semi-analytical model for the delineation of wellhead protection areas". Prepared by HydroGeoLogic Inc. For USEPA, Washington, DC.
- ❑ Bonn, B., y Rounds, S. (1990). "DREAM – Analytical Ground-water Flow Programs". Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI. 109 pp.
- ❑ Boulding, J.R. (1995). "Practical handbook of soil, vadose zone, and ground-water contamination assessment, prevention and remediation. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 948 pp.
- ❑ Bradbury, K. R. and Muldoon, M.A, Zaparozec, A., y Levy, J. (1991). "Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks". Technical Guidance Document. USEPA. 144 pp.
- ❑ Bradbury, K. R. and Muldoon, M.A. (1994). "Effects of fracture density and anisotropy on delineation of wellhead protection areas in fractured-rock aquifers. Applied Hydrogeology. No. 3, pp 17-23.
- ❑ Cleary, T. (1992). "Investigación a través de modelos matemáticos, de los efectos de los principales parámetros hidrogeológicos sobre la delineación de los perímetros de protección a pozos y la remediación de acuíferos contaminados." Tesis de Maestría, Instituto de Geociencias de la Universidad de Sao Paulo. (en portugués). 93 pp.
- ❑ 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.
- ❑ Faybishenko, B.A.; Javandel, I., y Witherspoon, P.A. (1995). "Hydrodynamics of the capture zone of partially penetrating well in a confined aquifer". Water Resour. Res., v. 31, n. 4, pp. 859-866.
- ❑ Forster, C. B., Lachmar, E. T. And Oliver, D.S. (1997). "Comparison of Models for Delineating Wellhead Protection Areas in Confined to Semiconfined Aquifers in Alluvial Basins". Ground Water. v. 35, pp. 689-697.

- ❑ Foster, S. y Hirata, R. (1988). "Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data". CEPIS, Tech. Report (WHO-PAHO-CEPIS), Lima. 62, pp.
- ❑ Grubb, S. (1993). "Analytical Model for Estimation of Steady-State Capture Zones of Pumping Wells in Confined and Unconfined Aquifers" *Ground Water*. v. 31, n. 1, pp. 27-32.
- ❑ Hirata, R. (1994). Fundamentos y estrategias de protección en el control de calidad de las aguas subterráneas. Estudios de casos en el estado de Sao Paulo. Tesis de Doctorado, Instituto de Geociencias de la Universidad de Sao Paulo. (en portugués). 132, pp.
- ❑ 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*. v. 4, pp 423-436.
- ❑ Kinselbach, W., Marburger, M., y Chiang, W.H. (1992). "Determination of groundwater catchment areas in two and three spatial dimensions". *Journal of Hydrology*. N. 134, pp. 221-246.
- ❑ Lerner, D. (1992). "Well Catchments and time-of- Travel Zones in aquifers with recharge". *Water. Resourc. Res.*, v. 28, no. 10, pp. 2621-2628.
- ❑ Livingstone, S., Franz, T. and Guiguer, N. (1996). "Managing Groundwaters Resources Using Wellhead Protection Programs". *Geoscience Canada*, v. 22, pp.121-128.
- ❑ LM. MINBAS, (1995). Ley de Minas de la República de Cuba. Ministerio de la industria básica. 48 pp.
- ❑ López, G., (1992). "Metodología de los perímetros de protección de las aguas minero-medicinales". Jornadas de aguas minerales y mineromedicinales en España. Instituto Tecnológico Geominero de España. (ITGE). Cuarta ponencia.

- ❑ López, J. A., Martínez, C., Moreno, L., Navarrete, P., y Baeza, J. (1996). “Guía para la elaboración de perímetros de protección de aguas minerales y termales”. Instituto Tecnológico Geominero de España. (ITGE). 104 pp.
- ❑ Moreno, L. y Martínez, C. (1991). "Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas." Instituto Tecnológico Geominero de España. (ITGE). 290 pp.
- ❑ National Rivers Authority (NRA). Policy and practice for the protection of groundwater. Noviembre 1991. NRA, UK. 46 pp.
- ❑ 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.
- ❑ NC.2: 1995. Norma Cubana. Aguas minerales. Ministerio de la industria básica.. 12 pp.
- ❑ NC. 2:1996. Norma Cubana. “Agua de bebida envasada. Especificaciones”. 12 pp.
- ❑ Oradoskaia, A. M. y Lapchin, N. N., (1987). "Protección Sanitaria alrededor de los pozos de aguas subterráneas." Nedra, Moscú (en ruso). 168 pp.
- ❑ Oregon Health Division, (1992). “Oregon Wellhead Protection program. Guidance manual”. 34 pp.
- ❑ Oliva, G., Lluís, E., Sánchez, E. A., (1989). “Nuevo Atlas Nacional de Cuba”. Academia de Ciencias de Cuba. 220 pp.
- ❑ Pérez, F., Menéndez, A., y Pérez, O., (1998). “Experiencias en el cálculo de la distancia de protección sanitaria en las fuentes de abasto de aguas subterráneas en las provincias de Ciudad de la Habana y Matanzas, Cuba”. Archivos, CENHICA, INRH. pp. 13.

- ❑ Pollock, (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.

- ❑ RDPH. Reglamento del Dominio Público Hidráulico, de 11 de abril de 1986

- ❑ RLM^c. Reglamento de la Ley de Minas de Cuba, 19 de septiembre de 1997

- ❑ RLM^e. Reglamento de la Ley de Minas de España, 25 de agosto de 1978

- ❑ RTS. Reglamentación técnico sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas en España, aprobada por el Real Decreto 1164/1991, del 22 de julio.

- ❑ Shafer, J.M., (1987). GWPATH- “Interactive Ground-Water Flow Path Analysis”. Illinois State Water Survey, Bulletin 69. 42 pp.

- ❑ Springer, A.E. y Bair, E.S., (1992). “Comparison of Methods Used to delineate Capture Zones of Wells: Stratified-Drift Buried-Valley Aquifer”. Ground Water. v. 30, n. 6, pp. 908-917.

- ❑ United State Environmental Protection Agency (USEPA).1991a. Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks. EPA 570/9-91-009. Wisconsin Geological and Natural Survey. Washington (DC). 144pp.

- ❑ United State Environmental Protection Agency (USEPA).1991b. Wellhead protection strategies for confined-aquifer settings. EPA 570/9-91-008. The University of Texas at Austin. Washington (DC). 168pp.

- ❑ United State Environmental Protection Agency (USEPA).1993. “Guideline for delineation of wellhead protection. EPA 440/5-93-001. Washington (DC). 122pp.

- ❑ United State Environmental Protection Agency (USEPA).1994. “Ground Water and Wellhead Protection”. EPA 625/R-904/001

- ❑ Varljen, M.D. y Shafer, J.M., (1991). "Assessment of Uncertainty in time-Related Capture Zones Using Conditional Simulation of Hydraulic Conductivity" *Ground Water*. v. 39, n. 5 pp. 737-748.
- ❑ Vasielivich, B., (1989). "Levantamiento geológico del Norte de Las Villas. Cuba" Archivos, Oficina Nacional de Recursos Minerales. 130 pp.
- ❑ Waterloo hydrogeologic Inc., (1998). "Aquifer Test, User's Manual". Waterloo, Ontario, Canadá. 176 pp.
- ❑ Zlotnik, V. A., (1997). "Effects of Anisotropy on the Capture Zone of Partially Penetrating Well". *Ground Water*. v. 35, no. 5, pp. 842-847.

