



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO – METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE GEOLOGÍA – MINERÍA
DEPARTAMENTO DE MINERÍA

TRABAJO DE DIPLOMA
EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO DE MINAS

Título: Elaboración de software para la determinación de parámetros hidrogeológicos en estudios geólogo-mineros.

Autor: Djaofera Ambendahy Zarisse

Tutores: DrC. Constantino De Miguel Hernández

DrC. Orlando Belete Fuentes

DrC. Luis Delfín Rojas Purón

Moa, 2013

“AÑO 55 DE LA REVOLUCIÓN”

Declaración de Autoridad

Yo **Djaofera Ambendahy Zarisse**, autor del presente trabajo, certifico la propiedad intelectual a favor del ISMM y a la Facultad de Geología y Minería del mismo Instituto los cuales podrán hacer uso del mismo con la finalidad que estimen conveniente.

El estudiante

Pensamiento

"Encomienda tus obras a Yavé, y tus proyectos se realizarán". Proverbios 16:3.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia de Tana por el amor y apoyo que ha brindado. También a mis padres y hermanos y a todas las personas que me ayudaron para que se lograra el mismo.

Agradecimiento

A Dios todo poderoso, Afla y Omega. A Él sea la GLORIA.

Especial agradecimiento para mis padres Djaofera y Berline Zeriette por el amor y cuidado que me han brindado, y por haberme querido tanto y sacrificado por mí, que Dios los bendiga siempre.

A mis hermanas y hermanos primos, J. Razanadahy Georgia, J. Falliere, J. Ruphine, D. Ambendahy Stevene, D. A. Texas, D. A. Solohery, Talahy, Dejy, Vilma, Venancia, Sandrina, Odalys, Corinne, Benitez, etc.

A Mr. Hasindrazana Zamany Venance y su esposa e hijas mis hermanas y la familia entera.

A mis queridas amistades, que me han acompañado en todo momento durante esos 5 años de mi estudio, especialmente a Juan de Dios Londres, Y Marilyn Vásquez, Ayelin, Ailin, Keyla, Nordiel Bombale y su esposa Lucila, los cuales me han sido siempre de apoyo incondicionalmente.

A mis tutores, Dr.C Constantino de Miguel, Dr.C Orlando Belete Fuentes y Dr.C Luis Delfin Roja Purón con ayuda de quienes este trabajo se pudo realizar con éxito.

A la Revolución cubana y a todos los profesores del ISMM que por sus sacrificios y todo lo que hicieron por mí para que yo fuera ingeniero, quienes pudieron aguantar y perseverar en brindar sus conocimientos y experiencias profesionales.

A todos mis amigos y amigas, sin dejar de mencionar aquí Fabián Ricardo Djeda Pardo (quién cogiste mi cosa?), Raúl Machaca (Ay mamá...), Evelyn Angélica Gallardo Viquez, Camila, Michel, Faustin, Carnoth, Amukende, Helvi, Pombili (kahewa kandje), Mahata, JB Koffi, Michel Basala, Arsene, Samuel y mis compañeros de aula, y mis compatriotas en Cuba y todos los que han estado de una u otra forma teniendo la oportunidad de compartir conmigo en los buenos y malos momentos.

A todas, bendiciones y muchas gracias!

Resumen

La Hidrogeología es la ciencia que se ocupa del estudio de las aguas subterráneas, las cuales desde la antigüedad han sido empleadas con fines domésticos, agrícolas e industriales; utilización que se define a partir de su origen y del análisis de sus características físicas y químicas, de la composición y estructura de los horizontes y yacimientos acuíferos así como de las condiciones geológicas, hidrográficas y climáticas locales o regionales, donde se localizan las rocas en las cuales se almacenan y a su vez transitan. Estos estudios conllevan a la realización de múltiples operaciones experimentales y un elevado volumen de cálculos matemáticos para determinar los parámetros hidrogeológicos que clasifican las aguas para diversos usos. Por el elevado volumen de cálculos matemáticos y operaciones experimentales que tienen estas investigaciones hidrogeológicas surge el presente trabajo que tiene como objetivo diseñar una herramienta informática para el cálculo de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos.

Como resultado se obtiene un software para el procesamiento de la información y el uso más eficiente de los recursos, basado en la implementación de una metodología sobre el cálculo de los parámetros hidrogeológicos necesarios durante las investigaciones geólogo-mineras con fines de determinar el comportamiento de las aguas subterráneas; cuya aplicación se traduce en un aumento de la productividad de los investigadores, facilita el acceso y tratamiento de la información y favorece el trabajo colaborativo.

Abstract

The Hydrogeology is a science which studies the underground water which has been used in domestic, agricultural and industrial goals since long time. This use depends on its origin and analysis of its physical and chemical characteristics; it is also based on its composition and structure of the horizons and aquifer locations as well as the geologic and regional climatic conditions where the rocks that store the underground water are located. These studies include multiple experimental operations and great volume of mathematical calculations to determine the hydrogeological parameters that classify the waters into several uses. For that reason, the main goal of this work is to design computer program to carry out the calculation of the mentioned parameters of aquifers.

Finally, software which allows an efficient uses of resources and easy information processing is obtained; based on the implementation of procedures to calculate the hydrogeological parameters which are necessary during investigations in order to determine the behavior of the dynamic of underground water whose application contribute to the increase of the productivity of investigators and makes easy the access, treatment of the information and collaborative work.

Índice

CAPÍTULO I – FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	4
1.1. Introducción	4
1.2 Estado del Arte.	4
1.2.1. Generalidades de los softwares de Hidrogeología	4
1.3. Lenguaje de programación utilizado para la elaboración del HidroZ@RYS	10
1.3.1. ¿Qué es MATLAB?	10
1.3.2. Origen de MatLab	12
1.3.4. Plataformas	12
1.3.5. Interacción MATLAB-usuario.....	12
1.4. Conclusiones del Capítulo	14
CAPITULO II: DETERMINACIÓN DE PARAMETROS HIDROGEOLÓGICOS.....	15
2.1. Introducción.	15
2.2. Bombeos y sus principales características	16
2.3. Cálculo por bombeos en pozos	19
2.3.1. Pozos Perfectos:	19
2.3.2. Pozos Imperfectos	27
2.3.3. Cálculo del radio de influencia de bombeo en pozos imperfectos.....	31
2.4. Cálculos del coeficiente de filtración por datos de cubeteo y bombeos instantáneos	32
2.5. Determinación de parámetros hidrogeológicos por datos de vertimientos en pozos	35
2.5.1. Vertimientos en pozos en zona de saturación.....	35
2.5.2. Vertimiento en pozo en zona no saturada.....	37
2.5.3. Vertimiento en calicatas	41

2.6. Conclusión del segundo capítulo	46
CAPÍTULO III: PLANEACIÓN Y DISEÑO DEL SOFTWARE HidroZ@RYS	47
3.1. Introducción	47
3.2. Funcionalidades generales	47
3.3. Generalidades del software	47
3.4. Cálculos básicos del software.....	49
3.4.1. Cálculo del coeficiente de filtración por el método de Bombeo	50
3.4.2. Cálculo del coeficiente de filtración por el método de Cubeteo.....	58
3.4.3. Cálculo del coeficiente de filtración por el método de Vertimiento	64
3.5. Estudio de factibilidad.....	67
3.6. Efectos económicos.....	67
3.7. Beneficios y Costos Intangibles en el proyecto.....	68
3.8. Ficha de costo	69
3.9. Gráfico de comparación de las operaciones manuales y automatizadas	71
3.9. Conclusiones del Capítulo	73
CONCLUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	78

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, con el surgimiento de nuevas tecnologías como resultado del desarrollo científico-técnico de la sociedad, en muchas actividades y empresas se necesitan herramientas automatizadas de gestión del conocimiento para controlar y cuantificar los distintos aspectos de sus operaciones, como son Software de aplicación para el control de almacenes, inventarios, planillas, ventas, cuentas por pagar y cobrar, contabilidad, entre otras; las que son habituales en la mayoría de las empresas independientemente de su tamaño o giro de negocio.

Actualmente existen sistemas informáticos en las diferentes ramas del saber, y la hidrogeología, como una rama de la Geología, no escapa de estos avances y para realizar sus investigaciones con distintos fines se han implementado sistemas que se basan en tecnologías de última generación. Estos adelantos aunque aportan resultados confiables y humanizan el trabajo, para Cuba tiene el inconveniente de tener un alto costo por lo que su empleo en el país se ha visto restringido a utilizar solo algunos de ellos en algunas empresas y realizar las operaciones de cálculo mediante sistemas manuales o por el software Microsoft office.

Las empresas Comandante Ernesto Che Guevara y Comandante Pedro Sotto Alba, del municipio de Moa, en colaboración con la Facultad de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), frecuentemente durante los trabajos de exploración y explotación minera, se construyen pozos de monitoreo para determinar los parámetros hidrogeológicos que definen el régimen y comportamiento de las aguas subterráneas de la zona de estudio.

Por lo antes expuesto se plantea como **problema científico**, la inexistencia de una herramienta informática para las investigaciones y la docencia del ISMM, que garantice de manera eficiente la calidad del proceso de cálculo de los parámetros hidrogeológicos.

Teniendo en cuenta el problema planteado, el **objeto de estudio** es el proceso de cálculo de los parámetros hidrogeológicos, siendo el **campo de acción** la

automatización de los métodos de cálculos de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos.

Como **objetivo general** la investigación se propone: Diseñar una herramienta informática para los procesos de cálculo de parámetros hidrogeológicos de los acuíferos.

Como **idea a defender** se establece que: Si se conocen los algoritmos de cálculos relacionados con los principales métodos conocidos para la determinación de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos entonces, se puede diseñar una herramienta automatizada que garantice la calidad del proceso de cálculo de estos parámetros en los estudios realizados por los investigadores del ISMM.

Para dar cumplimiento al objetivo general se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

- Desarrollar los fundamentos de los distintos métodos para la determinación de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos.
- Realizar un estudio de sistemas similares existentes.
- Definir las variables de entrada y salida de la herramienta informática.
- Realizar el algoritmo para el proceso de automatización del cálculo de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos.

Los métodos teóricos utilizados en la investigación son:

Análisis y síntesis: Este método se utiliza para desglosar el problema en partes o sub-problemas para de esta forma comprobar el correcto funcionamiento de las mismas, luego integrarlo todo para corroborar las relaciones entre estas y su integración como un todo, llegando así a una mejor solución, también para arribar a conclusiones parciales y generales de la investigación.

Histórico-Lógico: Es utilizado para la comprensión de la evolución del empleo de herramientas para la gestión de la información que es generada por la interacción de dos o más personas.

Entre los métodos empíricos utilizados se encuentran:

Entrevista: Se usa con el objetivo de recopilar información, esta será la vía fundamental para la determinación de los requerimientos del sistema.

La observación: es útil para entender el comportamiento del sistema y sus especificaciones.

Revisión de documentos: se utiliza para conocer los detalles del funcionamiento de los métodos y pruebas o experimentos es decir, reglas y particularidades de los mismos además de permitirnos justificar nuestra solución al problema planteado.

En el capítulo 1: Fundamentación teórica, se analizan aspectos relacionados con el tema de la investigación. Determinar el marco teórico - metodológico de la investigación, se realiza un estudio de los diferentes sistemas existentes vinculados al campo de acción, además se presenta la metodología y las herramientas a utilizar en el desarrollo del sistema propuesto. En el capítulo 2: Fundamentos para la determinación de los parámetros hidrogeológicos, se explica la importancia y particularidad del uso de los pozos y calas en los estudios hidrogeológicos, además se desarrolla con ilustraciones y fórmulas los distintos métodos para el cálculo de estos parámetros. El capítulo 3: Planeación y diseño del Software HidroZ@RYS, se hace uso de la metodología expuesta en los capítulos iniciales para su posterior desarrollo, abordando en detalles cada una de sus fases.

CAPÍTULO I – FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Introducción

En la actualidad, los sistemas informáticos han evolucionado considerablemente y junto a ellos la producción de software. Las nuevas tecnologías de la información y la comunicación posibilitan de manera efectiva la atención a las diferentes ramas de los procesos empresariales pues para la aplicación de cualquier estrategia es necesario o aconsejable apoyarse en algún software que ayude a recoger los datos históricos de los resultados obtenidos y permita optimizar la fluidez de estos. En este capítulo se abordan aspectos básicos relacionados con el tema de Investigación. Se analizan características y beneficios de su utilización, entre otros. Estos elementos constituyen el soporte teórico del proyecto, que contribuye al logro de un mejor entendimiento de la situación problemática y de una valoración adecuada para su solución.

1.2 Estado del Arte.

1.2.1. Generalidades de los softwares de Hidrogeología

Existe una amplia variedad de software que se utilizan en el campo de la Hidrogeología para la realización de diferentes funciones, ya sea para cálculos, representación de perfiles litológicos y estratigráficos, y de Modelos Digitales de los Terrenos, entre otras funciones, así como los empleados en la Geología, Geomecánica, Geofísica, que son usados también dentro de la Hidrogeología para la realización de diversas tareas y entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

1. INQUIMAP

Modelización de acuíferos con el método de las diferencias finitas o con el de superposición de los efectos. Puede tratar acuíferos libres, semiconfinados y confinados. Es capaz de modelizar acuíferos incluso con una permeabilidad lateralmente anisótropa y de realizar la reconstrucción del nivel acuífero para condiciones inalteradas. En los acuíferos analizados pueden intervenir, por ejemplo, pozos, barreras impermeables o puntos de recarga. Inquimap determina las isócronas

del flujo subterráneo, así como las concentraciones de contaminantes con métodos numéricos. Los análisis pueden realizarse tanto en régimen estacionario como transitorio.

2. HAPPIE

Definición y evaluación de franjas de terreno sujetas a riesgo de contaminación a causa de un vertido. Analiza su impacto sobre el medio incluso en presencia de más puntos de agua. Esta determinación se realiza en función de parámetros fáciles de determinar, mediante el uso de una extensión del método de Le Grand. Happie realiza una representación gráfica de la forma, la dimensión y el nivel de riesgo para cada franja.

3. WELL

Análisis e interpretación de ensayos de bombeo. Realiza el cálculo de los principales parámetros hidrogeológicos para acuíferos libres, confinados y semiconfinados. Interpreta tanto las pruebas a caudal constante como variable (sea a escalones o con disminución constante del nivel piezométrico). Es posible utilizar WELL para regímenes estacionarios y transitorios, tanto para pozos únicos como para ensayos con uno o más piezómetros de control. Los métodos de cálculo pueden ser analíticos o bien interpretaciones automáticas de ábacos de curvas de descensos.

4. SID :

Cálculo de secciones hidráulicas con características geométricas e hidráulicas cualesquiera. SID determina, para una sección dada, los valores de velocidad del agua en función de la altura de la lámina. Finalmente, elabora un diagrama de los caudales en función de la altura (curva de gastos), con la indicación de la altura de lámina correspondiente al caudal de diseño propuesto.

5. El Rock Works 2004 y 2006:

Es un software estándar que se ha utilizado por mucho tiempo para la visualización de datos geotécnicos, medioambientales, en la industria minera subterránea y en el petróleo, ya que sus herramientas permiten trabajar con mapas, secciones transversales, diagramas y modelos sólidos estructurales y volumétricos. Contiene numerosas opciones para el análisis de datos subterráneos, como la estratigrafía, litología, fracturamiento de pozos, hidráulica, y acuíferos. La versión del 2006 se especializa en la construcción y visualización de datos subterráneos de pozos, de secciones transversales, diagramas y modelos estructurales de mapas geológicos. En él se pueden manejar datos geofísicos, geotécnicos y se pueden observar litologías, contacto de estratigrafías, nivel de agua y de fractura con una dinámica de 2D y 3D.

6. AutoCAD 2010:

Versión del AutoCAD usado para editar, modificar, analizar y mejorar datos con el fin de poder integrar el trabajo con mapas, documentos escaneados y dibujos en papel, imágenes de satélite y fotos aéreas.

7. DataGeosis: Software de la topografía y la geodesia versión 2005. Disponible en las versiones:

- STANDARD
- STANDARD PLUS
- PROFESSIONAL
- VIAS STANDARD
- DEMO Y JUNIOR

a) Versión STANDARD

Dentro de esta se realizan las siguientes operaciones:

1. Entrada de datos
2. Apertura de archivos
3. Planillas de cálculos
4. Cálculo de poligonal
5. CAD integrado

6. Autocroquis
7. Cálculo de áreas
8. División de áreas
9. Memoria descriptiva o descriptivo de linderos
10. Herramientas de dibujo
11. Modelaje numérico
12. Curvas de nivel
13. Norte verdadero
14. Exportación de archivos
15. Ubicación de puntos.

b) Versión STANDARD PLUS

Dentro de esta se realizan las siguientes operaciones:

1. Geodesia
2. Meridiana punto a punto
3. Visualización de las coordenadas geográficas
4. Visualización de las coordenadas geodésicas
5. Monografía de marco
6. Perfiles longitudinales y transversales
7. Visualización 3D.

c) Versión PROFESSIONAL

Dentro de esta se realizan las siguientes operaciones:

1. Cálculo de volumen entre superficies
2. Mapa de declividades (pendientes)
3. Área de inundación
4. Generación de líneas de proyectos
5. Cálculo de volumen por secciones transversales
6. Sección tipo.

d) Versión VIAS STANDARD

Esta versión contiene todas las herramientas de la versión PROFESSIONAL

Dentro de esta se realizan las siguientes operaciones:

1. Curvas horizontales
2. Curvas verticales
3. Secciones tipo intercaladas.

e) VERSIONES DEMO Y JUNIOR

La versión DEMO Y JUNIOR tiene el carácter académico y está disponible para copia y distribución. Esta versión de DataGeosis es dedicada a estudiantes y profesionales que están iniciándose en automatización topográfica, haciendo el aprendizaje más moderno y adecuado a las herramientas del futuro usuario. En esta versión están disponibles funciones de planimetría. Esta versión no exportará ficheros en el formato DXF, o cualquier otro formato. Por tener un fichero propio, ficheros de otras versiones no podrán ser abiertos en esta versión.

8. TOPCION

TOPCION es otro software para determinar las cotas de los puntos y se fundamenta en las aplicaciones de TOPO6. Está formado por las siguientes opciones:

1. Nivelación
2. Ficheros
3. Cálculo.

- 9. Surfer 8:** Esta versión forma parte de la serie de versiones que hacen un uso más fácil del programa y más funcional para ciertas áreas.

Principales novedades:

- a)** Significativos avances en la construcción de mapas de superficie y gráficos en 3D.
- b)** Trazado de curvas de nivel.
- c)** Mayor capacidad de ficheros:

- Lee ficheros de datos de hasta 109 filas y columnas, dependiendo de la memoria disponible.
- Nuevos métodos de rejilla.
- Nuevos modelos de variogramas.

10. Surfer 10:

Esta versión forma parte de la serie de versiones que hacen un uso más fácil del programa y más funcional para ciertas áreas.

Principales novedades:

- d)** Significativos avances en la construcción de mapas de superficie y gráficos en 3D.
- e)** Trazado de curvas de nivel.
- f)** Mayor capacidad de ficheros:
 - Lee ficheros de datos de hasta 32766 filas y columnas, dependiendo de la memoria disponible.
 - Nuevos métodos de rejilla.
 - Nuevos modelos de variogramas.

11. HidroZ@RYS:

Fue creado por Djaofera Ambendahy Zarissee (autor de este trabajo) en el campo de lenguaje de programación de MatLab que permite calcular los siguientes aspectos:

- Coeficiente de filtración de acuíferos por el método de bombeo tanto en régimen estacionario como el no estacionario
- Coeficiente de filtración de acuíferos por el método de vertimiento en pozos
- Coeficiente de filtración de acuíferos por el método de cubeteo en calicata o pozos
- Transmisividad de los acuíferos freáticos y artesianos por los tres métodos mencionados
- Piezoconductividad o conductividad de nivel de los acuíferos
- Entrega de agua de los acuíferos

1.3. Lenguaje de programación utilizado para la elaboración del HidroZ@RYS

El rápido avance de los recursos informáticos permite que estos se extiendan y empleen en áreas donde hace unas décadas resultaba muy costoso y complejo, por ejemplo en el control y supervisión a gran escala de procesos que envuelven importantes gastos energéticos y de insumos, lo que facilita aumentar su conocimiento y que técnicas más elaboradas puedan ser implementadas.

Debido a esto, se hace necesario la introducción gradual de métodos y herramientas que automatizan los procesos de cálculo estadístico y análisis de procesos reales y que a la vez sirvan para ser empleados en laboratorios industriales y docentes para la ejecución de prácticas virtuales en los niveles superiores de formación y posgraduación del profesional, aprovechando las facilidades de recursos que disponen programas tales como el MATLAB, para ser utilizados en la esfera de la minería y en especial en la industria del petróleo.

La selección del método de simulación, teniendo en cuenta su empleo en el sector industrial y académico, puede utilizar varias metodologías a partir de diferentes métodos numéricos. Por ello se escoge, como método de simulación, las herramientas que presenta el MATLAB.

1.3.1. ¿Qué es MATLAB?

MATLAB es un programa interactivo para computación numérica y visualización de datos. Es ampliamente usado por Ingenieros de Control en el análisis y diseño, posee además una extraordinaria versatilidad y capacidad para resolver problemas en matemática aplicada, física, química, ingeniería, finanzas y muchas otras aplicaciones. Está basada en un sofisticado software de matrices para el análisis de sistemas de ecuaciones. Permite resolver complicados problemas numéricos sin necesidad de escribir un programa. MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son

expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional. El nombre de MATLAB proviene de la contracción de los términos MATrix LABoratory y fue inicialmente concebido para proporcionar fácil acceso a las librerías LINPACK y EISPACK, las cuales representan hoy en día dos de las librerías más importantes en computación y cálculo matricial. MATLAB es un sistema de trabajo interactivo cuyo elemento básico de trabajo son las matrices. El programa permite realizar de un modo rápido la resolución numérica de problemas en un tiempo mucho menor que si se quisiesen resolver estos mismos problemas con lenguajes de programación tradicionales como pueden ser los lenguajes Fortran, Basic o C⁺⁺.

MATLAB goza en la actualidad de un alto nivel de implantación en escuelas y centros universitarios, así como en departamentos de investigación y desarrollo de muchas compañías industriales nacionales e internacionales. En entornos universitarios, por ejemplo, MATLAB se ha convertido en una herramienta básica, tanto para los profesionales e investigadores de centros docentes, como una importante herramienta para la impartición de cursos universitarios, tales como sistemas e ingeniería de control, algebra lineal, proceso digital de imagen, señal, etc. En el mundo industrial, MATLAB está siendo utilizado como herramienta de investigación para la resolución de complejos problemas planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería.

Los usos más característicos de la herramienta están en áreas de computación y cálculo numérico tradicional, prototipaje algorítmico, teoría de control automático, estadística, análisis de series temporales para el proceso digital de señal. MATLAB dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyos especializados, denominados Toolboxes, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos Toolboxes cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación destacando entre ellos el "toolbox" de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neurales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc. Además también se dispone del programa Simulink que es un entorno gráfico

interactivo con el que se puede analizar, modelizar y simular la dinámica de sistemas no lineales. (GARCÍA DE JALÓN, 2005).

1.3.2. Origen de MatLab

MATLAB fue originalmente desarrollado en el lenguaje FORTRAN para ser usado en computadoras mainframe. Fue el resultado de los proyectos Linpack y Eispack desarrollados en el *Argonne National Laboratory*. Su nombre, como se dijo anteriormente, proviene de MATrix LABoratory. Al pasar de los años fue complementado y reimplementado en lenguaje C⁺⁺. Actualmente la licencia de MatLab es propiedad de MathWorks Inc. La empresa MathWorks ofrece MatLab como su principal producto para computación numérica, análisis y visualización de datos. También ofrece Simulink como un anexo a MatLab y que interactúa con el lenguaje de MatLab y lenguaje de bajo nivel C⁺⁺. Simulink es usado para simulación modelado no lineal avanzado. Se ofrecen además numerosas herramientas especiales en “Toolboxes” para resolver problemas de aplicaciones específicas, por ejemplo control, procesamiento de señales, redes neurales, etc. Estas herramientas son colecciones de rutinas escritas en MatLab. (LÓPEZ MARTÍNEZ, 2004).

1.3.4. Plataformas

MatLab está disponible para un amplio número de plataformas: estaciones de trabajo SUN, Apollo, VAXstation y HP, VAX, MicroVAX, Gould, Apple Macintosh y PC AT compatibles 80386 o superiores. Opera bajo sistemas operativos UNIX, Macintosh y Windows.

1.3.5. Interacción MATLAB-usuario

Los procedimientos en MATLAB se fundamentan en que una función definida dentro de procedimientos hace posible la realización de algoritmos que constituyen bloques con centenas de funciones predefinidas para la creación de modelos dentro de ventanas que constituyen procedimientos de funciones lineales y no lineales, de sistemas SISO, MIMO y sistemas multilaterales, de forma que cada usuario puede ampliar sus propios bloques modificando los ya existentes o incorporando código MATLAB y C⁺⁺.

Las operaciones de modelación y simulación se controlan de forma interactiva mediante menús interactivos o empleando ventanas elaboradas desde MATLAB para simulaciones con el GUIDE o Interfaz Gráfica del Usuario.

Las múltiples ventanas de MATLAB y las ventanas establecidas al efecto, pueden permanecer abiertos simultáneamente, facilitando así las operaciones de cálculos. Los parámetros de las ventanas se introducen en los cuadros de diálogos como vectores escalares o matrices, empleando valores numéricos o variables y expresiones del MATLAB.

MatLab emplea matrices porque con ellas se puede descubrir infinidad de aspectos de una forma altamente flexible y matemáticamente eficiente. Una matriz de pixeles puede ser una imagen o una película. Una matriz de fluctuaciones de una señal puede ser un sonido o una voz humana. Y tal vez más significativamente, una matriz puede describir una relación lineal entre los componentes de un modelo matemático. En este último sentido, una matriz puede describir el comportamiento de un sistema extremadamente complejo. Por ejemplo una matriz puede representar al vuelo de un avión a 40.000 pies de altura, o un filtro digital de procesamiento de señales.

El software HidroZ@RYS en su versión más reciente, permite realizar pruebas y verificaciones continuas del proceso de cálculo. Con el MATLAB, los ingenieros pueden verificar los resultados, usando una AYUDA en línea para producir especificaciones ejecutables validadas. Por medio de pruebas de sistemas y algoritmos durante la fase de modelación y simulación, los errores pueden ser identificados de manera temprana, en un estado donde las correcciones son más fáciles y de menor costo.

El HidroZ@RYS permite una rápida y adecuada selección de los resultados con datos reales para los cálculos de los parámetros hidrogeológicos que analiza el comportamiento dinámico del agua subterránea, el cual es uno de los factores que interviene en la proyección de las obras subterráneas y en la impermeabilización de las mismas, para asegurar los flujos tecnológicos geólogo-mineros entre otros procesos conocidos. Representando una herramienta poderosa para el desarrollo de laboratorios virtuales para los alumnos de 2do año de la carrera de Ingeniería de minas, 3ro y 5to años de Ingeniería Geológica; y en el desarrollo de investigaciones operacionales de la industria minera cubana.

Cada ventana está compuesta por una o varias ecuaciones de cálculos que fueron obtenidas a partir de la metodología desarrollada en el texto Hidrogeología general y aplicada, reconocido por los especialistas, y que corresponden a las características dinámicas reales del agua subterránea según el tipo de acuífero.

1.4. Conclusiones del Capítulo

1. Aunque existen algunos softwares de la disciplina de Hidrogeología, en este capítulo se abordan elementos necesarios para comprender y fundamentar el Sistema automatizado, las tendencias y tecnologías actuales relacionadas con el tema.
2. Además, de las características del lenguaje de programación utilizado para el diseño del software HidroZ@RYS que se expone en el capítulo 3.

CAPÍTULO II: DETERMINACIÓN DE PARAMETROS HIDROGEOLÓGICOS

2.1. Introducción.

Los parámetros hidrogeológicos son los índices de los cálculos hidrodinámicos, relacionados con el movimiento de las aguas subterráneas en los horizontes acuíferos, en la exploración y explotación de los yacimientos de aguas subterráneas dulces, medicinales, industriales, termales.

Dentro de los parámetros hidrogeológicos se encuentran: el coeficiente de filtración (K), entrega de agua (μ), piezoconductividad (a) o conductividad de nivel (a_y), transmisividad (T). En la actualidad estos parámetros se determinan por datos de trabajos experimentales de filtración; y en menor grado, por los resultados de tomas de aguas en la explotación.

Los métodos actuales de determinación de los parámetros hidrogeológicos están fundamentados por ecuaciones del movimiento régimen no estacionario, estacionario y cuasi-estacionario.

Los métodos de determinación de parámetros hidrogeológicos por trabajos experimentales de filtración se dividen en dos grupos:

1er grupo: Se relaciona con los datos obtenidos durante el periodo de bombeo en pozo, de vertimientos o de inyección, en el transcurso de los cuales no influyen los límites en planta y perfiles del estrato en prueba en las variaciones de los niveles. En este caso las leyes de variación de los niveles se determinan solamente por las propiedades de filtración y de capacidad acuífera de las rocas.

2do grupo: son los métodos basados en los datos de trabajos experimentales, durante los cuales el régimen de variación de los niveles de las aguas subterráneas en tiempo y espacio dependen no solo de las propiedades de filtración y capacidad de las rocas acuíferas, sino también de las condiciones de límites del estrato en plantas y perfiles.

Como anteriormente se mencionó, las pruebas de filtración pueden ser por aforos (bombeos), vertimiento o inyección en calas, pozos y calicatas; las fórmulas y métodos de cálculos adoptados presentan sus características que corresponden al tipo de prueba ejecutada y esquema de cálculos que asume; estos últimos dentro de lo posible

deberán representar las características hidrogeológicas y de límites del área donde se ejecuta la prueba. (DE MIGUEL, 1999).

Para los cálculos de estos parámetros existen dos grupos de métodos fundamentales:

- 1) Métodos grafo-analíticos, en los cuales se conjugan los resultados obtenidos en las pruebas, representados en gráficos; de los que se obtienen parámetros que luego se aplican en fórmulas analíticas establecidas para los cálculos.
- 2) Métodos analíticos, los cuales presentan una amplia variedad de fórmulas en dependencia de las condiciones hidrogeológicas y características propias de las pruebas de filtración.

2.2. Bombeos y sus principales características

Los aforos en calas y pozos representan los principales trabajos experimentales de filtración en las investigaciones con el fin de determinar los parámetros hidrogeológicos de los horizontes acuíferos.

De acuerdo a la tarea a resolver y exigencias de la precisión que se quiera, los aforos pueden ser unitarios, con la medición del gasto y niveles (abatimiento) solamente en el pozo o cala que se afora; de grupos, con medidas del gasto y niveles en el pozo que se afora, y medidas de los niveles en calas perforadas con el fin de observación de los niveles; con medidas del gasto y niveles en varios pozos o calas, y medidas de los niveles en calas de observación.

Según el objetivo de los aforos estos son: de prueba (de 1-6 turnos de trabajo), experimentales (de 10-30 turnos de trabajo) y experimentales de explotación (de 30 o más turnos de trabajo). Cada turno se considera de 8 horas. La duración de los aforos depende también de las condiciones hidrogeológicas del horizonte acuífero que se prueba y periodo del año en que se ejecuta el aforo.

Durante la investigación del acuífero, con el fin de abasto del agua como regla, la duración de los aforos se toma mucho mayor que en investigaciones de estudio de las condiciones hidrogeológicas en yacimientos minerales o para fines de construcción hidrotécnica y de mejoramiento. En el estudio de los horizontes con aforos con el

objetivo de abasto, es preciso no solo la definición de las propiedades de filtración del acuífero, sino también su acuosidad, variación posible de la composición química del agua durante su explotación y otras características del acuífero.

Si las condiciones hidrogeológicas del acuífero investigado es muy complejas y hay que definir las reservas de explotación de las aguas subterráneas, es preferible ejecutar los aforos desde un pozo o cala o grupo de ellos, durante un periodo de tiempo prolongado, en ocasiones es requerido extender los aforos a las condiciones similares a las del proceso de explotación (aforos experimentales de explotación hasta 450 turnos o más). Si la estructura del acuífero está formada por varios estratos, cuando es necesario determinar los parámetros de los distintos estratos, será menester considerar para los aforos construcciones especiales de las calas o pozos que se aforan y las de observación, con la tecnología de perforación que corresponda.

En la proyección de las calas y pozos unitarios o de grupos es necesario por anticipado tener una idea de las metodologías y fórmulas que se usan en los cálculos para cada caso en específico. En dependencia del objetivo y la tarea del aforo, a las condiciones hidrogeológicas y litológicas del acuífero, con los datos de los trabajos especiales de prospección y búsqueda, se selecciona el tipo y método de aforo con la condición de que se prevea el procesamiento necesario de los mismos por fórmulas que se usarán para su procesamiento; luego, se define la necesidad de ejecutar aforos unitarios o de grupos y también la cantidad racional y localización de los pozos de observación, construcción de los pozos, tipo y ubicación de los filtros, teniendo en cuenta el posible caudal del aforo y equipos para el bombeo.

Para elegir la ubicación y la cantidad de turnos en que se ejecutan los aforos hay que tener en cuenta la tarea y el objetivo de estos y el grado de detallamiento necesario; se considera también el relieve, estructura geológica y propiedades hidrogeológicas de los tramos. Cada uno de los tramos donde se ejecutan los aforos debe ser representativo del territorio que se investiga. Para ello, de acuerdo a las posibilidades, no deberán ser seleccionados tramos donde varíe bruscamente la potencia acuífera. Se recomienda también seleccionar aquellos tramos donde el relieve no dificulta una rápida evacuación de las aguas bombeadas. En caso de que esto no sea posible deberá considerarse la

evacuación de las aguas bombeadas mediante tuberías (en acuíferos freáticos), hasta distancias mayores al radio de influencia del aforo.

Los aforos unitarios experimentales se realizan, preferentemente, en aquellos casos en que es preciso determinar el coeficiente de filtración o caudal específico en pozos construidos sin filtros o con filtros que garanticen la entrega de agua máxima de las rocas (rocas carsificadas, rocas muy agrietadas, cantos y gravas, arenas gruesas y medias).

Cuando es menester la determinación del radio de influencia, coeficiente de filtración y otros parámetros, se recomienda la ejecución de aforos de grupos. Las calas de observación se localizan en forma de rayos, normales a la dirección del flujo subterráneo, y coincidentes con ella.

Los aforos de grupos formados por varias calas de observación responderán a la ubicación de estas calas en rayos perpendiculares entre sí. La cantidad de calas y rayos va a depender del grado de heterogeneidad de las características litológicas y de límites del acuífero.

Con un rayo se ejecutan aforos en rocas que presentan una litología relativamente homogénea y sin ningún límite de alimentación o impermeable próximo. Las calas de observación se localizan paralelamente a la dirección del flujo subterráneo.

Con dos rayos se ejecutan aforos en las rocas siguientes:

- a) En rocas agrietadas donde esté bien definida la dirección del agrietamiento, un rayo se ubica en dirección coincidente con la dirección del agrietamiento, y otro normal a la dirección del mismo.
- b) En rocas de estructura heterogénea, un rayo paralelo a la dirección del flujo y otro normal al mismo. Cuando existe una fuente superficial de alimentación próxima un rayo se ubica paralelo al límite de alimentación y otro normal al mismo.

Con cuatro rayos se realizan aforos para una composición litológica muy variable cuando la transmisividad varía en distintas direcciones y es necesario determinar los parámetros hidrogeológicos en los límites de influencia del aforo. Para ello dos rayos se

ubicar normales al flujo, uno paralelo al flujo en dirección con el mismo y otro paralelo a la dirección del flujo en sentido contrario.

La cantidad de calas de observación y distancia entre ellas, en los rayos, se determinan ante todo por el objetivo de la investigación y también por la profundidad de yacencia del horizonte acuífero y condiciones hidrogeológicas del territorio. (DE MIGUEL, 1999).

2.3. Cálculo por bombeos en pozos

Cálculos de parámetros hidrogeológicos en condiciones de régimen estacionario y no estacionario del movimiento de las aguas durante el bombeo.

Cálculos de parámetros hidrogeológicos en horizontes acuíferos homogéneos.

2.3.1. Pozos Perfectos:

Se le llama pozo perfecto aquel pozo en que la penetración del agua subterránea hacia el pozo se efectúa a través de todo el espesor acuífero. Se puede utilizar en acuíferos con movimiento de las aguas subterráneas durante el bombeo con régimen estacionario y no estacionarios. El bombeo puede efectuarse en dos tipos:

Bombeo unitario:

Todas las observaciones se ejecutan solamente en el pozo que se bombea, pozo central.

Acuíferos artesianos

$$K = \frac{0,366Q \log \frac{R}{r_0}}{MS_0}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración de las rocas acuíferas, m / día;

S₀: Abatimiento del nivel, m;

Q: Caudal estabilizado de bombeo, m³ / día;
 R: Radio de influencia del bombeo, m;
 r₀: Radio del pozo que se bombea, m;
 M: Espesor del acuífero artesiano, m;

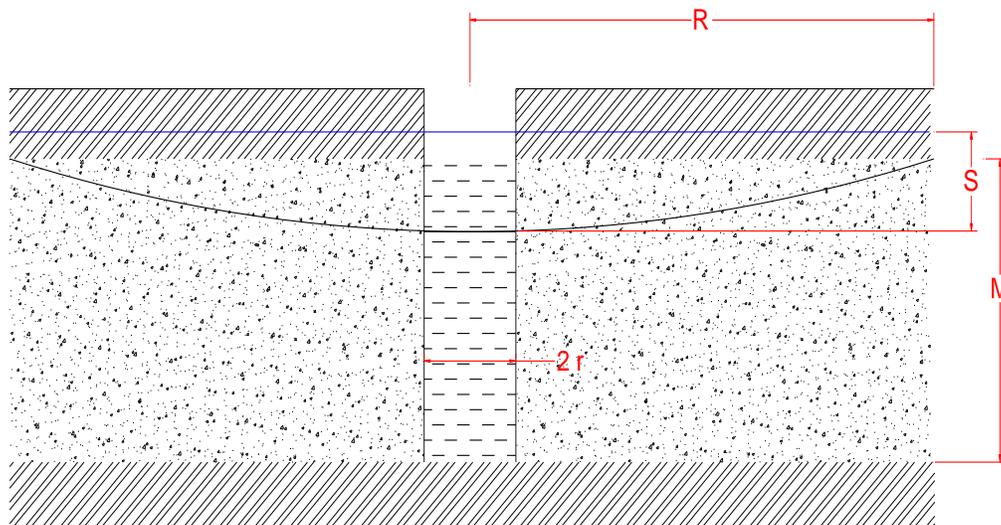


Figura 2.1: Pozo en acuífero artesiano, perfecto, unitario.

Acuíferos freáticos:

$$K = \frac{0,73Q \log \frac{R}{r_0}}{(2H - S_0)S_0}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración de las rocas acuíferas, m / día;
 S₀: Abatimiento del nivel, m;
 Q: Caudal estabilizado de bombeo, m³ / día;
 R: Radio de influencia del bombeo, m;
 r₀: Radio del pozo que se bombea, m;
 H: Espesor de acuífero freático, m.

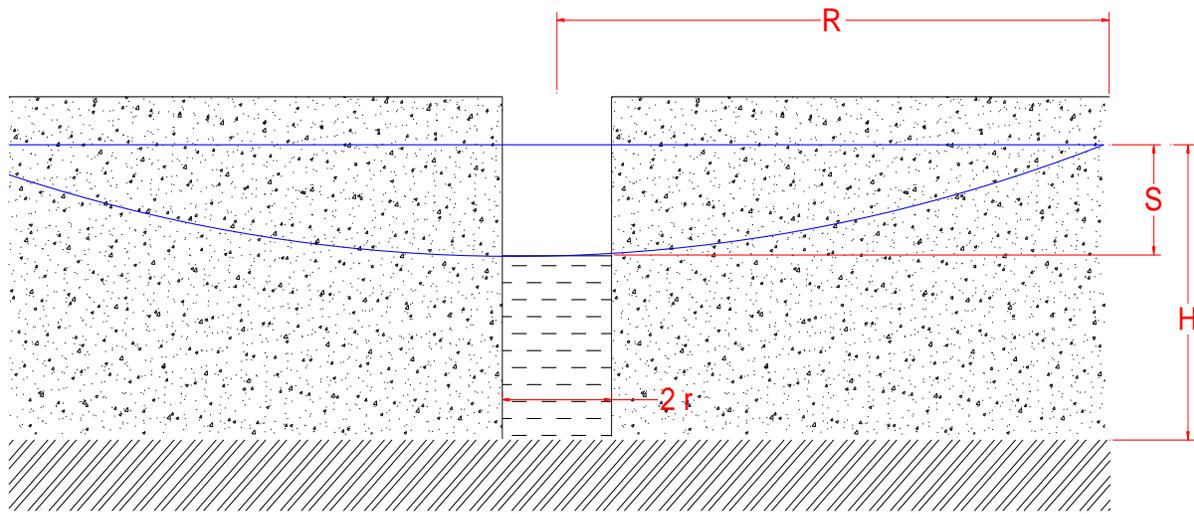


Figura 2.2: Pozo en acuífero freático, perfecto, unitario.

El radio de influencia del bombeo puede calcularse en función del abatimiento específico S_e como se muestra en la tabla siguiente.

$$S_e = \frac{S}{Q}$$

Dónde

S. Abatimiento del bombeo; m

Q: Caudal de bombeo; l / s.

Tabla 1: Valores del radio reducido en función del descenso específico

Abatimiento específico, S_e (m / L . s)	Radio de influencia, R (m)
<0.5	>300
0.5 - 1.0	100 – 300
1.0 - 2.0	50 – 100
2.0 - 3.0	25 – 50
3.0 - 5.0	10 – 25
>0.5	>10

Pozo ubicado próximo a la fuente de alimentación (río, etc.):

- Acuíferos artesianos:

$$K = \frac{0,366Q \log \frac{2L}{r_0}}{MS_0}$$

- Acuíferos freáticos:

$$K = \frac{0,73Q \log \frac{2L}{r_0}}{(2H - S_0)S_0}$$

Dónde:

L: Distancia desde el centro del pozo hasta la fuente de alimentación, m.

K: Coeficiente de filtración de las rocas acuíferas, m / día;

S₀: Abatimiento del nivel, m;

Q: Caudal estabilizado de bombeo, m³ / día;

R: Radio de influencia del bombeo, m;

r₀: Radio del pozo que se bombea, m;

H: Espesor de acuífero freático, m.

M: Espesor de acuífero artesiano, m.

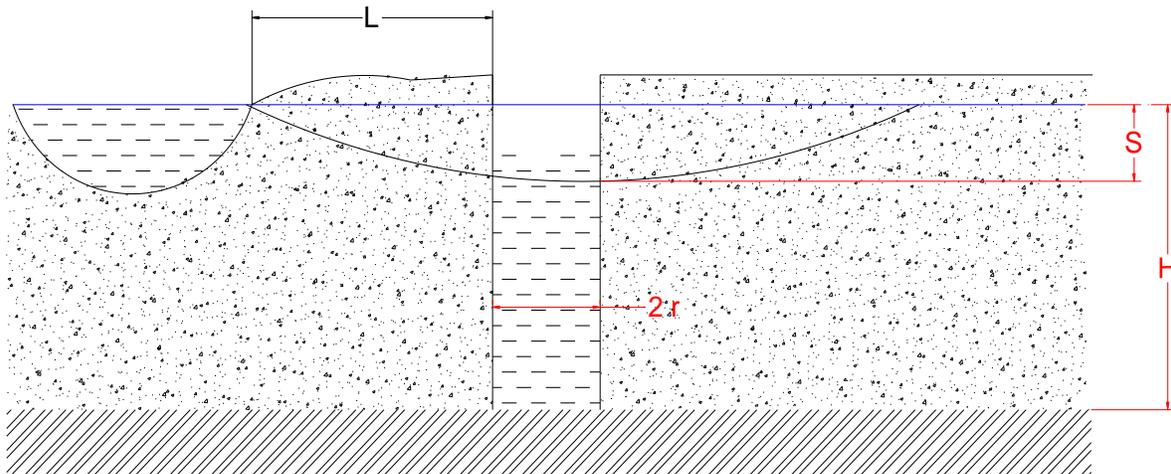


Figura 2.3: Pozo próximo a fuente de alimentación, (río).

Bombeo con un pozo de observación

✚ Acuífero artesiano:

$$K = \frac{0,366Q \log \frac{r_1}{r_0}}{M(S_0 - S_1)}$$

Dónde:

r_1 : Distancia desde el pozo central hasta el pozo de observación, m;

S_1 : Abatimiento estabilizado en el pozo de observación, m.

K: Coeficiente de filtración de las rocas acuíferas, m / día;

S_0 : Abatimiento del nivel, m;

Q: Caudal estabilizado de bombeo, m³ / día;

R: Radio de influencia del bombeo, m;

r_0 : Radio del pozo que se bombea (central), m;

M: Espesor de acuífero artesiano, m.

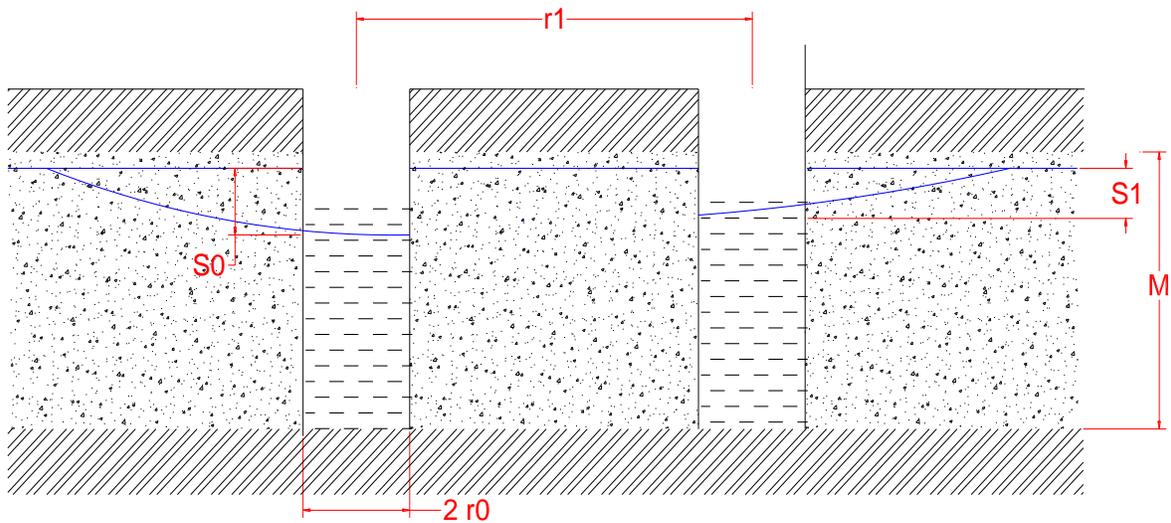


Figura 2.4: Pozo en acuífero artesiano, perfecto, con un pozo de observación.

✚ Acuífero freático:

$$K = \frac{0,73Q \log \frac{r_1}{r_0}}{(2H - S_0 - S_1)(S_0 - S_1)}$$

Dónde:

r_1 : Distancia desde el pozo central hasta el pozo de observación, m;

S_1 : Abatimiento estabilizado en el pozo de observación, m.

K : Coeficiente de filtración de las rocas acuíferas, m / día;

S_0 : Abatimiento del nivel, m;

Q : Caudal estabilizado de bombeo, m^3 / día;

R : Radio de influencia del bombeo, m;

r_0 : Radio del pozo que se bombea (central), m;

H : Espesor de acuífero freático, m.

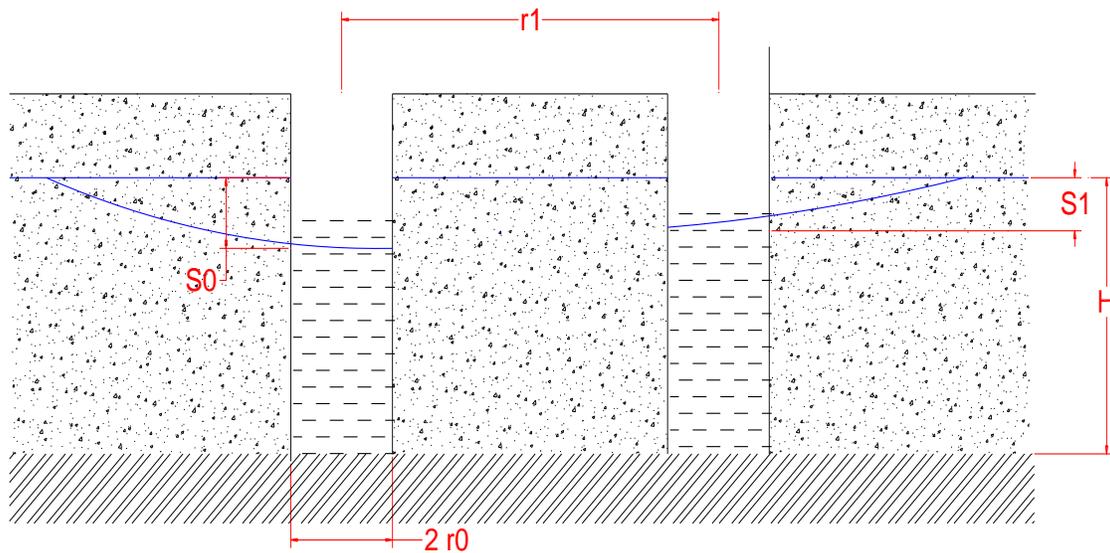


Figura 2.5: Pozo freático, perfecto, con un pozo de observación.

Bombeo con dos pozos de observación

El pozo central en bombeo, con dos pozos de observación de niveles.

✚ Acuíferos artesianos:

$$K = \frac{0,366Q \log \frac{r_2}{r_1}}{M(S_1 - S_2)}$$

Dónde:

r_1 : Distancia hasta el pozo de observación más próximo; m.

S_1 : Abatimiento de nivel en el pozo de observación más próximo; m.

r_2 : Distancia hasta el pozo de observación más distante; m.

S_2 : Abatimiento de nivel en el pozo de observación más distante; m.

Q: Caudal estabilizado de bombeo, $m^3 / \text{día}$;

M: Espesor de acuífero artesiano, m.

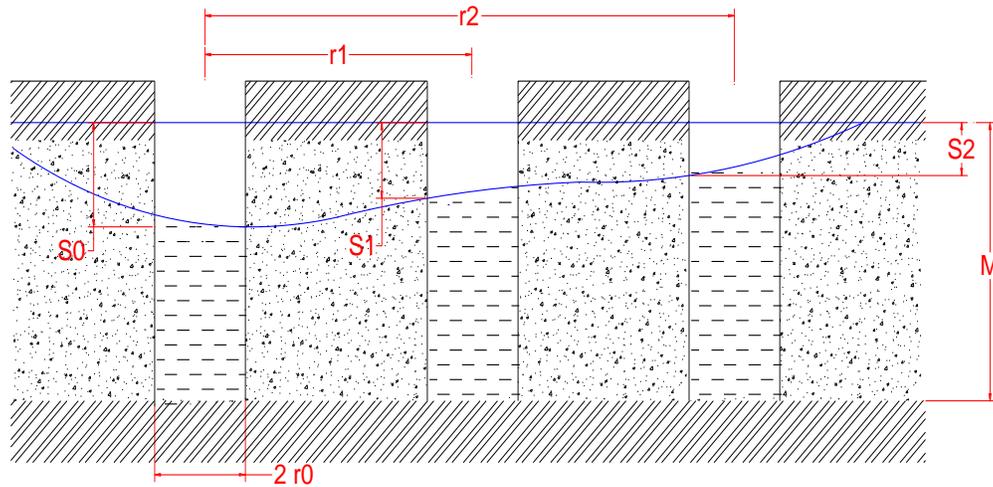


Figura 2.6: Pozo en acuífero artesiano, perfecto, con dos pozos de observación.

➤ Acuíferos freáticos:

$$K = \frac{0,73Q \log \frac{r_2}{r_1}}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)}$$

Dónde:

r_1 : Distancia hasta el pozos de observación más próximo; m.

S_1 : Abatimiento de nivel en el pozo de observación más próximo; m.

r_2 : Distancia hasta el pozo de observación más distante; m.

S_2 : Abatimiento de nivel en el pozo de observación más distante; m.

Q : Caudal estabilizado de bombeo, $m^3 / \text{día}$;

H : Espesor de acuífero freático, m.

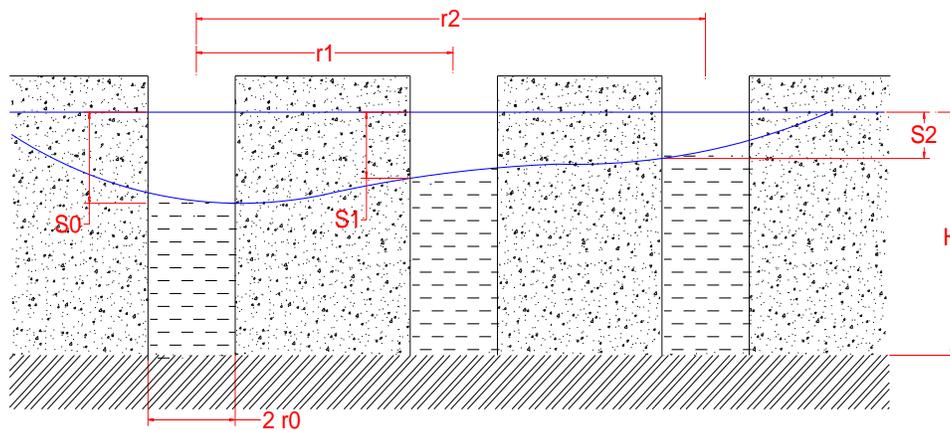


Figura 2.7: Pozo perfecto, en acuífero freático, con dos pozos de observación.

2.3.2. Pozos Imperfectos

Un pozo es llamado imperfecto cuando el agua penetra al pozo solamente por una porción de su profundidad, bien sea porque el pozo en rocas estables que no requieren filtros no penetra en todo el espesor acuífero o porque el pozo aunque atraviese todo el espesor acuífero cuenta con filtros que no atraviesan todo el espesor acuífero, bien porque los filtros están ubicados próximo al techo acuífero, en su centro o próximo al lecho acuífero, tanto con bombeo en régimen estacionario como no estacionario.

En muchas ocasiones esta zona de penetración es con una estructura de rocas sueltas e inestables, por lo tanto se acostumbra encamisarla con un filtro que permita el paso del agua. Como es obvio que en la mayoría de los casos el agua no penetra por toda la longitud del pozo sino por una zona donde le es más fácil penetrar, entonces en adelante cuando hablamos de la longitud del filtro (l) estaremos utilizando el mismo término para decir la magnitud de la zona donde se efectúa la penetración del agua al pozo, aunque no constituya prácticamente un filtro colocado en la misma, pues si las rocas son estables no es necesario colocar el filtro artificial. (BOCHEVIER y DE MIGUEL, 1968, 1999).

Al igual que los pozos perfectos, se puede efectuar dos tipos de bombeos cuando los pozos son imperfectos: bombeo unitario y bombeo de grupo.

Bombeo unitario

➤ Acuífero artesiano:

$$K = \frac{0,366Q \left(\log \frac{R}{r_0} + 0,217\xi_0 \right)}{MS_0}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración de las rocas acuíferas, m / día;

S₀: Abatimiento del nivel, m;

Q: Caudal estabilizado de bombeo, m³ / día;

R: Radio de influencia del bombeo, m;

r₀: Radio del pozo que se bombea, m;

M: Espesor del acuífero artesiano, m;

ξ₀. Coeficiente de imperfección del pozo. (Ver Anexo 1)

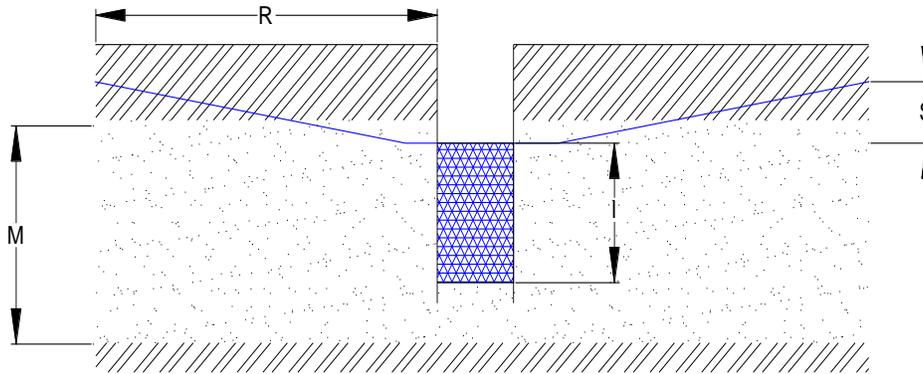


Figura 2.8: Pozo en acuífero artesiano, unitario, imperfecto.

➤ Acuífero freático:

$$K = \frac{0,73Q \left(\log \frac{R}{r_0} + 0,217\xi_0 \right)}{(2H - S_0)S_0}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración de las rocas acuíferas, m / día;

S_0 : Abatimiento del nivel, m;

Q: Caudal estabilizado de bombeo, m^3 / día;

R: Radio de influencia del bombeo, m;

r_0 : Radio del pozo que se bombea, m;

H: Espesor del acuífero freático, m;

ξ_0 . Coeficiente de imperfección del pozo. (Ver Anexo 1)

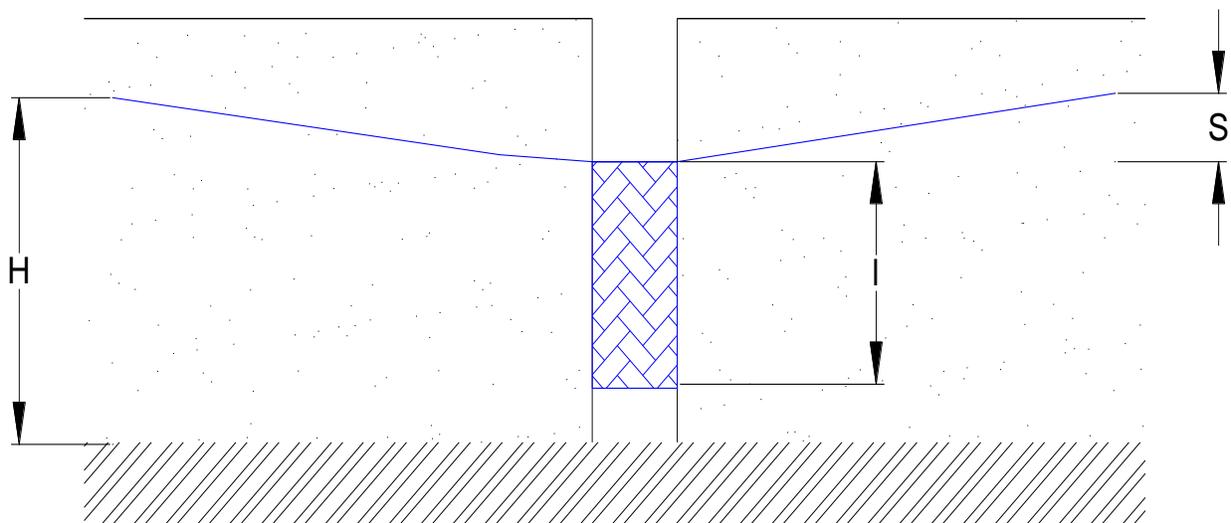


Figura 2.9: Pozo en acuífero freático, imperfecto.

Bombeo con un pozo de observación:

La realización del bombeo es similar a la del pozo perfecto con un pozo de observación, con la única diferencia de que aquí las imperfecciones del pozo bombeado y del pozo de observación influyen en el valor del coeficiente de filtración. Las fórmulas para los cálculos en cada tipo de acuíferos son las siguientes.

➤ **Acuíferos artesianos:**

$$K = \frac{0,366Q \left[\log \frac{r_1}{r_0} + 0,217(\xi_0 - \xi_1) \right]}{M(S_0 - S_1)}$$

➤ Acuíferos freáticos:

$$K = \frac{0,73Q \left[\log \frac{r_1}{r_0} + 0,217(\xi_0 - \xi_1) \right]}{(2H - S_0 - S_1)(S_0 - S_1)}$$

Dónde:

ξ_0 . Coeficiente de imperfección del pozo bombeado

ξ_1 . Coeficiente de imperfección del pozo de observación

r_1 : Distancia desde el pozo central hasta el pozo de observación, m;

S_1 : Abatimiento estabilizado en el pozo de observación, m.

K: Coeficiente de filtración de las rocas acuíferas, m / día;

S_0 : Abatimiento del nivel, m;

Q: Caudal estabilizado de bombeo, m³ / día;

R: Radio de influencia del bombeo, m;

r_0 : Radio del pozo que se bombea (central), m;

M: Espesor de acuífero artesiano, m.

H: Espesor de acuífero freático, m.

Bombeo con dos pozos de observación:

Al igual que para un pozo con un pozo de observación, las imperfecciones de los pozos entran tienen influyen sobre el coeficiente de filtración.

➤ Acuíferos artesianas:

$$K = \frac{0,366Q \left[\log \frac{r_2}{r_1} + 0,217(\xi_1 - \xi_2) \right]}{M(S_1 - S_2)}$$

➤ Acuíferos freáticos:

$$K = \frac{0,73Q \left[\log \frac{r_2}{r_1} + 0,217(\xi_1 - \xi_2) \right]}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)}$$

Dónde:

r_1 : Distancia hasta el pozos de observación más próximo; m.

S_1 : Abatimiento de nivel en el pozo de observación más próximo; m.

r_2 : Distancia hasta el pozo de observación más distante; m.

S_2 : Abatimiento de nivel en el pozo de observación más distante; m.

Q: Caudal estabilizado de bombeo, m³ / día;

H: Espesor de acuífero freático, m.

M: Espesor de acuífero artesiano, m.

ξ_1 : Coeficiente de imperfección del pozo de observación más próximo.

ξ_2 : Coeficiente de imperfección del pozo de observación más distante.

Valores del coeficiente de imperfección ξ (ver Anexo 1)

2.3.3. Cálculo del radio de influencia de bombeo en pozos imperfectos

Las fórmulas para determinar el radio de influencia en los pozos imperfectos son las siguientes:

Acuíferos artesianos

✚ Con un pozo se observación:

$$\log(R) = \frac{S_0 \log r_1 - S_1 \log r_0}{S_0 - S_1}$$

✚ Con dos pozos de observación:

$$\log(R) = \frac{S_1 \log r_2 - S_2 \log r_1}{S_1 - S_2}$$

Acuíferos freáticos:

✚ Con un pozo de observación:

$$\log(R) = \frac{(2H - S_0)S_0 \log r_1 - (2H - S_1)S_1 \log r_0}{(S_0 - S_1)(2H - S_0 - S_1)}$$

✚ Con dos pozos de observación:

$$\log(R) = \frac{(2H - S_1)S_1 \log r_2 - (2H - S_2)S_2 \log r_1}{(S_1 - S_2)(2H - S_1 - S_2)}$$

Dónde los parámetros son los mismos mencionados anteriormente en cada tipo de bombeo correspondiente.

2.4. Cálculos del coeficiente de filtración por datos de cubeteo y bombeos instantáneos

Durante bombeos intensivos de corta duración o cubeteos sin estabilización del nivel del agua, el coeficiente de filtración de los acuíferos puede determinarse mediante las expresiones que se muestran a continuación.

- **Primer Caso:**

Por datos de la recuperación del nivel, según A. P. Erkin

$$K = \frac{3,5r^2U}{L + 2r}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración, m / día,

r: Radio del pozo, cm,

L: Profundidad del nivel antes de iniciado el bombeo o cubeteo, cm,

U: Coeficiente que se calcula de la siguiente forma; s

$$U = \frac{\log Y_0 - \log Y_n}{\sum (t_1 + t_2 + \dots + t_n)}$$

Y_0 : Abatimiento al finalizar el bombeo o cubeteo, cm,

Y_n : Último abatimiento tomado en tiempo t_n (en segundo), a partir del instante en que se detuvo el bombeo o cubeteo, cm.

$\sum(t_1 + t_2 + \dots + t_n)$: Sumatoria de los tiempos de cada medición de nivel a partir del instante en que se detuvo el bombeo o cubeteo en segundo. (Ver Figura siguiente).

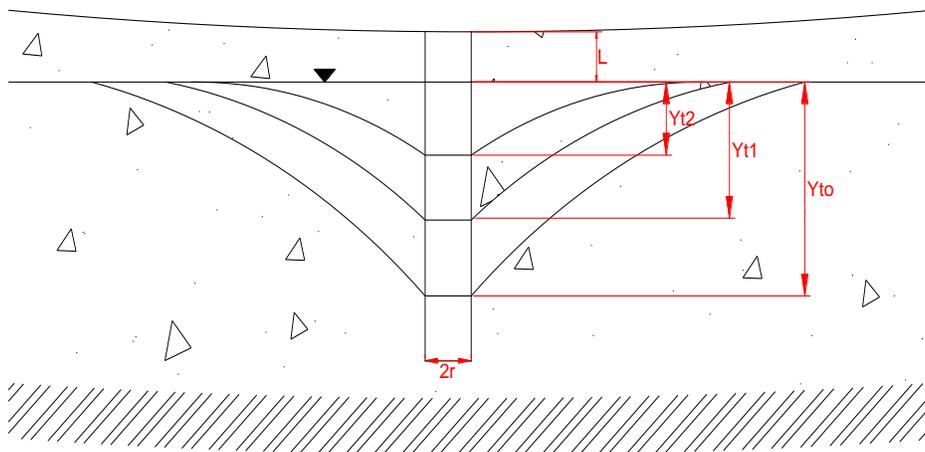


Figura 2.10: Esquema de recuperación de niveles a partir de suspensión de cubeteo o bombeo.

- **Segundo caso:**

Por columna de agua en el pozo durante el bombeo o cubeteo, según F. M. Bochevier.

$$K = \frac{Q}{2H \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{\ln t_2 - \ln t_1} \right)}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración, m,

Q: Caudal de bombeo o cubeteo, m³ / día,

h₁ y h₂: Columnas de agua en el pozo (en m) en los tiempos t₁ y t₂ (en días) respectivamente a partir del inicio del bombeo o cubeteo.

- **Tercer caso:**

Por recuperación del nivel. En este caso debe considerarse la forma de entrada del agua al pozo, por el fondo del pozo cuando el mismo se encuentre encamisado.

$$K = 1,8 \frac{r}{t} \log \left(\frac{S_1}{S_2} \right)$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración, cm / s (se multiplica por 864; en m / día.),

r: Radio del pozo, cm,

t: Período de tiempo (s.) entre las mediciones del nivel S₁ y S₂ tomados en cm.

Cuando el pozo es imperfecto y al mismo se le ubican filtros en todo el intervalo del espesor acuífero

$$K = \frac{r^2(S_1 - S_2)}{(S_1 + S_2)t\sqrt{ld}}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración, m / día,

r: Radio del filtro, m,

S₁ y S₂: Ascensos del nivel a partir del inicio de la recuperación, m,

t: tiempo transcurrido entre los ascensos S₁ y S₂, m,

l: Largo del filtro, m,

d: Diámetro del filtro, m.

2.5. Determinación de parámetros hidrogeológicos por datos de vertimientos en pozos

El objetivo de estos tipos de pruebas es determinar el coeficiente de filtración en acuíferos de rocas y sedimentos poco permeables o de rocas y sedimentos de la zona de aeración. En la práctica los trabajos para este fin se llevan a cabo principalmente en investigaciones para fines de construcción de obras hidrotécnicas y de mejoramiento de suelo, aunque pueden tener un amplio desarrollo en otras investigaciones ingeniero-geológicas.

2.5.1. Vertimientos en pozos en zona de saturación

- **Primer caso:**

Para acuíferos con espesor menor de 5 metros se puede utilizar la formula siguiente:

$$K = \frac{0,733Q \lg \frac{R}{r_0}}{h^2 - H^2}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración, m / día;

Q: Caudal estabilizado del vertimiento, m³/día;

R: Radio del cono de vertimiento (m) puede calcularse sobre la base del descenso específico del nivel de la tabla 1 o por pozos de observación.

r₀: Radio del pozo, m;

h: Columna de agua con nivel estabilizado en el pozo, m;

H: Espesor acuífero, m.

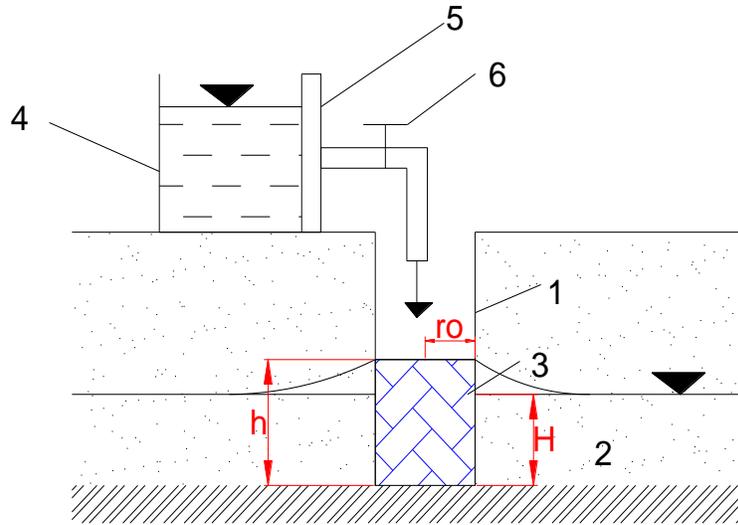


Figura 2.11: Esquema de vertimiento en estrato freático de poco espesor. 1. Pozo; 2. Horizonte acuífero; 3. Filtros; 4. Envase de agua; 5. Regla graduada; 6. Manguera con llave reguladora.

- **Segundo caso:**

Acuífero con espesor considerable (mayor de 5m).

$$K = 0,525 * q * \log\left(\frac{0,66l_0}{r_0}\right)$$

Dónde:

K: coeficiente de filtración, m/día;

q: Absorción específica, m/día

$$q = \frac{Q}{l_0 H_0}$$

Q: Caudal estabilizado de vertimiento;

l_0 : Largo del tramo en prueba (largo de filtro), m;

H_0 : Carga hidrostática sobre el nivel del agua natural (antes del vertimiento), m.

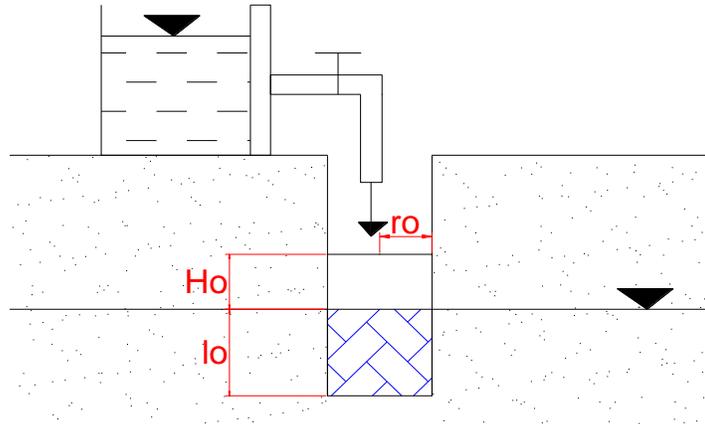


Figura 2.12: Esquema de vertimiento en estratos acuíferos de espesores considerables.

2.5.2. Vertimiento en pozo en zona no saturada

- **Primer caso:**

Cuando se desconoce la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas.

$$K = 0,423 * \frac{Q}{l_0^2} * \log \frac{2 * l_0}{r_0}$$

Dónde:

K: Coeficiente de filtración, m/día;

Q: Caudal estabilizado de vertimiento, m³/día;

l₀: Columna de agua en el pozo, m;

r₀: Radio del pozo, m.

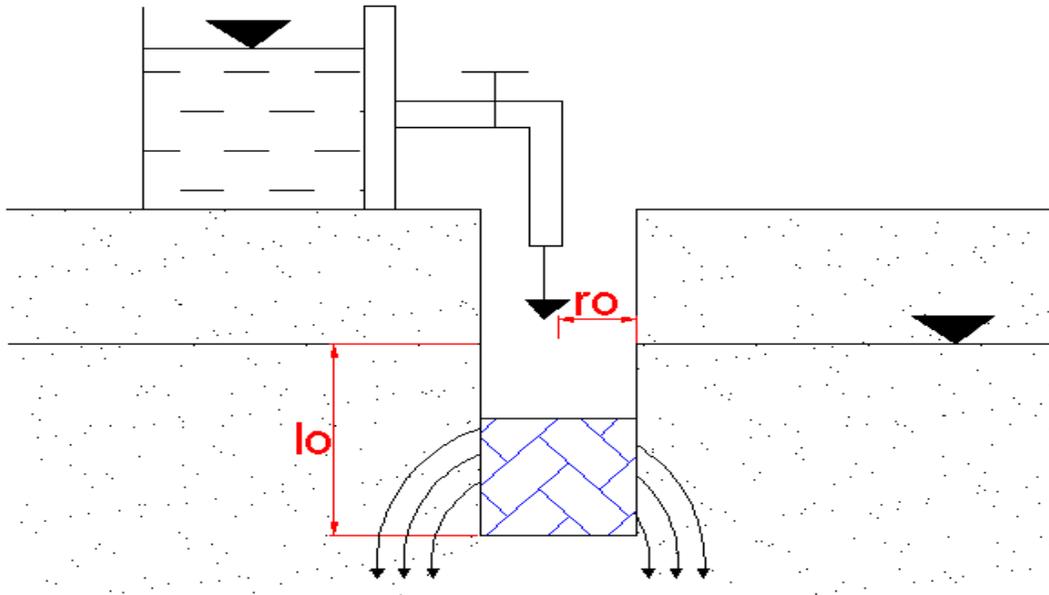


Figura 2.13: Esquema de vertimiento en zona no saturada donde se desconoce la profundidad de yacencia del nivel del agua subterránea.

- **Segundo caso:**

Cuando se conoce la profundidad de yacencia del nivel de las aguas subterráneas.

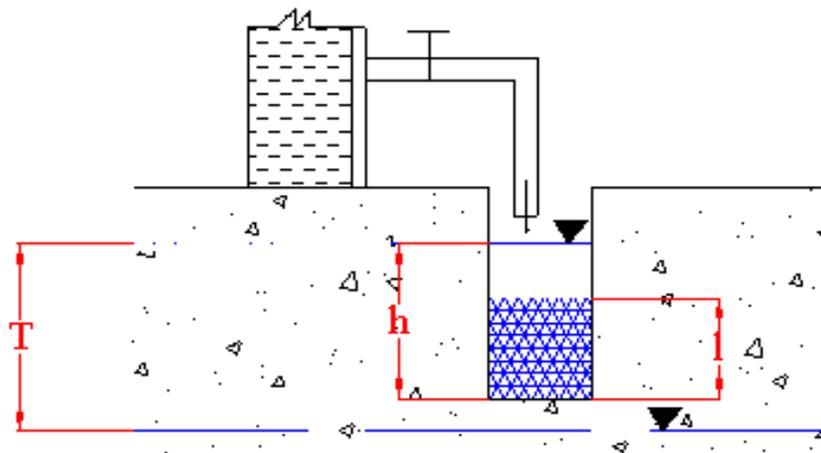


Figura 2.14: Esquema de vertimiento en zona no saturada en pozos donde se conoce la profundidad de yacencia del nivel de las aguas subterráneas.

Entre las fórmulas más utilizadas tenemos las variantes de cálculo a continuación. El grafico que determina la utilización de cada uno de estas fórmulas puede verse en la figura siguiente.

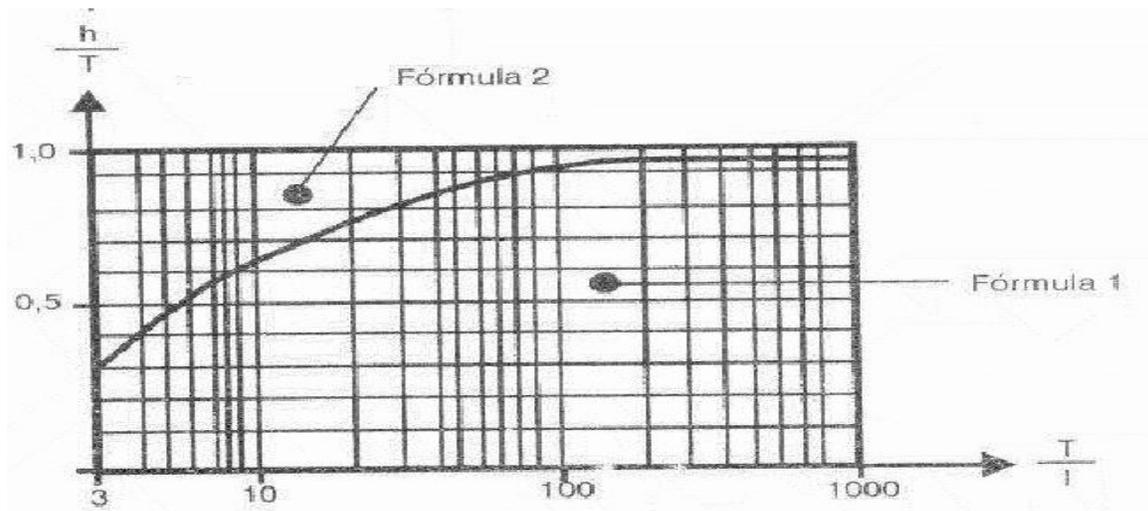


Figura 2.16: Grafico para la aplicación de la fórmula 1 y la fórmula 2

Primera variante de cálculo (formula1).

$$K = \frac{Q}{C_1 r h}$$

Segunda Variante de cálculo (formula2).

$$K = \frac{2Q}{r(C_2 + 4)(T + h - l)}$$

Dónde:

K: coeficiente de filtración, m/día;

Q: caudal estabilizado de vertimiento, m³/día;

r: Radio del pozo, m;

h: Columna de agua sobre el extremo inferior del filtro con nivel estabilizado en el pozo, m;

T: Columna de agua desde el nivel estabilizado en el pozo hasta el nivel del agua subterránea, m;

l: longitud de filtros, m;

C_1, C_2 : Coeficientes se determinan por los gráficos siguientes:

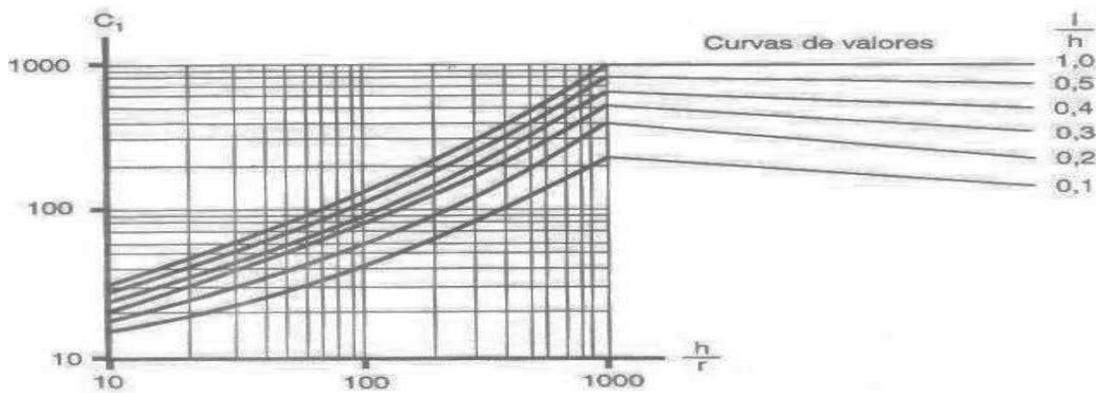


Figura 2.17 Gráfico para determinar C_1

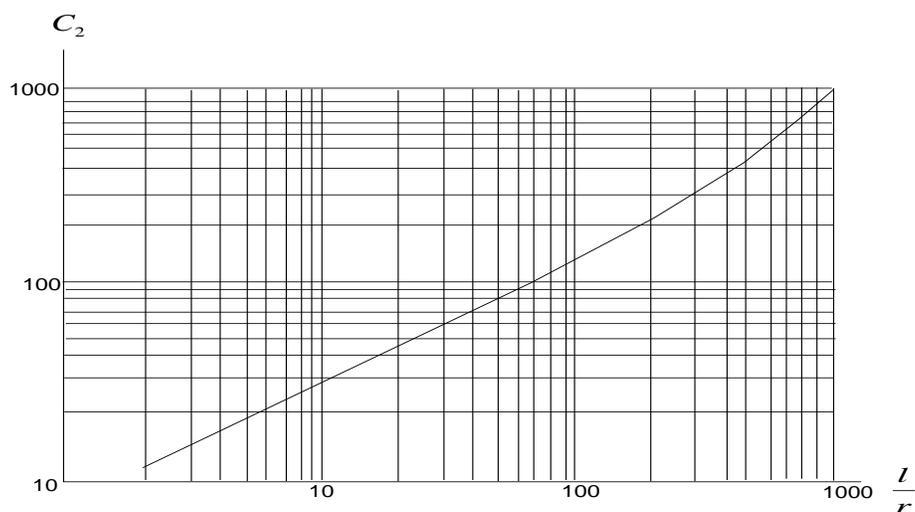


Figura 2.18: Gráfico para determinar C_2

2.5.3. Vertimiento en calicatas

Se ejecuta para la determinación del coeficiente de filtración en la zona no saturada hasta profundidades no mayores de 3 hasta 5 m.

1. Método de A. K. Bóldiriev

$$Q = K * I * F$$

Dónde:

Q: Caudal estabilizado de vertimiento, m³/día;

F: Área de la sección del orificio, m²;

I: Gradiente de la carga

$$I = \frac{H_0 + l}{l} = \frac{H_0}{l} + 1$$

H_0 : Altura del nivel del agua sobre el fondo del orificio (10 – 12 cm.);

l : Profundidad de penetración del agua al finalizar la prueba, m.

Cuando el vertimiento se realiza por un tiempo relativamente prolongado (más de 2 horas) la infiltración del agua se considera vertical, de donde el gradiente $I = 1$.

$$K = \frac{Q}{F}$$

Dónde:

Q. Caudal de vertimiento, m³/día.

F. Área del fondo del orificio, m²

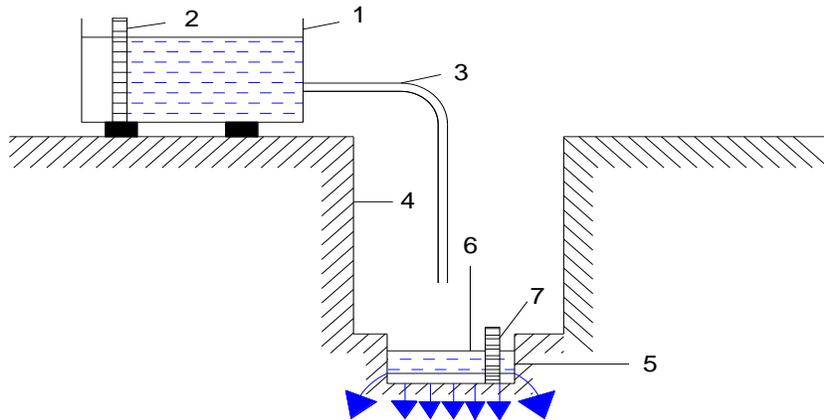


Figura 2.19: Esquema de instalación para vertimiento en calicatas por el método de K. Bóldiriev. 1. Envase de agua; 2. Regla para el control del nivel del agua. 3. Manguera con llave para regular el caudal de vertimiento; 4. Pared de la calicata; 5. Orificio en el fondo de la calicata; 6. Nivel del agua en el orificio; 7. Regla con marca para mantener el nivel del agua estabilizado.

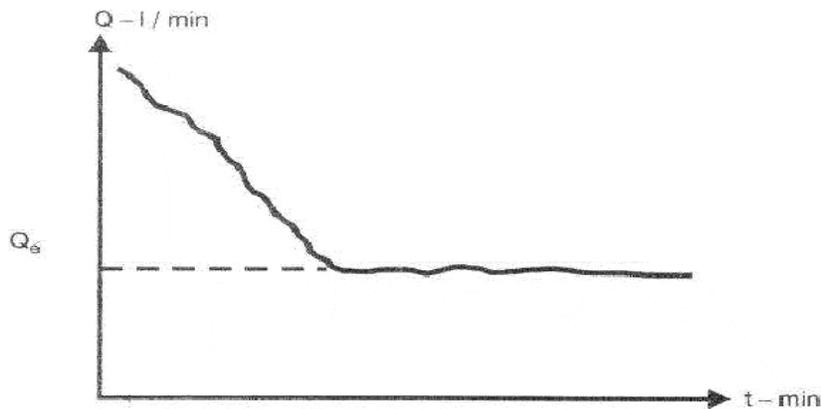


Figura 2.20: Gráfico característico de $Q = f(t)$.

2. Método de G. N. Kamiénsky

El coeficiente de filtración se calcula por la fórmula:

$$K = \psi Q_e$$

Dónde:

K: coeficiente de filtración, m/día;

ψ : Coeficiente de correlación de N. K. Guirínsky, se determina por tabla 4 (Anexo 3).

$$\psi = f \left[H_0 + H_c \right]; d^-;$$

H_0 : Lámina de agua en el orificio, m.

H_c : Ascenso capilar (Ver Anexo 3), m.

d : Diámetro del anillo, cm.

Q_e : Volumen de agua que se vierte al envase regulador 1 (Figura 2.39), en períodos de tiempo t .

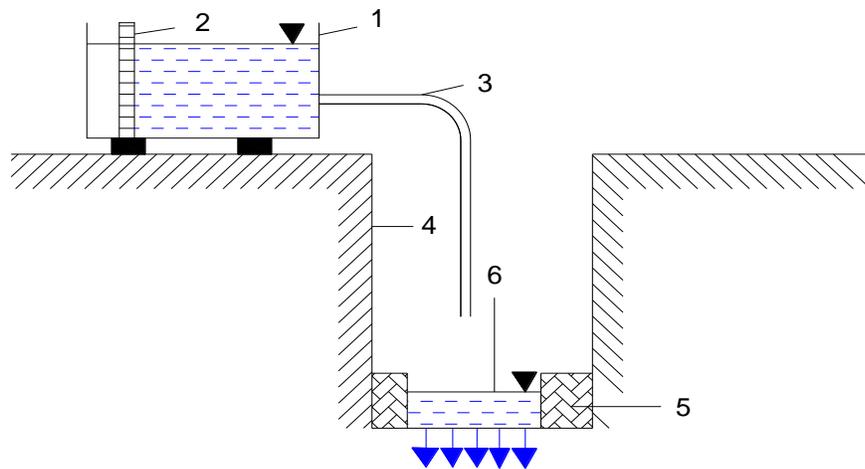


Figura 2.21: Esquema de instalaciones para vertimientos en calicatas por el método G. N. Kamienski. 1. Envase de agua; 2. Regla para control del nivel del agua; 3. Manguera con llave reguladora; 4. Pared de la calicata; 5. Anillo metálico; 6. Nivel estabilizado del agua dentro del anillo; 7. Material arcilloso vertido alrededor del anillo (débilmente compactado).

3. Método de N. K. Guirínsky.

Los cálculos del coeficiente de filtración igual al primer caso se ejecuta por la formula siguiente:

$$K = \frac{Q}{F}$$

Dónde:

F: Área de la sección por la que penetra o atraviesa el agua, m².

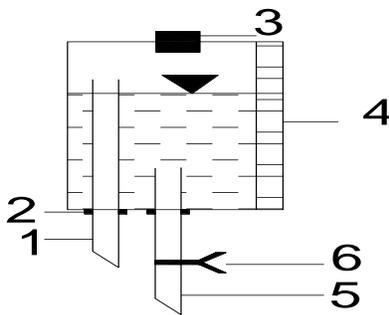


Figura 2.22: Esquema del envase de Mariott. 1. Tubo de aire; 2. Junta de ajuste; 3. Tapa con rosca; 4. Envase cilíndrico con regla graduada; 5. Tubo de agua; 6. Llave reguladora; 7. Anillo para traslado del equipo.

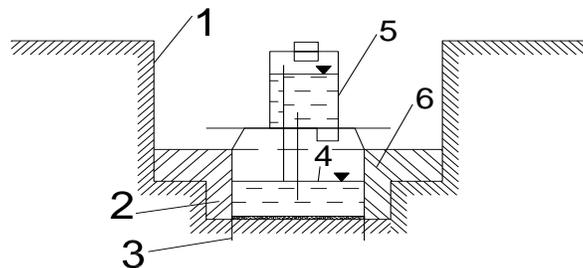


Figura 2.23: Esquema de instalación para vertimiento en calicatas por el método de N. K. Guirínsky. 1. Pared de la calicata; 2. Orificio en el fondo de la calicata. 3. Anillo; 4. Nivel del agua estabilizado; 5. Envase de Mariott. 6. Relleno arcilloso.

4. Método de N. S. Nesteróv.

Los cálculos del coeficiente de filtración igual al primer caso se ejecutan por la fórmula siguiente:

$$K = \frac{Q}{F}$$

Dónde:

F: Área de la sección por la que penetra o atraviesa el agua, m².

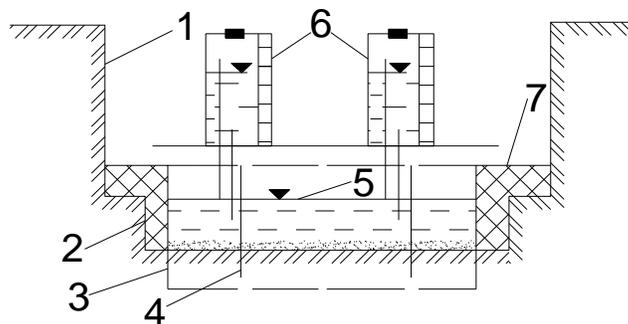


Figura 2.24: Esquema de instalación por vertimiento en calicatas por el método de N. S. Nesteróv. 1. Pared de la calicata; 2. Orificio en el centro de la calicata; 3. Anillo exterior; 4. Anillo interior; 5. Nivel del agua dentro de los anillos; 6. Envases de Mariott; 7. Relleno arcilloso.

2.6. Conclusión del segundo capítulo

1. En este capítulo se pudo ver cuáles son los métodos principales que se usan para determinar el coeficiente de filtración de los acuíferos artesianos y freáticos tanto en régimen de bombeo estacionario como no estacionario.
2. Se presentaron los principales casos y métodos para determinar la permeabilidad en la zona no saturada.
3. Además, vimos la diferencia de cada método y las condiciones requeridas para su aplicación en la práctica.

CAPÍTULO III: PLANEACIÓN Y DISEÑO DEL SOFTWARE HidroZ@RYS

3.1. Introducción

En este capítulo se introduce la fase de diseño y planeación del Software, donde se manifiestan las necesidades del cliente, se describen las distintas funcionalidades que constituirán objeto de automatización.

3.2. Funcionalidades generales

Según los hidrogeólogos de Cuba, se revela que el cálculo de los parámetros hidrogeológicos en las investigaciones que se realizan, se hace manual, lo cual hace el proceso más lento, con el consiguiente aumento de gastos de papel y otros materiales e incrementa la posibilidad de cometer errores en el momento de editar la información de los mismos.

3.3. Generalidades del software

Este software se diseña para la etapa de gabinete en el cálculo de los parámetros hidrogeológicos durante las investigaciones hidrogeológicas para determinar el coeficiente de filtración (K) mediante tres métodos referidos en el capítulo anterior: bombeo, vertimiento y cubeteos, aplicados según las condiciones y características del acuífero. La figura 3.1 muestra la ventana de inicio del software donde se aprecian los métodos.



Figura 3.1: Presentación de los contenidos del Software HidroZ@RYS

Al operar con el Software, debe introducir para estos métodos los datos lógicos. Si durante la ejecución de los cálculos se comete un error el software advierte el error mediante un mensaje mostrado en una ventana como la que se observa en la figura 3.2.



Figura 3.2: Aviso del software al cometerse un error en el cálculo

Los datos y los resultados obtenidos del cálculo con el software HidroZ@RYS se pueden exportar a una base de datos y se imprime o simplemente se guarda dentro de una carpeta. Ejemplo de una impresión está en la figura mostrada a continuación (Figura 3.3).

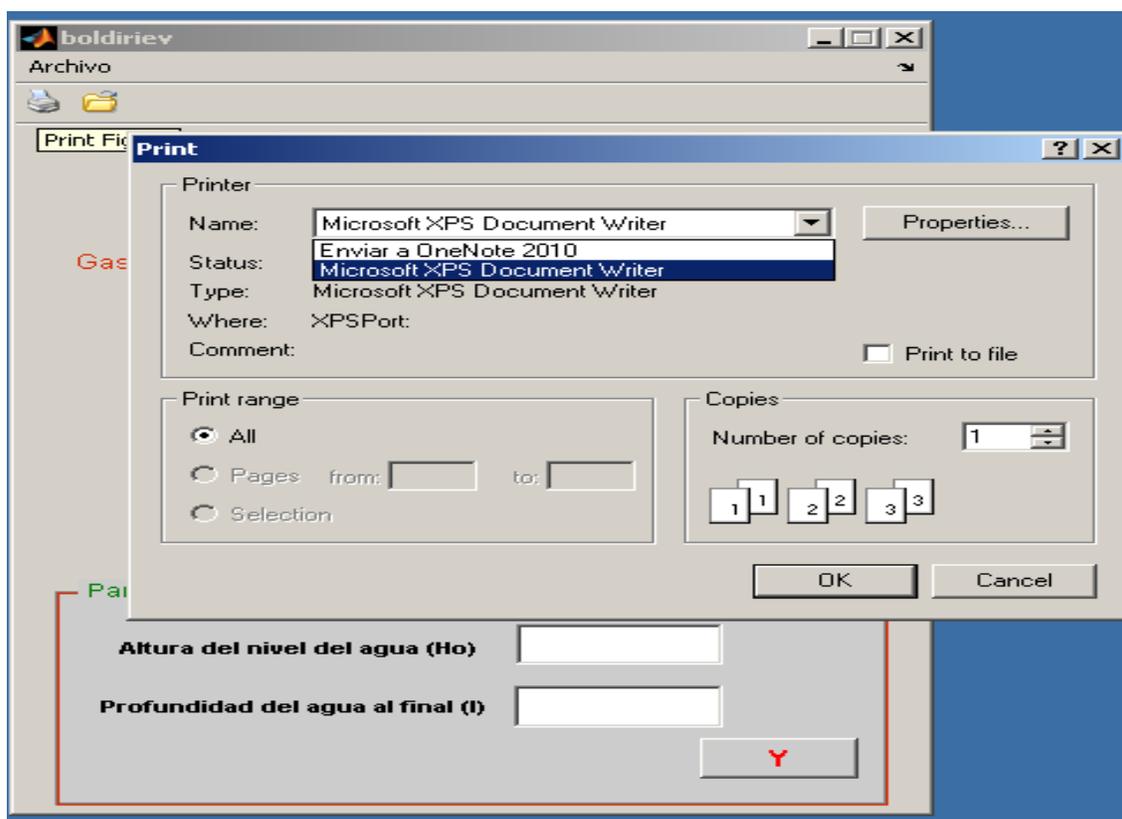


Figura 3.3: Herramienta de imprimir del software HidroZ@RYS

3.4. Cálculos básicos del software

El software consta de tres métodos básicos (Bombeo, cubeteo y vertimiento) que se utilizan en la determinación del coeficiente de filtración de los acuíferos en dependencia de sus características geológicas e hidrogeológicas y de otros factores que influyen en la determinación experimental del mismo. Esta sección se dedica a la representación de los tres métodos con sus parámetros analíticos y su automatización dentro del software HidroZ@RYS.

3.4.1. Cálculo del coeficiente de filtración por el método de Bombeo

Se obtienen diferentes formas empíricas con la aplicación de este método, que permite establecer ecuaciones de manera más o menos fija y accesible para cada caso concreto del estado del acuífero: freático y artesiano. En estos últimos, en dependencia de la profundidad del pozo de bombeo con respecto al espesor del acuífero se definen dos tipos de bombeo: con pozos perfectos o con pozos imperfectos.

Para realizar el cálculo por método de Bombeo con el software HidroZ@RYS los cálculos se dividen en 2 partes; uno para un acuífero artésiano y otro para un acuífero freático. Y a su vez, pueden efectuarse en dependencia del tipo y número de pozo de bombeo y/o de observación, así como la perfección o imperfección del pozo.

El desarrollo de este método se observa a continuación (figura 3.4):

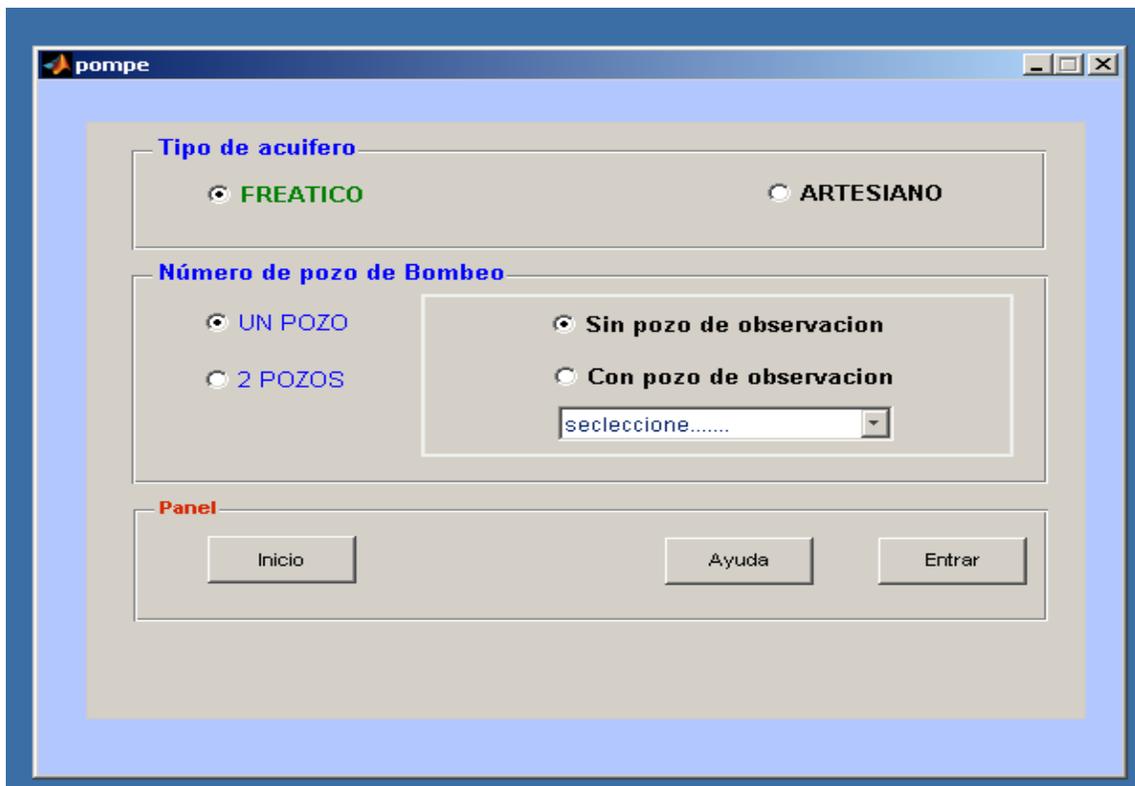


Figura 3.4: Ventana principal para el método de bombeo

Acuífero freático:

Al seleccionar, tipo de acuífero en el cuadro superior y marcando el número de pozo de bombeo (en la práctica generalmente UN POZO) y designar si el bombeo se efectuó sin pozo de observación (pozo unitario en este caso) o con pozo de observación (seleccionando al mismo tiempo el número de pozo de observación dentro del popupmenu). Se despliega una ventana de acuerdo a la opción.

El desarrollo de lo anterior se muestra en el ejemplo siguiente, donde el cálculo es para un **acuífero freático, bombeo unitario**; esta ventana pide la imperfección del pozo.

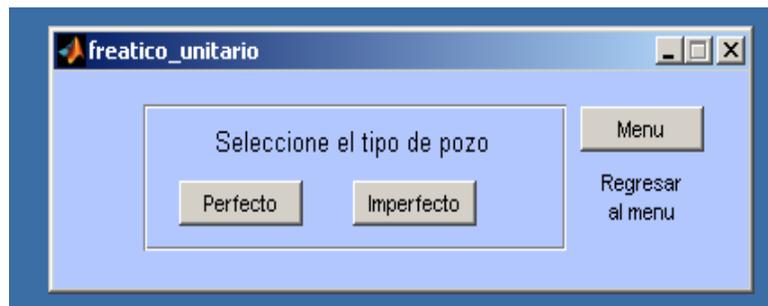


Figura 3.5: Ventana para entrar al cálculo para un pozo unitario en acuífero freático.

Si presiona con el mouse uno de los botones (**perfecto** o **imperfecto**), se abre la ventana que le corresponde.

freatico_unitario_perfecto

DATOS:

Caudal Q m3/día

Radio de influencia R m

Radio del pozo r m

Abatimiento So m

Espesor del acuífero H m

Coefficiente de filtración K m/día

Determinar R en f(S/Q)

R=f(S_e)

Desactive aquí e introduzca valor Q y So! para hallar R

La duración del bombeo (tbombeo**):**

días

Para usted hallar la conductividad de nivel "a" y la entrega de agua "u" por este metodo, es necesario especificar o introducir en eta caja la duracion en dias de su bombeo.

Mostrar resultado de otros parametros

Transmisividad T

Conductividad de nivel a **Transmisividad**

Entrega de agua u m2/dia

[Ayuda](#) [Regresar](#)

Figura 3.6: Ventana para el cálculo de parámetros hidrogeológicos por método de bombeo con pozo unitario perfecto caso de un acuífero freático

Figura 3.7: Ventana para el cálculo de parámetros hidrogeológicos por método de bombeo con pozo unitario imperfecto caso de un acuífero freático.

El valor de la imperfección del pozo se calcula en otra hoja o ventana al hacer clic en el botón "Calcular" dentro del cuadro de Resistencia de imperfección del pozo. Una vez calculado este parámetro se transporta de manera automática. Sobre el cómo transportar ese valor se describe en el acuífero artesiano.

Al seleccionar el tipo de ejecución de bombeo con pozos de observaciones, hay que designar el número de pozos de observaciones utilizados como muestra la figura, desde la ventana principal del método de determinación con datos de bombeo, es decir se abre el programa, se selecciona **BOMBEO**.

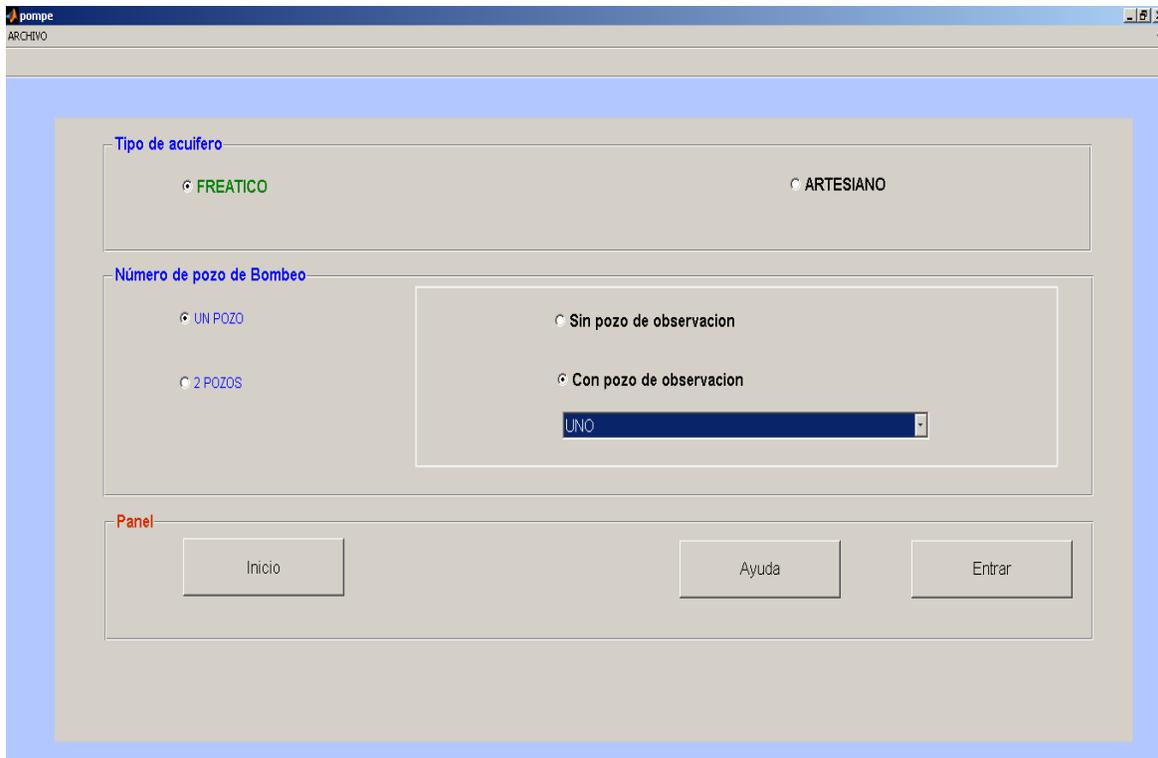


Figura 3.8: Ventana para entrar al cálculo en bombeo con un pozo de observación (acuífero freático).

La figura 3.8 muestra la selección realizada que indica el bombeo en un acuífero freático (**FREÁTICO**) y con un pozo de bombeo principal (**UN POZO**) y con un pozo de observación (**UNO**)

Acuífero artesiano:

En un acuífero artesiano utilizando el bombeo con un solo pozo (Bombeo unitario), el software se ha diseñado de la misma manera, pues no existe ninguna diferencia en su procedimiento; la diferencia consiste solamente en los coeficientes introducidos en las fórmulas obtenidas. Observe el ejemplo en la figura 3.9.

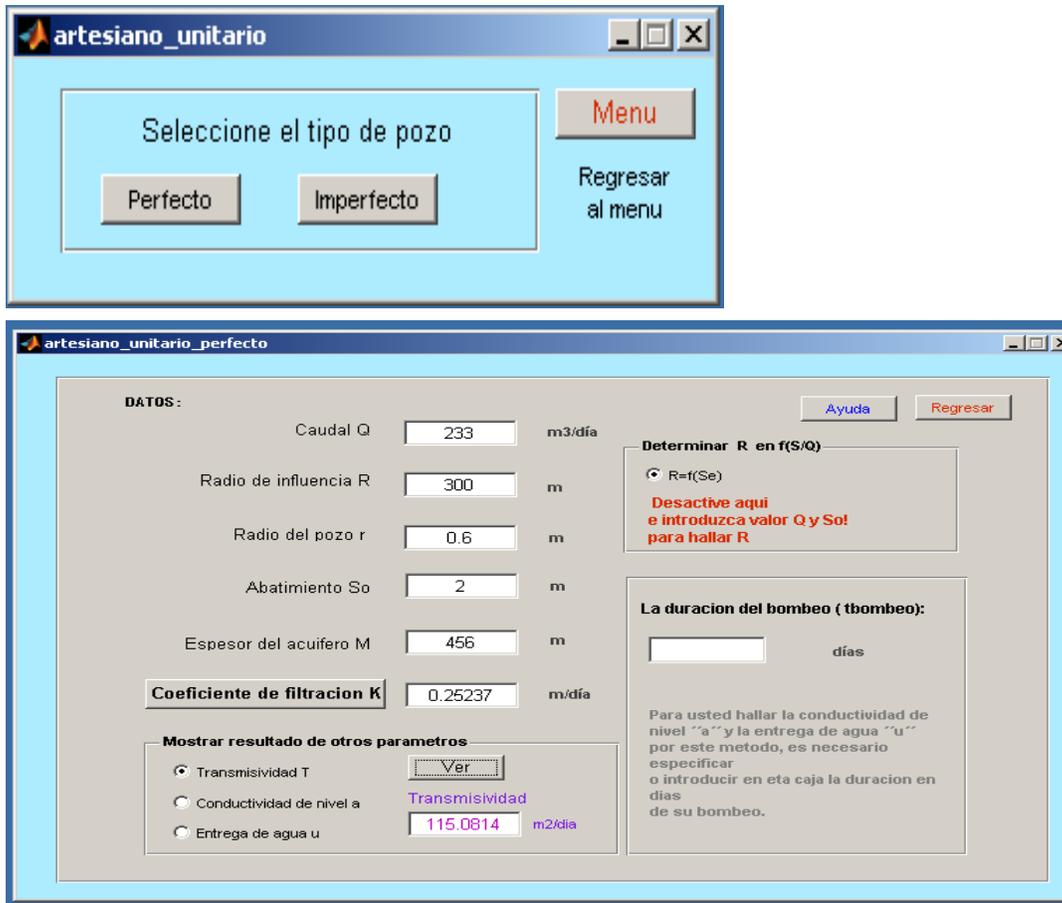


Figura 3.9: Ventana de cálculo de parámetros hidrogeológicos en acuífero artesiano por bombeo unitario perfecto.

Coeficiente de la resistencia de imperfección del pozo:

En caso de que los pozos son imperfectos, tanto en el bombeo unitario como de grupo, el software HidroZ@RYS brinda una hoja de cálculo con exactitud y precisión de acuerdo a los datos necesarios para su determinación.

Para la automatización del cálculo de la imperfección del pozo se utilizan las relaciones existentes entre la potencia del acuífero y las dimensiones de los pozos y la longitud del filtro que se utiliza para el pozo imperfecto. Para ver detalles sobre las relaciones mencionadas puede ir al anexo 1.

A continuación la ventana muestra el procedimiento para calcular la imperfección de un pozo con el software HidroZ@RYS.

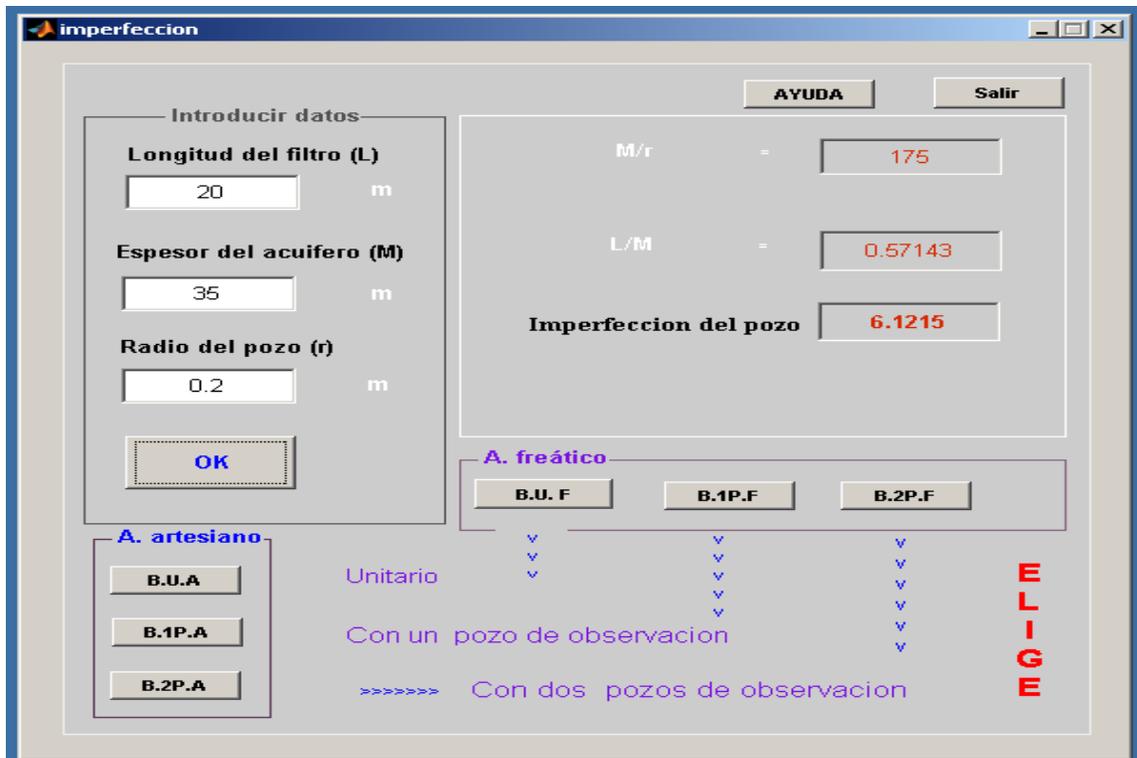


Figura 3.10: Ventana de cálculo del coeficiente de imperfección del pozo

B.U.F: Bombeo Unitario en acuífero Freático

B.1P.F: Bombeo con 1 pozo de observación en acuífero Freático

B.2P.F: Bombeo con 2 pozos de observación en acuífero Freático

B.U.A: Bombeo Unitario en acuífero Artesiano

B.1P.A: Bombeo con 1 pozo de observación en acuífero Artesiano

B.2P.A: Bombeo con 2 pozos de observación en acuífero Artesiano

Se utilizan los botones descritos para importar el valor del coeficiente imperfección del pozo calculado al pozo correspondiente al cálculo que se desee.

Se puede ver en el ejemplo siguiente un valor importado para un pozo imperfecto de bombeo unitario con 2 pozos de observación en un acuífero freático (presionando el botón **BUF**). Ver figura 3.11 y figura 3.12.

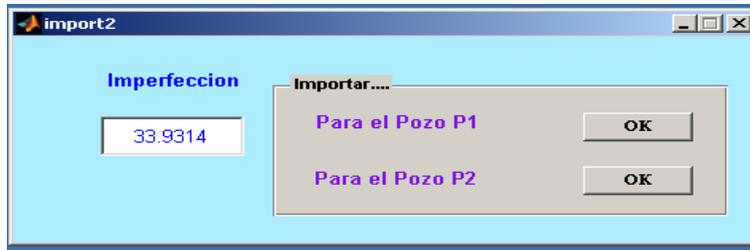


Figura 3.11: Ventana de importación del coeficiente de imperfección del pozo

P1: Si es para el primer pozo (imperfecto) de observación que se tiene.

P2: Si es para el segundo pozo (imperfecto) de observación que se tiene.

Al hacer clic en **P1**, por ejemplo, se obtiene la respuesta siguiente;

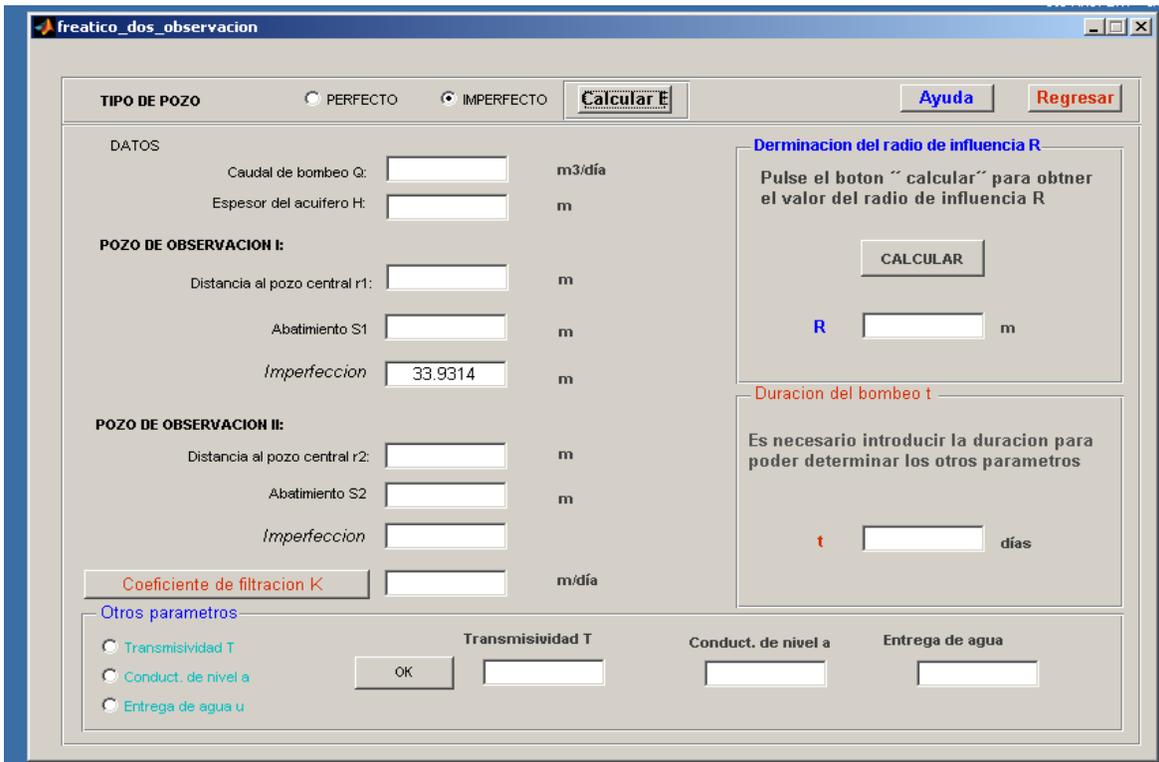


Figura 3.12: Ventana de cálculo para bombeo con dos pozos de observación en acuífero freático

3.4.2. Cálculo del coeficiente de filtración por el método de Cubeteo

Para llevar a cabo el diseño del programa con los cálculos utilizando el método de cubeteo se cuenta con 3 tipos de pruebas. La figura 3.13 presenta el menú principal para acceder a los cálculos con este método el cubeteo en calas, cubeteo intensivo y cubeteo sin estabilización del abatimiento del agua.

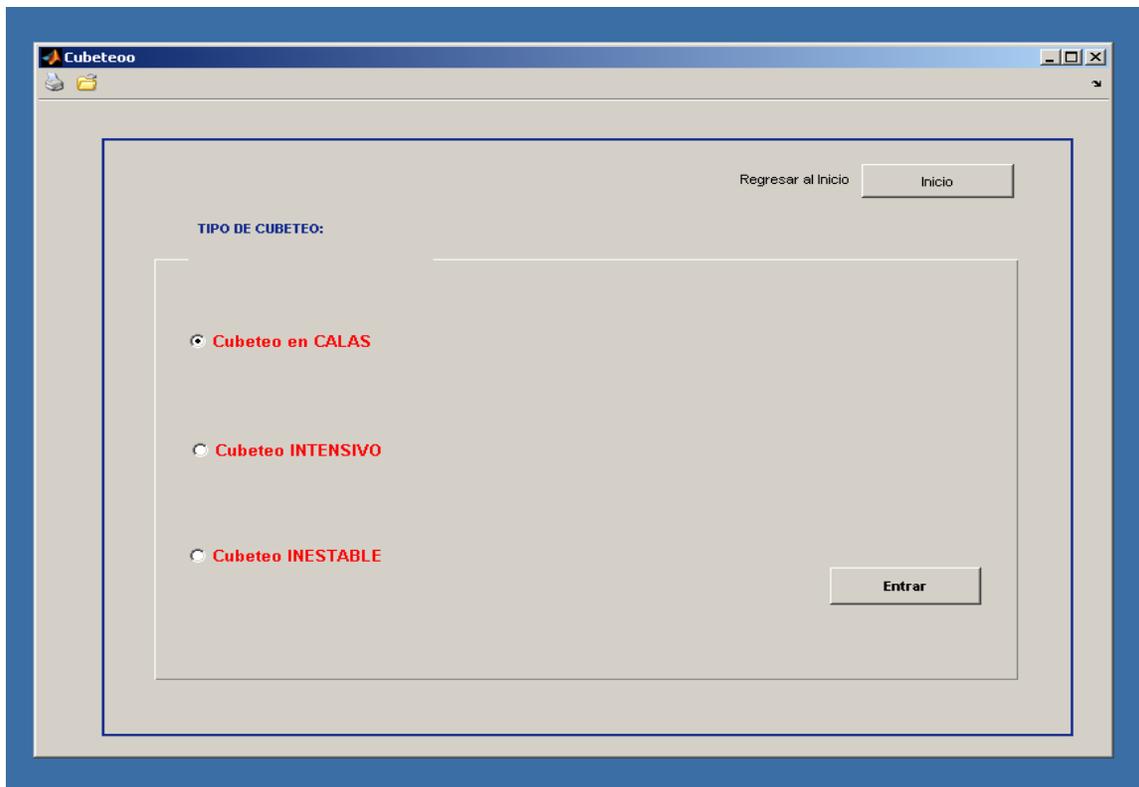


Figura 3.13: Ventana principal de cubeteo

Cubeteo en calas

Simplemente selecciona en el menú principal el tipo de cubeteo que utiliza para el cálculo y hace clic en Entrar y se abre la ventana que pide en qué tipo de roca se realizó el mismo. Este tipo de cubeteo se puede realizar en rocas friables, agrietadas y cársticas. El desarrollo del mismo se muestra en la figura 3.14.



Figura 3.14: Dialogo de opción para cubeteo en calas

Al presionar con el mouse uno de los botones se abre la ventana donde se ingresan los datos experimentales del cubeteo. (Figuras 3.15, 3.16 y 3.17)



Figura 3.15: Ventana cubeteo en calas en rocas friables

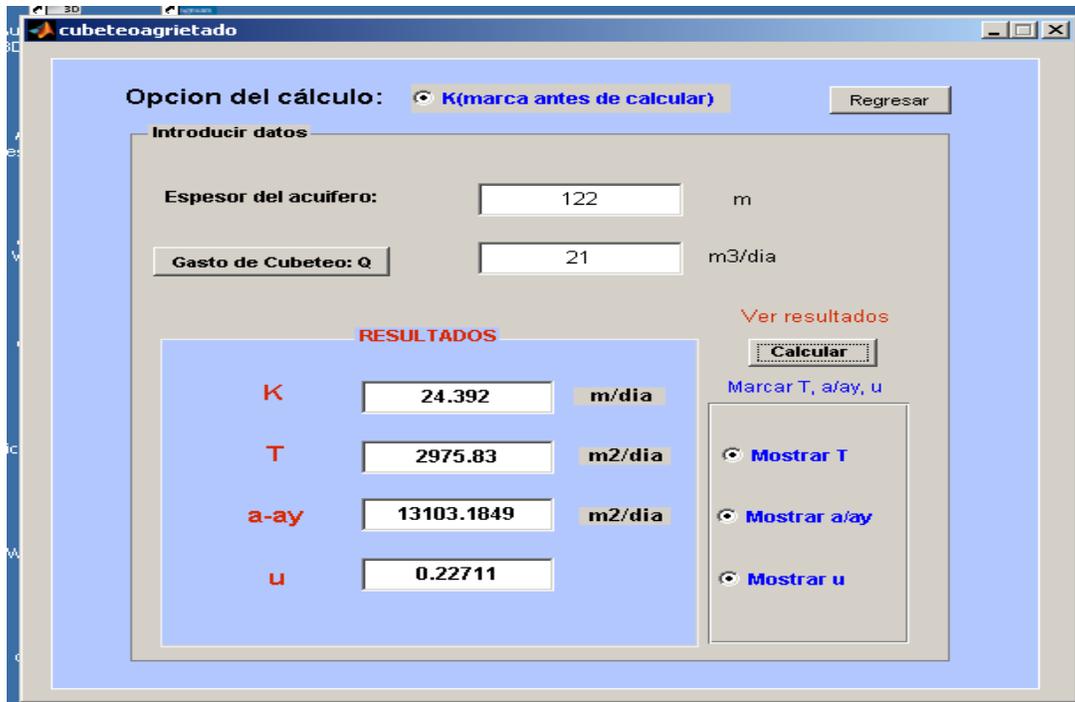


Figura 3.16: Ventana cubeteo en calas en rocas agrietadas

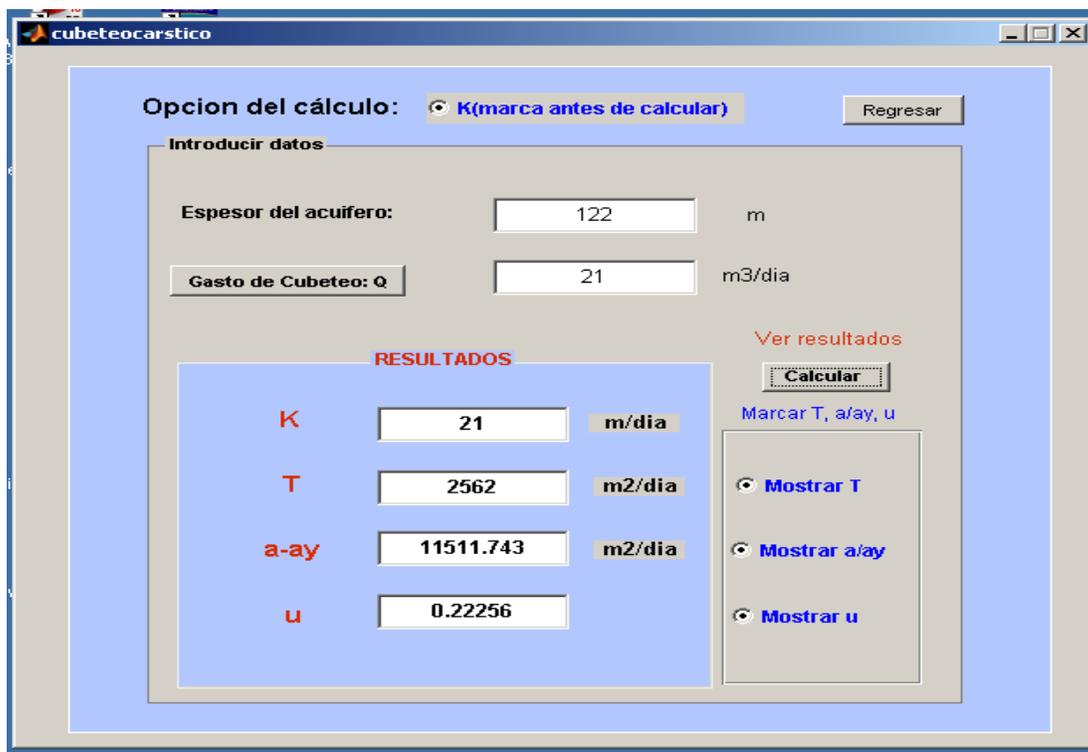


Figura 3.17: Ventana cubeteo en calas en rocas cársicas

En las figuras anteriores las variables o datos que ingresan al programa son:

- El espesor del acuífero, m.
- Gasto de cubeteo (se calcula en caso de que no se conoce de antemano). Más adelante mostraremos el procedimiento de cálculo del mismo con HidroZ@RYS.

Los parámetros a calcular son:

- El coeficiente de filtración (K), m/día.
- La transmisividad (T), m²/día.
- La conductividad de nivel o piezoconductividad (a o a_y), m²/día.
- La entrega de agua (μ).

Para que se muestren los resultados deseados se selecciona la variable deseada y luego se presiona el botón "**Calcular**". Si se modifican las variables de entrada se debe seleccionar nuevamente la variable de salida que se calcula.

Aforos cortos y cubeteos intensivos

Este método es ampliamente utilizado en casos en que el aforo se ejecuta sin estabilización del abatimiento con un gasto constante. Las variantes que se incorporan en HidroZ@RYS son los métodos más usados propuestos por A.P. Erquin y F.M. Bochevier (1968).

Figura 3.18: Ventana cubeteos intensivos

Cubeteo inestable

Los métodos de cálculo presentado en el diseño del programa son desarrollados por el ruso E. E. Kerkis en 1975, en Moscú, cuando escribió su libro acerca de las propiedades de filtración de las rocas. E l desarrollo de este método en HidroZ@RYS se representa en la figura siguiente.

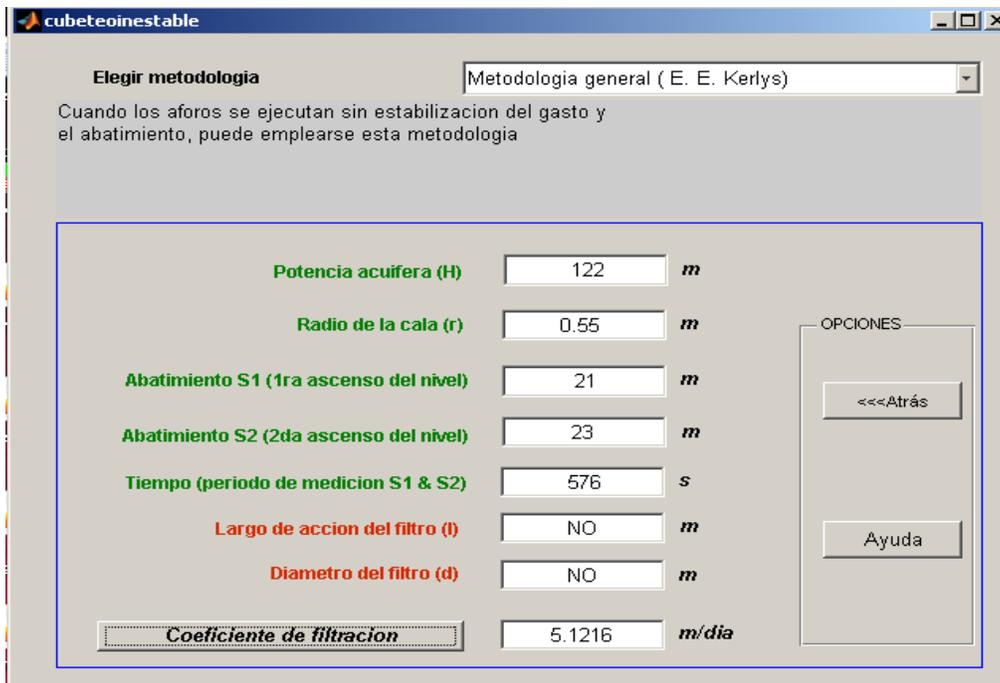


Figura 3.19: Ventana cubeteo sin estabilización del abatimiento

Cuando se selecciona las variantes de cálculo del mismo el programa da una respuesta para los datos que hay que ingresar y donde está escrito la palabra "NO" significa la necesidad de no ingresar esa variable para el cálculo a ejecutar.

Cálculo del gasto específico de cubeteo:

Como se hizo referencia anteriormente, que es necesario determinar a veces el valor del gasto de cubeteo o de aforo para cubeteos en calas, cuando esto no es conocido de antemano. La figura siguiente muestra el desarrollo del procedimiento de su cálculo. Es importante señalar que el descenso promedio del nivel del agua, cuando no es estable, hay que calcularlo midiendo hasta tres veces el nivel de descenso (S1, S2, S3). Para ello HidroZ@RYS incorpora el cuadro de cálculo del mismo conjuntamente con el cálculo del gasto de aforo o gasto específico de cubeteo. Una vez calculado dicha magnitud, presiona el botón que le corresponde al tipo de roca en el cual se desea calcular el mismo. Ver la figura 3.20.

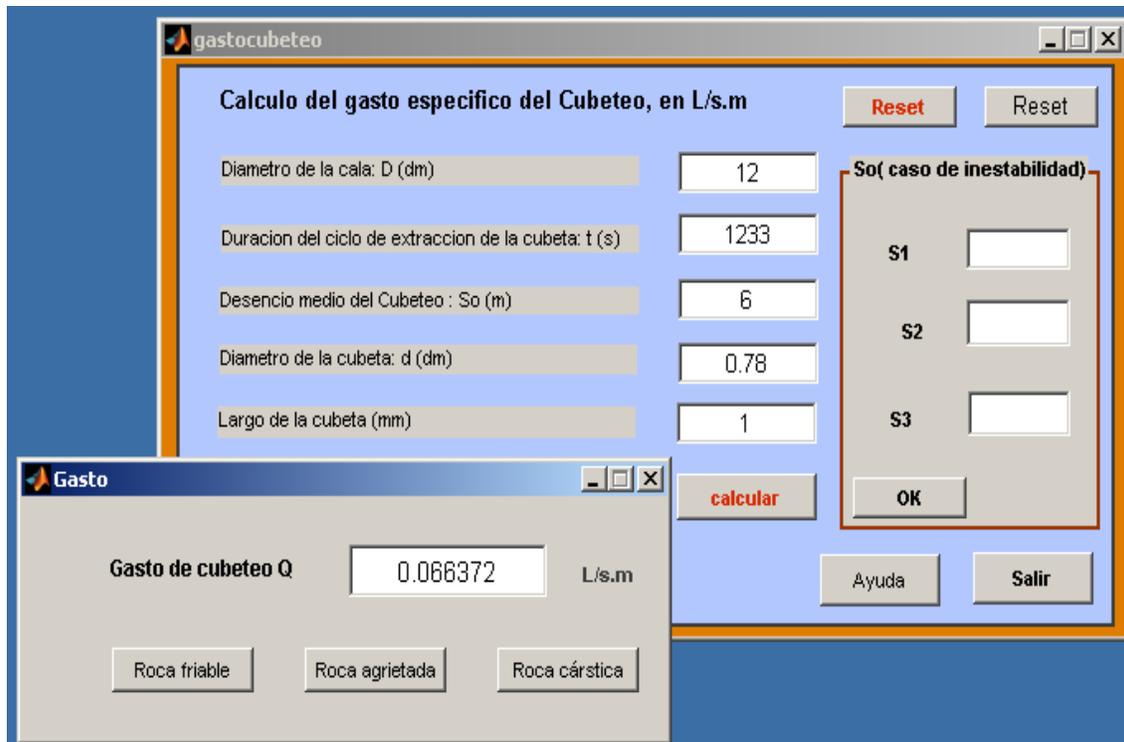


Figura 3.20: Ventana para calcular el gasto de cubeteo en calas

3.4.3. Cálculo del coeficiente de filtración por el método de Vertimiento

Estos tipos de prueba tienen como objetivo determinar el coeficiente de filtración de rocas y sedimentos pocos permeables de la zona acuífera o de rocas y sedimentos de la zona de aireación (Zona No Saturada). A partir de ello se hace el diseño donde la hoja de cálculo va a estar dividida en dos partes principales y cada una de ellas considera las variantes. La ventana de selección de las variantes se muestra en la figura siguiente.

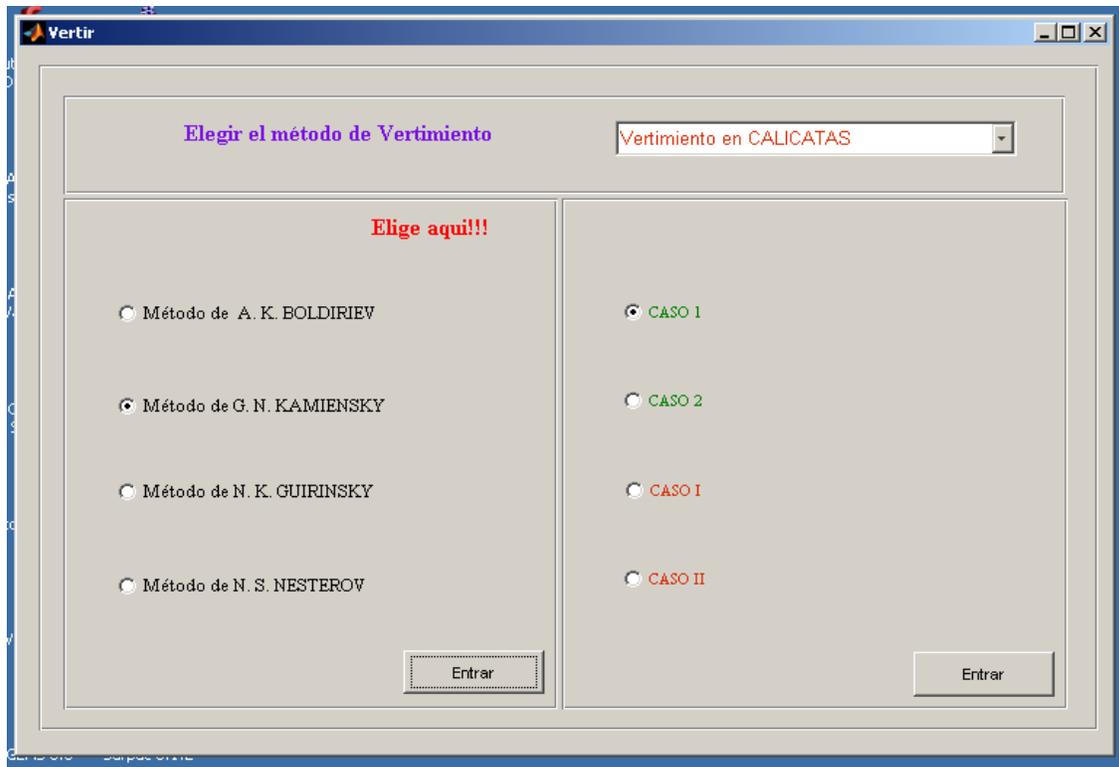


Figura 3.21: Ventana para los métodos de vertimiento

A continuación se muestran dos ejemplos de estos métodos, los cuales son representativos (figura 3.22 y figura 3.23). Para que se abran estas ventanas se debe especificar el método de vertimiento (si es en calas o en calicatas) y presione Entrar.

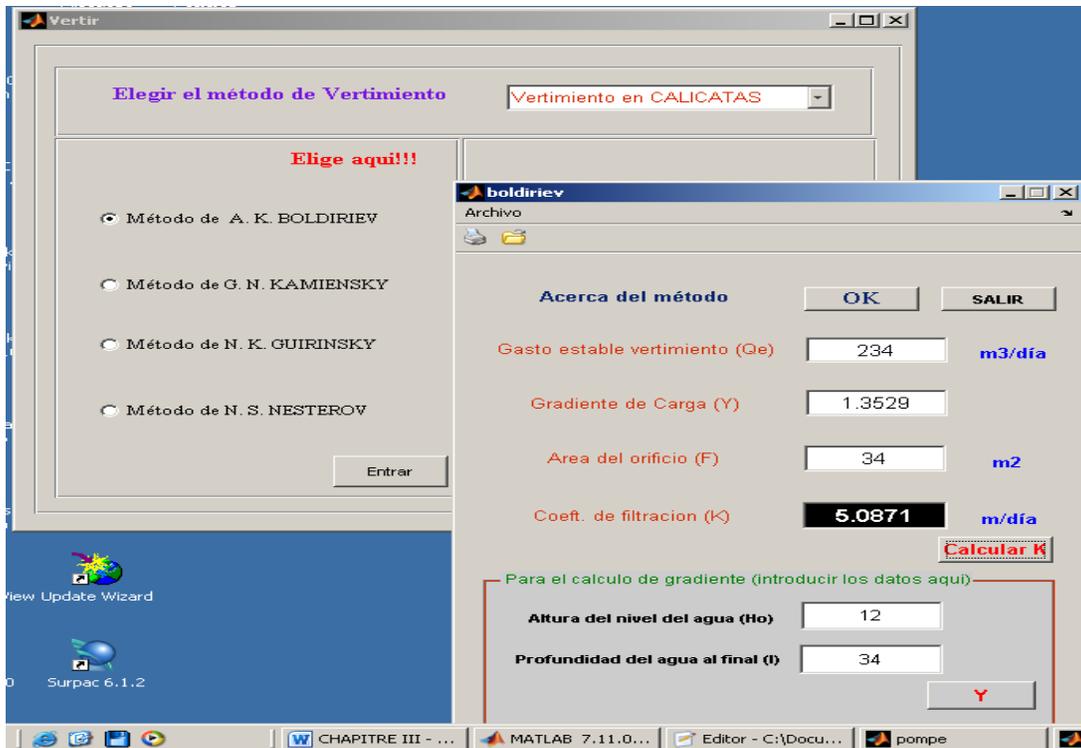


Figura 3.22: Ventana vertimiento en calicatas por método de Boldriev

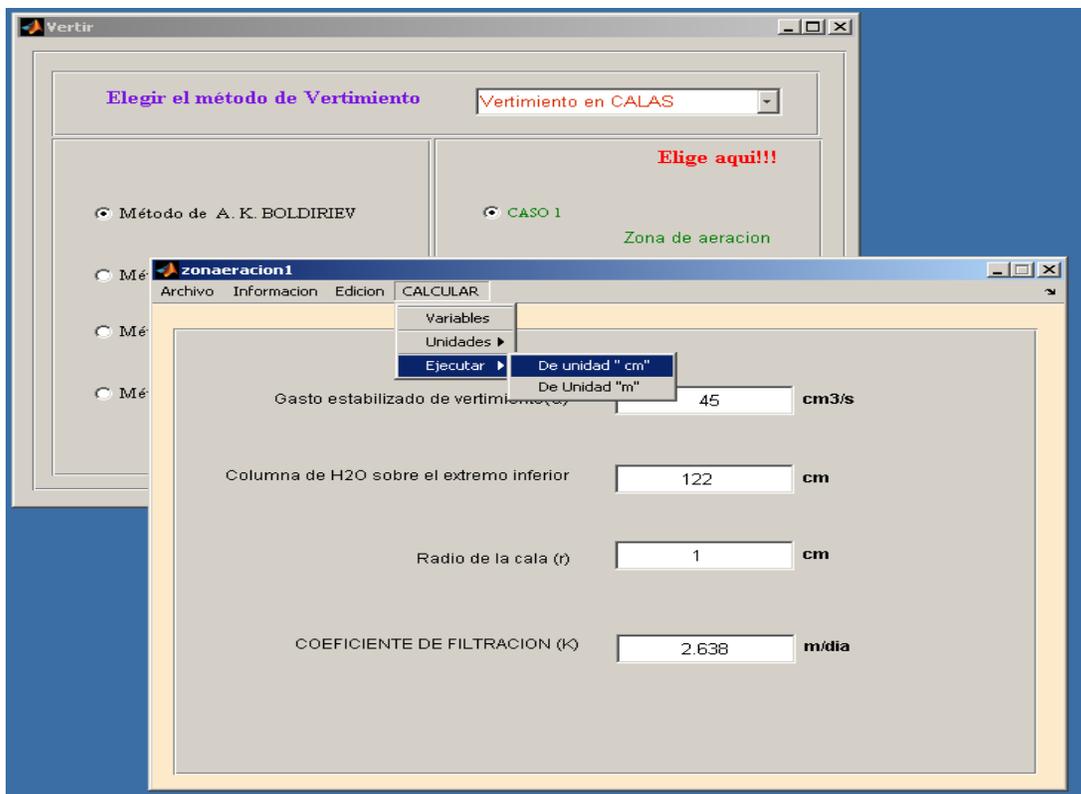


Figura 3.23: Ventana vertimiento en calas en una zona de aereación

3.5. Estudio de factibilidad

Para estudiar la factibilidad de este proyecto se emplea la **Metodología Costo-Efectividad (Beneficio)**, la cual plantea que la conveniencia de la ejecución de un proyecto se determina por la observación conjunta de dos factores:

- El costo, que involucra la implementación de la solución informática, adquisición y puesta en marcha del sistema hardware/software y los costos de operación asociados.
- La efectividad, que se entiende como la capacidad del proyecto para satisfacer la necesidad, solucionar el problema o lograr el objetivo para el cual se ideó, es decir, un proyecto será más o menos efectivo con relación al mayor o menor cumplimiento que alcance en la finalidad para la cual fue ideado (costo por unidad de cumplimiento del objetivo).

Esta es una de las partes más importantes en la elaboración de cualquier proyecto, ya que haciendo un correcto estudio de factibilidad se puede ahorrar meses e incluso años de trabajo, hasta evitar poner en duda la reputación profesional si se realiza un sistema mal planificado desde una etapa temprana.

3.6. Efectos económicos

- Efectos directos.
- Efectos indirectos.
- Efectos externos.
- Intangibles

Efectos directos:

POSITIVOS:

- Los usuarios autorizados a manipular el sistema tendrán la cobertura de poder registrarse y entrar al sistema para poder llevar un control de ellos.
- Se mejora la eficiencia del proceso de cálculo de los parámetros hidrogeológicos en estudios geólogo-mineros.

Efecto indirecto:

Los efectos económicos observados que pudiera repercutir sobre otros mercados no son perceptibles, aunque este proyecto no está construido con la finalidad de comercializarse.

Efecto externo:

- Se tendrá una herramienta disponible que le podrá facilitar gran parte del trabajo a los encargados de la gestión y control de los medios informáticos.

Intangibles:

- En la valoración económica siempre hay elementos perceptibles por una comunidad como perjuicio o beneficio, pero al momento de ponderar en unidades monetarias esto resulta difícil o prácticamente imposible.

3.7. Beneficios y Costos Intangibles en el proyecto

Costos

- Resistencia al cambio.

Beneficios

- Comodidad para realizar los cálculos de los parámetros hidrogeológicos.
- Mejora la calidad de información por la integridad, oportunidad de la información y confiabilidad (ayudas que brinda el sistema).

- Menor tiempo empleado en la introducción de los datos y en la obtención de resultados.

3.8. Ficha de costo

Para determinar el costo económico del proyecto se utiliza el procedimiento para elaborar Una Ficha de Costo de un Producto Informático [Dra. Ana Ma. Gracia Pérez, UCLV].

Para la elaboración de la ficha se consideran los siguientes elementos de costo, desglosados en moneda libremente convertible y moneda nacional.

Costos en moneda libremente convertible:

Tabla 2: Costo en moneda libremente convertible

Ficha de Costo.		Precio(s)
Costos Moneda Libremente Convertible		
Costos Directos		
Compra de equipos de cómputo		0,00
Alquiler de equipos de cómputo		0,00
Compra de licencia de Software		0,00
Depreciación de equipos		60,78
Materiales directos		0,00
	Subtotal	60,78
Costos Indirectos		
Formación del personal que elabora el proyecto		0,00
Gastos en llamadas telefónicas		0,00
Gastos para el mantenimiento del centro		0,00
Know How		0,00
Gastos en representación		0,00

Subtotal		0,00
Gastos de Distribución y Venta		
Participación en ferias o exposiciones		0,00
Gastos en transportación		0,00
Compra de materiales de propagandas		0,00
Subtotal		0,00
Total		60,78

Costos en moneda nacional:

Tabla 3: Costo en moneda nacional.

Ficha de Costo.		
		Precio(s)
Costos Moneda Nacional		
Costos Directos		
Salario del personal que laborará en el proyecto		100,00
12,5% del total de gastos por salarios se dedica a la seguridad social		0,00
9.09% de salario total, por concepto de vacaciones a acumular		0,00
Gasto por consumo de energía eléctrica		0,00
Gastos en llamadas telefónicas		0,00
Gastos administrativos		0,00
Subtotal		100
Costos Indirectos		
Know How		0,00
Subtotal		
Total		100

3.9. Gráfico de comparación de las operaciones manuales y automatizadas

Dentro de esta metodología la técnica de punto de equilibrio aplicable a proyectos donde los beneficios tangibles no son evidentes, el análisis se basa exclusivamente en los costos. Para esta técnica es imprescindible definir una variable discreta que haga variar los costos. Teniendo en cuenta que el costo para este proyecto es despreciable, se toma como costo el tiempo en horas empleado para resolver los cálculos, determinar los parámetros hidrogeológicos y la variable sería la complejidad de las pruebas o tareas que se realizan durante este proceso.

Valores de las variables (Solución manual):

- a) Realizar los cálculos en Excel
- b) Entrada de los datos de las variables al programa Excel.
- c) Respuesta del programa de Excel al usuario.

Valores de las variables de solución (Sistema automatizado):

- a) Cargar el sistema y seleccionar la ventana para realizar el cálculo.
- b) Entrada de los datos de las variables al sistema automatizado para una ventana.
- c) Respuesta del sistema al usuario.

Teniendo en cuenta los resultados reflejados en la gráfica en cuanto al Punto de Equilibrio se demuestra la factibilidad del sistema evidenciado por la relación entre la complejidad del problema, (cantidad de variables) y el tiempo que demora la solución del mismo de forma manual y automatizada.

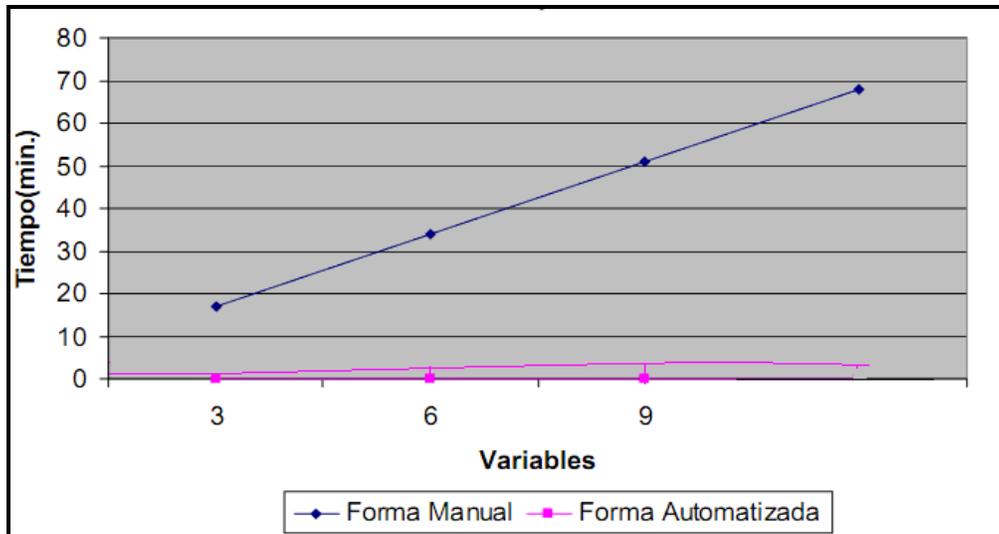


Figura 3.25: Punto de equilibrio

3.9. Conclusiones del Capítulo

El capítulo aborda la fase de planeación y diseño del software HidroZ@RYS. El sistema resultante está provisto de un ambiente cómodo, fácil de entender, para esto se siguieron los siguientes pasos:

- Se elabora el marco teórico metodológico que fundamenta la investigación, permitiendo el análisis del proceso de automatización del cálculo de los parámetros hidrogeológicos en acuíferos. Se efectúa un estudio de las diferentes tecnologías y herramientas para la confección del sistema, haciendo una elección, de acuerdo a las especificaciones del cliente.
- Se efectúa un levantamiento de los requerimientos, los que propiciaron un mejor entendimiento de la problemática en cuestión, facilitando el análisis, diseño e implementación del sistema automatizado, el cual soluciona las dificultades antes expuestas.
- Se obtiene un sistema automatizado que permite el cálculo de parámetros hidrogeológicos, muy particularmente el coeficiente de filtración de los acuíferos.

CONCLUSIONES

Luego del desarrollo del trabajo se llegan a las siguientes conclusiones:

- Se logra la planeación y diseño del software HidroZ@RYS mediante los recursos que ofrece el MATLAB, que constituye una herramienta informática para facilitar el proceso de cálculo de los parámetros hidrogeológicos en estudios geólogo-mineros.
- El HidroZ@RYS es aplicable en tareas académicas e investigación de los estudiantes de 2do. año de la carrera de Ingeniería en Minas y 3ro y 5to. años de la carrera de Geología, así como en otros estudios relacionados con la determinación de los parámetros hidrogeológicos.
- El Software HidroZ@RYS cuenta con las siguientes desventajas:

Solo puede ejecutarse en el campo de MATLAB.

No están desarrolladas todas las fórmulas conocidas (más de 4000 fórmulas) aplicables para la determinación de los parámetros mencionados anteriormente.

- Se realiza un estudio del costo real en que se incurre durante el diseño del software HidroZ@RYS mediante la metodología costo efectividad (beneficios), se analizan todos los factores directos, indirectos, externos e intangibles, además se calcula el costo de ejecución del producto software mediante la comparación de trabajos manuales y automatizados arrojando como resultados (**costo**) demostrando la conveniencia de la elaboración del sistema.

RECOMENDACIONES

Este trabajo es la primera fase de una propuesta de proyecto que puede ser profundizado. Por tanto se hacen las siguientes recomendaciones.

- Continuar trabajando en el presente software como un sistema de gestión automatizado de cálculo de parámetros hidrogeológicos para mejorar las insuficiencias que presenta.
- Agregar nuevas funcionalidades acorde a nuevos requisitos que pudiesen surgir por alguna causa o para aumentar el rendimiento del sistema.

BIBLIOGRAFÍAS

- ALTOVSKY, M. E.: *Guía del hidrogeólogo*, Moscú, 1962.
- ANTONOV, V. V.: *Búsqueda y exploración de las aguas subterráneas*, Leningrado, 1983.
- ANTONOV, V. V.: *Dinámica de las aguas subterráneas*, Leningrado, 1984.
- ANTONOV, V. V.: *Guía práctica para la evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas*, Leningrado, 1985.
- AUTODESK. Software AutoCAD 2010.
- BARRAGÁN GUERRERO, D. O.: *Manual de Interfaz Gráfica de Usuario en MatLab*, [PDF]. Loja, Ecuador, 2008. [Consultado: 2011-18-12]. Disponible en: www.matpic.com.
- BARRAGÁN GUERRERO, D. O.: *Interfaz Gráfica de Usuario que simula modulaciones digitales*, [en línea]. Loja, Ecuador, 2010. [Consultado: 2012-03-10]. Disponible en: www.mathwork.com.
- BARRAGÁN GUERRERO, D. O.: *Interfaz Gráfica de Usuario que permita diseñar filtros digitales*, [en línea]. Loja, Ecuador, 2010. [Consultado: 2012-03-10]. Disponible en: www.mathwork.com.
- BARRAGÁN GUERRERO, D. O.: *Interacción entre GUIDE y Simulink*, [en línea]. Loja, Ecuador, 2010. [Consultado: 2012-03-10]. Disponible en: www.mathwork.com.
- BARRAGÁN GUERRERO, D. O.: *Operaciones sobre señales*, [en línea]. Loja, Ecuador, 2011. [Consultado: 2012-28-11]. Disponible en: www.mathwork.com.
- BOCHEVIER, F. M.: *Teoría y métodos prácticos de cálculos hidrogeológicos de las reservas de explotación de las aguas subterráneas*, Moscú, 1968.
- DE MIGUEL, F. C.: *Formación y evaluación de las reservas de explotación de yacimientos de aguas subterráneas de los sedimentos de mioceno-cuaternarios de la cuenca del río Cauto*, Leningrado, 1986.
- DE MIGUEL, F. C.: *Hidrogeología Aplicada*. Editorial Félix Varela, La Habana, 1999.

- GARCÍA DE JALÓN, J. G., J. I. RODRÍGUEZ y JOSÉ VIDAL: *Aprenda MATLAB 7.0 como si estuviera en primero*, Madrid, Diciembre 2005.
- LÓPEZ MARTÍNEZ, M. y J. A. ACOSTA RODRÍGUEZ: *Manual de Introducción a MatLab*, Universidad de Sevilla, 2004.
- PASOXOV, E. V.: *Hidrogeología general*, Leningrado, 1975.
- SHESTAKOV, V. M. y I. P. KRAVCHENKO: *Dinámica de las aguas subterráneas*, Moscú, 1975.
- STEVEN DUFOUR: *Court aide-mémoire pour les étudiants de MTH2210*, Ecole Polytechnique de Montréal, 2002.

ANEXOS

Anexo 1: Valores del coeficiente de imperfección de un pozo imperfecto

$\frac{l}{M}$	$\frac{M}{r}$									
	0,5	1,0	3,0	10,0	30,0	100,0	200,0	500,0	1000,0	2000,0
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	69,5	79,6	90,9
0,3	0,00297	0,0907	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,5	24,9	28,2
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11,0	12,4
0,7	0,000546	0,0167	0,237	0,879	1,69	2,07	3,24	4,01	4,58	5,19
0,9	0,000048	0,0015	0,025	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12

Anexo 2: Valores del ascenso capilar H_c según N. N. Bándeman (en pruebas de corta duración)

Sedimentos	Ascenso capilar H_c , m.
Arcilla poco arenosa	1
Arcilla arenosa	0.8
Arena muy arcillosa	0.6
Arena arcillosa	0.4
Arena fina poco arcillosa	0.3

Anexo 3: Coeficiente de corrección de ψ según N. K. Guirínsky

$H_0 + H_c$ (m)	Diámetro del anillo, cm.										
	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
1,00	1,08	1,00	0,94	0,88	0,84	0,80	0,76	0,72	0,89	0,66	0,63
0,95	1,12	1,05	0,99	0,93	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72	0,69	0,68
0,90	1,18	1,11	1,04	0,98	0,93	0,88	0,84	0,80	0,76	0,73	0,70
0,85	1,25	1,17	1,10	1,04	0,98	0,93	0,88	0,84	0,80	0,77	0,73
0,80	1,33	1,24	1,17	1,10	1,04	0,99	0,94	0,89	0,85	0,81	0,77
0,75	1,41	1,32	1,24	1,17	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86	0,82
0,70	1,51	1,41	1,33	1,25	1,18	1,12	1,06	1,00	0,96	0,91	0,87
0,65	1,62	1,52	1,42	1,34	1,26	1,19	1,21	1,15	1,10	1,05	0,93
0,60	1,75	1,64	1,54	1,44	1,36	1,28	1,31	1,25	1,18	1,13	1,00
0,55	1,90	1,78	1,66	1,58	1,46	1,38	1,43	1,35	1,28	1,22	1,07
0,50	2,08	1,93	1,80	1,70	1,60	1,51	1,45	1,35	1,28	1,22	1,16
0,45	2,28	2,12	1,98	1,87	1,75	1,64	1,55	1,47	1,40	1,33	1,27
0,40	2,53	2,36	2,20	2,00	1,92	1,81	1,71	1,62	1,54	1,46	1,38
0,35	2,84	2,60	2,45	2,29	2,14	2,02	1,90	1,80	1,70	1,61	1,53
0,30	3,22	2,99	2,78	2,59	2,42	2,27	2,13	2,01	1,91	1,81	1,72
0,25	3,74	3,44	3,19	2,97	2,77	2,96	2,45	2,21	2,17	2,05	1,94
0,20	4,42	4,07	3,78	3,50	3,24	3,03	2,84	2,67	2,52	2,38	2,26
0,15	5,38	4,94	4,56	4,24	3,94	3,67	3,41	3,18	2,99	2,91	2,65
0,10	6,03	6,30	5,78	5,33	4,94	4,60	4,28	3,90	3,71	3,47	3,25

Anexo 4: Ubicación de las calas de observación para afloros de pozos perfectos y duración del aforo

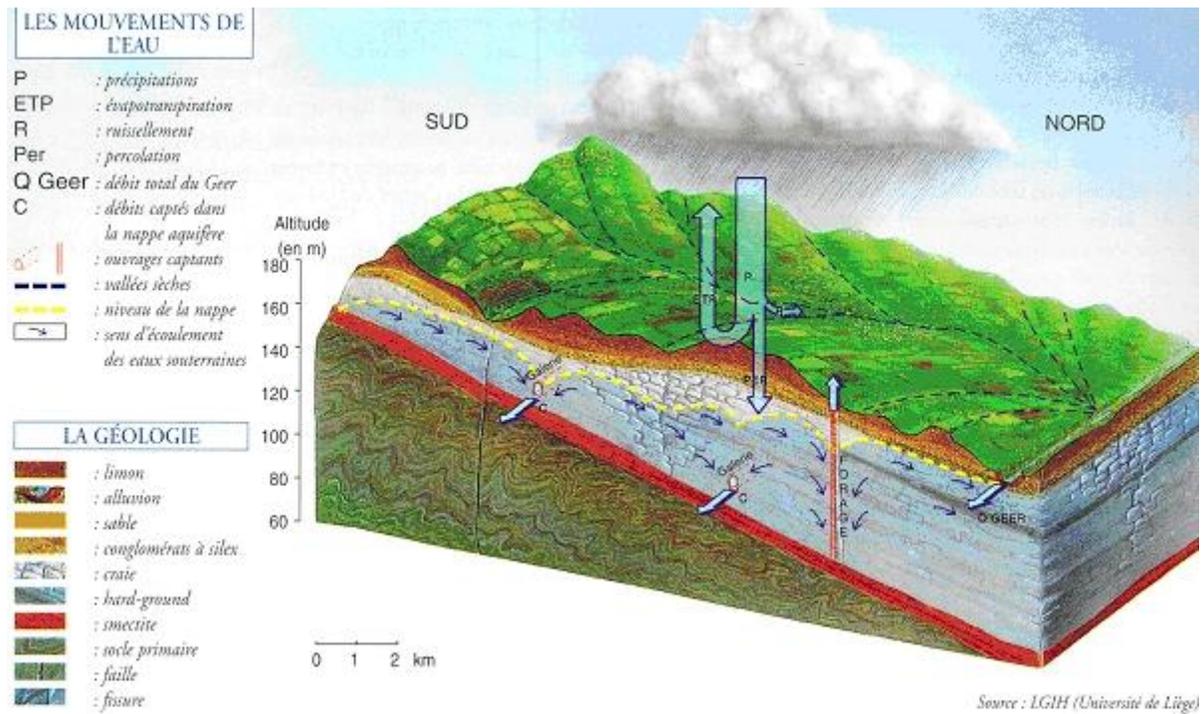
Tipos de rocas	Coeficiente de filtración m/día	Tipo de acuífero	Distancia de la cala central hasta las de observación, m			Duración del aforo por abatimiento en turnos de trabajo		
			1ra	2da	3ra	Unitario de prueba	Unitario experimental	Grupo experimental
Arenas finas y de granulometría variada arcillosa	1-5	Freático artesiano	1-3	4-8	20-30	5-6	6-8	7-20
			2-4	6-12	25-40	4-5	5-7	7-20
Arena de granulometría variada	5-20	Freático artesiano	2-6	8-60	30-60	4-5	5-7	7-20
			3-6	6-20	40-75	3-4	4-6	6-18
Sedimentos gravosos con relleno de arenas finas y media	20-60	Freático artesiano	3-6	10-20	40-75	3-4	4-6	6-18
			5-15	20-30	50-100	2-3	3-5	10-20
Sedimentos gravosos con poco relleno de arena homogénea	> 60	Freático artesiano	4-10	15-30	75-125	2-3	3-5	10-18
			8-15	20-40	100-150	1-2	2-4	10-20
Rocas agrietadas	≥ 60	Freático artesiano	5-10	15-30	75-150	4-6	5-6	10-24
			6-15	20-40	100-200	3-4	4-5	10-30
Rocas agrietadas con carso	> 60	Freático artesiano	10-20	20-60	200-300	2-3	3-8	10-30
			15-30	40-80	250-400	2-3	3-6	10-30

Observaciones: En afloros con abatimientos en la cala o pozo central mayor de 10 m, la distancia entre las calas se aumentará 1,5 veces (según recomendaciones de I. A. Skavatanovich). En afloros experimentales de explotación la duración del aforo por cada abatimiento deberá aumentarse no menos de tres veces a los relacionados con la tabla anterior.

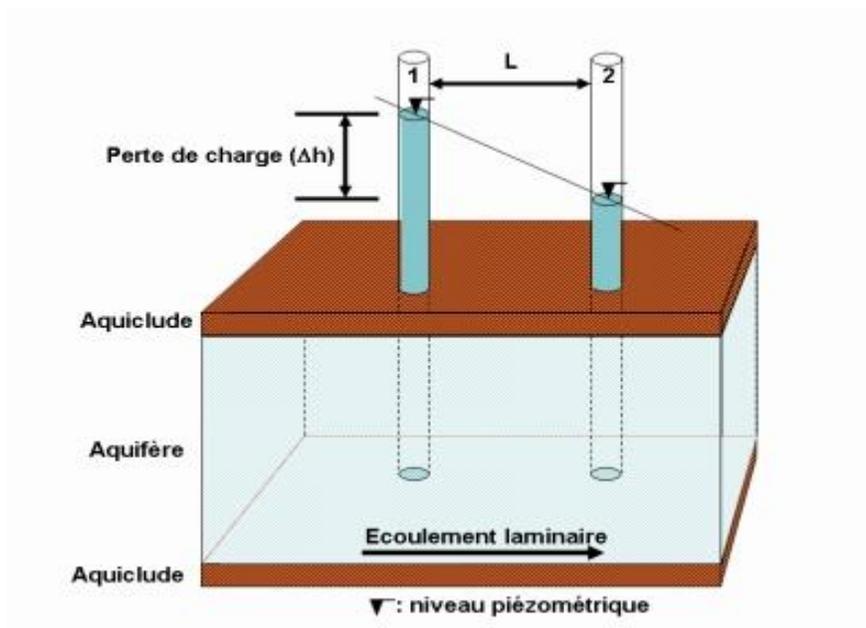
Anexo 5: Ubicación de las calas de observación para afloros de pozos imperfectos

Tipos de rocas	Coeficiente de filtración, m/día	Distancia de la cala central hasta la de observación, m			Observaciones
		1ra	2da	3ra	
Arenas y de granulometría variada y fina arcillosa	1-5	0,3 l	1	25-40	1- longitud de los filtros en calas o pozos centrales, m La ubicación de los filtros en las calas de observación deberá corresponder con los esquemas de cálculo expuestos en el Anexo 2. La distancia de ubicación de la tercera cala de observación aumentará proporcionalmente con el aumento de la permeabilidad
Arenas heterogéneas finas, gruesas y de granulometría variada	5-20	0,3 l	1	40-75	
Gravas y cantos rodados, con relleno 30 % de arenas finas y medias	20-60	0,3 l	1	50-100	
Gravas y cantos rodados, con relleno 30 % de arenas finas o gruesas	> 60	0,3 l	1	100-150	
Rocas agrietadas	> 60	0,3 l	1	25-150	
Rocas muy agrietadas y cavernosas	> 60	0,3 l	1	100-200	

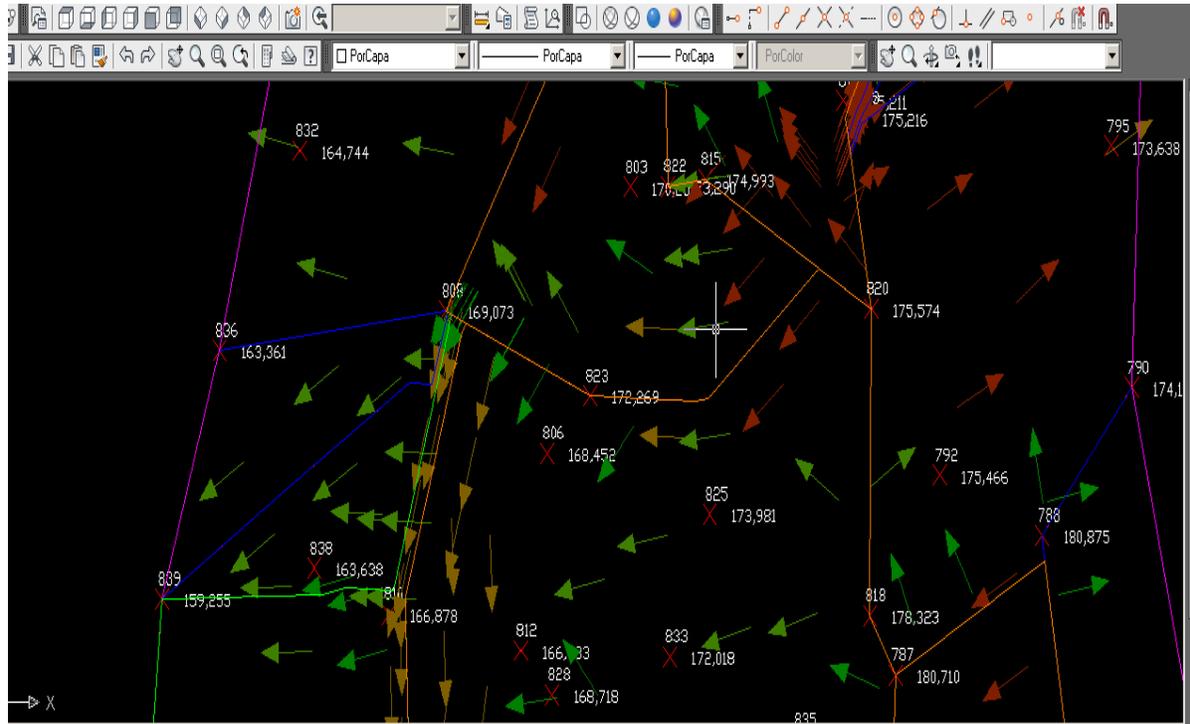
Anexo 6: Ejemplo del ciclo hidrológico en una zona acuífera de Hesbaye (Bélgica)



Anexo 7: Esquema del movimiento del agua subterranea en acuíferos



Anexo 8: Modelo de las cuencas de captación de las aguas en AutoCAD Civil 3D



Anexo 9: Valores de la conductividad hidraulica de las rocas friables (en m/s)

