

“UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA”



ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**“IMPLEMENTACIÓN DE RUTINAS DE HIDRÁULICA DE POZOS EN EL
LABORATORIO VIRTUAL DE HIDROLOGÍA (HYDROVLAB)”**

Trabajo de fin de carrera previo
a la obtención del Título de
INGENIERO CIVIL.

AUTOR:

EDISON WILSON BRICEÑO BRICEÑO

DIRECTOR:

PhD. FERNANDO RODRIGO OÑATE VALDIVIESO

LOJA – ECUADOR

2012





CERTIFICACIÓN:

PhD.

FERNANDO RODRIGO OÑATE VALDIVIESO

**Catedrático de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad
Técnica Particular de Loja.**

CERTIFICA:

Que el presente trabajo de fin de carrera desarrollado para obtener el título de Ingeniero Civil, titulado "**IMPLEMENTACIÓN DE RUTINAS DE HIDRÁULICA DE POZOS EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE HIDROLOGÍA (HYDROVLAB)**", realizado por el señor Edison Wilson Briceño Briceño, ha sido elaborado bajo mi dirección y minuciosamente supervisado y revisado, por lo que autorizo su presentación a la Escuela de Ingeniería Civil.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Loja, enero de 2012

PhD. Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso
DIRECTOR DE PROYECTO DE FIN DE CARRERA



AUTORÍA:

Las ideas, diseños, cálculos, resultados, conclusiones, tratamiento formal y científico de la metodología de la investigación contemplada en el trabajo de fin de carrera titulado **"IMPLEMENTACIÓN DE RUTINAS DE HIDRÁULICA DE POZOS EN EL LABORATORIO VIRTUAL DE HIDROLOGÍA (HYDROVLAB)"**, previo a la obtención del grado de Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja, son de exclusiva responsabilidad del autor.

La información recopilada para el presente proyecto, se encuentra debidamente especificada en el apartado de las referencias bibliográficas.

Edison Wilson Briceño Briceño



CESIÓN DE DERECHOS:

Yo, Edison Wilson Briceño Briceño, declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la universidad".

Edison Wilson Briceño Briceño



AGRADECIMIENTO:

En primer lugar agradezco a Dios por permitirme haber aprendido esta hermosa profesión, pues en todo momento ha estado con migo brindándome de múltiples formas su apoyo incondicional.

A mis padres por haber realizado todos los sacrificios que me han permitido desarrollarme como persona y como profesional, convirtiéndose en grandes colaboradores de mí progreso.

A la Universidad Técnica Particular de Loja quien por medio de la Escuela de ingeniería Civil ha facilitado las herramientas necesarias para la realización de mi formación profesional.

A mi director de tesis el PhD. Fernando Oñate Valdivieso por haberme brindado su colaboración indicándome las directrices para la correcta ejecución de este proyecto.

Al Ing. Santiago Quiñonez administrador del laboratorio virtual de Hidrología por la colaboración brindada en el proceso de implementación del proyecto como parte del HYDROVLAB.

A mis amigos y a todos aquellos profesionales quienes me han brindado en alguna etapa de mi formación su colaboración en las distintas actividades realizadas a lo largo de este periodo de aprendizaje.

Edison Wilson Briceño Briceño



DEDICATORIA:

A Dios por ser mi guía en el transcurso de mi vida, yo he señalado a donde quiero ir y él me ha mostrado por donde he de seguir.

A mis padres Gloria Briceño Jara y Edy Briceño Calderón por ser ejemplo de esfuerzo, comprensión y de sacrificio para mí pues han procurado dar lo mejor en todas las etapas de mi formación, y el que haya logrado esto es una muestra de ello.

Al final lo logre; por ti y para ti.

Edison Wilson Briceño Briceño



INDICE

CERTIFICACIÓN:	I
AUTORÍA:	II
CESIÓN DE DERECHOS:	III
AGRADECIMIENTO:	IV
DEDICATORIA:	V
RESUMEN	XVI
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 DEFINICIONES BÁSICAS.....	4
1.4.1 HydroVlab	4
1.4.2 Microsoft Visual studio.net	4
1.4.3 ASP.NET	5
1.4.4 Chart Director	5
1.4.5 Ajax Tool Kit.....	5
CAPÍTULO II: HIDRÁULICA DE POZOS	6
2.1 Definiciones básicas	7
2.1.1 Acuífero confinado.....	7
2.1.2 Acuífero semiconfinado	7
2.1.3 Acuífero libre.....	8
2.1.4 Coeficientes característicos de un acuífero	8
2.2 Hidráulica de pozos	10



2.2.1	Pozo de extracción	10
2.2.2	Pozo de observación	10
2.2.3	Abatimiento	10
2.2.4	Caudal de extracción (Q)	11
2.2.5	Cono de depresión	11
2.3	Hidráulica de pozos en régimen permanente	11
2.3.1	Hidráulica de pozos en acuífero confinado: método de Thiem.....	12
2.3.2	Hidráulica de pozos en acuífero libre: método de Dupuit.....	13
2.4	Hidráulica de pozos régimen no permanente	14
2.4.1	Hidráulica de pozos: método de Theis.....	14

**CAPÍTULO III: IMPLEMENTACIÓN DE RUTINAS DE HIDRÁULICA DE POZOS
CON VISUAL STUDIO.NET 17**

3.1	Consideraciones para la implementación de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab.	18
3.2	Algoritmos y diagramas de flujo de la herramienta hidráulica de pozos.....	20
3.3	Implementación de la herramienta hidráulica de pozos mediante Microsoft visual Studio.	27

**CAPÍTULO IV: FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA HIDRÁULICA DE
POZOS 33**

4.1	Introducción	34
4.2	Funcionamiento de la herramienta hidráulica de pozos en el HydroVlab bajo régimen permanente.....	36
4.2.1	Hidráulica de pozos sin pozos de observación.....	36
4.2.2	Hidráulica de pozos con dos pozos de observación.....	43
4.3	Funcionamiento de la herramienta hidráulica de pozos en el HydroVlab bajo régimen no permanente.....	48
4.3.1	Determinación del caudal (Q) y abatimiento (Z) en el acuífero.	49



4.2.2 Determinación del coeficiente de almacenamiento (S) y de transmisibilidad (T).53

CAPÍTULO V: VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA HIDRÁULICA DE POZOS DEL HYDROVLAB. 61

5.1 Validación de resultados.....62

5.1.1 Acuífero confinado: Método de Thiem.....62

5.1.2 Acuífero libre: Método de Dupuit.62

5.1.3 Método de Theis63

5.2 Resultados obtenidos por: Custodio, E. y Lamas, M. (2001); así como por Monsalve Sáenz G. (1995).64

5.2.1 Régimen permanente: Método de Thiem.64

5.2.2 Régimen permanente: Método de Thiem y de Dupuit.65

5.2.3 Régimen no permanente: Método de Theis.....67

5.3 Resultados obtenidos mediante Microsoft Excel.70

5.3.1 Régimen permanente: Método de Thiem.70

5.3.2 Régimen permanente: Método de Thiem y método de Dupuit.74

5.3.3 Régimen no permanente: Método de Theis.....81

5.4 Resultados obtenidos mediante aplicación de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab.....85

5.4.1 Régimen permanente: Método de Thiem.85

5.4.2 Régimen permanente: Método de Thiem y método de Dupuit.88

5.4.3 Régimen no permanente: Método de Theis.....97

5.5 Análisis de resultados.....101

5.5.1 Régimen permanente: Método de Thiem101

5.5.2 Régimen permanente: Método de Thiem y método de Dupuit102

5.5.3 Régimen no permanente: Método de Theis.....104



CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
6.1 Conclusiones	108
6.2 Recomendaciones	109
BIBLIOGRAFÍA..	111

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Acuífero confinado.....	7
Figura 2.2: Acuífero semiconfinado.	7
Figura 2.3: Acuífero libre.	8
Figura 2.3: Coeficiente de almacenamiento.	9
Figura 2.4: Abatimiento en pozo de extracción.	10
Figura 2.5: Formación del cono de descensos.....	11
Figura 2.6: Curva genérica de Theis	16
Figura 3.1: Diagrama de flujo general de la aplicación: Régimen permanente.	20
Figura 3.2: Diagrama de flujo general de la aplicación: Régimen no permanente.	21
Figura 3.3: Diagrama de flujo para el método de Thiem: Dos pozos de observación.....	22
Figura 3.4: Diagrama de flujo para el método de Dupuit: Dos pozos de observación.....	24
Figura 3.5: Diagrama de flujo para el método de Theis.....	26
Figura 3.6: Código: Acuífero libre: Un pozo de observación-Cálculo de caudal de extracción- Método de Dupuit	27
Figura 3.7: Código de la aplicación: Acuífero libre: Un pozo de observación- Cálculo de caudal de extracción - Método de Dupuit.....	28
Figura 4.1: Presentación del Hydrovlab.....	34
Figura 4.2: Presentación categoría Hidráulica de pozos del Hydrovlab.	35
Figura 4.3: Campos habilitados para determinar el caudal en un acuífero confinado.....	38
Figura 4.4: Ejemplo de ingreso de parámetros necesarios para determinar caudal extracción en un acuífero confinado.	38



Figura 4.5: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos régimen permanente: método de Thiem.	39
Figura 4.6: Variación de parámetros: para determinar caudal extracción.	40
Figura 4.7: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos régimen permanente- método de Thiem.	40
Figura 4.8: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen permanente-método de Thiem: Determinación del Abtimiento a distintos radios.	41
Figura 4.9: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen permanente-método de Thiem.	42
Figura 4.10: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen permanente- método de Thiem: Acercamiento al pozo de extracción.	42
Figura 4.11: Ejemplo de ingreso de parámetros necesarios para determinar caudal extracción en un acuífero confinado.	44
Figura 4.12: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: método de Thiem.....	45
Figura 4.13: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Determinación de abatimientos a distintos radios.	45
Figura 4.14: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Pozos de pequeño diámetro.....	46
Figura 4.15: Gráficas HydroVlab - Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Acercamiento al pozo de extracción.....	46
Figura 4.16: Gráficas HydroVlab - Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Acercamiento al pozo de observación 1.....	47
Figura 4.17: Gráficas HydroVlab - Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Acercamiento al pozo de observación 2.....	47
Figura 4.18: Campos habilitados para determinar el caudal en un acuífero confinado.	49
Figura 4.19: Ingreso de parámetros necesarios para determinar caudal de extracción.	50
Figura 4.20: Espacio destinado para la presentación de las gráficas Hidráulica de pozos-HydroVlab.	50
Figura 4.21: Gráficas Hydrovlab: Hidráulica de pozos régimen no permanente- método de Theis.	51



Figura 4.22: Variación de parámetros: Determinación del caudal extracción.	51
Figura 4.23: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen no permanente- método de Theis.	52
Figura 4.24: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen no permanente- método de Theis: Determinación del Abtimiento a distintos radios.	52
Figura 4.25: Ingreso de parámetros necesarios para determinar T y S.	53
Figura 4.26: Ingreso de registros z (m) vs t (h): Exploración de archivo (.txt).	54
Figura 4.27: Ingreso de registros z (m) vs t (h): Selección de archivo (.txt).	55
Figura 4.28: Ingreso de registros z (m) vs t (h): Cargar archivo (.txt).....	56
Figura 4.29: Ingreso de registros z (m) vs t (h): Mensaje de confirmación de archivo cargado con éxito.	56
Figura 4.30: Presentación de los registros z (m) vs t (horas) del archivo.....	56
Figura 4.31: Gráficas de Theis: Curva tipo u vs W (u) y curva de los datos (r^2/t) vs z.	57
Figura 4.33: Desplazamiento de gráficas de Theis: Curva tipo u vs W (u) y datos reales (r^2/t) vs z.	58
Figura 4.34: Ingreso de parámetros obtenidos por la superposición de gráficas de Theis.	59
Figura 4.35: Determinación del coeficiente de transmisibilidad (T).	59
Figura 4.36: Determinación del coeficiente de almacenamiento (S).	59
Figura 4.37: Limpieza de campos: Régimen permanente.	60
Figura 4.38: Limpieza de campos: Régimen no permanente.	60
Figura 5.1: Curva genérica: W (u) vs u.....	67
Figura 5.2: Valores: r^2/t vs z	68
Gráfica 5.13: Superposición de gráficas de Theis.	84
Gráfica 5.14: Superposición de gráficas de Theis.	84
Figura 5.14: Determinación del abatimiento en el pozo (zp) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.....	85
Figura 5.15: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.	86
Figura 5.16: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.	86
Figura 5.17: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.	86



Figura 5.18: Curva de abatimientos mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.	87
Figura 5.19: Acercamiento al pozo mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.	87
Figura 5.20: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	88
Figura 5.21: Curva de abatimientos mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	88
Figura 5.22: Acercamiento al pozo mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	89
Figura 5.23: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	89
Figura 5.24: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	89
Figura 5.25: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta Hidráulica de pozos del HydroVlab: Método de Dupuit.	90
Figura 5.26: Curva de abatimientos mediante la herramienta Hidráulica de pozos del HydroVlab: Método de Dupuit.	90
Figura 5.27: Acercamiento al pozo de mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	91
Figura 5.28: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	91
Figura 5.29: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	91
Figura 5.30: Determinación del abatimiento (z) en el pozo de extracción y en pozos de observación mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	92
Figura 5.31: Hidráulica de pozos del HydroVlab: Curva de abatimientos considerando pozos de observación en acuífero confinado.	93
Figura 5.32: Acercamiento al pozo de extracción mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	93
Figura 5.33: Acercamiento al pozo de observación 1 mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.	94



Figura 5.34: Acercamiento al pozo de observación 2 mediante la herramienta:
Hidráulica de pozos del HydroVlab..... 94

Figura 5.35: Determinación del abatimiento (z) en el pozo de extracción y
en pozos de observación mediante la herramienta: Hidráulica
de pozos del HydroVlab..... 95

Figura 5.36: Hidráulica de pozos del HydroVlab: Curva de abatimientos
considerando pozos de observación en acuífero libre..... 95

Figura 5.37: Acercamiento al pozo de extracción mediante la herramienta:
Hidráulica de pozos del HydroVlab..... 96

Figura 5.38: Acercamiento al pozo de observación 1 mediante la
herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab..... 96

Figura 5.39: Acercamiento al pozo de observación 2 mediante la herramienta:
Hidráulica de pozos del HydroVlab..... 97

Figura 5.40: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab:
Campos habilitados. 97

Figura 5.41: Determinación de coeficientes S y T mediante HydroVlab. 98

Figura 5.42: Determinación de coeficientes S y T mediante el Hydrovlab:
Ingreso de registro z vs t..... 98

Figura 5.43: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab:
Factor r^2/t 98

Figura 5.44: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab:
Factor r^2/t 99

Figura 5.45: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab:
Curva genérica de Theis..... 99

Figura 5.46: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab:
Valores r^2/t vs z..... 99

Figura 5.47: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab:
Superposición de gráficas de Theis..... 100

Figura 5.48: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab:
Superposición de gráficas de Theis..... 100

Figura 5.49: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab..... 100



INDICE DE TABLAS Y CUADROS

Tabla 4.3: Distancias radiales y abatimientos determinadas por la aplicación: Método de Thiem	41
Tabla 4.8: Distancias radiales y abatimientos determinadas por la aplicación mediante el: Método de Theis.....	53
Tabla 5.2: Descensos para los puntos de observación.....	66
Tabla 5.3: Registro de abatimiento (z) vs tiempo (t).....	67
Cuadro 5.1: Determinación del abatimiento en el pozo (Zp) hasta R mediante Microsoft Excel.....	70
Cuadro 5.2: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R, mediante Microsoft Excel.....	71
Cuadro 5.3: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.....	72
Cuadro 5.4: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.....	73
Cuadro 5.5: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.....	76
Cuadro 5.6: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.....	77
Cuadro 5.7: Determinación del abatimiento en el pozo (Zp) y desde rp hasta R mediante Microsoft Excel.....	78
Cuadro 5.8: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.....	79
Cuadro 5.9: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.....	80
Cuadro 5.10: Determinación de coeficientes S y T mediante Microsoft Excel.....	81
Tabla 5.4: Curva genérica de Theis: Pares ordenados u, W(u).....	82
Tabla 5.5: Valores de gráfica: r^2/t vs z.....	83
Tabla 5.6: Coeficientes S y T obtenidos mediante Microsoft Excel.....	85
Tabla 5.7: Resumen de resultados obtenidos mediante aplicación de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab.....	92
Tabla 5.8: Resumen de resultados: Método de Thiem.....	101
Tabla 5.9: Resumen de resultados: Método de Thiem.....	102



Tabla 5.10: Resumen de resultados: Método de Dupuit.	102
Tabla 5.11: Resumen de resultados: Método de Theis.	104
Tabla 5.12: Comparación de valores de $W(u)$ de acuerdo a la precisión empleada.	105



RESUMEN

Este trabajo se desarrolló con el objetivo de proporcionar por medio del laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB) herramientas de hidráulica de pozos que les permitan a todos aquellos interesados, experimentar mediante un entorno confiable y de fácil manejo; para lo cual se empleó como herramienta de programación Microsoft Visual Studio.Net 2005.

Se ha empleado principalmente la bibliografía de Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1, así como Monsalve Sáenz G. (1995), Hidrología En La Ingeniería.*

Las herramientas implantadas permiten realizar la simulación de la hidráulica de pozos aplicando para régimen permanente el método de Thiem y el método de Dupuit y para régimen no permanente el método de Theis.

La efectividad de las herramientas se midió al comparar, para los mismos problemas de hidráulica de pozos, los resultados presentados en la bibliografía empelada, los resultados obtenidos mediante aplicación de Microsoft Excel y los resultados obtenidos mediante la herramienta hidráulica de pozos del Hydrovlab, obteniendo una precisión del 100%.

Además de su precisión se destaca la facilidad de manejo de las herramientas implantadas en el HydroVlab.

Palabras clave: HydroVlab, hidráulica de pozos, método de Thiem, método de Dupuit, método de Theis, acuífero confinado, acuífero no confinado.



ABREVIATURA DE UNIDADES	
h	Horas
m	Metro
s	Segundo
m²	Metro cuadrados
m³	Metro cúbicos
–	Adimensional

SIMBOLOGÍA DE TÉRMINOS	
SÍMBOLO	SIGNIFICADO
Q	Caudal
z	Abatimiento
rp	Radio de pozo
R	Radio de influencia del pozo de extracción.
N.F.	Nivel freático
rpObs.	Radio de pozo de observación.
rpExtr.	Radio del pozo de extracción
T	Coeficiente de transmisibilidad.
hp	Altura del agua en pozo de extracción
S	Coeficiente de almacenamiento del acuífero
K	Coeficiente de permeabilidad del acuífero
t	Tiempo de bombeo



SIMBOLOGÍA DE TÉRMINOS	
SÍMBOLO	SIGNIFICADO
hw	Altura del agua en el punto de análisis
ho	Altura de agua donde termina el radio de influencia.
hn	Altura de agua para una distancia radial n comprendida entre rp y R.
Ho	Altura del acuífero.
u	Parámetro adimensional de Theis para pozo en acuífero cautivo.
W (u)	Función de pozo de Theis en acuífero confinado.
ln	Logaritmo natural.
!	Factorial de un número.
x	Operador de multiplicación.
PE	Pozo de extracción.
PO	Pozo de observación.
R	Distancia radial a un punto de observación comprendido entre rp y R.
D₁	Distancia al pozo de observación 1.
D₂	Distancia al pozo de observación 2.



CAPÍTULO I

GENERALIDADES



1.1 INTRODUCCIÓN

El estudio del agua subterránea ha venido tomando mucha importancia sobre todo debido al incremento poblacional y a las cada vez más escasas fuentes de abastecimiento de pueblos y ciudades; pero no basta con determinar posibles fuentes es necesario analizar e implantar una adecuada producción de las mismas, por lo que el estudio de la hidráulica de pozos como captaciones de agua subterránea permite determinar las características y la forma de explotación de este recurso de tal manera que su producción se efectúe de manera económica y eficaz.

Entre los principales objetivos del estudio de la hidráulica de pozos se encuentran el determinar caudales de extracción, abatimientos, conductividad hidráulica, etc.; características propias que dependen del tipo de formación geológica es decir dependen de si es un acuífero: confinado, semiconfinado o libre; produciéndose una variedad de casos tanto para pozos bajo régimen permanente así como para pozos bajo régimen no permanente.

Debido a la necesidad de analizar la hidráulica de los pozos de explotación de aguas subterránea, es de importancia contar con herramientas en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB) que faciliten todo este proceso tanto a estudiantes como a profesionales interesados mediante un entorno gráfico de fácil manejo cuyos resultados sean fáciles de interpretar de manera que se pueda entender su comportamiento y determinar la factibilidad de la implantación de este tipo de captaciones subterráneas.



1.2 JUSTIFICACIÓN

En nuestro país como en el resto del mundo es necesario determinar la factibilidad de explotación de nuevas fuentes de abastecimiento de agua subterránea, pero la complejidad del procedimiento debido a la variedad de parámetros que se deben manejar así como la falta de herramientas de cálculo y de experimentación impide que el estudio de la hidráulica pozos se desarrolle de forma sencilla, por tal razón el crear una serie de herramientas en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB) permitirá a estudiantes y profesionales experimentar y comprender la aplicabilidad de la hidráulica de pozos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Implementar mediante una aplicación en Microsoft Visual Studio, herramientas de hidráulica de pozos en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB), que permitan a todos aquellos interesados experimentar mediante un entorno confiable y de fácil manejo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Implementar herramientas de experimentación en hidráulica de pozos en el Hydrovlab que permitan:

- ✓ Determinar el caudal de extracción de un pozo implantado en un acuífero: confinado o libre.
- ✓ Calcular del abatimiento generado por la explotación del agua contenida en un acuífero: confinado o libre.



- ✓ Determinación de los coeficientes característicos de un acuífero como: conductividad hidráulica, coeficiente de transmisividad, entre otros.
- ✓ Obtener la curva de abatimientos generada en cada tipo de acuífero: libre o confinado.
- ✓ Determinar el radio de influencia de un pozo implantado en un acuífero confinado o en un acuífero libre.
- ✓ Herramienta que permita generar gráficas que faciliten la comprensión del comportamiento de la hidráulica de pozos.
- ✓ Elaborar manuales de usuario y ejemplos de aplicación de cada aplicación de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab.

1.4 DEFINICIONES BÁSICAS

1.4.1 HydroVlab¹

El laboratorio virtual de hidrología (HydroVlab), es un espacio académico que cuenta con un entorno amigable el cual presenta múltiples herramientas que facilitan a los interesados en el campo de hidrología realizar entre otras opciones la simulación, el análisis y experimentación de fenómenos hidrológicos así como el diseño de soluciones para los mismos.

1.4.2 Microsoft Visual studio.net²

Es una herramienta de programación considerada como un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) que permite entre otras la elaboración de aplicaciones web, con la ayuda de lenguajes de programación como ASP.NET, visual basic.NET entre otros, en cualquier entorno que soporte la plataforma.

¹ <http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec>

² http://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio, revisado en noviembre de 2011.



1.4.3 ASP.NET³

Es un framework o infraestructura digital elaborada por Microsoft para la elaboración de aplicaciones web, entre sus atributos se encuentra el facilitar la construcción de sitios web dinámicos, aplicaciones web y servicios web XML; todo esto debido a que permite escribir código ASP.NET usando cualquier lenguaje admitido por el .NET Framework.

1.4.4 Chart Director

Constituye una poderosa herramienta que permite representar gráficamente y en forma profesional la información, al aplicarse conjuntamente con Microsoft visual studio.net, en este caso empleando el lenguaje de programación visual basic.net.

1.4.5 Ajax Tool Kit⁴

Es una tecnología (JavaScript asíncrono y XML) que permite la elaboración de páginas web interactivas, entre sus múltiples aplicaciones está el evitar efectos de refrescamiento al actualizar la información de la página; es decir acortar el tiempo de respuesta de la aplicación web evitando el refrescamiento total.

³ <http://es.wikipedia.org/wiki/ASP.NET>, revisado en noviembre de 2011.

⁴ <http://www.es-asp.net/tutoriales-asp-net/tutorial-5312-5313/que-es-el-asp-net-ajax-control-toolkit.aspx>, revisado en noviembre de 2011.



CAPÍTULO II

HIDRÁULICA DE POZOS



2.1 Definiciones básicas

2.1.1 Acuífero confinado

Formación geológica la cual contiene agua que se encuentra a mayor presión que la atmosférica. No recibe aportes o recargas de agua.⁵

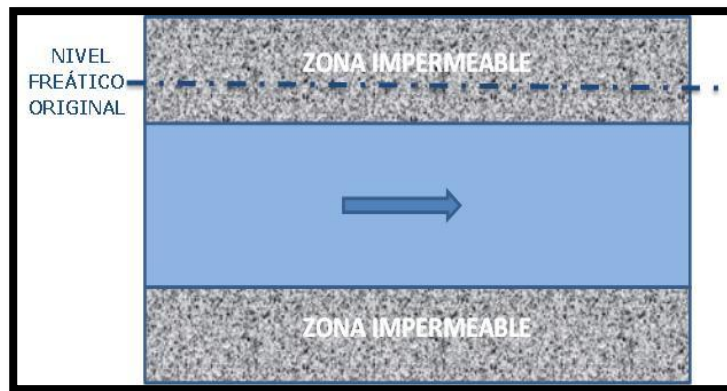


Figura 2.1: Acuífero confinado.

Fuente: El Autor.

2.1.2 Acuífero semiconfinado

Formación geológica de similares características a las del acuífero confinado pero a diferencia de este recibe o pierde agua a través del techo y/o de la base.⁵

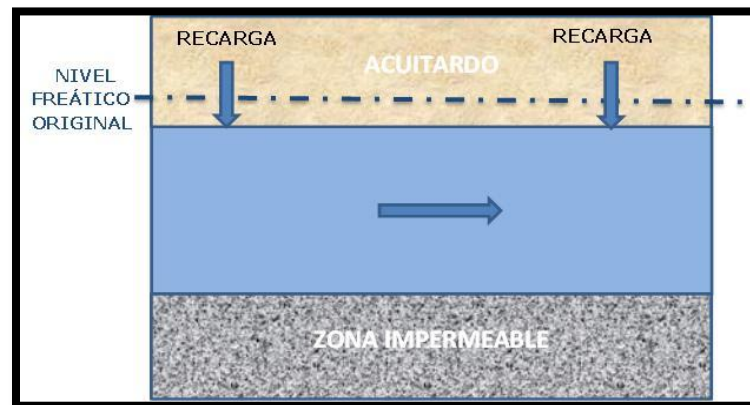


Figura 2.2: Acuífero semiconfinado.

Fuente: El Autor.

⁵ Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1, Pág. 619.*



Un acuífero semiconfinado por lo menos está limitado por un acuitardo ya sea en el techo (Figura 2.2) o en su base, éste es una formación geológica semipermeable a través de la cual el agua lentamente es transmitida⁶.

2.1.3 Acuífero libre

Aquella formación geológica que contiene agua y cuya superficie actúa bajo presión atmosférica, es conocido también como acuífero freático, una de sus características es que recibe recargas de agua⁷.

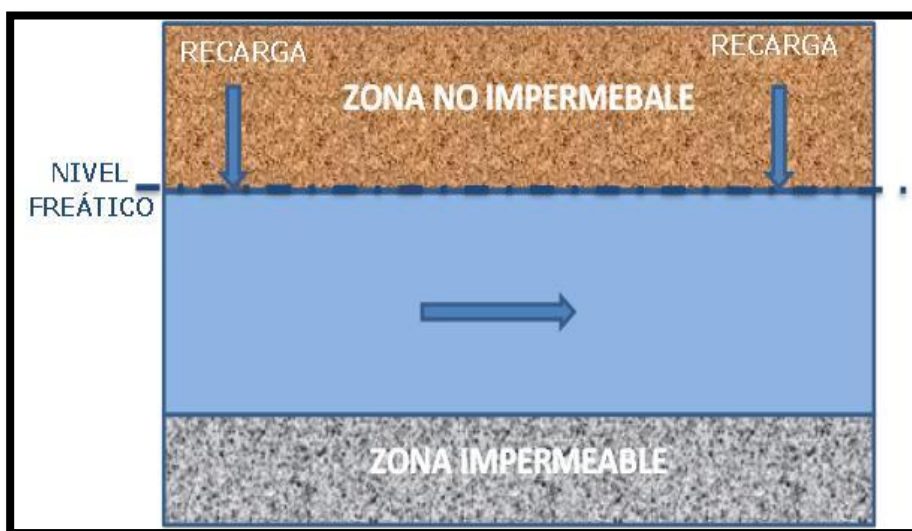


Figura 2.3: Acuífero libre.
Fuente: El Autor.

2.1.4 Coeficientes característicos de un acuífero

Coeficiente de transmisividad (T): Parámetro que expresa la capacidad que tiene el acuífero para transmitir agua, expresado en $m^2/día$.

⁶ Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1, Pág. 619.*

⁷ Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1, Pág. 619.*



Coeficiente de almacenamiento (S): Representa la cantidad de agua que es liberada por un prisma vertical de base unitaria y altura del acuífero que desciende la longitud de altura piezométrica media⁸, es un parámetro adimensional.

$$S = \frac{V_{agua}}{A_{base} \times h_p} \quad (2.1)$$

Donde:

V_{agua}: Volumen unitario de agua descargado.

A_{base}: Área de la base del prisma.

h_p: Altura que desciende la longitud piezométrica media del acuífero.

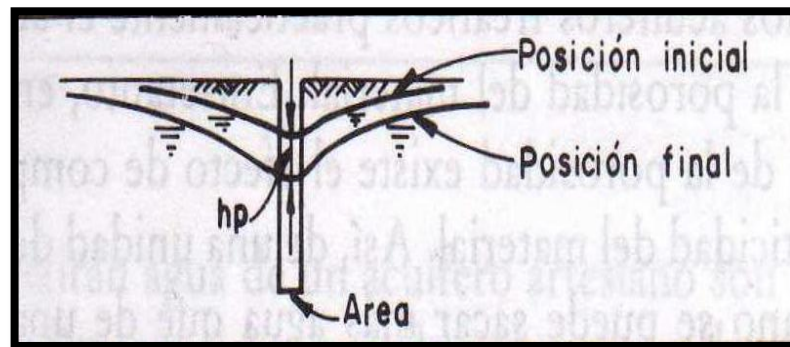


Figura 2.4: Coeficiente de almacenamiento.

Fuente: Monsalve Sáenz G. (1995), *Hidrología En La Ingeniería*; Pág.370.

Conductividad hidráulica (K): Representa la capacidad que tiene el acuífero para permitir el paso del agua a través de él, expresada en m/día, siendo determinada mediante:

$$k = \frac{T}{H_o} \quad (2.2)$$

Donde:

T: Coeficiente de transmisividad, m²/día.

H_o: Altura del acuífero, m.

⁸ Monsalve Sáenz G. (1995), *Hidrología En La Ingeniería*; Pág.370.



2.2 Hidráulica de pozos

2.2.1 Pozo de extracción

Captación vertical de agua subterránea de forma cilíndrica cuyo diámetro es de dimensión mucho menor que su profundidad.⁹

2.2.2 Pozo de observación

Es un punto o una estación de control que permite realizar el monitoreo del agua subterránea que contiene un acuífero permitiendo identificar cambios en el nivel del agua.

2.2.3 Abatimiento

Es el descenso en la carga hidráulica del pozo producto del proceso de extracción; es decir es la distancia que existe entre la carga hidráulica inicial y la carga hidráulica luego del proceso de extracción medida para el mismo punto. Se expresa en unidades de longitud (m).¹⁰

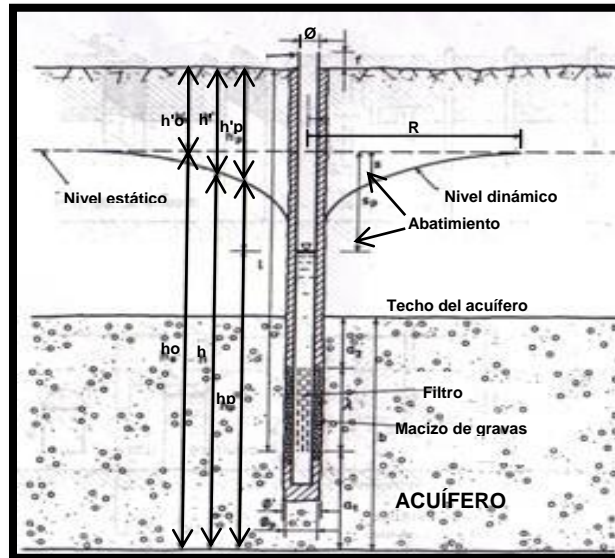


Figura 2.5: Abatimiento en pozo de extracción.

Fuente: Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1*; Pág. 621.

⁹ Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1*, Pág. 620.

¹⁰ Donado Garzón Leonardo David, *Hidráulica de pozos*, Capítulo 8, Pág. 1.



2.2.4 Caudal de extracción (Q)

Es la cantidad de agua que se extrae por unidad de tiempo a través de una captación subterránea (pozos). Se expresa en unidades de volumen sobre unidades de tiempo ($m^3/día$).

2.2.5 Cono de depresión

Forma que adquiere el nivel freático del agua subterránea alrededor del pozo producto de la extracción de agua, también se conoce como cono de descensos¹¹.

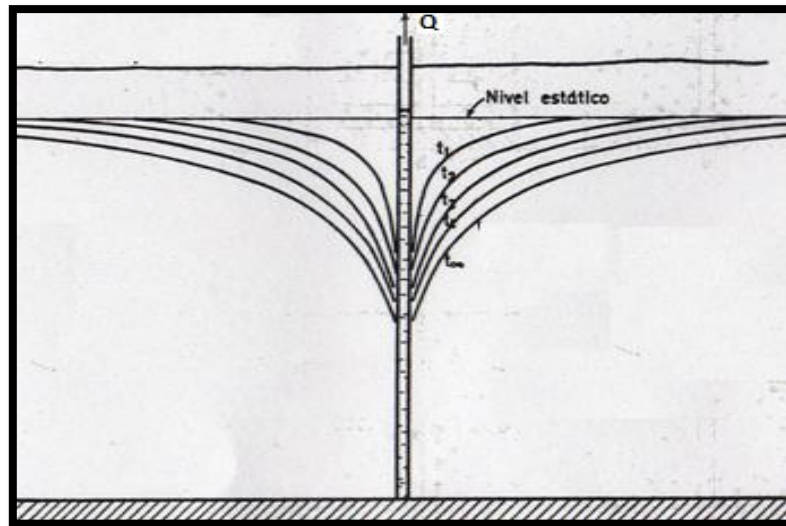


Figura 2.6: Formación del cono de descensos

Fuente: Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1*; Pág. 624; Omega: Barcelona, 4560 pp.

2.3 Hidráulica de pozos en régimen permanente

Las condiciones hidráulicas bajo régimen permanente se presentan cuando existe un equilibrio en el sistema, es decir que el caudal extraído (descarga) es igual al caudal de recarga del acuífero y por tanto no se toma el agua almacenada en el acuífero¹².

¹¹ Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1*, Pág. 624.

¹² Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1*, Pág. 624 y 625.



2.3.1 Hidráulica de pozos en acuífero confinado: método de Thiem.

Las condiciones hidráulicas en acuíferos confinados en los que se ha implantado pozos de extracción y los cuales actúan bajo régimen permanente pueden ser analizadas mediante el método propuesto por Adolph Thiem (1870), el cual requiere entre otras consideraciones las que se presentan a continuación:

- ✓ Acuífero confinado
- ✓ Condiciones hidráulicas bajo régimen permanente.
- ✓ El acuífero es horizontal y tiene un espesor constante
- ✓ El caudal de extracción es constante
- ✓ El acuífero presenta una extensión infinita, *entre otras*.

Se debe considerar que el método de Thiem no presenta limitaciones respecto al radio del pozo de extracción (Custodio, E. y Lamas, M., 2001)

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2 \times \pi \times T} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.3)$$

Donde:

h₁: Altura piezométrica del agua en el punto de observación 1.

h₂: Altura piezométrica del agua en el punto de observación 2.

Q: Caudal de extracción expresado en m³/día.

T: Coeficiente de transmisibilidad del acuífero expresada en m²/día.

r₁: Distancia radial medida desde el centro del pozo de extracción a la que se observa la altura piezométrica 1.

r₂: Distancia radial medida desde el centro del pozo de extracción a la que se observa la altura piezométrica 2.



2.3.2 Hidráulica de pozos en acuífero libre: método de Dupuit.

Para acuífero libre se emplea el método de Dupuit, entre sus consideraciones tenemos:

- ✓ Acuífero homogéneo y de extensión infinita.
- ✓ El caudal de extracción es constante
- ✓ El nivel del agua decae al mismo tiempo que el agua es extraída del acuífero.
- ✓ Radio del pozo de extracción es pequeño por lo que se desprecia el almacenamiento en el pozo, *entre otras*.

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi x K} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

Q: Caudal de extracción expresado en m³/día.

K: Permeabilidad del acuífero expresada en m/día.

h₁: Altura piezométrica del agua en el punto de observación 1.

h₂: Altura piezométrica del agua en el punto de observación 2.

r₁: Distancia radial desde el centro del pozo de extracción hasta el punto en el que se observa la altura piezométrica 1.

r₂: Distancia radial desde el centro del pozo de extracción hasta el punto en el que se observa la altura piezométrica 2.

Análogamente se presenta (Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea*, Volumen 1, Pág. 658) una fórmula equivalente a la mencionada anteriormente:

$$h_2^2 - h_1^2 = 0,73 \left(\frac{Q}{K} \right) \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.5)$$



2.4 Hidráulica de pozos régimen no permanente

Las condiciones hidráulicas bajo régimen no permanente se presentan cuando no existe recarga en el acuífero o cuando ésta no es igual a la descarga, por lo tanto se extrae el agua almacenada en el acuífero.

En este caso no existe un equilibrio en el sistema ya que el caudal extraído provendrá únicamente o en su mayoría del almacenamiento de agua en el acuífero¹³.

2.4.1 Hidráulica de pozos: método de Theis

Se emplea como método de cálculo en acuífero confinado el método de Theis el cual para régimen no permanente considera:

- ✓ El acuífero es confinado
- ✓ No desprecia el descenso del nivel freático con el tiempo
- ✓ La gradiente hidráulica varía con el tiempo.
- ✓ El radio del pozo de extracción es muy pequeño por lo que no considera que en él se produzca almacenamiento, *entre otras*.

$$z = \frac{Q}{4 \pi x T} W(u) \quad (2.6)$$

Donde:

z: Abatimiento de la superficie piezométrica en el pozo de observación.

Q: Caudal de extracción expresado en m³/día.

T: Coeficiente de transmisibilidad del acuífero expresada en m²/día.

W (u): Función de pozo para acuífero confinado.

¹³ Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea*, Volumen 1, Pág. 624 y 625.



u : Parámetro adimensional para acuífero cautivo definido como:

$$u = \frac{S}{4 \times T} \left(\frac{r^2}{t} \right) \quad (2.7)$$

Donde:

S: Coeficiente de almacenamiento del acuífero el cual es un parámetro adimensional (-).

r: Distancia radial desde el pozo de extracción al punto de observación, expresada en m.

t: Tiempo medido desde el inicio del proceso de extracción, expresado en días.

En el presente trabajo se emplea la función desarrollada por Theis para la determinación de $W(u)$ la cual se define como:

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} \dots \quad (2.8)$$

Además la función de pozo para acuífero confinado $W(u)$ puede también ser determinada mediante tablas de tabulación (*Custodio, E. y Lamas, M. (2001), Hidrología Subterránea, Aparatado A.1.4 del Apéndice A.9.1*).

En el caso de desconocer los coeficientes de almacenamiento (S) y de transmisibilidad (T) del acuífero el método de Theis emplea un proceso de superposición de gráficas, utilizando la curva genérica de Theis $W(u)$ vs u .

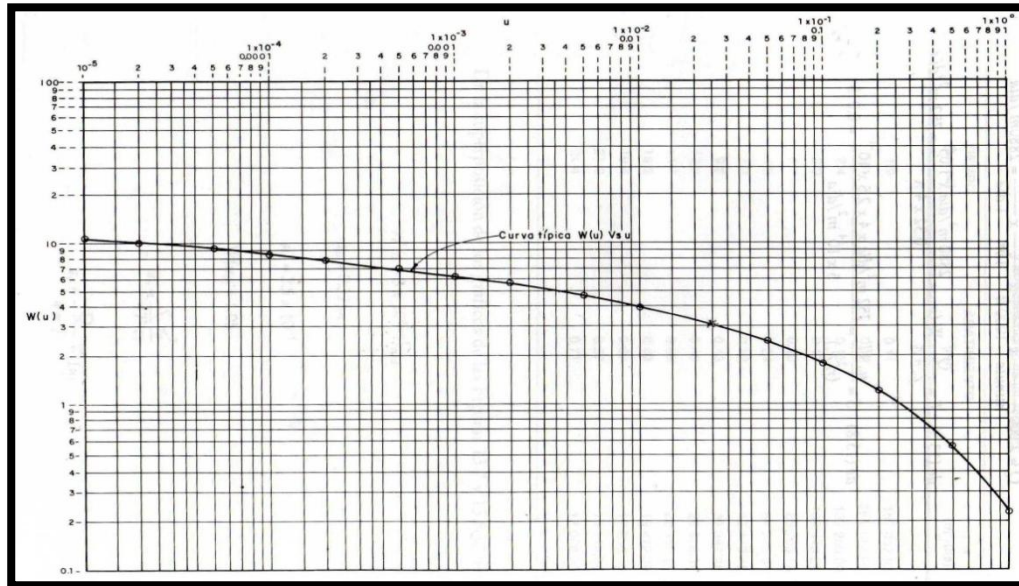


Fig. 2.7: Curva genérica de Theis

Fuente: Monsalve Sáenz G. (1995), *Hidrología En La Ingeniería*; Pág.376; Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería: Bogotá.



CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN DE RUTINAS DE HIDRÁULICA DE POZOS CON VISUAL STUDIO.NET



3.1 Consideraciones para la implementación de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab.

La herramienta hidráulica de pozos además de las consideraciones propias de cada método tanto para acuífero confinado como para acuífero libre considera para efectos demostrativos que:

- ✓ En las gráficas el radio de los pozos de observación sean la mitad de los pozos de extracción.
- ✓ Debido que la mayoría de las veces no se conoce la ubicación exacta de la superficie ésta se determina arbitrariamente en función del nivel freático y en un punto superior a este.
- ✓ La profundidad de los pozos de extracción como de observación corresponde a la magnitud a la que se coloca la superficie.
- ✓ Con el objetivo de apreciar de mejor manera el comportamiento en cada uno de los pozos, en caso de que la distancia radial desde el pozo de extracción al punto de observación 1 sea menor a dos veces r_{pExt} ($D1 < 2 r_{pExt}$) el radio de observación1 será determinado en función de la distancia radial al punto de observación 1 ($D1$), **Capítulo 3, Apartado 3.2.**
- ✓ Si la distancia radial al pozo de observación2 ($D2$) es menor a 1,5 veces la distancia radial al punto de observación 1 ($D1$), el radio del pozo de observación 2 se calculará en función de las distancias $D1$ y $D2$, **Capítulo 3, Apartado 3.2.**
- ✓ Para la representación gráfica aplicando el método de Dupuit se tiene que:

$$h_1^2 = h_2^2 - \left[\frac{Q}{\pi x K} \ln \left(\frac{R}{r} \right) \right] \quad (2.4)$$



Y por tanto:

$$h_1 = \left\{ h_2^2 - \left[\frac{Q}{\pi x K} \ln \left(\frac{R}{r} \right) \right] \right\}^{0.5}$$

Se establece que la variable **a** equivalga a la altura del agua (h) en el punto 2 elevada al cuadrado:

$$a = h_2^2 \quad (3.1)$$

Se conoce que la altura del agua (h) en un punto n es igual a la diferencia entre el nivel freático (Nf_n) y el abatimiento (z_n) medidos en el mismo punto:

$$h = Nf_n - z_n$$

Por tanto:

$$a = (Nf_n - z_n)^2$$

Y además se establece que la variable **b** equivalga:

$$b = \left[\frac{Q}{\pi x K} \ln \left(\frac{R}{r} \right) \right] \quad (3.2)$$

Por lo tanto al remplazar las dos variables en la ecuación 2.4:

$$h_1 = (a - b)^{0.5}$$

Para evitar que se genere un error debido a que no es posible determinar la raíz de un número negativo se ha establecido (**Capítulo 3, Apartado 3.2**) que:

$$a > b \quad (3.3)$$



3.2 Algoritmos y diagramas de flujo de la herramienta hidráulica de pozos.

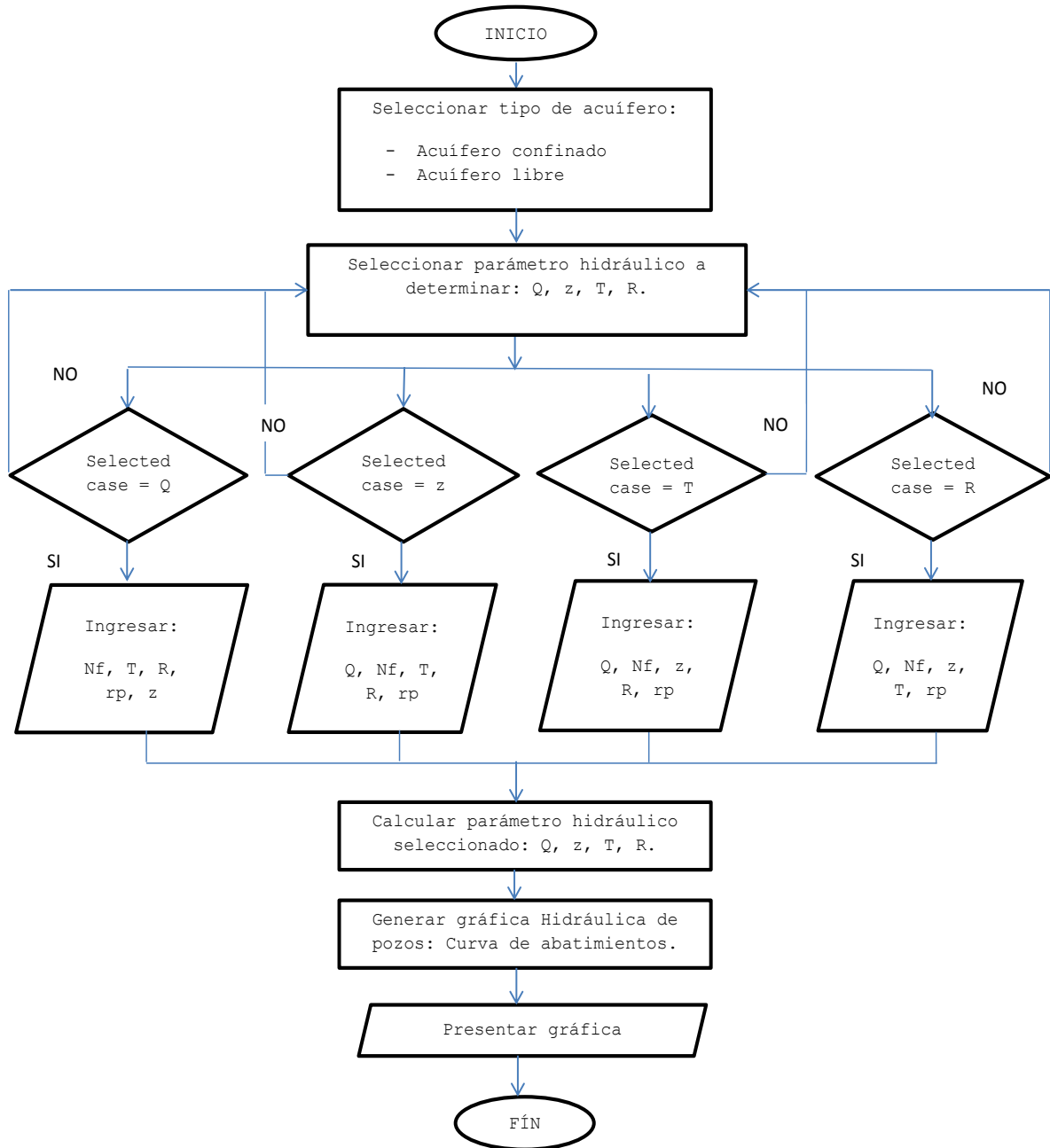


Figura 3.1: Diagrama de flujo general de la aplicación: Régimen permanente.

Fuente: El Autor.

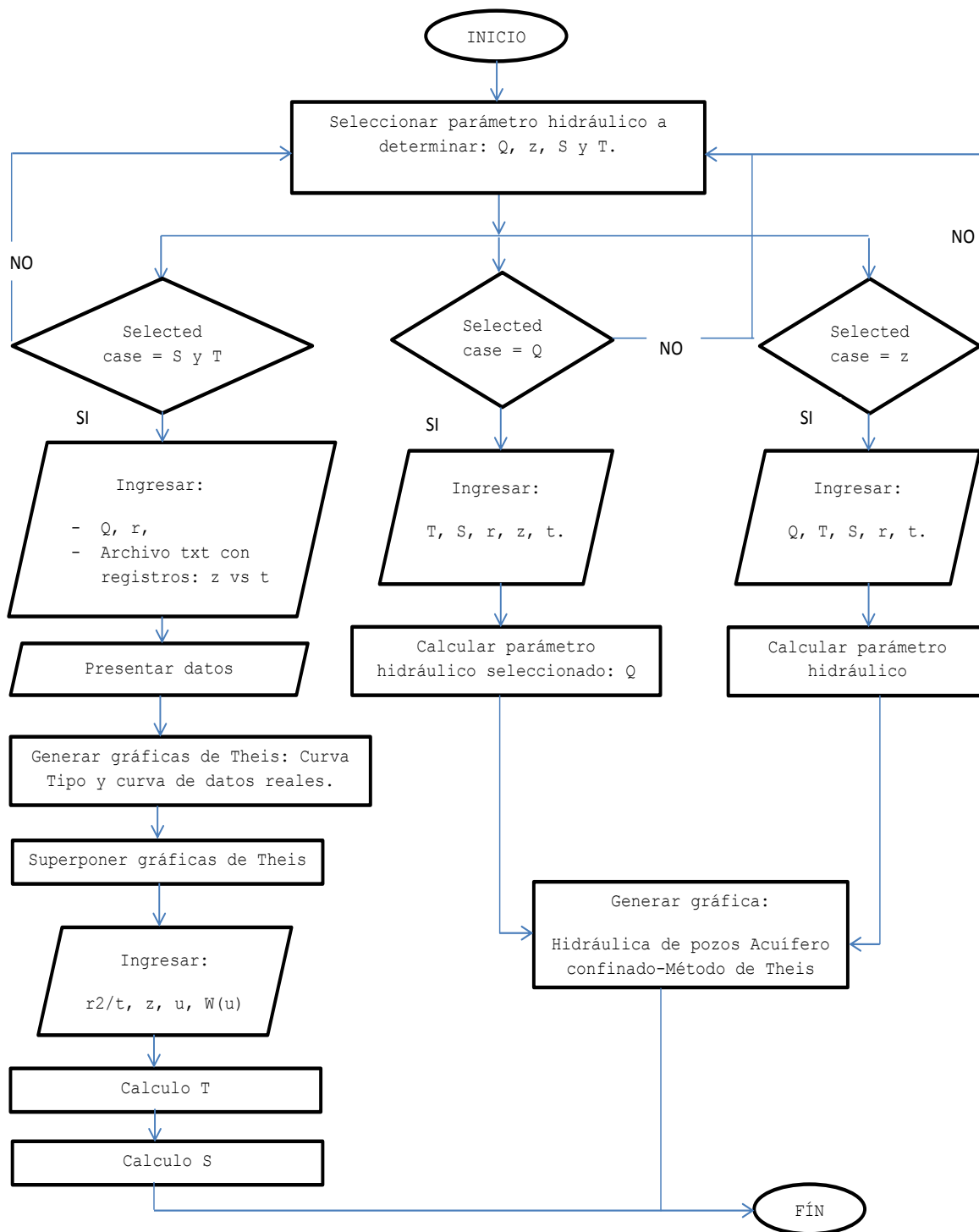


Figura 3.2: Diagrama de flujo general de la aplicación: Régimen no permanente.

Fuente: El Autor.

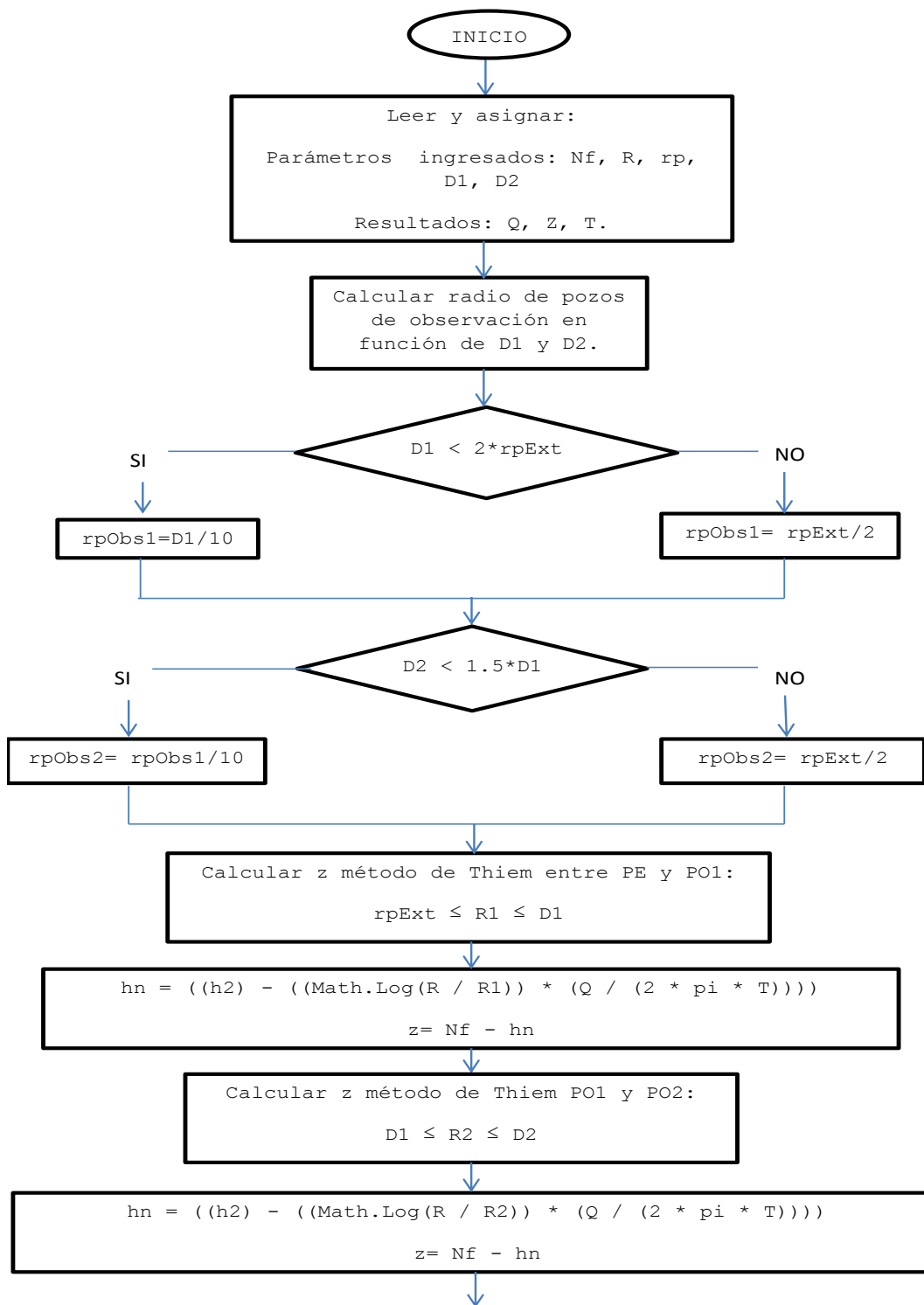


Figura 3.3: Diagrama de flujo para el método de Thiem: Dos pozos de observación.
Fuente: El Autor.

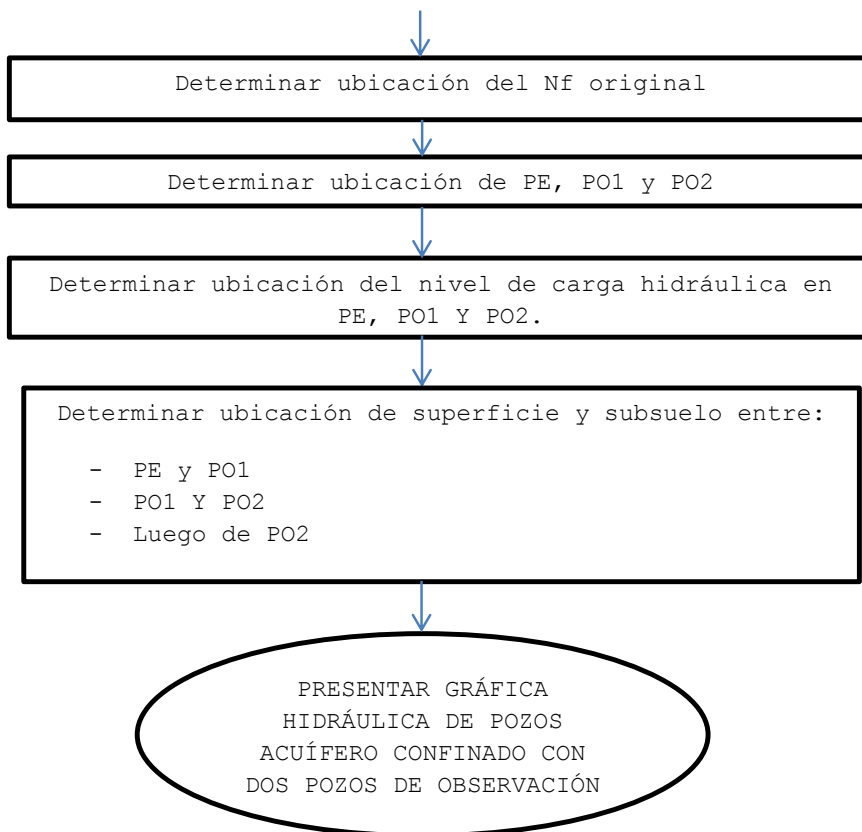


Figura 3.3: Continuación.

Fuente: El Autor.

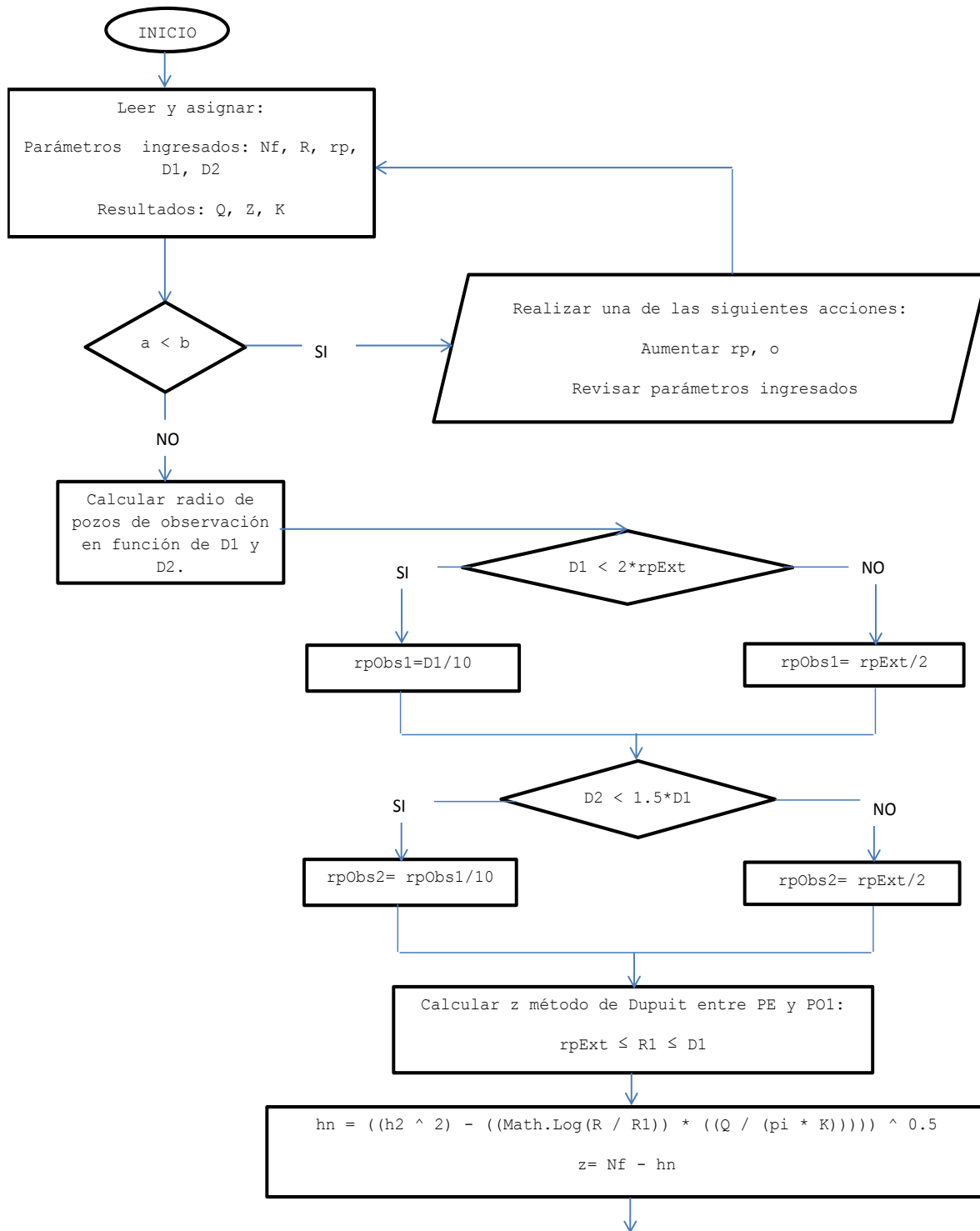


Figura 3.4: Diagrama de flujo para el método de Dupuit: Dos pozos de observación.
Fuente: El Autor.

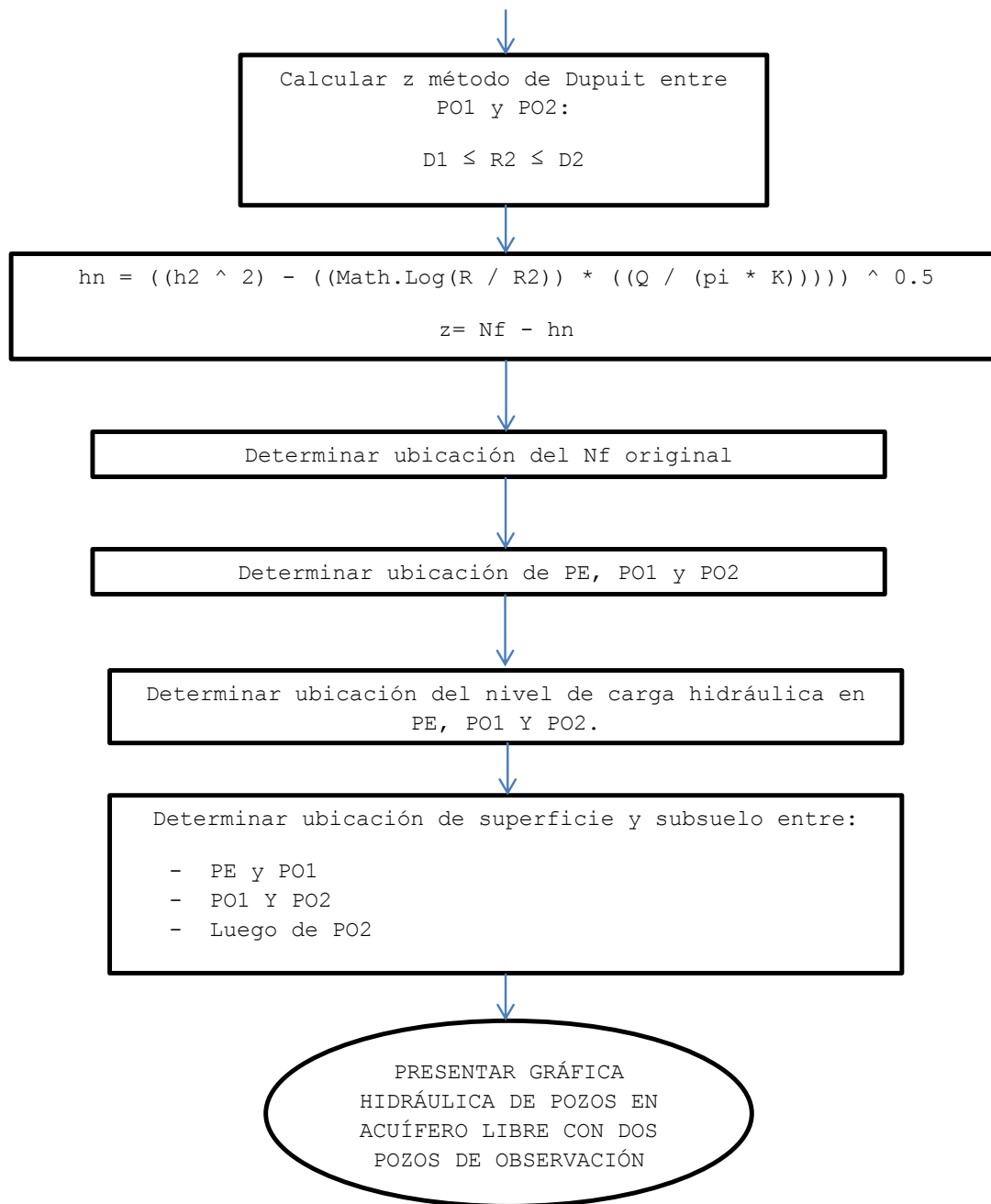


Figura 3.4: Continuación.

Fuente: El Autor.

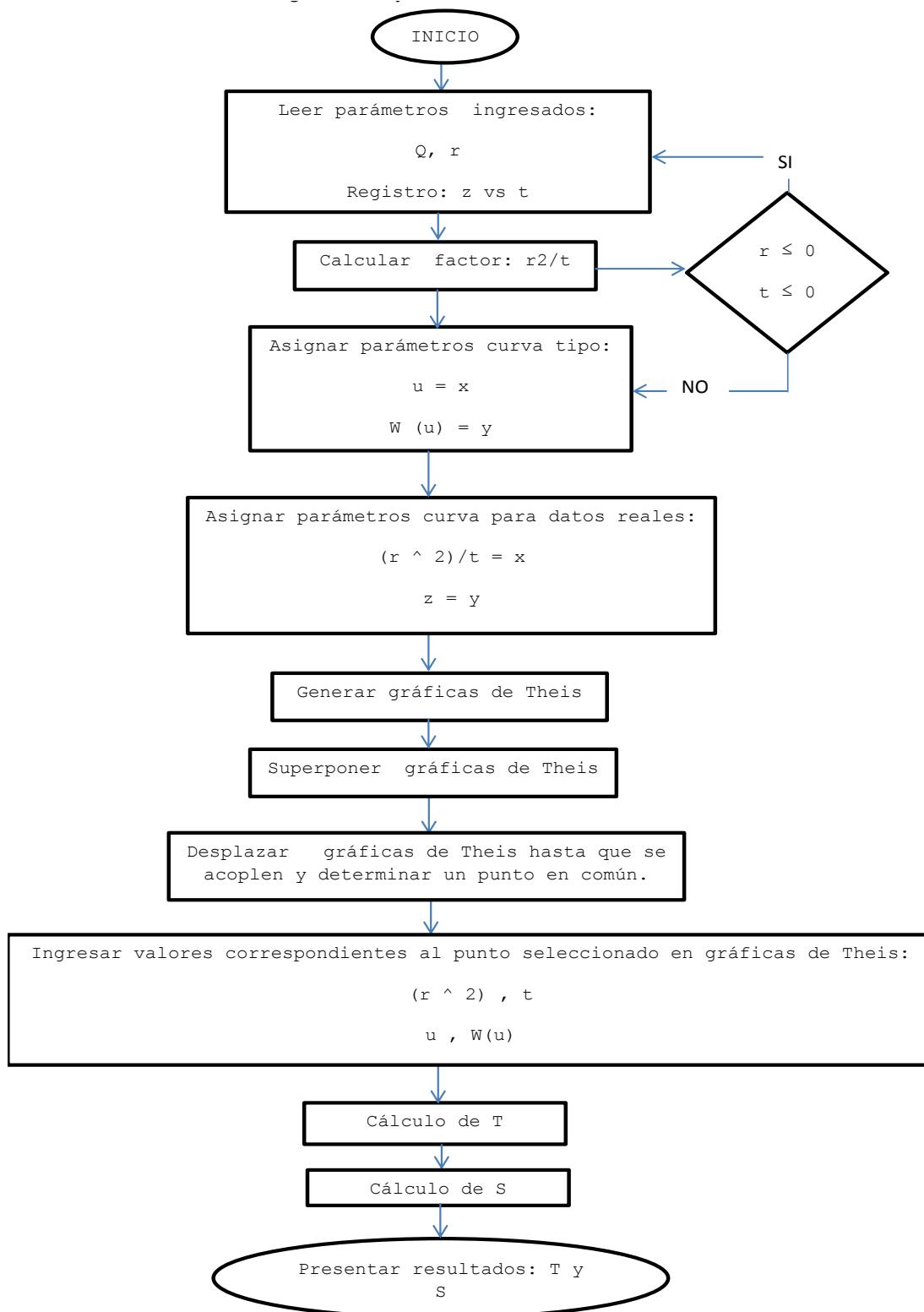


Figura 3.5: Diagrama de flujo para el método de Theis.
Fuente: El Autor.



3.3 Implementación de la herramienta hidráulica de pozos mediante Microsoft visual Studio.

La aplicación emplea como herramienta de programación Microsoft visual Studio.net, a continuación se ha colocado el código empleado para el funcionamiento de una de las herramienta de la aplicación ya que por la magnitud del código (19000 líneas de código), se ha creído conveniente que es de mayor importancia demostrar en forma detallada su funcionamiento el cual se encuentra descrito en el capítulo siguiente (**Capítulo IV**). Además en la memoria digital del proyecto se entregará el código completo de la aplicación.

A continuación se presenta el código para en régimen permanente y para acuífero libre aplicando el método de Dupuit determinar el caudal de extracción (Q):

```
Partial Class Hidraulica_de_pozos
    Inherits System.Web.UI.Page

    Variables Globales

    Eventos Protegidos, botones

    #Region "RÉGIMEN PERMANENTE"
    RÉGIMEN ESTACIONARIO: HIDRÁULICA DE UN POZO DE EXTRACCIÓN EN ACUÍFERO CONFINADO Y ACUÍFERO LIBRE
    RÉGIMEN ESTACIONARIO: HIDRÁULICA DE UN POZO DE EXTRACCIÓN Y DOS POZOS DE OBSERVACIÓN EN ACUÍFERO CONFINADO Y ACUÍFERO LIBRE
    #End Region

    RÉGIMEN NO PERMANENTE

End Class
```

Figura 3.6: Código: Acuífero libre: Un pozo de observación-Cálculo de caudal de extracción- Método de Dupuit

Fuente: El Autor.



```
Protected Sub btnGráficaAcuifLibreDupuit_Click(ByVal sender As
Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
btnGráficaAcuifLibreDupuit.Click

If Radbtn_Acuif_Libre_Dupuit.SelectedItem.Selected = True Then
Select Case Radbtn_Acuif_Libre_Dupuit.SelectedValue
Case "Determinar caudal de extracción"
If txtQal.Text = "" Then
MsgBox("Falta calcular Caudal (Q)",
MsgBoxStyle.DefaultButton1 = MsgBoxStyle.DefaultButton1, "HYDROVLAB")
Exit Sub

Else
'NIVEL FREATICO
Dim data0() As Double = {Val(0), Val(txtrlal.Text * 2),
Val((Val(txtrlal.Text * 2) +
Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text)) / 10)),
Val((Val(txtrlal.Text * 2) + Val((txtr2al.Text) -
Val(txtrlal.Text)) / 5)), Val((Val(txtrlal.Text * 2) +
Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text)) / 3)),
Val((Val(txtrlal.Text * 2) + Val((txtr2al.Text) -
Val(txtrlal.Text)) / 2)), Val((Val(txtrlal.Text * 2) +
Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text)) / 1.5)), Val(txtr2al.Text
+ Val(txtrlal.Text) + Val(90))}

Dim data1() As Double = {Val(txtNFal.Text), Val(txtNFal.Text),
Val(txtNFal.Text), Val(txtNFal.Text), Val(txtNFal.Text),
Val(txtNFal.Text), Val(txtNFal.Text), Val(txtNFal.Text)}

' CURVA DE ABTIMIENTOS
Dim data2() As Double = {Val(txtrlal.Text * 2),
Val((Val(txtrlal.Text * 2) + Val((txtr2al.Text) -
Val(txtrlal.Text)) / 10)), Val((Val(txtrlal.Text * 2) +
Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text)) / 5)),
Val((Val(txtrlal.Text * 2) + Val((txtr2al.Text) -
Val(txtrlal.Text)) / 3)), Val((Val(txtrlal.Text * 2) +
Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text)) / 2)),
Val((Val(txtrlal.Text * 2) + Val((txtr2al.Text) -
Val(txtrlal.Text)) / 1.5)), Val(txtr2al.Text +
Val(txtrlal.Text))}

Dim data3() As Double = {Val((((txtNFal.Text ^ 2) -
((Math.Log(txtr2al.Text / txtrlal.Text)) * ((txtQal.Text /
(3.1416 * (txtTal.Text / txtNFal.Text)))))) ^ 0.5)),
Val((((txtNFal.Text ^ 2) - ((Math.Log(txtr2al.Text /
(Val((Val(txtrlal.Text) + Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text))
/ 10)))))) * ((txtQal.Text / (3.1416 * (txtTal.Text /
txtNFal.Text)))))) ^ 0.5)), Val((((txtNFal.Text ^ 2) -
((Math.Log(txtr2al.Text / (Val((Val(txtrlal.Text) +
Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text)) / 5)))))) * ((txtQal.Text
/ (3.1416 * (txtTal.Text / txtNFal.Text)))))) ^ 0.5)),
Val((((txtNFal.Text ^ 2) - ((Math.Log(txtr2al.Text /
(Val((Val(txtrlal.Text) + Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text))
/ 3)))))) * ((txtQal.Text / (3.1416 * (txtTal.Text /
txtNFal.Text)))))) ^ 0.5)), Val((((txtNFal.Text ^ 2) -
((Math.Log(txtr2al.Text / (Val((Val(txtrlal.Text) +
Val((txtr2al.Text) - Val(txtrlal.Text)) / 2))))))
```

Figura 3.7: Código de la aplicación: Acuífero libre: Un pozo de observación-Cálculo de caudal de extracción - Método de Dupuit.

Fuente: El Autor.



```
'GRAFICA EL POZO DE EXTRACCIÓN
'LINEA INICIAL POZO
Dim data4() As Double = {Val(0), Val(0)}
Dim data5() As Double = {Val(0), Val((txtNFal.Text + 2) + 2)}
'LINEA FINAL DE POZO
Dim data6() As Double = {Val(txtr1al.Text * 2),
Val(txtr1al.Text * 2)}
Dim data7() As Double = {Val(0), Val((txtNFal.Text + 2) + 2)}
'LINEA DE FONDO DEL POZO
Dim data8() As Double = {Val(0), Val(txtr1al.Text * 2)}
Dim data9() As Double = {Val(0), Val(0)}
'GRAFICA EL POZO DE EXTRACCIÓN

'TAMAÑO TOTAL GRÁFICA
Dim c As XYChart = New XYChart(640, 350, &HEEEFF, &H0, 1)
c.setRoundedFrame()

'Area gráfica ( Sin considerar títulos de los ejes no=i de la
gráfica)
c.setPlotArea(55, 58, 560, 245, &HFFFFFF, -1, -1,
&HFFFFFF, &HFFFFFF)

'Tipo de letra para título de gráfica.
c.addLegend(55, 32, False, "Arial Bold",
9).setBackground(Chart.Transparent)

'TÍTULO DE LA GRÁFICA DE DUPUIT, LOGO DEL SITIO WEB Y
CARATERÍSTICAS
c.addTitle( _

    "<*block, valign=absmiddle*><img=Recursos_Hidraulica_d
e_pozos\Imágenes Presentación
_Hidrovlab\imgHidrolabCuenca_HP.png*> MÉTODO DE
DUPUIT", "Times New Roman Bold Italic", 15,
&H0).setBackground(&HCCCCFF, -1,
Chart.softLighting(Chart.Right))

'Título del eje y
c.yAxis().setTitle("Nivel freático (m)")

'Escala del eje x
c.xAxis().setLinearScale(0, (txtr2al.Text +
Val(txtr1al.Text) + Val(90))) 'ÉSCALA DE GRAFICA

'Título del eje x
c.xAxis().setTitle("<*block, valign=absmiddle*> Radios
de influencia (m)<*/*>")

'Grosor de las líneas de los ejes
c.xAxis().setWidth(2)
c.yAxis().setWidth(2)
```

Figura 3.8: Código de la aplicación: Acuífero libre: Un pozo de observación-Cálculo de caudal de extracción - Método de Dupuit.

Fuente: El Autor.



```
'NIVEL FREÁTICO : 2PIXELES

Dim lineLayer As LineLayer = c.addLineLayer2() 'Tipo de línea
del nivel freático
    lineLayer.addDataSet(data1,
c.dashLineColor(&H3333FF, Chart.DashLine), "Nivel freático
original")

lineLayer.setXData(data0) 'Datos para el eje x
lineLayer.setLineWidth(2) 'Grosor de línea

'CURVA DE ABATIMIENTOS: 2PIXELES
Dim splineLayer As SplineLayer = c.addSplineLayer(data3,
&HC0, _
"Curva de abatimientos") 'Tipo de línea para la curva de
abatimientos
splineLayer.setXData(data2) 'Datos para el eje x
splineLayer.setLineWidth(2) 'Grosor de línea

splineLayer.addDataSet(data3).setDataSymbol(Chart.DiamondSym
bol, 11, &H9999FF) 'Simbolos para la curva de abatimientos

'GRÁFICA LINEAS DEL POZO DE EXTRACCIÓN
'LÍNEA INICIAL POZO DE EXTRACCIÓN (PE): 2 pixels
Dim lineaIPE As SplineLayer = c.addSplineLayer(data5, &H0, _
"")
    lineaIPE.setXData(data4)
    lineaIPE.setLineWidth(2)
'LÍNEA FINAL POZO DE EXTRACCIÓN (PE): 2 pixels
Dim lineaFPE As SplineLayer = c.addSplineLayer(data7, &H0, _
"")
    lineaFPE.setXData(data6)
    lineaFPE.setLineWidth(2)
'LINEA DE FONDO
Dim lineaFondoPE As SplineLayer = c.addSplineLayer(data9, &H0, "")
    lineaFondoPE.setXData(data8)
    lineaFondoPE.setLineWidth(2)

'Tipo de letra y ubicación de identificación de la gráfica.

c.addText(605, 290, _
"<*block, valign=absmiddle*><*block*>" & "<*font=Times New
Roman Bold Italic, size=10, color=&HFF*>Hidráulica" & "<*br*>de
Pozos<*/*>").setAlignment(Chart.BottomRight)
```

Figura 3.9: Código de la aplicación: Acuífero libre: Un pozo de observación-Cálculo de caudal de extracción - Método de Dupuit.

Fuente: El Autor.



```
'DETALLES DE LA GRÁFICA

'AGUA EN POZO
Dim dataX0() As Double = {Val(txtr1al.Text)}
Dim dataY0() As Double = {Val(((((((txtNfal.Text ^ 2) -
((Math.Log(txtr2al.Text / txtr1al.Text)) * ((txtQal.Text /
(3.1416 * (txtTal.Text / txtNfal.Text))))))))) ^ 0.5))) / 2)}

Dim dataZX0() As Double = {Val(txtr1al.Text * 2)} 'ESCALA X
Dim dataZY0() As Double = {Val(((((((txtNfal.Text ^ 2) -
((Math.Log(txtr2al.Text / txtr1al.Text)) * ((txtQal.Text /
(3.1416 * (txtTal.Text / txtNfal.Text))))))))) ^ 0.5))} 'ESCALA Y

Dim layer As ScatterLayer = c.addScatterLayer(dataX0, dataY0, "",
Chart.SquareSymbol, 1, &H803333FF, &H803333FF)

layer.setSymbolScale(dataZX0, Chart.XAxisScale, dataZY0, _
Chart.YAxisScale)

'SUELO: COLOR CAFE CLARO
Dim dataX1() As Double = {Val(((Val(txtr2al.Text +
Val(txtr1al.Text) + Val(90)) - (txtr1al.Text * 2)) / 2) +
(txtr1al.Text * 2))}
Dim dataY1() As Double = {Val((txtNfal.Text + 2) / 2)}
Dim dataZX1() As Double = {Val((Val(txtr2al.Text +
Val(txtr1al.Text) + Val(90)) - (txtr1al.Text * 2)))} 'ESCALA X
Dim dataZY1() As Double = {Val((txtNfal.Text + 2))} 'ESCALA Y

c.addScatterLayer(dataX1, dataY1, "", Chart.SquareSymbol, 1,
&H40DDAA77, &H40DDAA77).setSymbolScale(dataZX1, Chart.XAxisScale,
dataZY1, Chart.YAxisScale)

'SUPERFICIE: COLOR NEGRO
Dim dataX2() As Double = {Val(((Val(txtr2al.Text +
Val(txtr1al.Text) + Val(90)) - (txtr1al.Text * 2)) / 2) +
(txtr1al.Text * 2))}
Dim dataY2() As Double = {Val((txtNfal.Text + 2))}
Dim dataZX2() As Double = {Val((Val(txtr2al.Text +
Val(txtr1al.Text) + Val(90)) - (txtr1al.Text * 2)))} 'ESCALA X
Dim dataZY2() As Double = {0.5} 'ESCALA Y

c.addScatterLayer(dataX2, dataY2, "", Chart.SquareSymbol, 1,&H0,
&H0).setSymbolScale(dataZX2, Chart.XAxisScale, dataZY2,_
Chart.YAxisScale)
```

Figura 3.10: Código de la aplicación: Acuífero libre: Un pozo de observación-Cálculo de caudal de extracción - Método de Dupuit.

Fuente: El Autor.



```
'CESPED: SUPERFICIE COLOR VERDE

Dim dataX3() As Double = {Val(((Val(txtr2al.Text +
Val(txtrlal.Text) + Val(90)) - (txtrlal.Text * 2)) / 2) +
(txtrlal.Text * 2))}
Dim dataY3() As Double = {Val((txtNfal.Text + 2) + 0.3)}
Dim dataZX3() As Double = {Val((Val(txtr2al.Text +
Val(txtrlal.Text) + Val(90)) - (txtrlal.Text * 2)))} 'ESCALA X
Dim dataZY3() As Double = {0.5} 'ESCALA Y

c.addScatterLayer(dataX3, dataY3, "Superficie",
Chart.SquareSymbol, 7, &HFF00, _
&HFF00).setSymbolScale(dataZX2, Chart.XAxisScale, dataZY2,
Chart.YAxisScale)

'TIPO DE GRÁFICA EMPLEADA

wcvAcuifLibreDUPUIT.Image = c.makeWebImage(Chart.PNG)

'INFORMACIÓN A PRESENTAR EN LA GRÁFICA
wcvAcuifLibreDUPUIT.ImageMap = c.getHTMLImageMap("", "", _
"title='{dataSetName}: Radio = {x|2} m , y = {value|2} m'")

End If
```

Figura 3.11: Código de la aplicación: Acuífero libre: Un pozo de observación-Cálculo de caudal de extracción - Método de Dupuit.

Fuente: El Autor.



CAPÍTULO IV

FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA HIDRÁULICA DE POZOS



4.1 Introducción

Las herramientas implementadas tienen como finalidad facilitar la simulación de la hidráulica de pozos tanto en **régimen permanente** como en **régimen no permanente** a todos aquellos interesados que se hallen registrados en el Hydrovlab.

En este capítulo se presenta una síntesis de los manuales de usuario que se encuentran alojados en laboratorio virtual de hidrología, los mismos que se recomienda revisar para una mayor comprensión de su funcionamiento.

Es posible acceder a la herramienta a través de: **www.hydrovlab.utpl.edu.ec**, seleccionando la sección de simulación y dentro de ésta la categoría hidráulica de pozos:



Figura 4.1: Presentación del Hydrovlab.
Fuente: www.hydrovlab.edu.ec



La aplicación emplea para **régimen permanente** los métodos de Thiem y de Dupuit, pudiendo seleccionar la simulación con y sin pozos de observación.

Para el **régimen no permanente** emplea el método de Theis facilitando la determinación de caudal de extracción, abatimientos y los coeficientes de transmisibilidad (T) y de almacenamiento (S) empleando para este último caso el proceso de superposición de gráficas.

Estás aquí: [SIMULACIÓN](#) > [pHidraulicaPozos](#)

Categorías

- Balance Hídrico
- Evapotranspiración
- Hidráulica de Pozos**
- Lluvia escurrentía
- Producción de sedimentos
- Simulación continua
- Tránsito de Avenidas
- Transporte de sedimentos

RÉGIMEN PERMANENTE

Aplicación	Descripción
Método de Thiem: Sin pozos de observación	Permite simular en régimen permanente el funcionamiento de pozos de extracción implantados en acuífero confinado, facilitando la determinación de: radios de influencia (R), caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, entre otros.
Método de Dupuit: Sin pozos de observación	Permite simular en régimen permanente el funcionamiento de pozos de extracción implantados en acuífero no confinado, facilitando la determinación de: radios de influencia (R), caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, entre otros.
Método de Thiem: Con pozos de observación	Permite simular en régimen permanente el funcionamiento de pozos de extracción y de observación implantados en acuífero confinado, facilitando la determinación de: radios de influencia (R), caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, entre otros.
Método de Dupuit: Con pozos de observación	Permite simular en régimen permanente el funcionamiento de pozos de extracción y de observación implantados en acuífero no confinado, facilitando la determinación de: radios de influencia (R), caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, entre otros.

RÉGIMEN NO PERMANENTE

Aplicación	Descripción
Método de Theis: Determinación de caudal de extracción (Q) y de abatimientos (z)	Permite simular en régimen no permanente el funcionamiento de pozos de extracción y de observación implantados en acuífero confinado, facilitando la determinación de: caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, producto de la explotación del acuífero.
Método de Theis: Determinación de coeficientes de transmisibilidad (T) y de almacenamiento (S)	Permite mediante el método de Theis la determinación de los coeficientes característicos del acuífero: coeficiente de transmisibilidad (T) y de almacenamiento (S) aplicando el proceso de superposición de gráficas.

Figura 4.2: Presentación de la categoría Hidráulica de pozos del Hydrovlab.

Fuente: www.hydrovlab.edu.ec



4.2 Funcionamiento de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab bajo régimen permanente.

4.2.1 Hidráulica de pozos sin pozos de observación

En esta sección se han implantado herramientas que facilitan la simulación con el método de Thiem y con el método de Dupuit pudiendo seleccionar:

Para acuífero confinado:

RÉGIMEN PERMANENTE	
Aplicación	Descripción
Método de Thiem: Sin pozos de observación	Permite simular en régimen permanente el funcionamiento de pozos de extracción implantados en acuífero confinado, facilitando la determinación de: radios de influencia (R), caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, entre otros.
Dirección electrónica:	http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlexperimentos/simulaci%C3%B3n/hidraulicadepozos/Hidraulica_de_pozos.aspx?Hpozos=0&idioma=es-Es

Tabla 4.1: Descripción de aplicación Método de Thiem sin pozos de observación

Fuente: El Autor.

Para acuífero libre:

RÉGIMEN PERMANENTE	
Aplicación	Descripción
Método de Dupuit: Sin pozos de observación	Permite simular en régimen permanente el funcionamiento de pozos de extracción implantados en acuífero no confinado, facilitando la determinación de: radios de influencia (R), caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, entre otros.
Dirección electrónica:	http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlexperimentos/simulaci%C3%B3n/hidraulicadepozos/Hidraulica_de_pozos.aspx?Hpozos=1&idioma=es-ES

Tabla 4.2: Descripción de aplicación Método de Dupuit sin pozos de observación

Fuente: El Autor.



Para obtener resultados adecuados mediante el empleo de estas herramientas se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar el tipo de acuífero en el que se va a realizar el análisis y el parámetro hidráulico a determinar (**Figura 4.3**), pudiendo elegir:

ACUÍFERO CONFINADO

- Caudal ($\text{m}^3/\text{día}$)
- Abatimiento en el pozo de extracción (m)
- Coeficiente de transmisibilidad ($\text{m}^2/\text{día}$)
- Radio de influencia del pozo de extracción (m)

ACUÍFERO LIBRE

- Caudal ($\text{m}^3/\text{día}$)
- Abatimiento en el pozo de extracción (m)
- Conductividad hidráulica (m/día)
- Radio de influencia del pozo de extracción (m)

Las aplicaciones como se indicó anteriormente emplean para la simulación en acuífero confinado el método de Thiem y para acuífero libre el método de Dupuit descritos en el Capítulo II.

De acuerdo al tipo de acuífero y el parámetro hidráulico seleccionado se habilitarán campos en los cuales el usuario debe ingresar los datos de entrada necesarios para efectuar el cálculo correspondiente en las unidades indicadas en cada ítem como se puede observar en la **Figura 4.3**.



RÉGIMEN PERMANENTE

ACUÍFERO CONFINADO

Determinar caudal de extracción (Q)
 Determinar abatimiento en el pozo (Z)
 Determinar coeficiente de transmisibilidad (T)
 Determinar el radio de influencia del pozo de extracción (R)

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text"/>	Caudal (m ³ /día)	<input type="text"/>
Descenso del nivel freático (m)	<input type="text"/>		
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text"/>		
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text"/>		<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>

Figura 4.3: Campos habilitados para determinar el caudal en un acuífero confinado.
Fuente: El Autor.

- Ingresar los parámetros necesarios en las unidades indicadas para efectuar el cálculo correspondiente como se muestra a continuación:

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="12"/>	Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="690.57"/>
Descenso del nivel freático (m)	<input type="text" value="4.5"/>		
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="100"/>		
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="10"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="600"/>		<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>

Figura 4.4: Ejemplo de ingreso de parámetros necesarios para determinar caudal extracción en un acuífero confinado.
Fuente: El Autor.

La herramienta cuenta con un ejemplo para cada caso con el cual el usuario puede interactuar y efectuar el análisis de la hidráulica de pozos.



3. Luego de que se ha determinado el parámetro hidráulico deseado se procede a la representación gráfica de todos los parámetros ingresados y de los resultados mediante la representación gráfica (**Figura 4.5**); la cual permitirá analizar el comportamiento del agua subterránea en cada caso:

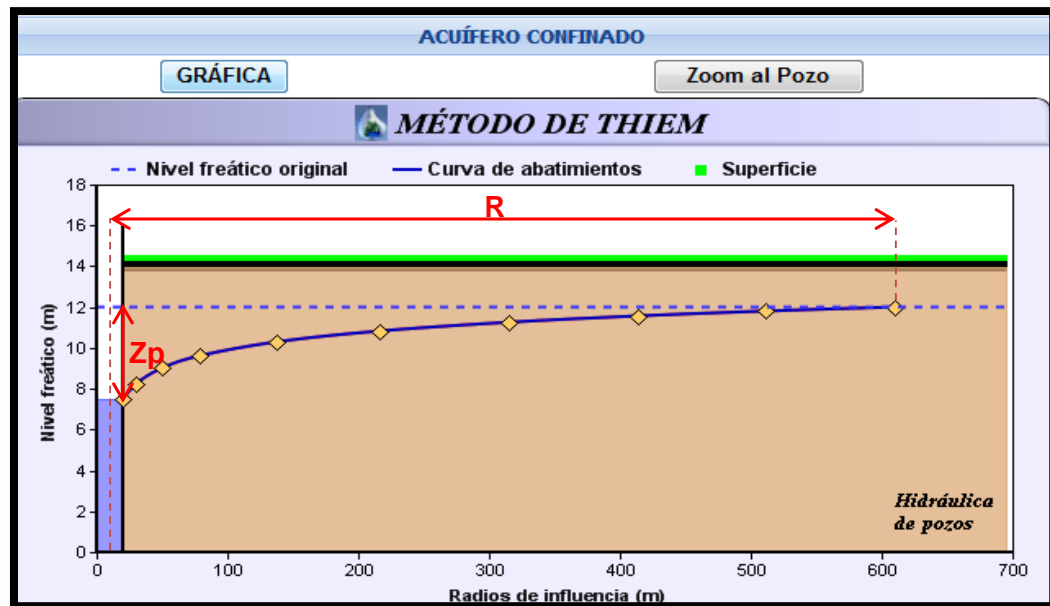


Figura 4.5: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos régimen permanente: método de Thiem.

Fuente: El Autor.

La representación gráfica nos permite determinar la curva de abatimientos o nivel dinámico del agua subterránea a lo largo del radio de influencia (R) del pozo de extracción implantado en el acuífero que haya sido seleccionado y para las características ingresadas previamente por el usuario.

Adicionalmente con el objetivo de analizar el comportamiento hidráulico en cada caso se puede ir variando las características o datos de entrada en cada caso; por ejemplo: variando la posición del N.F. como se puede observar en la **Figura 4.6**:



DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="7"/>	Caudal (m³/día)	<input type="text" value="690.57"/>
Descenso del nivel freático (m)	<input type="text" value="4.5"/>		
Coefficiente de transmisibilidad (m²/día)	<input type="text" value="100"/>		
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="10"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="600"/>		
<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>		<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>	

Figura 4.6: Variación de parámetros: para determinar caudal extracción.
Fuente: El Autor.

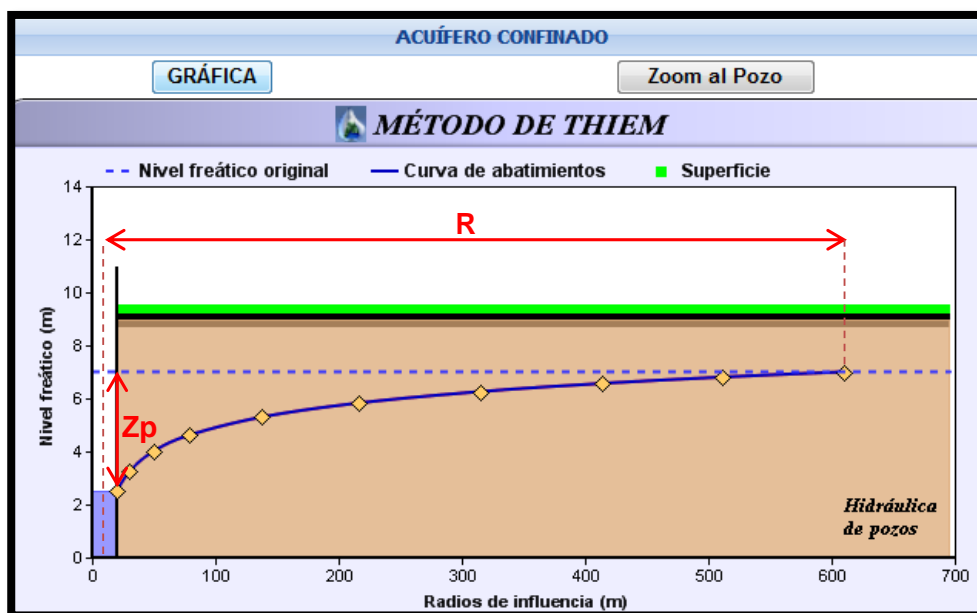


Figura 4.7: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos régimen permanente-método de Thiem.

Fuente: El Autor.

4. El valor del nivel dinámico del agua subterránea para distintos radios o distancias que se encuentren dentro del radio de influencia del pozo de extracción pueden ser determinados al colocar el puntero del mouse en cada punto de la curva de abatimientos graficada en cada caso (Figura 4.8):

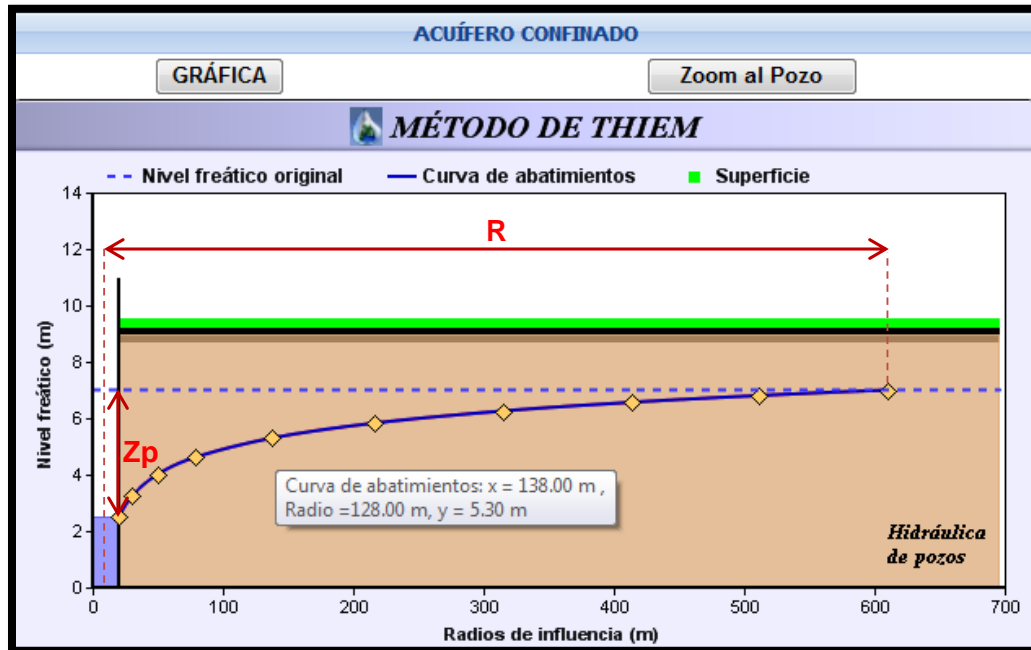


Figura 4.8: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen permanente-método de Thiem: Determinación del Abtimiento a distintos radios.

Fuente: El Autor.

En la Figura 4.8 para un pozo colocado en acuífero confinado con las características ingresadas anteriormente y aplicando el método de Thiem se tiene que:

Distancia desde 0 (m) = x	Distancia radial (m)	Nivel dinámico (m) = y	Nivel freático Original (m)	Abatimiento (m)
20.00	10.00	2.50	7.00	4.50
29.83	19.83	3.25	7.00	3.75
49.50	39.50	4.01	7.00	2.99
79.00	69.00	4.62	7.00	2.38
138.00	128.00	5.30	7.00	1.70
216.67	206.68	5.83	7.00	1.17
315.00	305.00	6.26	7.00	0.74
413.33	403.33	6.56	7.00	0.44
610.00	600.00	7.00	7.00	0.00

Tabla 4.3: Distancias radiales y abatimientos determinadas por la aplicación: Método de Thiem

Fuente: El Autor.



5. En los caso de presentarse que el radio del pozo es demasiado pequeño con relación al radio de influencia y por tanto no se puede observar de cerca el comportamiento del agua subterránea en el pozo, la herramienta permite realizar un acercamiento (zoom) sobre la captación:

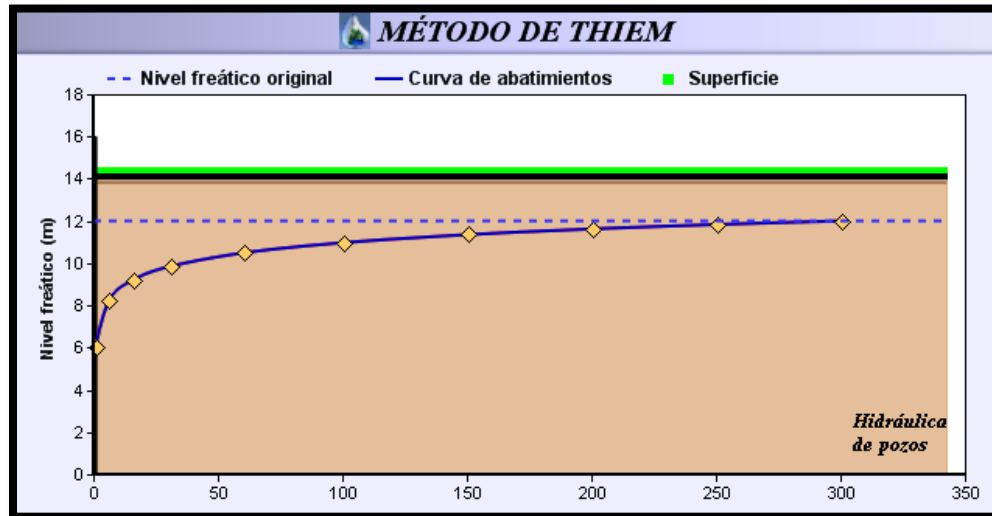


Figura 4.9: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen permanente-método de Thiem.

Fuente: El Autor.

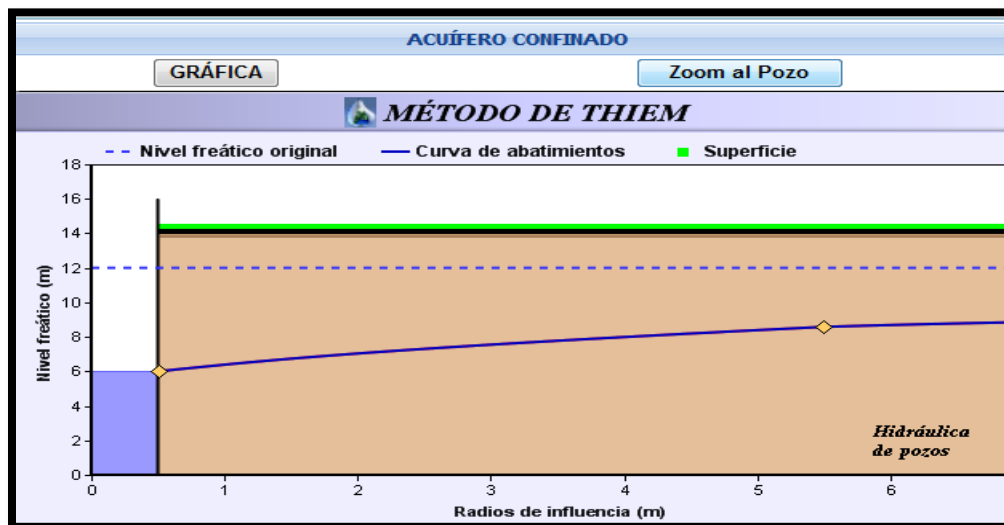


Figura 4.10: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen permanente-método de Thiem: Acercamiento al pozo de extracción.

Fuente: El Autor.

El proceso es similar para la determinación de los demás parámetros así como para el análisis en acuífero libre.



4.2.2 Hidráulica de pozos con dos pozos de observación

En esta categoría se encuentran herramientas para realizar la simulación con la colocación de pozos de observación, pudiendo seleccionar:

Para acuífero confinado:

RÉGIMEN PERMANENTE	
Aplicación	Descripción
Método de Thiem: Con pozos de observación	Permite simular en régimen permanente el funcionamiento de pozos de extracción y de observación implantados en acuífero confinado, facilitando la determinación de: radios de influencia (R), caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, entre otros.
Dirección electrónica:	http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlexperimentos/simulaci%C3%B3n/hidraulicadepozos/Hidraulica_de_pozos.aspx?Hpozos=2&idioma=es-ES

Tabla 4.4: Descripción de aplicación Método de Thiem con pozos de observación

Fuente: El Autor.

Para acuífero libre:

RÉGIMEN PERMANENTE	
Aplicación	Descripción
Método de Dupuit: Con pozos de observación	Permite simular en régimen permanente el funcionamiento de pozos de extracción y de observación implantados en acuífero no confinado, facilitando la determinación de: radios de influencia (R), caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, entre otros.
Dirección electrónica:	http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlexperimentos/simulaci%C3%B3n/hidraulicadepozos/Hidraulica_de_pozos.aspx?Hpozos=3&idioma=es-ES

Tabla 4.5: Descripción de aplicación Método de Dupuit con pozos de observación

Fuente: El Autor.



El procedimiento para la utilización de estas herramientas es similar al indicado anteriormente, pero se requiere de un mayor número de parámetros de entrada como se indica a continuación:

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	12	Caudal (m³/día)	1052.01
Coeficiente de transmisibilidad (m2/día)	100		
Descenso del nivel freático Pozo de Observación 1 (m)	6		
Descenso del nivel freático Pozo de Observación 2 (m)	3		
Radio del pozo de extracción(m)	10		
Distancia al pozo de observación 1 (m)	100		
Distancia al pozo de observación 2 (m)	600		

Figura 4.11: Ejemplo de ingreso de parámetros necesarios para determinar caudal extracción en un acuífero confinado.

Fuente: El Autor.

A diferencia de las aplicaciones mostradas anteriormente en este caso se requiere como datos de entrada:

- Descenso del nivel freático en pozo de observación 1 y 2
- Distancia a la que se encuentran el pozo de observación 1 y 2.

Es necesario considerar que el radio de los pozos de observación se puede despreciar en comparación con el radio de influencia del pozo de extracción, por lo cual *para efectos demostrativos* se ha considerado que sea la mitad del radio del pozo de extracción, **Capítulo III, apartado 3.2.**

Luego de realizar el ingreso de los datos correspondientes para realizar el cálculo deseado, se procede a obtener la representación gráfica de los mismos:

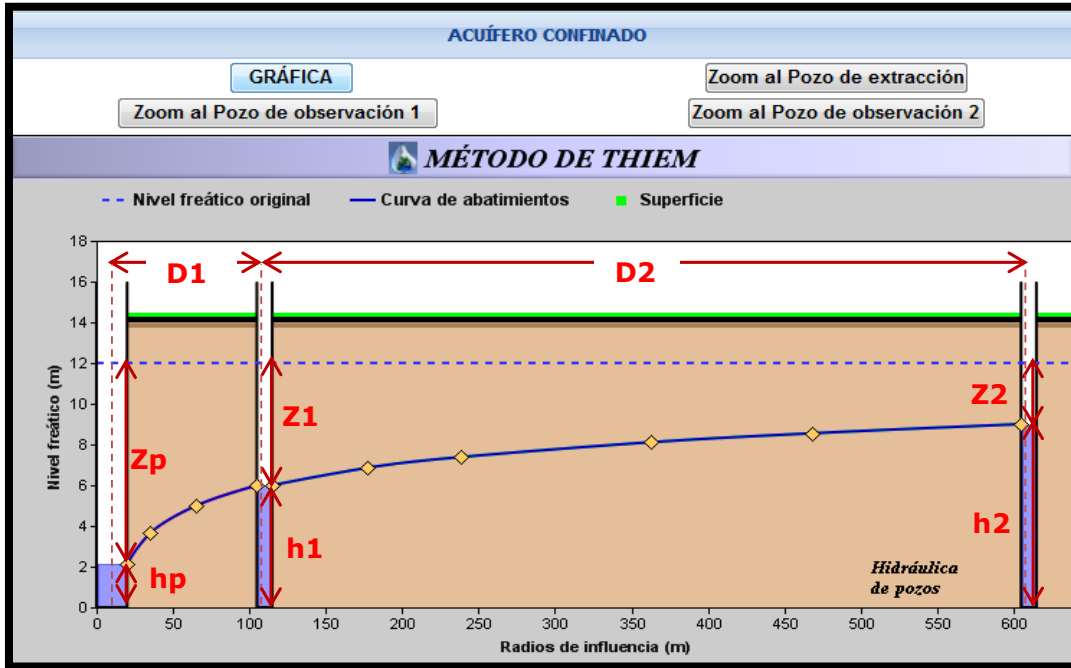


Figura 4.12: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: método de Thiem.

Fuente: El Autor.

El valor de la curva de abatimientos a diferentes radios se puede obtener al colocar el puntero del mouse sobre el punto deseado:

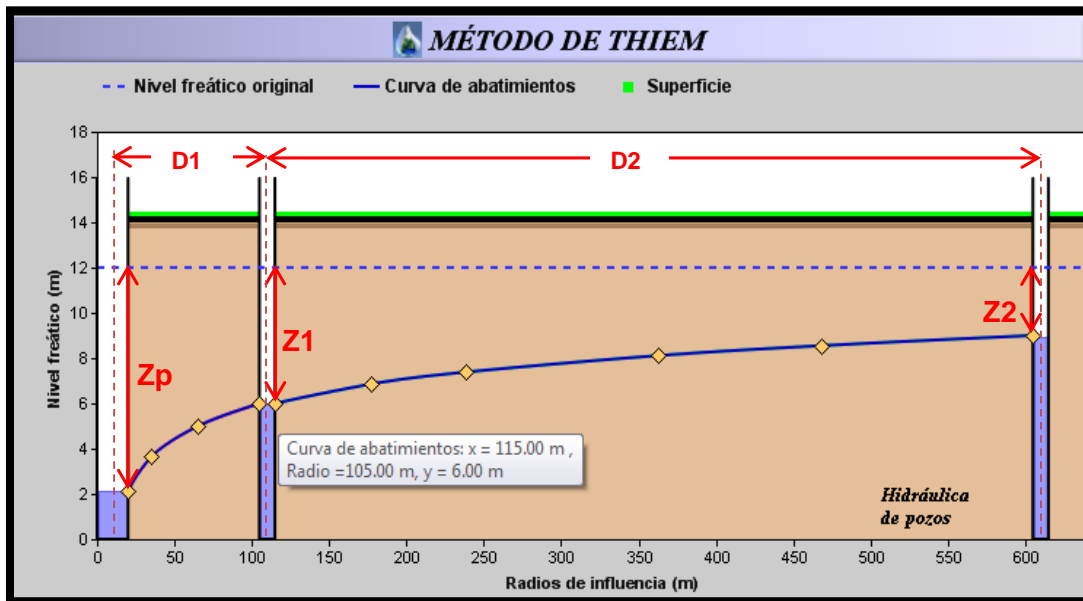


Figura 4.13: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Determinación de abatimientos a distintos radios.

Fuente: El Autor.



De igual forma cuando las distancias (R) a las que se encuentran ubicados los pozos extracción y de observación son demasiado grandes con respecto a su radio (r_p), la herramienta permite realizar un acercamiento sobre cada uno de ellos para apreciar mejor su comportamiento:

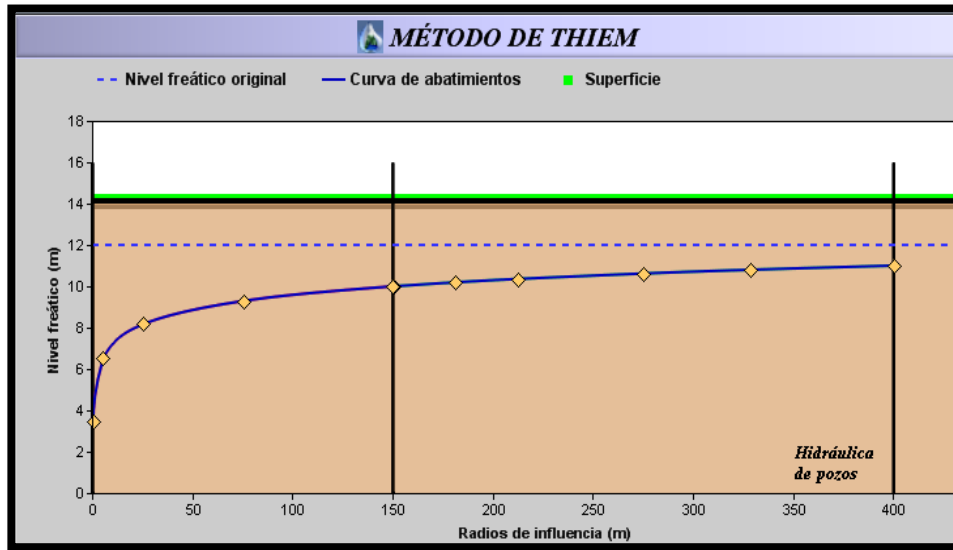


Figura 4.14: Gráficas HydroVlab-Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Pozos de pequeño diámetro.
Fuente: El Autor.

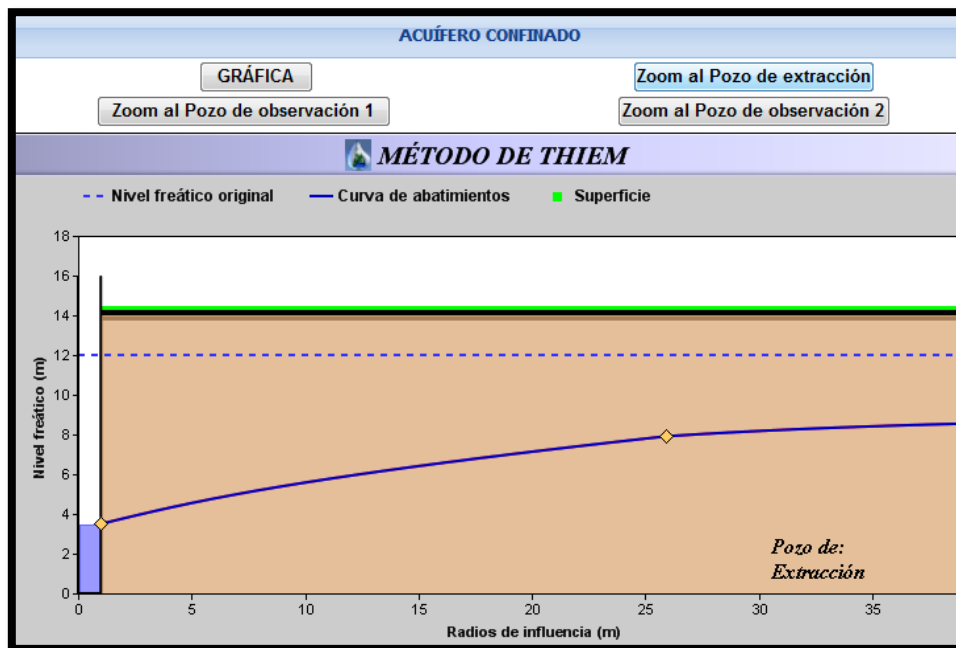


Figura 4.15: Gráficas HydroVlab - Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Acercamiento al pozo de extracción.
Fuente: El Autor.

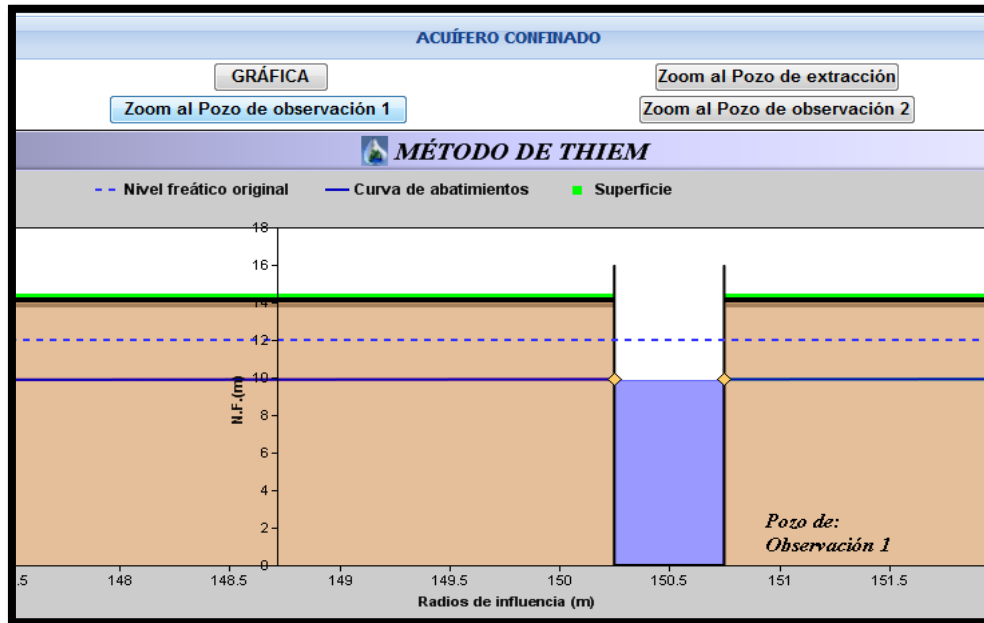


Figura 4.16: Gráficas HydroVlab - Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Acercamiento al pozo de observación 1.

Fuente: El Autor.

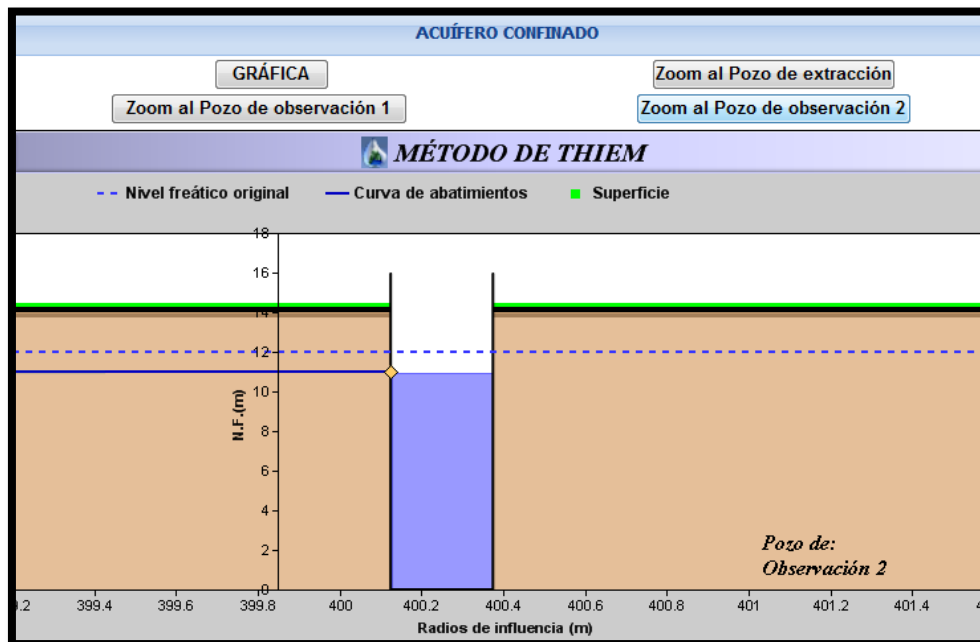


Figura 4.17: Gráficas HydroVlab - Hidráulica de pozos con dos pozos de observación: Acercamiento al pozo de observación 2.

Fuente: El Autor.

El proceso es similar para la determinación de los demás parámetros así como para el análisis en acuífero libre.



4.3 Funcionamiento de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab bajo régimen no permanente.

Estas herramientas emplean el método de Theis pudiendo seleccionar:

RÉGIMEN NO PERMANENTE	
Aplicación	Descripción
Método de Theis: Determinación de caudal de extracción (Q) y de abatimientos (z).	Permite simular en régimen no permanente el funcionamiento de pozos de extracción y de observación implantados en acuífero confinado, facilitando la determinación de: caudal de extracción (Q), curva de abatimientos, producto de la explotación del acuífero.
Dirección electrónica:	http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlexperimentos/simulaci%C3%B3n/hidraulicadepozos/Hidraulica_de_pozos.aspx?Hpozos=4&idioma=es-ES

Tabla 4.6: Descripción de aplicación Método de Theis determinación de S y T.

Fuente: El Autor.

Además de la determinación de coeficientes de almacenamiento y de transmisibilidad:

RÉGIMEN NO PERMANENTE	
Aplicación	Descripción
Método de Theis: Determinación de coeficientes de transmisibilidad (T) y de almacenamiento (S).	Permite mediante el método de Theis la determinación de los coeficientes característicos del acuífero: coeficiente de transmisibilidad (T) y de almacenamiento (S) aplicando el proceso de superposición de gráficas.
Dirección electrónica:	http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlexperimentos/simulaci%C3%B3n/hidraulicadepozos/Hidraulica_de_pozos.aspx?Hpozos=5&idioma=es-ES

Tabla 4.7: Descripción de aplicación Método de Theis determinación de S y T.

Fuente: El Autor.



Para obtener resultados adecuados mediante el empleo de esta herramienta se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar el parámetro hidráulico a determinar (**Figura 4.18**), pudiendo elegir :
 - Caudal (m^3/s).
 - Abatimiento en el pozo de extracción (m).
 - Coeficiente de transmisibilidad ($m^2/día$) y coeficiente de almacenamiento (-).

Adicionalmente si se conoce el coeficiente de transmisibilidad (T) se puede determinar el coeficiente de almacenamiento (S).

De acuerdo al parámetro hidráulico seleccionado se habilitarán campos en los cuales el usuario debe ingresar los datos de entrada necesarios para efectuar el cálculo correspondiente como se puede observar en la **Figura 4.18**.

4.3.1 Determinación del caudal (Q) y abatimiento (Z) en el acuífero.

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS
		Caudal ($m^3/día$)
Coeficiente de transmisibilidad ($m^2/día$)	<input type="text"/>	
Coeficiente de almacenamiento (-)	<input type="text"/>	
Abatimiento (Z) en el Pozo de Observación (m)	<input type="text"/>	
Tiempo desde el inicio del bombeo (días)	<input type="text"/>	
Distancia radial (m)	<input type="text"/>	

Figura 4.18: Campos habilitados para determinar el caudal en un acuífero confinado.
Fuente: El Autor.



- Ingresar los parámetros necesarios en las unidades indicadas para efectuar el cálculo correspondiente como se muestra en la **Figura 4.19**:

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS
		Caudal (m ³ /día) 2885.90
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="752"/>	
Coefficiente de almacenamiento (-)	<input type="text" value="0.015"/>	
Abatimiento (Z) en el Pozo de Observación (m)	<input type="text" value="0.32"/>	<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>
Tiempo desde el inicio del bombeo (días)	<input type="text" value="0.265"/>	
Distancia radial (m)	<input type="text" value="115"/>	
	<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>	

Figura 4.19: Ingreso de parámetros necesarios para determinar caudal de extracción.
Fuente: El Autor.

- Luego de que se ha determinado el parámetro hidráulico deseado se procede a la representación gráfica de todos los parámetros ingresados y de los resultados (**Figura 4.20**); la cual permitirá analizar el comportamiento del agua subterránea en cada caso:

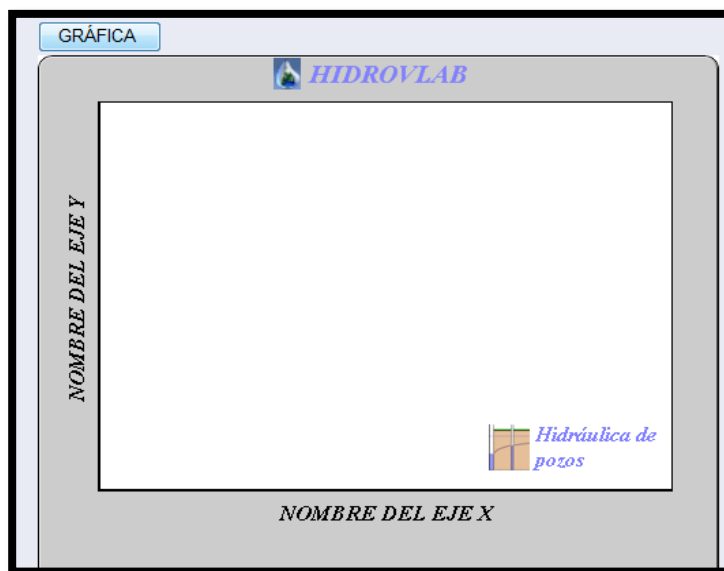


Figura 4.20: Espacio destinado para la presentación de las gráficas Hidráulica de pozos-HydroVlab.
Fuente: El Autor.

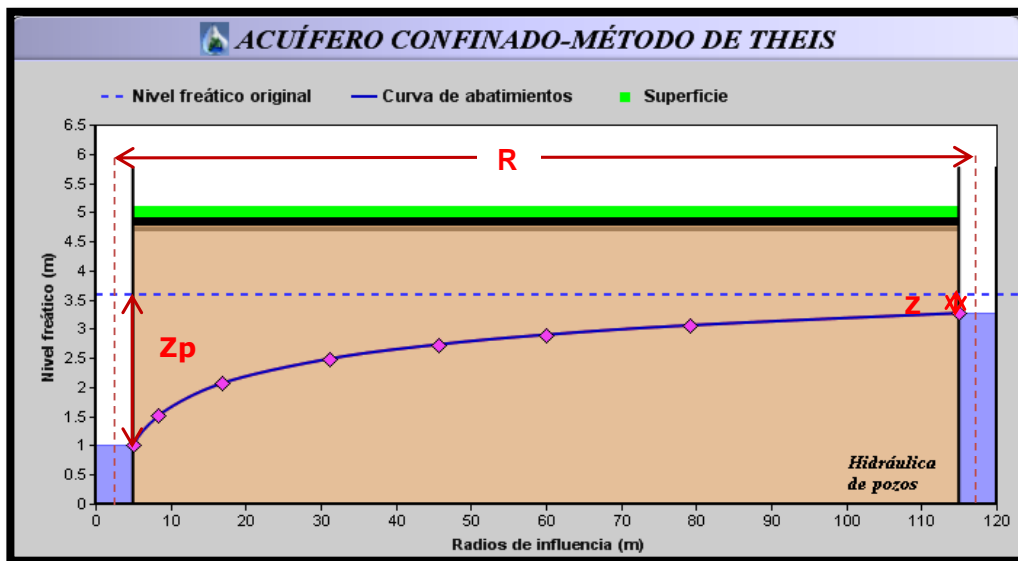


Figura 4.21: Gráficas Hydrovlab: Hidráulica de pozos régimen no permanente-método de Theis.

Fuente: El Autor.

La representación gráfica nos permite determinar la curva de abatimientos o nivel dinámico del agua subterránea a lo largo del radio de influencia (R) del pozo de extracción para las características ingresadas previamente por el usuario.

Adicionalmente con el objetivo de analizar el comportamiento hidráulico en cada caso se puede ir variando las características o datos de entrada en cada caso; por ejemplo: variar la distancia radial (r) como se puede observar:

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
		Caudal (m ³ /día)	1529.69
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="752"/>		
Coefficiente de almacenamiento (-)	<input type="text" value="0.015"/>		
Abatimiento (Z) en el Pozo de Observación (m)	<input type="text" value="0.32"/>		<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>
Tiempo desde el inicio del bombeo (días)	<input type="text" value="0.265"/>		
Distancia radial (m)	<input type="text" value="67"/>		
	<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>		

Figura 4.22: Variación de parámetros: Determinación del caudal extracción.

Fuente: El Autor.

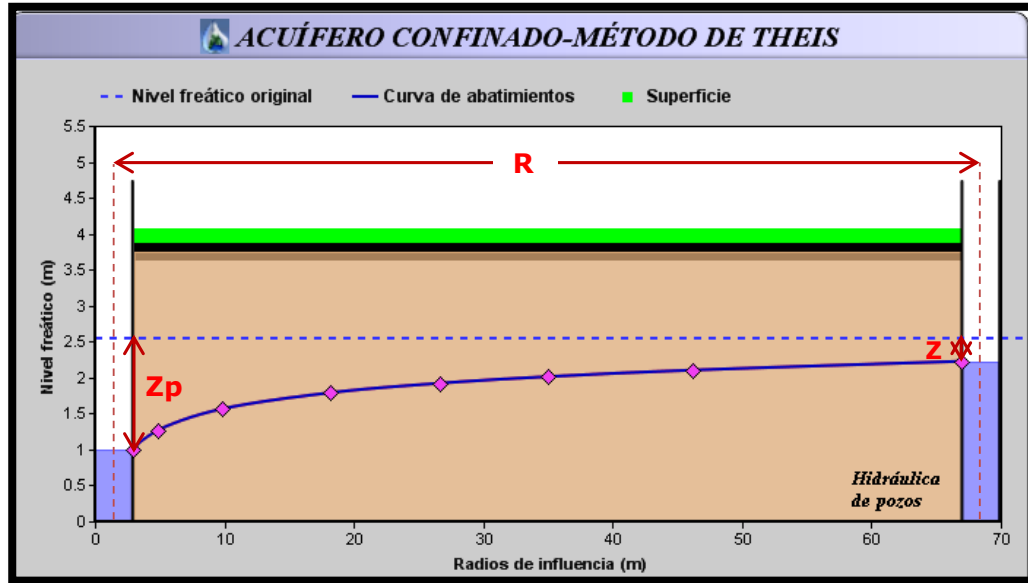


Figura 4.23: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen no permanente-método de Theis.

Fuente: El Autor.

4. El valor del nivel dinámico del agua subterránea para distintos radios o distancias que se encuentren dentro del radio de influencia del pozo de extracción pueden ser determinados al colocar el puntero del mouse en cada punto de la curva de abatimientos graficada en cada caso:

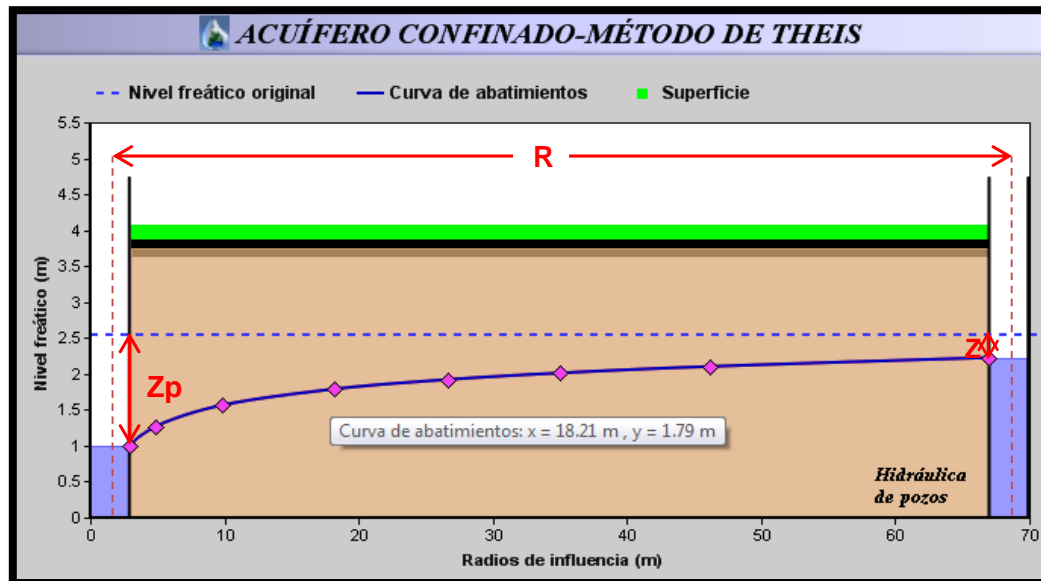


Figura 4.24: Gráficas HydroVlab: Hidráulica de pozos régimen no permanente-método de Theis: Determinación del Abtimiento a distintos radios.

Fuente: El Autor.



De la **Figura 4.24** para un pozo colocado en acuífero confinado con las características ingresadas anteriormente y aplicando el método de Theis se tiene que:

Distancia desde 0 (m) = x	Distancia radial (m)	Nivel dinámico (m) = y	N.F. Original Impuesto (m)	Abatimiento (m)
2.91	1.46	1	2.55	1.55
4.81	3.35	1.27	2.55	1.28
9.83	8.38	1.57	2.55	0.98
18.21	16.75	1.79	2.55	0.76
26.64	25.18	1.92	2.55	0.63
34.96	33.50	2.01	2.55	0.54
46.12	44.67	2.10	2.55	0.45
68.46	67.00	2.23	2.55	0.32

Tabla 4.8: Distancias radiales y abatimientos determinadas por la aplicación mediante el Método de Theis.

Fuente: El Autor.

El proceso es similar para la determinación del abatimiento en el pozo de extracción.

4.2.2 Determinación del coeficiente de almacenamiento (S) y de transmisibilidad (T).

Se recomienda seguir el proceso mostrado a continuación:

1. Ingresar como datos de entrada el caudal y el radio de influencia del pozo:

RÉGIMEN NO PERMANENTE

MÉTODO DE THEIS

DETERMINAR COEFICIENTES DE TRANSMISIBILIDAD (T) Y DE ALMACENAMIENTO (S)

DATOS DE ENTRADA

Caudal de extracción (m³/día)

Distancia radial (m)

Figura 4.25: Ingreso de parámetros necesarios para determinar T y S.

Fuente: El Autor.



2. Cargar un archivo de texto (*extensión .txt*), el cual contenga el registro abatimiento (Z) vs tiempo (t) expresados en metros y horas respectivamente.

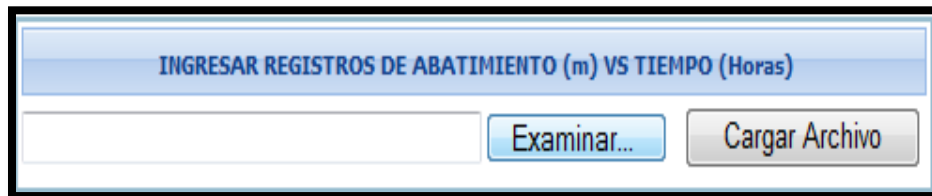


Figura 4.26: Ingreso de registros z (m) vs t (h): Exploración de archivo (.txt).
Fuente: El Autor.

El archivo de registros debe contener dos columnas: en la primera columna los abatimientos (z) expresados en metros y en la segunda el tiempo (t) expresado en horas, empleando como separador de columnas una tabulación (TAB con el teclado):

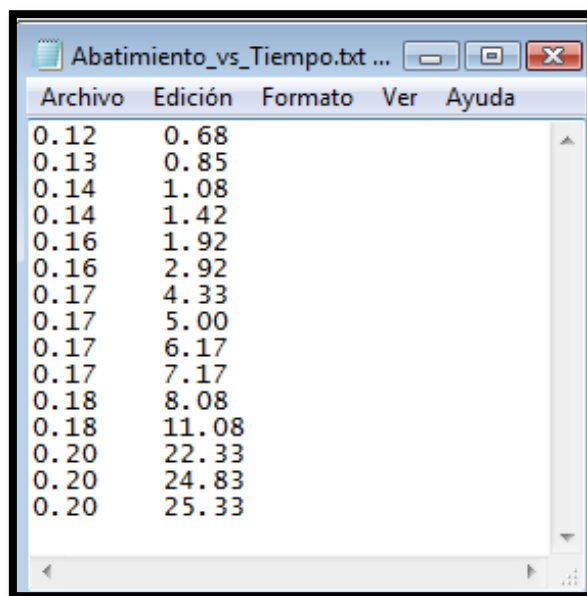


Figura 4.27: Formato del archivo con los registros z vs t.
Fuente: El Autor.

Otra forma de obtener el formato correcto para el archivo es ingresando los registros en Excel, como se indicó anteriormente y guardando el archivo como texto (delimitado por tabulaciones):

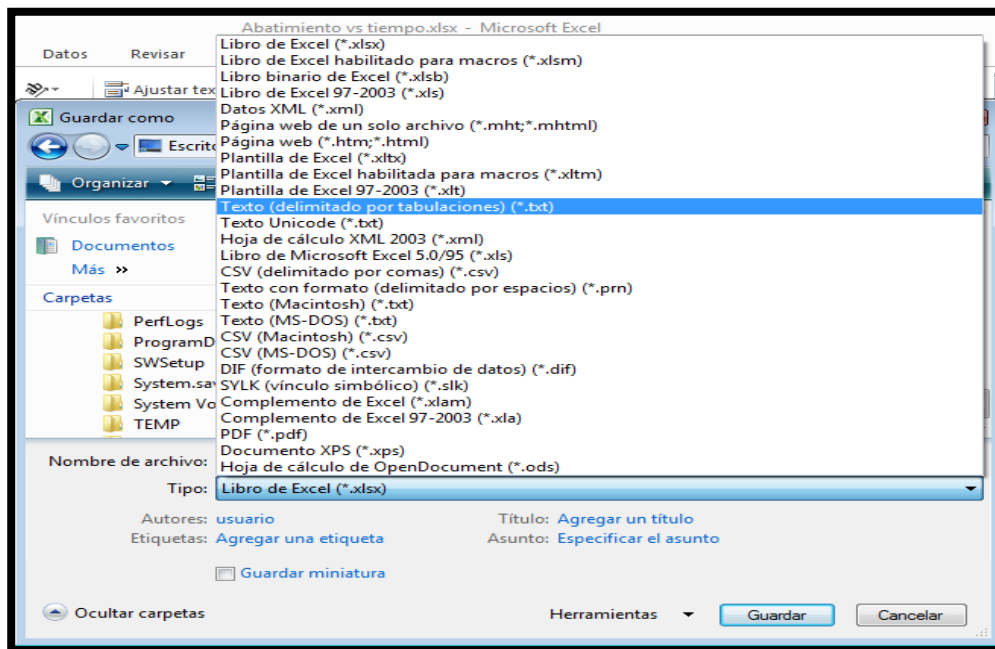


Figura 4.28: Formato con el que se debe guardar en Excel los registros z vs t.
Fuente: El Autor.

Se busca el archivo txt que contiene el registro:

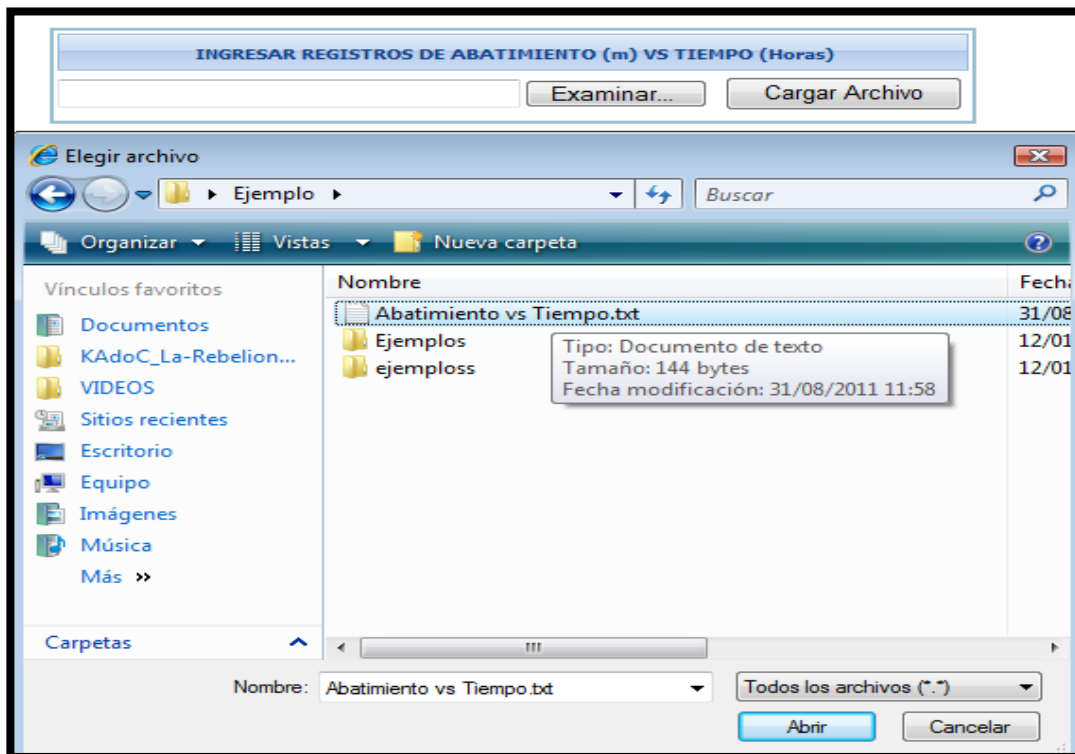


Figura 4.29: Ingreso de registros z (m) vs t (h): Selección de archivo (.txt).
Fuente: El Autor.

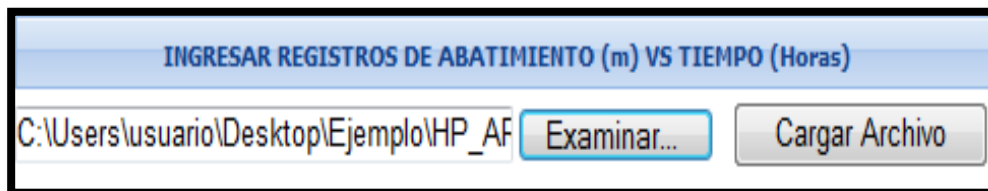


Figura 4.30: Ingreso de registros z (m) vs t (h): Cargar archivo (.txt).
Fuente: El Autor.

Si el archivo tiene la extensión correcta (.txt), se mostrará un mensaje indicando que el archivo se ha cargado correctamente:

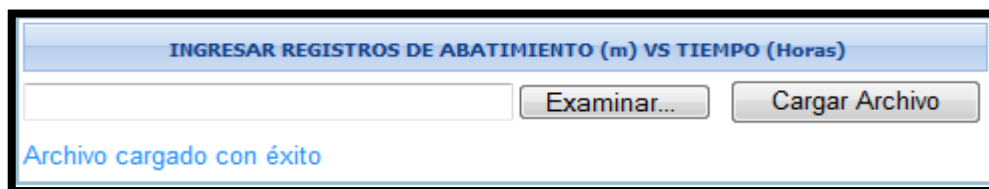


Figura 4.31: Ingreso de registros z (m) vs t (h): Mensaje de confirmación de archivo cargado con éxito.
Fuente: El Autor.

3. Presentar los datos contenidos en el archivo de registros cargado, esto con el objetivo de verificar que los datos se encuentran en las unidades correctas y en el formato adecuado, además se presenta el factor (r^2/t) calculado con la información del archivo:

PRESENTAR DATOS CARGADOS		PRESENTAR
Z (m)	t (horas)	r^2/t (m ² /día)
0,11	1,9	167052,63
0,12	2,1	151142,86
0,15	2,4	132250,00
0,17	2,9	109448,28
0,20	3,7	85783,78
0,24	4,9	64775,51
0,32	7,3	43479,45
0,43	9,8	32387,76
0,49	12,2	26016,39

Figura 4.32: Presentación de los registros z (m) vs t (horas) del archivo.
Fuente: El Autor.



4. Con la información cargada correctamente, se procede a generar en escala logarítmica las gráficas de Theis :

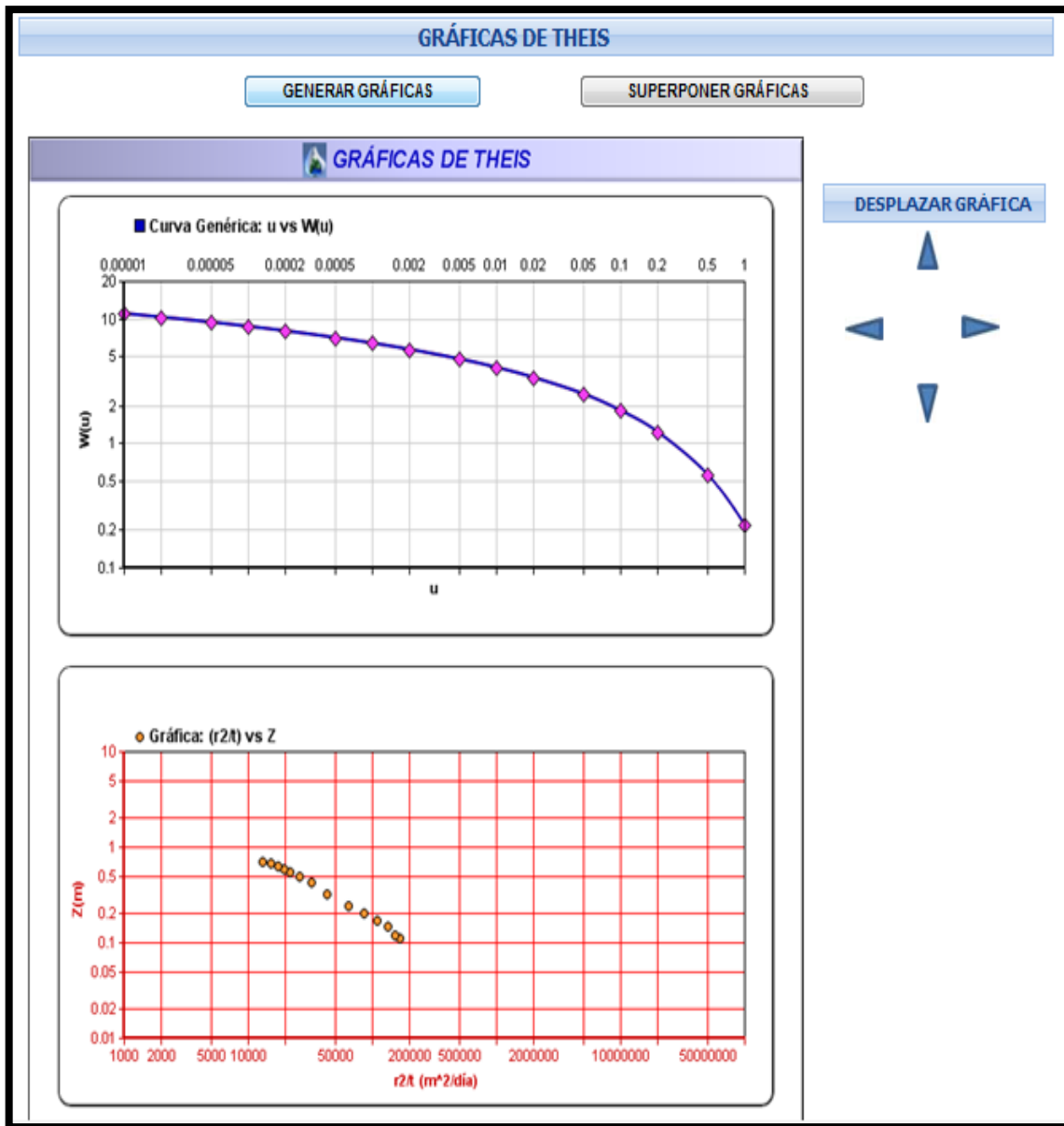


Figura 4.33: Gráficas de Theis: Curva tipo u vs $W(u)$ y curva de los datos (r^2/t) vs z .
Fuente: El Autor.



- 5. Superponer la gráficas de Theis, las cuales son del mismo tamaño:

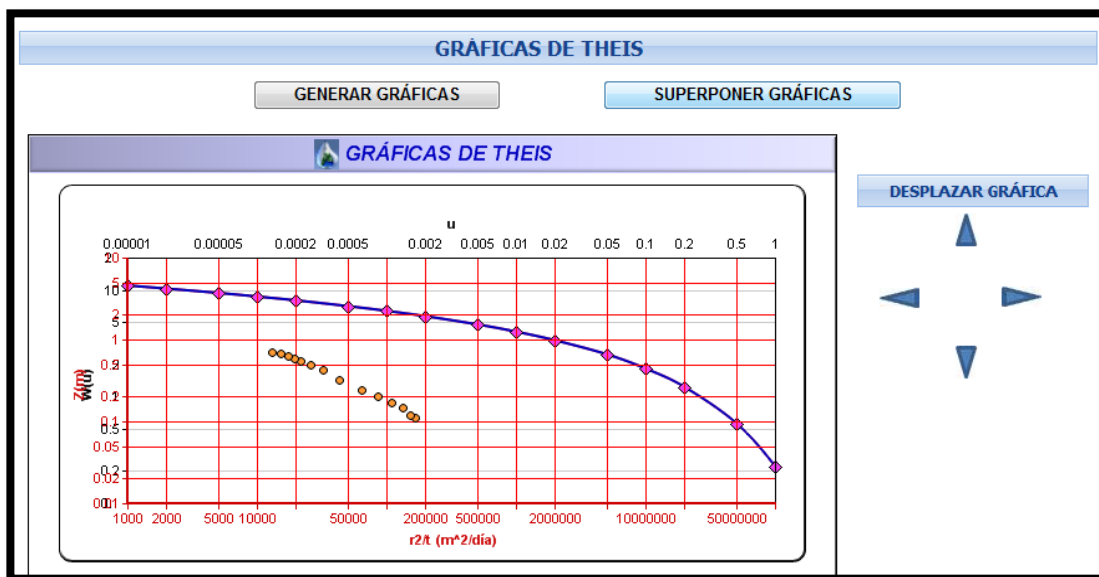


Figura 4.34: Superposición de gráficas de Theis: Curva tipo u vs W (u) y curva de los datos reales (r^2/t) vs z.

Fuente: El Autor.

- 6. Desplazar la gráfica de Theis (r^2/t vs z) hasta encontrar una posición en la que se presente el mejor ajuste:

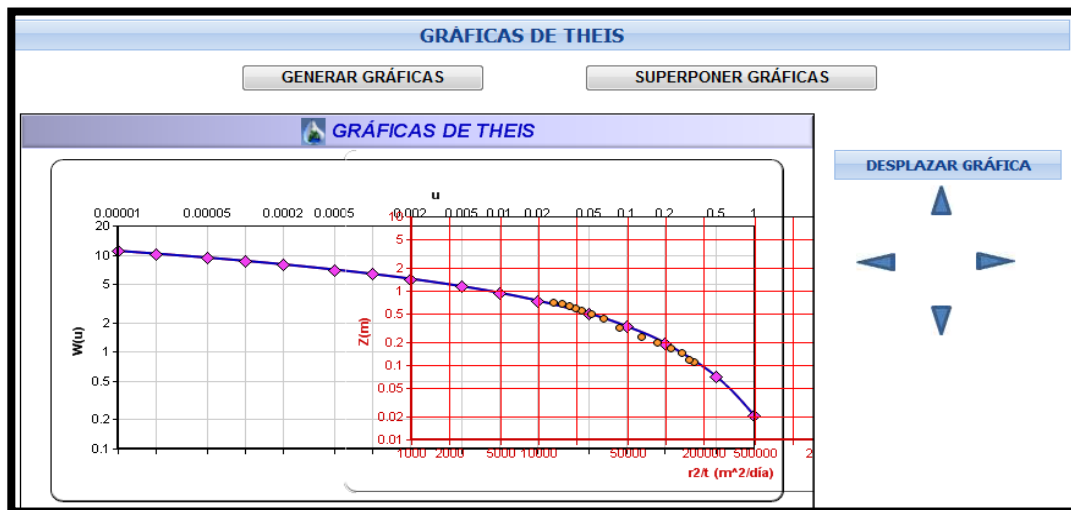


Figura 4.35: Desplazamiento de gráficas de Theis: Curva tipo u vs W (u) y datos reales (r^2/t) vs z.

Fuente: El Autor.



7. Ingresar los datos correspondientes al punto seleccionado mediante la superposición de las gráficas Theis:

INGRESAR DATOS OBTENIDOS POR LA SUPERPOSICIÓN DE GRÁFICAS			
Factor: r^2/t (m ² /día)	50000	Z (m)	0.32
Factor : u (-)	0.25	Función de pozo W(u) (-)	1
RESULTADOS			
Coef. de transmisibilidad (m ² /día)		Coef. de almacenamiento (-)	

Figura 4.36: Ingreso de parámetros obtenidos por la superposición de gráficas de Theis. Fuente: El Autor.

8. Luego de ingresar los parámetros obtenidos por la superposición de las gráficas de Theis procedemos a calcular el coeficiente de transmisibilidad (T):

INGRESAR DATOS OBTENIDOS POR LA SUPERPOSICIÓN DE GRÁFICAS			
Factor: r^2/t (m ² /día)	50000	Z (m)	0.32
Factor : u (-)	0.25	Función de pozo W(u) (-)	1
RESULTADOS			
Coef. de transmisibilidad (m ² /día)	716.20	Coef. de almacenamiento (-)	

Figura 4.37: Determinación del coeficiente de transmisibilidad (T). Fuente: El Autor.

9. Finalmente y posterior a realizar el cálculo de coeficiente de transmisibilidad (T) se procede a realizar el cálculo de coeficiente de almacenamiento (S):

INGRESAR DATOS OBTENIDOS POR LA SUPERPOSICIÓN DE GRÁFICAS			
Factor: r^2/t (m ² /día)	50000	Z (m)	0.32
Factor : u (-)	0.25	Función de pozo W(u) (-)	1
RESULTADOS			
Coef. de transmisibilidad (m ² /día)	716.20	Coef. de almacenamiento (-)	0.01

Figura 4.38: Determinación del coeficiente de almacenamiento (S). Fuente: El Autor.



Para realizar un nuevo cálculo se procede a limpiar los campos utilizados en el proceso anterior:

RÉGIMEN PERMANENTE

ACUÍFERO CONFINADO

- Determinar caudal de extracción (Q)
- Determinar abatimiento en el pozo (Z)
- Determinar coeficiente de transmisibilidad (T)
- Determinar el radio de influencia del pozo de extracción (R)

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text"/>	Caudal (m ³ /día)	<input type="text"/>
Descenso del nivel freático (m)	<input type="text"/>		
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text"/>		
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text"/>		

Figura 4.39: Limpieza de campos: Régimen permanente.
Fuente: El Autor.

RÉGIMEN NO PERMANENTE

MÉTODO DE THEIS

DETERMINAR COEFICIENTES DE TRANSMISIBILIDAD (T) Y DE ALMACENAMIENTO (S)

DATOS DE ENTRADA	
Caudal de extracción (m ³ /día)	<input type="text"/>
Distancia radial (m)	<input type="text"/>

Figura 4.40: Limpieza de campos: Régimen no permanente.
Fuente: El Autor.



CAPÍTULO V

VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA HIDRÁULICA DE POZOS DEL HYDROVLAB.



5.1 Validación de resultados

Este proceso se presenta con la finalidad de comparar los resultados obtenidos mediante aplicación de la herramienta implantada en el HydroVlab y poder obtener un grado de validez sobre la efectividad de esta herramienta.

En este capítulo no se muestra paso a paso el procedimiento de cálculo la herramienta pues este ya fue indicado en forma detallada en el capítulo IV.

Se presentan para los mismos problemas planteados los resultados obtenidos mediante la aplicación de: la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab, la herramienta de cálculo Microsoft Excel y los resultados presentados por los autores Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1 y 2* así como también Monsalve Sáenz G. (1995), *Hidrología en la Ingeniería* de la escuela Colombiana de Ingeniería.

5.1.1 Acuífero confinado: Método de Thiem.

Se ha tomado el ejemplo 1 planteado por Custodio, E. y Lamas, M. (2001), en el *Capítulo 9.3 de Hidrología Subterránea, Volumen 1* :

En un acuífero cautivo con 1000 m²/día de transmisividad y en el que el radio de influencia puede admitirse que vale 1000 m se extraen 50 m³/hora de un pozo de 500 mm de diámetro. Calcular el descenso teórico en el pozo de bombeo y en pozos de observación situados a 10, 100 y 500 m de distancia.

5.1.2 Acuífero libre: Método de Dupuit.

En este caso se ha considerado el *ejemplo 12* planteado por Custodio, E. y Lamas, M. (2001), en el *Capítulo 9.3 de Hidrología Subterránea, Volumen 1*:

Calcular los descensos en un pozo de 0.5 de diámetro y a distancias del mismo de 10 y 100 m, teniendo en cuenta que se bombean en régimen



estacionario $80 \text{ m}^3/\text{h}$ de un acuífero que inicialmente tenía 10 m de espesor saturado y cuya transmisibilidad antes del bombeo era de $500 \text{ m}^3/\text{día}$. Se supone que el radio de influencia vale 200 m. Aplicar el método de Thiem y el método de Dupuit.

5.1.3 Método de Theis

Para el análisis de se ha considerado el *ejemplo 13.4.2* planteado por Monsalve Sáenz G. (1995), en el *Capítulo 13 de Hidrología en la Ingeniería de la escuela Colombiana de Ingeniería*:

El registro de abatimiento contra tiempo de un pozo de observación a 115 m de un pozo de bombeo con un caudal de extracción constante de 2000 lt/minuto , se muestra en el cuadro 13.3 (Libro). Encuentre los coeficientes de transmisibilidad y almacenamiento del acuífero. Utilice el método de Theis.

TIEMPO (Horas)	ABATIMIENTO (m)	r^2/t ($\text{m}^2/\text{día}$)
1.90	0.11	167052.63
2.10	0.12	151142.86
2.40	0.15	132250.00
2.90	0.17	109448.28
3.70	0.2	85783.78
4.90	0.24	64775.51
9.80	0.43	32387.76
12.20	0.49	26016.39
14.70	0.55	21591.84
16.30	0.59	19472.39
18.40	0.63	17250.00
21.00	0.67	15114.29
24.40	0.71	13008.20

Tabla 5.1: Registro de abatimiento (z) vs tiempo (t).

Fuente: Monsalve Sáenz G. Capítulo 13, Cuadro 13.3: Registro de abatimiento.



5.2 Resultados obtenidos por: Custodio, E. y Lamas, M. (2001); así como por Monsalve Sáenz G. (1995).

5.2.1 Régimen permanente: Método de Thiem.

Aplicando el método de Thiem Custodio E. y Lamas M., presentan:

a) Descenso en el pozo

$$z_p = 0.366 \frac{Q}{T} \log \left(\frac{R}{r_p} \right)$$

$$z_p = 0.366 \frac{(50 \text{ m}^3/\text{h}) \times (24 \text{ h/día})}{1000 \text{ m}^2/\text{día}} \log \left(\frac{1000}{0.25} \right)$$

$$z_p = 1.58 \text{ m } \underline{\text{Rta.}}$$

b) Descenso a 10, 100 y 500 m del pozo

Para $r = 10 \text{ m}$

$$z = 0.366 \frac{(50 \text{ m}^3/\text{h}) \times (24 \text{ h/día})}{1000 \text{ m}^2/\text{día}} \log \left(\frac{1000}{10} \right)$$

$$z = 0.88 \text{ m } \underline{\text{Rta.}}$$

Para $r = 100 \text{ m}$

$$z = 0.366 \frac{(50 \text{ m}^3/\text{h}) \times (24 \text{ h/día})}{1000 \text{ m}^2/\text{día}} \log \left(\frac{1000}{100} \right)$$

$$z = 0.44 \text{ m } \underline{\text{Rta.}}$$



Para $r = 500$ m

$$z = 0.366 \frac{(50 \text{ m}^3/\text{h}) \times (24 \text{ h/día})}{1000 \text{ m}^2/\text{día}} \log\left(\frac{1000}{500}\right)$$

$$z = 0.13 \text{ m } \underline{\text{Rta.}}$$

5.2.2 Régimen permanente: Método de Thiem y de Dupuit.

Aplicando los métodos de Thiem y de Dupuit al problema planteado a Custodio E. y Lamas M., presentan:

a) Abatimiento en el pozo aplicando el método de Thiem:

$$z_p = 0.366 \frac{Q}{T} \log\left(\frac{R}{r_p}\right)$$

$$z_p = 0.366 \frac{(80 \text{ m}^3/\text{h}) \times (24 \text{ h/día})}{500 \text{ m}^2/\text{día}} \log\left(\frac{200}{0.25}\right)$$

$$z_p = 4.08 \text{ m } \underline{\text{Rta.}}$$

b) Abatimiento en el pozo con el método de Dupuit:

$$H_o^2 - H_p^2 = 0.73 \frac{Q}{k} \log\left(\frac{R}{r_p}\right)$$

$$100 - H_p^2 = 0.73 \frac{1920 \text{ m}^3/\text{día}}{50 \text{ m/día}} \log\left(\frac{200}{0.25}\right)$$

siendo:

$$k = \frac{T}{H_o} \quad (2.2)$$



$$k = \frac{500 \text{ m}^2/\text{día}}{10 \text{ m}}$$

$$k = 50 \text{ m/día}$$

de donde:

$$H_p^2 = 100 - \left[0.73 \frac{1920 \text{ m}^3/\text{día}}{50 \text{ m/día}} \log\left(\frac{200}{0.25}\right) \right]$$

$$H_p = 4.32 \text{ m}$$

Y por lo tanto el descenso será:

$$z_p = H_o - H_p$$

$$z_p = 10 - 4.32$$

$$s_p = 5.68 \text{ m } \underline{\text{Rta.}}$$

Los resultados para las otras distancias radiales se presentan a continuación:

Distancia Radial (m)	Descenso (m)	
	Método de Thiem	Método de Dupuit
Pozo $r_p = 0.25 \text{ m}$	4.08 m	5.68 m
10 m	1.82 m	2.03 m
100 m	0.42 m	0.43 m

Tabla 5.2: Descensos para los puntos de observación.
Fuente: Custodio, E. y Lamas, M., *Capítulo 9.3, Ejemplo 12, Pág. 659*



5.2.3 Régimen no permanente: Método de Theis.

De acuerdo a Monsalve Sáenz G., ampliando el método de Theis se tiene:

TIEMPO (Horas)	ABATIMIENTO (m)	r^2/t (m ² /día)
1.90	0.11	167052.63
2.10	0.12	151142.86
2.40	0.15	132250.00
2.90	0.17	109448.28
3.70	0.2	85783.78
4.90	0.24	64775.51
7.30	0.32	43479.45
9.80	0.43	32387.76
12.20	0.49	26016.39
14.70	0.55	21591.84
16.30	0.59	19472.39
18.40	0.63	17250.00
21.00	0.67	15114.29
24.40	0.71	13008.20

Tabla 5.3: Registro de abatimiento (z) vs tiempo (t).

Fuente: Monsalve Sáenz G. Capítulo 13, Cuadro 13.3: Registro de abatimiento

De la superposición de las figuras: Curva genérica $W(u)$ vs u y figura: Curva r^2/t vs z se obtiene:

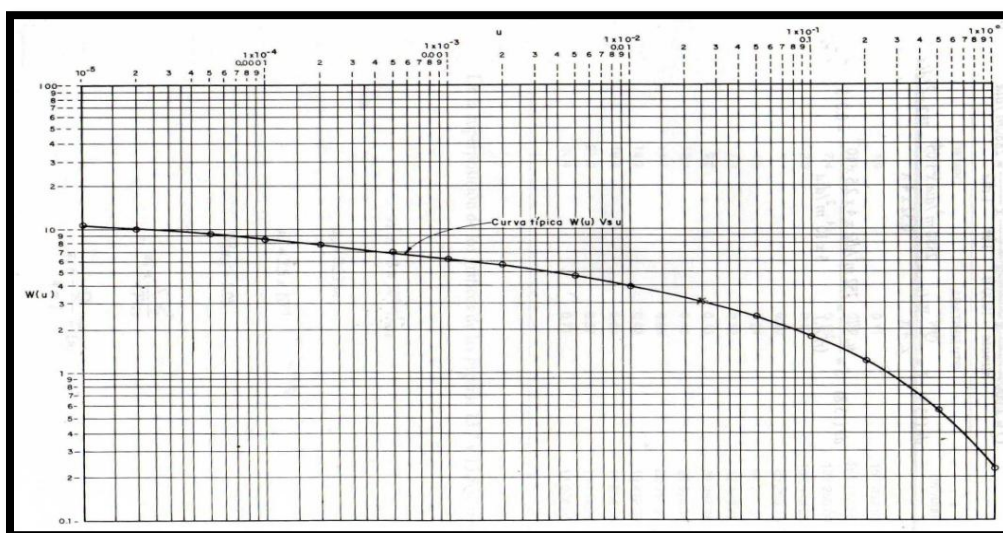


Figura 5.1: Curva genérica: $W(u)$ vs u

Fuente: Monsalve Sáenz G., HIDROLOGÍA EN LA INGENIERÍA, (1995), Pág.:376.

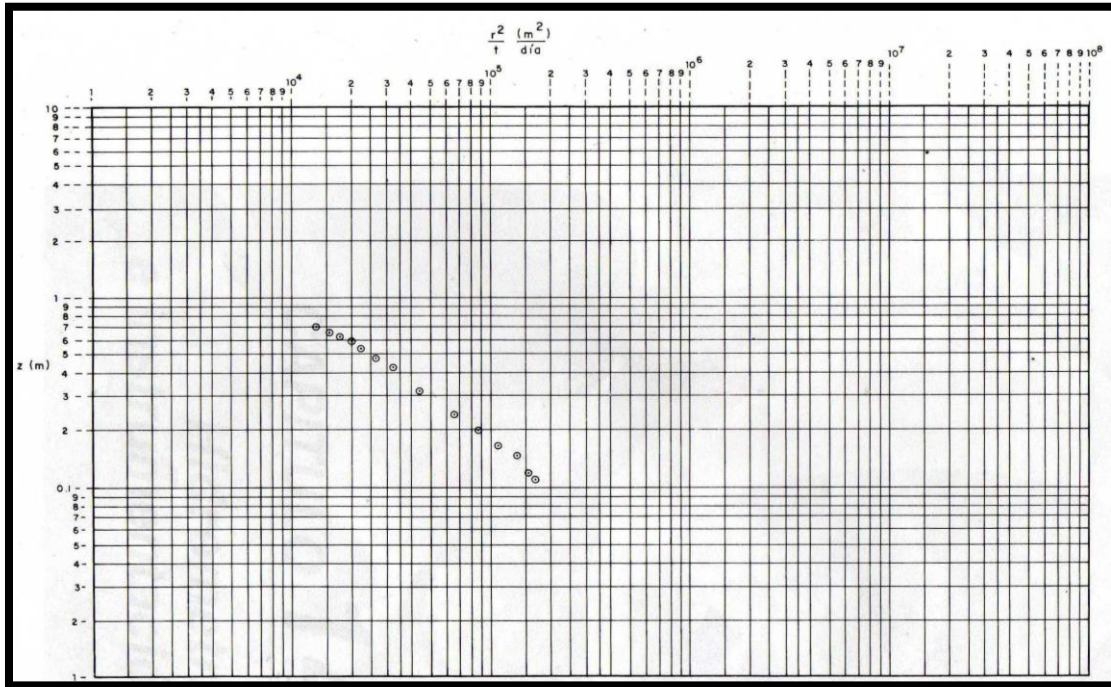


Figura 5.2: Valores: r^2/t vs z

Fuente: Monsalve Sáenz G., HIDROLOGÍA EN LA INGENIERÍA, (1995), Pág.:377.

$$\frac{r^2}{t} = 5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$z = 0.32 \text{ m}$$

$$u = 2.5 \times 10^{-1}$$

$$W(u) = 1.05$$

$$Q = 2000 \frac{\text{lt}}{\text{minuto}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lt}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}$$

$$Q = 2880 \text{ m}^3/\text{día}$$



Se conoce que el abatimiento es:

$$z = \frac{Q}{4 \times \pi \times T} W(u)$$

De donde el coeficiente de transmisibilidad (T) es:

$$T = \frac{Q}{z \times 4 \times \pi} W(u)$$

$$T = \frac{2880 \text{ m}^3/\text{día}}{(0.32 \text{ m}) \times 4 \times \pi} * 1.05$$

$$T = 752 \text{ m}^2/\text{día} \quad \underline{\text{Rta.}}$$

Además se tiene que:

$$u = \frac{S}{4 \times T} \left(\frac{r^2}{t} \right)$$

Por tanto el coeficiente de almacenamiento (S) del acuífero es:

$$S = \frac{u \times 4 \times T}{r^2/t}$$

$$S = \frac{0.25 \times 4 \times 752 \text{ m}^2/\text{día}}{5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{día}}$$

$$S = 0.015 \quad \underline{\text{Rta.}}$$



5.3 Resultados obtenidos mediante Microsoft Excel.

5.3.1 Régimen permanente: Método de Thiem.

Para el problema planteado por Custodio, E. y Lamas, M. aplicando el método de Thiem se obtienen los siguientes resultados:

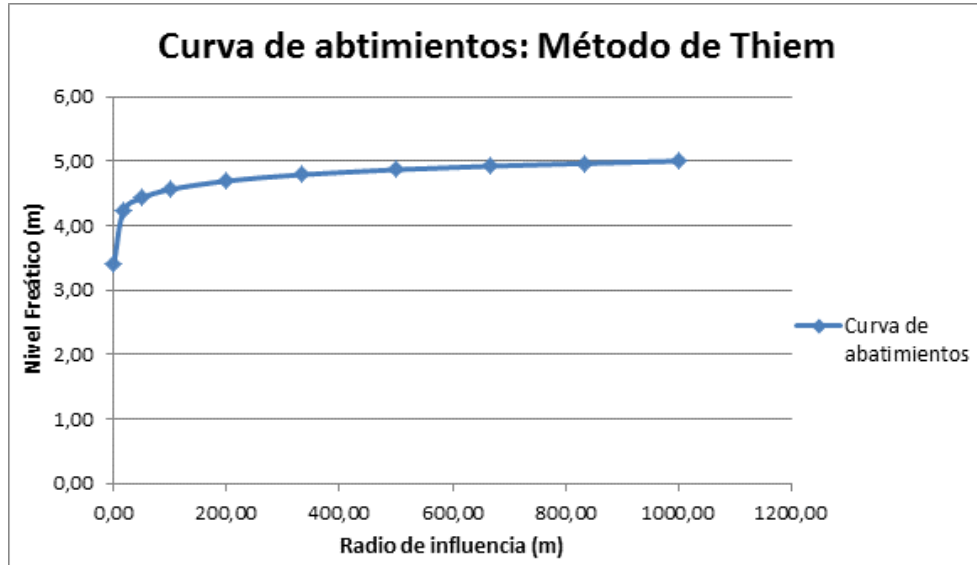
a) Descenso en el pozo

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
T (m ² /día)	1000.00	Z _p (m)	1.58
Q (m ³ /día)	1200.00		
r (m)	0.25		
R (m)	1000.00		
N.F. (m): Impuesto	5.00		

Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R.		
r (m)	Z (m)	N.F. (m)
0.25	1.58	3.42
16.91	0.78	4.22
50.24	0.57	4.43
100.23	0.44	4.56
200.20	0.31	4.69
333.50	0.21	4.79
500.13	0.13	4.87
666.75	0.08	4.92
833.38	0.03	4.97
1000.00	0.00	5.00

Cuadro 5.1: Determinación del abatimiento en el pozo (Z_p) hasta R mediante Microsoft Excel.

Fuente: El Autor.



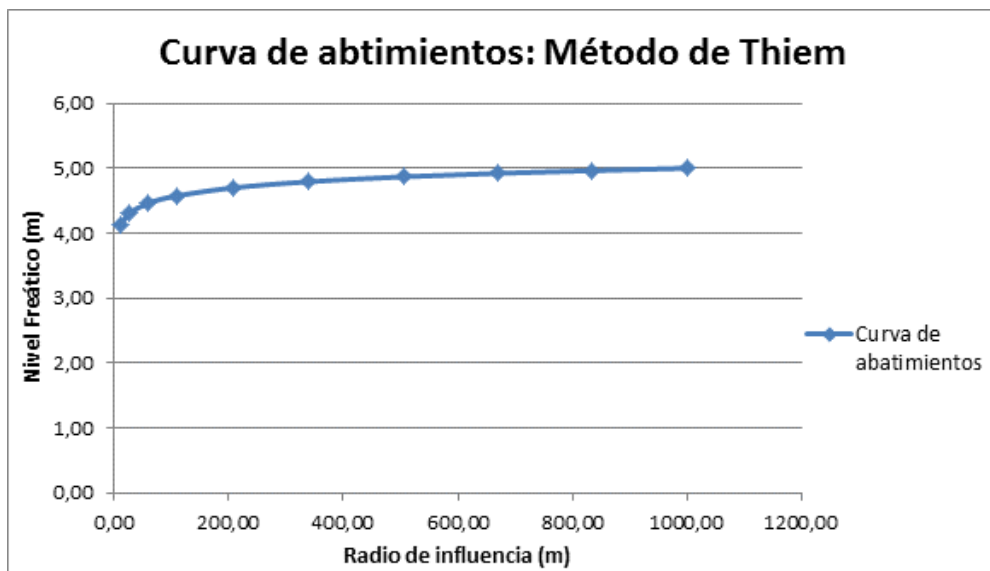
Gráfica 5.1: Curva de abatimiento desde r hasta R.
Fuente: El Autor.

a) Descenso a 10, 100 y 500 m del pozo

Para r = 10 m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS																																		
T (m ² /día)	1000.00	Z (m)	0.88																																	
Q (m ³ /día)	1200.00	Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R. <table border="1"> <thead> <tr> <th>r (m)</th> <th>Z (m)</th> <th>N.F. (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10.00</td><td>0.88</td><td>4.12</td></tr> <tr><td>26.50</td><td>0.69</td><td>4.31</td></tr> <tr><td>59.50</td><td>0.54</td><td>4.46</td></tr> <tr><td>109.00</td><td>0.42</td><td>4.58</td></tr> <tr><td>208.00</td><td>0.30</td><td>4.70</td></tr> <tr><td>340.00</td><td>0.21</td><td>4.79</td></tr> <tr><td>505.00</td><td>0.13</td><td>4.87</td></tr> <tr><td>670.00</td><td>0.08</td><td>4.92</td></tr> <tr><td>835.00</td><td>0.03</td><td>4.97</td></tr> <tr><td>1000.00</td><td>0.00</td><td>5.00</td></tr> </tbody> </table>		r (m)	Z (m)	N.F. (m)	10.00	0.88	4.12	26.50	0.69	4.31	59.50	0.54	4.46	109.00	0.42	4.58	208.00	0.30	4.70	340.00	0.21	4.79	505.00	0.13	4.87	670.00	0.08	4.92	835.00	0.03	4.97	1000.00	0.00	5.00
r (m)	Z (m)			N.F. (m)																																
10.00	0.88			4.12																																
26.50	0.69			4.31																																
59.50	0.54			4.46																																
109.00	0.42			4.58																																
208.00	0.30			4.70																																
340.00	0.21			4.79																																
505.00	0.13			4.87																																
670.00	0.08			4.92																																
835.00	0.03	4.97																																		
1000.00	0.00	5.00																																		
r (m)	10.00																																			
R (m)	1000.00																																			
N.F. (m): Impuesto	5.00																																			

Cuadro 5.2: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R, mediante Microsoft Excel.
Fuente: El Autor.

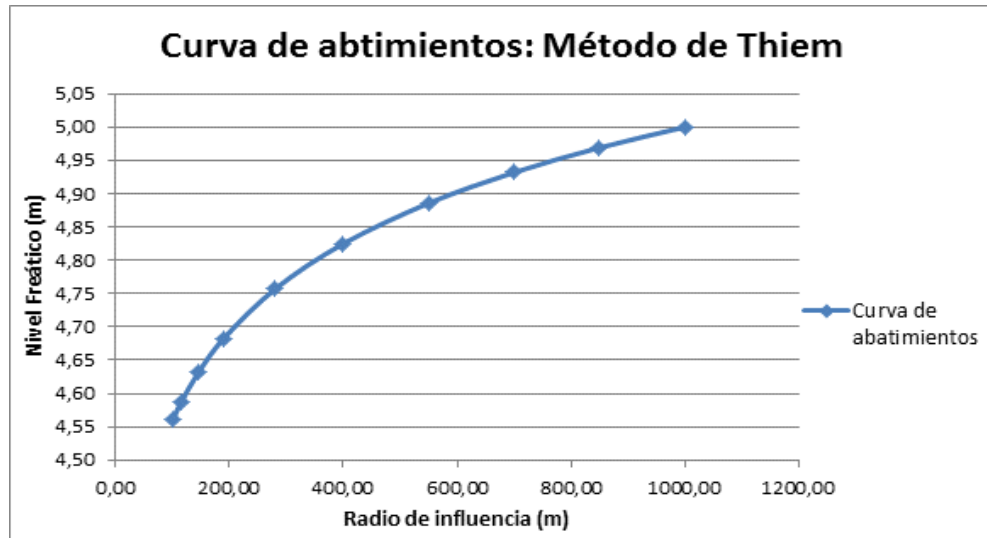


Gráfica 5.2: Curva de abatimiento desde r hasta R.
Fuente: El Autor.

Para $r = 100 \text{ m}$

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS																																		
T (m ² /día)	1000.00	Z (m)	0.44																																	
Q (m ³ /día)	1200.00	Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R. <table border="1"> <thead> <tr> <th>r (m)</th> <th>Z (m)</th> <th>N.F. (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100.00</td><td>0.44</td><td>4.56</td></tr> <tr><td>115.00</td><td>0.41</td><td>4.59</td></tr> <tr><td>145.00</td><td>0.37</td><td>4.63</td></tr> <tr><td>190.00</td><td>0.32</td><td>4.68</td></tr> <tr><td>280.00</td><td>0.24</td><td>4.76</td></tr> <tr><td>400.00</td><td>0.17</td><td>4.83</td></tr> <tr><td>550.00</td><td>0.11</td><td>4.89</td></tr> <tr><td>700.00</td><td>0.07</td><td>4.93</td></tr> <tr><td>850.00</td><td>0.03</td><td>4.97</td></tr> <tr><td>1000.00</td><td>0.00</td><td>5.00</td></tr> </tbody> </table>		r (m)	Z (m)	N.F. (m)	100.00	0.44	4.56	115.00	0.41	4.59	145.00	0.37	4.63	190.00	0.32	4.68	280.00	0.24	4.76	400.00	0.17	4.83	550.00	0.11	4.89	700.00	0.07	4.93	850.00	0.03	4.97	1000.00	0.00	5.00
r (m)	Z (m)			N.F. (m)																																
100.00	0.44			4.56																																
115.00	0.41			4.59																																
145.00	0.37			4.63																																
190.00	0.32			4.68																																
280.00	0.24			4.76																																
400.00	0.17			4.83																																
550.00	0.11			4.89																																
700.00	0.07			4.93																																
850.00	0.03	4.97																																		
1000.00	0.00	5.00																																		
r (m)	100.00																																			
R (m)	1000.00																																			
N.F. (m): Impuesto	5.00																																			

Cuadro 5.3: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.
Fuente: El Autor.

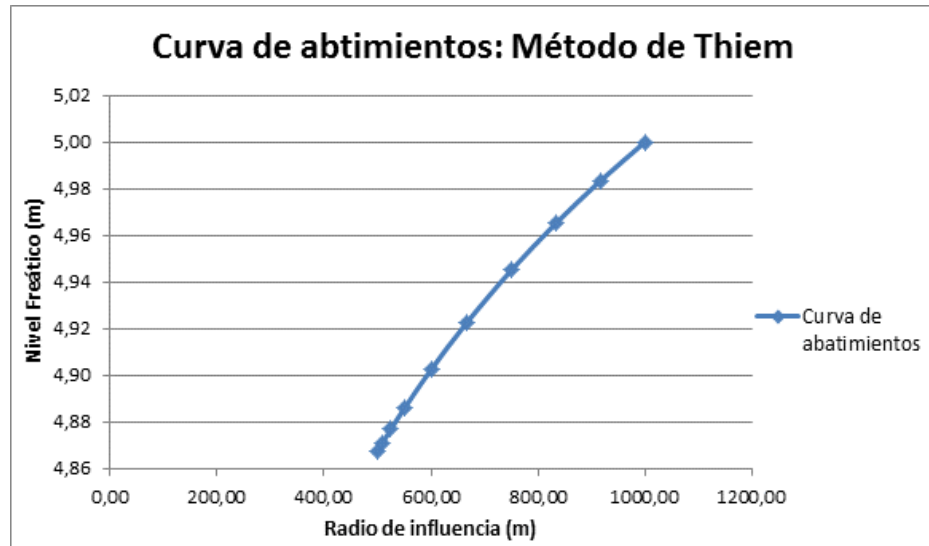


Gráfica 5.3: Curva de abatimientos desde r hasta R.
Fuente: El Autor.

Para $r = 500 \text{ m}$

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS																																		
T (m ² /día)	1000.00	Z (m)	0.13																																	
Q (m ³ /día)	1200.00	Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R. <table border="1"> <thead> <tr> <th>r (m)</th> <th>Z (m)</th> <th>N.F. (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>500.00</td><td>0.13</td><td>4.87</td></tr> <tr><td>508.33</td><td>0.13</td><td>4.87</td></tr> <tr><td>525.00</td><td>0.12</td><td>4.88</td></tr> <tr><td>550.00</td><td>0.11</td><td>4.89</td></tr> <tr><td>600.00</td><td>0.10</td><td>4.90</td></tr> <tr><td>666.67</td><td>0.08</td><td>4.92</td></tr> <tr><td>750.00</td><td>0.05</td><td>4.95</td></tr> <tr><td>833.33</td><td>0.03</td><td>4.97</td></tr> <tr><td>916.67</td><td>0.02</td><td>4.98</td></tr> <tr><td>1000.00</td><td>0.00</td><td>5.00</td></tr> </tbody> </table>		r (m)	Z (m)	N.F. (m)	500.00	0.13	4.87	508.33	0.13	4.87	525.00	0.12	4.88	550.00	0.11	4.89	600.00	0.10	4.90	666.67	0.08	4.92	750.00	0.05	4.95	833.33	0.03	4.97	916.67	0.02	4.98	1000.00	0.00	5.00
r (m)	Z (m)			N.F. (m)																																
500.00	0.13			4.87																																
508.33	0.13			4.87																																
525.00	0.12			4.88																																
550.00	0.11			4.89																																
600.00	0.10			4.90																																
666.67	0.08			4.92																																
750.00	0.05			4.95																																
833.33	0.03			4.97																																
916.67	0.02	4.98																																		
1000.00	0.00	5.00																																		
r (m)	500.00																																			
R (m)	1000.00																																			
N.F. (m): Impuesto	5.00																																			

Cuadro 5.4: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.
Fuente: El Autor.



Gráfica 5.4: Curva de abatimientos desde r hasta R.
Fuente: El Autor.

5.3.2 Régimen permanente: Método de Thiem y método de Dupuit.

Para el problema planteado por Custodio, E. y Lamas, M. se tiene:

a) Abatimiento en el pozo aplicando el método de Thiem:

DATOS DE ENTRADA	
T (m ² /día)	500.00
Q (m ³ /día)	1920.00
r (m)	0.25
R (m)	200.00
N.F. (m):	10.00

Tabla 5.3: Determinación del abatimiento en el pozo (Z_p) y desde r_p hasta R mediante Microsoft Excel.

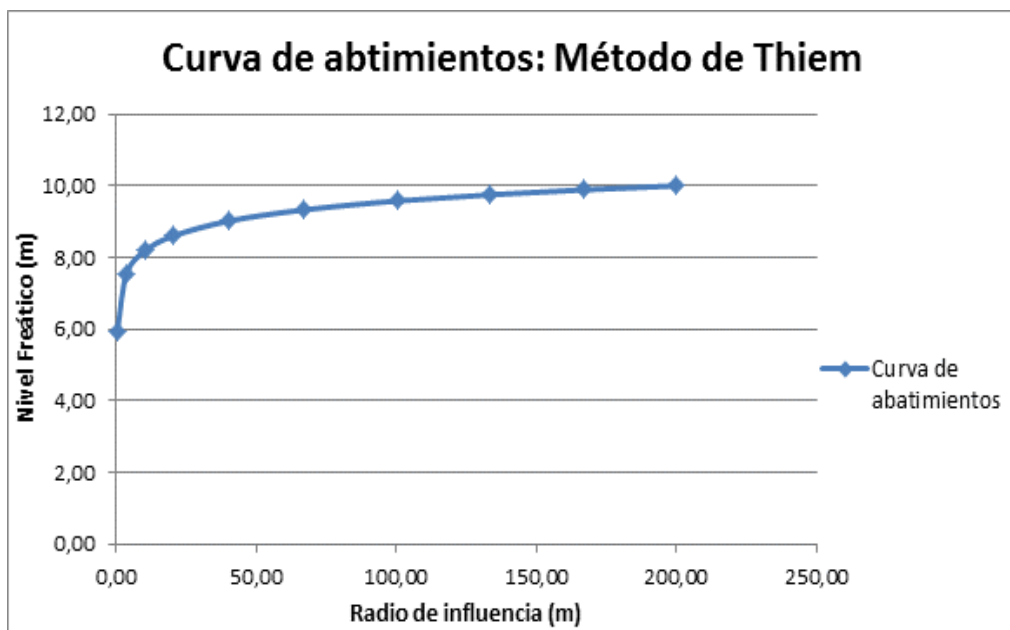
Fuente: El Autor.



RESULTADOS		
Z (m)	4.09	

Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R.		
r (m)	Z (m)	N.F. (m)
0.25	4.09	5.91
3.58	2.46	7.54
10.24	1.82	8.18
20.23	1.40	8.60
40.20	0.98	9.02
66.83	0.67	9.33
100.13	0.42	9.58
133.42	0.25	9.75
166.71	0.11	9.89
200.00	0.00	10.00

Tabla 5.3: Continuación.
Fuente: El Autor.



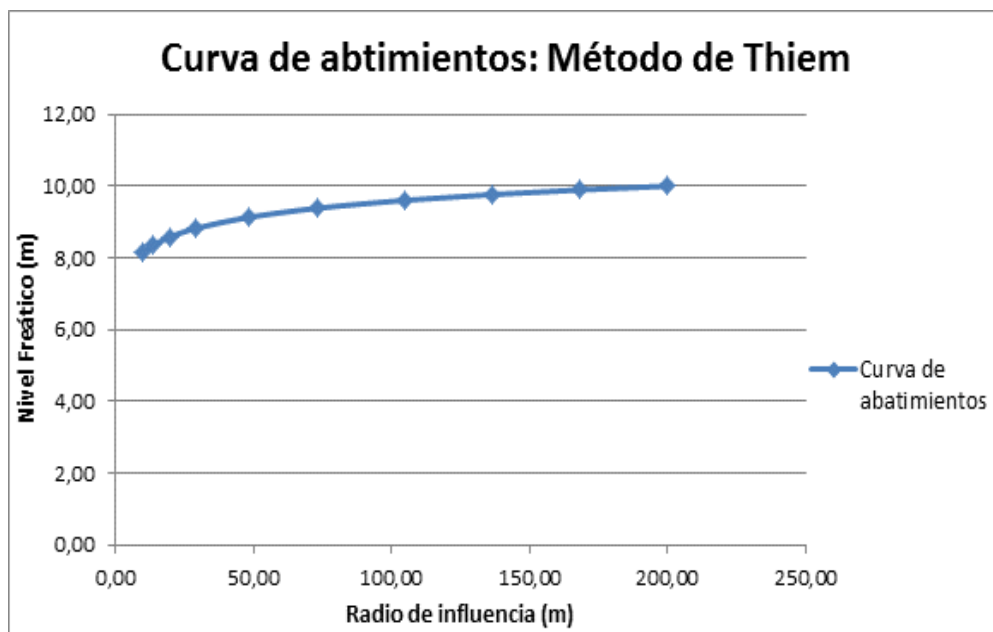
Gráfica 5.5: Curva de abatimientos desde rp hasta R.
Fuente: El Autor.



Para $r = 10$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS				
T (m ² /día)	500.00	Z (m)	1.83			
Q (m ³ /día)	1920.00	Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R.				
r (m)	10.00					
R (m)	200.00					
N.F. (m):	10.00					
				r (m)	Z (m)	N.F. (m)
				10.00	1.83	8.17
				13.17	1.66	8.34
				19.50	1.42	8.58
				29.00	1.18	8.82
				48.00	0.87	9.13
		73.33	0.61	9.39		
		105.00	0.39	9.61		
		136.67	0.23	9.77		
		168.33	0.11	9.89		
		200.00	0.00	10.00		

Cuadro 5.5: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.
Fuente: El Autor.



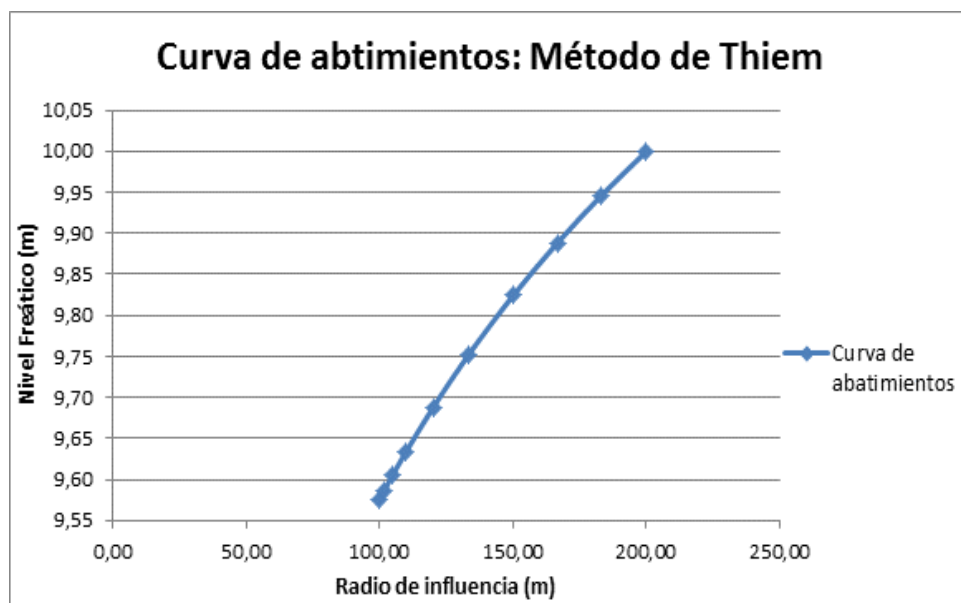
Gráfica 5.6: Curva de abatimientos desde r hasta R.
Fuente: El Autor.



Para $r = 100$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS				
T (m ² /día)	500.00	Z (m)	0.42			
Q (m ³ /día)	1920.00	Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R.				
r (m)	100.00					
R (m)	200.00					
N.F. (m):	10.00					
				r (m)	Z (m)	N.F. (m)
				100.00	0.42	9.58
				101.67	0.41	9.59
				105.00	0.39	9.61
				110.00	0.37	9.63
				120.00	0.31	9.69
		133.33	0.25	9.75		
		150.00	0.18	9.82		
		166.67	0.11	9.89		
		183.33	0.05	9.95		
		200.00	0.00	10.00		

Cuadro 5.6: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.
Fuente: El Autor.



Gráfica 5.7: Curva de abatimientos desde r hasta R.
Fuente: El Autor.



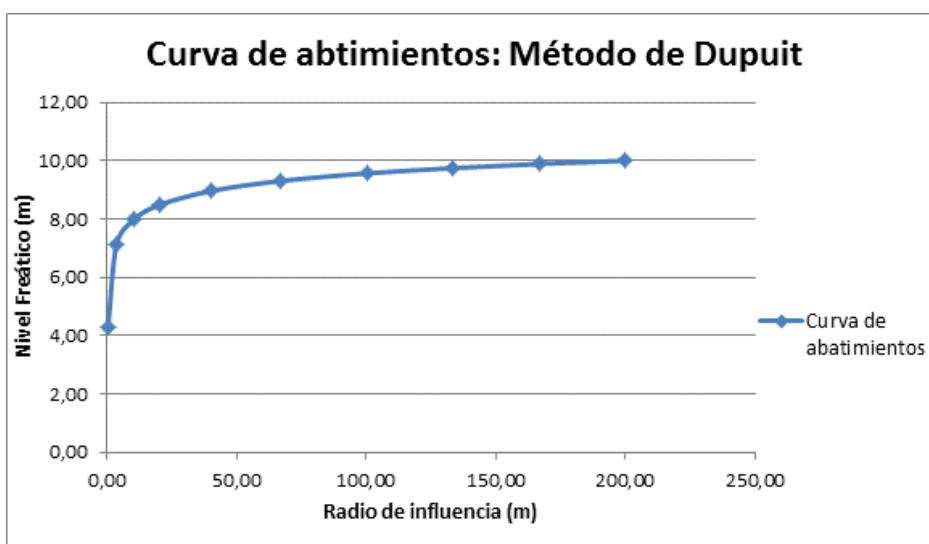
b) Abatimiento en el pozo aplicando el método de Dupuit:

Para $r_p = 0.25$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS		
T (m ² /día)	500.00	K (m/día)	50.00	
N.F. (m)	10.00	Z _p (m)	5.72	
Q (m ³ /día)	1920.00	Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R.		
r _p (m)	0.25			
R (m)	200.00			
r (m)	Z (m)			N.F. (m)
0.25	5.72			4.28
3.58	2.87			7.13
10.24	2.02			7.98
20.23	1.52			8.48
40.20	1.03			8.97
66.83	0.69			9.31
100.13	0.43	9.57		
133.42	0.25	9.75		
166.71	0.11	9.89		
200.00	0.00	10.00		

Cuadro 5.7: Determinación del abatimiento en el pozo (Z_p) y desde r_p hasta R mediante Microsoft Excel.

Fuente: El Autor.



Gráfica 5.8: Curva de abatimientos desde r_p hasta R.

Fuente: El Autor.



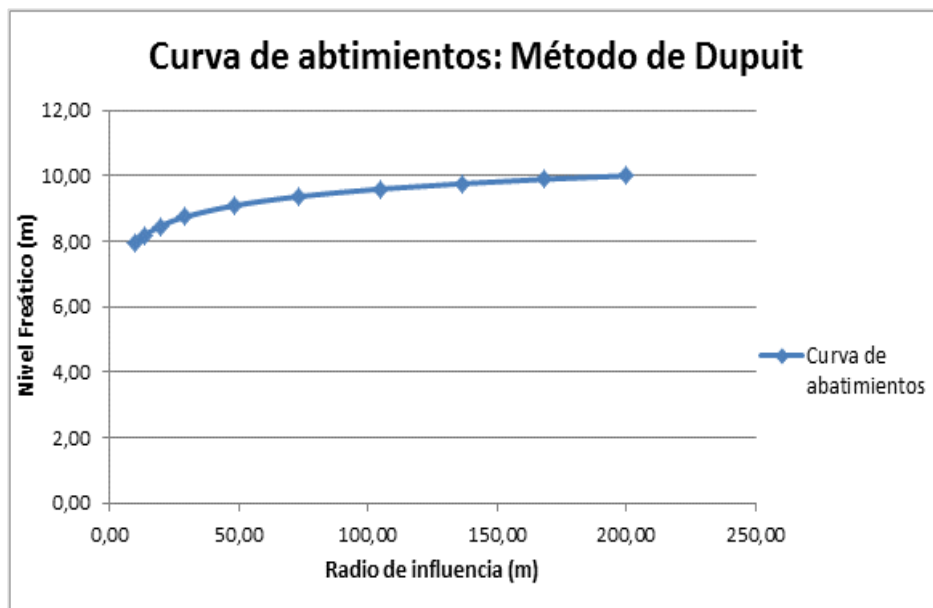
Para $r = 10\text{ m}$

DATOS DE ENTRADA	
T (m ² /día)	500.00
N.F. (m)	10.00
Q (m ³ /día)	1920.00
r (m)	10.00
R (m)	200.00

RESULTADOS	
K (m/día)	50.00
Z (m)	2.04

Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R.		
r (m)	Z (m)	N.F. (m)
10.00	2.04	7.96
13.17	1.83	8.17
19.50	1.54	8.46
29.00	1.26	8.74
48.00	0.91	9.09
73.33	0.63	9.37
105.00	0.40	9.60
136.67	0.24	9.76
168.33	0.11	9.89
200.00	0.00	10.00

Cuadro 5.8: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel.
Fuente: El Autor.



Gráfica 5.9: Curva de abatimientos desde r hasta R.
Fuente: El Autor.



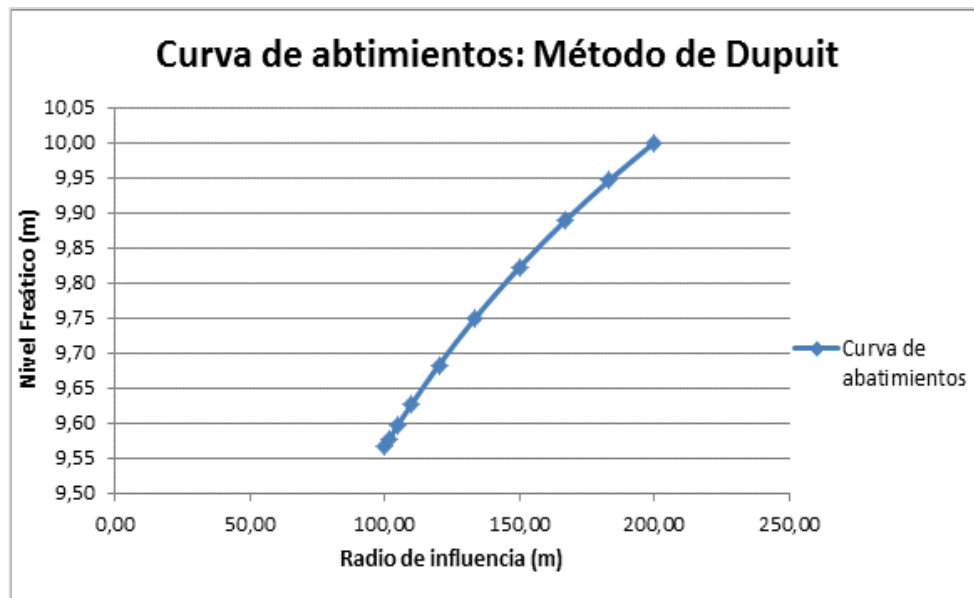
Para $r = 100$ m

DATOS DE ENTRADA	
T (m ² /día)	500.00
N.F. (m)	10.00
Q (m ³ /día)	1920.00
r (m)	100.00
R (m)	200.00

RESULTADOS	
K (m/día)	50.00
Z (m)	0.43

Abatimiento y nivel dinámico del agua desde r hasta R.		
r (m)	Z (m)	N.F. (m)
100.00	0.43	9.57
101.67	0.42	9.58
105.00	0.40	9.60
110.00	0.37	9.63
120.00	0.32	9.68
133.33	0.25	9.75
150.00	0.18	9.82
166.67	0.11	9.89
183.33	0.05	9.95
200.00	0.00	10.00

Cuadro 5.9: Determinación del abatimiento (Z) desde r hasta R mediante Microsoft Excel. Fuente: El Autor.



Gráfica 5.10: Curva de abatimientos desde r hasta R. Fuente: El Autor.



5.3.3 Régimen no permanente: Método de Theis.

Aplicando Microsoft Excel para la resolución del ejemplo planteado por Monsalve Sáenz G. se tiene:

Es necesario tener todos los parámetros en las mismas unidades para lo cual se realiza la respectiva transformación de los datos de entrada:

DATOS DE ENTRADA		TRANSFORMACIÓN DE UNIDADES: DATOS DE ENTRADA	
r (m)	Q (lt/min)	r (m)	Q (m ³ /día)
115	2000	115	2880
Registro: z vs t		Registro: z vs t	
Z (m)	t (Horas)	Z (m)	t (días)
0.11	1.9	0.11	0.08
0.12	2.1	0.12	0.09
0.15	2.4	0.15	0.10
0.17	2.9	0.17	0.12
0.2	3.7	0.20	0.15
0.24	4.9	0.24	0.20
0.32	7.3	0.32	0.30
0.43	9.8	0.43	0.41
0.49	12.2	0.49	0.51
0.55	14.7	0.55	0.61
0.59	16.3	0.59	0.68
0.63	18.4	0.63	0.77
0.67	21.0	0.67	0.88
0.71	24.4	0.71	1.02

Cuadro 5.10: Determinación de coeficientes S y T mediante Microsoft Excel.

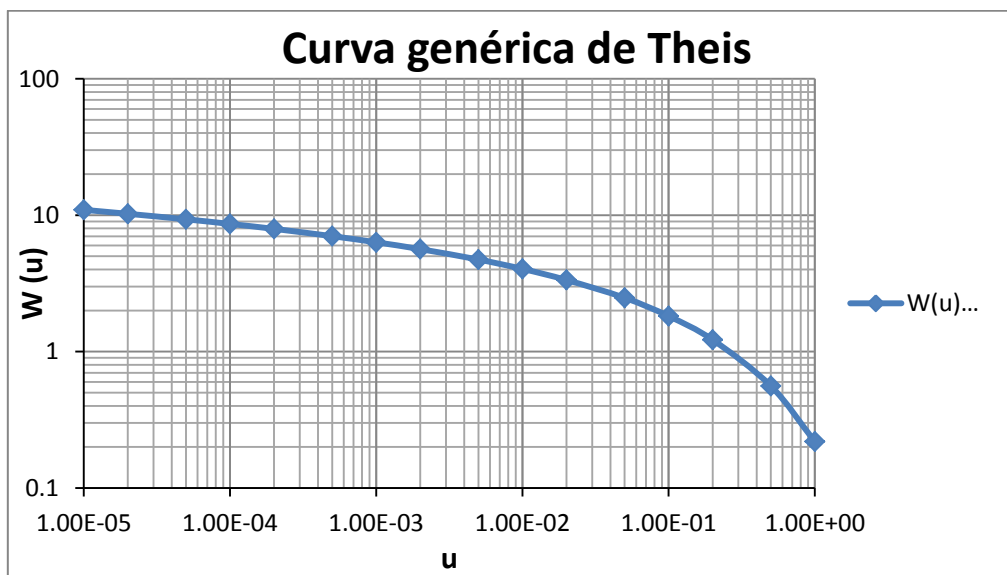
Fuente: El autor



La curva genérica de Theis es generada en función de los pares ordenados $u, W(u)$:

Curva tipo de Theis: $u, W(u)$	
u	$W(u)$
0.00001	10.95
0.00002	10.24
0.00005	9.33
0.0001	8.63
0.0002	7.94
0.0005	7.02
0.001	6.33
0.002	5.64
0.005	4.73
0.01	4.04
0.02	3.35
0.05	2.48
0.1	1.82
0.2	1.22
0.5	0.56
1	0.22

Tabla 5.4: Curva genérica de Theis: Pares ordenados $u, W(u)$.
Fuente: Monsalve Sáenz G. Capítulo 13, Cuadro 13.3: Registro de abatimiento



Gráfica 5.11: Curva genérica: $W(u)$ vs u .
Fuente: El Autor.

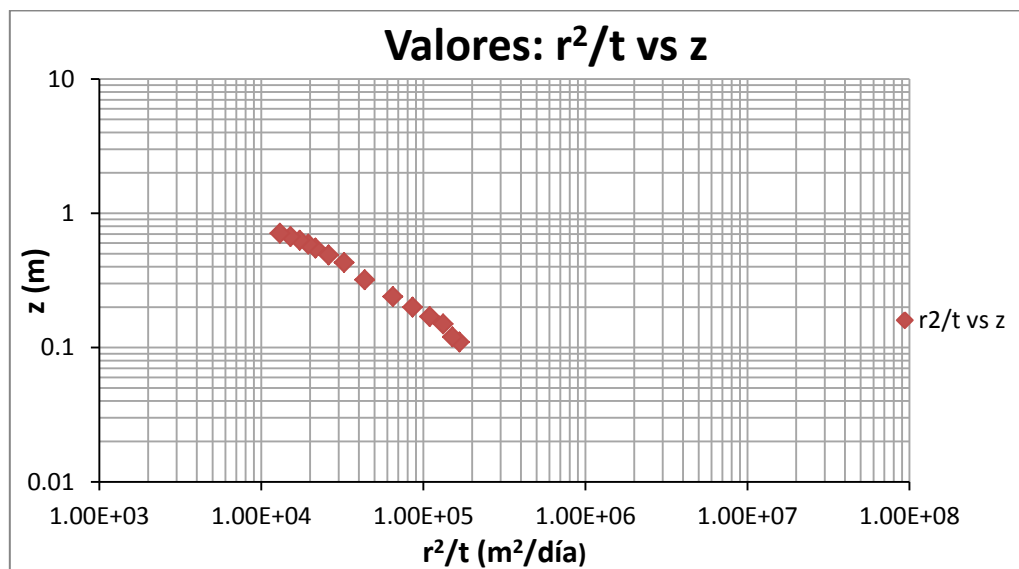


De acuerdo con los datos de entrada tenemos que:

DATOS REALES GRÁFICA: r^2/t vs t	
r^2/t (m ² /día)	Z (m)
167052.63	0.11
151142.86	0.12
132250.00	0.15
109448.28	0.17
85783.78	0.20
64775.51	0.24
43479.45	0.32
32387.76	0.43
26016.39	0.49
21591.84	0.55
19472.39	0.59
17250.00	0.63
15114.29	0.67
13008.20	0.71

Tabla 5.5: Valores de gráfica: r^2/t vs z .
Fuente: El Autor.

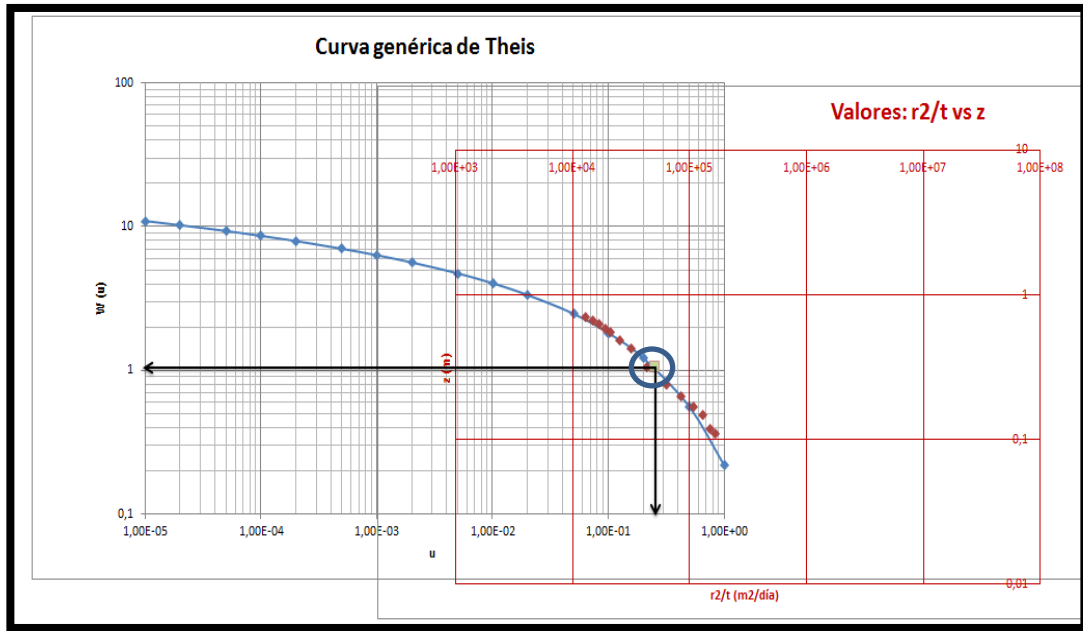
Al representar gráficamente los valores anteriormente citados tenemos:



Gráfica 5.12: Valores de: r^2/t vs z .
Fuente: El Autor.



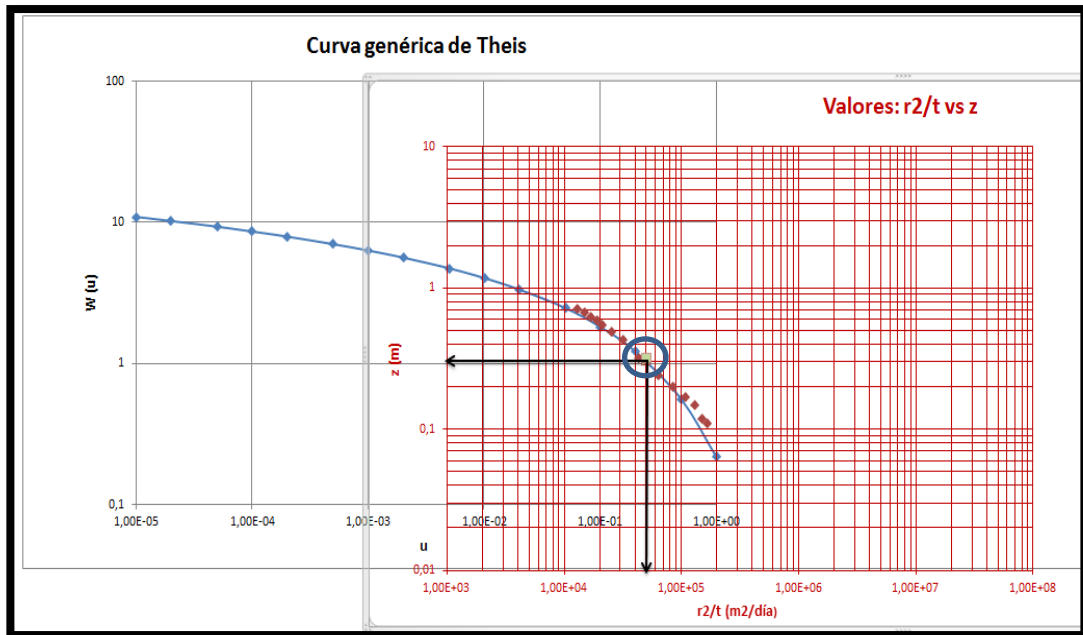
Del proceso de superposición de las gráficas de Theis obtenemos:



Gráfica 5.13: Superposición de gráficas de Theis.
Fuente: El Autor.

Determinando que:

u	W (u)
0,25	1,05



Gráfica 5.14: Superposición de gráficas de Theis.
Fuente: El Autor.



Además:

r^2/t (m ² /día)	z (m)
50000	0.32

Por lo tanto los el valor de los coeficientes son:

RESULTADOS	
T (m ² /día)	752.01
S (-)	0.015

Tabla 5.6: Coeficientes S y T obtenidos mediante Microsoft Excel. Fuente: El Autor.

5.4 Resultados obtenidos mediante aplicación de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab.

5.4.1 Régimen permanente: Método de Thiem.

Para el problema planteado por Custodio, E. y Lamas, M. aplicando el método de Thiem se obtienen los siguientes resultados:

a) Descenso en el pozo: $r_p = 0.25$

RÉGIMEN PERMANENTE

ACUÍFERO CONFINADO

- Determinar caudal de extracción (Q)
- Determinar abatimiento en el pozo (Z)
- Determinar coeficiente de transmisibilidad (T)
- Determinar el radio de influencia del pozo de extracción (R)

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	Para graficar	Abatimiento (m)	1.58
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	1000		
Radio del pozo de extracción (m)	0.25		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	1000		
Caudal (m ³ /día)	1200		

CARGAR EJEMPLO

LIMPIAR CAMPOS

Figura 5.14: Determinación del abatimiento en el pozo (z_p) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.



b) Descenso a 10, 100 y 500 m del pozo

Para $r = 10$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="Para graficar"/>	Abatimiento (m)	<input type="text" value="0.88"/>
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="1000"/>	<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>	
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="10"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="1000"/>		
Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="1200"/>		
<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>			

Figura 5.15: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.

Fuente: El Autor.

Para $r = 100$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="Para graficar"/>	Abatimiento (m)	<input type="text" value="0.44"/>
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="1000"/>	<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>	
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="100"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="1000"/>		
Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="1200"/>		
<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>			

Figura 5.16: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.

Fuente: El Autor.

Para $r = 500$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="Para graficar"/>	Abatimiento (m)	<input type="text" value="0.13"/>
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="1000"/>	<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>	
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="500"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="1000"/>		
Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="1200"/>		
<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>			

Figura 5.17: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.

Fuente: El Autor.



Adicionalmente la herramienta permite obtener una gráfica del comportamiento que presenta el agua subterránea para las características ingresadas bajo régimen permanente aplicando el método de Thiem:

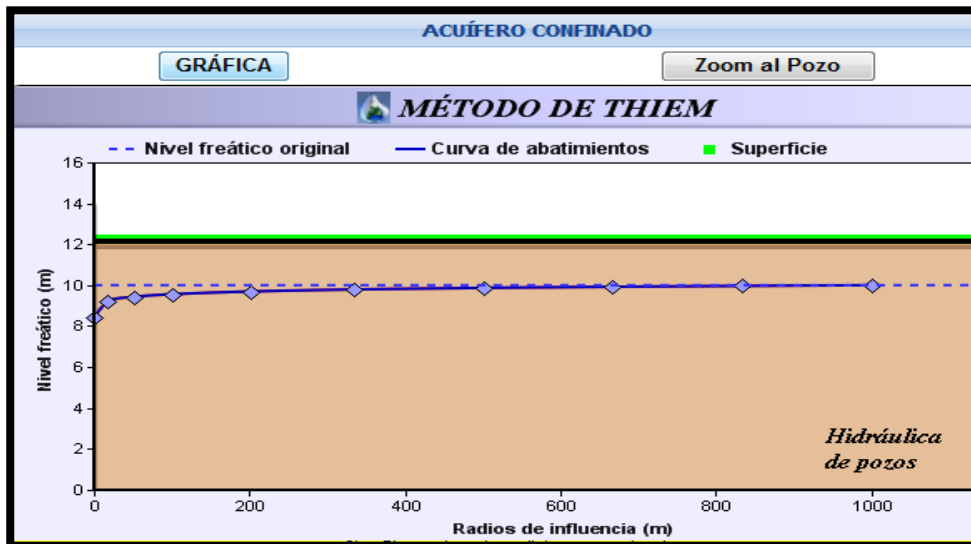


Figura 5.18: Curva de abatimientos mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.

Fuente: El Autor.

Para apreciar el de cerca el comportamiento del agua subterránea en el pozo de extracción se efectúa un acercamiento:

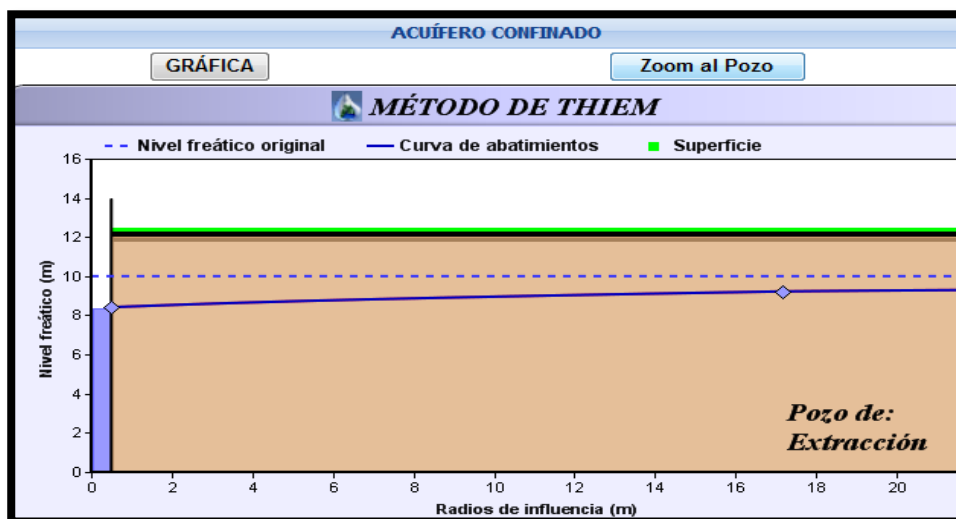


Figura 5.19: Acercamiento al pozo mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del Hydrovlab.

Fuente: El Autor.



5.4.2 Régimen permanente: Método de Thiem y método de Dupuit.

Para el problema planteado por Custodio, E. y Lamas, M. se tiene:

a) *Abatimiento en el pozo aplicando el método de Thiem:*

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	10	Abatimiento (m)	4.09
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	500		
Radio del pozo de extracción (m)	0.25		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	200		
Caudal (m ³ /día)	1920		

Buttons: LIMPIAR CAMPOS, CARGAR EJEMPLO

Figura 5.20: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.

Aplicando el método de Thiem y empleando los datos ingresados se determina la curva de abatimiento:

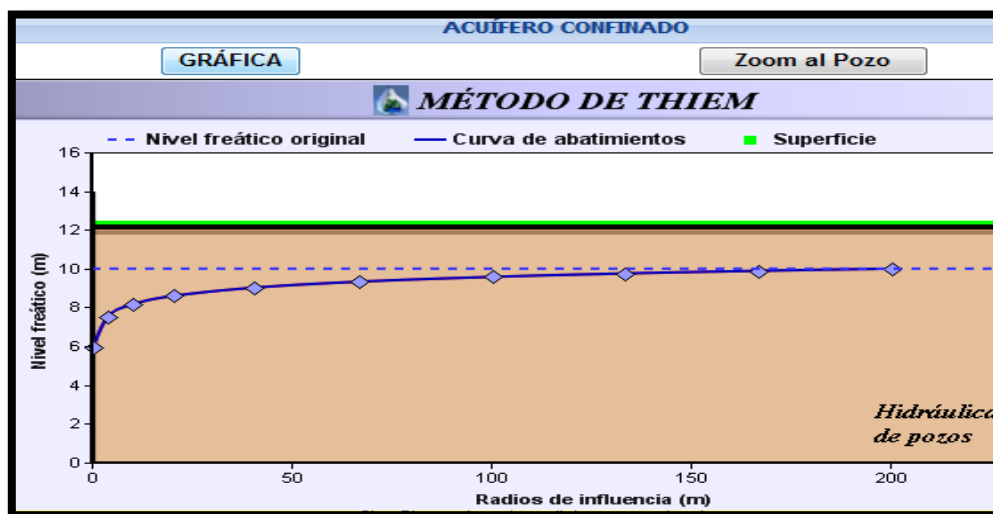


Figura 5.21: Curva de abatimientos mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.



Al realizar un acercamiento al pozo de extracción tenemos:

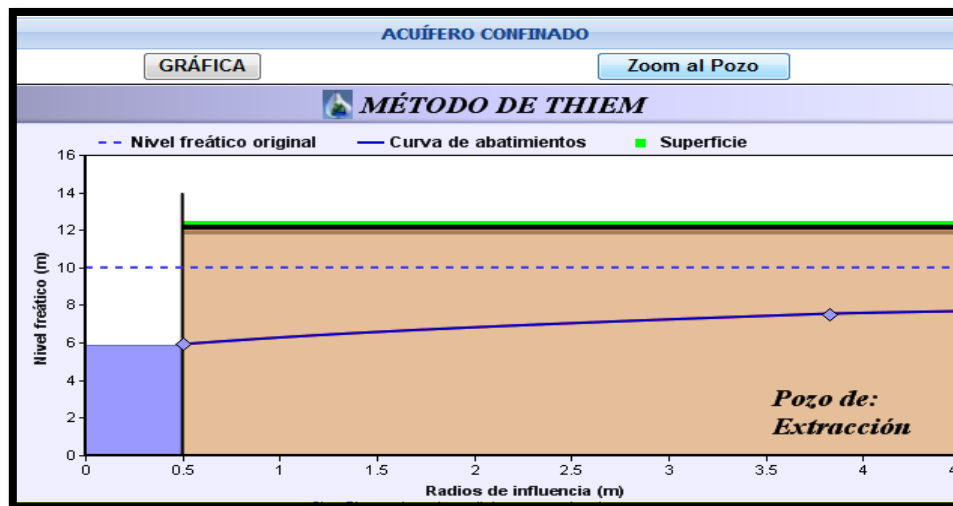


Figura 5.22: Acercamiento al pozo mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.

Para $r = 10$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="10"/>	Abatimiento (m)	<input type="text" value="1.83"/>
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="500"/>		
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="10"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="200"/>		<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>
Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="1920"/>		
	<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>		

Figura 5.23: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.

Para $r = 100$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="10"/>	Abatimiento (m)	<input type="text" value="0.42"/>
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="500"/>		
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="100"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="200"/>		<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>
Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="1920"/>		
	<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>		

Figura 5.24: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.



b) Abatimiento en el pozo con el método de Dupuit:

The screenshot shows the 'ACUÍFERO LIBRE' (Free Aquifer) section of the HydroVlab software. It includes a list of calculation options, an input data table, and a results section.

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS
Nivel freático original (m)	10	Abatimiento (m) 5.72
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	500	
Radio del pozo de extracción (m)	0.25	
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	200	
Caudal (m ³ /día)	1920	

Buttons: LIMPIAR CAMPOS, CARGAR EJEMPLO

Figura 5.25: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta Hidráulica de pozos del HydroVlab: Método de Dupuit.

Fuente: El Autor.

De acuerdo con los datos ingresados y aplicando el método de Dupuit se obtiene la curva de abatimiento:

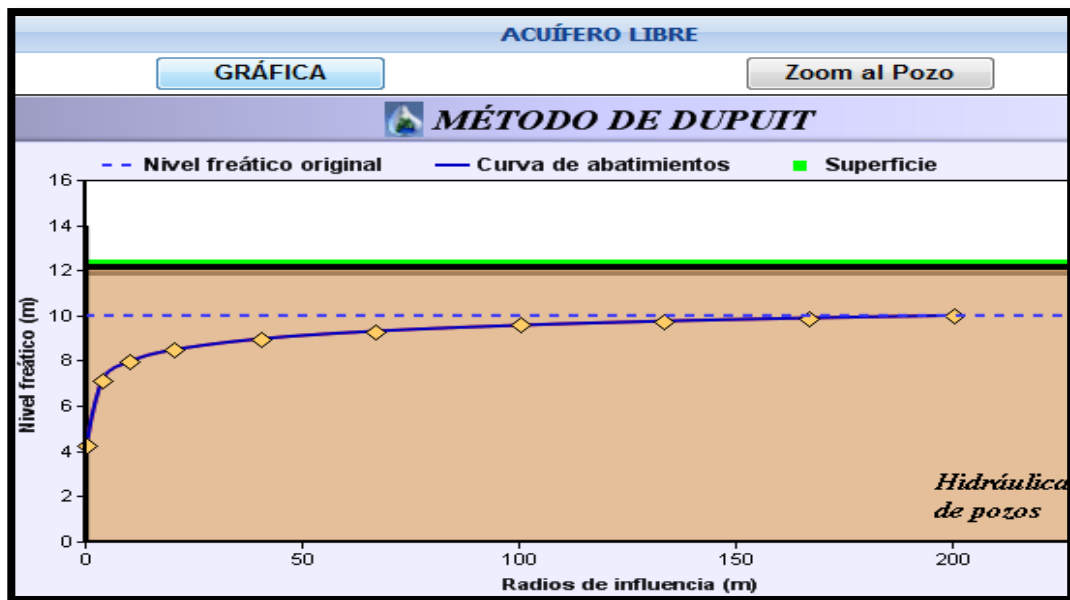


Figura 5.26: Curva de abatimientos mediante la herramienta Hidráulica de pozos del HydroVlab: Método de Dupuit.

Fuente: El Autor.



Al realizar un acercamiento al pozo de extracción tenemos:

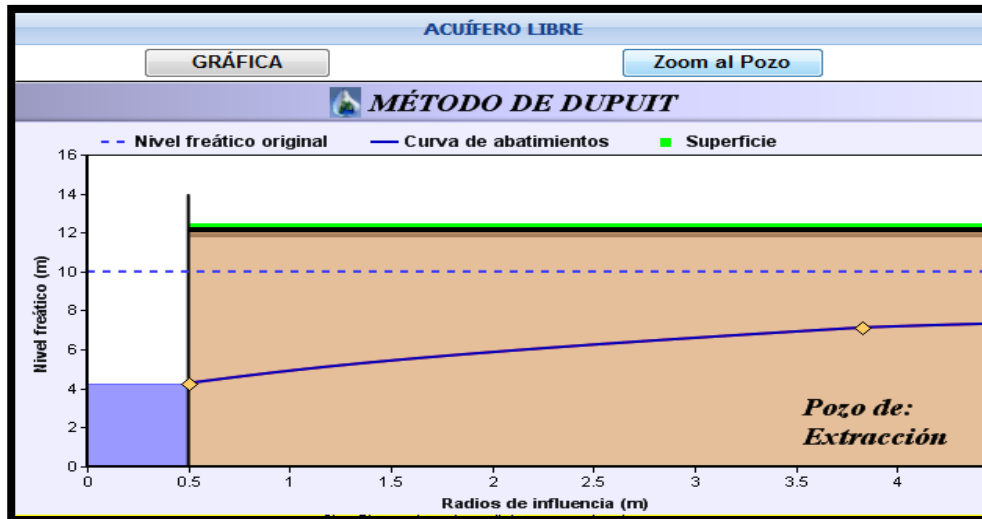


Figura 5.27: Acercamiento al pozo de mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.
Fuente: El Autor.

Para $r = 10$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="10"/>	Abatimiento (m)	<input type="text" value="2.04"/>
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="500"/>	<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>	
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="10"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="200"/>		
Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="1920"/>	<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>	

Figura 5.28: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.
Fuente: El Autor.

Para $r = 100$ m

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="10"/>	Abatimiento (m)	<input type="text" value="0.43"/>
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="500"/>	<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>	
Radio del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="100"/>		
Radio de influencia del pozo de extracción (m)	<input type="text" value="200"/>		
Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="1920"/>	<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>	

Figura 5.29: Determinación del abatimiento (z) mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.
Fuente: El Autor.



Distancia radial: r (m)	Abatimiento: z (m)	
	Método de Thiem	Método de Dupuit
$r_p = 0.25$	4.09 m	5.72 m
$r_1 = 10$	1.83 m	2.04 m
$r_2 = 100$	0.42 m	0.43 m

Tabla 5.7: Resumen de resultados obtenidos mediante aplicación de la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.

Adicionalmente la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab permite realizar el cálculo simultaneo de del abatimiento en el pozo así como los puntos de observación si es conocido el descenso en uno de ellos, además de presentar una representación gráfica del comportamiento del agua subterránea aplicando el método de Thiem y Dupuit como se muestra a continuación:

Determinar caudal de extracción (Q)
 Determinar abatimiento en el pozo de extracción (Z)
 Determinar coeficiente de transmisibilidad (T)
 Determinar el radio de influencia del pozo de extracción (R)

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	<input type="text" value="10"/>		
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="500"/>		
		Abatimiento (m)	
Descenso del nivel freático Pozo de Observación 2 (m)	<input type="text" value="0.42"/>	Z (m): Pozo de extracción	<input type="text" value="4.08"/>
Radio del pozo de extracción(m)	<input type="text" value="0.25"/>	Z (m): Pozo de observación 1	<input type="text" value="1.83"/>
Distancia al pozo de observación 1 (m)	<input type="text" value="10"/>		
Distancia al pozo de observación 2 (m)	<input type="text" value="100"/>	<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/>	
Caudal (m ³ /día)	<input type="text" value="1920"/>		
<input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>			

Figura 5.30: Determinación del abatimiento (z) en el pozo de extracción y en pozos de observación mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.



La representación gráfica con dos pozos de observación para el problema planteado se presenta como:

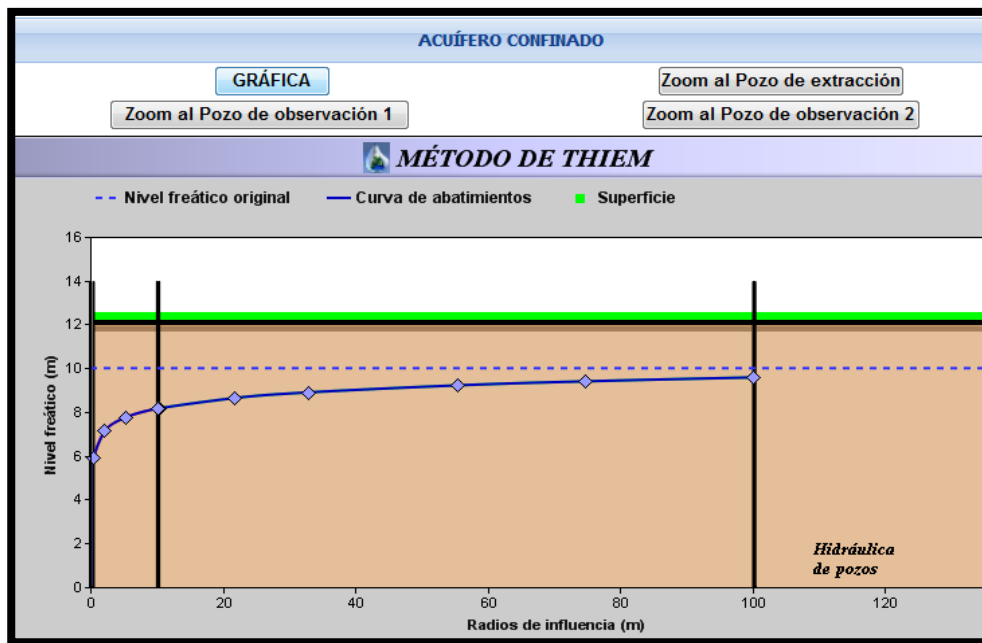


Figura 5.31: Hidráulica de pozos del HydroVlab: Curva de abatimientos considerando pozos de observación en acuífero confinado.

Fuente: El Autor.

Al realizar un acercamiento al pozo de extracción tenemos:

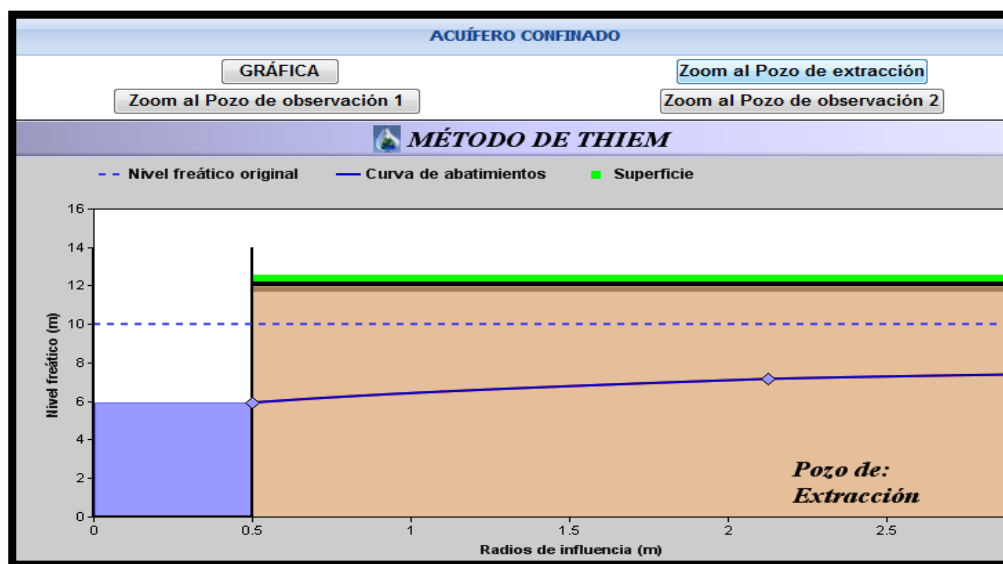


Figura 5.32: Acercamiento al pozo de extracción mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.



En el pozo de observación 1 colocado a 10 m tenemos:

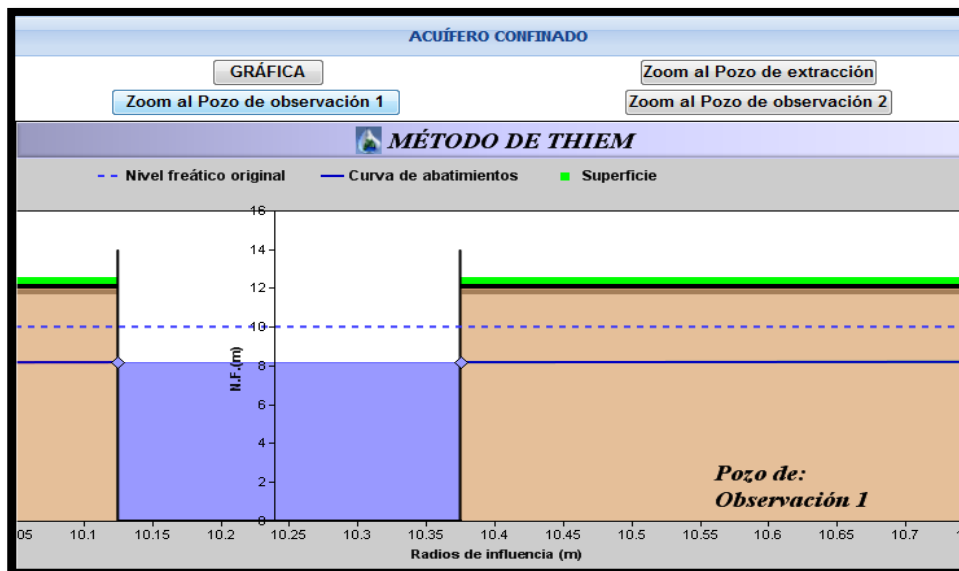


Figura 5.33: Acercamiento al pozo de observación 1 mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.

En el pozo de observación 2 colocado a 100 m tenemos:

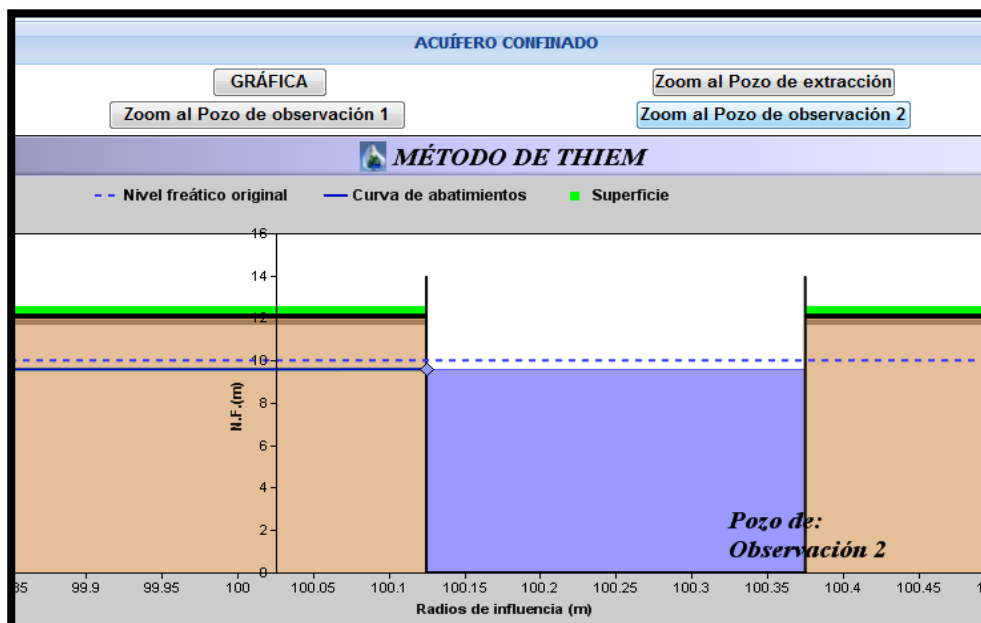


Figura 5.34: Acercamiento al pozo de observación 2 mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.



De manera similar la herramienta permite en acuífero libre aplicando el método de Dupuit obtener el comportamiento al colocar pozos de observación en las distancias radiales planteadas:

DATOS DE ENTRADA		RESULTADOS	
Nivel freático original (m)	10	Abatimiento (m)	
Coefficiente de transmisibilidad (m ² /día)	500	Z (m): Pozo de extracción	5.69
Descenso del nivel freático Pozo de Observación 2 (m)	0.42	Z (m): Pozo de observación 1	2.02
Radio del pozo de extracción(m)	0.25	CARGAR EJEMPLO	
Distancia al pozo de observación 1 (m)	10	LIMPIAR CAMPOS	
Distancia al pozo de observación 2 (m)	100		
Caudal (m ³ /día)	1920		

Figura 5.35: Determinación del abatimiento (z) en el pozo de extracción y en pozos de observación mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.

La representación gráfica de los datos ingresados muestra:

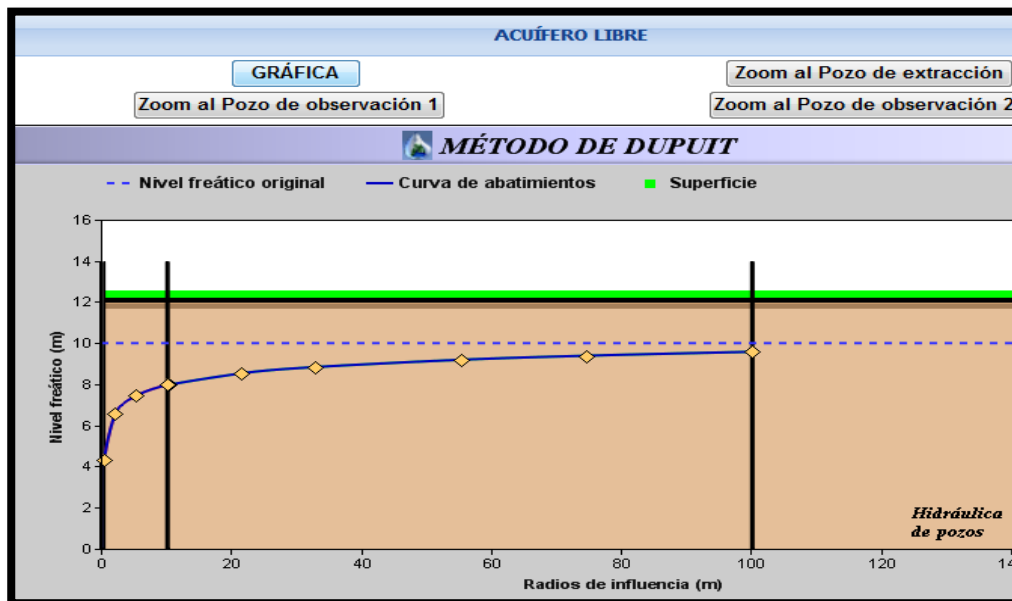


Figura 5.36: Hidráulica de pozos del HydroVlab: Curva de abatimientos considerando pozos de observación en acuífero libre.

Fuente: El Autor.



Al efectuar un acercamiento al pozo de extracción tenemos:

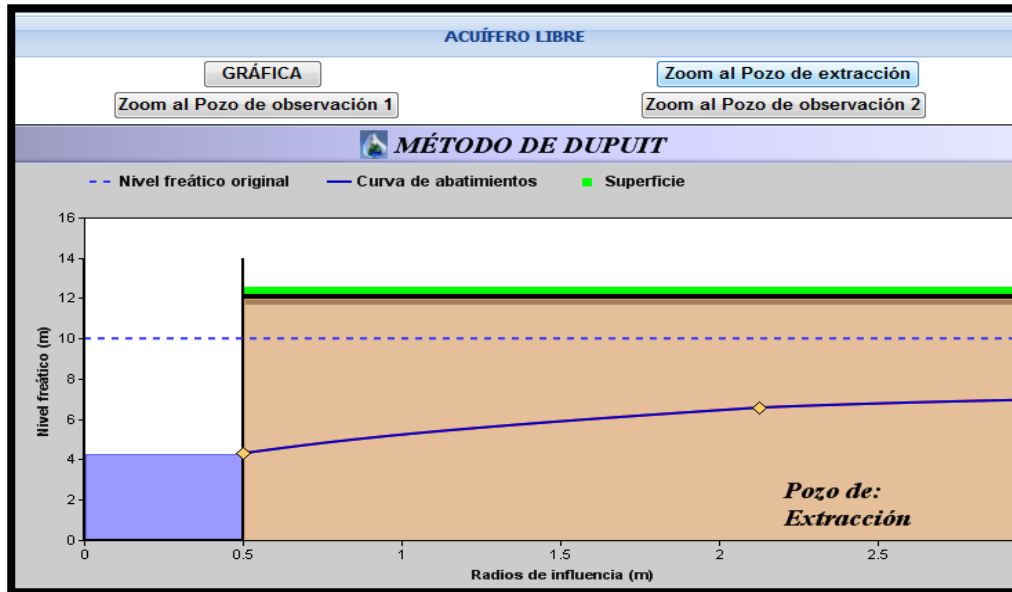


Figura 5.37: Acercamiento al pozo de extracción mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.

En el pozo de observación 1 colocado a 10 m tenemos:

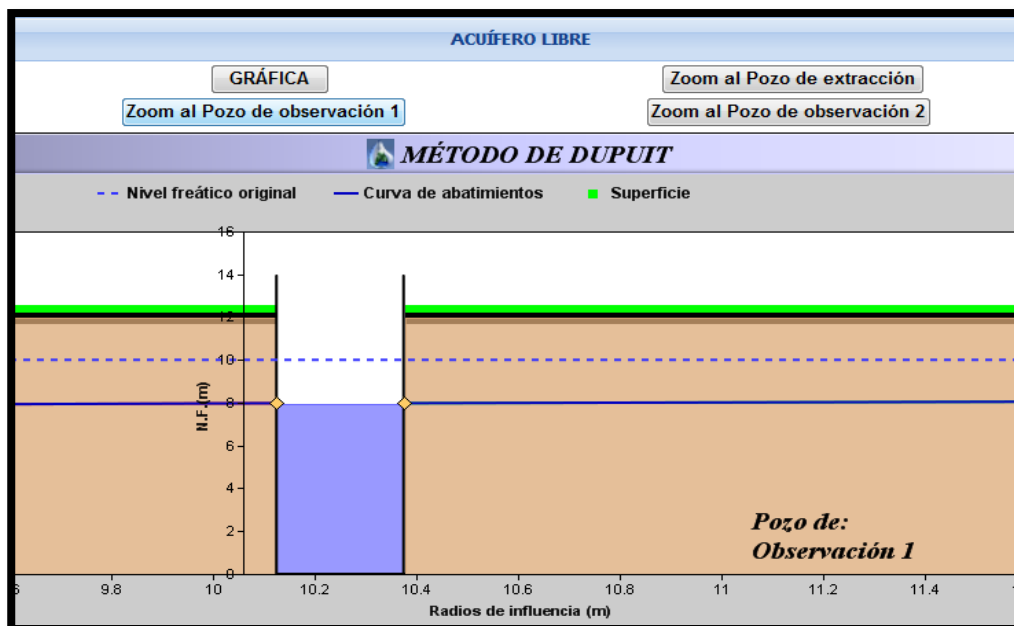


Figura 5.38: Acercamiento al pozo de observación 1 mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.

Fuente: El Autor.



En el pozo de observación 2 colocado a 100 m tenemos:

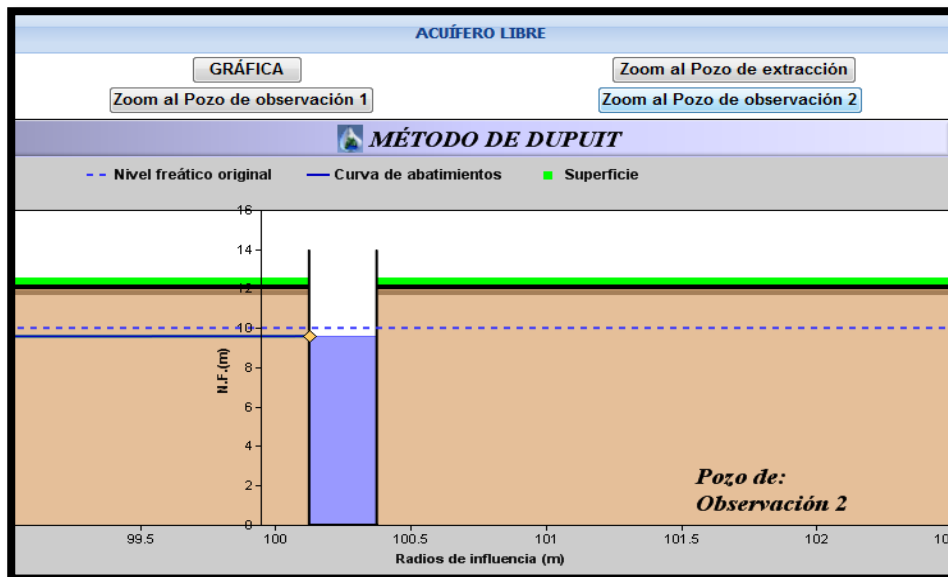


Figura 5.39: Acercamiento al pozo de observación 2 mediante la herramienta: Hidráulica de pozos del HydroVlab.
Fuente: El Autor.

5.4.3 Régimen no permanente: Método de Theis.

Aplicando la herramienta del HydroVlab para la resolución del ejemplo planteado por Monsalve Sáenz G. se tiene:

Figura 5.40: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab: Campos habilitados.
Fuente: El Autor.



DATOS DE ENTRADA	
Caudal de extracción (m ³ /día)	2880
Distancia radial (m)	115
<input type="button" value="CARGAR EJEMPLO"/> <input type="button" value="LIMPIAR CAMPOS"/>	

Figura 5.41: Determinación de coeficientes S y T mediante HydroVlab.
Fuente: El Autor.

El registro de abatimientos (Z) contra el tiempo (t) es cargado de la forma indicada en el capítulo 4, apartado 4.2.2:

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0.12	0.68			
0.13	0.85			
0.14	1.08			
0.14	1.42			
0.16	1.92			
0.16	2.92			
0.17	4.33			
0.17	5.00			
0.17	6.17			
0.17	7.17			
0.18	8.08			
0.18	11.08			
0.20	22.33			
0.20	24.83			
0.20	25.33			

Figura 5.42: Determinación de coeficientes S y T mediante el Hydrovlab: Ingreso de registro z vs t.
Fuente: El Autor.

Se determina el factor: r^2/t :

PRESENTAR DATOS CARGADOS			<input type="button" value="PRESENTAR"/>
Z (m)	t (horas)	r2/t (m2/día)	
0,11	1,9	167052,63	
0,12	2,1	151142,86	
0,15	2,4	132250,00	
0,17	2,9	109448,28	
0,20	3,7	85783,78	
0,24	4,9	64775,51	
0,32	7,3	43479,45	
0,43	9,8	32387,76	
0,49	12,2	26016,39	

Figura 5.43: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab: Factor r^2/t .
Fuente: El Autor.



PRESENTAR DATOS CARGADOS		PRESENTAR
Z (m)	t (horas)	r ² /t (m ² /día)
0,24	4,9	64775,51
0,32	7,3	43479,45
0,43	9,8	32387,76
0,49	12,2	26016,39
0,55	14,7	21591,84
0,59	16,3	19472,39
0,63	18,4	17250,00
0,67	21,0	15114,29
0,71	24,4	13008,20

Figura 5.44: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab: Factor r^2/t .
Fuente: El Autor.

Se genera las curvas de Theis:

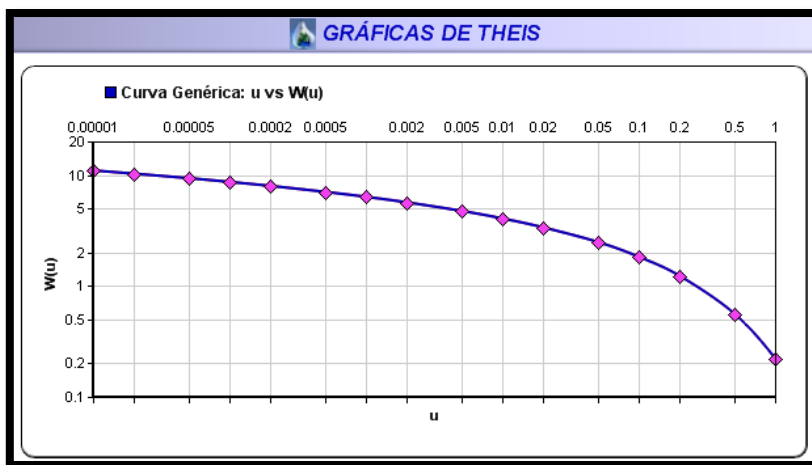


Figura 5.45: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab: Curva genérica de Theis.
Fuente: El Autor.

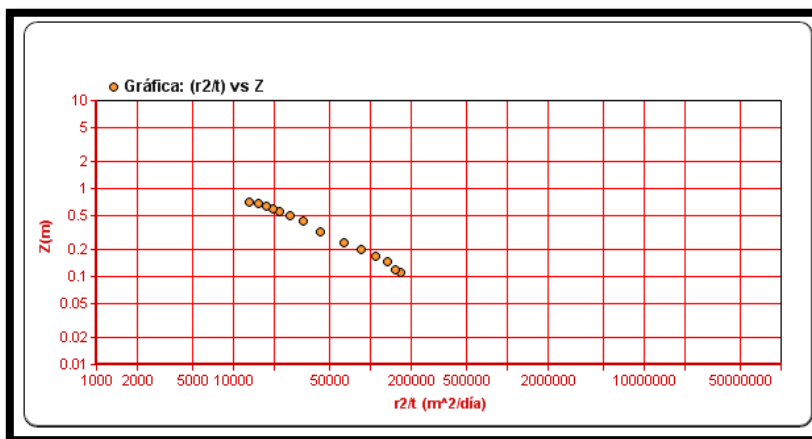


Figura 5.46: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab: Valores r^2/t vs z.
Fuente: El Autor.



Al realizar el proceso de superposición tenemos:

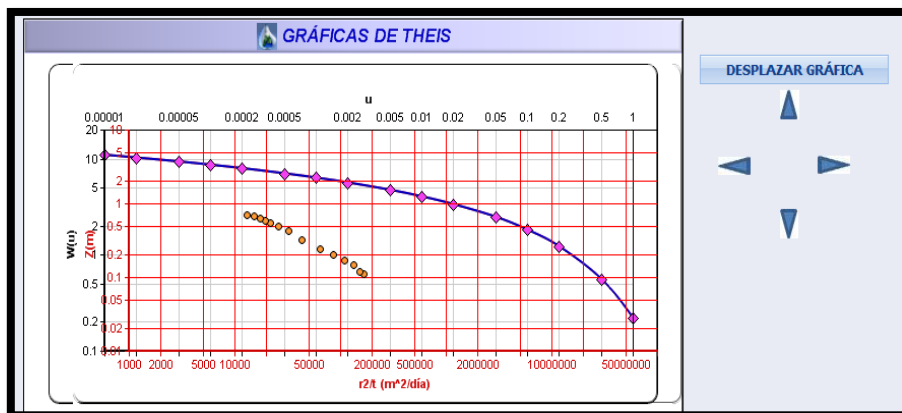


Figura 5.47: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab: Superposición de gráficas de Theis.

Fuente: El Autor.

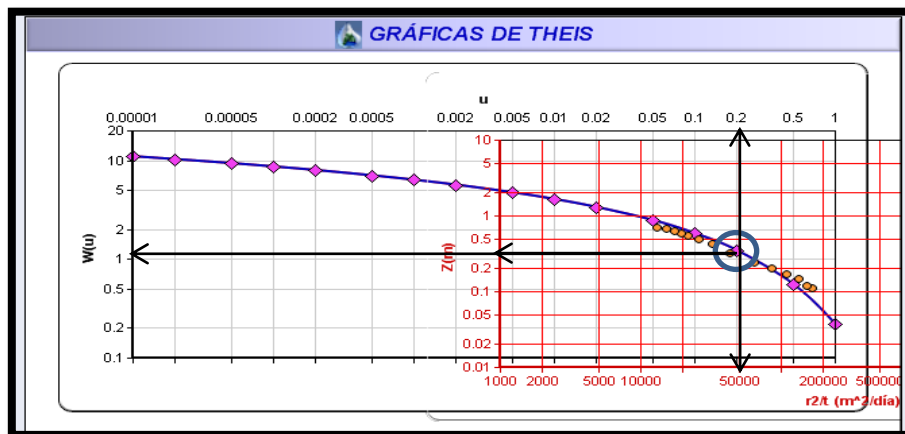


Figura 5.48: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab: Superposición de gráficas de Theis.

Fuente: El Autor.

Se ingresan los valores determinados en las gráficas y se procede a realizar el cálculo:

INGRESAR DATOS OBTENIDOS POR LA SUPERPOSICIÓN DE GRÁFICAS			
Factor: r^2/t (m ² /día)	<input type="text" value="50000"/>	Z (m)	<input type="text" value="0.32"/>
Factor : u (-)	<input type="text" value="0.25"/>	Función de pozo W(u) (-)	<input type="text" value="1.05"/>
RESULTADOS			
Coef. de transmisibilidad (m ² /día)	<input type="text" value="752.01"/>	Coef. de almacenamiento (-)	<input type="text" value="0.02"/>

Figura 5.49: Determinación de coeficientes S y T mediante el HydroVlab.

Fuente: El Autor.



5.5 Análisis de resultados

5.5.1 Régimen permanente: Método de Thiem

Los resultados obtenidos anteriormente producto de la aplicación de las consideraciones y herramientas mostradas en los capítulos anteriores se presentan en una síntesis en la siguiente tabla:

	MÉTODO DE THIEM		
	Custodio, E. y Lamas, M.	Microsoft Excel	Hidráulica de pozos-HydroVlab
Distancia radial (m)	Abatimiento (m)	Abatimiento (m)	Abatimiento (m)
$r_p = 0.25$	1.58	1.58	1.58
$r = 10$	0.88	0.88	0.88
$r = 100$	0.44	0.44	0.44
$r = 500$	0.13	0.13	0.13

Tabla 5.8: Resumen de resultados: Método de Thiem
Fuente: El Autor.

Para el problema planteado se puede observar que:

- ✓ La herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab permite obtener un valor bastante preciso al presentar los resultados con dos cifras significativas pues en comparación con los resultados obtenidos por Custodio E. y Lamas M., y con la herramienta Microsoft Excel se obtiene el mismo valor de abatimiento para cada distancia radial.
- ✓ La herramienta hidráulica de pozos brinda una opción adicional respecto a herramientas como Microsoft Excel, y es la posibilidad de representar gráficamente el comportamiento del agua subterránea en acuífero confinado en el que se ha implantado un pozo de extracción y de observación, ya que si bien en Excel se puede graficar no se puede



obtener con facilidad la representación del funcionamiento de este tipo de captaciones subterráneas en un misma gráfica como se mostró en los apartados 5.4 y 5.5.

5.5.2 Régimen permanente: Método de Thiem y método de Dupuit

De los procedimientos mostrados anteriormente tenemos:

MÉTODO DE THIEM			
	Custodio, E. y Lamas, M.	Microsoft Excel	Hidráulica de pozos-HydroVlab
Distancia radial (m)	Abatimiento (m)	Abatimiento (m)	Abatimiento (m)
$r_p = 0.25$	4.08	4.09	4.09
$r = 10$	1.82	1.83	1.83
$r = 100$	0.42	0.42	0.42

Tabla 5.9: Resumen de resultados: Método de Thiem.
Fuente: El Autor.

MÉTODO DE DUPUIT			
	Custodio, E. y Lamas, M.	Microsoft Excel	Hidráulica de pozos-HydroVlab
Distancia radial (m)	Abatimiento (m)	Abatimiento (m)	Abatimiento (m)
$r_p = 0.25$	5.68	5.72	5.72
$r = 10$	2.03	2.04	2.04
$r = 100$	0.43	0.43	0.43

Tabla 5.10: Resumen de resultados: Método de Dupuit.
Fuente: El Autor.



- ✓ En acuífero libre aplicando el método de Dupuit se presenta una ligera variación respecto al resultado presentado por Custodio, E. y Lamas, M. y se debe a que estos autores aplican:

$$h_2^2 - h_1^2 = 0,73 \left(\frac{Q}{K}\right) \log \left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.5)$$

La cual se presenta (Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea*, Volumen 1, Pág. 658) como una equivalencia de:

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi x K} \ln \left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.4)$$

Siendo ésta última ecuación la empleada por la aplicación hidráulica de pozos del HydroVlab, las dos ecuaciones fueron descritas previamente en el **Capítulo II**.

- ✓ Al comparar los resultados obtenidos mediante Microsoft Excel y la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab los resultados son semejantes al aplicar la misma ecuación, por lo cual se puede deducir que la precisión de la aplicación es adecuada.
- ✓ De igual forma la herramienta del HydroVlab permite obtener una gráfica muy detallada del comportamiento del agua subterránea para las características ingresadas por el usuario, como se mostró en los apartados anteriores (5.4 y 5.5).



5.5.3 Régimen no permanente: Método de Theis.

Parámetro	MÉTODO DE THEIS		
	Monsalve Sáenz G. (1995).	Microsoft Excel	Hidráulica de pozos-HydroVlab
T (m ² /día)	752.00	752.01	752.01
S (-)	0.015	0.02	0.02

Tabla 5.11: Resumen de resultados: Método de Theis.

Fuente: El Autor.

Al comparar los resultados obtenidos se establece que:

- ✓ La herramienta hidráulica de pozos facilita el manejo de cada una de las variables mediante un proceso metódico y de fácil manejo para la determinación de los coeficientes de almacenamiento (S) y de transmisibilidad (T), a diferencia del procedimiento manual presentado por Monsalve Sáenz G. (1995) el cual resulta un tanto tedioso por la cantidad de parámetros que se debe manejar alargando el tiempo de determinación.
- ✓ Desde el punto de vista de la precisión los resultados son semejantes a los obtenidos por Monsalve Sáenz G., y mediante la aplicación de Microsoft Excel; se debe considerar que la herramienta hidráulica de pozos presenta las respuestas con dos cifras significativas.

Se debe indicar que cuando son conocidos los coeficientes S y T y desea determinar el caudal de extracción (Q) o el abatimiento (Z) mediante el método de Theis, de acuerdo al procedimiento indicado en **Capítulo IV**, la herramienta hidráulica de pozos determina internamente la función de pozo **W (u)** mediante la ecuación 2.8 presentada anteriormente.



En la realización de este proyecto se pudo comprobar que para valores de u mayores a 1 ($u > 1$), para obtener gran precisión no basta con emplear la **ecuación 2.8** hasta el factorial de 3, ya que se obtiene un valor impreciso de $W(u)$ como se indica a continuación:

DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE POZO DE THEIS: $W(u)$			
	Microsoft Excel	Microsoft Excel	HydroVlab
	Factorial: 3!	Factorial: 169!	Factorial: 169!
u	$W(u)$	$W(u)$	$W(u)$
1.00	0.2284	0.2194	0.2194
2.00	0.1741	0.0489	0.0489
3.00	0.5742	0.0131	0.0131
4.00	1.5921	0.0038	0.0038
5.00	3.5078	0.0012	0.0012
6.00	6.6310	0.0004	0.0004
7.00	11.2824	0.0001	0.0001
8.00	17.7878	0.0001	0.0001
9.00	26.4756	0.0000	0.0000

Tabla 5.12: Comparación de valores de $W(u)$ de acuerdo a la precisión empleada.
Fuente: El Autor.

Debido a esto y con el objetivo de obtener resultados precisos la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab, aplica la ecuación 2.8 hasta el factorial de 169, como se puede apreciar en la tabla anterior obteniendo una precisión del 100% en comparación con los resultados obtenidos con Microsoft Excel.

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} - \frac{u^4}{4 \times 4!} \dots + \frac{u^{169}}{169 \times 169!} \tag{2.8}$$

La importancia de este procedimiento radica en que obtener de forma manual la función de pozo de Theis $W(u)$ y con ese grado de precisión, resulta un procedimiento muy extenso, incluso de realizar en Microsoft Excel; por lo que la herramienta hidráulica de pozos del HydroVlab facilita, en forma precisa, la determinación de estos parámetros.



Se aplica ésta serie hasta el factorial de 169 (169!), debido a que por definición (**Apartado 2.4**), esta serie termina con el factorial de un número impar y debido a que a partir de 171 es indeterminado su factorial, corresponde evaluar hasta donde la capacidad del software Microsoft Visual Studio.Net permite.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



6.1 Conclusiones

- a) Se han implantado seis herramientas de hidráulica de pozos en el HydroVlab para la determinación de: caudales de extracción, abatimientos, radios de influencia, curva de abatimientos y coeficientes característicos del acuífero S y T.
- b) Las herramientas de hidráulica de pozos del HydroVlab presentan un entorno amigable y de fácil manejo pues este se realiza siguiendo un procedimiento secuencial como se indicó en el capítulo IV.
- c) Las herramienta implementadas son adecuadas para la determinación de los parámetros de hidráulica de pozos pues presenta una precisión del 100% en comparación con los resultados presentados en la bibliografía empleada (Custodio, E. y Lamas, M. (2001), *Hidrología Subterránea, Volumen 1*; así como por Monsalve Sáenz G. (1995), *Hidrología En La Ingeniería*) y los resultados obtenidos mediante Microsoft Excel.
- d) En comparación con Microsoft Excel presenta ventajas en lo que respecta a la representación gráfica, pues estas se presentan de forma mucho más detallada y profesional al emplear la tecnología del ChartDirector conjuntamente con Microsoft Visual Studio.Net.
- e) Las gráficas que presenta la aplicación en forma detallada permiten a estudiantes y demás interesados comprender de forma mucho más rápida el comportamiento de la hidráulica de pozos tanto en acuífero confinados como en acuífero libre.
- f) La herramienta hidráulica de pozos del Hydrovlab facilita el manejo de la información y aumenta la precisión en la determinación de parámetros como S y T en los que por lo general el procedimiento de superposición de gráficas indicado en el capítulo 4 y 5 se lo realiza manualmente.



- g) Se reduce el tiempo de cálculo pues todo el procedimiento se encuentra automatizado mediante aplicación de Visual Studio.Net la cual es una herramienta empleada a nivel mundial por su efectividad en el campo de la programación.
- h) La accesibilidad de las herramientas es a nivel mundial al ser parte del laboratorio virtual de hidrología (HydroVlab).
- i) Los manuales de usuario de las herramientas de hidráulica de pozos se encuentran alojados en el HydroVlab y pueden ser descargados de **www.hydrovlab.utpl.edu.ec** entrando a la sección de simulación y dentro de esta en la categoría hidráulica de pozos.

6.2 Recomendaciones

- a) Para la correcta utilización de la herramientas así como una adecuada interpretación de los resultados se recomienda tener conocimientos previos de hidráulica de pozos los cuales se encuentran ampliamente explicados por Custodio, E. y Lamas, M. así como por Monsalve Sáenz G. y cuya comprensión facilitará el manejo de la aplicación implementada en el HydroVlab.
- b) Emplear como complemento de programación el lenguaje Java ya que esto facilitaría añadir elementos adicionales a las gráficas ya implementadas, como por ejemplo un zoom dinámico así como animaciones que muestren el movimiento del caudal extraído de cada formación acuífera.
- c) Leer el manual del usuario para dar un uso adecuado así como una correcta comprensión de los procedimientos empleados en cada una de las aplicaciones de hidráulica de pozos con las que cuenta el HydroVlab.



- d) Implementar herramientas para la simulación de la hidráulica de pozos en acuífero semiconfinado ya que las herramientas implantadas son para aplicaciones en acuífero confinado y en acuífero libre en régimen permanente y régimen no permanente.

- e) Se recomienda para efectos de seguridad comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación de las herramientas del HydroVlab con los obtenidos mediante el empleo de herramientas como Excel o con algún software para hidrología subterránea que se encuentre disponible en el mercado.



BIBLIOGRAFÍA



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ✓ Custodio, E. y Lamas, M. (2001) *Hidrología Subterránea, Volumen 1 y 2*; Omega: Barcelona, 4560 pp.
- ✓ Monsalve Sáenz G. (1995), *Hidrología En La Ingeniería*; Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería: Bogotá
- ✓ Donado Garzón Leonardo David, (1999), *Hidráulica Subterránea, capítulo 8: Hidráulica de pozos*, Bogotá-Colombia.
- ✓ Dingman, L., (2002), *Physical Hydrology*, Prentice Hall, New Jersey
- ✓ Jeffrey J. Tsay, (2004), *Visual Basic. NET Programming*; Editorial Person-Prentice Hall, New Jersey-Estados Unidos de Norteamérica.
- ✓ Steven Holzner, (2003), *Visual Basic. Net*; Editorial SAMS, Indiana- Estados Unidos de Norteamérica.
- ✓ G. P. Kruseman, Hidrogeólogo, International Agricultural Centre, N. A. De Ridder, Hidrogeólogo, *ANALYSIS AND EVALUATION OF PUMPING TEST DATA*, International Institute for Land Reclamation And Improvem Wageningen, Holanda, 1970, Traducción al castellano: Miguel Donezar, Ingeniero Agrónomo, *ANALISIS Y EVALUACION DE LOS DATOS DE ENSAYOS POR BOMBEO*, 1975.
- ✓ Advanced Software Engineering Limited, 2006, *.Net Edition Programmer's Manual-ChartDirector version 4.1*.

WEBLIOGRAFÍA:

- ✓ Universidad Técnica Particular de Loja, HYDROVLAB, 2011,
<http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec>
- ✓ Wikipedia, 2011
http://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio
<http://es.wikipedia.org/wiki/ASP.NET>
- ✓ Es-ASP.net, 2011
<http://www.es-asp.net/tutoriales-asp-net/tutorial-5312-5313/que-es-el-asp-net-ajax-control-toolkit.aspx>