

TM  
Z6834  
.C5  
FIC  
1985  
R5

TM  
Z6834  
.C5  
FIC  
1985  
R5



1020072400

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Aplicación de un modelo numérico para simular  
el comportamiento hidráulico del acuífero que  
sirve como fuente de abastecimiento a la  
Central Nucleoeléctrica Laguna Verde

T E S I S

Que para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS  
en Hidrología Subterránea presenta

ALFONSO

RIVERA

BUSTOS

Aprobado por:

-----  
Prof. Victor M. Aguilera R.

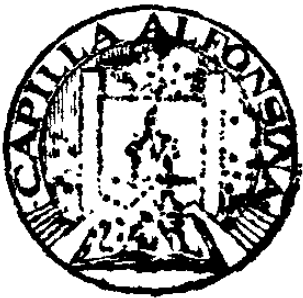
Monterrey, N.L. Noviembre 1985

APLICACION DE UN MODELO NUMERICO  
PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO  
HIDRAULICO DEL ACUIFERO QUE SIRVE  
COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO A  
LA CENTRAL NUCLEOELECTRICA LAGUNA  
VERDE

ALFONSO RIVERA BUSTOS



TM  
Z 6834  
.C5  
FIC  
1985  
R5



137809

Con mucho cariño y respeto a mis padres

**ALEONSO Y MARGARITA**

por su ejemplo de tenacidad en el trabajo

Con mucho amor y agradecimiento a mi esposa

**CHRIS**

quien siempre ha confiado en mí y es una  
constante fuente de motivación

Y con mucho amor y esperanza a mi querido hijo

**ABRAHAM**

motivo principal de mis desvelos. En espera de  
que su mundo haga compatibles la disciplina, la  
concentración y la paciencia, en el desarrollo  
del maravilloso arte de la ciencia

## AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a las que deseo agradecer que de alguna manera hayan contribuido para que yo pudiera elaborar y terminar este trabajo a lo largo de todas sus etapas. Extiendo mi gratitud al Prof. Victor M. Aguilera quien revisó la tesis y colaboró en mucho con sus comentarios a darle fundamento científico y estilo; agradezco a mis profesores de maestría Dr. Leopoldo Rodarte e Ing. Rubén Chavez Guillén quienes despertaron en mí una inmensa curiosidad por la maravillosa ciencia de la Geohidrología. Estoy también muy agradecido con el Ing David Fernández Camargo quien como director de los estudios de postgrado durante mi estancia en la UANL, me apoyó en todo momento. No menos valiosa para mí ha sido la ayuda proporcionada por el actual director de los estudios de postgrado Ing. Anastacio Vázquez.

Agradezco a la Comisión Federal de Electricidad por haber proporcionado parte de los datos que se analizan en esta tesis; y al Banco de México por haberme otorgado la beca con la que pude realizar mis estudios de maestría.

Mi principal compromiso moral lo tengo con el Instituto de Investigaciones Eléctricas por haberme permitido utilizar sus instalaciones, su sistema de cómputo, el tiempo de CPU que fué necesario para las simulaciones y otras facilidades de tipo administrativo. En lo particular agradezco al Dr. Pablo Mulás por haberme permitido el uso de esas instalaciones y por su interés mostrado por el desarrollo de este trabajo.

A mis colegas del Instituto, en particular a los Doctores Francisco Vidal y Victor Vidal, les estoy profundamente agradecido por su apoyo desinteresado y ambiente propicio que me brindaron al darme la oportunidad de utilizar parte de mi tiempo de trabajo de apoyo a su propia causa, para poder terminar esta tesis.

De igual forma quiero agradecer a los Ingenieros Lorenzo Zambrano y Ramiro Anaya así como al Físico José María Perez por sus consejos y ayuda proporcionada en aspectos de programación y cómputo.

Finalmente pero muy especialmente, agradezco a mi esposa Marie-Christine por su paciencia, comprensión, apoyo moral y aliento que siempre me brindó y que eran tan necesarios para mí, sobretodo en las etapas más estenuantes de este trabajo, sin los cuales simplemente no hubiera podido seguir adelante.



## RESUMEN

La modelación del agua subterránea - tanto por métodos numéricos como analíticos - es una herramienta que ayuda a analizar muchos y muy variados problemas del agua subterránea y que en muchos de los casos, es útil en la toma de decisiones para la planeación del manejo racional de este recurso tan valioso.

En este trabajo se evalúa un acuífero en condiciones freáticas adyacente al sitio de la construcción de la Central Nuclearéctrica Laguna Verde en las costas del estado de Veracruz, partiendo del análisis de datos disponibles y de la obtención en el campo de parámetros geohidrológicos ya sea por medición directa o por métodos analíticos; asimismo, a partir del cálculo e interpretación de los resultados se forma un modelo conceptual del funcionamiento hidráulico del sistema acuífero y se implementa un modelo de flujo subsuperficial con solución numérica por diferencias finitas utilizando para ello una computadora digital.

Se hace énfasis en el desarrollo de un modelo conceptual previo a la implementación de cualquier modelo matemático a fin de tener un entendimiento, lo más detallado posible, del sistema acuífero en sus respuesta a tensiones tanto naturales como inducidas (v.gr. recarga y descarga natural y abatimiento de los niveles piezométricos como consecuencia del bombeo).

Se da peso a la investigación de campo tendiente a definir el sistema físico que describe al tipo de acuífero. Se plantea la necesidad de planear racionalmente el uso del recurso, de simular la recarga del acuífero a través de un río influente, y de predecir el decaimiento de la carga hidráulica para varios arreglos de extracción.

Este trabajo incluye la descripción de modelos de agua subterránea; para ello, se realizó una investigación literaria exhaustiva, revisando algunos modelos existentes, analizando su uso y las limitaciones y fuentes de error en la modelación.

El modelo numérico aplicado es calibrado primeramente, mediante la comparación con una solución analítica para condiciones infinitas en acuífero sin fronteras.

El modelo identifica la recarga natural del acuífero por un río influente, misma que sirve para validar el modelo en un intervalo de tiempo con datos conocidos. Finalmente el modelo simula los abatimientos provocados por el bombeo para diferentes tasas de extracción.

La finalidad de este tipo de trabajo, a juicio del autor, es la de presentar al modelo en un formato tal que sirva como argumento importante en quienes deban tomar decisiones para la planificación del acuífero como recurso de agua de abastecimiento.

# C O N T E N I D O

	<u>Página</u>
Resumen	v
Prefacio	xiv
1.0 INTRODUCCION .....	1
1.1 Objetivos y enfoque del estudio	
1.2 Organización de este trabajo	
2.0 REVISION DE TRABAJOS PREVIOS.....	8
3.0 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.....	13
3.1 Geología regional	
3.1.1 Geología local	
3.2 Hidrología superficial	
3.3 Hidrología subterránea	
4.0 INVESTIGACION PARA DEFINIR EL SISTEMA FISICO QUE DESCRIBE EL TIPO DE ACUIFERO .....	49
4.1 Perforación de barrenos exploratorios e instalación de piezómetros	
4.2 Pruebas de permeabilidad "Lefranc"	
4.3 Perforación de pozos de extracción y equipamiento de moto-bomba	
4.4 Programa de medición de niveles piezometricos	
5.0 MODELO NUMERICO DE PREDICCIÓN .....	92
5.1 Objetivos	
5.1.1 Comparar soluciones analíticas con soluciones numéricas	
5.1.2 Simular la recarga del acuífero a través del río	
5.1.3 Predecir el decaimiento de la carga hidráulica para varios gastos de extracción	
6.0 DESCRIPCION DE MODELOS DE AGUA SUBTERRANEA.....	98
6.1 Tipos de modelos	
6.2 Revisión de algunos modelos existentes	
6.3 Usos de los modelos	
6.4 Limitaciones y fuentes de error en la modelación	
7.0 DESCRIPCION DEL MODELO SELECCIONADO.....	134

8.0	ESTIMACION DE LOS PARAMETROS DE ENTRADA AL MODELO.....	155
8.1	Diseño de la malla de diferencias finitas	
8.2	Estimación de los coeficientes de Transmisibilidad (T) y almacenamiento (S)	
8.2.1	Metodo gráfico de Theis	
8.2.2	Metodo gráfico modificado de Jacob	
8.2.3	Programa CALTS de calculadora manual TI-59	
8.2.4	Metodo analítico para la determinación del coeficiente de almacenamiento	
8.3	Estimación del factor de almacenaje adecuado al modelo	
8.4	Estimación de las cargas hidráulicas	
8.5	Calculo de la recarga del acuífero	
8.5.1	Recarga inducida por el río	
8.6	Gastos de extracción en bombeo variable	
9.0	CORRIDAS DE SIMULACION DEL MODELO .....	209
9.1	Condiciones infinitas-acuífero sin fronteras	
9.1.1	Comparación de solución numérica con solución analítica	
9.2	Simulación de la recarga inducida por el río	
9.2.1	Validación del modelo, comparando la recarga real medida, con la simulada	
9.3	Simulación del decaimiento de la carga hidráulica con bombeo variable-acuífero con fronteras	
10.0	CONCLUSIONES .....	240
	Referencias .....	244
	Anexos	

## LISTA DE TABLAS

<u>TABLA</u>	<u>PAGINA</u>
4.1	Características del equipo de bombeo.....78
6.1	Características de algunos modelos de agua subterránea .....111
6.2	Resúmen de reportes de modelos recopilados.....113
6.3	Perspectiva de los modelos investigados.....115
6.4	Requerimientos de datos que deben ser considerados para un modelo predictivo .....122
7.1	Programa básico de simulación de acuífero.....147
8.1	Transmisibilidades obtenidas por varios métodos.....176
8.2	Programa <<CALTS>> de calculadora manual TI-59 para el cálculo de los coeficientes de Transmisibilidad (T) y Almacenamiento (S) .....183
9.1	Parámetros de entrada (INPUT) al modelo para corridas de validación .....211
9.2	Comparación de valores numéricos y analíticos para tiempo-abatimiento, a una distancia de 100 mts .....218
9.3	Comparación de valores numéricos y analíticos para tiempo-abatimiento, a una distancia de 500 mts .....219
9.4	Comparación de valores numéricos y analíticos para distancia-abatimiento, para un tiempo de 1 día .....220
9.5	Comparación de valores numéricos y analíticos para distancia-abatimiento, para un tiempo de 5 días .....221
9.6	Comparación de valores numéricos y analíticos para distancia-abatimiento, para un tiempo de 10 días .....222
9.7	Comparación de parámetros hidrológicos .....224

## LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>	<u>PAGINA</u>
3.1	Localización geográfica del Sitio de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde .....14
3.2	Provincias Fisiográficas .....16
3.3	Geología y secciones del área Laguna Verde ....22
3.4	Cuencas hidrológicas .....27
3.5	Hidrograma del Río Barranca Hernández .....32
3.6	Hidrograma del Río El Viejón .....32
3.7-1	Hietogramas .....35
3.7-2	Hietogramas .....36
3.7-3	Hietogramas .....37
3.7-4	Hietogramas .....38
3.8	Hidrogeología Local .....42
3.9	Hidrografos de algunos piezómetros seleccionados .....45
3.10	Modelo geométrico geohidrológico del acuífero "El Viejón" .....48
4.1-1	Corte litológico B-16 .....52
4.1-2	Corte litológico B-17 .....53
4.1-3	Corte litológico B-18 .....54
4.1-4	Corte litológico B-I .....55
4.1-5	Corte litológico B-II .....56
4.1-6	Corte litológico B-III .....57

4.1-7	Corte litológico B-IV .....	58
4.1-8	Corte litológico B-V .....	59
4.1-9	Corte litológico B-VI .....	60
4.2-1	Corte litológico B-VII .....	62
4.2-2	Corte litológico B-VIII .....	63
4.2-3	Corte litológico B-IX .....	64
4.2-4	Corte litológico B-X .....	65
4.2-5	Corte litológico B-XI .....	66
4.2-6	Piezómetros .....	67
4.3	Sección litológica .....	68
4.4	Sección Litológica .....	69
4.5	Dispositivo para pruebas "Lefranc" .....	70
4.6	Croquis de terminación del Pozo A .....	72
4.7	Croquis de terminación del Pozo B .....	73
4.8	Croquis de terminación del Pozo C .....	74
4.9	Croquis de terminación del Pozo D .....	76
4.10	Croquis de terminación del Pozo E .....	77
4.11	Superficie Equipotencial-Junio de 1981 .....	81
4.12	Hidrógrafos de Piezómetros B16, B17 y B18 .....	84
4.13	Hidrógrafos de Piezómetros BI, BII y B5 .....	85
4.14	Hidrógrafos de Piezómetros BIII y BIX .....	86
4.15	Hidrógrafos de Piezómetros BVII, BVIII y BX .....	87
4.16	Superficie Equipotencial-Junio de 1983 .....	90
6.1	Diagrama lógico para desarrollar un modelo matemático .....	100
6.2	Tipos de modelos de agua subterránea y sus aplicaciones más comunes .....	104

6.3	Distribución de los modelos de predicción .....	117
6.4	Diagrama que muestra el uso del modelo .....	119
6.5	Ejemplos de mallas de diferencias finitas y del elemento finito .....	120
7.1	Elementos de una malla de diferencias finitas.....	146
7.2	Volúmenes vectoriales para los términos de tasas de flujo de nodo-a-nodo .....	143
7.3	Volúmenes vectoriales para los términos de tasas de flujo $Q_5$ , $Q_6$ y $Q_n$ .....	144
7.4	Diagrama de flujo para el programa básico de simulación de acuífero .....	152
7.5	Sección generalizada del acuífero para los parámetros del programa básico de simulación .....	153
8.1	Malla de diferencias finitas con nodos centrados en la red y con espaciamiento variable para modelar el acuífero El Viejón .....	158
8.2	Curva tipo de Theis .....	165
8.3	Curva de campo log-log (Theis) .....	167
8.4	Curva de campo log-log (Theis) .....	168
8.5	Curva de campo log-log (Theis) .....	169
8.6	Curva de campo log-log (Theis) .....	170
8.7	Curva de campo semi-log (Jacob) .....	173
8.8	Curva de campo semi-log (Jacob) .....	174
8.9	Curva de campo semi-log (Jacob) .....	175
8.10	Curva ejemplificativa típica de un acuífero libre con rendimiento retardado .....	178
8.11	Distribución de las Transmisibilidades usadas en el modelo .....	187
8.12	Perfil de carga piezométrica (sección litológica) .....	190
8.13	Perfil de carga piezométrica (sección	

	litológica) .....	191
8.14	Perfil de carga piezométrica (sección litológica) .....	192
8.15	Distribución de los Factores de Almacenaje usados en el modelo .....	195
8.16	Respuesta de los niveles estáticos al escurrimiento del río y a la infiltración directa causada por la precipitación pluvial .....	197
8.17	Cargas hidráulicas (h) como condiciones iniciales para simular la recarga inducida por el río .....	199
8.18	Parámetros del programa básico de simulación con infiltración inducida y curva de tasa-infiltración .....	201
8.19	Ejemplo de los vectores volumétricos del lecho del río .....	204
8.20	Arreglo de tasas de bombeo variable .....	207
9.1	Curva tiempo-abatimiento. Analítica vs numérica para r=100 m .....	213
9.2	Curva tiempo-abatimiento. Analítica vs numérica para r=500 m .....	214
9.3	Curva distancia-abatimiento. Analítica vs numérica para t=1 día .....	215
9.4	Curva distancia-abatimiento. Analítica vs numérica para t=5 días .....	216
9.5	Curva distancia abatimiento. Analítica vs numérica para t=10 días .....	217
9.6	Discretización del río "El Viejón" .....	227
9.7	Comparación de las cargas piezométricas del acuífero El Viejón recargado por el río, medidas y simuladas por el modelo para el periodo Junio 15 - Julio 15 de 1981 .....	228
9.8	Abatimiento de la superficie freática del acuífero "El Viejón" generada por el modelo, después de 1 día de bombeo (a) y de 5 días de bombeo (b) de los pozos A, B y C .....	233
9.9	Abatimiento de la superficie freática del acuífero	



	"El Viejón" generada por el modelo, despues de 10 días de bombeo (a) y de 30 días de bombeo (b) de los pozos A, B y C .....	234
9.10	Abatimiento de la superficie freática del acuífero "El Viejón" generada por el modelo, despues de 25 días de bombeo de los pozos B, D y E (a); y de los pozos A, B, C, D y E (b) .....	236
9.11	Abatimiento de la superficie freática del acuífero "El Viejón" generada por el modelo despues, de 30 días de bombeo ininterrumpido de los pozos A, B, C, D y E .....	238

## PREFACIO

La modelación del agua subterránea es un área de investigación actual. Como tal, sus nuevas técnicas y aplicaciones están en constante evolución. Adicionalmente a la influencia causada por la necesidad continua de solucionar problemas, los recientes desarrollos están también influenciados por la evolución del estado del modelo y de las capacidades de la computadora.

Un estímulo importante para el desarrollo de los modelos numéricos iniciales usados para problemas de agua subterránea era la disponibilidad de computadoras eficientes. Desde entonces, la tecnología de las computadoras ha continuado mejorando rápidamente. Esto es quizá más evidente en las calculadoras manuales programables de hoy día. Dos desarrollos importantes que están influenciando las técnicas de modelación e investigación son la disponibilidad de mini-computadoras eficientes y económicas, y los procesadores de vectores. Adicionalmente a ello, existen también una gran variedad de los llamados "periféricos" como impresoras de color, graficadores tridimensionales, etc.

La modelación del agua subterránea llega en ocasiones a adquirir un carácter "místico" ya que de por sí, aquella es difícil de comprender, pues está fuera de nuestra vista y en ocasiones de nuestro alcance. Al obtener una serie de números en la salida de la computadora y graficarlos a colores en tres dimensiones con lo más avanzado de los dispositivos actuales, es fácil perder, por la emoción, el objetivo original y las hipótesis en que se basó el modelo.

Por otro lado, los códigos de computadoras y las técnicas de soluciones numéricas de los modelos son generalmente solo del dominio del experto en análisis numérico y programación computarizada. Un hidrólogo bien entrenado y quien finalmente usará el modelo para el estudio de un acuífero, no necesariamente requiere ser un experto en ciencias computacionales para utilizar los modelos en forma efectiva y práctica.

Es importante entender que los modelos son una herramienta que ayuda a comprender y a analizar un sistema acuífero y a solucionar algún problema específico; y que los modelos tienen limitaciones y algunas fuentes de error.

Este trabajo es un intento por presentar de una manera sistemática el análisis del comportamiento hidráulico de un acuífero partiendo de la recopilación de datos de campo como parte prioritaria; de la formación de un modelo conceptual del comportamiento del acuífero; y, una vez revisados los modelos analíticos y numéricos existentes, de aplicar uno de ellos como herramienta, a la solución de problemas específicos.

Hago énfasis en que en general el uso del modelo debe estar combinado con un juicio científico educado, basado en observaciones de campo. Considero que este tipo de herramienta debe estar precedida de suficiente conceptualización geohidrológica, tal que ayude a asegurar que el usuario del modelo esté conciente de sus limitaciones así como de las complejidades geológicas de la formación bajo estudio a fin de evitar errores de "cajas negras" adonde aún y cuando funcionen, nos arrojen información que esté muy alejada de la realidad.

Al escribir este trabajo he tenido en mente la utilidad que éste pueda tener además de satisfacer los requisitos inherentes a una tesis; y mi deseo es dejar implementada y bien documentada esta herramienta a fin de que pueda ayudar en alguna toma de decisión para resolver un problema, sea este de ingeniería o bien, meramente científico.