

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE AGRONOMIA
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**SIMULACION DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA
EN UN MEDIO FRACTURADO EN CALIZAS**

POR

JAVIER DE JESUS CORTES BRACHO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO**

MARIN, N. L., MEXICO

FEBRERO DE 1999

TD
GB1032
.C6
C677
1999
c.1



1080110324



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA

SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**SIMULACION DEL FLUJO DE AGUA
SUBTERRANEA EN UN MEDIO FRACTURADO EN
CALIZAS**

POR

JAVIER DE JESUS CORTES BRACHO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO**

MARIN, N. L. MEXICO

FEBRERO DE 1999





TD

GB 1032

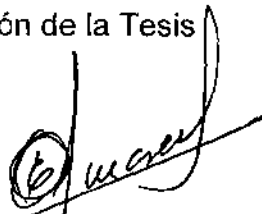
. C6

C677

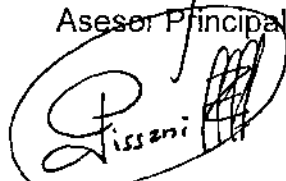
1999

SIMULACION DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA EN UN MEDIO FRACTURADO EN CALIZAS

Aprobación de la Tesis



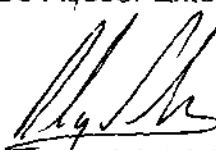
Ph. D. Emilio Olivares Sáenz
Asesor Principal



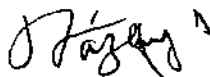
Dr. Juan Francisco Pissani Zuñiga
Co-Asesor



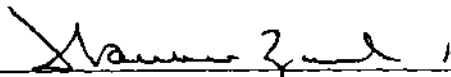
Dr. Héctor de León Gómez
Co-Asesor Externo



Dr. Rolando Cavazos Cadena
Co-Asesor Externo



Ph. D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado
Co-Asesor



Ph. D. Francisco Zavala García
Subdirector de Estudios de Postgrado de la FAUANL

Marín, N. L., México

Febrero de 1999

**“Las Cosas que uno ve y palpa
son copias imperfectas
de las formas puras
estudiadas en matemáticas y filosofía”**

Sócrates

DEDICATORIA

A Dios Padre

Por darme vida y salud que me hacen estar en este momento de mi vida.

A mi Esposa Luz María, mi Lucero

Por su apoyo incondicional, por su estímulo constante, por su vida entregada a mis hijos y a mi, solo puedo decirte con gran amor y cariño, GRACIAS POR TODO.

A mis Hijos: Sergio Hernán, Javier Matías, Norma, Angélica Elizabeth y Javier de Jesús
Por su cariño y ternura; Hijos, disculpen mis irritaciones y principalmente el tiempo que deje de dedicarles, los quiero mucho.

A mis Padres: Sr. Efraín Cortés Yeverino y Sra. María del Refugio Bracho de Cortés
Por su amor y cariño a nuestra familia.

A mi Hermana María del Rosario

Con admiración y respeto por la atención que ha tenido hacia nuestros Padres.

Al recuerdo invorable de mi Hermana Juana Antonieta

Tony, quisiera que estuvieras aquí...

AGRADECIMIENTOS

A La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por permitirme una superación más en mi vida.

A La Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por recibirme en su Postgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo con la Beca Crédito otorgada para obtener el grado de Doctor en Ciencias.

A La Comisión Nacional del Agua (CNA) Gerencia Estatal de Coahuila a cargo del Ing. Oscar Gutiérrez Santana, por permitirme el acceso a la información que respalda esta tesis.

Al Ing. Arturo Monroy Nieto, Subgerente Técnico de la CNA en Coahuila, mil gracias por su amistad, apoyo, consejos y estímulo, que durante el desarrollo de mi programa doctoral tuvo para mi persona.

Al Dr. Emilio Olivares Sáenz, por permitirme ser su amigo, por la dirección de la presente investigación y por sus consejos en el ámbito de programación por objetos, que me permitieron realizar software disponible a usuarios.

Al Dr. Juan Francisco Pissani Zuñiga, por su asesoría, no solo de la presente investigación, sino de muchas actividades que he emprendido en mi vida profesional.

Al Dr. Héctor de León Gómez, por la entusiasta participación en el presente trabajo la cual manifestó en todo momento. Gracias por su amistad.

Al Dr. Rolando Cavazos Cadena, por que desde mi Maestría y hasta la fecha, inspiró en mi una disciplina en la aplicación de la Estadística Matemática.

Al Dr. Rigoberto Vázquez Alvarado, por la revisión del presente escrito.

A los Drs. Rigoberto González y Francisco Zavala, que en sus funciones de Subdirector de Postgrado en la FAUANL, me brindó cada uno de ellos su apoyo incondicional.

Al Dr. Ricardo D. Valdez Cepeda, Primer Doctor en Ciencias de la FAUANL, gracias por su amistad y por sus comentarios técnicos a esta investigación.

Al Ing. Jorge del Angel Vargas y su Sra. Esposa, quienes fueron un apoyo moral constante para mi y mi familia.

A los Drs. y Maestros: Ricardo Hirata, del Departamento de Geología Económica del Instituto de Geociencias de la Universidad de Sao Paulo, Brasil; Emilio Custodio Gimena, Catedrático de la Universidad Politécnica de Cataluña y Director General del Instituto Tecnológico Geominero de España; Fernando Lara Guerrero, Subcoordinador de Hidrología Subterránea en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; Rubén Chavez Guillen, Gerente de Aguas Subterráneas a Nivel Nacional de la Comisión Nacional del Agua; Oscar Escolero Fuentes, Subgerente de Evaluación y Modelación Hidrogeológica de la Gerencia Nacional de Aguas Subterráneas; Joel Carrillo Rivera, Presidente del Capítulo Mexicano de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Ignacio Navarro De León, de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la U.A.N.L; Daniel Gómez y Emilio Padrón Corral, Maestros Investigadores del Departamento de Estadística de la U.A.A.A.N y Humberto Madrid de la Vega, del Centro de Investigación de Matemáticas Aplicadas (CIMA) de la U.A.C; quienes conocieron el desarrollo de la presente investigación y realizaron comentarios de gran aporte técnico.

A mis compañeros y amigos en el Postgrado: José Luis Lara, Juan Carlos Rodríguez, Mario Madrigal, Mario Dena, Mario Cruz, Ismael Mata, Nestali Gómez, Manuel Huerta, Carlos Longoria, Clemente Gallegos, José Luis Woo, Javier Garza, José Butrón, José Verastegui, Sergio García, Marquis Adames, Juan Romero, Javier Castillo, Roberto Carranza, Elías Treviño, Homero Morales y en especial gracias por su amistad a José Luis Carlos Rimoldi, Noé Flores Durán, Wilder Camacho y José Hernández.

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Nombre:

Javier de Jesús Cortés Bracho

Candidato para el Grado de Doctor en Ciencias Agrícolas Especialidad Agua-Suelo.

Tesis:

Simulación del Flujo de Agua Subterránea en un Medio Fracturado en Calizas.

Areas de Estudio:

Hidrología Subterránea y Estadística Matemática Aplicada.

Biografía:

Nacido el 14 de Octubre de 1958 en Saltillo, Coahuila México.

Egresado de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro como Ingeniero Agrónomo en Irrigación en diciembre de 1980, y como Maestro en Ciencias en Estadística Experimental en 1986.

Profesor Investigador adscrito al Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro desde Enero 1981 a la fecha, impartiendo los cursos de Uso y Conservación del Agua, Drenaje Agrícola, Suelos Salinos y Sódicos, Geohidrología y Seminario a nivel Licenciatura, y Profesor del curso de Geohidrología a nivel Postgrado.

Profesor invitado por la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma de Chapingo, para impartir curso-taller sobre Variabilidad Espacial en el contexto agrícola.

Profesor invitado por la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, para impartir curso de Geohidrología a nivel Maestría.

Profesor invitado por la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, para impartir curso-taller de Geoestadística.

Responsable de 22 proyectos de investigación y corresponsable de un proyecto de desarrollo.

Presidente de jurado en 30 ocasiones en exámenes profesionales y 48 veces como vocal.

Presidente de jurado en 2 ocasiones en exámenes para obtención de grado de Maestro en Ciencias y 7 veces como vocal.

Asesor principal de 19 tesis de licenciatura terminadas.

Asesor principal de 2 tesis de maestría terminadas.

Coasesor de 13 tesis de nivel licenciatura terminadas.

Coasesor de 7 tesis a nivel postgrado terminadas.

Asistencia a 12 cursos y seminarios a nivel Nacional sobre temas de Enseñanza Universitaria y Aprovechamiento de Agua Subterránea.

Participación como ponente en 22 congresos a nivel Nacional e Internacional

Jefe del Departamento de Riego y Drenaje en el período de Septiembre de 1989 a Septiembre de 1991, Consejero Propietario del H. Consejo Universitario y Miembro de la Comisión de Planeación en 1992 de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

41 publicaciones científicas en memorias de congresos nacionales e internacionales y en revistas con arbitraje (Terra y Agricultura Técnica en México), una publicación en revisión en la revista Ingeniería Hidráulica de México y un manuscrito en revisión en Ground Water Journal.

Dos programas de computo registrados en el Registro Público de Derecho de Autor.

33 reconocimientos dentro de estos, el ser miembro del Sistema Nacional de Investigadores como Candidato, en los períodos 1989-1992 y 1992-1993.

Miembro de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.

Miembro de la Federación Agronómica Sección Sur de Coahuila.

Miembro de la Asociación Geohidrológica Mexicana.

Miembro de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD).

Miembro de la International Association of Hydrogeologists (IAH).

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CUADROS	xi
INDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
SUMMARY	xvi
1. INTRODUCCION	2
1.1. Hipótesis general	3
1.2. Hipótesis particulares	3
1.3. Objetivo general	4
1.4. Objetivos particulares	4
2. REVISION DE LITERATURA	5
2.1. Las Rocas calizas	5
2.1.1. Génesis	5
2.1.2. Composición	6
2.1.3. Textura y estructura	8
2.1.4. Disolución	9
2.1.5. Características de la circulación cárstica	11
2.2. Historia de los modelos de flujo del agua subterránea	12
2.3. Software desarrollado para el modelaje del flujo de agua subterránea	13
2.4. Modelación y simulación del flujo de agua en medios fracturados	15
3. MATERIALES Y METODOS	17
3.1. Descripción del área de estudio	17
3.1.1. Localización	17
3.1.2. Economía y poblaciones principales	17
3.1.3. Clima	17
3.1.4. Fisiografía	18
3.1.5. Geomorfología	18
3.1.6. Geología general	19
3.1.7. Estratigrafía.	22
3.1.8. Tectónica general	24
3.2. Características Hidrogeológicas de las formaciones en la zona de estudio	25
3.2.1. Jurásico Superior	25
3.2.2. Cretácico Inferior	26
3.2.3. Cretácico Inferior-Cretácico Superior	28
3.2.4. Cretácico Superior	28
3.2.5. Terciario Inferior	30

3.2.6. Cuaternario	30
3.3. El agua subterránea en la zona de estudio	31
3.3.1. Aprovechamiento	31
3.3.2. Vulnerabilidad a la contaminación	33
3.3.3. Parámetros hidrogeológicos	34
3.4. Proceso de modelación y simulación del flujo en medios fracturados de calizas	35
3.4.1. Determinación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea	35
3.4.2. Análisis del patrón de distribución de fracturas	40
3.4.3. Análisis de datos direccionales	41
3.4.4. Determinación del Índice de Densidad de Fractura	43
3.4.5. Determinación de parámetros hidrogeológicos	44
3.4.6. Modelo de simulación del flujo de agua subterránea	47
3.4.7. Verificación del modelo	49
4. RESULTADOS Y DISCUSION	51
4.1. Índices de vulnerabilidad	51
4.2. Análisis de la distribución de fracturas	52
4.3. Análisis de datos direccionales	53
4.4. Determinación del índice de densidad de fractura	54
4.5. Determinación de parámetros hidrogeológicos	58
4.6. Simulación del flujo subterráneo	64
4.7. Verificación del modelo	72
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
6. BIBLIOGRAFIA	78
7. APENDICE	84
7.1. Información de datos en diskett 1 anexo	85
7.2. Software en diskett anexo	87
7.2.1. Índice de densidad de fracturas (diskett 2)	87
7.2.2. Pruebas de bombeo para medios fracturados (diskett 3)	87
7.3. Ubicación de pruebas de bombeo en mapa hidrogeológico	88
7.4. Secciones estructurales del área de estudio	89

INDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. Suministro de agua potable para la ciudad de Saltillo de Enero a Diciembre de 1995 (SIMAS)	32
Cuadro 4.1. Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en la zona hidrogeológica Manzanera-Zapalinamé municipio de Arteaga, Coah. Utilizando el método de doble porosidad	60
Cuadro 4.2. Resultados de transmisividad en m^2/s por unidad hidrogeológica	63
Cuadro 4.3. Resultados del coeficiente de almacenamiento por unidad hidrogeológica	63
Cuadro 4.4. Evolución de la población total en el municipio de Saltillo, Coah. (INEGI, 1994a y 1996)	67
Cuadro 4.5. Información de campo y estimada para los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Localización del área de estudio (INEGI, 1995)	20
Figura 3.2. Isoyetas para la zona Saltillo-Ramos Arizpe (Lesser y Asociados S. A. de C. V., 1997)	21
Figura 3.3. Secuencia estratigráfica de la provincia plegada de Coahuila (Wall <i>et al.</i> 1961)	23
Figura 3.4. Período relativo de atraso para el acceso del contaminante (Escolero, 1996)	36
Figura 3.5. Capacidad para retención y reacción físico-química con respecto al contaminante (Escolero, 1996)	37
Figura 3.6. Potencial general de dilución del medio hidrogeológico (Escolero, 1996)	38
Figura 3.7. Índice de vulnerabilidad del nodo (Escolero, 1996)	39
Figura 4.1. Índice de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en las zonas geohidrológicas Saltillo-Ramos Arizpe y Manzanera-Zapalinamé	51
Figura 4.2. Mapa de fracturas encontradas en el área de estudio, basado en las cartas geológicas G14C33 y G14C34 de CETENAL (1975)	52
Figura 4.3. Diagrama de Rosa de las fracturas encontradas en el área de estudio, basado en las cartas geológicas G14C33 y G14C34 de CETENAL (1975)	52
Figura 4.4. Semivariograma isotrópico esférico para $\tau = 2.0$ Km.	55
Figura 4.5. Modelos anisotópicos esféricos para $\tau = 0.5$ Km, $\tau = 1.0$ Km, $\tau = 1.5$ Km y $\tau = 2.0$ Km.	56
Figura 4.6. Mapa que muestra los Índices de Densidad de Fractura resultados de la interpolación Kriging	57
Figura 4.7. Modelo anisotrópico gaussiano para la transmisividad en $m^2/día$	65

Figura 4.8. Modelo isotrópico lineal con umbral para el coeficiente de almacenamiento	65
Figura 4.9. Modelo isotrópico gaussiano para la cota del nivel estático	66
Figura 4.10. Modelo isotrópico esférico para el caudal de extracción	66
Figura 4.11. Carta y perfil piezométrico en bloque simulado para el año 2000 del área de estudio	69
Figura 4.12. Carta y perfil piezométrico en bloque simulado para el año 2010 del área de estudio	70
Figura 4.13. Carta y perfil piezométrico en bloque simulado para el año 2020 del área de estudio	71
Figura 4.14. Representación de contornos medidos y estimados de cargas Piezométricas para 1996	73
Figura 4.15. Distribución espacial de los errores de estimación	73
Figura 4.16. Correlación entre las cargas piezométricas medidas y estimadas con el modelo de simulación para 1996	74

RESUMEN

Javier de Jesús Cortés Bracho

Fecha de Graduación: Febrero de 1999

**Candidato para el Grado de Doctor en Ciencias Agrícolas
Especialidad: Agua-Suelo**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Agronomía

Título del Estudio: Simulación del Flujo de Agua Subterránea en un Medio Fracturado en Calizas

Número de Páginas: 89

Areas de Estudio:

Hidrología Subterránea y Estadística Matemática Aplicada.

Palabras Clave:

Acuífero, fracturas, calizas, doble porosidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, eigenvalor, eigenvector.

Propósitos y Métodos de Estudio:

El propósito principal de la investigación fue realizar un modelo de simulación de flujo de agua subterránea para un medio fracturado en calizas, como una herramienta que aporte un entendimiento del comportamiento dinámico del recurso hidráulico subterráneo del acuífero de rocas calcáreas, de la región sur-este del estado de Coahuila, México. Para lo cual fue necesario definir un marco conceptual, basado en la identificación de las características hidrogeológicas, e índices de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, y posteriormente plantear un proceso de modelación y simulación involucrando a un análisis de la distribución de fractura y la determinación de los parámetros hidrogeológicos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento bajo el método de doble porosidad, parámetros que fueron claves en el planteamiento del modelo de simulación, derivado de la solución de eigenvalores y eigenvectores.

Contribuciones y Conclusiones:

De la presente investigación, se deriva una metodología para definir un modelo de simulación de flujo de agua subterránea para medios fracturados de calizas, donde el método de doble porosidad para la interpretación de las pruebas de bombeo, representa significativamente la evolución de tiempo vs. abatimiento en medios fracturados de

calizas, por lo que hace muy factible su aplicación. En lo que respecta al modelo de simulación basado en eigenvalores y eigenvectores de un eigenproblema donde se involucra directamente a la transmisividad y al coeficiente de almacenamiento, proporciona una alternativa de solución a los problemas de flujo en medios fracturados de calizas.

Se desarrolló software para la determinación del índice de densidad de fractura y para la interpretación de pruebas de bombeo bajo la metodología de doble porosidad, que auxilia en gran medida en los procesos de cálculo.

De la aplicación de estas aportaciones a la región sur-este del estado de Coahuila, se concluye que:

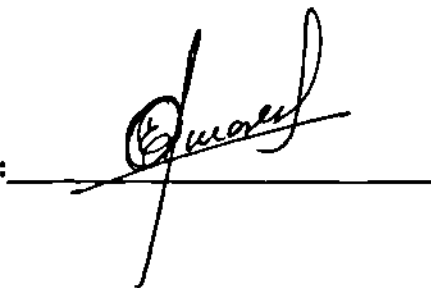
Los mayores índices de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea se presentan en el valle Saltillo-Ramos Arizpe.

El comportamiento de las fracturas superficiales siguen una distribución Von Mises con orientación predominante noroeste-sureste, mientras que los mayores índices de densidad de fractura se encuentran al sur-este de la ciudad de Saltillo, Coah.

Se estimaron los parámetros de transmisividad y coeficiente de almacenamiento para el sur-este del Estado de Coahuila y se recomienda al método de doble porosidad para la interpretación de pruebas de bombeo en medios fracturados de calizas.

El modelo de simulación obtenido, predijo un abatimiento de 16.4 m/año y se encontraron estimaciones de los niveles piezométricos para los años 2000, 2010 y 2020.

FIRMA DEL ASESOR PRINCIPAL:



SUMMARY

Javier de Jesús Cortés-Bracho

Graduation Date: February of 1999

**Candidate to obtain the Doctor Degree in Agricultural Sciences
Water and Soil Sciences**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Agronomía

Title of the Research: Groundwater Simulation Flow in Fractured Limestone

Number of Pages: 89

Subjects of the Research Work:

Underground Hydrology and Statistics Math.

Key Words:

Aquifer, fractures, calcareous, double porosity, transmissibility, storage coefficient, eigenvalue, eigenvector.

Purposes and Study Methods:

The principal purpose of the investigation was to accomplish a model for simulation of ground water for fractured limestone, as a tool for understanding dynamical behavioral of the aquifer in the southeast region of the state of Coahuila, Mexico. Conceptual framework was defined based on the identification of the hydrodynamic characteristics, and vulnerability indices of pollution of the ground water. Fracture distribution and density was measured and the determination of the hydrogeologic properties of transmissibility and storage coefficient were calculated using the double porosity method, parameters that were key in the simulation model, derivative from the solution of eigenvalues and eigenvectors.

Contributions and Conclusions:

The present investigation derived a methodology to define a model of flow simulation of ground water for fractured limestone, where the double porosity method for the interpretation of the pumping tests, represents satisfactorily the time vs. drawdown evolution in fractured means, therefore makes very feasible its application. The simulation model based on eigenvalues and eigenvectors of an eigenproblem where is involved directly the transmissibility and the storage coefficient, gives an alternative of solution to the flow problems in fractured limestone. Software for determination of the index of fracture density and for interpretation of pumping tests under the double

porosity methodology, that auxiliary to the calculation processes was made in the present investigation.

The application of these contributions to the southeast region of the state of Coahuila, Mexico is concluded that:

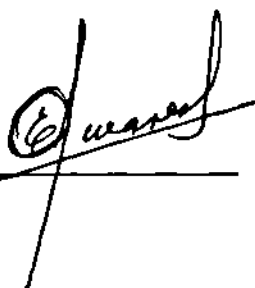
The greater vulnerability indices of pollution of the ground water are presented in the valley Saltillo-Ramos Arizpe.

The behavior of the superficial fractures continue a distribution Von Mises with northwest-southeast direction, while the greater indices of fracture density are found southeast of the city Saltillo Coahuila, Mexico.

The hydrogeologic properties of transmissibility and storage coefficient were estimated for the southeast of the state of Coahuila and is recommended double porosity method for the interpretation of pumping tests in fractured limestone.

The simulation model forecasted a drawdown of 16.4 m/year and estimates of the piezometric surface for the years 2000, 2010 and 2020 were found.

MAIN ADVISOR SIGNATURE: _____

A handwritten signature in black ink, written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be 'E. ...'.