

03063
5
reje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS
PROFESIONAL Y DE POSGRADO

***DESARROLLO DE MODELOS COMPUTACIONALES DE
FLUJO EN ACUIFEROS SEMICONFINADOS EN LA
CUENCA DE MEXICO***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACION

P R E S E N T A .

GUILLERMO DE JESUS HERNANDEZ GARCIA

DIRECTOR DE TESIS: DR. ISMAEL HERRERA REVILLA

MEXICO D.F.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1994



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico esta tesis a

Carolina.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado del esfuerzo de varias personas en la Universidad. Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, el doctor Ismael Herrera Revilla por su apoyo y paciente guía en todos los aspectos que abarcó el presente trabajo.

Quiero también reconocer los esfuerzos especiales del ingeniero Rubén Martínez Guerra y el físico Norberto Vera Guzmán en el curso de las corridas de prueba de los programas, la preparación de las rutinas y la discusión de resultados. Así mismo al ingeniero Rodrigo Medina Bañuelos le agradezco su apoyo y asesoría principalmente el la hidrogeología de la cuenca de México y los datos correspondientes. Asimismo le agradezco su apoyo al geólogo Eliseo Vázquez por los datos de la geología de la cuenca. Por el apoyo con la revisión agradezco también su apoyo al doctor J. Joel Carrillo Rivera y al maestro Jaime Durazo Lozano.

ÍNDICE

1. **INTRODUCCIÓN.**
 - 1.1 La Cuenca de México.
 - 1.2 Modelos Matemáticos Computarizados de la Cuenca de México.
Referencias.

2. **MODELO TRIDIMENSIONAL DE FLUJO.**
 - 2.1 Implantación del modelo tridimensional.
 - 2.2 Convención de la Discretización.
 - 2.3 Ecuación por Diferencias Finitas.
 - 2.4 Iteración.
 - 2.5 Diseño del Programa.
Referencias.

3. **INCORPORACIÓN DEL EFECTO DE LAS ARCILLAS CUANDO LA CONSOLIDACIÓN ES LINEAL.**
 - 3.1 Formulación integrodiferencial del acuitardo
 - 3.2 Incorporación del efecto de la memoria en arcillas al modelo.
 - 3.3 Cálculo del hundimiento
 - 3.4 Tiempos cortos
 - 3.5 Notación.
Referencias.
Anexo.

4. **INCORPORACIÓN DEL EFECTO DE LAS ARCILLAS CUANDO LA CONSOLIDACIÓN ES NO LINEAL.**
 - 4.1 Formulación de los parámetros
 - 4.2 Incorporación de la consolidación no lineal en el modelo.
 - 4.3 Cálculo del hundimiento.
 - 4.4 Cálculo del flujo del acuitardo al acuífero.
Referencias.
Anexo.

5. **MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA Y APLICACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL.**
 - 5.1 La Zona de Estudio.
 - 5.2 Discretización del Dominio.
 - 5.3 Modelación del Estado Estacionario.
 - 5.4 Modelación del Estado Transitorio.
Referencias.
Anexo.
Figuras.

6. **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 La cuenca de México

La cuenca de México ha sido objeto de estudio por diferentes grupos de investigadores y expertos de universidades nacionales y extranjeras y de organismos gubernamentales, con el fin de conocer las propiedades físicas que la caracterizan desde el punto de vista geológico, geofísico e hidrológico. Estos trabajos buscan la solución de problema de interés, entre ellos el del abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México. Por el alto costo de otras alternativas, se prevé que el abastecimiento de agua de la Ciudad de México continuará por muchos años dependiendo en forma sustancial de los recursos subterráneos. Por otra parte, el volumen que se requiere para abastecer a esta zona metropolitana, cuyo constante crecimiento la hace la más grande del mundo, es ya enorme y continuará aumentado en el futuro. La extracción actual es de $50\text{m}^3/\text{s}$, de los cuales $40\text{ m}^3/\text{s}$, el 80%, provienen del subsuelo. Ante estos hechos, resulta evidente que es necesario utilizar este recurso con gran eficiencia.

El sistema acuífero de la cuenca de México (*la cuenca*, en lo sucesivo) está localizado en la parte central del Eje Neovolcánico Mexicano, tiene una altitud promedio de 2,400 m sobre el nivel del mar y una área aproximada de 11,000 km², de los cuales 4,700 km² corresponden a la porción sur, donde se encuentra el área urbana. Limitada al Sur por la Sierra de Chichinautzin, al norte por la Sierra de Pachuca, al este por la Sierra Nevada y al oeste por la Sierra de la Cruces, superficialmente la cuenca está dividida en once subcuencas: Xochimilco, Cuautitlán, Texcoco, Tochac, Churubusco, Pachuca, Chalco, Tecmulco, Ciudad de México, Teotihuacán y Apan.

Con el apoyo de la geología se pudo obtener, por medio de exploraciones directas y geofísicas, la geometría de las diferentes formaciones que conforman el acuífero de la cuenca. El contenedor del sistema está formado básicamente por rocas volcánicas originadas por diversos aparatos de emisión en diferentes periodos de actividad: andesitas, dacitas y riodacitas, del Mioceno-Pleistoceno y basaltos del Cuaternario. Los materiales presentes en la cuenca son de origen volcánico y lacustre, y constituyen un sistema acuífero complejo formado por tres grandes cuerpos. En la parte superior dos grandes estratos de arcilla separados por una capa delgada de material tobáceo, la llamada capa dura que, a pesar de su

reducido espesor, hidráulicamente tiene gran importancia debido a su alta permeabilidad. El acuífero actualmente en explotación se extiende por debajo de la segunda capa de arcilla y está formado por material granular más grueso: piroclastos, conglomerados y otro tipo de material volcánico. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base llega a estar a más de 3,000 m. de profundidad, por lo que se trata de un acuífero de enorme espesor. Bajo estas últimas se encuentran rocas carbonatadas de origen sedimentario de espesor desconocido.

El análisis del flujo de agua subterránea y la consolidación de estratos confinantes de baja permeabilidad, de material arcilloso, llamados acuitardos, tiene interés cuando se aplican a sistemas en donde los acuíferos son explotados intensivamente. Como consecuencia, el hundimiento del terreno asociado a la explotación de agua subterránea, que es de gran magnitud en la cuenca, debido principalmente a la alta compresividad de la arcilla, es un problema cuyo tratamiento es relevante en la actualidad.

Un problema más, que complica el estudio y la administración del agua subterránea de la cuenca, es el debido a los procesos geoquímicos que tienen lugar en la cuenca subterránea. Por una parte existen los motivados por causas naturales, entre los que destacan los que origina la composición química de las arcillas. Por otra parte están los antropogénicos: los generados por la actividad humana de la gran población que habita la cuenca y la que provoca la actividad industrial que ahí se asienta, que es, por mucho, la mayor del país.

Con base en lo anterior es claro que en la cuenca, el estudio y la administración del agua subterránea necesita de métodos científicos avanzados. Y aquí el término *administración* se emplea en un sentido amplio, de manera que incluye planeación, implantación, y control adaptativo de políticas y programas relacionados con exploración, inventario, desarrollo y operación de los recursos subterráneos.

El progreso mundial que ha habido en los métodos para administrar en forma científica los recursos subterráneos ha crecido, especialmente a partir de la década de los setentas. Buena parte de este progreso se ha derivado del avance habido en la capacidad para modelar matemáticamente y la disponibilidad de más eficientes equipos cómputo; de esta manera es posible predecir el comportamiento de los sistemas hidrológicos frente a diferentes opciones de explotación, utilizando para ello a las Ciencias de la Computación. Los modelos numéricos constituyen una herramienta fundamental para resolver problemas

hidrogeológicos relevantes y suministran al administrador información indispensable para tomar las decisiones con fundamento adecuado.

En esta tesis se presenta una nueva versión de un modelo numérico de la cuenca, con la intención de que constituya una herramienta útil para quienes tienen la responsabilidad de administrar el recurso. Un antecedente importante del presente trabajo es el modelo que desarrolló Herrera [1-3]. En la primera de ellas [1], se presentaron resultados preliminares, en la segunda [2] se establecieron las conclusiones relativas al balance, funcionamiento hidrológico y hundimiento que se obtuvieron en ese estudio. Finalmente, en la tercera [3] se presentó un modelo perfeccionado que ampliaba su versatilidad. La metodología empleada en estos trabajos fue la de ecuaciones integrodiferenciales que se originó en México, desarrollada por Herrera y colaboradores [4-8].

La sismología registrada y la exploración sismológica ha sido una fuente de información del subsuelo y desde hace tiempo ha originado, junto con la mecánica de suelos el conocimiento de las propiedades de las formaciones geológicas, en especial las del acuitardo. El modelo que aquí se presenta, es una versión avanzada con respecto a los trabajos referidos antes por varias razones. La información disponible se ha ampliado en forma muy importante, especialmente como resultado de los estudios que sobre la estructura subterránea del Valle se han realizado a partir del gran sismo de 1985. Aunque estos estudios fueron planteados con objetivos de sismología e ingeniería sísmica, la información generada tiene gran valor, pues permite conocer la estructura geológica del subsuelo a profundidades mucho mayores que anteriormente. Por otra parte, en otros modelos el tratamiento había sido bidimensional. En esta ocasión, el tratamiento numérico es tridimensional. La necesidad de proceder de esta manera es, en buena medida, consecuencia del conocimiento ampliado de las estructuras hidrogeológicas de que ahora se dispone y que han puesto en evidencia espesores muy superiores a los que se habían incluido en los modelos desarrollados en el pasado.

1.2 Modelos Matemáticos Computacionales de la cuenca de México

Roberto Gayol, en 1925, informa a la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos de México que la ciudad se está hundiendo y que la causa probable de ello es "la perturbación que en el fondo del Valle de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo" [10,11]. Desde una perspectiva actual, los trabajos iniciados por Nabor Carrillo [12,13], hace ya más de cuarenta años, pueden considerarse como importantes antecedentes de la aplicación de esta herramienta a la cuenca. A partir de que Nabor Carrillo explica los hundimientos observados por la Dirección de Geografía, en varios puntos de la ciudad; se inicia el estudio sistemático del subsuelo y se amplía también el estudio de las aguas subterráneas de la cuenca. La correlación de bancos de nivel y las primeras mediciones piezométricas realizadas en 1952 por Marsal, Hiriart y Sandoval [14], permiten corroborar los hallazgos de Nabor Carrillo. A esta información se agregan las investigaciones de Zeevaert [15] y la labor de la Comisión Hidrológica de la cuenca del Valle de México (S.R.H.), la cual realizó nivelaciones periódicas, instaló un gran número de bancos de nivel, construyó y operó más de 100 estaciones piezométricas desde 1953. También hizo mediciones complementarias, que están contenidas en sus publicaciones [16,17]. Esta labor es continuada por la Comisión de Aguas del Valle de México, que la sustituye a partir de 1974. El comportamiento de las arcillas es estudiado por Marsal y Mazari [18,19]. Una revisión bastante completa del problema del hundimiento y de los estudios realizados hasta esa fecha fue presentada por Hiriart y Marsal en 1969 [20]. Posteriormente Juárez Badillo [21-23] estudió en forma amplia las ecuaciones constitutivas de las arcillas y Herrera [24-26] estableció una versión revisada que elimina inconsistencias de la teoría "Calm Clay".

La aplicación de la modelación matemática y computacional en Hidrología Subterránea y en Mecánica de Suelos, es un campo relativamente nuevo, para propósitos de investigación y como herramienta para la administración científica de los recursos subterráneos. Su aplicación práctica se ha extendido sólo en años recientes. El tratamiento de acuíferos semiconfinados múltiples, que es el caso de los de la cuenca, es difícil, debido a que un tratamiento adecuado de la arcilla requiere de una discretización muy fina. Hay una amplia gama de problemas para los que el tratamiento lineal del acuitardo es adecuado. Para ese caso, el tratamiento integrodiferencial es muy eficiente. Su desarrollo se inició en México, en 1968, por Herrera y Figueroa [4,5]. Esta misma idea es ampliada y sistematizada a partir de 1973 [6-8], y revisada en la American Water Resources Association, en 1976 [27]. La Teoría Integrodiferencial, constituye un método poderoso y con base en ella se construye un modelo numérico [8] que demostró ser el más eficiente [28] para consolidación

lineal, ya que reduce la capacidad de memoria y el tiempo de cómputo en, al menos, un orden de magnitud. Posteriormente, el procedimiento se perfeccionó aún más al desarrollarse una manera de tratar numéricamente en forma eficiente los tiempos cortos [29].

Entre 1979 y 1981, Herrera y colaboradores [1-3,28, 30] implantaron para el Departamento del Distrito Federal, un modelo computacional basado en el Método integrodiferencial. En 1979 [1] se presentaron resultados preliminares y en enero de 1982 [2,3] se publicaron los resultados finales, así como diversos perfeccionamientos. Debe señalarse, sin embargo, que este modelo es bidimensional y desde luego está basado en la información sobre el subsuelo, disponible hasta 1981. En 1989 Herrera, Martínez y Hernández [31], definieron la geometría tridimensional del sistema acuífero dentro de una región de análisis de la porción sur de la cuenca, que es donde existe la mayor información hidrogeológica y la parametrización de este sistema en todas sus partes, con el propósito de simular su funcionamiento hidráulico.

En este trabajo se presenta una nueva versión de modelación del acuífero de la cuenca aplicando el método de diferencias finitas en tres dimensiones al flujo en acuíferos subterráneos con la incorporación, por una parte, del efecto de las arcillas cuando la consolidación es lineal y por otra del efecto de la consolidación no lineal del subsuelo, para describir la explotación y evaluar alternativas de uso del recurso. Las distribuciones de niveles piezométricos son obtenidos para los estados estable y transitorio usando datos de campo para formular las condiciones de frontera. También como parte de este trabajo se incluye el modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca.

□

REFERENCIAS

1. Cruickshank V. C., Herrera, I., Yates, R., Hennart, J. P., Balarezo, D. y Magaña, R., Modelos de Predicción del hundimiento del subsuelo del Valle de México, Proyecto 9138, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1979.
2. Herrera, I., Yates, R. y Hennart, J. P. "Estudio de Hundimiento y Balance de los Acuíferos Subterráneos de la Ciudad de México". Elaborado para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Investigaciones Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS), UNAM 1982.
3. Herrera, I., Yates, R. y Hennart, J. P., "Subrutinas y Perfeccionamiento del Programa para la Simulación de Acuíferos Múltiples". Elaborado para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Investigaciones Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS), UNAM 1982.
4. Herrera, I. y Figueroa, G. E., "A Correspondence Principle for the Theory of leaky Aquifers". Water Resources Research, 5(4), pp 900-904, 1969.
5. Herrera, I., "Theory of Multiple Leaky Aquifers". Water Resources Research 6 (1), pp 185-193, 1970.
6. Herrera, I. y Rodarte, L., "Integrodifferential Equations for Systems of Leaky Aquifers and Applications. Part. 1: The Nature of Approximate Theories". Water Resources Research, 9 (4), pp 995-1005, 1973. También Instituto de Ingeniería, UNAM, E-6, 1973.
7. Herrera, I., "Integrodifferential Equations for Systems of Leaky Aquifers and Applications. Part 2: Error Analysis of Approximate Theories". Water Resources Research, 10 (4), pp 811-820, 1974. También Instituto de Ingeniería, UNAM, E-6, 1973.
8. Herrera, I. y Yates, R., "Integrodifferential Equations for Systems of Leaky Aquifers. Part 3: A Numerical Method of Unlimited Applicability". Water Resources Research. 13 (4), pp 725-732, 1977.
9. Ortega, A., "Las Condiciones de Frontera Hidráulicas Naturales en la Cuenca de México, Usando Modelado Matemático" Volumen 28-2, Geofísica Internacional, 1989.
10. Gayol, R., "Breves Apuntes a las Obras de Saneamiento y Desagüe de la Capital de la República y de las que, del mismo género, necesita con grande urgencia", Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, Vol. VII, 1929.
11. Gayol, R., "Breves Apuntes Relativos a la Catedral de México", Revista Mexicana de Ingeniería y Agricultura, Vol. XI, 1929.
12. Volumen Nabor Carrillo, "El Hundimiento de la Ciudad de México", Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México 1969.
13. Carrillo, N., "Influence of artesian wells on the sinking of Mexico City". Proc. of the 11th International Conference on Soil Mechanics, Holland, 1948.
14. Marsal, R. J., Hiriart, F., y Sandoval, R., "Hundimiento de la Ciudad de México, Observaciones y Estudios Analíticos", Ediciones ICA, Serie B, No. 3, 1952.
15. Zeevaert, L., "Pore pressure measurements to investigate the main source of surface subsidence in Mexico City". Proc. of the III International Conference on Soil Mechanics, Zurich, 1953.

16. Boletines de Mecánica de Suelos. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, S.R.H., de 1953 a 1969.
17. Boletín de Mecánica de Suelos. Comisión de Aguas del Valle de México, de 1970 a 1974.
18. Marsal, R. J., y Mazari, M., "Subsuelo de la Ciudad de México". 2 Vols., Instituto de Ingeniería, UNAM, 1959.
19. Marsal, R. J., y Graue, R., "El Subsuelo del Lago de Texcoco". Volumen Carrillo, 1969.
20. Hiriart, F. y Marsal, R. J., "El Hundimiento de la Ciudad de México". Vol. Carrillo, VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos. e Ingeniería de Cimentaciones pp 109-147, 1969.
21. Juárez-Badillo, E., "Mechanical Characterization of Mexico City Clay". Simposio Internacional de Ingeniería Geotérmica de Suelos Blandos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, D.F. pp 65-69, 1982.
22. Juárez-Badillo, E., "Constitutive Relationships for Soils". Symposium on Recent Developments in the Analysis of Soil Behaviour and Their Applications to Geotechnical Structures. The University of New South Wales Kingsington, Australia, pp 231-257, 1975.
23. Juárez-Badillo, E., "General Time Volume Change Equations for Soils". Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 2 pp 519-530 1985.
24. Herrera, I., "Ecuaciones Constitutivas de los Suelos". Instituto de Ingeniería, UNAM. 370, 1976.
25. Herrera, I., "El Concepto de Preconsolidación de los Suelos". Revista de Ingeniería 46 (1), pp 53-60, 1976. También Instituto de Ingeniería, UNAM, 363, 1976.
26. Herrera, I., León, J. L. y Fernández del Olmo, "Preconsolidations and its Rheological Implications". Proc. Novena Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos Ingeniería de Cimentaciones, Tokio, Japón, 1, pp 127-130, 1977
27. Herrera, I., "A review of the Integrodifferential Equations Approach to leaky Aquifer Mechanics". Advances in Ground Water Hydrology, AWRA Symposium Proceedings, Chicago, Ill., pp 29-47, 1976. (ponencia invitada).
28. Herrera, I., Hennart, J. P. y Yates, R., "A Critical Discussion of Numerical Models for Multiaquifer Systems". Advances in Water Resources, 3 (4), pp 159-163, 1980. También en Flow Through Porous Media, G. F. Pinder Ed., CML Publications, Southampton, pp 51-55, 1983.
29. Chen, B. y Herrera, I., "Numerical Treatment of Leaky Aquifers in the Short Time Range". Water Resources Research, 18 (3), pp 55-562, 1982. Presentado por invitación en el John Ferris Symposium on Groundwater Hydraulics in the Spring Annual A.G.U. Meeting in Baltimore. MD.
30. Hennart, J. P., Herrera, I. y Yates, R., "Extension of the Integrodifferential Approach to Inhomogeneous multiacuifer systems". Water Resources Research, 17 (4), pp 1044-1050, 1981.
31. Herrera I., Martínez R., Hernández G., "Contribución para la Administración Científica de Agua Subterránea de la Cuenca de México", Vol. 28-2, Geofísica Internacional, 1989. □

CAPÍTULO 2

MODELO TRIDIMENSIONAL DE FLUJO

Después de hacer una investigación de los modelos documentados existentes, se seleccionó un modelo tridimensional con formulación en diferencias finitas el de Mc Donald y Harbaugh [1], debido a que era accesible. Esto trajo como consecuencia la posibilidad de acoplar con el programa principal del modelo tridimensional, el tratamiento integrodiferencial del acuitardo. Posteriormente facilitó el tratamiento no lineal del mismo.

En los siguientes capítulos se aborda el tratamiento del acuitardo, donde se considera que el movimiento del agua en el acuitardo es esencialmente vertical [2] y por lo tanto, al penetrar al sistema principal de acuíferos se vuelve horizontal. Sin embargo, aunque esta condición no necesariamente debe cumplirse, la capa superior de las celdas del modelo tridimensional tiene que recibir una recarga del acuitardo, que puede llevarse a cabo a través de una subrutina apropiada al modelo.

2.1 Implantación del Modelo Tridimensional

El programa completo, escrito en lenguaje de programación FORTRAN 77, se adaptó en el centro de cómputo del Instituto de Geofísica de la UNAM, actualmente está compilado y *corriendo* en una estación de trabajo. También se procedió a compilarlo en una microcomputadora, y está trabajando normalmente.

El siguiente paso consistió en la utilización de la geometría del acuífero de la cuenca de México que propone el Grupo de Geología del Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM. Por lo que corresponde a las características físicas del mismo, se procedió a utilizar la información disponible en cuanto a los coeficientes de transmisividad T y coeficiente de almacenamiento S del acuífero principal y la conductividad hidráulica vertical del acuitardo K' y el coeficiente de almacenamiento del acuitardo S_s' del trabajo realizado por Herrera, *et al*, en 1982 [3].

Para lograr lo anterior se requirió reinterpretar las pruebas de bombeo y de aforo disponibles para conocer las características físicas del acuífero, así como la información piezométrica existente, para conocer, tanto las condiciones iniciales del acuífero, como para calibrar el modelo con la información de que se dispone en cuanto a explotación y recarga.

De esta forma se tuvieron las condiciones necesarias para simular las condiciones hidráulicas del acuífero de la cuenca de México. La descripción del sistema hidrogeológico con los valores K y S_s se incluye en otro capítulo de este trabajo. En este capítulo se describe el modelo tridimensional de flujo.

2.2 Convención de la Discretización

El sistema de coordenadas x, y, z coincide con el arreglo i, j, k , formando i renglones, j columnas y k capas, cuyos nodos son la intersección de dichas celdas tridimensionales. Cada celda tiene propiedades hidráulicas constantes, por lo que cada valor asignado es uniformemente distribuido.

Cada columna tiene un ancho Δx , cada renglón un ancho Δy y cada capa un espesor Δz . Por ejemplo la celda (2,4,3) tiene un volumen $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$, (ver figura 2.1).

Para un arreglo de celdas se puede usar el sistema en el que cada nodo es el centro de una celda, o bien el sistema en que cada nodo es la intersección de los límites de cada celda y por lo tanto representa a una celda promedio de las celdas que lo rodean. El primer caso es un sistema de bloque centrado y el segundo un sistema de punto o nodo centrado (figura 2.1).

2.3 Ecuación por Diferencias Finitas

De acuerdo con la ecuación de continuidad, expresando el balance de flujo en una celda, la suma de todos los flujos de entrada y salida a cada celda debe ser igual a la razón de cambio en el almacenamiento de esa misma celda [4], o bien:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (2.1)$$

donde:

- Q_i = razón de flujo hacia la celda, unidad de volumen por unidad de tiempo [$L^3 T^{-1}$]
- S_s = almacenamiento específico por unidad de volumen, por cambio de la carga piezométrica. [L^{-1}]
- ΔV = volumen de la celda [L^3]
- Δt = intervalo de tiempo [T]

Δh = cambio de la carga piezométrica [L]

Como convención, las entradas y el aumento del almacenamiento son positivas. Las salidas y la disminución del almacenamiento son negativas.

Las 6 celdas adyacentes a la celda i, j, k son (figura 2.2):

$i-1, j, k$; $i+1, j, k$;

$i, j-1, k$; $i, j+1, k$;

$i, j, k-1$; $i, j, k+1$.

Para las celdas adyacentes el cálculo de los caudales de entrada a la celda i, j, k y con base en la ley de Darcy, es lo siguiente (figura 2.2):

De $i, j-1, k$

$$q_{i, j-\frac{1}{2}, k} = KR_{i, j-\frac{1}{2}, k} \Delta C_i \Delta V_k \frac{h_{i, j-1, k} - h_{i, j, k}}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}} \quad (2.2)$$

donde: $KR_{i, j-1/2, k}$ es la conductividad hidráulica a lo largo de i entre los dos nodos en cuestión [LT^{-1}]. El índice $-1/2$ significa el espacio entre los dos nodo.

De $i, j+1, k$

$$q_{i, j+\frac{1}{2}, k} = KR_{i, j+\frac{1}{2}, k} \Delta C_i \Delta V_k \frac{h_{i, j+1, k} - h_{i, j, k}}{\Delta r_{j+\frac{1}{2}}} \quad (2.3)$$

De $i+1, j, k$

$$q_{i+\frac{1}{2}, j, k} = KC_{i+\frac{1}{2}, j, k} \Delta r_j \Delta V_k \frac{h_{i+1, j, k} - h_{i, j, k}}{\Delta C_{i+\frac{1}{2}}} \quad (2.4)$$

De $i-1, j, k$

$$q_{i-\frac{1}{2}, j, k} = KC_{i-\frac{1}{2}, j, k} \Delta r_j \Delta V_k \frac{h_{i-1, j, k} - h_{i, j, k}}{\Delta C_{i-\frac{1}{2}}} \quad (2.5)$$

De $i, j, k+1$

$$q_{i,j,k+\frac{1}{2}} = KV_{i,j,k+\frac{1}{2}} \Delta r_j \Delta c_i \frac{h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{k+\frac{1}{2}}} \quad (2.6)$$

De $i, j, k-1$

$$q_{i,j,k-\frac{1}{2}} = KV_{i,j,k-\frac{1}{2}} \Delta r_j \Delta c_i \frac{h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{k-\frac{1}{2}}} \quad (2.7)$$

Llamando conductancia al producto de la conductividad hidráulica por el área, dividida entre la separación de nodos:

$$CR_{i,j-\frac{1}{2},k} = \frac{KR_{i,j-\frac{1}{2},k} \Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}} [L^2 T^{-1}] \quad (2.8)$$

Sustituyendo (2.8) en (2.2) a (2.7) se obtiene:

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} = CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (2.9)$$

$$q_{i,j+\frac{1}{2},k} = CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad (2.10)$$

$$q_{i-\frac{1}{2},j,k} = CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (2.11)$$

$$q_{i+\frac{1}{2},j,k} = CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (2.12)$$

$$q_{i,j,k-\frac{1}{2}} = CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad (2.13)$$

$$q_{i,j,k+\frac{1}{2}} = CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad (2.14)$$

Los caudales (2.9) a (2.14) son las entradas para la celda i, j, k de las 6 celdas adyacentes dentro del acuífero. Estas entradas a la celda i, j, k , provenientes de otras fuentes se pueden hacer depender de la carga piezométrica de la celda que las recibe. La expresión general puede ser:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} [L^3 T^{-1}] \quad (2.15)$$

donde: $a_{i,j,k,n}$ es el flujo de la fuente n
 $p_{i,j,k,n}$ es una constante $[L^2 T^{-1}]$
 $q_{i,j,k,n}$ es una constante $[L^3 T^{-1}]$

Para una celda que recibe un caudal de un pozo recarga ($n=1$) se puede considerar que:

- a) es independiente de la carga $h_{i,j,k,l}$ de la celda i,j,k ;
 b) que depende de una carga.

Para el caso a) $p_{i,j,k,l} = 0 \therefore a_{i,j,k,l} = q_{i,j,k,l}$ (2.16)

Para el caso b) $a_{i,j,k,l} = p_{i,j,k,l} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,l}$ (2.17)

Para una celda que recibe un caudal de la filtración de un río, ($n=2$), dicho caudal depende de la carga $h_{i,j,k}$ de la celda y en su caso de la diferencia de cargas.

$$Q = \frac{KRIV(R_{i,j,k} - h_{i,j,k})}{D} \quad (2.18)$$

En este caso se usa $KRIV_{i,j,k,2}$ como conductividad hidráulica de la formación sobre la celda i,j,k y su conductancia es:

$$CRIV_{i,j,k,2} = \frac{KRIV_{i,j,k,2}}{D}$$

por lo que:

$$a_{i,j,k,2} = CRIV(R_{i,j,k} - h_{i,j,k})$$

o bien:

$$a_{i,j,k,2} = -CRIV_{i,j,k,2} h_{i,j,k} + CRIV_{i,j,k,2} R_{i,j,k} \quad (2.19)$$

De la ecuación (2.19) se deduce que:

$$p_{i,j,k,2} = -CRIV_{i,j,k,2} \quad (2.20)$$

y

$$q_{i,j,k,2} = CRIV_{i,j,k,2} R_{i,j,k} \quad (2.21)$$

En forma similar, para todas las fuentes externas se puede llegar a una solución tal como:

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (2.22)$$

o bien

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n}$$

$$Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n}$$

el flujo externo hacia la celda i,j,k es:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (2.23)$$

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} + q_{i,j+\frac{1}{2},k} + q_{i-\frac{1}{2},j,k} + q_{i+\frac{1}{2},j,k} + q_{i,j,k-\frac{1}{2}} + q_{i,j,k+\frac{1}{2}} + QS_{i,j,k} = S_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (2.24)$$

donde: $S_{i,j,k}$ es el almacenamiento específico [L^{-1}]

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ es el cambio de h con respecto al tiempo t [LT^{-1}]

y

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ es el volumen [L^3]

La ecuación (2.24) se puede utilizar para evaluar los términos de flujo en el tiempo avanzado t_m y la pendiente $\Delta h/\Delta t$ se puede obtener como sigue:

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}^m}{\Delta t_m} = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (2.25)$$

Esta aproximación es hacia atrás, pues el valor de $h_{i,j,k}^m$ depende del correspondiente $h_{i,j,k}^{m-1}$ anterior en el tiempo t . De esta forma, la ecuación (2.24) queda expresada como:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = S_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} \end{aligned} \quad (2.26)$$

En la ecuación (2.26) se desconocen las 7 cargas en el tiempo t_m , que son las incógnitas del sistema para la celda i,j,k . Se conocen por lo tanto los coeficientes, así como $h_{i,j,k}^m$ y $\Delta t_m = t_m - t_{m-1}$. Su solución se puede obtener en forma simultánea, pues cada celda i,j,k tiene 6 celdas adyacentes, o bien representa 7 ecuaciones con 7 incógnitas. Cada celda tiene en promedio una incógnita, por lo que para n celdas se tienen n ecuaciones y el sistema tiene solución.

Sin embargo, no todas las celdas pueden tener una ecuación de este tipo, por lo que el número de ecuaciones es igual al número de celdas de carga variable, en las cuales la carga puede variar en el tiempo. El resto de las celdas son de carga no variable y pueden ser de carga constante o de no flujo, las de carga constante tienen celdas adyacentes donde se conoce el flujo de la celda que promedia esta y las de no flujo no genera cargas desconocidas en las celdas adyacentes.

Las celdas pueden ser de varios tipos y representan las condiciones de frontera: cargas constantes, no flujo, flujo constante y flujo dependiente de carga. Flujo constante y flujo dependiente de carga pueden representarse por combinaciones de carga y no flujo, con fuentes externas. A partir de la carga inicial y las condiciones de frontera se conoce $h_{i,j,k}^1$ en el tiempo t_1 , que es el inicio de los incrementos de tiempo y por lo tanto se obtiene $h_{i,j,k}^2$, que es la carga en el tiempo t_2 , o el final del primer incremento del tiempo. Esto equivale a que en la ecuación (2.26) m sea 2 y $m-1$ sea 1 (ver figura 2.3). De esta forma se pasa a t_3 al término de la solución de todas las ecuaciones y m pasa a ser 3, así como $m-1$ es 2, lo que se continúa hasta llegar a cubrir el rango de tiempo de interés.

2.4 Iteración

Aunque la solución se puede obtener por métodos algebraicos, despejando cada carga y calculándola en función de la carga de tiempo anterior, se prefieren los métodos de iteración. Este tipo de métodos parte de una solución de prueba para calcular una solución interna, que aproximadamente resuelve la ecuación con una diferencia.

La solución interna se reemplaza en la solución nueva de prueba para obtener otra solución interna y así sucesivamente. Este proceso de iteración se continúa hasta que la solución interna es prácticamente la misma solución de prueba, lo cual se alcanza cuando la diferencia de soluciones es menor que cierto valor establecido previamente en forma arbitraria, lo que se denomina *criterio de cierre*. Este procedimiento se utiliza para cada incremento de tiempo.

Por lo tanto, $h_{i,j,k}^{m,0}$ representa la solución inicial de prueba en el nodo i,j,k y $h_{i,j,k}^{m,1}$ la que a su vez es la solución de prueba usada en la iteración 2 (ver figura 2.3).

Rearreglando la ecuación (2.26)

$$\begin{aligned}
 & CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-\frac{1}{2},k} h_{i,j-1,k}^m \\
 & + (-CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} - CC_{i-\frac{1}{2},j,k} - CR_{i,j-\frac{1}{2},k} \\
 & - CR_{i,j+\frac{1}{2},k} - CC_{i+\frac{1}{2},j,k} - CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m \\
 & + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

donde: $HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SC I_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}}$

$$RHS_{i,j,k} = Q_{i,j,k} - \frac{SC I_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}}$$

$$SC I_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

La ecuación (2.27) tiene en su lado izquierdo todos los términos de la carga al final del incremento de tiempo y los términos que no dependen de esta condición al lado derecho. Por lo tanto, esta ecuación es utilizada para desarrollar el sistema de ecuaciones por resolver y es la base del modelo de flujo de agua subterránea.

2.5 Diseño del Programa

El programa consiste de un programa principal (MAIN) y una gran cantidad de subrutinas altamente independientes llamadas módulos, los cuales se organizan en paquetes y *procedimientos*.

El período de simulación se divide en períodos de cálculo (*stress periods*), en los cuales todos los esfuerzos externos son constantes. Cada período se puede dividir en incrementos de tiempo. El sistema de ecuaciones de diferencias finitas de la forma de la ecuación (2.27) se formula y resuelve para producir la carga en cada nodo al final de cada incremento de tiempo, usando un método de solución por iteraciones para cada uno. En la simulación se usan tres ciclos: uno para el período de cálculo, dentro del cual hay uno de incremento de tiempo, que contiene además el ciclo de iteración (ver figura 2.4).

En el procedimiento *Define*, se define el problema por simular; tal como tamaño, tipo estable o transitorio, cantidad de periodos de cálculo, opciones hidrológicas; y se especifica el esquema de la solución deseada. En el procedimiento *Allocate* se coloca el espacio requerido para la memoria.

En el procedimiento *Read & Prepare* se leen los datos que no dependen del tiempo, que pueden ser: condiciones de frontera, cargas iniciales, transmisividad, conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento, porosidad efectiva, elevaciones del fondo y cima de las capas y otros parámetros requeridos.

En el procedimiento *Stress*, la cantidad de incrementos de tiempo (denominada NSTP en el programa) del periodo de cálculo y la información para calcular cada incremento de tiempo se lee. En el segundo procedimiento *Read & Prepare*, la información del periodo de cálculo, tal como bombeo y recarga, se leen y procesan .

En el de *Advance* se calcula la longitud del incremento de tiempo y se inicializan las cargas. La iteración tiene el procedimiento *Formulate*, el cual determina las conductancias y los coeficientes para cada nodo y el procedimiento *Approximate* aproxima una solución al sistema lineal de cargas. Al final de la iteración el procedimiento *Output Control* determina la disposición de las cargas calculadas, los términos globales y el flujo de cada celda. En el procedimiento *Budget* se calculan los términos globales y el flujo de cada celda se imprime y registra. Finalmente en el procedimiento *Output* se imprimen y registran las cargas, abatimiento y los términos globales. Todos los módulos pueden agruparse en el procedimiento en el cual están contenidos.

El trabajo dentro de cada módulo se lleva a cabo por llamadas desde *MAIN*. Los módulos que llama *MAIN* se denominan primarios. Los que llama un módulo primario se llaman secundarios, los cuales también llaman otros secundarios.

Un paquete consiste de todos los módulos asociados con un trabajo hidrológico particular, un método de solución o el control de toda la simulación. Por ejemplo cada módulo relacionado con la simulación de ríos son miembros de el *River Package*; cada módulo relacionado con el flujo interno entre celdas para una formulación de bloque centrado, son miembros de *Block-Centered-Flow Package*, las relacionadas con flujo interno y externo son del *Flow-Component*. Los paquetes de *Solver* incluyen módulos para

implementar un algoritmo, los cuales incluyen el (SIP) *Strongly Implicit Procedure* y el (SSOR) *Slice-Successive Overrelaxation*.

Tabla 2.1 Lista de Paquetes

Basic	BAS	Especifica fronteras, longitud de intervalos de tiempo, condiciones iniciales e impresión de resultados, entre otros.
Block-Centered Flow	BCF	Calcula los términos de las ecuaciones de diferencias finitas que representan el flujo en el medio, de celda a celda y hacia el almacenamiento.
Well	WEL	Añade los términos que representan el flujo a los pozos a la ecuación.
Recharge	RCH	Añade los términos de la recarga de área a la ecuación.
River	RIV	Añade los términos de los ríos a la ecuación.
Drain	DRN	Añade los términos de drenaje a la ecuación.
Evapotranspiration	EVT	Añade los términos de ET a la ecuación.
General Head Boundaries	GHB	Añade términos de las cargas generales de las fronteras a la ecuación.
Strongly Implicit Method	SIP	Resuelve el sistema de ecuaciones por el método de iteración SIP.
Slice Successive Overrelaxation	SOR	Resuelve el sistema de ecuaciones por el método SSOR.

Para los submódulos, por ejemplo SBCFIC, se inicia con la S, le siguen las tres letras del paquete, luego la versión y finalmente la letra característica del paquete.

Para los módulos utility, por ejemplo U2DREL, se inicia con la U y le siguen 5 caracteres del paquete que indican que lee arreglos bidimensionales reales 2D REAL.

2.5.1 Fronteras

Las fronteras son exteriores de no flujo y las interiores de no flujo y carga constante, las otras son combinaciones.

Para cada capa, la primera y última columna, así como el primero y último renglón, tienen conductancias a través de la capa exterior igual a cero. Las condiciones para celdas interiores se codifican para cada capa. Estas codificaciones se almacenan y corresponden a:

IBOUND	< 0	celda carga constante
IBOUND	= 0	celda inactiva (no flujo)
IBOUND	> 0	celda de carga variable.(varia con)

2.5.2 Espacio y estructuras de entrada y de salida

El espacio se almacena en un arreglo unidimensional llamado "X", en el cual se construye una estructura de direccionamiento dinámica. Esto permite el ajuste al espacio disponible de la máquina en que se haya instalado el modelo

La estructura de entrada se basa en un elemento del lenguaje Fortran llamado Número de Unidad Lógico (*logic unit number, LUN*). El programa se divide en el paquete Basic y varias opciones mayores. Las opciones se especifican en el arreglo IUNIT que se lee en *Define* por medio de *Basic*. Si la opción no se requiere se identifica con cero. Para las unidades se deben usar consistentemente las mismas para tiempo y longitud.

La salida por norma se refiere a las cargas y valores totales de cada periodo de cálculo.

2.5.3 Programa Principal

El programa: 1) controla el orden en el cual los módulos primarios se ejecutan y 2) sirve como sistema de cambio para la información (listados del programa principal se incluyen en los anexos de los capítulos 3 y 4).

1. Establece la longitud del arreglo X (LENX) donde se almacenan y listan los datos.
2. Asigna las entradas a Basic en la unidad 1 y salida impresa en la unidad 6.
3. Se define el problema en término de renglones, columnas, capas, períodos de cálculo y opciones mayores.
4. Coloca el espacio en el arreglo X para cada arreglo y lista de datos.
5. Si X no es suficiente, termina. Se redefinen X y LENX.
6. Lee y prepara la información que es constante en la simulación.
7. Para cada periodo de cálculo:
 - a) lee información para calcular el tiempo de cálculo.
 - b) lee y prepara la información que cambia en cada uno.
 - c) para cada incremento de tiempo:
 - calcula su longitud y cambia las nuevas cargas desde el incremento anterior.
 - formula las ecuaciones, calcula la solución aproximada y detiene la iteración cuando hay convergencia.
 - determina el tipo y la cantidad de salida para cada uno.
 - calcula los términos totales y si se especifica, también los términos de flujo de cada celda.
 - imprime y/o registra cargas y/o abatimientos.
 - si no hay convergencia, STOP.
8. Termina el programa

REFERENCIAS

1. Mc Donald, M. G. y Harbaugh, A. W., A Modular three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. Scientific Publication Co. Washington. D. C., 1984.
2. Hantush, M. S. y C. E. Jacob, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Eos Trans. AGU. 36(1) p. 95-100, 1955.
3. Herrera, I., Yates, R. y Hennart, J.P. "Estudio de Hundimiento y Balance de los Acuíferos Subterráneos de la Ciudad de México". Elaborado para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Investigaciones Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS), UNAM, 1982.
4. Todd, D. K., Groundwater Hidrology, John Wiley & Sons, New York, 1980.

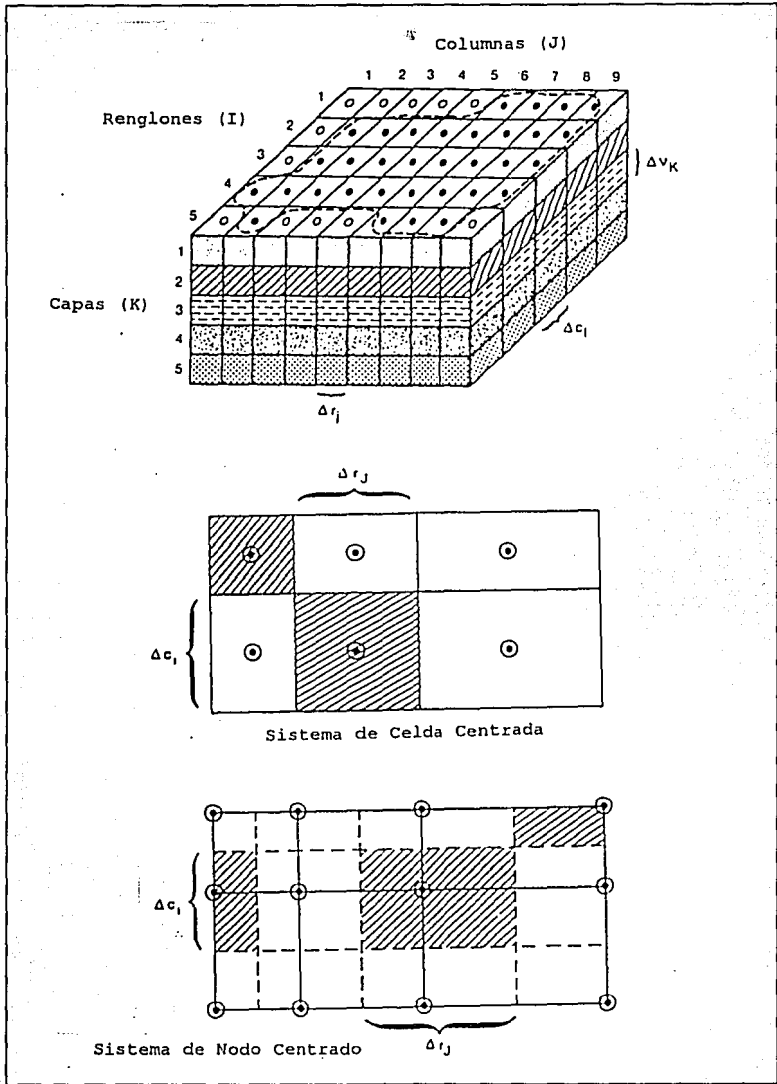


Figura 2.1

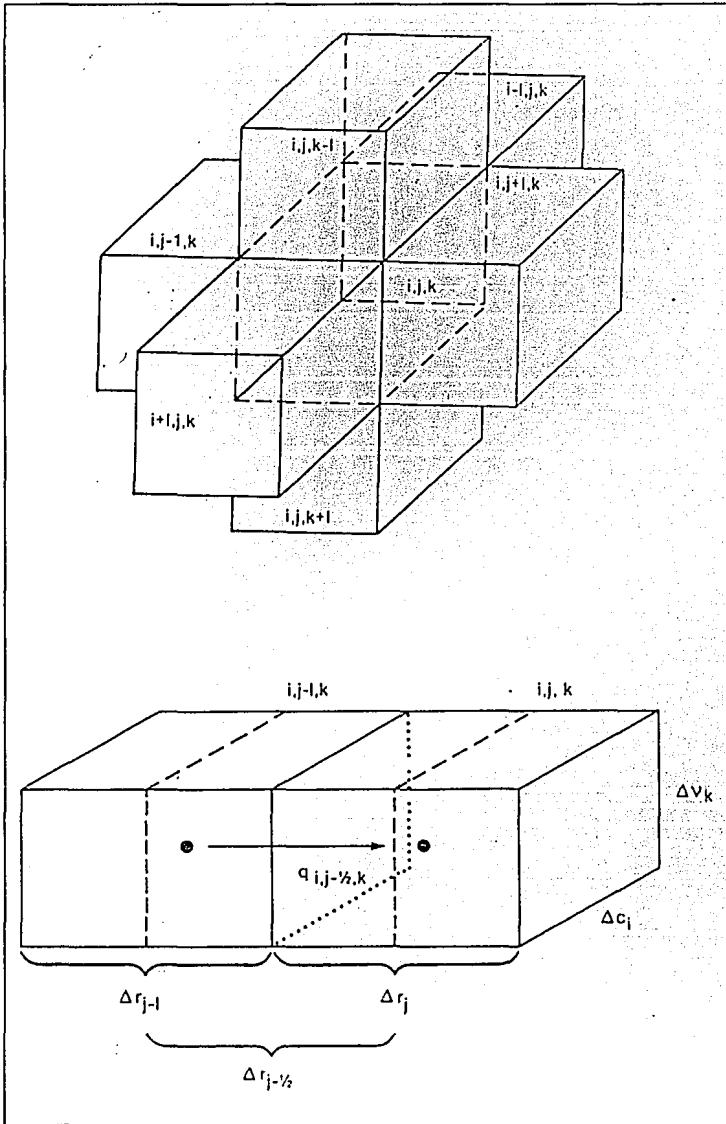


Figura 2.2

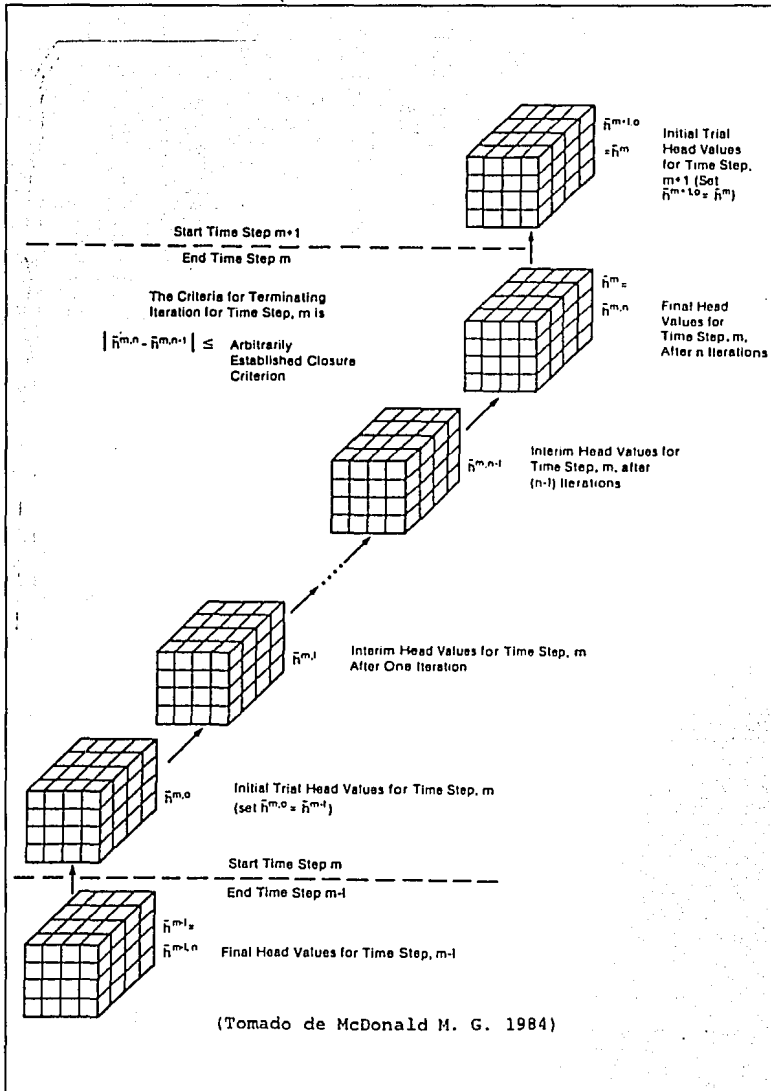
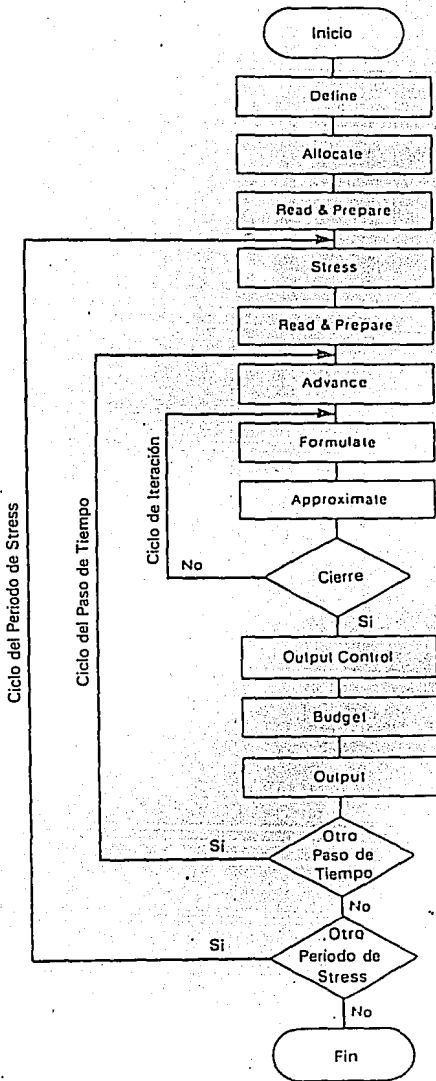


Figura 2.3



Define: Lee datos especificando número de renglones y columnas, capas, periodos de cálculo (*stress periods*), y opciones del programa principal.

Allocate: Separa espacios en la computadora para almacenar datos.

Read & Prepare: Lee información que es constante en la simulación. Prepara los datos haciendo los cálculos necesarios.

Stress: Determina la longitud de un periodo de cálculo (*stress period*) y calcula los términos para dividir el periodo de cálculo en incrementos de tiempo.

Read & Prepare: Lee información que cambia de un periodo de cálculo al siguiente. Prepara los datos haciendo los cálculos necesarios

Advance: Calcula la longitud del incremento y fija las cargas, al inicio de un nuevo incremento de tiempo, igual a las cargas calculadas al final del incremento anterior.

Formulate: Calcula los coeficientes de las ecuaciones de diferencias finitas de cada celda.

Approximate: Hace un corte al aproximar la solución del sistema de ecuaciones de diferencias finitas.

Output Control: Determina si los resultados deben ser escritos o guardados en disco para ese incremento de tiempo. Manda señales a Budget o a Output para indicar exactamente que información de debe sacarse.

Budget: Calcula los términos volumétricos y calcula y guarda para cada componente del mismo.

Output: Imprime y guarda las cargas, abatimientos y cálculos volumétricos de acuerdo con las señales que recabe de Output Control.

Figura 2.4 Estructura de todo el Programa

CAPÍTULO 3

INCORPORACIÓN DEL EFECTO DE LAS ARCILLAS CUANDO LA CONSOLIDACIÓN ES LINEAL

El tratamiento lineal de las arcillas es incorporado por medio de la formulación integrodiferencial del acuitardo. Las ecuaciones integrodiferenciales fueron obtenidas cuando se analizó el comportamiento de los acuitardos que separan formaciones acuíferas, principalmente cuando el almacenamiento tiene un papel importante en las respuesta de un acuífero alimentado en un sistema de acuíferos semiconfinados. Previamente Hantush y Jacob en 1955 [1] obtuvieron una solución bajo la consideración de que el acuitardo es solo transmisor de agua, esto es, el acuífero principalmente recibe una alimentación proporcional al gradiente en el acuitardo. Posteriormente, Hantush en 1960 [2] propuso ecuaciones para periodos cortos de tiempo, tomando en cuenta el almacenamiento del acuitardo y finalmente, propuso soluciones también para tiempos largos.

Para el acoplamiento de la función de respuesta de un acuitardo, cuyo almacenamiento es fuente de recarga vertical del acuífero principal, cuando este último se encuentra bajo el primero, se considera que el movimiento del agua en el acuitardo es esencialmente vertical y como primera aproximación, que el movimiento se torna horizontal al penetrar al acuífero principal.

3.1 Formulación integrodiferencial del acuitardo

A continuación se explican las bases y la forma en que se construyó el nuevo modelo, desarrollado durante el presente estudio. Las ecuaciones que gobiernan el flujo subterráneo son (ver notación al final del capítulo):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial s}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial s}{\partial t} \quad (3.1.1)$$

en los acuíferos principales. En los acuitardos, en cambio, las ecuaciones son:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K' \frac{\partial s'}{\partial z} \right) = S_s' \frac{\partial s'}{\partial t} \quad (3.1.2)$$

debido a que en ellos el flujo es predominantemente vertical. El flujo en la capa dura se consideró bidimensional, por lo que ahí se aplicaron las ecuaciones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial s}{\partial y} \right) + K' \left[\frac{\partial s'}{\partial z} \right]_{z=0} = S_s \frac{\partial s}{\partial t} \quad (3.1.3)$$

Debe observarse que el tercer término del miembro izquierdo de la ecuación (3.1.3), es el aporte que hacen los acuitardos a la capa dura.

Las condiciones de frontera entre los diferentes estratos son:

$$s' = s$$

$$K' \frac{\partial s'}{\partial z} = K \frac{\partial s}{\partial z} \quad (3.1.4)$$

entre las arcillas y el acuífero granular; y continuidad de los niveles piezométricos y de la componente vertical de la velocidad de flujo, al pasar de unas a otras de las demás formaciones. Para el tratamiento de los acuíferos principales se utilizó el modelo modular tridimensional de McDonald y Harbaugh [3] y para el de los acuitardos la Teoría Integro-Diferencial de Herrera y colaboradores. Los rasgos esenciales de la forma en que estos dos procedimientos se combinaron, se explican a continuación.

Debido a la segunda condición de las ecuaciones (3.1.4) hay un aporte del acuitardo a través de la frontera superior. Este flujo se calculó por medio de la teoría Integrodiferencial y se incorporó en el modelo tridimensional de los acuíferos principales a través de la frontera superior.

El modelo de McDonald y Harbaugh es un modelo de celdas. En esta clase de procedimiento, la región ocupada por los acuíferos se divide en un número finito de celdas (Fig. 5.13) y las ecuaciones de flujo se integran sobre cada una de ellas. Como se mencionó antes, a los acuíferos principales se les dio el tratamiento tridimensional, por lo que las celdas en este caso son paralelepípedos. Las celdas se numeran utilizando los índices i, j y k . Además el número total de divisiones en las dos direcciones horizontales son I y J mientras que en la vertical son L .

Al integrar la ecuación (3.1.1) se obtiene:

$$\left[T_{x,j,k}^x \frac{\partial s}{\partial n} \right]_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} + \left[T_{i,s,k}^y \frac{\partial s}{\partial n} \right]_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} + \left[T_{i,j,s}^z \frac{\partial s}{\partial n} \right]_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = \left(S_{i,j} S' \frac{\partial s}{\partial t} \right)_{i,j,k} \quad (3.1.5)$$

Los seis términos que aparecen en el miembro izquierdo de la ecuación (3.1.5) representan el flujo a través de cada una de las seis caras de la celda correspondiente a los índices ij,k . En un paso posterior estos términos se aproximan por:

$$\left[T^x \frac{\partial s}{\partial l} \right]_{l+\frac{1}{2},j,k} \approx T^x_{i+\frac{1}{2},j,k} \left[\frac{s_{i+1,j,k} - s_{i,j,k}}{\Delta x} \right] \quad (3.1.6)$$

y aproximaciones similares para los demás. Al término del miembro derecho de la ecuación (3.1.5), se le aplica un esquema theta (θ) de integración en el tiempo y de esta manera se obtienen ecuaciones heptadiagonales.

Una ventaja muy importante del método de celdas es precisamente que produce matrices heptadiagonales. Esta clase de matrices ha sido ampliamente estudiada en la literatura internacional y existe un gran número de procedimientos para invertirlas, algunos de ellos sumamente eficientes. El modelo aquí descrito, proporciona dos opciones: el secuencial modificado y el SIP (Strongly Implicit Procedure) de Stone [4].

Para evaluar el aporte del acuitardo se utiliza el método integrodiferencial. Su aplicación es directa, utilizando principalmente los resultados de Herrera, *et. al.* [5,6]. En la frontera común entre el acuífero y el acuitardo, el flujo por unidad de área está dado por:

$$K \frac{\partial s}{\partial z} = K' \frac{\partial s'}{\partial z} = -\frac{K'}{b'} \left[\int_0^t \frac{\partial s}{\partial t} (t - \tau) f(\tau) d\tau \right] \quad (3.1.7)$$

$$\text{donde: } f(\tau) = 1 + 2 \sum_1^{\infty} \exp(-n^2 \pi^2 \tau) \quad (3.1.8)$$

mientras que $\tau' = \alpha' \tau / (b')^2$. Tomando en cuenta que el abatimiento inicial del sistema es nulo, la ecuación (3.1.7) puede escribirse en la forma:

$$K \frac{\partial s}{\partial z} = -Cs(t) - C \int_0^t \frac{\partial s}{\partial t} (t - \tau) g(\tau) d\tau \quad (3.1.9)$$

donde $C = k'/b'$; y

$$g(\tau) = 2 \sum_1^{\infty} \exp(-n^2 \pi^2 \tau) \quad (3.1.10)$$

En aplicaciones numéricas de la fórmula (3.1.9), es necesario aproximar la función $g(\tau)$. Se utilizará una forma muy eficiente de hacerlo, debida a Herrera y Yates [6]. El

procedimiento se puede hacer tan exacto como se desee, dependiendo del número de términos en que se trunque la serie de exponenciales de la ecuación (3.1.10). Sea N dicho número. Entonces se define la función g_N por la ecuación:

$$g_N(\tau) = A_N \delta(\tau) + 2 \sum_1^N \exp(-n^2 \pi^2 \tau) \quad (3.1.11)$$

donde $A_N = \frac{1}{3} - (2/\pi^2) \sum_{n=N+1}^{\infty} (n^2)^{-1} = (2/\pi^2) \sum_{n=1}^N (n^2)^{-1}$, [adimensional].

La función g_N se utiliza como aproximación de g . Sustituyendo en la ecuación (3.1.9) se obtiene:

$$K \frac{\partial s}{\partial z} = -Cs(t) - A_N S' \frac{\partial s}{\partial t}(t) - 2C \sum_1^N \int_0^t \frac{\partial s}{\partial t}(t-\tau) \exp(-n^2 \pi^2 \tau) d\tau \quad (3.1.12)$$

Obsérvese que por la simetría, que como operación entre funciones tiene la convolución:

$$\int_0^t \frac{\partial s}{\partial t}(t-\tau) \exp(-n^2 \pi^2 \tau) d\tau = \int_0^t \frac{\partial s}{\partial t}(\tau) \exp[-n^2 \pi^2 (t-\tau)] d\tau \quad (3.1.13)$$

donde $t' = \alpha' t / (b')^2$. Utilizando (3.1.13) es claro que si se define:

$$Ds_n(t) = \exp(-n^2 \pi^2 t) \int_0^t \frac{\partial s}{\partial t}(\tau) \exp(n^2 \pi^2 \tau) d\tau \quad (3.1.14)$$

entonces:
$$K \frac{\partial s}{\partial z} = -Cs(t) - A_N S' \frac{\partial s}{\partial t}(t) - 2C \sum_1^N Ds_n(t) \quad (3.1.15)$$

La ventaja de haber introducido las funciones $Ds_n(t)$ por medio de las ecuaciones (3.1.14), es que cuando se lleva a cabo la integración de las ecuaciones paso a paso en el tiempo, las funciones $Ds_n(t)$ se actualizan fácilmente sin recargar la memoria de la computadora. El procedimiento para hacerlo es debido a Herrera y Yates [6]. Usando la definición (3.1.14) de esas funciones, se tiene:

$$\begin{aligned} Ds_n(t + \Delta t) &= \exp[-n^2 \pi^2 (t' + \Delta t')] \int_0^{t' + \Delta t'} \frac{\partial s}{\partial t}(\tau) \exp(-n^2 \pi^2 \tau) d\tau \\ &= \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t') Ds_n(t) + \exp[-n^2 \pi^2 (t' + \Delta t')] \int_t^{t' + \Delta t'} \frac{\partial s}{\partial t}(\tau) \exp(-n^2 \pi^2 \tau) d\tau \end{aligned} \quad (3.1.16)$$

de la última integral de la ecuación (3.1.16) se obtiene [6]:

$$Ds_n(t + \Delta t) = \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t') \left[Ds_n(t) + \int_0^{\Delta t'} \frac{\partial s}{\partial t}(t + \tau) \exp(n^2 \pi^2 \tau') d\tau \right] \quad (3.1.17)$$

Usando integración Gaussiana para evaluar la última integral, se obtiene:

$$Ds_n(t + \Delta t) = \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t') Ds_n(t) + \left[\exp(-n^2 \pi^2 \Delta t'/2) \right] \Delta s \quad (3.1.18)$$

la fórmula (3.1.18) se aplica recursivamente partiendo de las condiciones iniciales $s(0)=0$ y $Ds(0)=0$. Esto conduce a que en el primer incremento de tiempo se tiene:

$$Ds_n(\Delta t) = s(\Delta t) \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t'/2) \quad (3.1.19)$$

En un modelo tridimensional de celdas como el que se desarrolló, para incorporar el efecto del acuitardo es necesario solamente modificar el tratamiento de las celdas vecinas al mismo. En ellas hay una aportación del acuitardo igual a la velocidad de flujo por el área de la celda. A este aporte se le llamó q' . Usando las ecuaciones (3.1.15) y (3.1.18), se obtiene:

$$q'(t + \Delta t) = \Delta x \Delta y \left\{ \frac{K'}{b'} \left[s(t + \Delta t) + 2 \sum_1^N \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t') Ds_n(t) + 2 \Delta s \sum_1^N \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t'/2) \right] + A_N S' \frac{\partial s}{\partial t}(t + \Delta t) \right\} \quad (3.1.20)$$

Aquí, el área horizontal de la celda es $\Delta x \Delta y$. Al incorporar el tratamiento numérico del modelo, se ve la conveniencia de descomponer $q'(t + \Delta t)$, en dos partes:

$$qm_{em}(t) = \frac{K' \Delta x \Delta y}{b'} \left\{ s(t) + 2 \sum_1^N \left[\exp(-n^2 \pi^2 \Delta t') Ds_n(t) + \Delta s \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t'/2) \right] \right\} \quad (3.1.21)$$

y el término $\Delta x \Delta y A_N S' \partial s / \partial t$. Este último término, debido a que contiene la derivada respecto al tiempo del abatimiento, implica una modificación de la matriz del sistema de ecuaciones, mientras que el definido por la ecuación (3.1.21) se puede incorporar como una fuente en cada paso del tiempo.

Dividiendo $\Delta x \Delta y A_N S'$, entre el volumen de la celda se obtiene:

$$S_z^a = A_N S_z' (b' / \Delta z) \quad (3.1.22)$$

de manera que para incorporar este término en el modelo de celdas, basta aumentar el coeficiente de almacenamiento específico de la celda vecina al acuitardo por esta cantidad.

3.2 Incorporación del Efecto de la Memoria en Arcillas al Modelo

De las expresiones correspondientes al caudal de alimentación del acuitardo y evaluadas con aproximación en diferencias finitas, se definen las bases para el diseño de una subrutina que permita simular el efecto de inyección al acuífero desde un acuitardo. La subrutina se denominó de memoria MEM1FM ya que se usa la formulación integrodiferencial apoyada en funciones de memoria.

3.2.1 Caudal de Alimentación

El caudal de alimentación q_{mem} , desde el acuitardo hacia el acuífero se expresa por:

$$q_{mem} = K' \Delta c_i \Delta r_j \left\{ s(t + \Delta t) + 2 \sum_{n=1}^N \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t') Ds_n(t) \right. \\ \left. + 2[s(t + \Delta t) - s(t)] \sum_{n=1}^N \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t' / 2) + \frac{b'^2}{\alpha'} A_N \frac{\partial s}{\partial t}(t + \Delta t) \right\} \quad (3.2.1)$$

donde:

$\Delta c_i \Delta r_j$ = ancho de columna y renglón de la celda bajo el acuitardo [L]

$s(t + \Delta t)$ = abatimiento del acuífero bajo el acuitardo [L]

$\Delta t'$ = incremento del tiempo transformado

= $(\alpha' / b'^2) \Delta t$ [adimensional]

$Ds_n(t)$ = vector auxiliar [L]

τ = tiempo transformado en la convolución [T]

De la lista de variables y unidades; la dimensión de q_{mem} es:

$$[q_{mem}] = [L^3 T^{-1}] \quad (3.2.2)$$

que representa volumen por unidad de tiempo, de un caudal.

Para su mejor manejo es conveniente separar, en la ecuación (3.2.1) la expresión del vector auxiliar $Ds_n(t)$ y usar otra expresión del tiempo.

$$Ds_n(t_m) = \sum_{n=1}^N \left\{ \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t') Ds_n(t_{m-1}) + \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t' / 2) [s(t_m) - s(t_{m-1})] \right\} \quad (3.2.3)$$

donde:

$$t_m = t + \Delta t$$

$$t_{m-1} = t$$

El vector auxiliar $Ds_n(t_m)$ se define en función auxiliar anterior $Ds_n(t_{m-1})$ y del abatimiento diferencial multiplicado por el exponencial que representa la memoria del acuitado.

En la ecuación (3.2.3), por su definición, $Ds_n(t_{m-1})$ es cero en $t=0$ y en ese instante sólo rige el segundo término; este sólo depende de $s(t_m)$ y del exponencial ya que $s(t_{m-1})=0$. El vector auxiliar obtenido pasa a ser $Ds_n(t_m)$ en el siguiente paso de tiempo. El efecto del acuitado en el acuífero será menor si Δt es pequeño.

La ecuación (3.2.1) se expresa ahora como:

$$q_{mem} = \frac{K' \Delta c_i \Delta r_j}{b'} \left[s(t_m) + \frac{b'^2}{\alpha'} A_N \frac{\partial s}{\partial t}(t_m) + 2Ds_n(t_m) \right] \quad (3.2.4)$$

definiendo el abatimiento como $S = h_0 - h$, con h_0 como la carga inicial y h como la carga hidráulica actual

$$s(t_m) - s(t_{m-1}) = h_0 - h(t_m) - h_0 + h(t_{m-1})$$

$$= h(t_{m-1}) - h(t_m) \quad (3.2.5)$$

$$\frac{\partial s'}{\partial t}(t_m) = \frac{\partial h}{\partial t}(t_m) \quad (3.2.6)$$

$$s(t_m) = h_0 - h(t_m) \quad (3.2.7)$$

y la ecuación (3.2.3) queda así

$$Ds_n(t_m) = \sum_{n=1}^N \left\{ \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t') Ds_n(t_{m-1}) + \exp(-n^2 \pi^2 \Delta t'/2) [h(t_{m-1}) - h(t_m)] \right\} \quad (3.2.8)$$

y entonces la (3.2.4) queda así:

$$q_{mem} = \frac{K' \Delta c_i \Delta r_j}{b'} \left[h_0 - h(t_m) + \frac{b'^2}{\alpha'} A_N \frac{\partial s}{\partial t}(t_m) + 2Ds_n(t_m) \right] \quad (3.2.9)$$

El tercer término de la anterior ecuación se puede colocar al lado derecho de la ecuación general de flujo para actualizar el coeficiente de almacenamiento específico. Se transforma como se ve a continuación:

$$K' \Delta c_i \Delta r_j \left[\frac{b'}{\alpha'} A_N \frac{\partial s}{\partial t}(t_m) \right] = -S_2' \Delta c_i \Delta r_j b' A_N \frac{\partial h}{\partial t}(t_m) \quad (3.2.10)$$

que equivale a:

$$K' \Delta c_i \Delta r_j \left[\frac{b'}{\alpha'} A_N \frac{\partial s}{\partial t}(t_m) \right] = -S_2' \Delta c_i \Delta r_j b' A_N \left[\frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \right] \quad (3.2.11)$$

Los dos términos resultantes, que dependen de la carga hidráulica de la celda i,j,k en t_m y t_{m-1} y pueden ser adaptados a los coeficientes HCOF $_{i,j,k}$ y RHS $_{i,j,k}$ del modelo.

La definición de HCOF $_{i,j,k}$ se puede expresar de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} \text{HCOF}_{i,j,k} h_{i,j,k}^m &= [P_{i,j,k} - SCI_{i,j,k} / (t_m - t_{m-1})] h_{i,j,k}^m \\ &= [P_{i,j,k} - S_{2,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k / (t_m - t_{m-1})] h_{i,j,k}^m \end{aligned} \quad (3.2.12)$$

adicionando el primer término de (3.2.11):

$$\text{HCOF}_{i,j,k} h_{i,j,k}^m = \left[P_{i,j,k} - \left(S_{2,j,k} + \frac{b' S_2' A_N}{\Delta V_k} \right) \frac{\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k}{(t_m - t_{m-1})} \right] h_{i,j,k}^m$$

$$\text{las } S_{2,j,k} \text{ pasan a ser: } \left(S_{2,j,k} + \frac{b' S_2' A_N}{\Delta V_k} \right) \quad (3.2.13)$$

En el modelo RHS se define como:

$$\begin{aligned} \text{RHS}_{i,j,k} &= -Q_{i,j,k} - SCI_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1}) \\ &= -Q_{i,j,k} - S_{2,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k h_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1}) \end{aligned} \quad (3.2.14)$$

Si a (3.2.14) se le resta el segundo término de (3.2.11)

$$\text{RHS}_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - \left(S_{2,j,k} + \frac{b' S_2' A_N}{\Delta V_k} \right) \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k h_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1}) \quad (3.1.15)$$

donde el término entre paréntesis es el (3.2.13) y entonces el coeficiente de almacenamiento se modifica en los dos cálculos en el acuífero bajo el acuitardo.

Los términos restantes de (3.2.9) pueden ser reagrupados en la (3.2.15). Se añaden con signo negativo con la siguiente expresión:

$$q_{mem} = \frac{K' \Delta c_i \Delta r_i}{b'} [h_0 - h(t_m) + 2Ds_n(t_m)] \quad (3.2.16)$$

esta expresión se agrega al cálculo de $Q_{i,j,k}$ y se escogió para incluir el resultado del paquete denominado WEL.

3.2.2 Procedimiento de cálculo

- i) Utilizar durante la operación de la subrutina el arreglo HOLD, que contiene la carga del ciclo inmediato anterior $h_{i,j,k}^{m-1}$. Así mismo se utiliza HNEW, con la carga $h_{i,j,k}^m$, de acuerdo con el modelo.
- ii) Introducir el efecto del abatimiento en $S_{i,j,k}$ de acuerdo con 3.2.13.
- iii) Añadir a $Q_{i,j,k}$ la expresión (3.2.14) que contiene en las cargas HOLD y HNEW, para afectar el caudal de drenaje de la celda.
- iv) Se repiten los cálculos anteriores mientras en cada paso sucesivo de tiempo Δt .
- v) El cálculo de q_{mem} parte un valor inicial $Ds_n(t_{m,i}) = 0$. Con éste se calcula el nuevo $Ds_n(t_{m,i})$ en función de HNEW = $h(t_{m,i})$ y HOLD = $h(t_{m,i-1})$.

3.2.3 Implantación del Paquete de Subrutinas de la Formulación de Memoria

Con las expresiones establecidas hasta la sección anterior se implantaron varias subrutinas que se agrupan bajo la denominación de MEM.

Los módulos se denominaron MEM1FM, MEM1RP y COE1ALM; se modificó el bloque MAIN y el módulo BCF1RP. Las implantaciones y modificaciones se llevaron a cabo en el Instituto de Geofísica de la UNAM.

Para el propósito de formular la memoria se insertaron: MEM1FM y MEM1RP. En MEM1FM se calculan los coeficientes An , $Dsn(t)$ y QMEM (ecuaciones 3.2.3 y 3.2.4). Se utiliza el arreglo WEL, que contiene el valor de los caudales de extracción por celda para sumar el caudal q_{mem} y así adicionarlo al lado derecho de la ecuación (RHS). La segunda rutina del paquete lee las matrices para conocer los coeficientes K' , Ss' y b' del acuitardo. Se

presentan los listados al final y a continuación se presenta el listado de las variables que intervienen, con su explicación breve.

En MEM1FM se establecen el número máximo de n para el cálculo de AN (NN) y la carga inicial h_0 (HO); se calculan AN , $\Delta t'$, $DS_n(t)$ y QMEM que se añade a QW para formar WELL.

En el cálculo de QMEM, H_0 es el valor del nivel piezométrico original en $t=0$, tiempo en el cual $DS_n=0$. DS_n será positivo si $h_{m-1} - h_m$ es positivo, es decir cuando exista abatimiento en el acuífero; DS_n será negativo en caso contrario, es decir, con una recuperación. Si QW es siempre de valor negativo, cuando QMEM sea positivo corresponderá a una recuperación de la carga piezométrica en la celda, equivalente a un drenaje hacia celdas vecinas del modelo. Si QMEM es negativo, lo que significa drenaje hacia el acuitardo, se anula (QMEM=0) ya que se considera que el acuitardo no se rehidrata después de haberse drenado.

El módulo MEM1RP se utiliza para la lectura y dimensionamiento de los arreglos b (BP en el código) S_p (SP) K' (RKBP) y el espesor de la celda (DELVK) CTRKPB es una constante que afecta el valor de K' y CNSTBP afecta b' .

HNEW y HOLD de cada celda se toman del incremento de tiempo anterior y se usan para el cálculo del nuevo QMEM para que éste a su vez se añada al valor WELL correspondiente a la celda para su uso en el siguiente paso de tiempo

El coeficiente de almacenamiento específico de la capa superior del acuífero en contacto con el acuitardo se modifica mediante la rutina COEIALM. Su listado aparece al final. Con el Cálculo de AN para $n=5$ (NN=5) y con los valores de b' y S_p , se obtiene el nuevo valor del coeficiente de almacenamiento específico. Este se actualiza una sola vez, en el primer paso de tiempo para celdas en contacto con el acuitardo.

El bloque MAIN es modificado en cuatro puntos, respecto a su forma original:

```

1.  COMMON X(90000)
2.  DIMENSION RKBP(42,32), BP(42,32), SP(42,32), DSINT(42,32), QW(1000)
3.  1, B1(42,32), HUNDTO(32,42)
   CALL MEM1RP(RKBP, BP, B1, SP, NCOL, HROW, HLAY, X(LCSC1),
4.  1 X(LCHOLD), X(LCHNEW), X(LCDEL), X(LCDELR), SS, DELVK)
   CALL MEM1FM(X(LCHNEW), X(LCHOLD), X(LCWELL),
   1 X(LCIBOU), MXWELL,

```

1 NWEL, X(LCSCI), NCOL, NROW, NLAY, KSTP, X(LCDELRL), X(LCDELCL), DELT,
 2 RKBP, BP, B1, SP, DSINT, QW, X(LCSTRT), DELVK, SS, HUNDTO

El bloque de BCFIRP cambia en un punto:

```
IF(K.EQ.1) CALL COEIALM (SCI(LOC), SP, BP, NROW, NCOL)
```

Los listados se muestran al final.

3.3 Cálculo del Hundimiento

Si se considera confinados a una capa arcilla y a un acuífero subyacente, dentro del área de una celda del modelo tridimensional el hundimiento resultante al cabo de un periodo de tiempo es el siguiente:

$$H = \int_0^t \frac{q_{mem}}{\text{área}} dt$$

donde H = hundimiento del terreno, [L],

q_{mem} = caudal aportado por el acuitardo hacia el acuífero, [L³][T⁻¹],

área = área de la celda, [L²].

si consideramos constante el caudal de aporte así como el área de la celda, el hundimiento para una celda dada de una columna y un renglón del arreglo de celda, durante un periodo de tiempo dado, denominado Δt , es el siguiente:

$$H_{\Delta t} = \frac{q_{mem_{\Delta t}}}{\Delta c \cdot \Delta r} (\Delta t)$$

Para el caso de la subrutina que incorpora la consolidación lineal, este es el valor calculado en cada paso de tiempo de la iteración del modelo. Para el cálculo del valor total en para cada paso de tiempo y para cada celda se suma obteniéndose el total al final de las iteraciones.

3.4 Tiempos Cortos.

El tratamiento numérico del rango de tiempos cortos en acuíferos semiconfinados es abordado por Chen y Herrera [7]. Si se hace el tratamiento de manera directa discretizando,

el procedimiento dependerá del número y distribución de los nodos usados. Si se plantea la aplicación de la ecuación integrodiferencial, la evolución del acuitardo se obtiene por medio de una serie de expansión, donde la exactitud depende del número de términos de la serie de expansión, lo cual permite un control más fácil.

3.5 Notación

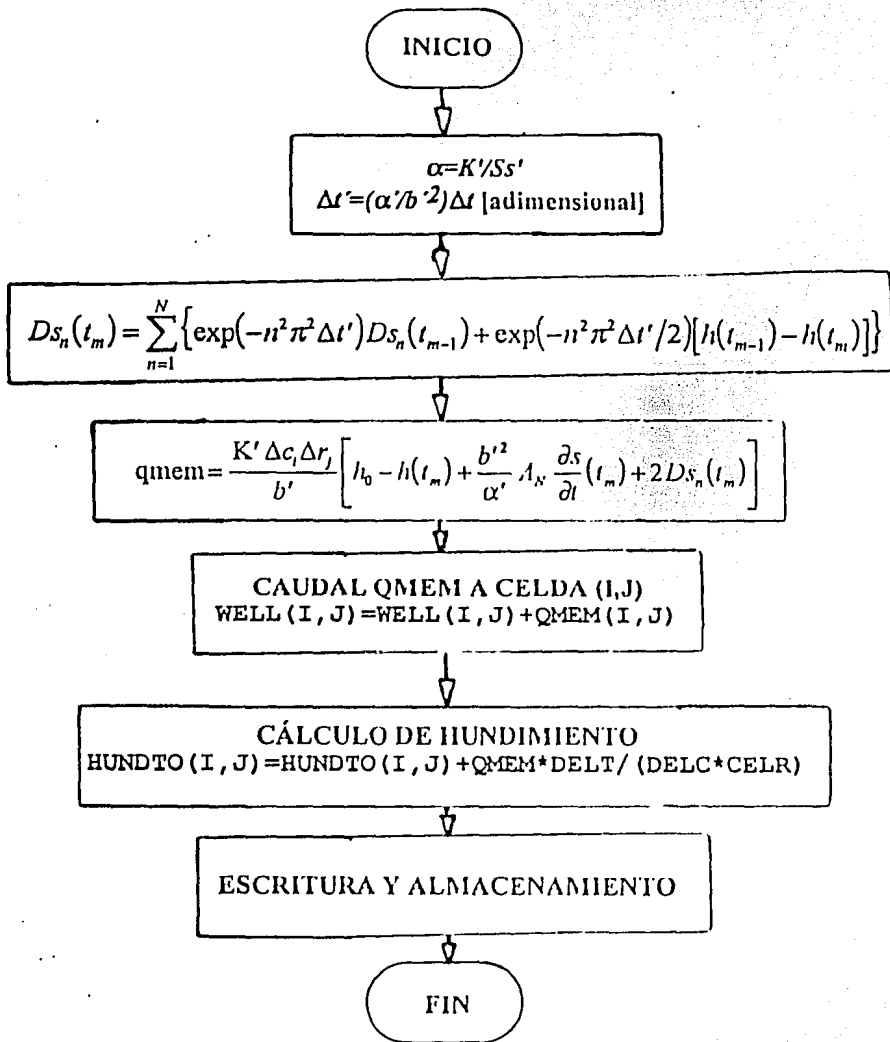
- $A_N = \frac{1}{3} - (2/\pi^2) \sum_{n=N+1}^{\infty} (n^2)^{-1} = (2/\pi^2) \sum_{n=1}^N (n^2)^{-1}$, [adimensional].
- b_i = Espesor del i -ésimo acuífero, [L].
- b' = Espesor del acuitardo, [L].
- K_i = Conductividad hidráulica, i -ésimo acuífero, [L][T⁻¹].
- K' = Conductividad hidráulica vertical del acuitardo, [L][T⁻¹].
- S_x^a = Corrección del coeficiente de almacenamiento específico del acuífero, [L¹].
- s = Abatimiento en el acuífero, [L].
- s' = Abatimiento en el acuitardo, [L].
- S_x = coeficiente de almacenamiento específico del acuífero [L⁻¹].
- S_x' = coeficiente de almacenamiento específico del acuitardo [L⁻¹].
- S = coeficiente de almacenamiento del acuífero = $S_x b$ [adimensional].
- S' = coeficiente de almacenamiento del acuitardo = $S_x' b$ [adimensional].
- Δs = Incremento de abatimiento del acuífero, [L].
- T = transmisividad del acuífero [L][T⁻¹] = $K b$.
- α = coeficiente de difusión del acuífero [L][T⁻¹] = K/S_x .
- α' = coeficiente de difusión del acuitardo [L²][T⁻¹] = K'/S_x' ; = T'/S' .
- T_x = Transmisividad del acuífero en la dirección x , [L][T⁻¹].
- t = Tiempo, [T].
- Δt = Incremento de tiempo, [T].
- t' = Tiempo [adimensional] = $\alpha' t/b^2$.
- x, y, z = Coordenadas, [L].
- V = Volumen del elemento, [L³].
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ = incremento o dimensión de elemento, [L].
- $\delta(t')$ = delta de Dirac, [adimensional].

REFERENCIAS

1. Hantush, M.S. y C. E. Jacob, (1955). Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Eos Trans. AGU. 36(1) p. 95-100.
2. Hantush, M. S. (1960). Modification of the theory of leaky aquifers. J. Geophys. Res. 65(11), p. 3713-3725.
3. Mc Donald Michael G. y Harbaugh Arlen W., (1984). A Modular three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. Scientific Publication co. Wasihngton. D. C.
4. Stone, H.L., "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations", SIAM J. Numer. Anal., 5, No. 3 pp 530-58 1968.
5. Herrera, I. y Rodarte, L., "Integrodifferential Equations for Systems of Leaky Aquifers and Applications. Part. 1: The Nature of Approximate Theories". Water Resources Research, 9 (4), pp 995-1005, 1973. También Instituto de Ingeniería, UNAM, E-6. 1973.
6. Herrera, I. y Yates, R., "Integrodifferential Equations for Systems of Leaky Aquifers. Part 3: A Numerical Method of Unlimited Applicability". Water Resources Research. 13 (4), pp 725-732, 1977.
7. Chen, B. y Herrera, I., "Numerical Treatment of Leaky Aquifers in the Short Time Range", Water Resources Research, 18 (3), pp 557-562, 1982.

□

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA DE MODELACION DE ACUITARDO SOBREYACIENDO A UN ACUIFERO CON EFECTOS DE MEMORIA Y DE CONSOLIDACION.



ANEXO DEL CAPÍTULO 3. LISTADOS.

```

C *****00000010
C MAIN CODE FOR MODULAR MODEL -- 6/1/83 00000020
C BY MICHAEL G. MCDONALD AND ARLEN W. HARBAUGH 00000030
C-----VERSION 1116 28DEC1983 MAIN1 00000040
C *****00000050
C SPECIFICATIONS: 00000060
C ----- 00000070
C 00000080
C COMMON X(99000) 00000090
C DIMENSION SS(50,50), VBVL(4,20), IUNIT(24) 00000100
C DOUBLE PRECISION DUMMY 00000110
C EQUIVALENCE (DUMMY,X(1)) 00000120
C ----- 00000130
C 00000140

DIMENSION RKBP(42,32), BP(42,32), SP(42,32), DSINT(42,32), QW(1000)
1,B1(42,32), HUNDT0(32,42)
CHARACTER*4 HEADNG(32), VBHM(4,20)
CHARACTER*10 RESULT
open(unit=1, file='INBAS.DAT')
open(unit=11, file='BCF.DAT')
open(unit=12, file='WELL.DAT')
open(unit=18, file='RECHARGE.DAT')
open(unit=19, file='SIP.DAT')
open(unit=30, file='COEF.DAT')
open(unit=13, file='DRAIN.DAT')
open(unit=22, file='RIVER.DAT')
open(unit=21, file='EVT.DAT')
open(unit=15, file='SALL.HED')
open(unit=16, file='SALL.DRA')
open(unit=32, file='inout.dat')
call date(result)
write(*,*)result
call time(result)
write(*,*)result
C1-----SET SIZE OF X ARRAY. REMEMBER TO REDIMENSION X. 00000150
LENX=99000 00000160
C 00000170
C2-----ASSIGN BASIC INPUT UNIT AND PRINTER UNIT. 00000180
INBAS=1 00000190
IOUT=6 00000200
C 00000210
C3-----DEFINE PROBLEM ROWS, COLUMNS, LAYERS, STRESS PERIODS, PACKAGES 00000220
CALL BASIDF(ISUM, HEADNG, NPER, ITHUNI, TOTIM, NCOL, NROW, NLAY, 00000230
1 00000240
NODES, INBAS, IOUT, IUNIT) 00000250
C 00000260
C4-----ALLOCATE SPACE IN "X" ARRAY. 00000270
CALL BASIAL(ISUM, LENX, LCHNEW, LCHOLD, LCIBOU, LCCR, LCCC, LCCV, 00000280
1 LCHCOF, LCPHS, LCDEL, LCDEL, LCSTRT, LCBUFF, LCIOFL, 00000290
2 INBAS, ISTRT, NCOL, NROW, NLAY, IOUT) 00000300
IF (IUNIT(1).GT.0) CALL BCFIAL(ISUM, LENX, LCSC1, LCHY, 00000310
1 LCBOT, LCTOP, LCSC2, LCTRPY, IUNIT(1), ISS, 00000320
2 NCOL, NROW, NLAY, IOUT, IBCFCB) 00000330
IF (IUNIT(2).GT.0) CALL WELIAL(ISUM, LENX, LCWELL, MKWELL, NWEL, 00000340
1 IUNIT(2), IOUT, IWELCB) 00000350
IF (IUNIT(3).GT.0) CALL DRNIAL(ISUM, LENX, LCDRAI, NDRAIN, MXDRN, 00000360
1 IUNIT(3), IOUT, IDRNCB) 00000370
IF (IUNIT(8).GT.0) CALL RCHIAL(ISUM, LENX, LCRIRCH, LCRECH, NRCHOP, 00000380
1 NCOL, NROW, IUNIT(8), IOUT, IRCHCB) 00000390
IF (IUNIT(5).GT.0) CALL EVTIAL(ISUM, LENX, LCIEVT, LCEVTR, LCXEXP, 00000400
1 LCSURF, NCOL, NROW, NEVTOP, IUNIT(5), IOUT, IEVTCB) 00000410
IF (IUNIT(4).GT.0) CALL RIVIAL(ISUM, LENX, LCRIVE, MXRIVR, NRIVER, 00000420
1 IUNIT(4), IOUT, IRIVCB) 00000430
IF (IUNIT(7).GT.0) CALL GHBIAL(ISUM, LENX, LCBNDS, NBOUND, MXBND,

```

```

1          IUNIT (7) , IOUT, IGHBCB)                                00000440
IF (IUNIT (9) .GT. 0) CALL SIPIAL (ISUM, LENX, LCEL, LCFL, LCGL, LCV,    00000450
1          LCHDCG, LCLRCH, LCW, MXITER, NPARM, NCOL, NROW, NLAY,      00000460
2          IUNIT (9) , IOUT)                                         00000470
IF (IUNIT (11) .GT. 0) CALL SORIAL (ISUM, LENX, LCA, LCPRES, LCHDCG, LCLRCH, 00000480
1          LCIEQP, MXITER, NCOL, NROW, NLAY, NSLICE, MBW, IUNIT (11) , IOUT) 00000490
C          00000500
C5-----IF THE "X" ARRAY IS NOT BIG ENOUGH THEN STOP.              00000510
          IF (ISUM-1.GT.LENX) STOP                                     00000520
C          00000530
C6-----READ AND PREPARE INFORMATION FOR ENTIRE SIMULATION.         00000540
          CALL BASIRP (X (LCIBOU) , X (LCHNEW) , X (LCSTRT) , X (LCHOLD) ,    00000550
1          ISTRT, INBAS, HEADNG, NCOL, NROW, NLAY, NODES, VBVL, X (LCIOFL) ,    00000560
2          IUNIT (12) , IHEDFM, IDDFM, IHEDUN, IDDNUN, IOUT)           00000570
IF (IUNIT (1) .GT. 0) CALL BCFIRP (X (LCIBOU) , X (LCHNEW) , X (LCSC1) ,    00000580
1          X (LCHY) , X (LCCR) , X (LCCC) , X (LCCV) , X (LCDEL) ,          00000590
2          X (LCDEL) , X (LCBOT) , X (LCTOP) , X (LCSC2) , X (LCTRPY) ,      00000600
3          IUNIT (1) , ISS, NCOL, NROW, NLAY, NODES, IOUT)           00000610
          CALL MEMIRP (RKBP, BP, B1, SP, NCOL, NROW, NLAY, X (LCSC1) ,      00000620
1          X (LCHOLD) , X (LCHNEW) , X (LCDEL) , X (LCDEL) , SS, DELVK)      00000630
          IF (IUNIT (9) .GT. 0) CALL SIPIRP (NPARM, MXITER, ACCL, HCLOSE, X (LCW) , 00000640
1          IUNIT (9) , IPCALC, IPRSIP, IOUT)                             00000650
IF (IUNIT (11) .GT. 0) CALL SORIRP (MXITER, ACCL, HCLOSE, IUNIT (11) ,    00000660
1          IPRSOR, IOUT)                                               00000670
C          00000680
C7-----SIMULATE EACH STRESS PERIOD.                                00000690
          DO 300 KPER=1, NPER                                         00000700
C          00000710
C7A-----READ STRESS PERIOD TIMING INFORMATION.                     00000720
          CALL BAS1ST (NSTP, DELT, TSMULT, PERTIM, KPER, INBAS, IOUT)      00000730
C          00000740
C7B-----READ AND PREPARE INFORMATION FOR STRESS PERIOD.           00000750
          IF (IUNIT (2) .GT. 0) CALL WELLRP (X (LCWELL) , NWEL, MXWELL, IUNIT (2) , 00000760
1          IOUT)                                                       00000770
          IF (IUNIT (3) .GT. 0) CALL DRHIRP (X (LCDRAI) , NDRAIN, MXDRH, IUNIT (3) , 00000780
1          IOUT)                                                       00000790
          IF (IUNIT (8) .GT. 0) CALL RCHIRP (NRCHOP, X (LCIRCH) , X (LCRECH) ,    00000800
1          X (LCDELR) , X (LCDEL) , NROW, NCOL, NLAY, IUNIT (8) , IOUT)      00000810
          IF (IUNIT (5) .GT. 0) CALL EVTIRP (NEVTOP, X (LCIEVT) , X (LCEVTR) ,    00000820
1          X (LCEXDP) , X (LCSURF) , X (LCDELR) , X (LCDEL) , NCOL, NROW,      00000830
2          NLAY, IUNIT (5) , IOUT)                                       00000840
          IF (IUNIT (4) .GT. 0) CALL RIVIRP (X (LCRIVR) , NRIVER, MXRIVR, IUNIT (4) , 00000850
1          IOUT)                                                       00000860
          IF (IUNIT (7) .GT. 0) CALL GHBIRP (X (LCBND) , NBOUND, MXBND, IUNIT (7) , 00000870
1          IOUT)                                                       00000880
C          00000890
C7C-----SIMULATE EACH TIME STEP.                                  00000900
          DO 200 KSTP=1, NSTP                                          00000910
C          00000920
C Para modelar CON el efecto LINEAL del acuitardo se INTRODUCE.     00000930
C LA RUTINA RESPECTIVA: MEM1 13 dic 1993                             00000940
C          00000950
          CALL MEMIFM (X (LCHNEW) , X (LCHOLD) , X (LCWELL) ,              00000960
1          X (LCIBOU) , MXWELL,                                         00000970
2          NWEL, X (LCSC1) , NCOL, NROW, NLAY, KSTP, X (LCDELR) , X (LCDEL) , DELT, 00000980
3          RKBP, BP, B1, SP, DSINT, QW, X (LCSTRT) , DELVK, SS, HUNDT0)      00000990
C          00001000
C7C1-----CALCULATE TIME STEP LENGTH. SET HOLD=HNEW..              00000910
          CALL BASIAD (DELT, TSMULT, TOTIM, PERTIM, X (LCHNEW) , X (LCHOLD) , KSTP, 00000920
1          NCOL, NROW, NLAY)                                             00000930
C          00000940
C7C2-----ITERATIVELY FORMULATE AND SOLVE THE EQUATIONS.           00000950
          DO 100 KITER=1, MXITER                                        00000960
C          00000970
C7C2A---FORMULATE THE FINITE DIFFERENCE EQUATIONS.                  00000980
          CALL BASIFM (X (LCHCOF) , X (LCRHS) , NCOL, NROW, NLAY, NODES)    00000990
          IF (IUNIT (1) .GT. 0) CALL BCFIFM (X (LCHCOF) , X (LCRHS) , X (LCHOLD) , 00001000

```

```

1      X(LCSC1),X(LCHNEW),X(LCIBOU),X(LCCR),X(LCCC),X(LCCV), 00001010
2      X(LCHY),X(LCTRPY),X(LCBOT),X(LCTOP),X(LCSC2), 00001020
3      X(LCDELRA),X(LCDELRC),DELT,ISS,KITER,KSTP,KPER,NCOL, 00001030
4      NROW,NLAY,IOUT) 00001040
IF(IUNIT(2).GT.0) CALL WEL1FM(NWEL,MXWELL,X(LCRHS),X(LCWELL), 00001050
1      X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY) 00001060
IF(IUNIT(3).GT.0) CALL DRN1FM(NDRAIN,MXDRN,X(LCDRAI),X(LCHNEW), 00001070
1      X(LCHCOF),X(LCRHS),X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY) 00001080
IF(IUNIT(8).GT.0) CALL RCH1FM(NRCHOP,X(LCIRCH),X(LCRECH), 00001090
1      X(LCRHS),X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY) 00001100
IF(IUNIT(5).GT.0) CALL EVT1FM(NEVTOP,X(LCIEVT),X(LCEVTR), 00001110
1      X(LCEXDP),X(LCSURF),X(LCRHS),X(LCVCHF),X(LCIBOU), 00001120
1      X(LCHNEW),NCOL,NROW,NLAY) 00001130
IF(IUNIT(4).GT.0) CALL RIV1FM(NRIVER,MXRIVR,X(LCIRVR),X(LCHNEW), 00001140
1      X(LCHCOF),X(LCRHS),X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY) 00001150
IF(IUNIT(7).GT.0) CALL GH1FM(NBOUND,MXBND,X(LCBNDS),X(LCHCOF), 00001160
1      X(LCRHS),X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY) 00001170
C 00001180
C7C2B---MAKE ONE CUT AT AN APPROXIMATE SOLUTION. 00001190
IF(IUNIT(9).GT.0) CALL SI1AP(X(LCHNEW),X(LCIBOU),X(LCCR),X(LCCC), 00001200
1      X(LCCV),X(LCHCOF),X(LCRHS),X(LCEL),X(LCFL),X(LCGL),X(LCV), 00001210
2      X(LCW),X(LCHDCG),X(LCLRCH),NPARM,KITER,HCLOSE,ACCL,ICNVG, 00001220
3      KSTP,KPER,IPCALC,IPRSR,MXITER,NSTP,NCOL,NROW,NLAY,NODES, 00001230
4      IOUT) 00001240
IF(IUNIT(11).GT.0) CALL SOR1AP(X(LCHNEW),X(LCIBOU),X(LCCR), 00001250
1      X(LCCC),X(LCCV),X(LCHCOF),X(LCRHS),X(LCA),X(LCRES),X(LCIEQP), 00001260
2      X(LCHDCG),X(LCLRCH),KITER,HCLOSE,ACCL,ICNVG,KSTP,KPER,IPRSOR, 00001270
3      MXITER,NSTP,NCOL,NROW,NLAY,NSLICE,MBW,IOUT) 00001280
C 00001290
C7C2C---IF CONVERGENCE CRITERION HAS BEEN MET STOP ITERATING. 00001300
IF(ICNVG.EQ.1) GO TO 110 00001310
100 CONTINUE 00001320
KITER=MXITER 00001330
110 CONTINUE 00001340
C 00001350
C7C3---DETERMINE WHICH OUTPUT IS NEEDED. 00001360
CALL BAS1OC(NSTP,KSTP,KPER,ISTR,ICNVG,X(LCIOFL),NLAY, 00001370
1 IBUDFL,ICBCFL,IHDDFL,IUNIT(12),IOUT) 00001380
C 00001390
C7C4---CALCULATE BUDGET TERMS. SAVE CELL-BY-CELL FLOW TERMS. 00001400
MSUM=1 00001410
IF(IUNIT(1).GT.0) CALL BCF1BD(VBHM,VBVL,MSUM,X(LCHNEW), 00001420
1      X(LCIBOU),X(LCHOLD),X(LCSC1),X(LCCR),X(LCCC),X(LCCV), 00001430
2      X(LCTOP),X(LCSC2),DELT,ISS,NCOL,NROW,NLAY,KSTP,KPER, 00001440
3      IBCFCB,ICBCFL,X(LCBUFF),IOUT) 00001450
IF(IUNIT(2).GT.0) CALL WEL1BD(NWEL,MXWELL,VBHM,VBVL,MSUM,X(LCWELL), 00001460
1      X(LCIBOU),DELT,NCOL,NROW,NLAY,KSTP,KPER,IWELCB,ICBCFL, 00001470
1      X(LCBUFF),IOUT) 00001480
IF(IUNIT(3).GT.0) CALL DRN1BD(NDRAIN,MXDRN,VBHM,VBVL,MSUM, 00001490
1      X(LCDRAI),DELT,X(LCHNEW),NCOL,NROW,NLAY,X(LCIBOU),KSTP,KPER, 00001500
2      IDRNCB,ICBCFL,X(LCBUFF),IOUT) 00001510
IF(IUNIT(8).GT.0) CALL RCH1BD(NRCHOP,X(LCIRCH),X(LCRECH), 00001520
1      X(LCIBOU),NROW,NCOL,NLAY,DELT,VBVL,VBHM,MSUM,KSTP,KPER, 00001530
2      IRCHCB,ICBCFL,X(LCBUFF),IOUT) 00001540
IF(IUNIT(5).GT.0) CALL EVT1BD(NEVTOP,X(LCIEVT),X(LCEVTR), 00001550
1      X(LCEXDP),X(LCSURF),X(LCIBOU),X(LCHNEW),NCOL,NROW,NLAY, 00001560
2      DELT,VBVL,VBHM,MSUM,KSTP,KPER,IEVTCE,ICBCFL,X(LCBUFF),IOUT) 00001570
IF(IUNIT(4).GT.0) CALL RIV1BD(NRIVER,MXRIVR,X(LCIRVR),X(LCIBOU), 00001580
1      X(LCHNEW),NCOL,NROW,NLAY,DELT,VBVL,VBHM,MSUM, 00001590
2      KSTP,KPER,IRIVCB,ICBCFL,X(LCBUFF),IOUT) 00001600
IF(IUNIT(7).GT.0) CALL GH1BD(NBOUND,MXBND,VBHM,VBVL,MSUM, 00001610
1      X(LCBNDS),DELT,X(LCHNEW),NCOL,NROW,NLAY,X(LCIBOU),KSTP,KPER, 00001620
2      IGHBCB,ICBCFL,X(LCBUFF),IOUT) 00001630
C 00001640
C7C5---PRINT OR SAVE HEADS AND DRAWDOWNS. PRINT OVERALL BUDGET. 00001650
CALL BAS1OT(X(LCHNEW),X(LCSTR),ISTR,X(LCBUFF),X(LCIOFL), 00001660
1      MSUM,X(LCIBOU),VBHM,VBVL,KSTP,KPER,DELT, 00001670

```

2	PERTIM, TOTIM, ITMUNI, NCOL, NROW, NLAY, ICHVG,	00001680
3	IHDDFL, IBUDFL, IHEDFM, IHEDUN, IDDNFM, IDDNUN, IOUT)	00001690
C		00001700
C7C6	----IF ITERATION FAILED TO CONVERGE THEN STOP.	00001710
	IF (ICNVG.EQ.0) STOP	00001720
	200 CONTINUE	00001730
	300 CONTINUE	00001740
C		00001750
C8	-----END PROGRAM	00001760
	CALL wxyz(X(LCHNEW), NCOL, NROW, NLAY)	
	close(unit=1)	
	close(unit=11)	
	close(unit=12)	
	close(unit=18)	
	close(unit=19)	
	close(unit=30)	
	close(unit=13)	
	close(unit=21)	
	close(unit=22)	
	close(unit=15)	
	close(unit=16)	
	call date(result)	
	write(*,*)result	
	call time(result)	
	write(*,*)result	
	STOP	00001770
C		00001780
	END	00001790

```

-----
C
C CODIGO FUENTE DE LA RUTINA DE MEMORIA Y UTIMERIAS. VERSION DE DIC 1993
C
-----
      SUBROUTINE MEMIRP(RKBP, BP, B1, SP, NCOL, NROW, NLAY, SCI, HOLD, HNEW,
1 DELC, DELR, SS, DELVK)
C
      CHARACTER*8 FMT
      DIMENSION RKBP(NCOL, NROW), BP(NCOL, NROW), SP(NCOL, NROW),
1 SCI(NCOL, NROW, NLAY), HOLD(NCOL, NROW, NLAY), HNEW(NCOL, NROW, NLAY),
2 DELC(NROW), DELR(NCOL), SS(NCOL, NROW), B1(NCOL, NROW)
C
C-----LEEMOS LOS ARREGLOS PARA BPRIMA Y SPRIMA Y EL ESPESOR DE LA CAPA DELVK
      write(*,*)'*** SE VAN LEER LOS PARAMETROS DE LA ARCILLA ***'
C      read(*,*)i
C      if(i.ne.0)return
      READ(30,10)CTRKBP, FMT
10  FORMAT(F10.3, A8)
      write(*,*)'CTRKBP y FMT ', CTRKBP, FMT
      write(*,*)'*****RKBP*****'
      DO 55 J=1,nrow
      write(*,*) j
      read(30, FMT) (RKBP(I, J), I=1, NCOL)
          DO 20 II=1, NCOL
              RKBP(II, J)=RKBP(II, J)*CTRKBP
20          continue
      write(*,9) (RKBP(I, J), I=1, NCOL)
55  CONTINUE
9   FORMAT(1X, 10(1X, E10.5))
5   FORMAT(42F3.0)

      read(30,10)CNSTBP, FMT
      write(*,*)'CNSTBP y FMT ', CNSTBP, FMT
      write(*,*)'*****BP*****'
      DO 50 J=1,nrow
      write(*,*) j
      read(30, FMT) (BP(I, J), I=1, NCOL)
          DO 22 II=1, NCOL
              BP(II, J)=BP(II, J)*CNSTBP
22          continue
      write(*,9) (BP(I, J), I=1, NCOL)
50  CONTINUE
C
C----- OBTENCION DEL TERMINO RKBP/BP
      DO 333 I1=1, NCOL
      DO 444 I2=1, NROW
      IF(BP(I1, I2).NE.0.0) THEN
          RKBP(I1, I2)=RKBP(I1, I2)/BP(I1, I2)
          ELSE
              RKBP(I1, I2)=0.0
      ENDIF
444 CONTINUE
333 CONTINUE
      write(*,*)'escritura del termino RKBP/BP '
      do 335 J1=1, NROW
      write(*,*) J1
      write(*,9) (RKBP(J2, J1), J2=1, NCOL)
335 continue
C
C
      read(30,10)CNSTSP, FMT
      write(*,*)' CNSTSP y FMT ', CNSTSP, FMT
      write(*,*)'*****SP*****'
      DO 60 J=1,nrow
      write(*,*) j
      read(30, FMT) (SP(I, J), I=1, NCOL)

```

```

      DO 21 II=1,NCOL
      SP(II,J)=SP(II,J)*CNSTSP
      CONTINUE
21  write(*,9)(SP(I,J),I=1,NCOL)
      CONTINUE
C
C
      read(30,10)CNSTB1,FMT
      write(*,*)' CNSTB1 y FMT ',CNSTB1,FMT
      write(*,*)'*****B1*****'
      DO 70 J=1,nrow
      write(*,*) j
      read(30,FMT) (B1(I, J), I=1,NCOL)
      DO 23 II=1,NCOL
      B1(II,J)=B1(II,J)*CNSTB1
23  CONTINUE
      write(*,9)(B1(I,J),I=1,NCOL)
70  CONTINUE

      PI=3.14159
      NN=5
      AN=0.0
      AA=0.0
      DO 105 N=1,NN
      AA=AA+(1./(N**2))
105  CONTINUE
      AN=(1.0/3.0)-(2.0/(PI**2))*AA

C-----CALCULO DEL NUEVO COEFICIENTE DE ALMACENAJE
      il=1
      DO 500 IR=1,NROW
      DO 500 IC=1,NCOL
C-----ALMACENAMOS EN SS EL VALOR ORIGINAL DE SCL(NCOL,NROW,1)
      SS(IC,IR)=SCL(IC,IR,il)
      if((hold(ic,ir,il).gt.hnew(ic,ir,il)).AND.(B1(IC,IR).gt.0.))then
      scl(ic,ir,il)=scl(ic,ir,il)+bp(ic,ir)*sp(ic,ir)*An/b1(ic,ir)
      endif
500  CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE MEMIFM(HNEW,HOLD,WELL,IBOUND,MXWELL,NWELLS,SC1,
      1NCOL,NROW,NLAY,KSTP,DELR,DELC,DELT,RKBP,BP,B1,SP,DSINT,QW,HO,
      2 DELVK,SS,HUNDTO)
C
C-----VERSION 0200 22 DIC 1993 MEMIFM
C *****
C PAQUETE DE FORMULACION DE LA MEMORIA
C *****
C
C ESPECIFICACIONES:
C -----
      DOUBLE PRECISION HNEW
      DIMENSION HNEW(NCOL,NROW,NLAY),HOLD(NCOL,NROW,NLAY),
      1 WELL(4,MXWELL),IBOUND(NCOL,NROW,NLAY),DSINT1(50,50),
      2 DELR(NCOL),DELC(NROW),DSINT(NCOL,NROW),
      3 RKBP(NCOL,NROW),QW(MXWELL),SC1(NCOL,NROW,NLAY),
      4 BP(NCOL,NROW),SP(NCOL,NROW),DELT(42,32),HO(NCOL,NROW,NLAY),
      5 SS(NCOL,NROW),B1(NCOL,NROW),HUNDTO(NCOL,NROW)
C -----
C
      write(*,*)'*** EN MEMIFM SE CALCULA EL APORTE DE LA ARCILLA***'
      c il es la capa a la cual se aporta el caudal de la arcilla
      il=1
C---OBTENCION DEL VALOR DE An
      PI=3.14159
      NN=5

```

```

An=0
DO 5 N=1,NN
  An=An+1./N**2
5 CONTINUE
An=(1./3.)-(2./(PI**2))*An
write(*,*)
1!* col * ren * capa * well * * qmem * * hnew * * hold * ,
2! * hund *
DO 100 L=1,NWELLS
  IC=WELL(3,L)
  IR=WELL(2,L)
  IL=WELL(1,L)
  if (IL.NE.11) go to 100
  IF (IBOUND(IC,IR,IL).LE.0) GO TO 100
C
C---CALCULO DE SUMATORIA, DSINT(T), Y DELTA T PRIMA
IF (SP(IC,IR).NE.0.0.AND.BP(IC,IR).NE.0.0)THEN
  DELTP(IC,IR)=(RKBP(IC,IR)/(SP(IC,IR)*(BP(IC,IR))))*DELTA
ELSE
  GO TO 100
ENDIF
C
C-----Dsint
C-----PRIMER PASO
if (KSTP.eq.1)THEN
  QW(L)=WELL(4,L)
  Dsint(IC,IR)=0.0
ELSE
  Dsint(IC,IR)=0.0
PI2=PI**2
TOTAL=0
DO 900 n=1,NN
  QMEMT=0.0
  N2=N**2
  SUMA=
  1 exp(-N2*PI2*(DELTP(IC,IR))*Dsint(IC,IR)+
  2 exp(-N2*PI2*(DELTP(IC,IR)/2))*
  3 (HOLD(IC,IR,IL)-HNEW(IC,IR,IL))
  TOTAL=TOTAL+SUMA
900 continue
  DSINT1(IC,IR)=TOTAL
  TOTAL=0
  DO 901 n=1,NN
  N2=N**2
  SUMA=
  1 exp(-N2*PI2*(DELTP(IC,IR))*Dsint1(IC,IR)+
  2 exp(-N2*PI2*(DELTP(IC,IR)/2))*
  3 (HOLD(IC,IR,IL)-HNEW(IC,IR,IL))
  TOTAL=TOTAL+SUMA
901 continue
  DSINT(IC,IR)=DSINT1(IC,IR)+TOTAL
ENDIF
C
QMEM=0.0
QMEM= RKBP(IC,IR)*DELC(IR)*DELR(IC)*
1((HO(IC,IR,IL)-HNEW(IC,IR,IL))+(2*Dsint(IC,IR)))
C
C-----SUMA DE LA APORTACION AL LADO DERECHO DE LA ECUACION
IF (HNEW(IC,IR,IL).LT.HOLD(IC,IR,IL))then
  WELL(4,L)=QW(L)+QMEM
C
C-----CALCULO DEL HUNDIMIENTO PAPA CADA UNA DE LAS CELDAS CON UN ESPESOR
C-----DE ARCILLA DIFERENTE DE CERO 26 ENERO 93
HUNDTO(IC,IR)=HUNDTO(IC,IR)+QMEM*DELT/4000000.0
C-----ESCRITURA DE DATOS DE LA CELDA
write(*,4)IC,IR,IL,well(4,L),qmem,hnew(IC,IR,IL),hold(IC,IR,IL)
1 ,hundto(ic,ir)

```



```

      QMEMT=QMEMT+QMEM
    else
      write (*,8) IC, IR, IL, well(4,L), qmem, hnew(IC, IR, IL), hold(IC, IR, IL)
1    , hundo(ic, ir)
    endif
100  continue
      WRITE(*,6)QMEMT
4    FORMAT(3I6,2F10.6,2F10.2,F10.6)
8    FORMAT(3I6,2F10.6,2F10.2,F10.6,' RECUPERACION')
6    FORMAT(' ',15X,'QMEM TOTAL =',F10.6)
      DO 500 IR=1,NROW
      DO 500 IC=1,NCOL
        if((hold(ic,ir,il).gt.hnew(ic,ir,il)).AND.(B1(IC,IR).GT.0.)) then
          scl(ic,ir,il)=scl(ic,ir,il)+bp(ic,ir)*sp(ic,ir)*An/b1(ic,ir)
        endif
500  CONTINUE
      return
    end

```

```

-----
C
C
C Rutina de escritura de las columnas i, j, hnew para usos en graficacion
C
      subroutine wjhnw(hnew,ncol,nrow,nlay)
      DOUBLE PRECISION HNEW
      DIMENSION HNEW(NCOL,NROW,NLAY)
      write (31,9)((i,j,HNEW(j,i,1),j=1,ncol),i=1,nrow)
9    format(2i5,f13.6)
      return
    end

```

```

-----
C
C
C Rutina de escritura de las columnas i, j, param para usos en graficacion
C
      subroutine wxyz(param,ncol,nrow,nlay)
      DOUBLE PRECISION param
      DIMENSION param(NCOL,NROW,NLAY)
      open(unit=31,file='HEADS.GRD')
      write (31,*) "DSAA"

```

```

C
C-----SE ESCRIBE CON EL FORMATO DE SURFER PARA .GRD, PAG. H-1 DEL MANUAL
C
C----- COLUMNAS Y FILAS
      WRITE(31,*)NCOL,NROW
C
C----- COLUMNAS PRIMERA Y ULTIMA
      WRITE(31,*)1,NCOL
C
C----- FILAS PRIMERA Y ULTIMA
      WRITE(31,*)1,NROW
C
C----- Z MINIMA Y MAXIMA: SURFER SE ENCARGA DE SELECCIONARLAS
      WRITE(31,*) 0,0
C
C----- ESCRIBE LOS VALORES DE NIVELES INVIRTIENDO LAS FILAS
      ncapa=1
      DO 20 J=1,NROW
      DO 10 I=1,NCOL
        if(param(i,nrow-j+1,ncapa).eq.0)write(31,*) 2.0**127
        if(param(i,nrow-j+1,ncapa).ne.0)WRITE(31,*)param(I,NROW-J+1,NCAPA)
C      WRITE(31,*)param(I,NROW-J+1,NCAPA)
10    CONTINUE
20    CONTINUE
      close(unit=31)
      RETURN
    END

```

CAPÍTULO 4

INCORPORACIÓN DEL EFECTO DE LAS ARCILLAS CUANDO LA CONSOLIDACIÓN ES NO LINEAL

La incorporación del efecto no lineal de las arcillas al modelo tridimensional de flujo subterráneo se logró con base en la teoría de la consolidación. Esta indica que un suelo está preconsolidado cuando la presión efectiva máxima que ha soportado es mayor que la presión efectiva actuante. Un suelo se considera normalmente consolidado si no está preconsolidado es decir, si la presión efectiva actuante es la máxima que ha soportado. Un material que ha sido preconsolidado muestra un comportamiento de sólido elástico si la presión efectiva actuante es menor que la presión de preconsolidación. En el caso en que la presión efectiva actuante es la máxima que ha soportado el material se ajusta a la curva de compresibilidad virgen [1-4].

El análisis del flujo de agua subterránea y la consolidación de estratos de baja permeabilidad, llamado acuitardo, tienen un interés relevante en la actualidad, principalmente cuando se aplican a sistemas en donde la explotación de los mantos acuíferos es alta. Para entender la mecánica del flujo de agua subterránea en acuíferos semiconfinados por acuitardos, es importante primero entender el comportamiento del acuitardo semiconfinante.

Consideramos un acuitardo como una acumulación de estratos más o menos compresibles, de baja permeabilidad que puede cambiar su comportamiento de acuerdo al de los estratos que lo componen. Las razones por las que es importante simular el comportamiento no lineal del acuitardo es que, a diferencia del comportamiento que tiene un acuífero en donde sus propiedades se mantienen constantes en el tiempo, en el acuitardo éstas propiedades cambian con el tiempo, de manera que no es lineal. Con base en esto, la manera más adecuada de simular su comportamiento es considerando esta no linealidad en los parámetros que los describen.

4.1 Formulación de los parámetros

Para la simulación del comportamiento no lineal del acuitardo en el modelo se requiere considerar parámetros tales como almacenamiento específico S_v , conductividad hidráulica K' y relación de vacíos e que caracterizan al acuitardo.

4.1.1 Almacenamiento específico.

El almacenamiento específico S_s' es el volumen de agua liberado por unidad de área y por unidad de abatimiento del nivel piezométrico y puede ser expresado como [5-6]:

$$S_s' = \rho g (\alpha + \eta \beta) \quad (4.1.1)$$

donde: ρ = densidad del fluido [$M L^{-3}$]

g = gravedad [$L T^{-2}$]

α y β = compresibilidades del medio poroso y del fluido respectivamente [$L T^2 M^{-1}$]

η = porosidad

Considerando que la compresibilidad del medio poroso es mucho mayor que la del fluido, el almacenamiento específico se puede expresar como [7]:

$$S_s' = \rho g \alpha \quad (4.1.2)$$

La relación de vacíos e se define por medio de la expresión.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (4.1.3)$$

donde V_v es el volumen de vacíos [L^3]

V_s es el volumen de sólido [L^3]

La porosidad η en términos de la relación de vacíos e está dada por:

$$\eta = \frac{e}{1+e} \quad (4.1.4)$$

La compresibilidad del medio poroso α , está dada por [6]:

$$\alpha = \frac{d\eta}{dP} \quad (4.1.5)$$

donde P es la presión de poro [$M L^{-1} T^{-2}$]

Derivando (4.1.4) con respecto a P obtenemos:

$$\alpha = \frac{1}{(1+e)^2} \frac{de}{dP} \quad (4.1.6)$$

Utilizando la ecuación de Terzaghi para la consolidación en una dimensión [4,8,9,10]:

$$e = e_0 - \lambda \log \left[\frac{\sigma_t - P}{\sigma_t - P_0} \right] \quad (4.1.7)$$

donde e, σ_t y P son los valores de relación de vacíos, presión total y presión de poro al tiempo t

e_0 y P_0 son valores de la relación de vacíos y presión de poro en el tiempo $t - \Delta t$

λ es el índice de compresibilidad.

La derivación de la ecuación (4.1.7) con respecto a P nos conduce a:

$$\frac{de}{dP} = \frac{\lambda}{\sigma_t - P} = \frac{\lambda}{\sigma_e} \quad (4.1.8)$$

donde σ_e es la presión efectiva en el medio poroso que se puede interpretar físicamente como la componente normal de la presión total σ_t , transmitida a través de las partículas.

Sustituyendo (4.1.8) en (4.1.6) se obtiene:

$$\alpha = \frac{1}{(1+e)^2} \frac{\lambda}{\sigma_e} \quad (4.1.9)$$

Sustituyendo (4.1.9) en (4.1.2) obtenemos una expresión para el almacenamiento específico: S_S'

$$S_S' = \rho g \frac{1}{(1+e)^2} \frac{\lambda}{\sigma_e} \quad (4.1.10a)$$

Si se utilizan las aproximaciones:

$$\frac{1}{\sigma_e} = \frac{d}{d\sigma_e} \log(\sigma_e) \cong \frac{\log(\sigma_e) - \log(\sigma_{e0})}{\sigma_e - \sigma_{e0}} \quad (4.1.10b)$$

$$y \quad \frac{\lambda}{1+e} = cte = C_c \quad (4.1.10c)$$

se obtiene la expresión utilizada por D. L. Rudolph en 1989 [11] para el coeficiente de almacenamiento S_S' que está dado por:

$$S_z' = \frac{\rho g}{(1+e)} C_e \left[\frac{\log \left(\frac{\sigma_e + \Delta \sigma_e}{\sigma_e} \right)}{\Delta \sigma_e} \right] \quad (4.1.10d)$$

4.1.2 Conductividad Hidráulica.

La conductividad hidráulica K' en un medio poroso saturado se relaciona con las propiedades conductivas del medio y con la naturaleza física del fluido que se mueve a través del medio. Lambe y Whitman [2] presentan datos en los que se pone de manifiesto que existe una relación lineal entre la relación de vacíos e y $\log(K')$

Si las propiedades del fluido se suponen constantes la relación entre Conductividad hidráulica K' y relación de vacíos e puede expresarse como [1,11]:

$$K_2' = K_1' \left[10^{\left(\frac{e_2 - e_1}{m} \right)} \right] \quad (4.1.11)$$

donde K_2' y e_2 son los valores de conductividad hidráulica y relación de vacíos al tiempo t ,

K_1' y e_1 son los valores de conductividad hidráulica y la relación de vacíos al tiempo $t - \Delta t$

m es la pendiente de la gráfica e en función de $\log(K')$.

4.1.3 Aplicación del método de Celdas para la discretización de la ecuación diferencial que describe el flujo en el acuitardo.

Aún cuando existen varios métodos para poder discretizar una ecuación diferencial, se adoptó el de celdas por su sencillez en la aplicación y su eficiencia en problemas no lineales [12,13].

Consideremos el intervalo $[0,1]$ como el espesor del acuitardo, y dividamos éste en E segmentos de la misma longitud Figura 4.1. Tomemos como nodos los centros de cada segmento y etiquetémoslos como 1,2,3,..., E empezando en el extremo izquierdo. También

etiquetemos las fronteras comunes de cada segmento como $1/2, 3/2, \dots, E+1/2$ como se muestra en la figura 4.1.

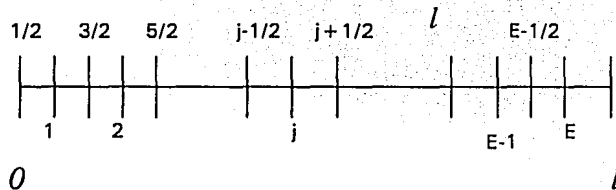


Figura 4.1. Discretización del intervalo $[0, l]$ en E segmentos y etiquetado de los nodos que identifican a cada segmento.

Consideremos ahora la ecuación diferencial que describe el flujo en el acuífero y las condiciones de frontera e inicial:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K' \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S' \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1.12)$$

con condiciones de frontera

$$h_{1/2} = h(0, t) = h_1(t) \quad (4.1.13a)$$

$$h_{E+1/2} = h(l, t) = h_2(t) \quad (4.1.13b)$$

y condición inicial

$$h(z, 0) = h_3(z) \quad (4.1.14)$$

La discretización de (4.1.12) por medio del método de celdas conduce al sistema:

$$K'_{j-1/2} h_j^{n+1} - \left[K'_{j+1/2} + K'_{j-1/2} + \frac{S'_{j,j} (\Delta z)^2}{\Delta t} \right] h_j^n + K'_{j+1/2} h_{j+1}^{n+1} = -S'_{j,j} \frac{(\Delta z)^2}{\Delta t} h_j^n$$

(4.1.15)

válido para $j=2, 3, \dots, E-1$

para $j=1$ se tiene

$$\frac{3}{4} h_1^{n+1} - \frac{1}{4} h_2^{n+1} = \frac{1}{2} h_1^n \quad (4.1.16a)$$

para $j=E$ se tiene

$$-\frac{1}{4}h_{E-1}^{n+1} + \frac{3}{4}h_E^{n+1} = \frac{1}{2}h_{E+1/2}^n \quad (4.1.16b)$$

El sistema constituido por las ecuaciones (4.1.15) y (4.1.16) expresado en forma matricial quedaría de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_3 & B_3 & C_3 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & A_{E-1} & B_{E-1} & C_{E-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & A_E & B_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \\ h_{E-1} \\ h_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 h_1 \\ D_2 h_2 \\ D_3 h_3 \\ \vdots \\ D_{E-1} h_{E-1} \\ D_E h_E \end{bmatrix} \quad (4.1.17)$$

donde:

$$B_1 = \frac{1}{4}, \quad C_1 = -\frac{1}{4} \quad (4.1.18a)$$

$$A_j = K'_{j+1/2} \quad \text{para } j=2,3,\dots,E-1 \quad (4.1.18b)$$

$$B_j = -\left[K'_{j+1/2} + K'_{j-1/2} + S'_{j,j} \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \right] \quad \text{para } j=2,3,\dots,E-1 \quad (4.1.18c)$$

$$C_j = K'_{j+1/2} \quad \text{para } j=2,3,\dots,E-1 \quad (4.1.18d)$$

$$A_E = -\frac{1}{4}, \quad B_E = \frac{1}{4} \quad (4.1.18e)$$

$$D_j = -S'_{j,j} \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \quad \text{para } j=2,3,\dots,E-1 \quad (4.1.18f)$$

$$D_1 = \frac{1}{2}, \quad D_E = \frac{1}{2} \quad (4.1.18g)$$

Como se puede ver en (4.1.17), la matriz es tridiagonal.

4.2 Incorporación de la consolidación no lineal en el modelo

Para incluir el fenómeno de hundimiento no lineal en el acuitardo así como el aporte de agua de la arcilla hacia el acuífero, se incluye un módulo adicional en el programa MODFLOW por medio de la subrutina NOLI. La forma como se acopla este módulo en el programa es la siguiente.

En la fase última del programa MODFLOW y para cada intervalo de tiempo de la simulación se hace una llamada a la subrutina NOLI, en donde se pasan los valores de la carga hidráulica h en la frontera superior del acuífero para celdas que contengan un espesor de arcilla diferente de cero, así como los parámetros hidráulicos correspondientes del acuífero que serán utilizados por la subrutina NOLI para poder calcular el flujo proveniente del acuitardo así como el hundimiento registrado en celdas con arcilla.

Este módulo está escrito en el Lenguaje de Programación FORTRAN 77, para hacer la simulación del comportamiento del acuitardo cuando un flujo de agua se mueve a través de él.

En su primera parte recibe y prepara los datos necesarios de entrada para la subrutina, los cuales son:

- El número de nodos "N" en que se va a dividir el acuitardo.
- El número de iteraciones en el tiempo "NI", que se va a realizar.
- El valor del intervalo de tiempo que se va a utilizar en esta simulación, y está dado en segundos, variable "DELTA".
- El periodo de tiempo y el espesor del acuitardo en metros.
- Dados estos datos se determina el espacio necesario requerido por cada una de las variables utilizadas en el programa, y se asignan localidades en un vector unidimensional que puede tener como máximo 30,000 entradas.

En la siguiente parte, en la Subrutina llamada PASO, se procede a hacer iteraciones en el tiempo, variable "L", y llamar a otras subrutinas con el fin de calcular los siguientes valores:

- Constantes utilizadas en el programa.
- Dar la piezometría inicial que se va a utilizar en cada nodo.
- Dar la presión total con que se trabajará en cada nodo.
- Hacer el cálculo del Almacenamiento Específico en cada nodo.

- Hacer el cálculo de la Conductividad Hidráulica en los nodos llamados "medios".
- Construir las entradas de la matriz tridiagonal.
- Resolver la matriz tridiagonal por medio del Algoritmo de Thomas.
- Calcular el Flujo de agua en la frontera inferior del acuitardo así como el hundimiento registrado.
- Registro escrito de salida, opcional, de los valores de piezometría, presión efectiva, relación de vacíos, conductividad hidráulica y almacenamiento específico para los intervalos de tiempo por años.

A continuación se da una descripción más explícita del cálculo de cada uno de los valores citados. Se inicia con el cálculo de constantes iniciales

- Se calculan los valores de "z" que corresponden con los nodos "enteros", 1,2,3,...,E y los almacena en la variable ZE(N).
- Se calcula los valores de "z" que corresponden con los nodos "medios", 3/2, 5/2, ..., E-1/2 y los almacena en la variable ZM(N).
- Se asigna los valores iniciales de h en los nodos "enteros", en la variable HOE(N). - Se calcula a través de un promedio, los valores iniciales de h en los nodos "medios" y los asigna a la variable HOM(N).
- Se calcula los valores de la presión de poro en los nodos "enteros" al tiempo T=0, y los asigna en la variable POE(N).
- Se calcula los valores de la presión de poro en los nodos "medios" al tiempo T=0, y los asigna en la variable POM(N).
- Se calcula los valores de la presión total SIGMA en los nodos "medios" y los asignan en la variable SIGMAM(N).

4.2.1 Cálculo del almacenamiento específico S_s'

- Se calculan la presión de poro inicial y la presión efectiva inicial en los nodos "enteros" y se asignan en la variable PE(N) y en la variable SGE(N), respectivamente.
- También se calculan valores iniciales de la relación de vacíos "e" y almacenamiento específico "Ss"; por ejemplo, para un espesor de 15m, según Rudolph [11], se considera que si la presión efectiva es menor de 15000 N/m, la relación de vacíos y el almacenamiento específico tienen un valor de 10.0 y 0.015 respectivamente, y en caso contrario, la relación de vacíos es una recta con pendiente (156/725) y cruce

por cero en 9.1, y el almacenamiento específico es también una recta con pendiente (26/3625) y cruce por cero en 0.12.

Los valores de presión efectiva, relación de vacíos y almacenamiento específico para tiempos posteriores se calculan de la siguiente manera.

- La presión efectiva se obtiene como una diferencia entre la presión total y la presión de poro.
- La relación de vacíos tiene un valor de 10.0 si la presión efectiva es menor de 15,000 N/m, y en caso contrario se aplica la relación

$$e^{t+\Delta t} = e^t - \lambda \log \left[\frac{\sigma_e}{\sigma_{e_0}} \right] \quad (4.2.1)$$

donde λ es el índice de compresibilidad, σ_e es la presión efectiva en el tiempo $t + \Delta t$ y σ_{e_0} es la presión efectiva en el tiempo t .

El almacenamiento específico S_s tiene un valor de 0.015 si la presión efectiva σ es menor de 15,000 N/m, y en caso contrario se obtiene a través de la siguiente relación, tomada de la ecuación 4.1.10a:

$$S_s = \frac{\gamma \lambda}{(1+e)^2} \log \left[2 - \frac{\sigma_e}{\sigma_e} \right] \quad (4.2.2)$$

donde γ es el resultado del producto de la densidad del agua por la aceleración de la gravedad $\gamma = \rho g$.

4.2.2 Cálculo de la conductividad hidráulica

Se Calculan los valores del nivel piezométrico h y presiones de poro en los nodos llamados "medios" para tiempos posteriores al inicial y se asignan en las variables HM(N) y PM(N) respectivamente.

Enseguida calcula los valores de la presión efectiva, relación de vacíos y conductividad hidráulica en los nodos "medios" de acuerdo a los siguientes pasos.

- La presión en el primer intervalo de tiempo se obtiene de una diferencia entre la presión total y la presión de poro. Si la presión efectiva en el primer intervalo de tiempo en los nodos "medios" es menor de 15000 N/m , la relación de vacíos y la conductividad hidráulica al primer intervalo de tiempo tienen un valor constante de 10.0 y 5.0x10 m/s respectivamente. En caso contrario, la relación de vacíos es una recta con pendiente (156/725) y cruce por cero en 9.1, y la conductividad hidráulica es una recta con pendiente (468/725)x10 y cruce por cero en 2.3x10 m/s.
- Para tiempos posteriores la presión efectiva se sigue obteniendo como una diferencia entre la presión total y la presión de poro. Si la presión efectiva es menor de 15000 N/m la relación de vacíos y la conductividad hidráulica tienen un valor de 10.0 y 5.0x10 m/s respectivamente y en caso contrario, la relación de vacíos está dada por:

$$e^{t+1} = e^t - \lambda \log \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{e_0}} \right) \quad (4.2.3)$$

y se asigna en la variable EM(N), donde σ_e es el valor de la presión efectiva al tiempo $t + \Delta t$ y σ_{e_0} se es el valor de la presión efectiva al tiempo t

La conductividad hidráulica K' en el caso de que la presión efectiva fuese mayor de 15,000 N/m se obtiene de la expresión.

$$K'^{t+1} = K'^t \left[10^{\left(\frac{e^{t+1} - e^t}{25} \right)} \right] \quad (4.2.4)$$

y se asigna en la variable KJ(N)

4.2.3 Diagonalización

Se calculan los valores de las entradas de la matriz tridiagonal basándose en los resultados obtenidos del Almacenamiento Especifico y Conductividad Hidráulica.

Nombraremos las diagonales de la matriz tridiagonal de la siguiente manera: la diagonal principal estará constituida por el vector B, la diagonal abajo de la principal estará constituida por el vector A y la diagonal arriba de la principal estará constituida por el vector

C y los coeficientes del vector de la derecha lo constituyen los valores del vector D de acuerdo a lo siguiente

$$B_1 = \frac{1}{4}, C_1 = -\frac{1}{4}; \quad (4.2.5a)$$

$$A_j = K'_{j-1/2} \text{ para } j=2,3,\dots,E-1; \quad (4.2.5b)$$

$$B_j = \left[K'_{j+1/2} + K'_{j-1/2} + S'_{j,j} \frac{(\Delta z)^2}{\Delta t} \right] \text{ para } j=2,3,\dots,E-1; \quad (4.2.5c)$$

$$C_j = K'_{j+1/2} \text{ para } j=2,3,\dots,E-1; \quad (4.2.5d)$$

$$A_E = -\frac{1}{4}, B_E = \frac{1}{4}; \quad (4.2.5e)$$

$$D_j = -S'_{j,j} \frac{(\Delta z)^2}{\Delta t} \text{ para } j=2,3,\dots,E-1; \quad (4.2.5f)$$

$$D_1 = \frac{1}{2}, D_E = \frac{1}{2}; \quad (4.2.5g)$$

La resolución de la matriz tridiagonal se lleva a cabo usando el algoritmo de THOMAS. Los valores del vector solución en cada paso de tiempo se guardan en la variable H(N). El diagrama de flujo que esquematiza todo este procedimiento se muestra en la figura 4.2.

4.3 Cálculo del Hundimiento

Considerando un paralelepípedo de area A y altura b, figura 4.3, su volúmen está dado por:

$$V = Ab \quad (4.3.1)$$

Debido a que la consolidación solo se realiza en una dirección, el volúmen del mismo paralelepípedo una vez consolidado el acuitardo está dado por:

$$V' = Ab' \quad (4.3.2)$$

El cambio en la altura se debe a que la relación de vacios cambia debido al cambio en el volúmen ocupado por los poros y está expresado por:

$$b' = \int_0^b \left(\frac{1+e}{1+e_0} \right) d\xi \quad (4.3.3)$$

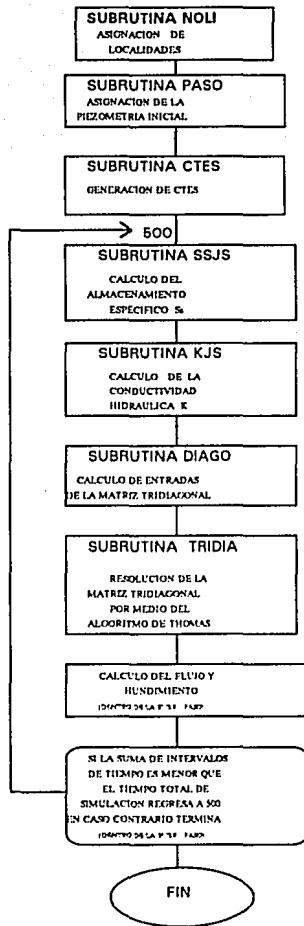


Figura 4.2. Diagrama de Flujo que representa esquemáticamente el procedimiento seguido para simular el comportamiento no lineal del acuitardo.

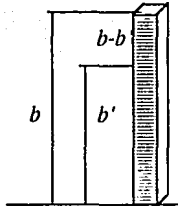


Figura 4.3. Paralelepípedo de columna de acuitardo en donde se muestra que después de consolidada la columna, el espesor original b cambia a b'

En cambio la altura inicial del paralelepípedo está dada por:

$$b = \int_0^h \left(\frac{1+e_0}{1+e} \right) d\xi \quad (4.3.4)$$

Por consiguiente el hundimiento H en el acuitardo se puede expresar como:

$$H = b - b' = \int_0^b \left(\frac{e_0 - e}{1+e_0} \right) d\xi \quad (4.3.5)$$

en donde $e_0 = e_0(z)$, $e = e(z, t)$

La ecuación (4.3.5) se puede aproximar de la siguiente manera

$$H = b - b' = \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_0(\xi_i) - e(\xi_i, t)}{1+e_0(\xi_i)} \right) \Delta z \quad (4.3.6)$$

en donde $e_0(\xi_i)$ es la relación de vacíos en el nodo ξ_i en el tiempo $t - \Delta t$ y

$e(\xi_i, t)$ es la relación de vacíos en el nodo ξ_i en el tiempo t

4.4 Cálculo del flujo del acuitardo al acuífero

Por continuidad, en la interfaz entre el acuífero y el acuitardo, figura 4.4, se debe cumplir la siguiente expresión para el caudal entre dos celdas contiguas:

$$\left(\frac{h_1 - h_{1/2}}{\frac{b_1}{2}} \right) K_1 = \left(\frac{h_{1/2} - h_0}{\frac{b_0}{2}} \right) K_0 \quad (4.4.1)$$

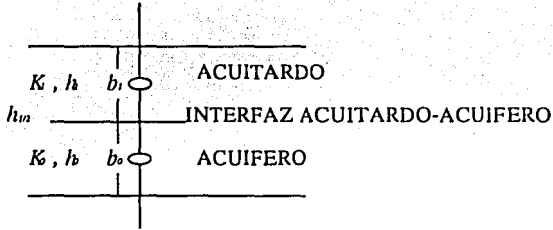


Figura 4.4 Esquema de interfaz acuífero-acuífero entre el nodo inferior de la columna del acuífero y el nodo superior de la columna del acuífero.

Haciendo la siguiente definición:

$$\alpha \equiv \frac{b_0 K_1}{b_1 K_0}$$

y despejando h_x de la ecuación (4.4.1), se obtiene la siguiente expresión:

$$h_x = \frac{h_1 \alpha + h_0}{1 + \alpha} \quad (4.4.2)$$

entonces el caudal Q_{nat} a través de la frontera acuífero-acuífero se puede expresar como:

$$Q_{nat} = \left(\frac{h_1 - h_x}{\frac{b_1}{2}} \right) K_1 A \quad (4.4.3)$$

sustituyendo (4.4.2) en (4.4.3) se llega a la ecuación siguiente:

$$Q_{nat} = \frac{2(h_1 - h_0)}{b_1(1 + \alpha)} K_1 A \quad (4.4.4)$$

Finalmente, sustituyendo la expresión para α en (4.4.4), obtenemos la expresión para el aporte del acuífero hacia el acuífero, dada por:

$$Q_{nat} = \frac{2(h_1 - h_0)}{\left(\frac{b_0}{K_0} + \frac{b_1}{K_1} \right)} A \quad (4.4.5)$$

REFERENCIAS

1. Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A., *Mecánica de Suelos* Vol. 1, Edit. Limusa México, 1978.
2. Lambe T. W. and Whitman R. V., *Soil Mechanics*, John Wiley New York, 1969.
3. Herrera I., *Ecuaciones Constitutivas de los Suelos*, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1976.
4. Herrera I., *El Concepto de Preconsolidación en los Suelos*. *Revista de Ingeniería*, 46(1), pp 53-60, 1976.
5. Freeze R. A. and Cherry J. A., *Groundwater*, 604pp., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. Y. 1979.
6. Huyakorn P. S. and Pinder G. F., *Computational Methods in Subsurface Flow*, Princeton, New Jersey, 1983.
7. Domenico P. A. and Mifflin M.D., *Water from low-permeability sediments and land subsidence*, *Water resour. Res.*, 1(4), 563-576, 1965.
8. Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1943.
9. Roscoe, K. H. y Burland, J. B., *On the Generalized Stress-Strain Behavior of 'Wet' Clay*, *Engineering Plasticity*, Cambridge Univ. press, March 1968.
10. Herrera I., León J. L. y Fernández del Olmo R., *Preconsolidation and its rheological implication*, *Proc. Novena Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cementaciones*, Tokio, Japón, 1, pp 127-130, 1977.
11. Rudolph, D. L., *Studies of Groundwater Flow and Solute Transport in a Clay Aquitard Near Mexico City*, Ph. D. Thesis, University of Waterloo, Ontario, 1989.
12. Herrera I. y Allen M., *Modelación Computacional de Sistemas en Ciencias e Ingeniería*, Instituto de Geofísica, UNAM 1986.
13. Allen M. III, Herrera I. y Pinder G. F., *Numerical Modeling in Science and Engineering*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.

ANEXO DEL CAPÍTULO 4. LISTADOS.

```

C *****00000010
C MAIN CODE FOR MODULAR MODEL -- 6/1/83 00000020
C BY MICHAEL G. MCDONALD AND ARLEN W. HARBAUGH 00000030
C-----VERSION 1116 28DEC1983 MAIN1 00000040
C *****00000050
C 00000060
C SPECIFICATIONS: 00000070
C -----00000080
C COMMON X(99000) 00000090
C DIMENSION VBVL(4,20), IUNIT(24) 00000100
C DOUBLE PRECISION DUMMY 00000110
C EQUIVALENCE (DUMMY,X(1)) 00000120
C -----00000130
C 00000140

C----- CHARACTER*4 HEADNG(32),VBNM(4,20)
ESPACIO QUE REQUIERE LA RUTINA NOLI QUE ES LLAMADA POR NOLIFM
PARAMETER (NAMAX=500, NBMAX=100, NCOL=42, NROW=32)
REAL*8 AN(NAMAX), BN(NBMAX, NCOL, NROW), BP(NCOL, NROW),
1 HUNDTO(NCOL, NROW), HO(NCOL, NROW)
open(unit= 1, file= 'inbas.dat' )
open(unit=11, file= 'bcf.dat' )
open(unit=12, file= 'well.dat' )
open(unit=18, file= 'recharge.dat')
open(unit=19, file= 'sip.dat' )
open(unit=30, file= 'coef.dat' )
open(unit=13, file= 'drain.dat' )
open(unit=22, file= 'river.dat' )
open(unit=21, file= 'evt.dat' )
CALL NOLIRP(BP, NCOL, NROW)

C1-----SET SIZE OF X ARRAY. REMEMBER TO REDIMENSION X. 00000150
LENX=99000 00000160
C 00000170
C2-----ASSIGN BASIC INPUT UNIT AND PRINTER UNIT. 00000180
INBAS=1 00000190
IOUT=6 00000200
C 00000210
C3-----DEFINE PROBLEM ROWS, COLUMNS, LAYERS, STRESS PERIODS, PACKAGES 00000220
CALL BAS1DF (ISUM, HEADNG, NPER, ITMUNI, TOTIM, NCOL, NROW, NLAY, 00000230
1 NODES, INBAS, IOUT, IUNIT) 00000240
C 00000250
C4-----ALLOCATE SPACE IN "X" ARRAY. 00000260
CALL BASIAL (ISUM, LENX, LCHNEW, LCHOLD, LCIBOU, LCCR, LCCC, LCCV, 00000270
1 LCHCOF, LCRHS, LCDEL, LCDEL, LCSTRT, LCBUFF, LCIOFL, 00000280
2 INBAS, ISTRT, NCOL, NROW, NLAY, IOUT) 00000290
IF (IUNIT(1) .GT. 0) CALL BCFIAL (ISUM, LENX, LCSC1, LCHY, 00000300
1 LCBOT, LCTOP, LCSC2, LCTRPY, IUNIT(1), ISS, 00000310
2 NCOL, NROW, NLAY, IOUT, IBCFCB) 00000320
IF (IUNIT(2) .GT. 0) CALL WELIAL (ISUM, LENX, LCWELL, MXWELL, NWEL, 00000330
1 IUNIT(2), IOUT, IWELCB) 00000340
IF (IUNIT(3) .GT. 0) CALL DRNIAL (ISUM, LENX, LCDRAI, NDRAIN, MXDRN, 00000350
1 IUNIT(3), IOUT, IDRNCB) 00000360
IF (IUNIT(8) .GT. 0) CALL RCHIAL (ISUM, LENX, LCRIRCH, LCRECH, NRCHOP, 00000370
1 NCOL, NROW, IUNIT(8), IOUT, IRCHCB) 00000380
IF (IUNIT(5) .GT. 0) CALL EVTIAL (ISUM, LENX, LCIEVT, LCEVTR, LCEXDP, 00000390
1 LCSURF, NCOL, NROW, NEVTOP, IUNIT(5), IOUT, IEVTCB) 00000400
IF (IUNIT(4) .GT. 0) CALL RIVIAL (ISUM, LENX, LCRIVR, MXRIVR, NRIVER, 00000410
1 IUNIT(4), IOUT, IRIVCB) 00000420
IF (IUNIT(7) .GT. 0) CALL GHBIAL (ISUM, LENX, LCBNDS, NBOUND, MXBND, 00000430
1 IUNIT(7), IOUT, IGHBCB) 00000440
IF (IUNIT(9) .GT. 0) CALL SIPIAL (ISUM, LENX, LCEL, LCFL, LCGL, LCV, 00000450
1 LCHDCG, LCLRCH, LCN, MXITER, NPARM, NCOL, NROW, NLAY, 00000460
2 IUNIT(9), IOUT) 00000470
IF (IUNIT(11) .GT. 0) CALL SORIAL (ISUM, LENX, LCA, LCRES, LCHDCG, LCLRCH, 00000480

```

```

1          LCIEQP,MXITER,NCOL,NROW,NLAY,NSLICE,MBW,IUNIT(11),IOUT) 00000490
C          00000500
C5-----IF THE "X" ARRAY IS NOT BIG ENOUGH THEN STOP.          00000510
          IF (ISUM-1.GT.LENXX) STOP                                00000520
C          00000530
C6-----READ AND PREPARE INFORMATION FOR ENTIRE SIMULATION.    00000540
          CALL BAS1RP(X(LCIBOU),X(LCHNEW),X(LCSTRT),X(LCHOLD),    00000550
1          TSRTT,INBAS,HEADING,NCOL,NROW,NLAY,MODES,VBVL,X(LCIOFL), 00000560
          IUNIT(12),IHEDFM,IDDHFM,IHEDUH,IDDHUN,IOUT)            00000570
          IF (IUNIT(1).GT.0) CALL BCF1RP(X(LCIBOU),X(LCHNEW),X(LCSC1), 00000580
1          X(LCHY),X(LCCP),X(LCCC),X(LCCV),X(LCDEL),X(LCDEL),    00000590
2          X(LCDEL),X(LCROT),X(LCTOP),X(LCSC2),X(LCTRPY),        00000600
3          IUNIT(1),ISS,NCOL,NROW,NLAY,MODES,IOUT)              00000610
          IF (IUNIT(9).GT.0) CALL SI1RP (HPARM,MXITER,ACCL,HCLOSE,X(LCW), 00000620
1          IUNIT(9),IPCALC,IPRSIP,IOUT)                          00000630
          IF (IUNIT(11).GT.0) CALL SOR1RP (MXITER,ACCL,HCLOSE,IUNIT(11), 00000640
1          IPRSOR,IOUT)                                           00000650
C          00000660
C7-----SIMULATE EACH STRESS PERIOD.                            00000670
          DO 300 KPER=1,NPER                                       00000680
C          00000690
C7A-----READ STRESS PERIOD TIMING INFORMATION.                00000700
          CALL BAS1ST (NSTP,DELT,TSMULT,PERTIM,KPER,INBAS,IOUT)  00000710
C          00000720
C7B-----READ AND PREPARE INFORMATION FOR STRESS PERIOD.      00000730
          IF (IUNIT(2).GT.0) CALL WEL1RP (X(LCWELL),NWEL,MXWELL,IUNIT(2), 00000740
1          IOUT)                                                  00000750
          IF (IUNIT(3).GT.0) CALL DRN1RP (X(LCDRAI),NDRAIN,MXDRN,IUNIT(3), 00000760
1          IOUT)                                                  00000770
          IF (IUNIT(6).GT.0) CALL RCH1RP (NRCHOP,X(LCIRCH),X(LCRECH), 00000780
1          X(LCDEL),X(LCDEL),NROW,NCOL,NLAY,IUNIT(8),IOUT)      00000790
          IF (IUNIT(5).GT.0) CALL EVT1RP (NEVTOP,X(LCIEVT),X(LCEVTR), 00000800
1          X(LCEXDP),X(LCSURF),X(LCDEL),X(LCDEL),NCOL,NROW,    00000810
1          NLAY,IUNIT(5),IOUT)                                    00000820
          IF (IUNIT(4).GT.0) CALL RIV1RP (X(LCRIVR),NRIVER,MXRIVR,IUNIT(4), 00000830
1          IOUT)                                                  00000840
          IF (IUNIT(7).GT.0) CALL GHB1RP (X(LCBNDS),NBOUND,MXBND,IUNIT(7), 00000850
1          IOUT)                                                  00000860
C          00000870
C7C-----SIMULATE EACH TIME STEP.                              00000880
          DO 200 KSTP=1,NSTP                                       00000890
C          00000900
C7C1----CALCULATE TIME STEP LENGTH. SET HOLD=HNEW.            00000910
          CALL BAS1AD (DELT,TSMULT,TOTIM,PERTIM,X(LCHNEW),X(LCHOLD),KSTP, 00000920
1          NCOL,NROW,NLAY)                                       00000930
C          00000940
C7C2----ITERATIVELY FORMULATE AND SOLVE THE EQUATIONS.        00000950
          DO 100 KITER=1,MXITER                                     00000960
C          00000970
C7C2A---FORMULATE THE FINITE DIFFERENCE EQUATIONS.            00000980
          CALL BAS1FM (X(LCHCOF),X(LCRHS),NCOL,NROW,NLAY,MODES)  00000990
          IF (IUNIT(1).GT.0) CALL BCF1FM (X(LCHCOF),X(LCRHS),X(LCHOLD), 00010000
1          X(LCSC1),X(LCHNEW),X(LCIBOU),X(LCCR),X(LCCV),X(LCCV), 00010100
2          X(LCHY),X(LCTRPY),X(LCBOT),X(LCTOP),X(LCSC2),        00010200
3          X(LCDEL),X(LCDEL),DELT,ISS,KITER,KSTP,KPER,NCOL,    00010300
4          NROW,NLAY,IOUT)                                        00010400
          IF (IUNIT(2).GT.0) CALL WEL1FM (NWEL,MXWELL,X(LCRHS),X(LCWELL), 00010500
1          X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY)                              00010600
          IF (IUNIT(3).GT.0) CALL DRN1FM (NDRAIN,MXDRN,X(LCDRAI),X(LCHNEW), 00010700
1          X(LCHCOF),X(LCRHS),X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY)         00010800
          IF (IUNIT(8).GT.0) CALL RCH1FM (NRCHOP,X(LCIRCH),X(LCRECH), 00010900
1          X(LCRHS),X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY)                   00011000
          IF (IUNIT(5).GT.0) CALL EVT1FM (NEVTOP,X(LCIEVT),X(LCEVTR), 00011100
1          X(LCEXDP),X(LCSURF),X(LCRHS),X(LCHCOF),X(LCIBOU), 00011200
2          X(LCHNEW),NCOL,NROW,NLAY)                             00011300
          IF (IUNIT(4).GT.0) CALL RIV1FM (NRIVER,MXRIVR,X(LCRIVR),X(LCHNEW), 00011400
1          X(LCHCOF),X(LCRHS),X(LCIBOU),NCOL,NROW,NLAY)         00011500

```

```

IF (IUNIT (7) .GT. 0) CALL GHB1FM(NBOUND, MXBND, X(LCBNDS), X(LCHCOF), 00001160
1 X(LCRHS), X(LCIBOU), NCOL, NROW, NLAY) 00001170
C 00001180
C7C2B---MAKE ONE CUT AT AN APPROXIMATE SOLUTION. 00001190
IF (IUNIT (9) .GT. 0) CALL SIPIAP(X(LCHNEW), X(LCIBOU), X(LCCR), X(LCCC), 00001200
1 X(LCCV), X(LCHCOF), X(LCRHS), X(LCEL), X(LCLF), X(LCGI), X(LCV), 00001210
2 X(LCW), X(LCHDCG), X(LCLRCH), NPARM, KITER, HCLOSE, ACCL, ICHVG, 00001220
3 KSTP, KPER, IPCALC, IPR SIP, MXITER, NSTP, NCOL, NROW, NLAY, NODES, 00001230
4 IOUT) 00001240
IF (IUNIT (11) .GT. 0) CALL SORIAP(X(LCHNEW), X(LCIBOU), X(LCCR), 00001250
1 X(LCCC), X(LCCV), X(LCHCOF), X(LCRHS), X(LCA), X(LCRES), X(LCIEQP), 00001260
2 X(LCHDCG), X(LCLRCH), KITER, HCLOSE, ACCL, ICHVG, KSTP, KPER, IPRSOR, 00001270
3 MXITER, NSTP, NCOL, NROW, NLAY, NSLICE, MBW, IOUT) 00001280
C 00001290
C7C2C---IF CONVERGENCE CRITERION HAS BEEN MET STOP ITERATING. 00001300
IF (ICNVG.EQ.1) GO TO 110 00001310
100 CONTINUE 00001320
KITER=MXITER 00001330
110 CONTINUE 00001340
C 00001350
C7C3----DETERMINE WHICH OUTPUT IS NEEDED. 00001360
CALL BASIOC(NSTP, KSTP, KPER, ISTRT, ICHVG, X(LCIOFL), NLAY, 00001370
1 IBUDFL, ICBCFL, IHDDFL, IUNIT (12), IOUT) 00001380
C 00001390
C7C4----CALCULATE BUDGET TERMS. SAVE CELL-BY-CELL FLOW TERMS. 00001400
MSUM=1 00001410
IF (IUNIT (1) .GT. 0) CALL BCF1BD(VBVM, VBVL, MSUM, X(LCHNEW), 00001420
1 X(LCIBOU), X(LCHOLD), X(LCSC1), X(LCCR), X(LCCC), X(LCCV), 00001430
2 X(LCTOP), X(LCSC2), DELT, ISS, NCOL, NROW, NLAY, KSTP, KPER, 00001440
3 IBCFCB, ICBCFL, X(LCBUFF), IOUT) 00001450
IF (IUNIT (2) .GT. 0) CALL WEL1BD(HWEL, MWEL, VBHM, VBVL, MSUM, X(LCWELL), 00001460
1 X(LCIBOU), DELT, NCOL, NROW, NLAY, KSTP, KPER, IWELCB, ICBCFL, 00001470
2 X(LCBUFF), IOUT) 00001480
IF (IUNIT (3) .GT. 0) CALL DRN1BD(HDRAIN, MXDRN, VBHM, VBVL, MSUM, 00001490
1 X(LCDRAI), DELT, X(LCHNEW), NCOL, NROW, NLAY, X(LCIBOU), KSTP, KPER, 00001500
2 IDRNCB, ICBCFL, X(LCBUFF), IOUT) 00001510
IF (IUNIT (8) .GT. 0) CALL RCH1BD(NRCHOP, X(LCIRCH), X(LCRECH), 00001520
1 X(LCIBOU), NROW, NCOL, NLAY, DELT, VBVL, VBHM, MSUM, KSTP, KPER, 00001530
2 IRCHCB, ICBCFL, X(LCBUFF), IOUT) 00001540
IF (IUNIT (5) .GT. 0) CALL EVT1BD(NEVTOP, X(LCIEVT), X(LCEVTR), 00001550
1 X(LCEXDP), X(LCESRF), X(LCIBOU), X(LCHNEW), NCOL, NROW, NLAY, 00001560
2 DELT, VBVL, VBHM, MSUM, KSTP, KPER, IEVTCB, ICBCFL, X(LCBUFF), IOUT) 00001570
IF (IUNIT (4) .GT. 0) CALL RIV1BD(NRIVER, MXRIVR, X(LCPIVR), X(LCIBOU), 00001580
1 X(LCHNEW), NCOL, NROW, NLAY, DELT, VBVL, VBHM, MSUM, 00001590
2 KSTP, KPER, IRIVCB, ICBCFL, X(LCBUFF), IOUT) 00001600
IF (IUNIT (7) .GT. 0) CALL GHB1BD(NBOUND, MXBND, VBHM, VBVL, MSUM, 00001610
1 X(LCBNDS), DELT, X(LCHNEW), NCOL, NROW, NLAY, X(LCIBOU), KSTP, KPER, 00001620
2 IGHBCB, ICBCFL, X(LCBUFF), IOUT) 00001630
C 00001640
C7C5---PRINT AND OR SAVE HEADS AND DRAWDOWNS. PRINT OVERALL BUDGET. 00001650
CALL BASIOT(X(LCHNEW), X(LCSTRT), ISTRT, X(LCBUFF), X(LCIOFL), 00001660
1 MSUM, X(LCIBOU), VBHM, VBVL, KSTP, KPER, DELT, 00001670
2 PERTIM, TOTIM, ITMUNI, NCOL, NROW, NLAY, ICHVG, 00001680
3 IHDDFL, IBUDFL, IHEDFM, IHEDUM, IDDNFM, IDDNUN, IOUT) 00001690
C 00001700
C7C6----IF ITERATION FAILED TO CONVERGE THEN STOP. 00001710
IF (ICNVG.EQ.0) STOP 00001720
C --- PARA MODELADO CON EL EFECTO NO LINEAL DEL ACUITARDO DE INTRODUCER.
C --- LA RUTINA RESPECTIVA: NOLI QUE LLAMA A NOLI - 7 OCT 1993 - NVG Y GHG
CALL NOLIFM(X(LCHNEW), X(LCHOLD), X(LCWELL), X(LCIBOU), X(LCCV), MXWELL
1 , NWEL, NCOL, NROW, NLAY, KSTP, DELT, BP, HUNDTO, AN, BN, NAMAX, NBMAX, HO)
200 CONTINUE 00001730
300 CONTINUE 00001740
C 00001750
C8-----END PROGRAM 00001760
WRITE (*, *) 'MATRIZ DE HUNDIMIENTO'
do 998 i=1, NROW

```

```

998 WRITE(*,999) (HUNDTO(j,i),j=1,NCOL)
999 FORMAT(15F10.2)
CALL WXYZ(X(LCHNEW),NCOL,NROW,NLAY)
close(unit=1)
close(unit=11)
close(unit=12)
close(unit=18)
close(unit=19)
close(unit=30)
close(unit=13)
close(unit=21)
close(unit=22)
STOP

```

```

00001770
00001780
00001790

```

```

C
END

```

```

C *****
C SUBROUTINE NOLIFM(HNEW,HOLD,WELL,IBOUND,CV,MXWELL,NWELLS,
C   NCOL,NROW,NLAY,KSTP,DELT,BP,HUNDTO,AN,BN,NAMAX,NBMAX,HO)

```

```

C
C-----VERSION 0100 8 OCT 1993 NOLIFM
C *****

```

```

C PAQUETE DE FORMULACION DE LA ARCILLA NO LINEAL
C *****

```

```

C ESPECIFICACIONES:

```

```

C-----
C REAL*8 HNEW,HUNDTO(NCOL,NROW),HO(NCOL,NROW),BP(NCOL,NROW)
C REAL*8 AN(NAMAX),BN(NBMAX,NCOL,NROW),QNOLI,HUND,CVL
C DIMENSION HNEW(NCOL,NROW,NLAY),HOLD(NCOL,NROW,NLAY),
C   1 WELL(4,MXWELL),IBOUND(NCOL,NROW,NLAY),CV(NCOL,NROW,NLAY)

```

```

C WRITE(*,*)'          *** DATOS PRODUCIDOS POR NOLIFM ***'

```

```

C-----EN ESTE CICLO REvisa SOLO LAS CELDAS CON UN POZO DEFINIDO.

```

```

C-----Y QUE SEA CELDA ACTIVA (IBOUND>0)

```

```

IARCI=1
DO 100 L=1,NWELLS
IC=WELL(3,L)
IR=WELL(2,L)
IL=WELL(1,L)
IF(IL.NE.IARCI) GO TO 100
IF(IBOUND(IC,IR,IL).LE.0) GO TO 100

```

```

C-----VERIFICACION DE QUE, ADEMAS ES UNA CELDA CON ARCILLA
IF(BP(IC,IR).EQ.0.0)GO TO 100

```

```

C-----SIMULACION DE LA ARCILLA NO LINEAL
HO(IC,IR)=HO(IC,IR)+HNEW(IC,IR,IL)-DBLE(HOLD(IC,IR,IL))
IF(HO(IC,IR).GT.0.0)HO(IC,IR)=0.00
CVL=CV(NCOL,NROW,NLAY)/4000000.0
CALL NOLI(AN,BP(IC,IR),DELT,HO(IC,IR),KSTP,

```

```

1 BN(1,IC,IR),NAMAX,NBMAX,HUNDTO(IC,IR),QNOLI,CVL)
C-----SUMA DE LA APORTACION AL LADO DERECHO DE LA ECUACION
IF(QNOLI.LT.0.0)QNOLI=0.00
WELL(4,L)=WELL(4,L)+QNOLI

```

```

100 CONTINUE
RETURN
END

```

```

C *****

```

```

C
C LECTURA DE PARAMETROS PARA LA ARCILLA NO LINEAL
C VERSION DE OCTUBRE DE 1993
C

```

```

C *****

```

```

SUBROUTINE NOLIRP(BP,NCOL,NROW)
CHARACTER*8 FMT

```

```

REAL*8 BP(NCOL,NROW)
READ(30,10)CNSTBP,FMT
WRITE(*,*)'CNSTBP = ',CNSTBP,' FMT = ',FMT,'*****BP*****'
DO 50 J=1,NROW
WRITE(*,*) J
READ(30,FMT)(BP(I,J),I=1,NCOL)
DO 22 II=1,NCOL
BP(II,J)=BP(II,J)*CNSTBP
22 CONTINUE
WRITE(*,9)(BP(I,J),I=1,NCOL)
50 CONTINUE
9 FORMAT(1X,10(1X,E10.5))
10 FORMAT(F10.3,A8)
RETURN
END

C
C*****
C
C Rutina de escritura de las columnas i, j, param para usos en graficacion
C
C*****
C
subroutine wxyz(param,ncol,nrow,nlay)
DOUBLE PRECISION param
DIMENSION param(NCOL,NROW,NLAY)
open(unit=31,file='HEADS.GRD')
write(31,*) "DSAA"

C
C-----SE ESCRIBE CON EL FORMATO DE SURFER PARA .GRD, PAG. H-1 DEL MANUAL
C
C----- COLUMNAS Y FILAS
WRITE(31,*)NCOL,NROW

C
C----- COLUMNAS PRIMERA Y ULTIMA
WRITE(31,*)1,NCOL

C
C----- FILAS PRIMERA Y ULTIMA
WRITE(31,*)1,NROW

C
C----- Z MINIMA Y MAXIMA: SURFER SE ENCARGA DE SELECCIONARLAS
WRITE(31,*) 0,0

C
C----- ESCRIBE LOS VALORES DE NIVELES INVIRTIENDO LAS FILAS
ncapa=1
DO 20 J=1,NROW
DO 10 I=1,NCOL
if(param(i,nrow-j+1,ncapa).eq.0)write(31,*) 2.0**127
if(param(i,nrow-j+1,ncapa).ne.0)WRITE(31,*)param(I,NROW-J+1,NCAPA)
10 CONTINUE
20 CONTINUE
close(unit=31)
RETURN
END

□

C$DEBUG
c Subrutina de consolidación NO LINEAL para uso desde el modelo
c tridimensional de flujo para uso en la Cuenca de México.
c Revisión: 8 de octubre de 1993, Vera N. y Hernández G.
C*****
SUBROUTINE NOLI (AN, ESP, TPAS, HO, KSTP, B, NAMAX, NBMAX, HUND, QHOLI, CVL)
REAL*8 AN(NAMAX), ESP, DELT, HO, B(NBMAX), QHOLI, HUND, CVL
REAL*4 PORO

C-----DAMOS EL NUMERO DE NODOS "N" Y NUMERO DE ITERACIONES "NI" '

```

```

PORO=0.3
DELT=7884000.DO
N=10
NI=INT ((TPAS/DELT)+0.5)
n1=1
nZE=n1
nZM=nZE+n
nH=nZM+n
nHM=nH+n
nPOE=nHM+n
nPOM=nPOE+n
nPE=nPOM+n
nPM=nPE+n
nSIGMA=nPM+n
nSIGMAM=nSIGMA+n
nEE=nSIGMAM+n
nEM=nEE+n
nSS=nEM+n
nKJ=nSS+n
nA=nKJ+n
nB=nA+n
nC=nB+n
nD=nC+n
nF=nD+n
nALFA=nF+n
nBETA=nALFA+n
nY=nBETA+n
nSCE=nY+n
nSGE0=nSGE+n
nSGM=nSGE0+n
nSGM0=nSGM+n
nq=nSGM0+n
nEE0=nq+NI
N1=NEE0+N
call carga(AN(nH), AN(nSIGMA), AN(nEE), AN(nEM), AN(nSS), AN(nKJ),
1 N, AN(nSGE), AN(nSGE0), AN(nSGM), AN(nSGM0), B, NBMAX)
CALL PASO(AN(nZE), AN(nZM), AN(nH), AN(nHM),
1 AN(nPE), AN(nPM), AN(nSIGMA), AN(nSIGMAM), AN(nEE),
2 AN(nEM), AN(nSS), AN(nKJ), AN(nA), AN(nB), AN(nC), AN(nD), AN(nF),
3 AN(nALFA), AN(nBETA), AN(nY), N, AN(nSGE), AN(nSGE0),
4 AN(nSGM), AN(nSGM0), AN(nq), AN(NEE0), NI, ESP, DELT, PORO, H0, KSTP
5 , HUND, QNOLI, CVL)
call salva(AN(nH), AN(nSIGMA), AN(nEE), AN(nEM), AN(nSS), AN(nKJ),
1 N, AN(nSGE), AN(nSGE0), AN(nSGM), AN(nSGM0), B, NBMAX)

```

C

```

RETURN
END

```

C*****

```

subroutine carga (H, SIGMA, EE, EM, SS, KJ, N, SGE, SGE0, SGM, SGM0, B, NBMAX)
REAL*8 H(N), SIGMA(N), EE(H), EM(H), SS(H)
REAL*8 KJ(N), SGE(N), SGE0(N), SGM(N), SGM0(N), B(NBMAX)
do 10 i=1, n
  j=0
  h(i) =b(j+i)
  j=j+n
  sigma(i) =b(j+i)
  j=j+n
  ee(i) =b(j+i)
  j=j+n
  em(i) =b(j+i)
  j=j+n
  ss(i) =b(j+i)
  j=j+n
  kj(i) =b(j+i)
  j=j+n
  sge(i) =b(j+i)

```

```

        j=j+n
        sge0(i)=b(j+i)
        j=j+n
        sgm(i)=b(j+i)
        j=j+n
        sgm0(i)=b(j+i)
10    continue
C
RETURN
END

C*****
subroutine salva(H, SIGMA, EE, EM, SS, KJ, N, SGE, SGE0, SGM, SGM0, B, NBMAX)
REAL*8 H(N), SIGMA(N), EE(N), EM(N), SS(N)
REAL*8 KJ(N), SGE(N), SGE0(N), SGM(N), SGM0(N), B(NBMAX)
do 10 i=1,n
    j=0
    b(j+i)=h(i)
    j=j+n
    b(j+i)=sigma(i)
    j=j+n
    b(j+i)=ee(i)
    j=j+n
    b(j+i)=em(i)
    j=j+n
    b(j+i)=ss(i)
    j=j+n
    b(j+i)=kj(i)
    j=j+n
    b(j+i)=sge(i)
    j=j+n
    b(j+i)=sge0(i)
    j=j+n
    b(j+i)=sgm(i)
    j=j+n
    b(j+i)=sgm0(i)
10    continue
C
RETURN
END

C*****
SUBROUTINE PASO(ZE, ZM, H, HM, PE, PM, SIGMA, SIGMAM,
1  EE, EM, SS, KJ, A, B, C, D, F, ALFA, BETA, Y, N, SGE, SGE0, SGM, SGM0,
2  Q, EEO, NI, ESP, DELT, PORO, HO, KSTP, HUND, QHOLI, CVL)
REAL*8 ZE(N), ZM(N), H(N), HM(N), EEO(N)
REAL*8 PE(N), PM(N), SIGMA(N), SIGMAM(N), EE(N), EM(N), SS(N), Y(N)
REAL*8 KJ(N), A(N), B(N), C(N), D(N), F(N), h1, ALFA(N), BETA(N), Q(NI)
REAL*8 DELT, DELZ, PI, LAMDA, SGE(N), SGE0(N), SGM(N), SGM0(N)
REAL*8 ESP, QHOLI, HUND, HO, HOO, CVL
REAL*4 PORO, ZC, PREC
C
    if (kstp.ne.1)go to 501
    LAMDA=5.9
    DELZ=ESP/N
C----VALOR DE LA CARGA EN EL EXTREMO INFERIOR Y EN EL SUPERIOR
    h1=ESP
    ZC=PORO*ESP
    PREC=2066.66*(1.0-PORO)*(ESP-ZC)
C1----DAMOS LA PIEZOMETRIA INICIAL HI Y LA PRESION TOTAL SIGMA
    ZINCRE=0.0
    DO 10 I=1,N
    ZINCRE=(I-1.0/2.0)*DELZ
    H(I)=ESP
    SIGMA(I)=
1  9800.0*PORO*(ESP-ZINCRE)+2066.66*(1.0-PORO)*(ESP-ZINCRE)
10    CONTINUE

```

```

HUND=0.0D0
501 H00=H0
    QNOLI=0.D0
    DO 500 L=1,4
    DO 20 I=1,N
    EEO(I)=EE(I)
20 CONTINUE
C2----CALCULAMOS SS EN LOS ENTEROS
    CALL SSJS(PE,H,ZE,SIGMA,EE,SS,N,LAMDA,L,SGE,SGEO,PORO,
1 ZC,PREC,DELZ)
C3----CALCULAMOS KJ EN LOS MEDIOS
    CALL KJS(HM,H,PM,ZM,SIGMA,SIGMAM,EM,KJ,N,LAMDA,L,SGM,SGMO,PORO,
1 ZC,PREC,DELZ)
C4----CONSTRUIMOS LA MATRIZ DIAGONAL Y EL VECTOR DE LA DERECHA
    CALL DIAGO(A,B,C,KJ,SS,DELZ,DELT,N,D,F,H,H00,h1)
C6----CALCULAMOS H EN EL TIEMPO (N+1) POR MEDIO DE ALG.DE THOMAS
    CALL TRIDIA(A,B,C,H,F,BETA,ALFA,Y,N)
C-----CALCULAMOS EL FLUJO EN LA PARTE INFERIOR DEL ACUITARDO
C Q(L)=-KJ(2)*4000000.0*delt*(H00-H(1))/DELZ
Q(L)=2*4000000.0*delt*(H(1)-H00)/(DELZ/KJ(2)+1.0/CVL)
C-----CALCULAMOS EL HUNDIMIENTO EN EL ACUITARDO
IF(L.EQ.1)GOTO 500
DO 30 I=1,N
HUND=HUND+(EEO(I)-EE(I))*DELZ/(1.0+EEO(I))
30 CONTINUE
C-----CALCULAMOS EL FLUJO DEL ACUITARDO EN EL ACUIFERO
QNOLI=QNOLI+Q(L)
C7----CONTINUAMOS CON EL SIGUIENTE PASO DE TIEMPO
500 CONTINUE
QNOLI=QNOLI/(4.0*DELT)
C
RETURN
END

C*****
SUBROUTINE SSJS(PE,H,ZE,SIGMA,EE,SS,N,LAMDA,L,SGE,SGEO,
1 PORO,ZC,PREC,DELZ)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION PE(N),H(N),ZE(N),SIGMA(N),EE(N),SS(N)
REAL*8 LAMDA,SGE(N),SGEO(N)
REAL*4 PORO,ZC,PREC
C
RO=1000.D0
G=9.8D0
GAMA=RO*G
C-----CALCULO DE LAS PRESIONES EN LOS ENTEROS
C-----CALCULO DE "Z" EN LOS ENTEROS DESDE I=1,2,3,...,N
DO 10 I=1,N
ZE(I)={I-(1.0/2.0)}*DELZ
PE(I)=GAMA*PORO*(H(I)-ZE(I))
10 CONTINUE
C-----CALCULO DE "e" y "Ss" EN LOS ENTEROS
IF(L.GT.1)GO TO 100
DO 30 I=1,N
SGE(I)=SIGMA(I)-PE(I)
IF(SGE(I).LT.PREC)THEN
EE(I)=10.0
SS(I)=0.015
ELSE
EE(I)=9.1+(0.9/(ZC))*ZE(I)
SS(I)=0.12+(0.03/(ZC))*ZE(I)
ENDIF
30 CONTINUE
RETURN
100 DO 40 I=1,N
SGEO(I)=SGE(I)

```



```

SGE(I)=SIGMA(I)-PE(I)
IF(SGE(I).LT.PREC)THEN
EE(I)=10.0
SS(I)=0.015
ELSE
EE(I)=EE(I)-LAMDA*LOG10(SGE(I)/SGE0(I))
VAR1=(1.0+EE(I))*(SGE(I)-SGE0(I))
SS(I)=(GAMA*LAMDA*LOG10(SGE(I)/SGE0(I)))/VAR1
ENDIF
40 CONTINUE
C-----SSJ(J) CONTIENE LOS VALORES DE LOS COEFICIENTES BUSCADOS
C
RETURN
END

```

C*****

```

SUBROUTINE KJS(HM,H,PM,ZM,SIGMA,SIGMAM,EM,KJ,N,LAMDA,L,SGM,SGM0,
1 PORO,ZC,PREC,DELZ)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
REAL*8 LAMDA,KJ
REAL*4 PORO,ZC,PREC
DIMENSION HM(N),H(N),PM(N),ZM(N),SIGMA(N),SIGMAM(N),EM(N),KJ(N)
DIMENSION SGM(N),SGM0(N)

```

```

C
E=N
RO=1000.DO
G=9.8DO
GAMA=RO*G
C-----CALCULAMOS H y SIGMA EN LOS MEDIOS
DO 10 I=2,N
HM(I)=(H(I-1)+H(I))/2.0

```

```

C
C-----CALCULO DE "Z" EN LOS MEDIOS DESDE I=2,3,...,N-1
C-----ZM(1)=DELZ EN 3/2
ZM(I)=(I-1.0)*DELZ
C-----CALCULAMOS LAS PRESIONES EN LOS MEDIOS
PM(I)=GAMA*PORO*(HM(I)-ZM(I))
C-----CALCULO DE "SIGMA" EN LOS MEDIOS
SIGMAM(I)=(SIGMA(I-1)+SIGMA(I))/2.0
10 CONTINUE

```

```

C-----AHORA CALCULAMOS LAS E's EN LOS MEDIOS y KJ(I)
IF(L.GT.1)GO TO 100
DO 30 I=2,N
SGM(I)=(SIGMAM(I)-PM(I))
IF(SGM(I).LT.PREC)THEN
EM(I)=10.0
KJ(I)=5.0E-9
ELSE
EM(I)=9.1+(0.9/(ZC))*ZM(I)
KJ(I)=(2.3+(2.7/(ZC))*ZM(I))*(1.0E-9)
ENDIF
30 CONTINUE
RETURN

```

```

100 DO 40 I=2,N
SGM0(I)=SGM(I)
SGM(I)=(SIGMAM(I)-PM(I))
IF(SGM(I).LT.PREC)THEN
EM(I)=10.0
KJ(I)=5.0E-9
ELSE
EMO=EM(I)
EM(I)=EM(I)-LAMDA*LOG10(SGM(I)/SGM0(I))
s1=(EM(I)-EMO)/2.5
KJ(I)=KJ(I)*(10**s1)
ENDIF

```

```

40 CONTINUE
C-----ESTE ULTIMO CALCULO CONTIENE LAS KJ'S EN LOS MEDIOS
C
      RETURN
      END

C*****
      SUBROUTINE DIAGG(A,B,C,KJ,SS,DELZ,DELT,N,D,F,H,H00,h1)
      REAL*8 A(N),B(N),C(N),KJ(N),SS(N),D(N),F(N),H(N),H00,h1
      REAL*8 DELZ,DELT
C
C
C-----EMPEZAMOS CON LA DIAGONAL A, A(J),J=2,E
      A(1)=0.0
      A(N)=-1./4.
      DO 10 J=2,N-1
10    A(J)=KJ(J)
C
C-----SEGUIMOS CON LA DIAGONAL B, B(J),J=1,E
      B(1)=3./4.
      B(N)=3./4.
      DO 20 J=2,N-1
20    B(J)=- (KJ(J)+KJ(J+1)+ ((DELZ**2)/DELT)*SS(J))
C
C-----CONTINUAMOS CON LA DIAGONAL C, C(J),J=1,E-1
      C(1)=-1./4.
      DO 30 J=2,N-1
30    C(J)=KJ(J+1)
C
C-----FINALIZAMOS CON LA COLUMNA D, D(J),J=1,E
      DO 40 J=2,N-1
40    D(J)=- ((DELZ**2)*SS(J))/DELT
C5----CALCULAMOS EL VECTOR F (VECTOR DE LA DERECHA)
      F(1)=(0.5)*H00
      F(N)=(0.5)*h1
      DO 250 J=2,N-1
250   F(J)=D(J)*H(J)
C
C-----CON ESTO HEMOS CONSTRUIDO LAS DIAGONALES
C-----A(J),J=2,N
C-----B(J),J=1,N
C-----C(J),J=1,N-1
C-----F(J),J=1,N
      RETURN
      END

C*****
      SUBROUTINE TRIDIA(A,B,C,H,F,BETA,ALFA,Y,N)
      REAL*8 A(N),B(N),C(N),H(N),F(N),BETA(N),ALFA(N),Y(N)
C
C-----EMPEZAMOS EL CALCULO DE PARAMETROS
      BETA(1) = C(1)/B(1)
      Y(1) = F(1)/B(1)
      DO 200 I = 2,N
      alfa(i)=b(i)-a(i)*beta(i-1)
      beta(i)=c(i)/alfa(i)
200   y(i)=(f(i)-a(i)*y(i-1))/alfa(i)
C EMPEZAMOS LA SUSTITUCION HACIA ATRAS APARTIR DEL ULTIMO RENGLON
      h(n)=y(n)
      DO 210 I=n-1,-1
210   h(i)=y(i)-beta(i)*h(i+1)

      RETURN
      END

```

□

CAPÍTULO 5.

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA Y APLICACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

En este capítulo se describen los aspectos relevantes de la cuenca de México. Estos se discretizan para ser procesados en el modelo matemático computacional de flujo. Mediante este se hace la simulación del estado estacionario y, posteriormente, del estado transitorio. Se presentan salidas o resultados tanto numéricos como su versión gráfica. El proceso descrito es posible aproximarlos a la realidad por medio de un ciclo de calibración que permite alternativas para la administración científica del acuífero.

5.1. La Zona de Estudio.

Aunque desde hace mucho tiempo se estudia el subsuelo de la cuenca de México, gran parte del conocimiento que se tiene de las zonas más profundas es debida a estudios recientes [1,2,3] con base en reinterpretaciones de las líneas sísmicas realizadas por Petróleos Mexicanos, PEMEX, que se emprendieron a consecuencia del macrosismo de septiembre de 1985. La revisión y síntesis se verificó con los registros litológicos y geofísicos de los pozos profundos exploratorios de PEMEX, de los pozos productores de agua controlados por la DGCOH, GAVM, y CEAS, así como de los pozos perforados durante el proyecto Texcoco [5-7]. Una descripción de la secuencia estratigráfica que comprende el estado actual del conocimiento es la de Mosser y Molina [2], su versión a escala y actualizada en corte y planta es la de Carrillo-Rivera [8] (véanse las figuras 5.1). Una explicación correspondiente a cada cuerpo enumerado es dada en la tabla 5.1.

En la cuenca de México (la cuenca, en lo sucesivo), los depósitos lacustres arcillo-arenosos someros constituyen estratos semiconfinantes, algunas veces interdigitados con materiales volcánicos recientes. Estos depósitos fueron formados durante la última sedimentación de los lagos que cubrían la cuenca; actualmente cubren al acuífero principal. El sistema semiconfinante superficial que definen está subdividido en dos grandes acuitardos (aquí considerados como uno sólo), separados por un estrato de materiales granulares arenosos, de espesor reducido (3m en promedio) y alta permeabilidad relativa, denominada "Capa Dura". Esta capa, a pesar de ser muy delgada, juega un papel importante en las cimentaciones de las obras civiles y en el aprovechamiento del agua subterránea de la ciudad de México. Su importancia en las cimentaciones se debe a su poca profundidad y a su solidez como apoyo de las mismas.

TABLA 5.1 ELEMENTO DE LA SECUENCIA SISMOESTRATIGRÁFICA.

Nº NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1. Arcillas lacustres superficiales	En el norte de la cuenca son delgadas y se acuñan; hacia en sur, en los frentes de la sierra de Chichinautzin, alcanzan de 200 a 300 m, y están interestratificadas con lavas basálticas.
2. Rellenos aluviales	Alcanzan espesores máximos de 300 a 400 m. Son importantes en el sur y se acuñan en el norte. Descansan en el poniente en las bases de la formación Tarango, donde sepultan una red de valles erosionados; en el centro descansan sobre los aglomerados volcánicos estratificados correlacionables con la formación Tepozteco y también sepultan una red de valles.
3. Basaltos del Pleistoceno y Reciente	Los basaltos de la hilera volcánica de la sierra de Santa Catarina están interestratificados con los depósitos lacustres (1) y con los rellenos aluviales (2). En el sur las lavas de la sierra Chichinautzin están interestratificadas con los depósitos lacustres (1) y con los rellenos aluviales (2); también forman la potente barrera que represó el antiguo sistema doble de valles que drenaba la cuenca al Alto Amacuzac en el Pleistoceno Superior, hace 600,000 años.
4. Formación Tarango	Representa los abanicos volcánicos que se extienden a los pies de las elevadas sierras (4a) que limitan la cuenca al oriente y al poniente. Consiste en tobas, flujos piroclásticos, lahares, depósitos fluviales, capas de pómez y suelos(4). Estos materiales se encuentran principalmente en la base de los depósitos aluviales (2), aunque sus elementos superiores (arenas Azules) están interestratificados con ellos.
5. Cuerpos volcánicos Basálticos - Andesíticos	Elementos que forman las elevaciones aisladas del cerro de la Estrella, del Peñón de los baños, del cerro de Chimalhuacán y de los cuerpos dómicos basálticos del sureste de la sierra de Guadalupe. Estos cuerpos descansan directamente sobre la secuencia estratificada.
6. Secuencia estratificada	Depósitos volcánicos claramente estratificados que progredan del centro de la cuenca hacia el sur, con espesores en el norte de 100 a 200 m, y que en el sur aumentan hasta 600 m. Estos depósitos desaparecen debajo de la sierra del Chichinautzin para aflorar en la sierra del Tepozteco, al oriente de Cuernavaca.
7. Sierras pliocénicas	Elevaciones volcánicas de mediana altura que están en parte intercaladas y en parte en la secuencia estratificada (6). sus elementos en la cuenca de México son la sierra de Tepoztlán, la sierra de las Pitayas, la sierra de Guadalupe y la sierra de Patlachique; son conjuntos de volcanes estratificados y domos espectaculares.

TABLA 5.1 (Continuación)

Nº NOMBRE	DESCRIPCIÓN
8. Depósitos lacustres del plioceno inferior	Formación que consiste en arcillas lacustres, generalmente de consolidación avanzada. Afloran en el norte de la cuenca por Huehuetoca, Taximay y Requena. Desaparecen hacia el sur debajo de los rellenos aluviales (2) y de las lavas pliocénicas intermedias y ácidas del las sierras de Tepotzotlán y de Guadalupe (7). registran espesores de 200 a 300 m debajo de la ciudad de México y subyacen a la secuencia estratificada (6). Al sur de la cuenca afloran debajo de los elementos orientales de la sierra del Tepozteco.
9. Vulcanitas del Mioceno	Forman un grueso paquete de rocas lávicas, clásticas y lacustres, generadas a consecuencia de las primeras erupciones volcánicas ligadas al principio de la subducción de la placa de cocos. Sus elementos más elevados afloran poco en el centro de la cuenca de México. Forman las elevaciones volcánicas de Barrientos y del cerro del Tepeyac (domo) en el norte de la ciudad. Parecen constituir elevaciones dirigidas al NNW, e cuyos espacios intramontanos se acumularon la secuencia estratificada (6) y los depósitos lacustre del Plioceno (8).
10 Vulcanitas del Oligoceno	En la base de las vulcanitas del Mioceno (9) se reconocen importantes espesores de vulcanitas que se adscriben al Oligoceno. Afloran en muy pocos puntos de la cuenca: en el centro poniente, en la sierra del Tigre (Atizapán de Zaragoza); y en el centro oriente, en la sierra de Tlaixpan (Texcoco). Ambas elevaciones representan calderas que están, como la mayoría de los elementos de esta edad, característicamente falladas al NNW. Así el graben de Mixuca, principal estructura tectónica del Oligoceno, se extiende por debajo de la ciudad de México, parte del pie norte de la sierra de Chichinaulzin hacia el NNW. El graben pasa con su flanco oriental por debajo del cerro de la Estrella y aflora con su flanco occidental en la sierra del Tigre. Los depósitos de la formación Balsas (10a), tobas, paleo suelos, yesos, conglomerados, y lavas, no se distinguen sísmicamente por lo que se incluyen en las vulcanitas del Oligoceno (10).
11 Basamento sedimentario marino	Debajo de las vulcanitas de la cuenca de México se encuentran formaciones marinas del Cretácico. Están plegadas y cabalgadas al oeste, hecho discernible en los perfiles sísmicos. Asimismo, el contacto de las Vulcanitas (incluyendo la formación Balsas (10a) en la base del complejo oligocénico) con las lutitas, margas (11a) y calizas marinas (11b) es bastante reconocible en los sismogramas analizados. Dos de los cuatro pozos perforados por PEMEX alcanzaron este basamento, permitiendo extender el contacto vulcanitas-depósitos marinos a la mayoría de las líneas sísmicas.

Desde el punto de vista hidrológico, la capa dura es de alta permeabilidad, ubicada entre dos estratos de muy baja permeabilidad pero alta capacidad de almacenamiento. Durante la primera etapa de aprovechamiento del acuífero de la ciudad de México, los pozos perforados fueron de poca profundidad, por lo que la mayor parte del gasto provenía de las arcillas a través de la capa dura.

Las formaciones acuíferas son de origen sedimentario y volcánico. Afloran en la superficie y su contacto perimetral lo tiene con el acuitardo que lo cubre en la porción central y con basaltos fracturados del cuaternario y rocas fracturadas del Terciario. En el interior de este estrato y abarcando parte de él, se encuentra un cuerpo de basalto fracturado (Fig. 5.1).

Debido a la insuficiente información sobre algunas zonas de la cuenca, el modelo que se desarrolló la incluye parcialmente. La zona de estudio y su posición relativa con respecto a la cuenca se muestran en la Figura 5.2. La topografía del terreno se muestra en la Figura 5.3 y su discretización se indica en la figura 5.4.

El sistema hidrológico subterráneo de la cuenca funciona como un sistema de acuífero, – semiconfinado en una parte y en otra libre. Las recargas laterales del sistema se originan por las lluvias en las montañas que circundan a la zona de estudio. Hasta el primer tercio del presente siglo la recarga estuvo equilibrada con su descarga, que ocurría en los lagos, para allí evaporarse.

Actualmente, debido al aprovechamiento del acuífero, se ha generado en él una depresión piezométrica cuyos niveles son menores a los del acuitardo. Esto da lugar al drenaje vertical, de las arcillas hacia el acuífero. Por consiguiente, una parte de la recarga del acuífero proviene del acuitardo. Esto, además, produce asentamiento del terreno, que en algunas zonas de la ciudad de México ha llegado a ser muy acentuado, creando problemas difíciles para las obras civiles. Otra consecuencia es el cambio de funcionamiento hidráulico del acuífero en algunas áreas ante el *colgamiento* hidráulico del acuitardo [3].

5.2. Discretización del Dominio.

El sistema de celdas corresponde al de nodo centrado en la celda; la localización de cada celda se ve como el espacio entre la distancia de nodos vecinos; sus parámetros son los mismos dentro de la celda y se ubican en el nodo, al centro de la celda. Estas son de forma cuadrada, se ordenaron en un arreglo de renglones y columnas en planos horizontales y capas en el sentido vertical (i, j, k). Denominando Δc al ancho del renglón, Δr al ancho de la columna y Δv al espesor de las capas, el volumen de la celda es: $\Delta c \cdot \Delta r \cdot \Delta v$.

La discretización en tres dimensiones del espacio de las formas geológicas se llevó a cabo de acuerdo a las necesidades del modelo de flujo. Primero se definió el parteaguas que rodea a la zona de estudio (Figura 5.5). Se estableció un sistema de celdas que miden 2000m x 2000m, de 32 renglones en la dirección de norte a sur y de 42 columnas en la dirección de este a oeste. Se utilizó una notación matricial con la celda (1,1) en la esquina noroeste. En la figura 5.15 se indica la distribución de celdas activas o de flujo (con uno), e inactivas (con cero) o de no flujo.

Los espesores de las capas se ajustaron lo más cercanamente a la forma de las capas geológicas; en el plano horizontal se aproximó la distribución a la forma discreta de las celdas. Los cuerpos litológicamente diferentes se discretizaron en el espacio de acuerdo con su secuencia estratigráfica. Su discretización se muestra en las figuras 5.6 a 5.9.

La primera capa tiene como límite superior la superficie de la arcilla lacustre, aproximadamente a una elevación de 2,240 msnm; se consideró como un solo acuitardo, cuya distribución se indica en la Figura 5.6. Dentro de este cuerpo se localiza la capa dura. En la actualidad este acuitardo debe funcionar preferentemente como una zona de recarga, hacia cuerpos inferiores, con una dirección de flujo esencialmente vertical. La conductividad hidráulica vertical (cerca a 5×10^{-9} m/s), se tomó del trabajo de Herrera, Yates y Hennart [4] (Figura 5.10). El coeficiente de almacenamiento específico correspondiente (5.73×10^{-2} m) se tomó del mismo trabajo [4], donde derivaron la combinación K/S' del modelo bidimensional (Figura 5.11), ya que ésta es relevante para la definición de su comportamiento hidráulico. Combinaciones similares se obtuvieron por la DGCOH [3].

La segunda capa es el acuífero principal, actualmente en explotación; está compuesto, con base en la tabla 5.1, por los elementos 2, 3, 4, 4a, 5, 7, 9, 10. Los límites laterales del acuífero principal coinciden con el parteaguas superficial de la cuenca. La frontera inferior es

la cima de la secuencia estratificada (6) y la sierra pliocénica (7). El acuífero es semiconfinado por el acuitardo superior; y es libre en las sierras del oriente, poniente, y sur y también en las planicies y conos aluviales que rodean a la planicie lacustre [3].

La morfología y granulometría del paleo ambiente fluvial cambian la magnitud de la *conductividad hidráulica vertical* Kh en los rellenos aluviales. A grandes rasgos, en la zona de canal, donde los sedimentos son gruesos la Kh varía entre 4.6×10^{-5} y 5.3×10^{-3} m/s y disminuye en las zonas de planicie a valores entre 3.1×10^{-5} y 1.0×10^{-4} m/s. Las medias respectivas para Kh son de 4.5×10^{-4} y 7.6×10^{-5} m/s.

La Kh en los basaltos de pleistoceno y reciente (3) varía de 1.7×10^{-5} a 2.3×10^{-2} m/s, con media representativa de 3.1×10^{-3} m/s. Los valores muestran que no todos los basaltos son de alta permeabilidad y sugieren heterogeneidad en este medio poroso fracturado.

La formación Tarango es también heterogénea, ya que la Kh varía entre 2.0×10^{-6} y 1.0×10^{-4} m/s. Los valores bajos predominan y la media representativa es de 5.9×10^{-5} m/s.

Las sierras elevadas (4a), forman las zonas de recarga del acuífero principal en las sierras del oriente y poniente, se les infiere una Kh de 5.9×10^{-4} m/s, un orden de magnitud mayor a la media de la formación Tarango. El valor asignado considera el alto fracturamiento y la presencia de manantiales así como las filtraciones reportadas por la DGCOH en los túneles de la sierra de las cruces y los pozos productores perforados en andesitas de la misma sierra.

La morfología y granulometría de los rellenos aluviales también controlan la magnitud del *coeficiente de almacenamiento* S y el *coeficiente de rendimiento específico* S_y . En las zonas confinadas de planicie S medio es 0.007 y en las zonas confinadas de canal es 0.0014. En las zonas libres de canal el S_y medio es de 0.1 y en las zonas libres de planicie es 0.005. los valores medios anteriores se consideran representativos para rellenos aluviales.

Los Basaltos del Pleistoceno Reciente (3) y los cuerpos volcánicos basálticos-andesíticos (5), presentan valores de S y S_y similares. En condiciones confinadas S está entre 0.004 y 0.005 con una media de 0.0045. En condiciones libres S_y es de 0.01 a 0.27 con una media de 0.1. En la Formación Tarango S_y es de 0.01 a 0.09 con un valor medio de 0.044.

Las sierras pliocénicas (7) y las Vulcanitas del Mioceno (9) y del Oligoceno (10), forman parte del acuífero principal. El valor de K/h para estos elementos varía entre 4.4×10^{-6} y 1.0×10^{-4} m/s; el valor de S varía entre 0.00015 y 0.03. Los valores altos representan mejores condiciones de fracturamiento para transmitir y almacenar agua subterránea. Es posible que su permeabilidad y porosidad disminuyan debido a compresión por sepultamiento, a grado tal que a cierta profundidad conforman el basamento hidrogeológico.

La profundidad a la base del acuífero principal varía entre 200 m en el centro de la planicie hasta 3000 m en el volcán Popocatepetl, en las sierras de Guadalupe y Patlachique. La profundidad a la base del acuífero coincide con la profundidad del basamento hidrogeológico, los espesores en la planicie aluvial-lacustre varían entre 150 y 500 m, los mayores espesores se presentan en el sur y los menores en el norte. En las sierras volcánicas se infieren espesores de entre 400 y 1000 m.

La tercera capa del modelo la constituye la secuencia estratificada (6), que pasa a constituir un acuitardo inferior. Se considera de permeabilidad y porosidad bajas; por su fracturamiento adquiere más permeabilidad. El rango de K/h varía entre 1.2×10^{-6} a 3.5×10^{-5} m/s; S varía entre 0.001 y 0.005. La Secuencia Estratificada no es recomendable para su explotación con pozos. A escala regional es importante por la filtración vertical que le aporta al acuífero principal.

El basamento Hidrogeológico consiste principalmente de la Formación Balsas (10a), la Mezcala, así como las Vulcanitas del Mioceno (9) y del Oligoceno (10). Se consideran Prácticamente impermeables y constituyen una frontera inferior.

5.3 Modelación del Estado Estacionario

El modelado requiere recuperar por simulación las condiciones previas a la extracción, para simular, a su vez, el abatimiento transitorio y así obtener una solución final. La solución de estado estacionario pretende representar al sistema de flujo regional que existía antes de que los pozos de producción fueran instalados. Las condiciones iniciales son las naturales que debieron haber prevalecido hasta 1940. Esta condición inicial es válida también para el acuitardo, considerándose que estos valores piezométricos fueron los mismos inicialmente.

Ya que no existían piezómetros al momento de iniciar la producción, se empleó información piezométrica reciente como ayuda en la simulación de las condiciones de flujo.

En la zona de la arcilla, que se localiza al centro de la zona de estudio, en el nivel topográfico más bajo, los niveles piezométricos son muy cercanos a la superficie del terreno que es de 2240 msnm. Esta elevación aumenta en los bordes. El análisis en condiciones estacionarias, sin extracción, con una elevación máxima de 2600 msnm, da lugar a la configuración inicial de la figura 5.12. Aquí puede observarse que en las partes altas de las sierras del sur las elevaciones de los niveles piezométricos alcanzan 2600 msnm y en la parte norte la máxima elevación es de 2300 msnm.

La región se consideró con celdas de no-flujo en los bordes; se incluye la recarga por infiltración de lluvias y escurrimientos superficiales en las partes altas. Se considera que en la cuenca, hasta 1940, en el periodo previo a la extracción intensiva, los acuíferos estaban saturados y con descarga de los excedentes por manantiales alrededor de la zona de lacustre.

Si se suponen condiciones de flujo cero entre el acuitardo y el acuífero inmediato inferior durante la simulación del estado estacionario, los gradientes verticales son cero. Al adoptar estas suposiciones ya no se necesita incluir al acuitardo en la simulación de estado estacionario y se puede trabajar con la información de espesores de las capas. Las simulaciones en estado estacionario no son dependientes del tiempo, aunque debido a la formulación numérica de la ecuación de flujo es necesario realizar varias iteraciones hasta alcanzar una solución estable y observando que se dé la convergencia.

La simulación final calibrada se realizó al incluir en la entrada del modelo paquetes de datos con información de manantiales, el acuitardo y la recarga. No se incluye aquí la extracción. El diagrama de isoclinas de niveles piezométricos resultantes se observa en la figura 5.13. En la figura se observa la dirección del flujo a través de flechas de vectores de velocidad. Para implantar esta opción de ver las velocidades se elaboró un programa de procesamiento gráfico cuyo listado constituye un anexo.

5.4 Modelación del Estado Transitorio

La simulación del sistema de flujo transitorio, es el análisis del abatimiento por extracción de agua subterránea a través de pozos. El modelo calcula los abatimientos desde un elevación de referencia. Esta referencia es la condición inicial dada por el estado estacionario.

Los parámetros acuíferos son los mismos que se utilizaron en el análisis del estado estacionario. Se utilizó la misma división en cuanto a las capas y a las celdas. Lo novedoso que se introduce es un régimen de bombeo.

La simulación final se realizó a través de incluir en la entrada del modelo paquetes de datos con información de manantiales, el acuitardo, la recarga y la extracción. La información de caudales de extracción por cada celda es incluida en periodos ordenados por año, abarcándose 50 años.

La extracción por pozos se lleva a cabo en la capa del acuífero granular, con un caudal instalado y distribución obtenida a través de la información proporcionada por la Comisión de Aguas del Valle de México, Departamento del Distrito Federal y Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento del Estado de México. Esta información comprende los datos de localización, constructivos, de operación y uso de los pozos registrados y operados por las dependencias mencionadas.

Para aproximar la distribución de los pozos, los que se localizan dentro de cada celda de la malla de entrada se representan al centro, en el nodo de la celda. La extracción total es el valor acumulado de la producción de los pozos contenidos en la celda en cuestión. Se corrió el modelo para 50 años y cada año cambian los valores; se introdujo el incremento paulatino del bombeo de acuerdo al patrón de crecimiento de la extracción registrado históricamente.

El proceso de la calibración del modelo de flujo involucra la comparación de los resultados de las simulaciones con la información piezométrica de las lecturas de campo. Para que una simulación numérica se aproxime lo más posible al campo de flujo observado, es necesario realizar una serie de corridas del modelo numérico con el fin de calibrar los parámetros hidráulicos de las unidades acuífero y acuitardo. Puede ser necesario modificar las condiciones de frontera, como parte del proceso de calibración. Es muy importante una buena interpretación de la información para el análisis de los resultados de la modelación computacional, sobre todo en el proceso de calibración.

La solución numérica del caso transitorio consiste en el cálculo del abatimiento por la extracción de agua subterránea. Basados en los datos piezométricos disponibles, se llegó a la configuración de niveles piezométricos; el flujo regional en la capa del granular representado por flechas de vectores de velocidad (figura 5.14).

REFERENCIAS

- 1 Vázquez S., E. y Jaimes P., R., "Geología de la cuenca de México", Geofísica Internacional, Vol. 28, 2, 1989
- 2 Moser, F. y Molina C., "Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca de México", Boletín del Centro de Investigaciones Sísmicas de la Fundación Javier Barros Sierra, Vol. 3, 1, 1993
- 3 D.D.F. - D.G.C.O.H., Diagnóstico del Estado Presente de las Aguas Subterráneas de la Ciudad de México y Determinación de sus Condiciones Futuras, Elaborado por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., 1994.
- 4 Herrera, I., Yates, R. y Hennart, J. P. "Estudio de Hundimiento y Balance de los Acuíferos Subterráneos de la Ciudad de México". Elaborado para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Investigaciones Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS), UNAM 1982.
- 5 DGCOH, "Estudio Geohidrológico de la porción suroriental de la cuenca de México", Informe Técnico, ETEISA, 1992.
- 6 GAVM CNA, Boletines de Mecánica de Suelos, Datos para el valle de México 1953-1986
- 7 PEMEX, Informes Geológicos Finales de los Pozos Tulychaulco 1, Mixhuca 1, Roma 1, y Copilco 1. 1988.
- 8 Carrillo-Rivera, J.J., "Monitoring of Exploited Aquifers Resulting in Subsidence - Example: Mexico City", UNESCO Series, Project M-1.1b (In Press), 1994

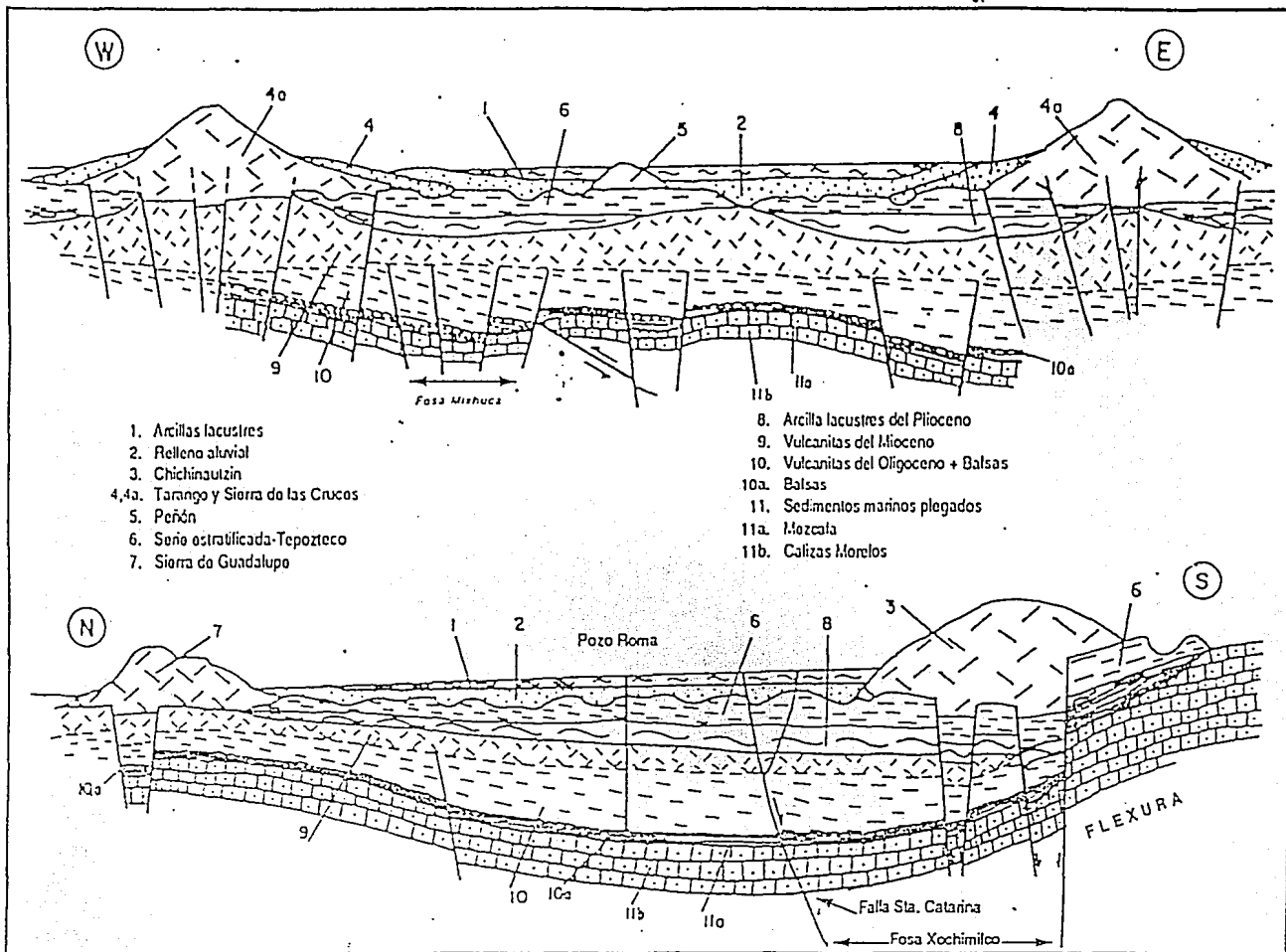


FIG. 5.1a CORTES TRANSVERSALES ESQUEMÁTICOS.

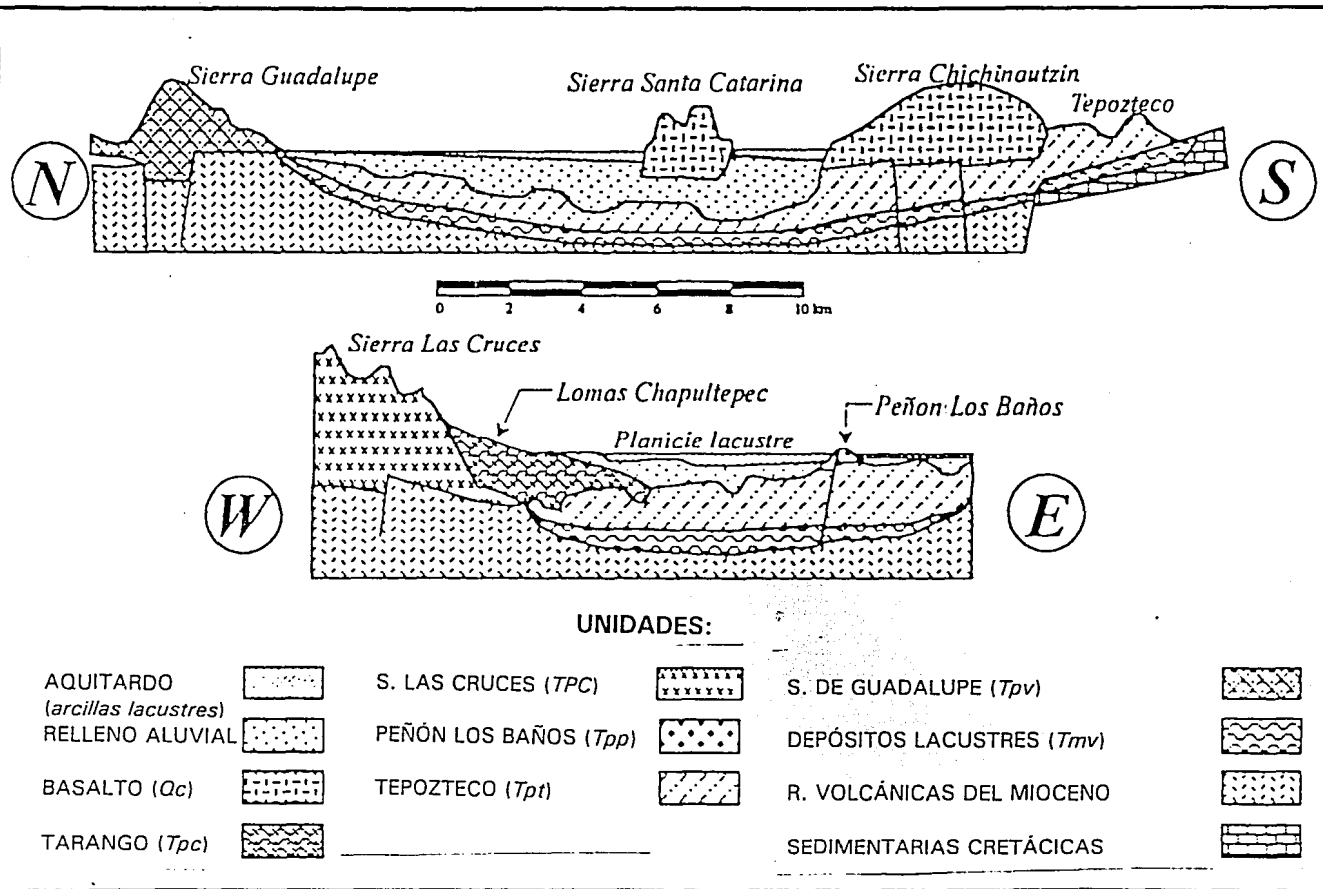


FIG. 5.1b UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS, CORTE A ESCALA.
(Fuente: Carrillo-Rivera, 1994)

ERA	PERIODO	ÉPOCA	SÍMBOLO	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS
C E N O Z O I C O	C u a t e r n a r i o	Pleis to ce no - Ho lo ce no	Qla	Sedimentos Lacustres (arcillas, limos, arenas y piroclastos)
			Qal	Aluvión (piroclastos, yeso y caliza lacustre)
			Qc	Formación Chichinautzin (flujos de lava basáltico-andesíticos)
			Qp	Formación Popocatepetl (piroclastos, tobas, pómez)
			Qi	Formación Iztaccihuatl (flujos lávicos andesítico-basálticos)
			Qt	Formación Tláloc (flujos lávicos andesítico-latíticos)
			Qpp	Formación El Pino (flujos de lava basáltico-andesítico-traquíticos)
			Qllg	Formación Llano Grande (pómez adesítica-dacítica, brecha y flujos lávicos)
	T e r c i a r i o	Plio ce no	Tpp	Peñón de los Baños (flujos de lava andesíticos)
			Tpc	Formación Las Cruces (tobas andesítico-dacíticas), U. Tarango incluida (flujos lávicos, pómez y aluvión)
			*Tpo'	Formación Otomí (tobas andesítico-dacíticas)
			Tpt	Formación Teposteco (piroclastos)
			Tpv	Depósitos Volcánicos (tobas piroclastos y flujos de lava andesítica y dacítica)
			Mio ce no	Tmv
Tomv	Rocas Volcánicas (andesíticas)			

FIG. 5.1d UNIDADES EN LA ESCALA GEOLÓGICA
(Fuente: Carrillo-Rivera, 1994)



FIG. 5.2 POSICIÓN RELATIVA DE LA ZONA DE ESTUDIO EN LA CUENCA (FUENTES: I. N. E. G. I. y S. A. R. H.)

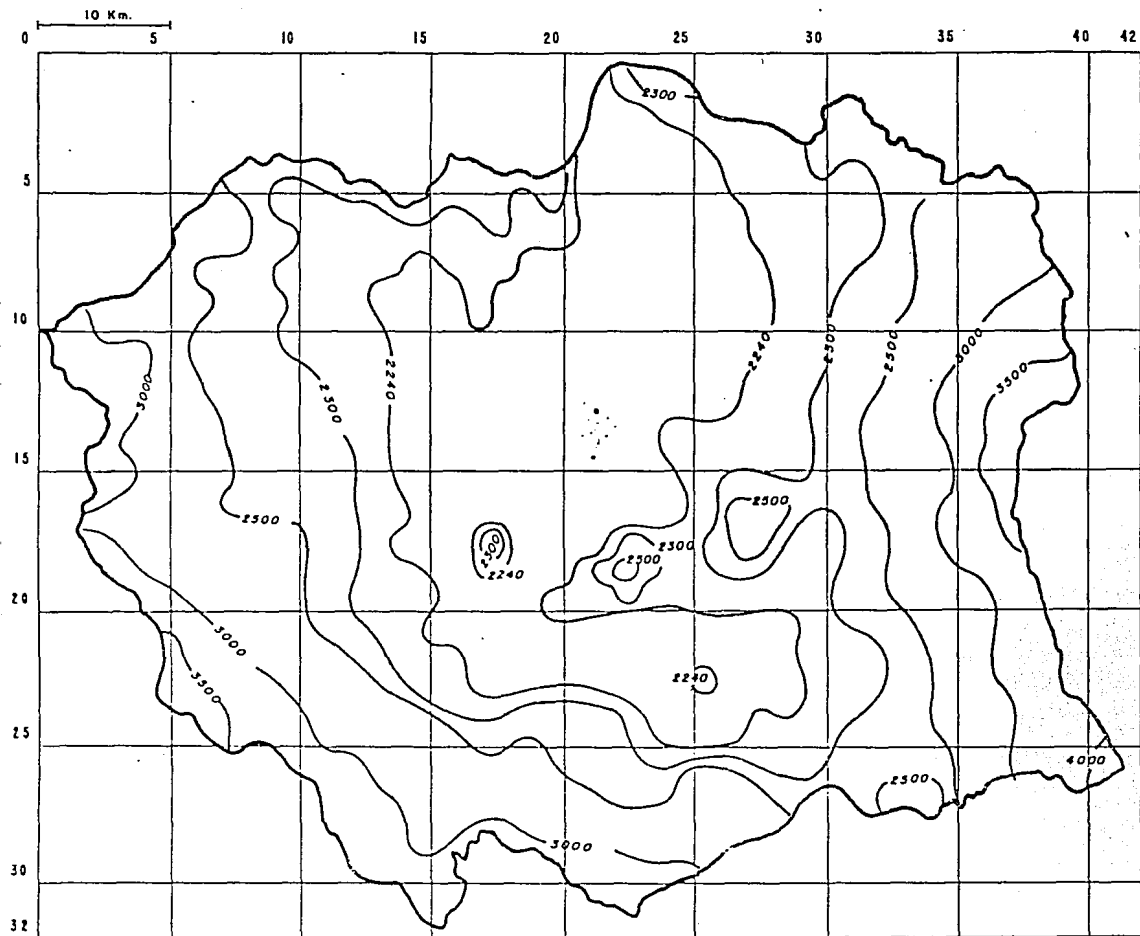


FIG. 5.3 TOPOGRAFÍA DE LA PORCIÓN SUR DEL VALLE m. s. n. m.

(Fuente: I. N. E. G. I. hojas topográficas E14A28, E14B31, E14A38, E14A39, E14B41, E14A48, E14A49)

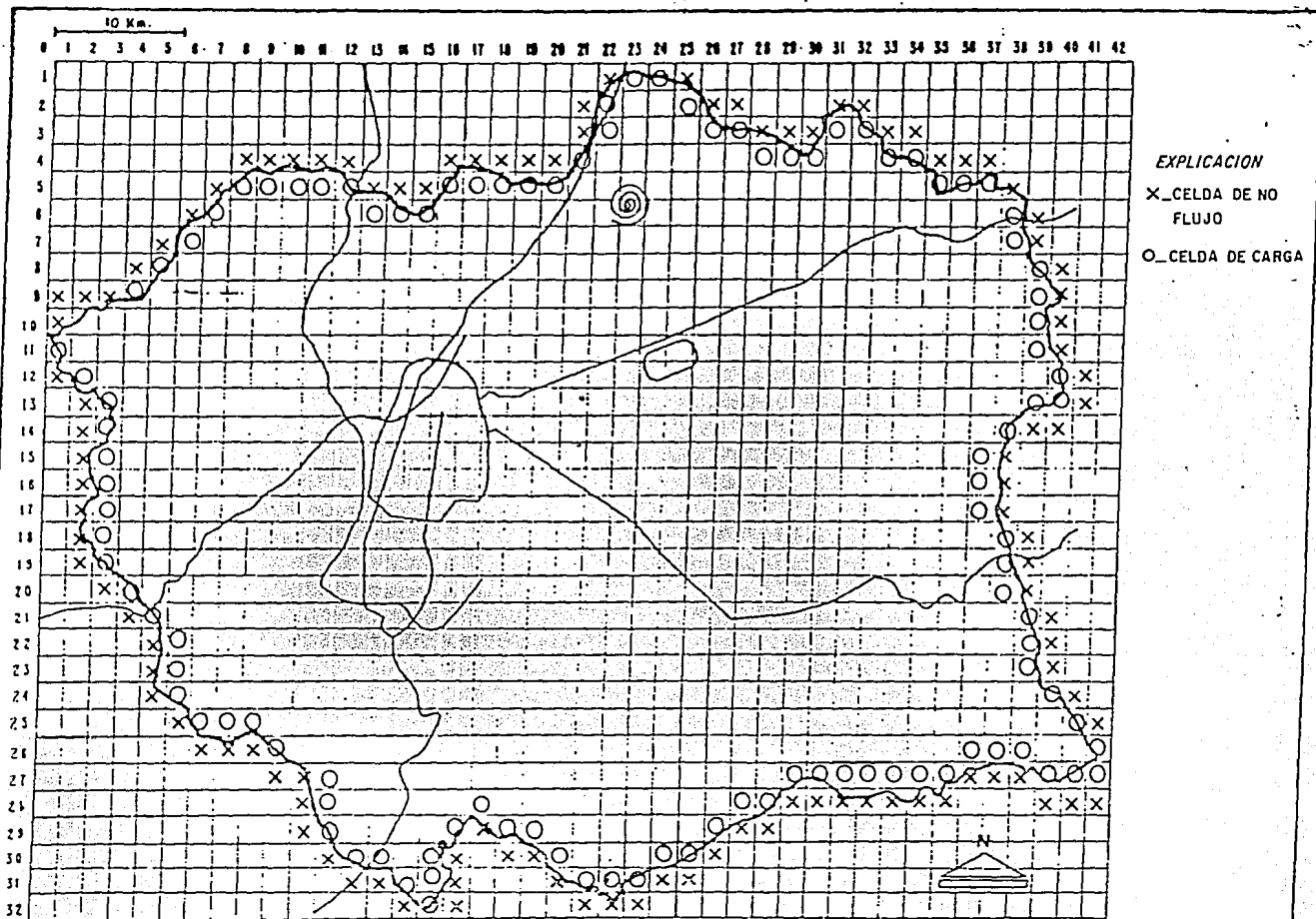


FIG. 5.5 ILUSTRACIÓN EN PLANTA DE LAS CELDAS DEL MODELO

CUENCA DE MEXICO

ZONA DE ESTUDIO

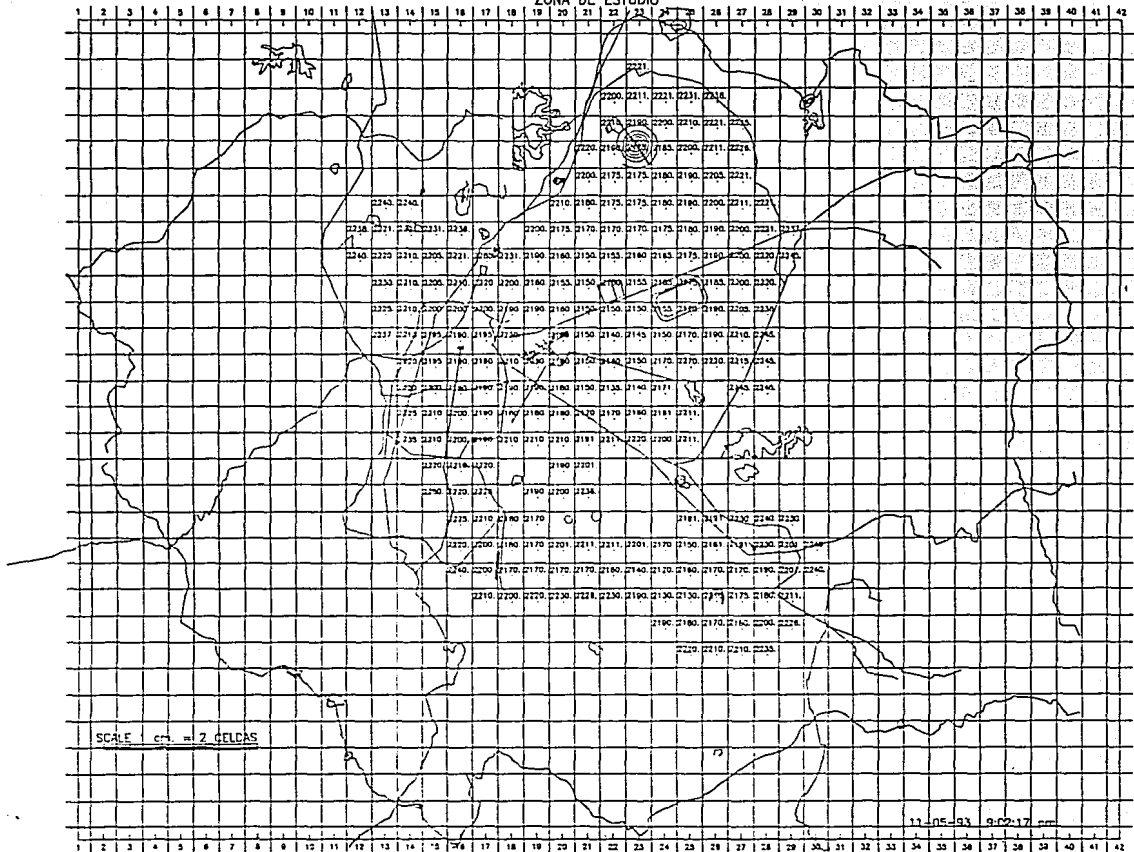


FIG. 5.6 BASE DE LA ARCILLA

CUENCA DE MEXICO

ZONA DE ESTUDIO

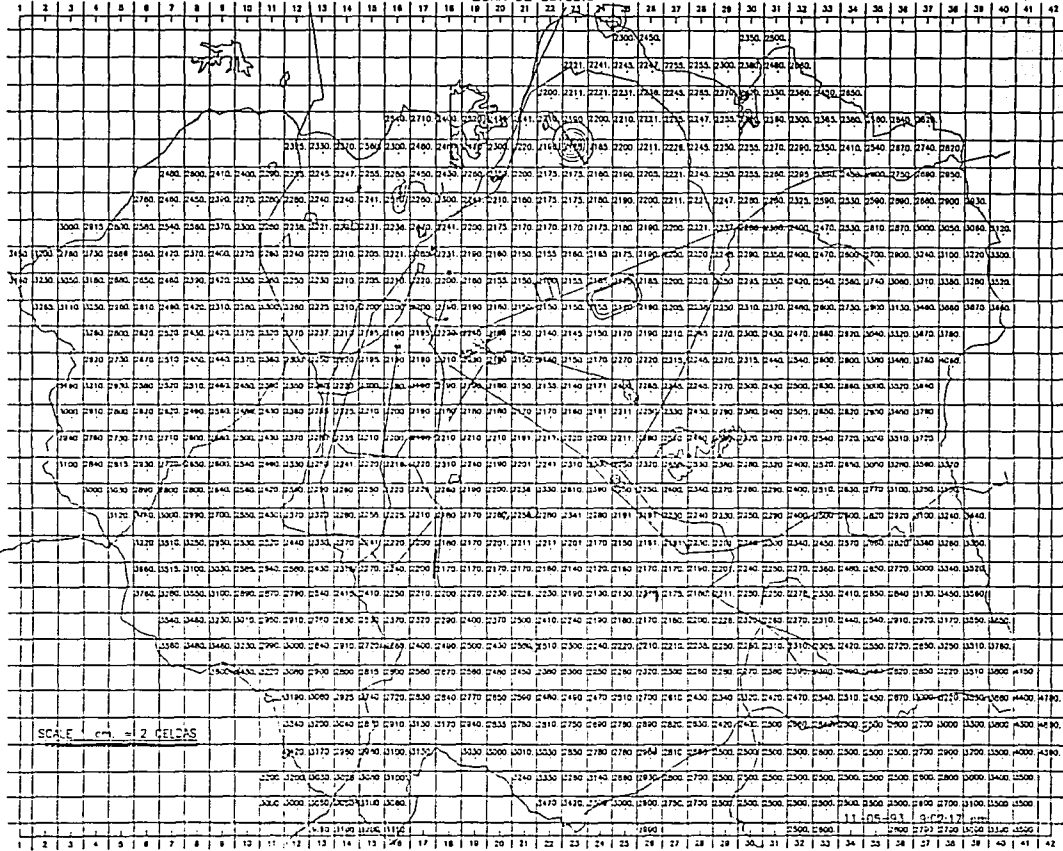


FIG. 5.7 CIMA DEL ACUÍFERO

CUENCA DE MEXICO

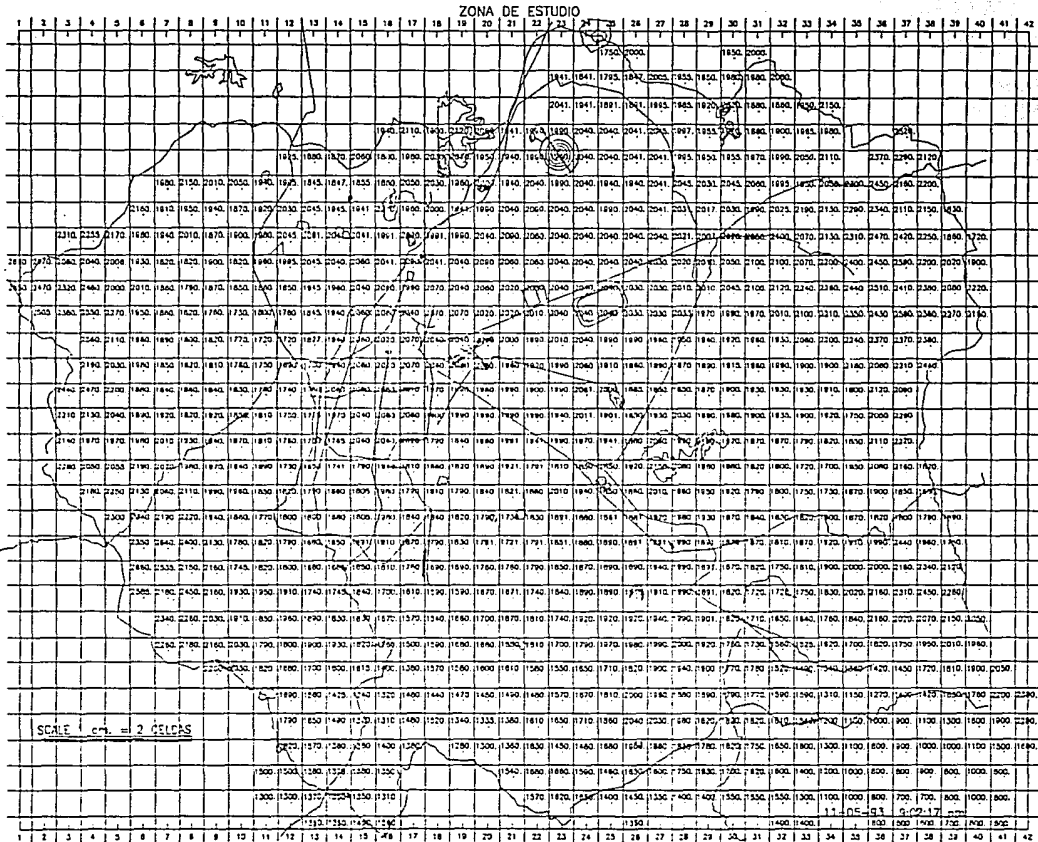


FIG. 5.8 BASE DEL ACUÍFERO

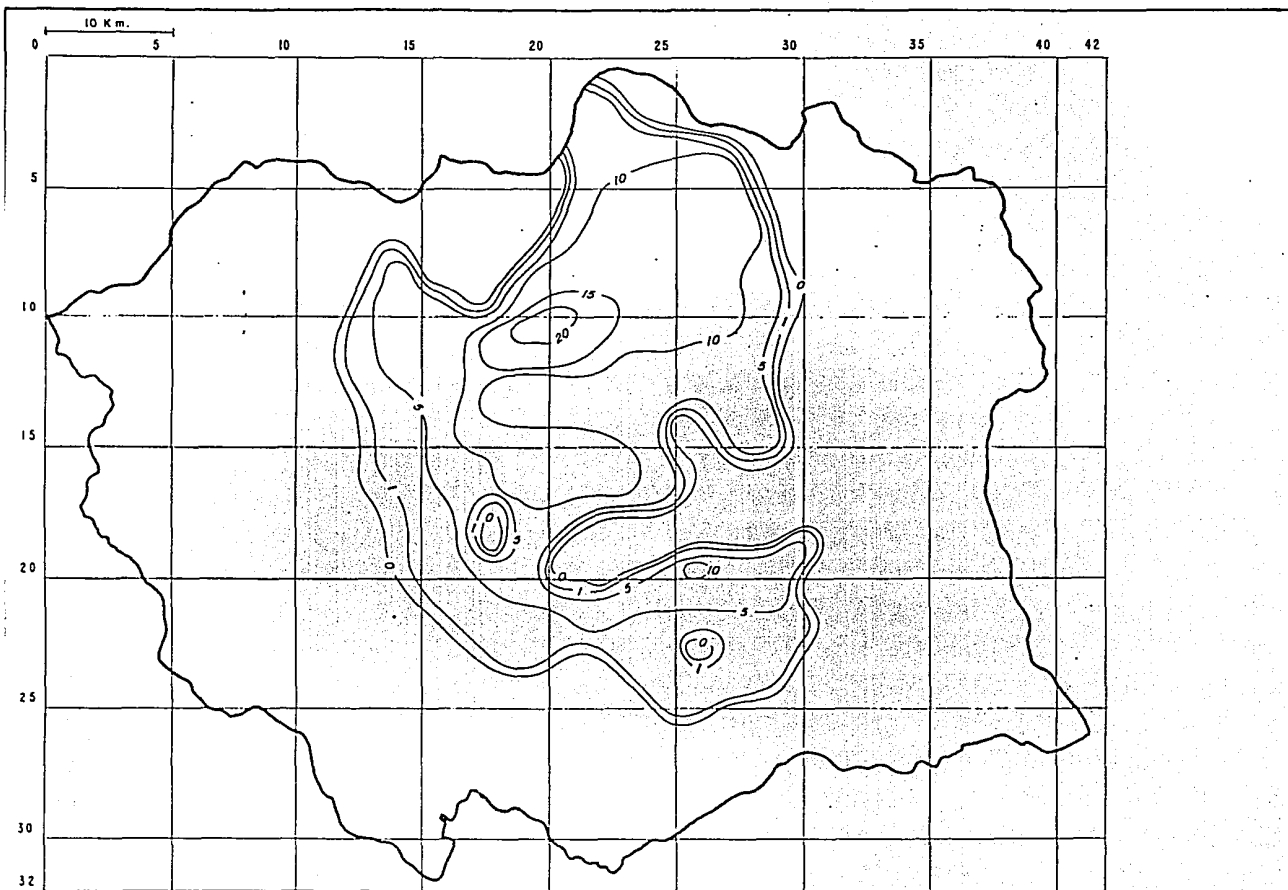


FIG. 5.10 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA VERTICAL DEL ACUITARDO.
 multiplicar por 10^{-9} m/seg. (Fuente: Herrera, Yates y Hennart, 1982)

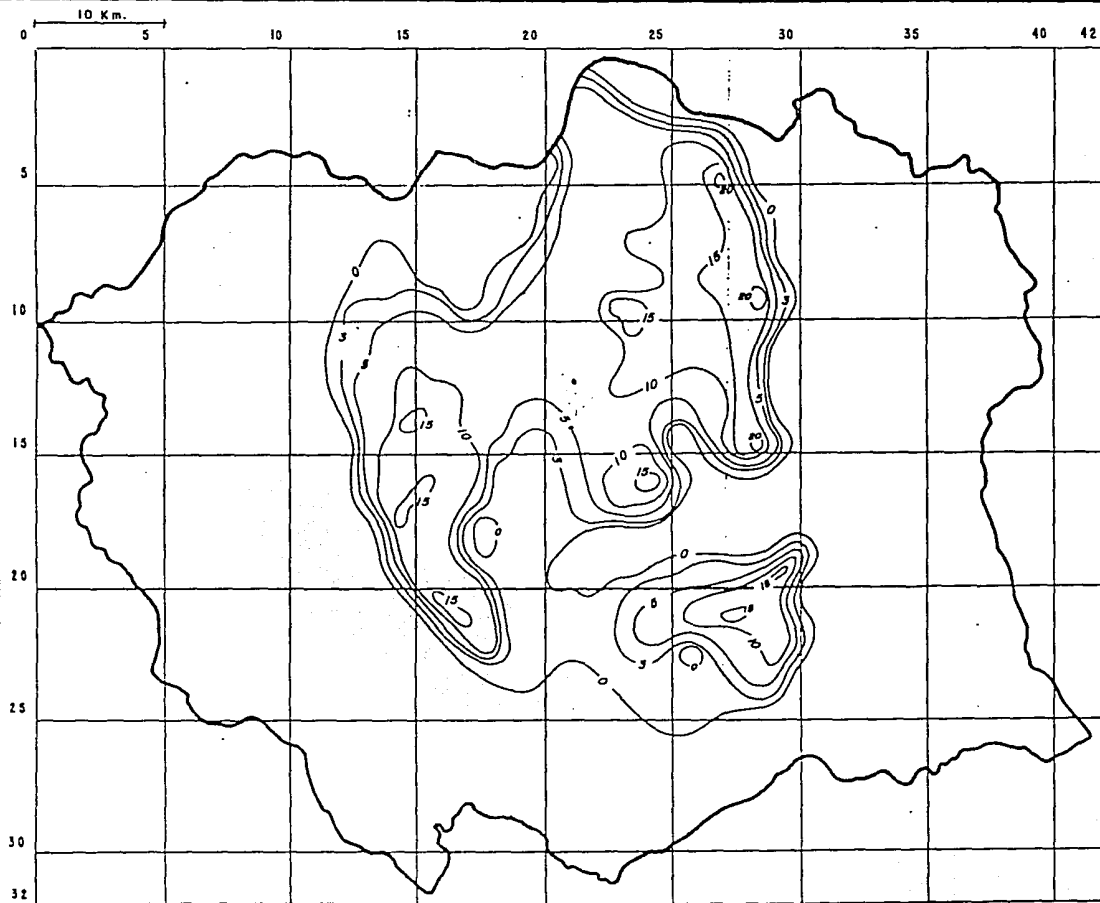


FIG. 5.11 ALMACENAMIENTO ESPECÍFICO DEL ACUITARDO $10^{-2} m^{-1}$

CUENCA DE MEXICO

ZONA DE ESTUDIO

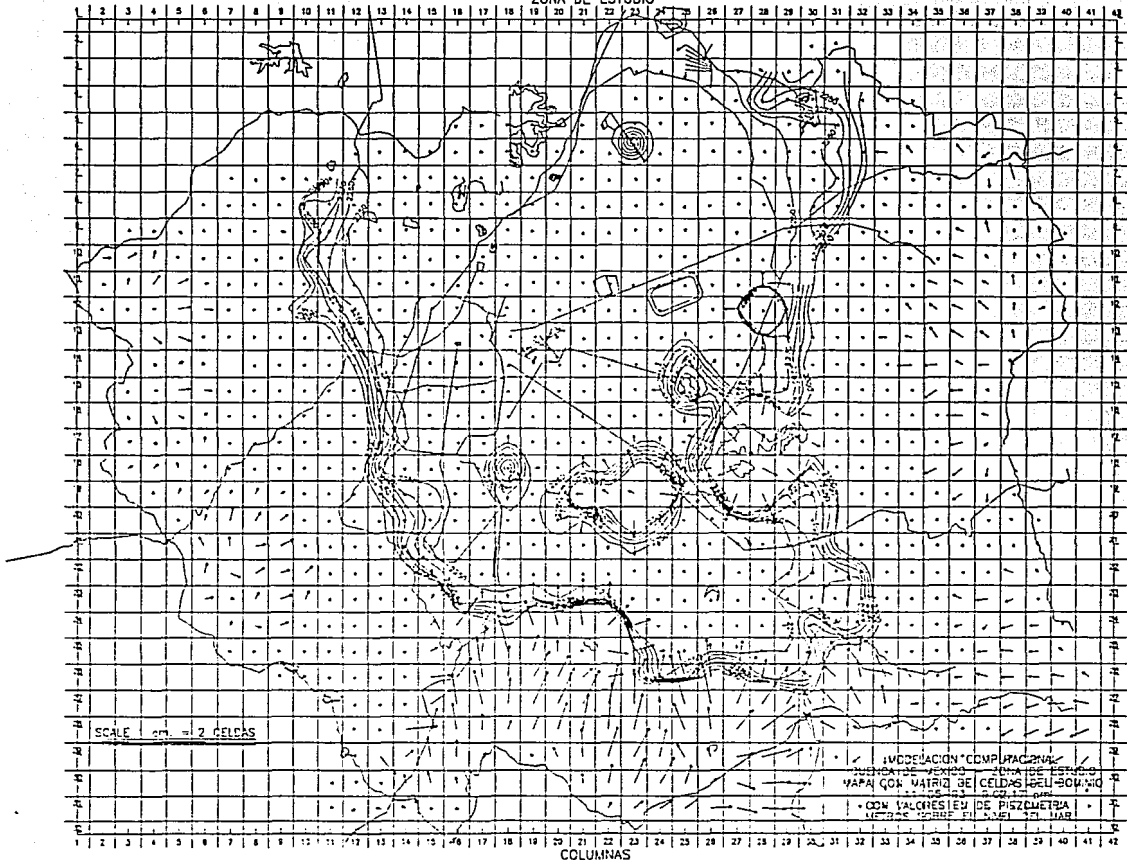


FIG. 5.13 RESULTADO DE LA MODELACIÓN DEL ESTADO ESTACIONARIO

CUENCA DE MEXICO

ZONA DE ESTUDIO

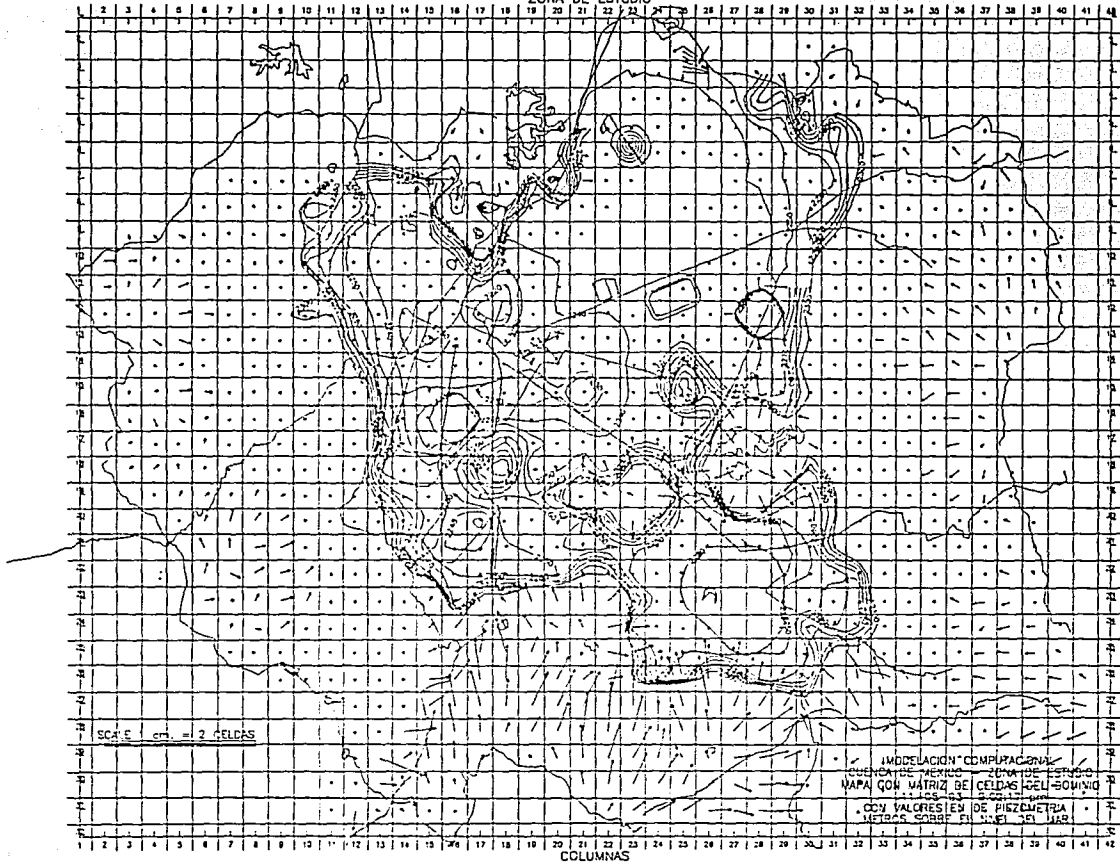


FIG. 5.14 RESULTADO DE LA MODELACIÓN DEL ESTADO TRANSITORIO

ANEXO DEL CAPÍTULO 5. LISTADOS.

```

C
C*****
C  PROGRAMA PARA EL CALCULO DE VECTORES VELOCIDAD Y SU GRAFICACION
C  SOBRE LINEAS EQUIPOTENCIALES PARA UNA CUENCA SUBTERRANEA
C*****
C
C          Guillermo Hernandez y Jorge De Los Santos
C          Version 1.0                Agosto de 1991
C-----
C          GRAFVEL2                por Guillermo Hernandez
C          Version 2.0                octubre de 1991
C
C Se introducen modificaciones para la mayor velocidad y memor manejo de
C archivos de pasos intermedios, utilizandose solo los siguientes:
C HEADS.GRD de entrada
C GRDTE.DAT de entrada
C GRAVEL.DAT INTERMEDIO
C  GRAF.DAT de entrada
C GRAFVEL.BLN de salida
C-----
C          GRAFVEL2                G. HERNANDEZ G.
C          VERSION 2.1                ABR 92
C SE INTRODUCEN MODIFICACIONES PARA USAR SURFER CON VALORES DE 2**127
C SIN AFECTAR EL CALCULO DE VELOCIDADES
C-----
C          GRAFVEL2                G. HERNANDEZ G.
C          VERSION 2.2                MAY 92
C SE INTRODUCEN MODIFICACIONES PARA USAR SURFER CON ETIQUETAS
C SIN AFECTAR EL CALCULO DE VELOCIDADES SE AGREAN LO SIGUIENTE:
C HEADS.DAT de salida
C SE ELIMINA:
C GRAVEL.DAT INTERMEDIO
C-----
C
C
C DIMENSIONAMIENTO DE MATRICES Y APERTURA DE ARCHIVOS DE LECTURA Y
C ESCRITURA
C
C          DIMENSION HNEW(42, 32, 1),VELX(42, 32, 1),VELY(42, 32, 1);VELR(42, 32, 1),
C          1ANF(42, 32, 1),VELRX(42, 32, 1),VELRY(42, 32, 1),AINTER(1400, 5)
C
C          CHARACTER*80 CADENA
C          OPEN(UNIT=28, FILE='GRDTE.DAT')
C          OPEN(UNIT=29, FILE='HEADS.GRD')
C          OPEN(UNIT=30, FILE='GRAF.DAT')
C          OPEN(UNIT=31, FILE='VELX.DAT')
C          OPEN(UNIT=32, FILE='VELY.DAT')
C          OPEN(UNIT=33, FILE='VELRX.DAT')
C          OPEN(UNIT=34, FILE='VELRY.DAT')
C          OPEN(UNIT=35, FILE='VELR.DAT')
C          OPEN(UNIT=36, FILE='GRAVEL.DAT')
C          OPEN(UNIT=37, FILE='GRAFVEL.BLN')
C          OPEN(UNIT=38, FILE='HEADS.DAT')
C
C
C LEE NUMERO DE ESTRATOS ACUIFEROS, NUMERO DE COLUMNAS Y FILAS DE LA
C MATRIZ. LEE COMO CARACTERES LAS 4 PRIMERAS FILAS DEL ARCHIVO HEADS
C
C          READ(28, *) NLAY, NCOL, NROW
C          I=1
C          100 READ(29, 101) CADENA
C          101 FORMAT(A80)
C          IF(I.EQ.5) GO TO 102

```

```

      I=I+1
      GO TO 100
C
C LEE EL NUMERO DE ESTRATO QUE GRAFICARA
C
102 READ(30,*) NCAPA
C
C LLAMA A LA SUBROUTINA PARA EL CALCULO DE VELOCIDADES
C
      CALL CALCVEL(HNEW,VELX,VELY,VELRX,VELRY,VELR,ANF,NCOL,NROW,NCAPA
1,MULT,NACTIVOS,AINTER)
C
C CIERRA EL ARCHIVO INTERMEDIO DE DATOS. VUELVE A ABRIRLO PARA
C AGREGAR LOS DATOS QUE USARA LA SUBROUTINA CONSTRUCTORA DE VECTORES.
C LLAMA A LA SUBROUTINA ANTEDICHA Y CIERRA ARCHIVOS.
C
C
      CLOSE (UNIT=36)
      OPEN(UNIT=36,FILE='GRAVEL.DAT')
      ESCALA=MULT
      CALL VELGR(HNEW,NCOL,NROW,ESCALA,NACTIVOS,AINTER)
      CLOSE (UNIT=28)
      CLOSE (UNIT=29)
      CLOSE (UNIT=30)
C
      CLOSE (UNIT=31)
C
      CLOSE (UNIT=32)
C
      CLOSE (UNIT=33)
C
      CLOSE (UNIT=34)
C
      CLOSE (UNIT=35)
C
      CLOSE (UNIT=36)
      CLOSE (UNIT=37)
      CLOSE (UNIT=38)
      STOP
      END
C
C
C
C
      SUBROUTINE CALCVEL(HNEW,VELX,VELY,VELRX,VELRY,VELR,ANF,NCOL,NROW
1,NCAPA,MULT,NACTIVOS,AINTER)
      DIMENSION HNEW(42,32,1),VELX(42,32,1),VELY(42,32,1),VELR(42,32,1),
1ANF(42,32,1),VELRX(42,32,1),VELRY(42,32,1),AINTER(1400,5)
      PI=3.14159
C
C COMPLETA LA LECTURA DEL ARCHIVO HEADS: NIVELES FINALES EN EL ACUIFERO
C
      DO 20 J=1,NROW
      DO 10 I=1,NCOL
          READ(29,*) HNEW(I,J,NCAPA)
10 CONTINUE
20 CONTINUE
C
C LEE EL PASO DE CALCULO ESPACIAL PARA X E Y EN LA GRILLA. LEE LA
C CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA PROMEDIO DEL ESTRATO
C
      READ(30,*) DELR,DELC,CHIDR
C
C CALCULA EL VALOR DE LA VELOCIDAD EN LA DIRECCION X PARA CADA NODO. EN
C CASO DE QUE EXISTA UN VALOR CERO ( INDICADOR DE CELDA VACIA ) NO
C REALIZA EL CALCULO Y OCUPA CON CERO EL VALOR DE VELOCIDAD EN X PARA
C ESE NODO
C
      DO 50 I=1,NROW
      DO 40 J=1,NCOL
          IF(J.NE.NCOL) GO TO 41
          VELX(J,I,NCAPA)=0.
          GO TO 42
41
42      K=J+1

```

41

```

C --- VERIFICACION DE QUE NO ES CERO O 2**127 (O.170141E+39)
  IF (HNEW(K,I,NCAPA) .NE.0.
  1.AND.HNEW(K,I,NCAPA) .NE.0.170141E+39) GO TO 43
  VELX(J,I,NCAPA)=0.
  GO TO 42
43  IF (HNEW(J,I,NCAPA) .NE.0.
  1.AND.HNEW(J,I,NCAPA) .NE.0.170141E+39) GO TO 44
  VELX(J,I,NCAPA)=0.
  GO TO 42
C CALCULO DE LA COMPONENTE X DE LA VELOCIDAD
44  VELX(J,I,NCAPA)=((HNEW(J,I,NCAPA)-HNEW(K,I,NCAPA))/DELX)*CHIDR
c 42  WRITE(31,*) VELX(J,I,NCAPA)
42  CONTINUE
40  CONTINUE
50  CONTINUE
C
C IDEM COMENTARIO ANTERIOR, PARA VELOCIDAD EN LA DIRECCION Y
C
  DO 70 I=1,NROW
  DO 60 J=1,NCOL
  IF(I.NE.NROW) GO TO 61
  VELY(J,I,NCAPA)=0.
  GO TO 62
61  K=I+1
C --- VERIFICACION DE QUE NO ES CERO O 2**127 (O.170141E+39)
  IF (HNEW(J,I,NCAPA) .NE.0.
  1.AND.HNEW(J,I,NCAPA) .NE.0.170141E+39) GO TO 63
  VELY(J,I,NCAPA)=0.
  GO TO 62
63  IF (HNEW(J,K,NCAPA) .NE.0.
  1.AND.HNEW(J,K,NCAPA) .NE.0.170141E+39) GO TO 64
  VELY(J,I,NCAPA)=0.
  GO TO 62
C CALCULO DE LA COMPONENTE Y DE LA VELOCIDAD
64  VELY(J,I,NCAPA)=((HNEW(J,I,NCAPA)-HNEW(J,K,NCAPA))/DELY)*CHIDR
c 62  WRITE(32,*) VELY(J,I,NCAPA)
62  CONTINUE
60  CONTINUE
70  CONTINUE
C
C ESTA SECUENCIA, CALCULA LOS VALORES RESULTANTES EN LA DIRECCION X,
C SUMANDO ALGEBRAICAMENTE DOS NODOS CONTIGUOS. EN PRIMER LUGAR, ASIGNA
C VALOR CERO PARA TODA LA PRIMERA FILA Y LO RESPALDA EN UN ARCHIVO.
C LUEGO CALCULA LA RESULTANTE HORIZONTAL EN LOS NODOS ACTIVOS. ASIGNA
C VALOR CERO A LA PRIMERA Y ULTIMA COLUMNA. SELECCIONA EL VALOR MAXIMO
C OBTENIDO PARA HALLAR UN NUMERO MULTIPLICADOR DEL MODULO DE LOS
C VECTORES QUE FINALMENTE SE COMPONDRAN PARA HACERLOS GRAFICABLES EN
C FORMA VISIBLE. ASIGNA VALOR CERO A LA ULTIMA FILA.
C
  I=1
  DO 140 J=1,NCOL
  VELRX(J,I,NCAPA)=0.
c 140  WRITE(33,*) VELRX(J,I,NCAPA)
  CONTINUE
  AMAX=1E-10
  DO 110 I=2,NROW-1
  DO 100 J=1,NCOL
  IF(J.NE.1) GO TO 215
  VELRX(J,I,NCAPA)=0.
c 100  WRITE(33,*) VELRX(J,I,NCAPA)
  GO TO 100
  215 IF(J.NE.NCOL) GO TO 220
  VELRX(J,I,NCAPA)=0.
c 220  WRITE(33,*) VELRX(J,I,NCAPA)
  GO TO 100
  220 VELRX(J,I,NCAPA)=VELX(J,I,NCAPA)+VELX(J-1,I,NCAPA)
c 220  WRITE(33,*) VELRX(J,I,NCAPA)

```



```

        IF(VELRX(J,I,NCAPA).EQ.0) GO TO 100
        IF(VELRX(J,I,NCAPA).LE.AMAX) GO TO 100
        AMAX=VELRX(J,I,NCAPA)
100    CONTINUE
110    CONTINUE
        MULT1=LOG10(AMAX)
        MULT2=ABS(MULT1)
        MULT=1E+1
        DO 1000 I=1,MULT2-1
1000   MULT=MULT*1E+1
        WRITE(*,*) 'MULTIPLICADOR =',MULT
C      WRITE(36,*) NCOL,NROW,MULT
        I=NROW
        DO 150 J=1,NCOL
        VELRX(J,I,NCAPA)=0.
C      WRITE(33,*) VELRX(J,I,NCAPA)
150    CONTINUE
C
C      IDEM AL COMENTARIO ANTERIOR PARA LA DIRECCION Y, CON EXCEPCION DE LA
C      SELECCION DEL MAXIMO YA EFECTUADA
C
        I=1
        DO 180 J=1,NCOL
        VELRY(J,I,NCAPA)=0.
C      WRITE(34,*) VELRY(J,I,NCAPA)
180    CONTINUE
        DO 130 I=2,NROW-1
        DO 120 J=1,NCOL
        IF(J.NE.1) GO TO 235
        VELRY(J,I,NCAPA)=0.
C      WRITE(34,*) VELRY(J,I,NCAPA)
        GO TO 120
235   IF(J.NE.NCOL) GO TO 240
        VELRY(J,I,NCAPA)=0.
C      WRITE(34,*) VELRY(J,I,NCAPA)
        GO TO 120
240   VELRY(J,I,NCAPA)=VELY(J,I,NCAPA)+VELY(J,I-1,NCAPA)
C      WRITE(34,*) VELRY(J,I,NCAPA)
120    CONTINUE
130    CONTINUE
        I=NROW
        DO 190 J=1,NCOL
        VELRY(J,I,NCAPA)=0.
C      WRITE(34,*) VELRY(J,I,NCAPA)
190    CONTINUE
210    CONTINUE
C
C      CALCULO DEL VECTOR RESULTANTE, COMPONIENDO LAS DIRECCIONES X E Y.
C      ASIGNA VALOR CERO A LAS FILAS PRIMERA Y ULTIMA, ASI COMO A IDENTICAS
C      COLUMNAS. ASIGNA VALOR CERO AL ANGULO CORRESPONDIENTE AL VECTOR NULO.
C      ENTRA A UNA SECUENCIA DE SELECCION DE CUADRANTES PARA LOS VECTORES NO
C      NULOS, CALCULANDO EL ANGULO EN RADIANES Y LA RESULTANTE DE AMBAS
C      DIRECCIONES. VUELCA A UN ARCHIVO LOS DATOS DEL NUMERO DE ESTRATO,
C      COLUMNA, FILA, MODULO Y DIRECCION ANGULAR.
C
        I=1
        NACTIVOS=0
        DO 280 J=1,NCOL
        VELR(J,I,NCAPA)=0.
C      WRITE(35,*) VELR(J,I,NCAPA)
        ANF(J,I,NCAPA)=0.
C      WRITE(36,*) NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA)
        CALL EMPACA (NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA),NACTIVOS
1,AINTER)
280    CONTINUE
        DO 90 I=2,NROW-1
        DO 80 J=1,NCOL

```

```

IF(J.NE.1) GO TO 335
VELR(J,I,NCAPA)=0.
C WRITE(35,*) VELR(J,I,NCAPA)
ANF(J,I,NCAPA)=0.
C WRITE(36,*) NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA)
CALL EMPACA (NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA),NACTIVOS
1,AINTER)
GO TO 80
335 IF(J.NE.NCOL) GO TO 340
VELR(J,I,NCAPA)=0.
C WRITE(35,*) VELR(J,I,NCAPA)
ANF(J,I,NCAPA)=0.
C WRITE(36,*) NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA)
CALL EMPACA (NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA),NACTIVOS
1,AINTER)
GO TO 80
340 IF(VELRX(J,I,NCAPA).LE.0.) GO TO 81
IF(VELRY(J,I,NCAPA).GT.0.) GO TO 84
IF(VELRY(J,I,NCAPA).EQ.0.) GO TO 86
ANF(J,I,NCAPA)=(1.5*PI)+ATAN(ABS(VELRX(J,I,NCAPA)/VELRY(J,I,NC
1APA)))
GO TO 82
86 ANF(J,I,NCAPA)=0.
GO TO 82
84 ANF(J,I,NCAPA)=ATAN(ABS(VELRY(J,I,NCAPA)/VELRX(J,I,NCAPA)))
GO TO 82
81 IF(VELRX(J,I,NCAPA).EQ.0.) GO TO 87
IF(VELRY(J,I,NCAPA).GT.0.) GO TO 85
IF(VELRY(J,I,NCAPA).EQ.0.) GO TO 91
ANF(J,I,NCAPA)=PI+ATAN(ABS(VELRY(J,I,NCAPA)/VELRX(J,I,NCAPA)))
GO TO 82
87 IF(VELRY(J,I,NCAPA).GT.0.) GO TO 88
IF(VELRY(J,I,NCAPA).EQ.0.) GO TO 89
ANF(J,I,NCAPA)=1.5*PI
GO TO 82
88 ANF(J,I,NCAPA)=0.5*PI
GO TO 82
89 ANF(J,I,NCAPA)=0.
GO TO 82
91 ANF(J,I,NCAPA)=PI
GO TO 82
85 ANF(J,I,NCAPA)=ATAN(ABS(VELRX(J,I,NCAPA)/VELRY(J,I,NCAPA)))+(PI/
12)
82 VELR(J,I,NCAPA)=SQRT((VELRX(J,I,NCAPA)*VELRX(J,I,NCAPA)+(VELRY(J
1,I,NCAPA)*VELRY(J,I,NCAPA)))
C WRITE(35,*) VELR(J,I,NCAPA)
C WRITE(36,*) NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA)
CALL EMPACA (NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA),NACTIVOS
1,AINTER)
80 CONTINUE
90 CONTINUE
I=NROW
DO 390 J=1,NCOL
VELR(J,I,NCAPA)=0.
C WRITE(35,*) VELR(J,I,NCAPA)
ANF(J,I,NCAPA)=0.
C WRITE(36,*) NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA)
CALL EMPACA (NCAPA,J,I,VELR(J,I,NCAPA),ANF(J,I,NCAPA),NACTIVOS
1,AINTER)
390 CONTINUE
RETURN
END
C
SUBROUTINE EMPACA(LLAY,LCOL,LROW,VELR,ANF,NACTIVOS,AINTER)
DIMENSION AINTER(1400,5)
NACTIVOS=NACTIVOS+1
AINTER(NACTIVOS,1) = LLAY

```

```

    AINTER(NACTIVOS,2) = LCOL
    AINTER(NACTIVOS,3) = LROW
    AINTER(NACTIVOS,4) = VELR
    AINTER(NACTIVOS,5) = ANF
RETURN
END
C
C
SUBROUTINE VELGR(HNEW,NCOL,NROW,ESCALA,NACTIVOS,AINTER)
DIMENSION HNEW(42,32,1),AINTER(1400,5)
C
PI=3.14159
C
LEE NUMERO DE COLUMNA, FILAS Y FACTOR MULTIPLICADOR DEL MODULO
C VECTORIAL
C
    READ(36,*) NCOL,NROW,ESCALA
C
LEE ESTRATO, COLUMNA, FILA, RESULTANTE Y DIRECCION EN RADIANES
C
    DO 10, K=1,NCOL*NROW
    DO 10, K=1,NACTIVOS
C
SE DESEMPACA EL ARCHIVO INTERMEDIO
    READ(36,*) LAY,COL,ROW,RESULT,ANGULO
    LAY = AINTER(K,1)
    COL = AINTER(K,2)
    ROW = AINTER(K,3)
    RESULT= AINTER(K,4)
    ANGULO= AINTER(K,5)
C
C GENERA LAS GRAFICAS DE LAS FLECHAS CON EL ANGULO Y RESULTANTE
C
    RESULT=RESULT*ESCALA
    X=COL + RESULT*COS(ANGULO)
    Y=ROW + RESULT*SIN(ANGULO)
C
C TRAZA LA CABEZA DE LA FLECHA
C
    X1=X+0.1*COS(ANGULO+PI)
    Y1=Y+0.1*SIN(ANGULO+PI)
    IF (ANGULO.EQ.0) GO TO 10
    IF (RESULT.LE.1E-25) GO TO 10
    ANGULO2=ATAN(-1/TAN(ANGULO))
    YI=Y1+0.05*SIN(ANGULO2)
    YD=Y1+0.05*SIN(ANGULO2+PI)
    XI=X1+0.05*COS(ANGULO2)
    XD=X1+0.05*COS(ANGULO2+PI)
C
C GENERA EL ARCHIVO A SER UTILIZADO PARA CONSTRUIR LOS VECTORES CON
C EL PAQUETE SURFER
C
    WRITE (37,*) '5 0'
    WRITE (37,*) COL,ROW
    WRITE (37,*) X,Y
    WRITE (37,*) XI,YI
    WRITE (37,*) XD,YD
    WRITE (37,*) X,Y
C
C ESCRITURA DE HEADS.DAT PARA DATSOS EN FORMA 'X,Y,Z,ETIQUETA,SIMBOLO,ANGULO
C PARA GRAFICA DE TEXTO DE HEADS
C
    WRITE (38,380) COL,ROW,HNEW(COL,ROW,1),46,0
380  FORMAT(5F10.0)
    10 CONTINUE
    RETURN
    END

```

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Conociendo el funcionamiento del acuitardo tendremos una base para describir el flujo de agua subterránea en acuíferos semiconfinados. Este conocimiento es importante no solo a nivel científico y cultural, sino principalmente a nivel social al permitir planear la administración científica de los mantos acuíferos, obras civiles, protección de infraestructura como es el drenaje y redes de distribución, ya que el hundimiento es predecible basándose en este tipo de análisis.
2. La planeación de la administración científica se hace basándose en el análisis de la información geológica y la procedente de mediciones, que se suministran a los modelos matemáticos que simulan el comportamiento de los sistemas físicos lo más fielmente posible.
3. Cabe decir que con un modelo, se logra aclarar y visualizar muchos efectos, pero para su aplicación es indispensable su sustento con los datos medidos en el campo.
4. Se desarrolló un modelo computacional para la simulación en tres dimensiones del flujo en el acuífero de la cuenca de México. El modelo está probado y es operable para predecir el comportamiento del acuífero frente a diferentes alternativas de aprovechamiento.
5. Los programas fuente y ejecutable, en lenguaje FORTRAN 77, así como los datos de entrada pueden ser implantados en una máquina computadora bajo el estándar IBM-AT, con un mínimo de 2048 KB de memoria RAM y disco duro.
6. Se diseñaron y se implantaron paquetes de subrutinas organizadas como módulos periféricos que se agregan en forma sencilla al modelo. De esta manera se cuenta con dos paquetes de simulación de una arcilla: la lineal, y la no lineal.
7. Aprovechando las posibilidades de un modelo computacional disponible, el acuitardo superficial se simula incorporando fuentes cuya intensidad está determinada por las subrutinas mencionadas en el punto anterior, que se insertan en las celdas donde el

acuitardo se empalma a la capa del acuífero granular. Las subrutinas se encargan de añadir dicho efecto, tomando en cuenta la distribución de conductividades hidráulicas.

8. El acuitardo constituye una fuente de recarga al acuífero en su contacto superior. En el tratamiento lineal, esta recarga es función del abatimiento en la capa inferior, de la función Ds_{ii} y de la modificación del coeficiente de almacenamiento específico Ss' de la celda en contacto con el acuitardo.
9. Para la simulación del comportamiento no lineal del acuitardo en el modelo se requiere considerar el cálculo en cada iteración de parámetros tales como: almacenamiento específico Ss' , conductividad hidráulica K' , que dependen de la relación de vacíos e en cada paso de tiempo y que juntas caracterizan al acuitardo.

Otras subrutinas permiten calcular el hundimiento. Para obtener precisiones adecuadas, fundamentalmente este cálculo requiere la utilización del modelo no lineal del acuitardo

10. La simulación de flujo de aguas subterráneas logró reproducir satisfactoriamente los niveles piezométricos medidos. Se implantó un programa para generar la gráfica del campo de velocidades, que es útil en la visualización del flujo de aguas subterráneas.
11. Se recomienda profundizar el estudio de los acuitardos arcillosos por sus implicaciones en la recarga y la alteración de la calidad del agua extraída. Para recuperar el acuífero, de acuerdo al comportamiento simulado por el modelo, se puede decir que la recarga es un recurso importante y que se necesita proteger. Es recomendable hacer más estudios para conocer la geometría del acuífero y los mecanismos de recarga al oeste y sur de la Ciudad de México.
12. Para hacer un uso eficiente del recurso disponible, se recomienda que en el futuro las políticas de extracción utilicen las técnicas de modelación computacional como una herramienta, ya que permiten ampliar el fundamento de las decisiones que se tomen.