

## **MODELANDO FLUJOS DE AGUAS SUBTERRANEAS UTILIZANDO CONDICIONES DE BORDE DE FLUJO**

**Rolando Bravo**

Profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Southern Illinois University Carbondale y Director Ejecutivo del Instituto Americano de Hidrología (AIH)

### **ABSTRACTO**

Uno de los puntos más críticos cuando se desea construir un modelo de aguas subterráneas regional es la determinación de las condiciones de borde. Normalmente los modelos de flujo de aguas subterráneas regionales requieren áreas que normalmente son mucho mayores que el área de interés. El presente trabajo se enfoca en la predicción de las alturas piezométricas en modelos regionales usando condiciones de borde de flujo. En el presente trabajo se usó el área de Houston, Texas, para la simulación de las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos Chicot y Evangeline, que subyacen el área de Houston, estas fueron hechas usando la información del perfil geológico disponible y la información existente de la producción de los pozos. Como condición inicial se usó la información de los piezómetros operados por el USGS ubicados en diversos lugares en el área de Houston. Para estimar las alturas piezométricas en lugares donde la información no estaba disponible, las alturas piezométricas fueron generadas usando el método de interpolación de kriging. El modelo de aguas subterráneas en tres dimensiones usando el método de diferencias finitas desarrollado por el USGS (MODFLOW) para predecir las alturas piezométricas.

### **INTRODUCCION**

Las unidades mayores de producción de aguas subterráneas en el área de Houston y Galveston son los acuíferos Chicot y Evangeline. El acuífero Chicot se encuentra encima del acuífero Evangeline. Este último se ubica encima de la formación Burkeville, que es la capa confinante, esta distribución se muestra en la Figura 1. Los acuíferos Chicot y Evangeline consisten de capas discontinuas de arcilla y arena no consolidadas que se profundizan en la dirección del Golfo de México.

### **MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL**

La superficie litológica del área de Houston está compuesta por capas de arena y arcillas de espesor variable, Bravo (1990) los estudios de logs de onda sonar, potencial espontáneo y conductividad hidráulica para 5 de los 11 lugares que se muestran en la Figura 2 (Baytown, Clear Lake, Johnson Space Center, Southwest, and Addicks). Estos registros fueron interpretados manualmente, para generar los perfiles geológicos de subsuelo en los 5 sitios. Los perfiles geológicos para Baytown, Clear Lake y Johnson Space Center se encuentran en Bravo *et al.* (1991).

La representación de la geología del subsuelo fue simplificada simplificando las capas de arenas y arcillas en una manera consistente con la estratigrafía en la dirección Este-Oeste y desarrollando las 8 capas conceptuales que se muestran en la Figura 3.

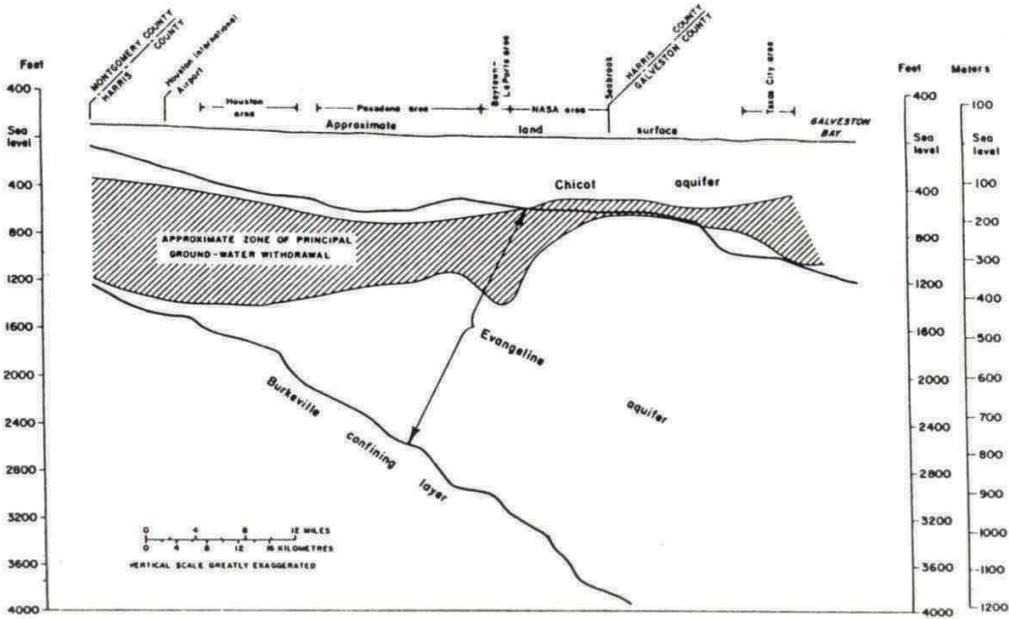


Figura 1. Perfil geológico de los acuíferos Chicot y Evangeline en la dirección Norte-Sur

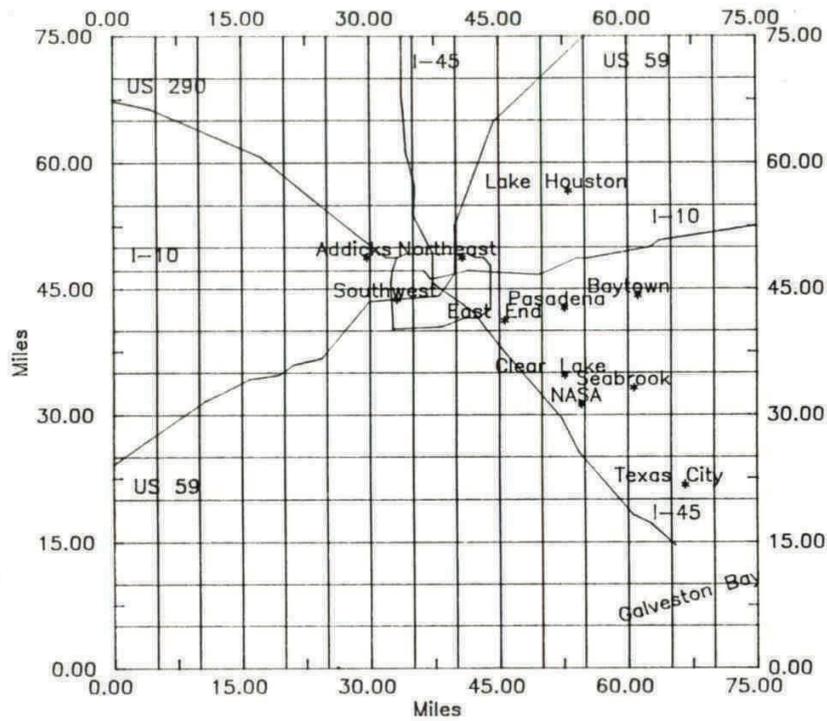


Figura 2. Ubicación de los piezómetros de observación.

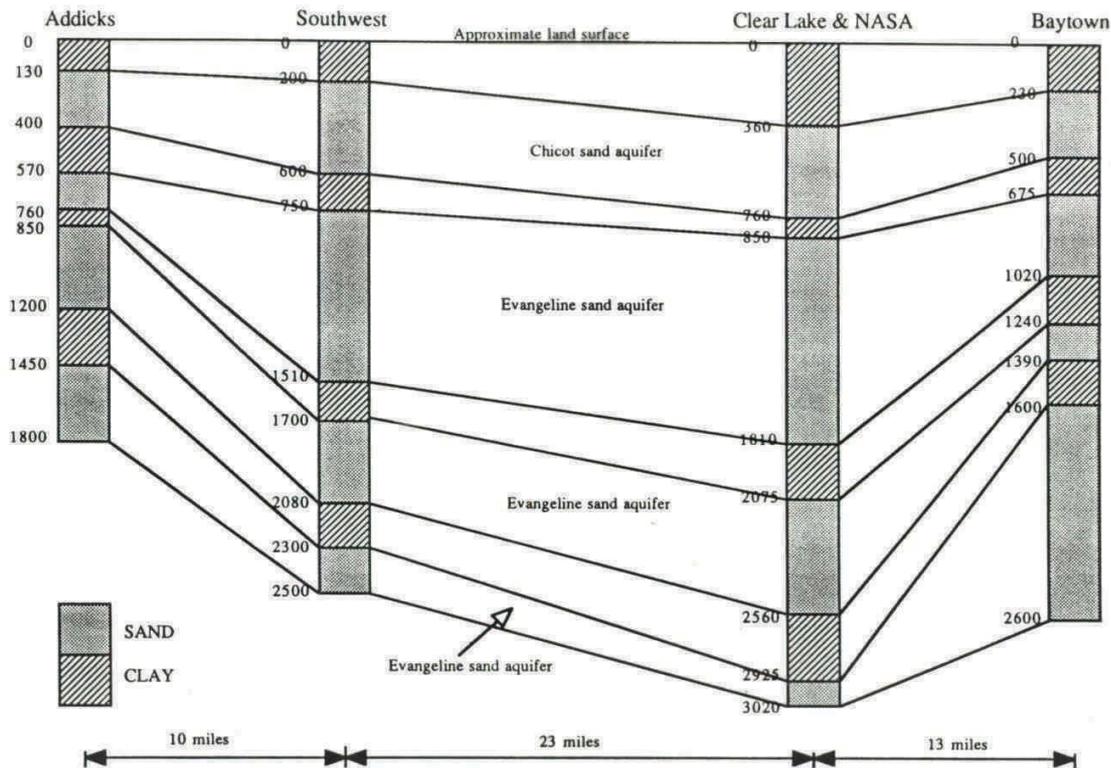


Figura 3. Modelo Hidrogeológico Conceptual en la dirección Este-Oeste.

## MODELO DE FLUJO DEL ACUIFERO

El acuífero Chicot fue modelado como isotrópico con el potencial de comportamiento tanto como confinado o no-confinado. Las capas de arena del acuífero Evangeline fueron modeladas como acuíferos isotrópicos confinados con descarga. Las capas arcillosas intercaladas fueron modeladas como formaciones semi permeables. Los efectos del depósito retardado en las capas de arcilla fueron modelados como un término de fuente en el modelo de flujo. Para representar el flujo no confinado del acuífero Chicot fue modelado asumiendo la hipótesis de Dupuit y una linealización de tiempo retrasado. La transmisividad fue calculada como producto del espesor saturado y la conductividad hidráulica. Una condición de borde de una altura piezométrica prescrita (Dirichlet condición) fue aplicada a lo largo del borde del modelo que interceptaba la Bahía de Galveston, mientras que una condición de borde de flujo prescrito (Neuman) se aplicó al resto de la frontera del modelo.

Los modelos de flujo de agua subterránea regionales anteriores usaron una altura piezométrica prescrita a lo largo de toda la frontera (Meyer and Carr, 1979). La frontera de estos modelos se extendía hacia las afueras del área de Houston hasta donde el bombeo era mínimo con el propósito de reducir los efectos de borde y eliminar la necesidad de imponer bordes de flujo. El área cubierta en este modelo era de 27,000 mi<sup>2</sup> (69,900 Km<sup>2</sup>).

El trabajo que se presenta usa una condición borde de flujo debido a que no existían datos suficientes para determinar una altura piezométrica prescrita al borde del área en estudio. Esta condición de borde

de flujo permite disminuir el área de extensión del modelo a solo 5,625 mi<sup>2</sup> (14,600 Km<sup>2</sup>). La extensión del área estudiada se escogió para cubrir las áreas de extracción (área de bombeo). Usando el borde de flujo, no hay necesidad de modelar aéreas que es mayor que el área de interés.

Las curvas piezométricas de 1980 a 1989 observados tienen similar apariencia que las esperadas para el flujo radial a un pozo. Esta similitud fue examinada en 8 direcciones diferentes (norte, norte-este, este, sur-este, sur, sur-oeste, oeste, y norte-oeste). En la mayoría de estas direcciones la relación entre la altura piezométrica y el logaritmo de la distancia radial parece lineal y las pendientes de las líneas de regresión resultó casi idéntica por los 10 años (Bravo, 1990). Estas pendientes fueron usadas para estimar el gradiente hidráulico en el borde. La Figura 4 muestra las líneas de regresión para diferentes niveles de agua en los acuíferos Chicot y Evangeline en la dirección Norte-Oeste y Sur-Este para la década del 80.

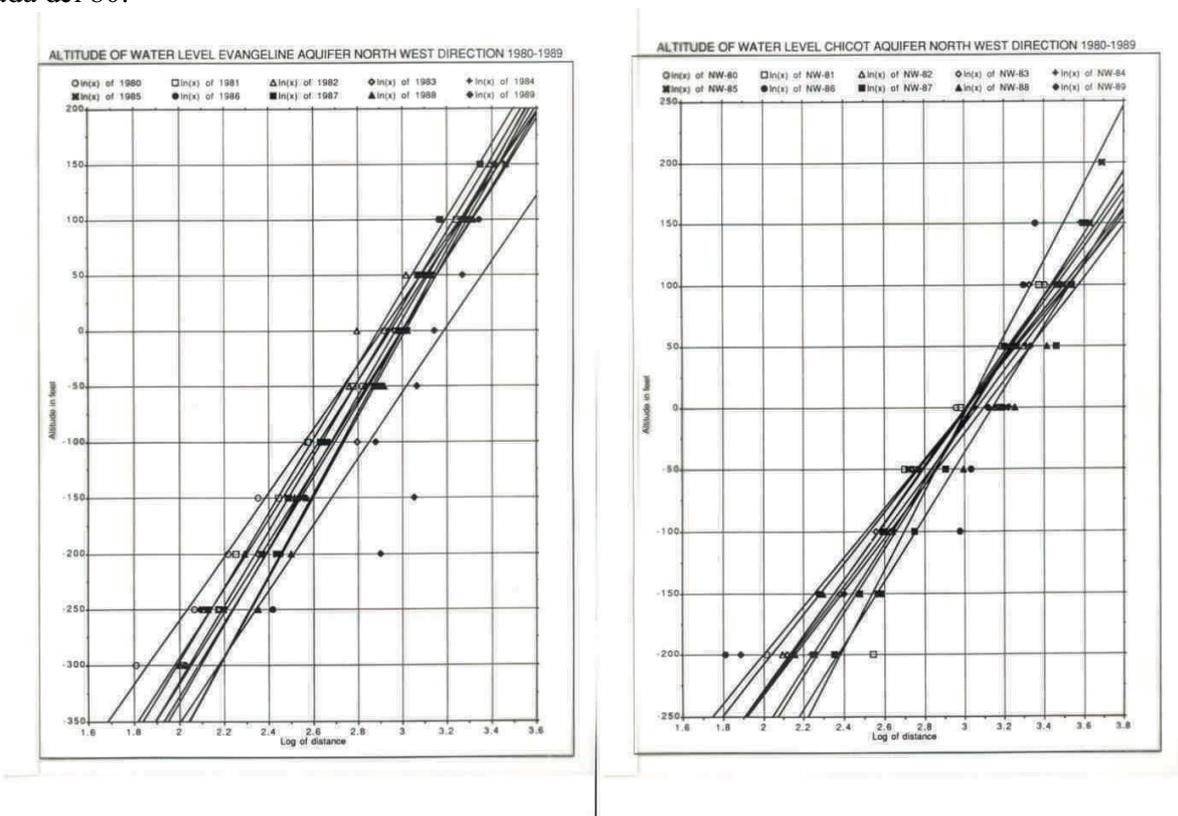


Figura 4. Líneas de regresión distintos niveles de agua subterránea

## CONDICIONES INICIALES

Aunque los mapas de nivel piezométrico existen, las condiciones iniciales para todas las celdas de cálculo en el modelo no están disponibles. La teoría de variación regional (kriging) se usó para estimar los niveles piezométricos en las celdas para las cuales no había datos. Un patrón circular para el kriging de los datos existentes asume que la variación de las cargas hidráulicas en la dirección Norte-Sur eran estadísticamente independientes para la variación de las cargas en la dirección Este-Oeste (Davis,

1986). Esta hipótesis fue consistente con la metodología usada para determinar las condiciones de flujo de borde.

### **CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DE LOS ACUIFEROS**

Los valores de la transmisividad y coeficientes de depósito para las capas de arena fueron tomados de estudios previos. La conductividad hidráulica vertical y los coeficientes de depósito de las capas semi-permeables fueron determinados independientemente usando el método desarrollado por Bravo (1990) y Bravo et al. (1991)

### **SOLUCION DEL MODELO DE FLUJO**

El modelo de flujo fue solucionado usando el Modelo Tridimensional de Diferencias Finitas para Aguas Subterráneas MODFLOW desarrollado por el USGS (McDonald and Harbaugh, 1988). MODFLOW es un código de diferencias finitas de bloque centrado, que puede simular todo tipo de acuíferos. Este programa de computación es capaz de modelar conceptualmente sistemas de flujo complicados y variaciones temporales. El flujo no permanente para la geometría mostrada en la Figura 2 fue modelada usando pozos de inyección para simular los flujos a través del borde.

### **RESULTADOS**

Usando los datos iniciales de 1980, el modelo de flujo fue operado para simulaciones de un año de duración. Como muestra la Figura 5 presenta las alturas piezométricas observadas en 1984 en el acuífero Chicot. Las curvas de nivel son alturas piezométricas en pies. La Figura 6 presenta las alturas piezométricas simuladas (las áreas sin datos fueron calculados usando el kriging).

Las Figuras 7 y 8 muestran las alturas piezométricas observadas y simuladas para 1984 para el acuífero Evangeline. Si las alturas piezométricas observadas y simuladas se sobreponen, se pueden observar las curvas de nivel coincidentes en muchas zonas del área en estudio. Para realizarla calibración del modelo localmente, se calculó el error de predicción relativo para ambos acuíferos. La fórmula usada fue;

$$RPE(x, y) = \frac{\varphi_{(x,y)}^{predichas} - \varphi_{(x,y)}^{real}}{\varphi_{(x,y)}^{real}}$$

La Figura 9 muestra el mapa de RPE para el acuífero Chicot. Se puede apreciar que el modelo se comporta bien prediciendo las alturas piezométricas en las áreas donde se disponía de datos. Figura 10, presenta similar resultado para el acuífero Evangeline. Nuevamente el modelo se simula bien prediciendo las alturas piezométricas en las áreas donde se disponía de datos. Estos mapas deben ser interpretados como una representación de las zonas donde el modelo dispone de datos de terreno. Las curvas piezométricas cero y las proximidades son altas debido a que el denominador en la Fórmula 6 es pequeño. Lo que resulta remarcable es que no se usó ningún procedimiento para la identificación de los parámetros (estimación inversa) más que la determinación de las condiciones de borde. Aun así el modelo presenta resultados adecuados.

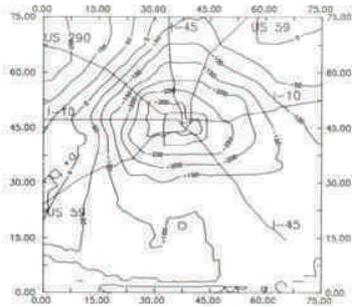


Figura 5. Alturas Piezométricas Observadas Acuífero Chicot para 1984

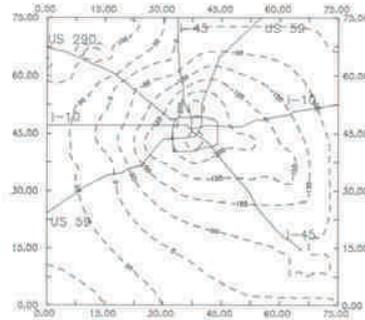


Figura 6. Alturas Piezométricas Simuladas Acuífero Chicot en 1984

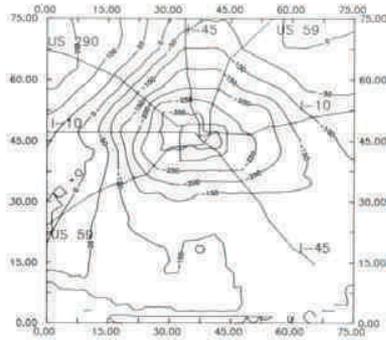


Figura 7. Alturas Piezométricas Observadas Acuífero Evangeline para 1984

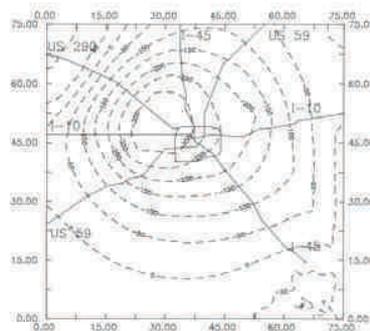


Figura 8. Alturas Piezométricas Simuladas Acuífero Evangeline en 1984

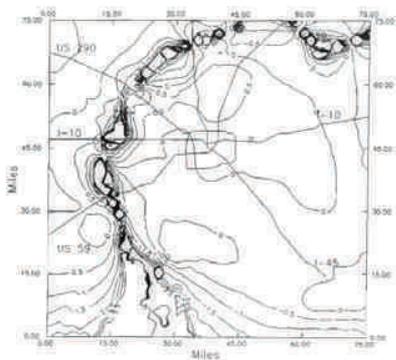


Figura 9. Error de Predicción Relativo Acuífero Evangeline 1984

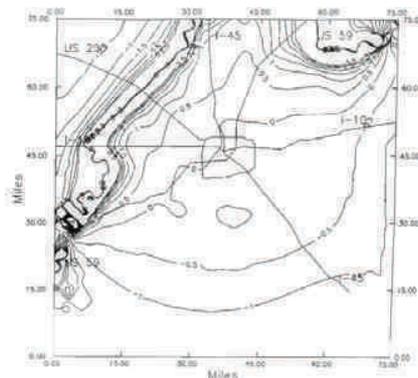


Figura 10. Error de Predicción Relativo Acuífero Chicot 1984