

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS.



SIMULACIÓN NUMÉRICA DE POZOS
DE EXTRACCIÓN Y RECARGA EN
ACUIFEROS MEDIANTE EL MÉTODO
DE SIMULACIÓN POR REDES

AUTOR:

BALTASAR ALFONSO, MARTÍNEZ ALONSO

INGENIERO CIVIL

PROYECTO FIN DE GRADO

**SIMULACIÓN NUMERICA DE POZOS
DE EXTRACCIÓN Y RECARGA EN
ACUIFEROS MEDIANTE EL METODO
DE SIMULACIÓN POR REDES**

AUTOR:

BALTASAR ALFONSO, MARTINEZ ALONSO

DIRECTOR:

IVÁN, ALHAMA MANTECA

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS (UPCT),
CARTAGENA. JULIO, 2014.**

Índice

CAPÍTULO I	Introducción y objetivos
	I.1 Introducción
	I.2 Objetivos
CAPÍTULO II	El programa FATSIM-A. El método de simulación por redes
	II.1 El programa FATSIM-A
	II.1.1 Introducción
	II.1.2 Entrada de datos
	II.1.3 Elaboración y simulación del modelo
	II.1.4 Presentación gráfica de resultados
	II.2 Introducción al método de simulación por redes
	II.2.1 Fundamentos del método
	II.2.2 El programa PSpice®
	II.2.3 La simulación del modelo en red
CAPÍTULO III	Modelos en red con pozos de extracción e introducción del problema de Henry
	III.1 El problema de Henry
	III.1.1 Presentación histórica y soluciones al problema
	III.1.2 Modelo físico y matemático del problema de Henry
	III.2 Modelo en red del problema de Henry
	III.3 Modelos de pozo
CAPÍTULO IV	Simulación numérica
	IV.1 Introducción. Patrones de Henry
	IV.2 Disposición de pozos
	IV.3 Pozos de extracción de agua “pequeños”
	IV.4 Pozos de extracción de agua “grandes”
	IV.5 Pozos de extracción de agua pequeños “en paralelo”
	IV.6 Pozos de extracción de agua grandes “en paralelo”

IV.7 Pozos de introducción de agua “pequeños”

IV.8 Pozos de introducción de agua “grandes”

IV.9 Pozos de introducción de agua pequeños “en paralelo”

IV.10 Pozos de introducción de agua grandes “en paralelo”

IV.11 Duplicado de caudal en ausencia de pozos

CAPÍTULO V

Conclusiones

Referencias

CAPÍTULO I

Introducción y objetivos

I.1 INTRODUCCIÓN

Los problemas de intrusión salina en acuíferos costeros o no, bajo explotación, son de gran interés en la actualidad y a ellos se dedica un enorme esfuerzo por parte de la comunidad científica en el campo de la hidrología subterránea. Son ya numerosas las revistas científicas en donde se trata este tema y frecuentes los encuentros científicos o congresos de carácter nacional e internacional donde existe un tópico relacionado con la protección de acuíferos contra intrusiones de agua salada y otros contaminantes.

El agua dulce subterránea, procedente de acuíferos costeros o no, es una fuente de recursos hídricos tanto para proveer de agua potable a la población como para abastecer las necesidades agrícolas de la zona. En particular, en regiones áridas costeras donde la pluviosidad es despreciable (caso de las regiones del sureste español y de otras áreas de la cuenca mediterránea) los acuíferos subterráneos constituyen una de las fuentes más importantes de abastecimiento de agua para estos fines. La contaminación salina procedente del mar a través del medio poroso es inevitable produciendo una cuña de agua salada en el acuífero, en constante evolución dinámica, cuya extensión depende de las propiedades del medio, geometría del acuífero, condiciones de frontera y régimen de explotación.

Una de las posibilidades de evitar o modificar el tipo de contaminación salina es la ubicación de pozos de introducción o extracción de aguas. Sin perjuicio del elevado coste de estas instalaciones, es necesario disponer de criterios que permitan elegir el tamaño y ubicación de los pozos en función del objetivo buscado.

Éste es el objetivo esencial del presente proyecto en el que, mediante modelos diseñados mediante el método de simulación por redes (González-Fernández, [2002]) y simulados en FATSIM-A (Alhama y col. [2010], ©), se estudia la alteración de la cuña salina en ausencia de pozos para determinar la geometría más adecuada (ubicación y profundidad del pozo) para unos criterios establecidos de protección.

Con objeto de centrar el estudio de los efectos de la ubicación de pozos sobre el flujo de agua y transporte de soluto a través del medio poroso se elige como problema característico el de Henry. Como es sabido, se trata de un problema patrón en el campo de la hidrología subterránea cuya solución ha sido motivo de discusión y controversia en las últimas décadas. Aunque, quizás, se trate de un problema ya abandonado en parte en algunas de sus versiones más antiguas, la precisión numérica de los resultados recientes, así como las soluciones semi-analíticas del mismo lo hacen idóneo para el estudio del problema que nos ocupa.

Como variables dependientes se utilizarán la función de corriente asociada al flujo del fluido y la concentración salina asociada al transporte de soluto. Esta formulación adimensional, en combinación con la aproximación de Boussinesq, que asume que las variaciones de densidad en el medio son pequeñas en relación con la densidad media, posee ciertas ventajas frente a la formulación clásica de presiones (Soto [2007]).

En primer lugar, la función de corriente proporciona una descripción escalar del campo de velocidades, de forma que los contornos de esta variable representan los caminos que las partículas de fluido siguen en la evolución del flujo. La diferencia entre valores numéricos de la función de corriente entre dos puntos dividido entre la distancia entre líneas es la medida de flujo total de fluido a través de la superficie, que contiene dichos puntos, normal al plano de representación. La representación de la función de corriente proporciona un esquema no ambiguo del campo de flujo muy difícil de conseguir mediante otro tipo de representaciones tal como el campo de velocidades. Más aún, dado que las velocidades del fluido son proporcionales al espaciado de las líneas de corriente, es fácil inferir esta magnitud de la representación directa de estas isolíneas cuando el parámetro función de corriente se representa a intervalos numéricos regulares.

Además del valor inherente en soluciones analíticas, la función de corriente presenta ventajas significativas cuando se usa en simulaciones numéricas y los gradientes hidráulicos envueltos muy pequeños, como ocurre en el flujo asociado a densidad variable. En particular, y esta es quizás la razón de peso más importante, cualquier solución del campo de flujo en términos de la

función de corriente garantiza la conservación de la masa del fluido. Con las formulaciones que usan las variables presión o altura piezométrica debe tenerse mucho cuidado con el tema de la conservación de la masa de fluido. De acuerdo con Patankar (Patankar, [1980]), las discretizaciones de segundo orden (diferencias centrales) de las ecuaciones de la presión o de la altura piezométrica conducen implícitamente a la continuidad del flujo en celdas no adyacentes; esto produce un campo ondulante de presiones que resulta problemático a la hora de calcular las velocidades del flujo.

No obstante, la función de corriente no es una variable que se puede medir directamente sino que se calcula a partir de otras como la descarga específica, la presión o la altura piezométrica. Otras desventajas del uso de la función de corriente están relacionadas con las dificultades para especificar ciertas condiciones como fuentes o sumideros en el fluido o el propio nivel freático (Frind y Matanga, [1985]).

La herramienta numérica usada para las simulaciones es el programa FATSIM-A, desarrollado en el grupo de investigación 'Simulación por Redes' de la UPCT. Una descripción del método puede encontrarse en González y col. (González y col. [2002]) y en numerosas publicaciones sobre transferencia de calor (Alhama y col. [1997], Alcaraz y col, [2003]), problemas de frontera móvil (Alhama y González Fernández [2002]), de ingeniería mecánica (Moreno Nicolás y col. [2007]), problema inverso (Zueco y col., [2003]), electroquímica (González y col., [1995]) y flujo de fluido con transporte de soluto (Soto y col. [2006 a-e]).

Los modelos en red para la simulación del problema de Henry han sido propuestos por Soto y col. (Soto y col., [2007a-c]) y su validez ha sido contrastada en trabajos ya publicados relacionados con problemas de flujo de agua con transporte de soluto en general (Soto y col. [2006a-e, 2007a-c], Alhama y col. [2010a-d]). Estos modelos se completan en esta memoria con la ubicación de diferentes tipos y tamaños de pozos y se vuelven a simular para obtener los nuevos patrones de flujo que permitan establecer los criterios iniciales sobre la ubicación óptima de estos dispositivos impermeables.

En cuanto al diseño del modelo, a partir del modelo matemático de problema que se discretiza espacialmente para obtener las ecuaciones diferenciales en diferencias finitas se diseña un circuito eléctrico cuyas ecuaciones son formalmente equivalentes a las anteriores siguiendo unas reglas sencillas que permiten, por un lado, asociar a cada término de la ecuación discretizada un componente eléctrico de la misma relación constitutiva entre variables, por otro, conectar los componentes eléctricos entre sí de acuerdo con la topología de la ecuación. De la misma forma se implementan las condiciones de contorno para formar el modelo completo del problema.

Los diferentes tipos de no linealidades del modelo, bien inherentes al medio bien a las condiciones de contorno, se implementan siguiendo reglas básicas, mediante el uso de fuentes de corriente controladas y circuitos auxiliares simples. Una cantidad suficientemente grande de elementos de volumen permite reducir los errores numéricos a valores despreciables. La asunción de geometrías irregulares en 2-D y 3-D es inmediata. Igualmente la asunción de diferentes variables dependientes acopladas es también inmediata mediante el uso de los aludidos generadores controlados.

FATSIM-A simula directamente el modelo en Pspice [1994] (Nagel, [1975 y 1977] y Vladimirescu [1994]) y lee los resultados de simulación introduciéndolos en MATLAB para su representación gráfica. FATSIM-A contiene su propio procesador de datos que permite, incluso, realizar animaciones.

En el desarrollo de este proyecto es como sigue: una relación de sus objetivos que sigue a esta introducción (Capítulo I), una descripción del programa FATSIM-A que incluye una introducción al método de redes (Capítulo II), los modelos del problema de Henry con pozos incluyendo la descripción de este problema patrón (Capítulo III), la simulación numérica de los diferentes casos propuestos y el tratamiento de los resultados (Capítulo IV) y, por último, las conclusiones del trabajo (Capítulo V). La bibliografía básica completa el presente proyecto.

Una copia electrónica del mismo junto con todos los archivos de modelo utilizados se recogen en el CD anexo a este documento.

I.2. OBJETIVOS

El núcleo del trabajo es la simulación de modelos en red de procesos 2-D de flujo con transporte de soluto en acuíferos confinados implementados en el escenario del problema de Henry en los que se ubican los pozos de extracción e introducción, estudiando la influencia, por separado de los parámetros más relevantes del problema. Así, en síntesis, los objetivos pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

- Obtener los modelos en red de pozos de extracción e introducción e integrarlos en los modelos de flujo de fluido con transporte de soluto (problema de Henry en sus diferentes versiones),

- Simular los modelos globales estudiando la influencia de:
 - la disposición del pozo en relación con la geometría del acuífero
 - la anchura y profundidad del pozo
 - la introducción o extracción de agua
 - los parámetros hidráulicos del medio poroso
 - las condiciones de contorno

- Aplicar el programa FATSIM-A desarrollado en la UPCT por el grupo de investigación 'Simulación por redes' para los alcanzar los objetivos anteriores.

CAPÍTULO II

El programa FATSIM-A. El método de simulación por redes

II.1 EL PROGRAMA FATSIM-A

II.1.1 Introducción

Este programa, cuyo anagrama se muestra en la Figura 2.1, es fruto de los trabajos que en campo de flujo y transporte en medios porosos se han desarrollado (con ayudas externas) dentro del grupo de investigación ‘Simulación por redes’, de la UPCT. Su objetivo es simular en 2-D, esquema suficientemente ambicioso para la mayor parte de los objetivos del grupo, que permite, en particular, abordar problemas de intrusión marina mediante pozos de extracción e introducción, objetivo principal de este trabajo. Los modelos de intrusión marina de los que se parte en este proyecto (básicamente el problema de Henry) han sido desarrollados en la tesis del profesor Antonio Soto y otros trabajos, y su eficacia y fiabilidad de los mismos ha sido demostrada en publicaciones científicas dentro del campo de hidrología subterránea con transporte de soluto (Soto y col. [2007a y 2007c]).



Figura 2.1 Anagrama de FATSIM-A

II.1.2 Entrada de datos

Es el primer paso para la realización del modelo mediante FATSIM-A. La ejecución del programa da acceso a la primera pantalla, Figura 2,2, que permite las opciones de generar una nueva malla o modelo (botón ‘Nueva’) o importarlo procedente de una carpeta (botón ‘Cargar’). Esta segunda opción presenta ante el usuario una nueva pantalla para seguir la ruta de acceso

hacia la ubicación del modelo que se desea cargar, Figura 2.3.



Figura 2.2 Pantalla de acceso a la generación o importación de un modelo

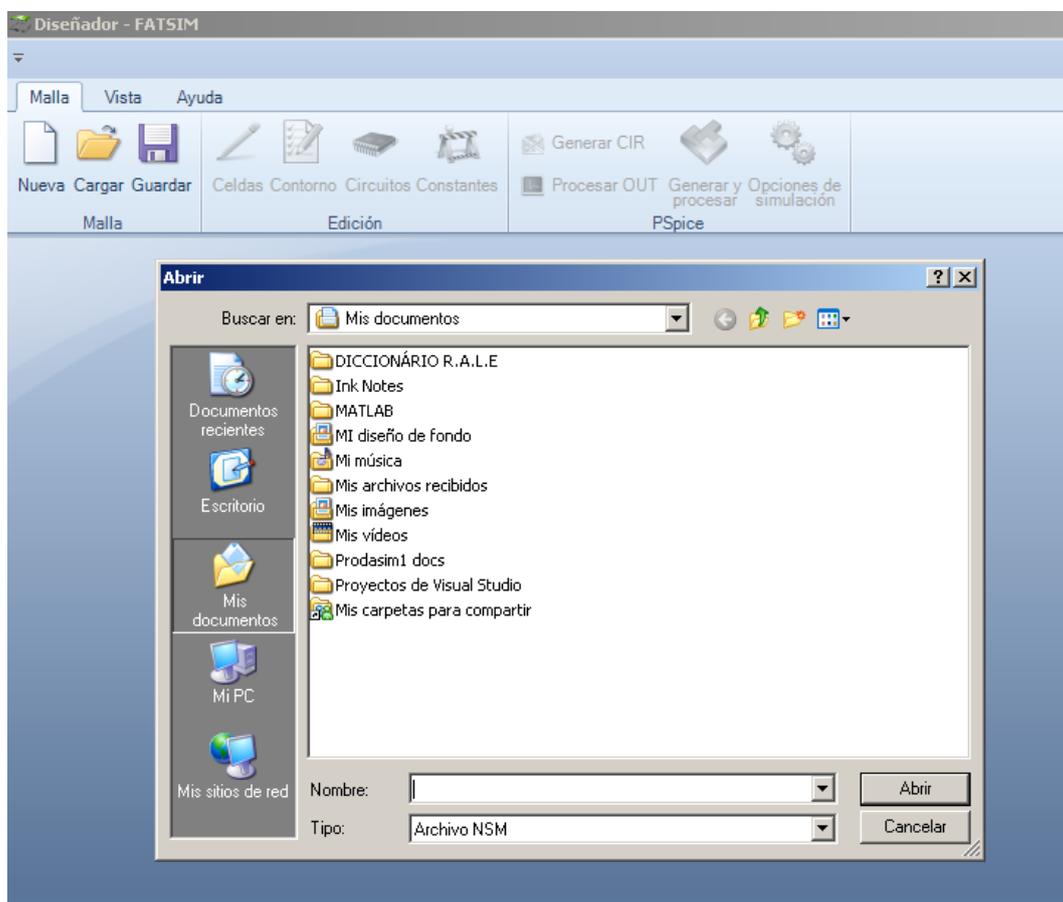


Figura 2.3 Ruta de acceso a la importación de un modelo

La opción 'Nueva' presenta la pantalla de entrada de datos, Figura 2.4. Ésta contiene los siguientes datos:

- i) Dimensiones, en donde se introduce los datos de mallado (número de celdas horizontales y verticales del modelo elegido por el usuario),
- ii) Tamaño de las celdas (ancho y alto de cada celda en unidades del S.I.) y
- iii) Parámetros o constantes físicas del problema (viscosidad, gravedad y máximo

cambio de la densidad del fluido), también en unidades del S. I. Una vez introducidos estos datos es necesario almacenarlos en el programa (opción ‘Guardar’).

El botón ‘Cancelar’ permite cambiar datos que erróneamente ya hayan sido introducidos.

Nueva malla

Dimensiones

X: celdas

Y: celdas

Tamaño de las celdas

Ancho:

Alto:

Constantes

Viscosity: kg/m/s

Gravity: m/s²

Fluid density change: kg/m³

Figura 2.4 Pantalla primera de entrada de datos

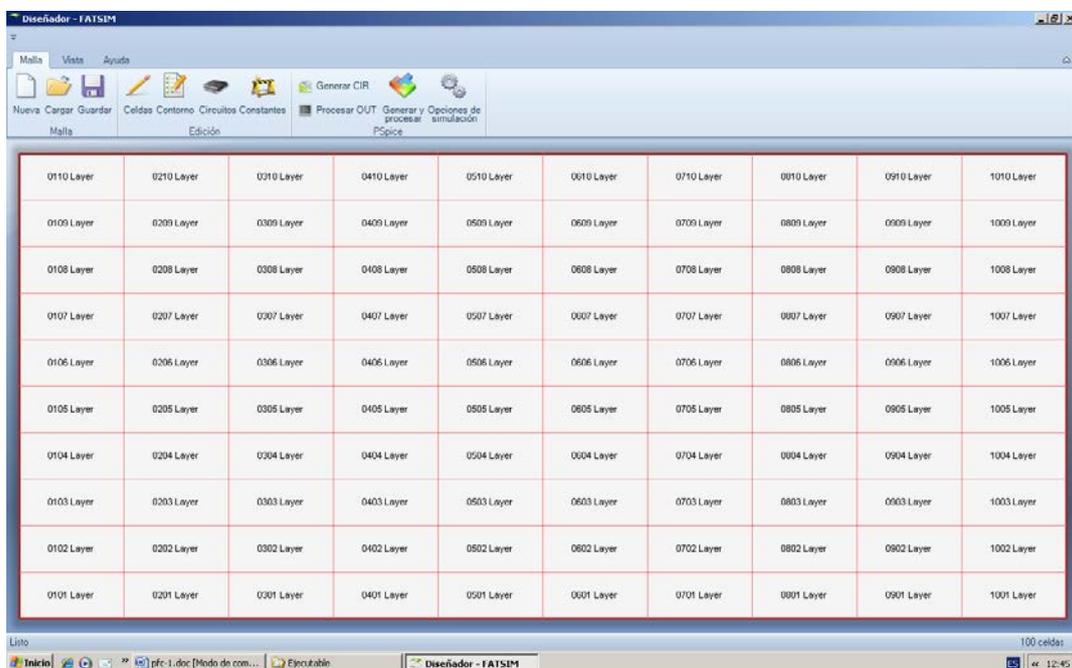


Figura 2.5 Retícula del modelo creado

Tras la introducción de datos FATSIM-A presenta una pantalla con la retícula elegida donde en

cada celda se muestra la numeración que la identifica (nº de la ubicación horizontal-ídem de la ubicación vertical) y su nombre, Figura 2.5. Esta retícula es interactiva en el sentido de que las celdas de la misma pueden ser seleccionadas con el ratón (una o un conjunto de ellas) para ser reeditadas cambiando cualquier de sus características físicas. Esta posibilidad, de hecho, es utilizada para implementar las condiciones de contorno del problema. Seleccionando por ejemplo la primera columna y pulsando el botón derecho del ratón aparece el cuadro de diálogo de la Figura 2.6. Si pulsamos ‘editar’ el programa presenta la pantalla de la Figura 2.7 para una re-edición completa de las celdas; si pulsamos ‘editar contorno’ el programa nos da acceso a la implementación de las condiciones de contorno en cualquiera de los extremos de las celdas seleccionadas.

Puede advertirse que el programa permite ahora asignar valores no isotrópicos a alguna de las características físicas del modelo tales como la permeabilidad hidráulica y la difusividad, así como asignar un valor de porosidad, un nuevo nombre para el conjunto de celdas seleccionado y, por último, modificar las características geométricas de la celda. Una vez terminado este bloque debemos almacenar los datos mediante el botón ‘aceptar’.

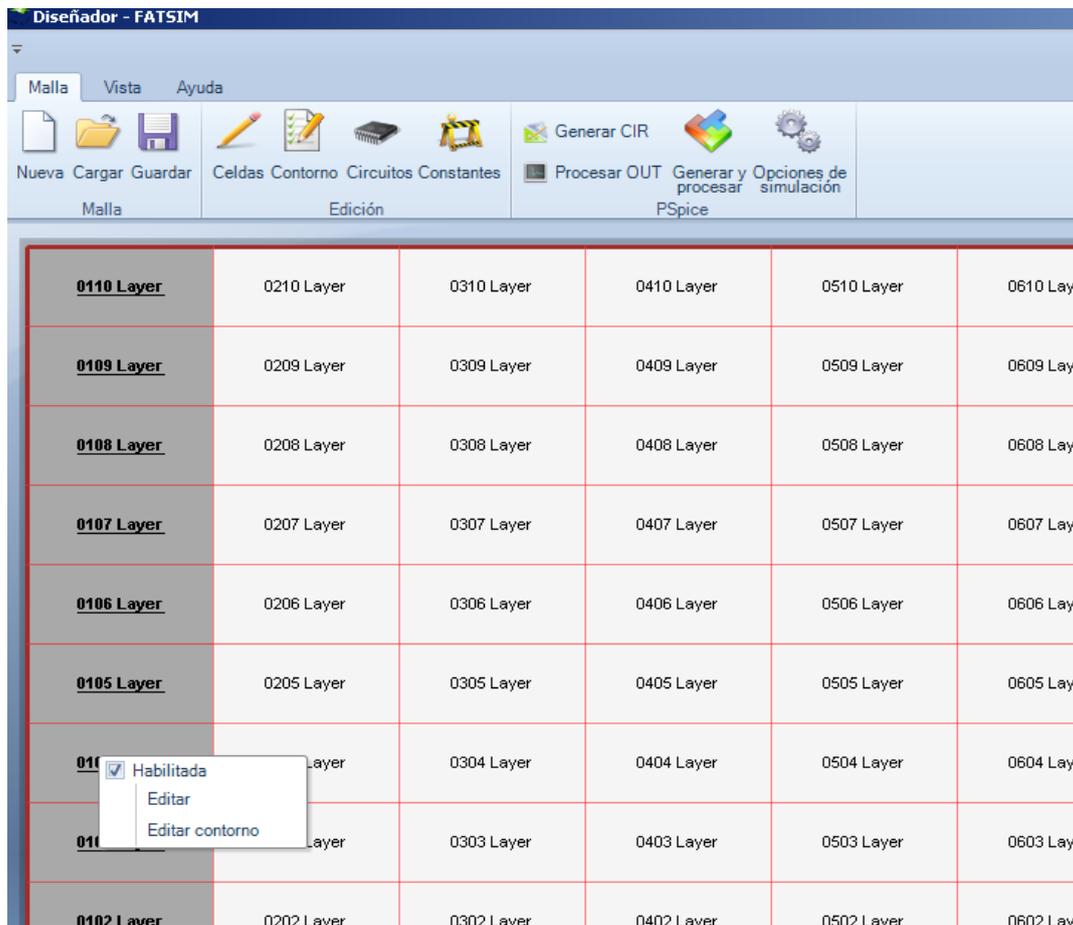


Figura 2.6 Edición de un conjunto de celdas para re-editar o implementar las condiciones de

contorno

Una vez editadas o re-editadas todas las celdas el botón 'opciones de simulación' permite generar las sentencias del modelo asociadas con el intervalo de tiempo de simulación, tiempo de paso, tolerancia relativa y número de dígitos para presentación de resultados, Figura 2.8. La sentencia generada se muestra en un cuadro a la derecha dentro de esta misma pantalla. También se incluye dentro de esta pantalla la opción de simulación paramétrica asociada con la posibilidad de dar un rango de valores a intervalos regulares a un parámetro (generalmente una característica física del modelo) de la simulación con el objeto de ver la influencia cualitativa del mencionado rango en los patrones finales o transitorios de la solución.

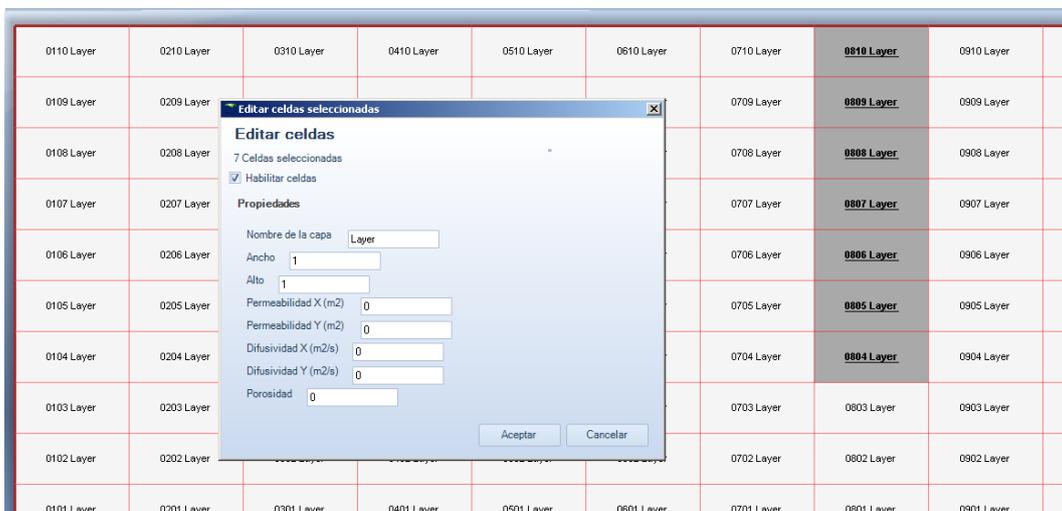


Figura 2.7 Re-editar el conjunto de celdas seleccionado

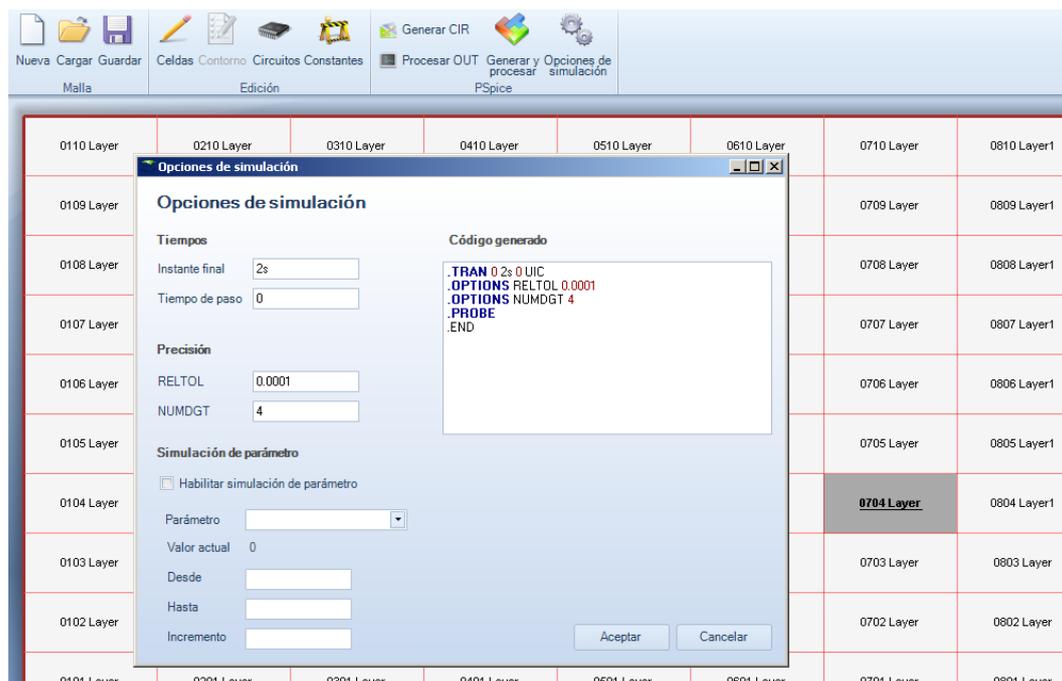


Figura 2.8 Datos complementarios de simulación y opciones de simulación paramétrica

La implementación del pozo en el modelo puede hacerse seleccionando las celdas que la constituyen a partir de la geometría de la misma (anchura y profundidad) sin más eliminar la edición de estas celdas. Para completar los datos del pozo es necesario implementar las condiciones de contorno en las celdas colindantes a este (condición adiabática para el flujo y valor constante para la función de corriente, como ya se ha mencionado).

Adviértase que el número global de celdas (mallado) determina la posibilidad de afinar en mayor o menor grado la ubicación de pozos y permite, obviamente, precisar asimismo los resultados de la simulación.

Es interesante hacer notar que es posible la simulación de escenarios constituidos por medios heterogéneos merced a la posibilidad mencionada de editar celdas individualmente. De nuevo elección del mallado permite ajustar en mayor o menor grado la implementación de geometrías de detalle. Es obvio que un mallado más fino implica tiempos de computación mayores aunque estos son relativamente bajos y comparables a los de otros programas en este campo (SUTRA, MODFLOW, FAST-C, FEFLOW, etc.). En realidad se consume un tiempo mucho mayor que el de computación en el postprocesado directo de datos con MATLAB, a partir de la salida numérica de Pspice, y en la elaboración de animaciones.

II.1.3 Elaboración y simulación del modelo

Concluida la entrada de datos, que incluye todas las condiciones de contorno (si falta alguna de ellas Pspice dará un error en la simulación), podemos: i) ‘generar cir’, que simplemente genera el archivo de texto del modelo y lo guarda en el directorio siguiendo la ruta marcada, Figura 2.9, y ii) ‘generar y procesar’, que genera y procesa el modelo directamente sin guardarlo. En el primer caso también existe la posibilidad de simulación mediante el botón ‘procesar’.

Una vez generado el archivo de texto, éste se muestra en la pantalla para ser comprobado o modificado por el usuario y, posteriormente, reguardado con otra nomenclatura. De esta forma el usuario podría utilizar archivos de programa ya elaborados para mediante pequeñas (o no tan pequeñas) modificaciones generar nuevos archivos sin necesidad de seguir todos los pasos de introducción de datos, elaborar archivos a través de otros ya existentes del mismo tipo.

La estructura de los archivos de texto es siempre la misma. En la Figura 2.10 se muestra la sección inicial de esta estructura constituida por un listado de los parámetros definidos. A continuación se definen los subcircuitos individualmente (su nomenclatura, componentes, valores de estos y numeración interna de nudos). Tras estos se listan los subcircuitos de cada

tipo y su numeración externa. La relación de componentes que implementan las condiciones de contorno (nomenclatura y nudos de conexión de estos dispositivos eléctricos) se presenta tras el listado de subcircuitos. Por último se incluye las sentencias asociadas con los tiempos de simulación, tolerancias y otras sentencias específicas relacionadas con Pspice.

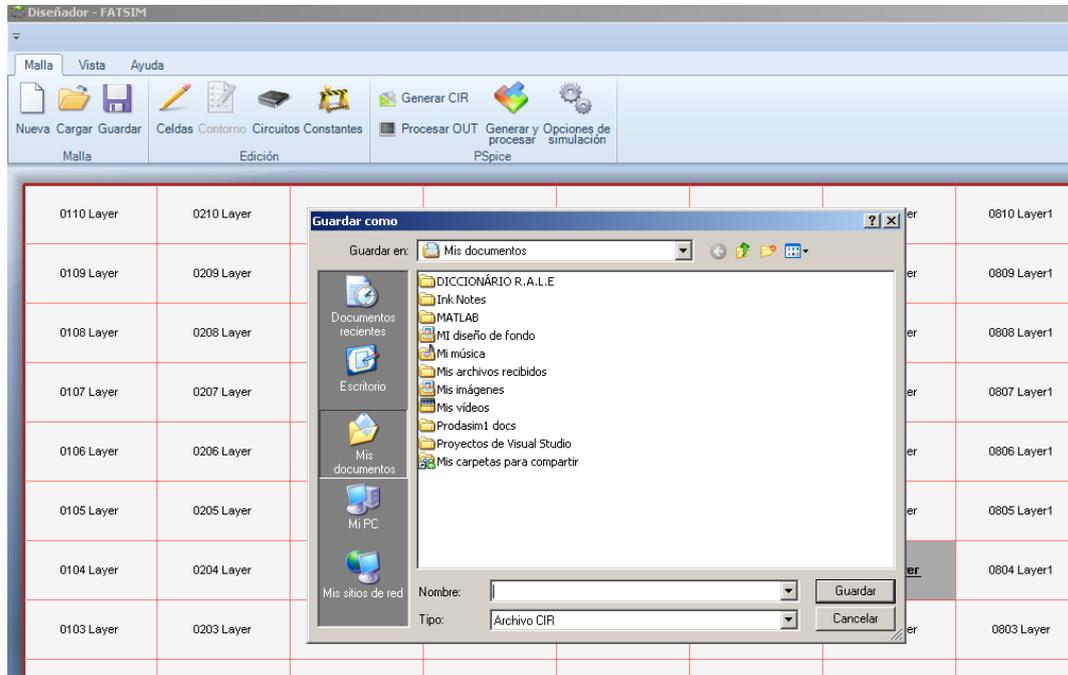


Figura 2.9 Ruta para guardar el archivo de texto del modelo generado

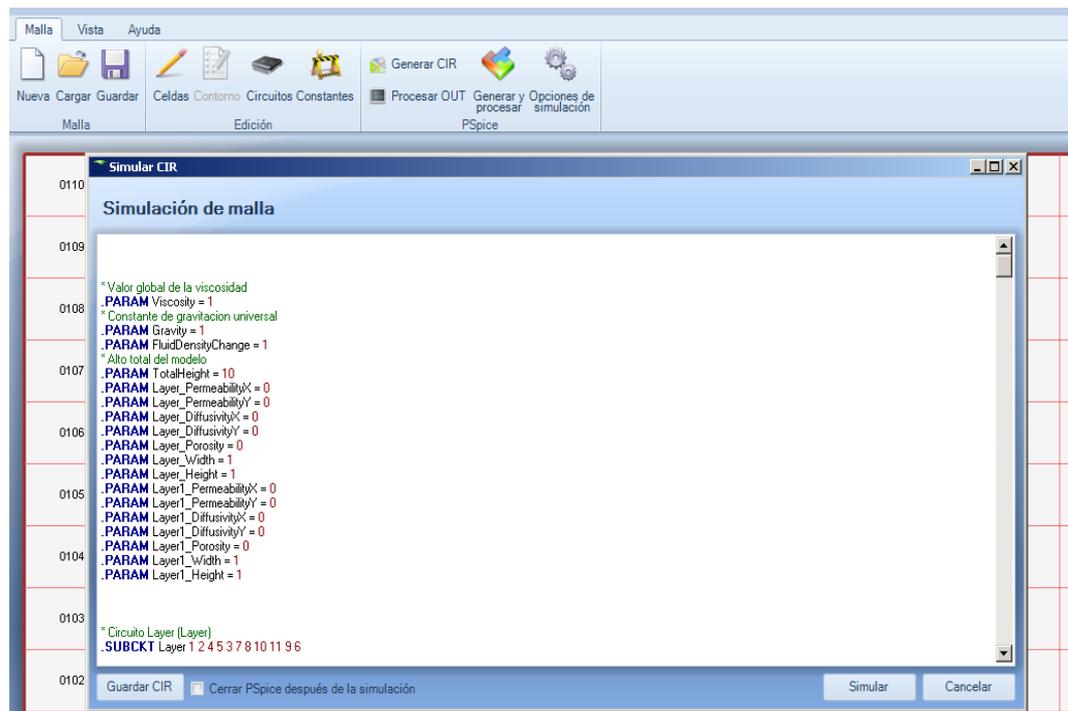


Figura 2.10 Estructura de los archivos de texto de los modelos

La simulación del modelo es automática mediante las opciones ‘generar’ o ‘generar y simular’, una vez guardado el archivo de texto del modelo. FATSIM-A dispone de subrutinas que arrancan Pspice y acceden directamente a la simulación y presentación de resultados en el propio entorno de Pspice.

Con la opción de simular el programa presenta inicialmente la pantalla de la Figura 2.11 en la que aparece el archivo generado que inmediatamente se comprueba y simula. En una primera y relativamente rápida fase (para un mallado bajo, del orden de 50×50 celdas), Pspice comprueba el diseño del modelo detectando los posibles errores que presenta en un archivo de salida de extensión ‘.out’, permitiendo al usuario corregir dichos errores. En ausencia de estos se procede a la simulación presentando una nueva pantalla en la que se informa al usuario de los datos más importantes de ésta: instante por el que transcurre la simulación y porcentaje de simulación realizada, así como intervalo de tiempo de paso para el cálculo.

Pspice modifica a conveniencia el intervalo de paso de tiempo de simulación (a menos que se elimine esta opción y se imponga un intervalo de paso fijo). Con ello se puede optimizar el tiempo de simulación global, sin perder la precisión relativa establecida por la sentencia ‘RELTOL’ en el archivo de texto, haciendo más largo el ‘time step’ cuando el transitorio es suave y acortándolo cuando surgen grandes cambios en las variables del proceso.

II.1.4 Presentación gráfica de resultados

Pspice permite también presentar los resultados transitorios (que permiten comprobar a primera vista si el proceso transcurre ‘adecuadamente’ o no) mediante una opción en el botón ‘simulación’ de su entorno, Figura 2.11.

Cuando ha terminado la simulación, si hemos incluido la sentencia .PROBE en el archivo de texto del modelo, aparece la pantalla de la Figura 2.12 (caso contrario hay que activar la opción simulación) que permite acceder a los resultados gráficos de las variables dependientes, tensión y corriente (equivalentes a flujo de agua y función de corriente o flujo de soluto y concentración según el circuito o nudo solicitado) mediante la opción ‘Trace’. Este entorno gráfico es limitado en cuanto a que sólo permite representar transitorios, no pudiendo hacer representaciones de patrones instantáneos de las variables.

La pantalla del entorno gráfico de salida de Pspice dispone numerosas opciones de presentación, todas habilitadas para el usuario. Por ejemplo, representación de resultados de diferentes archivos, representación de resultados múltiples habilitados con la sentencia ‘simulación paramétrica’, selección de detalle de gráficos, introducción de marcador de tiempos, etc.

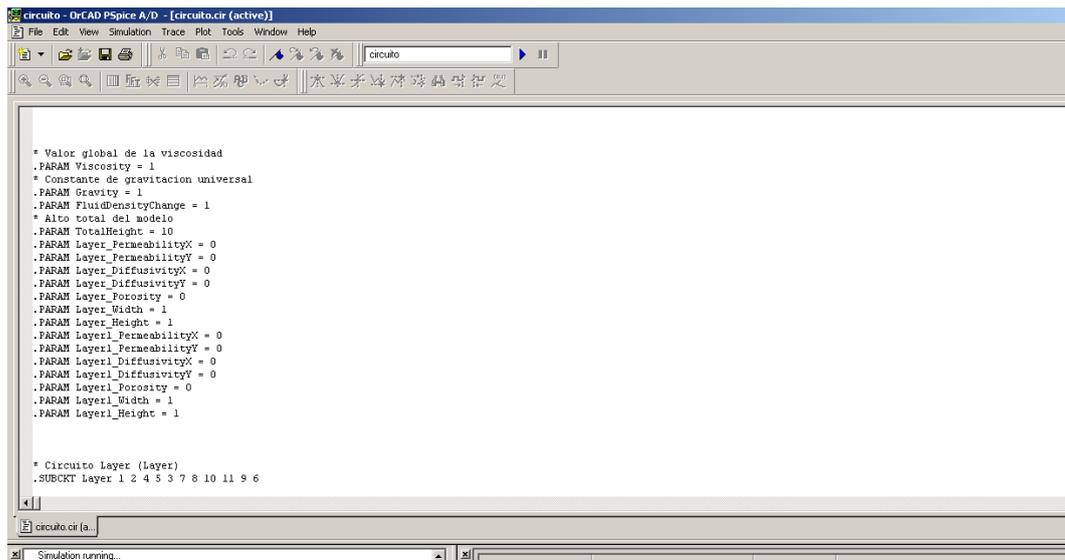


Figura 2.11 Pantalla de inicio de simulación de Pspice

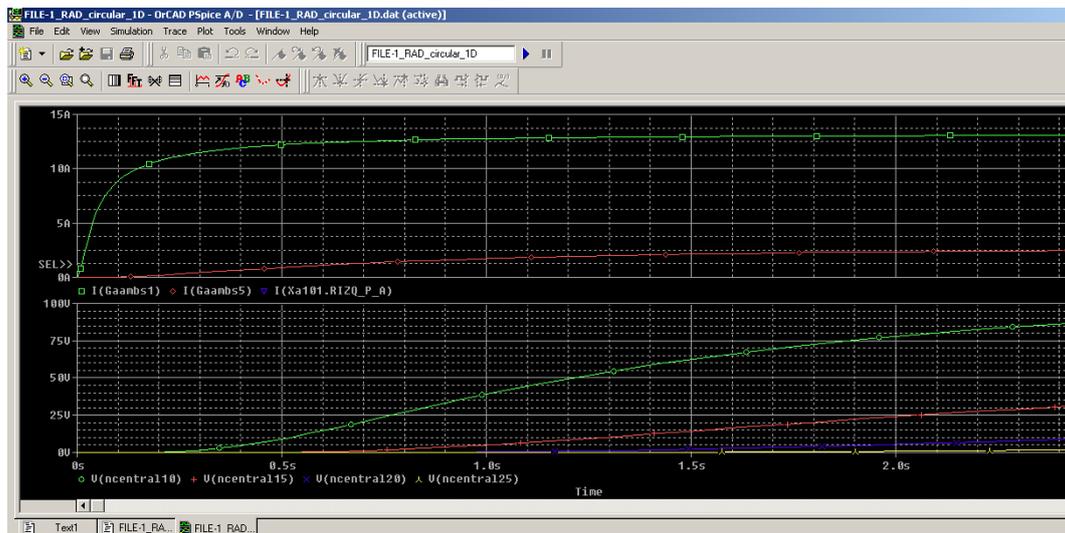


Figura 2.12 Entorno gráfico de salida de Pspice

Para terminar es interesante anotar que FATSIM-A dispone de su propio entorno gráfico, suficientemente potente para observar los patrones sin necesidad de procesar los datos de salida de Pspice con MATLAB.

II.2. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE SIMULACIÓN POR REDES

II.2.1 Fundamentos del método

El Método de simulación por redes, MESIR (Network Simulation Method, NSM), es una técnica numérica para el estudio de diferentes procesos que puedan definirse mediante un

conjunto de ecuaciones o modelo matemático. Partiendo de éstas el procedimiento consiste, en primer lugar, en elaborar un “modelo en red” o circuito eléctrico equivalente al proceso, y en segundo lugar, en simular dicho proceso obteniendo la solución del modelo en red mediante un programa adecuado de resolución de circuitos eléctricos. La posibilidad de controlar mediante programación, ajena al propio método, los parámetros del proceso a través de los valores de los dispositivos eléctricos incluidos en el modelo, abre también la posibilidad de aplicación del método a optimizar procesos.

En el MESIR, el punto de partida es siempre el modelo matemático de un cierto proceso, esto es, un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales (EDP) espacio-temporales; la discretización de la variable espacial permite establecer el modelo en red o red eléctrica equivalente. Ésta es la única manipulación directa que se hace de las ecuaciones.

El modelo en red es el formato que se da al modelo matemático para que pueda ser utilizado como entrada (fichero) en un programa de resolución de circuitos eléctricos tal como PSpice®. Este software es el que resuelve las ecuaciones de la red y proporciona la solución numérica del modelo matemático. En definitiva, puesto que la simulación del modelo en red mediante ordenador implica la resolución numérica de sus ecuaciones, el método de simulación por redes es, de hecho, un método numérico.

El MESIR guarda cierta relación con otros métodos numéricos, en particular con el método de diferencias finitas y con el método de líneas. La diferencia esencial con el primero es que utiliza de manera directa una única reticulación, la de la variable espacial, mientras que en las diferencias finitas se reticula tanto las variables espaciales como las temporales. En cuanto al método de líneas la diferencia está en la técnica de resolución de las ecuaciones en diferencias finitas discretizadas en el espacio; el método de líneas utiliza un software matemático directo mientras que el MESIR lo resuelve mediante PSpice.

Un modelo en red se considera equivalente a un determinado proceso cuando, en su descripción, las ecuaciones del modelo matemático discretizadas, y las ecuaciones del modelo en red para un elemento del volumen o celda elemental, correspondientes a variables análogas, coinciden.

La técnica empleada para elaborar el modelo en red consiste en reticular el espacio en elementos de volumen o celdas elementales; al aplicar estas reticulaciones a las ecuaciones diferenciales, se obtienen un conjunto de ecuaciones en diferencias finitas que se constituyen en el punto de partida para la obtención del modelo en red correspondiente a cada celda elemental; una seleccionada correspondencia entre variables dependientes del problema y variables eléctricas,

tensiones e intensidades, permite interpretar los resultados de la simulación en términos del proceso que se modela. La asociación de celdas, de acuerdo con la geometría del problema, configura el modelo en red correspondiente a todo el medio finito, que es tanto más preciso cuanto mayor sea el número de éstas. Las condiciones de contorno e iniciales se incorporan al modelo de manera simple.

En el caso de los procesos de transmisión de calor, la posibilidad de elaborar modelos en red representativos de los mismos, es decir, el hecho de que admitan redes eléctricas equivalentes, supone no sólo la equivalencia matemática sino, también, la equivalencia física entre las variables características de unos y otros procesos (térmicos y eléctricos).

La analogía termoelectrónica se ha venido utilizando de una u otra forma desde hace varias décadas por numerosos investigadores, bien como una representación alternativa de los problemas térmicos, sin ningún otro objetivo, bien como un método de solución del problema, construyendo los circuitos en el laboratorio y realizando medidas. No obstante, el MESIR es esencialmente diferente a los métodos anteriores.

En primer lugar el MESIR es un método numérico, lo que le hace esencialmente diferente de la implementación de la analogía térmico-eléctrica clásica. En ésta los elementos eléctricos representan el comportamiento del sistema térmico y permiten obtener relaciones entre las variables que intervienen en el mismo, pero no se utiliza directamente como un procedimiento de cálculo, salvo en aplicaciones muy sencillas.

En segundo lugar, el MESIR parte de las ecuaciones en derivadas parciales del sistema y proceso considerados, que son aplicadas a una discretización del medio.

En tercer lugar, el MESIR construye un modelo en red, que es un circuito eléctrico equivalente al proceso térmico, basándose en la similitud formal de las ecuaciones de comportamiento del sistema y las de los circuitos eléctricos, que se resuelve como tal mediante un software adecuado. La respuesta del circuito eléctrico coincide con la del sistema térmico. En ciertos métodos numéricos se ha aplicado la analogía térmico-eléctrica a las celdas resultantes de la discretización del sistema, pero siempre ha sido como forma de representación del proceso y para obtener las ecuaciones en derivadas parciales, pero nunca para resolverlo como tal.

Se podría decir que el MESIR aúna la riqueza analítica e intuitiva de la analogía térmico-eléctrica con la potencia de los métodos numéricos actuales, dando como resultado un método capaz de abordar sofisticados problemas de transmisión de calor (y otras disciplinas) en una

forma relativamente simple. Uno de los grandes atractivos del método es que, siendo un método numérico, apenas requiere armazón matemático, ya que el ensamblaje y resolución de las ecuaciones diferenciales se deja al software de resolución de circuitos.

El MESIR, que utiliza la teoría de redes para modelar el proceso físico objeto de estudio, es un método de simulación en tanto que incluye la resolución numérica del modelo en red obtenido mediante la reticulación. Así, las variables flujos y fuerzas, características del mismo, deben satisfacer las leyes de Kirchhoff y sus relaciones determinarán los elementos de circuito correspondientes. Ahora bien, en cada proceso concreto y una vez elegidas las variables conjugadas, la información de qué elementos de circuito intervienen en el modelo en red y cómo se conectan entre sí, se obtiene del modelo matemático y no de consideraciones de tipo físico acerca del papel que juegan estas variables.

En síntesis, en la teoría de redes, la viabilidad de un modelo en red supone:

- 1) La existencia de una red independiente del tiempo,
- 2) La existencia de una magnitud $j_{N-N'}$ llamada *flujo*, asociada a cada rama que conecta los nudos $N-N'$ y que va de N a N' . $j_{N-N'}$ obedece las leyes de Kirchhoff para corrientes (LCK),
- 3) La existencia de una magnitud, ϕ , llamada *potencial*, asociada a cada nudo, tal que la diferencia $X_{N-N'} = \phi_N - \phi_{N'}$, llamada *fuerza*, obedece la ley de los voltajes de Kirchhoff (LVK).

II.2.2 El programa PSpice®

Una vez obtenido el modelo en red se procede a su análisis. Para ello se recurre a un software adecuado para la solución de circuitos eléctricos tal como PSpice®. En el proceso de simulación el circuito se presenta al ordenador como un conjunto de ecuaciones matemáticas y éste, mediante procedimientos de análisis numérico, proporciona toda la información solicitada por el investigador para cada tipo de análisis. De esta forma se obtienen los datos correspondientes a medidas típicas de laboratorio con un margen de error despreciable y sin afectar al circuito; más aún, pueden alterarse las condiciones iniciales, de contorno, y las características térmicas del medio con sencillos cambios en el programa, y el análisis puede aportar datos sobre el comportamiento del circuito más allá de los límites que virtualmente se pueden obtener con medidas reales.

La simulación está estructurada en cinco subprogramas principales, que interaccionan entre ellos a través de una estructura de datos que es almacenada en un área común del programa. Estos subprogramas son: entrada, organización, análisis, salida y utilidades.

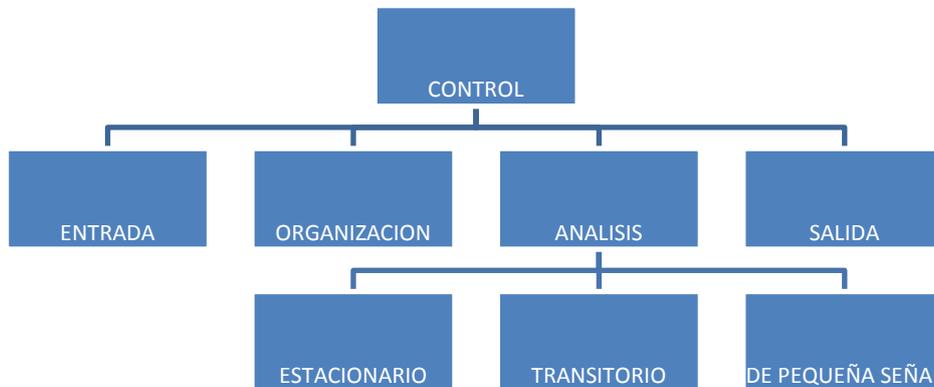


Figura 2.13 Diagrama bloques del programa de simulación de circuitos PSpice

II.2.3 La simulación del modelo en red

El software PSpice se programa en su forma clásica por sentencias, en un lenguaje relativamente simple. La sintaxis de entrada no requiere especiales disposiciones ordenadas de datos, su estilo puede catalogarse más bien como libre y dispone de una razonable fuente de datos que se adjudican por omisión a los componentes cuando éstos no se especifican en detalle. También realiza un buen número de chequeos para asegurar que el circuito ha sido introducido correctamente y el resto de las sentencias de programa están bien escritas, advirtiendo al programador de posibles errores mediante mensajes previos a la ejecución. En definitiva, un usuario principiante necesita especificar un número mínimo de parámetros y controles de simulación para extraer unos resultados de simulación aceptables.

El programa, por fin, se estructura como un listado que contiene todos los componentes eléctricos del circuito (existe la posibilidad de organizar el programa mediante subcircuitos), resistencias, condensadores, fuentes, interruptores, etc., que se introducen uno por uno indicando el nombre, valor, nudos de conexión y otros parámetros característicos.

También admite la programación a través de una interfaz gráfica (aplicación *Schematics*), que construye y ejecuta los programas de análisis, aumentando la rapidez de programación y la versatilidad del método en determinadas aplicaciones (p.e. varias dimensiones). La forma de

circuito eléctrico del modelo en red es muy familiar e intuitiva para ingenieros y científicos, lo que es una inestimable ayuda en la programación de los distintos procesos estudiados.

En el proceso de simulación, se obtiene la solución numérica de la representación matemática del modelo en red. Ésta contiene:

- a) las ecuaciones matemáticas de los diferentes tipos de monopuertas,
- b) las ecuaciones correspondientes a las restricciones impuestas por las leyes de Kirchhoff, propias de la teoría de circuitos, que han de satisfacerse entre las ramas y nudos del circuito,
y
- c) la información particular sobre la interconexión de los diferentes componentes eléctricos de cada modelo, dando lugar toda esta información a un extenso sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales.

CAPÍTULO III

Modelos en red con pozos de extracción e introducción del problema de Henry

III.1 EL PROBLEMA DE HENRY

III.1.1 Presentación histórica y soluciones al problema

Ya en 1959, Cooper (Cooper, [1959]) recoge los antecedentes del problema de intrusión marina en acuíferos costeros de Henry (Henry, [1960]), estableciendo la hipótesis de que las soluciones de estos problemas no son estáticas. En palabras de Cooper, *‘el agua de mar... fluye de manera continua en un ciclo desde el fondo del mar, en la frontera, hacia la zona de difusión, regresando de nuevo al mar’*. En esta zona de difusión se mezcla el agua dulce con el agua salada en un movimiento de convección causado principalmente por los cambios de densidad en la zona de mezcla. De nuevo, en palabras de Cooper: *‘la mezcla de agua dulce-agua salada, de menor densidad que el agua del mar, se eleva recorriendo un camino dentro del acuífero’*.

El problema de Henry ha sido estudiado por un gran número de investigadores (Segol, [1994]; Holzbecher, [1998] y Bear y col., [1999]). En el campo del flujo de aguas subterráneas asociado a densidad variable del fluido, el problema de Henry (Henry, [1964] y Voss y Souza, [1987]) ha llegado a convertirse en uno de los problemas patrón (“benchmark”) que muchos autores toman como referencia para contrastar las soluciones de sus propios métodos numéricos.

Tanto Henry como, posteriormente, Pinder y Cooper (Pinder y Cooper, [1970]), quienes usaron una ecuación distinta para el balance de masa del soluto, ya que dividieron la descarga específica por la porosidad, encontraron soluciones semianalíticas a este problema.

Lee y Cheng (Lee y Cheng, [1974]) obtuvieron soluciones numéricas relativamente concordantes con las semianalíticas mientras que Segol y col. (Segol y col. [1975]) proporcionaron otra solución numérica asumiendo una condición de contorno mixta en la porción superior del contorno vertical en contacto con el mar, con el propósito de vencer las dificultades numéricas que causaba la condición de frontera de Henry (físicamente poco real). Otros autores que han proporcionado soluciones numéricas a estos problemas son: Frind (Frind, [1982]), Huyakorn y col. (Huyakorn y col., [1987]), quienes usaron la ecuación de balance de masa utilizada por Pinder y las condiciones de frontera de Segol, y Voss y Souza (Voss y Souza, [1987]) quienes afirmaron que gran parte de las discrepancias que aparecieron en los artículos publicados sobre el problema de Henry se debían al uso de dos coeficientes de dispersión diferentes. Estas discrepancias, señalan los autores, tienen su origen en el estudio realizado por Pinder y Cooper (Pinder y Cooper, [1970]), investigadores que no usaron la recarga efectiva en sus estudios (como lo hizo Henry en 1964) en la ecuación de balance de la masa; Senger y Fogg (Senger y Fogg, [1990]) quienes mostraron el potencial de la formulación matemática bajo la función de corriente (“streamfunction”) para el problema de Henry; Evans y Raffensperger (Evans y Raffensperger, [1992]), Galeati y col. (Galeati y col., [1992]), Croucher y O’Sullivan (Croucher y O’Sullivan, [1995]), Kolditz y col. (Kolditz y col., [1998]).

Más recientemente, cabe mencionar el trabajo de Simpson and Clement (Simpson y Clement, [2003]), quienes compararon sus resultados con los de Frind y proporcionaron un estudio de las versiones acoplada y desacoplada del problema. Estos autores demostraron que la distribución de la concentración salina en el problema de Henry está esencialmente causada por la condición de frontera más que por los propios efectos de densidad variable. También el trabajo de Gotovac y col. (Gotovac y col., [2003]) con la formulación de la función de corriente y, de nuevo, el de Simpson y Clement (Simpson y Clement, [2004]) quienes precisaron la solución semianalítica de Segol (Segol, [1994]). Este último autor, extendiendo el corte de la serie (truncamiento) a un esquema de 183 términos proporcionó una solución más precisa al problema de Henry pero la comparó con la solución numérica del problema modificado, que asumía una condición de contorno de Segol o condición mixta, en lugar de con el original. Acerca de esta comparación, Simpson y Clement afirman que a pesar de que la solución semianalítica de Segol es la primera en mostrar acuerdo con soluciones numéricas, la comparación no es efectivamente apropiada pues no se trata del mismo problema. Estos autores re-evalúan la solución semianalítica del problema original de Henry con un esquema de truncamiento de 203 términos y encuentran un excelente grado de concordancia entre ésta y las soluciones numéricas. Además como alternativa para aumentar la influencia de los efectos de densidad variable y mejorar el mérito del problema de Henry como problema patrón, Simpson y Clement obtuvieron una nueva solución semianalítica para una recarga efectiva de agua dulce de la mitad de su valor original.

Por último, es preciso mencionar los trabajos de Soto y col. (Soto y col., [2007a-b] y Soto y col., [2006a-e], que utilizan el método de redes, herramienta usada en esta memoria. La comparación de los resultados de estos autores con las soluciones semianalíticas y numéricas de otros autores (Soto, [2007a]) valida la herramienta de cálculo y permite asumir las nuevas simulaciones de los modelos con pozos de extracción e introducción propuestos en esta memoria.

III.1.2 Modelo físico y matemático del problema de Henry

El problema de Henry, cuya geometría se representa en la Figura 3.1, trata de un acuífero rectangular, homogéneo e isótropo, con una concentración salina inicial uniforme de valor cero y condiciones de frontera impermeables al flujo en las regiones superior e inferior. En la frontera izquierda se provoca una recarga constante de agua dulce mientras que en la frontera derecha está en contacto con agua de mar. Con el tiempo, el agua salada penetra en el acuífero por la parte inferior del lateral en contacto con el mar y se mezcla con el agua dulce (en un proceso de dispersión), induciendo una circulación desde el fondo del mar hacia la zona de dispersión y desde ahí de nuevo hacia el mar por la región superior del lateral. Transcurrido un determinado tiempo (duración del transitorio) se alcanza un estado de equilibrio dinámico de flujo en el acuífero.

La formulación del problema de Henry (Croucher y O'Sullivan, [[1995]) implica la ley de Darcy,

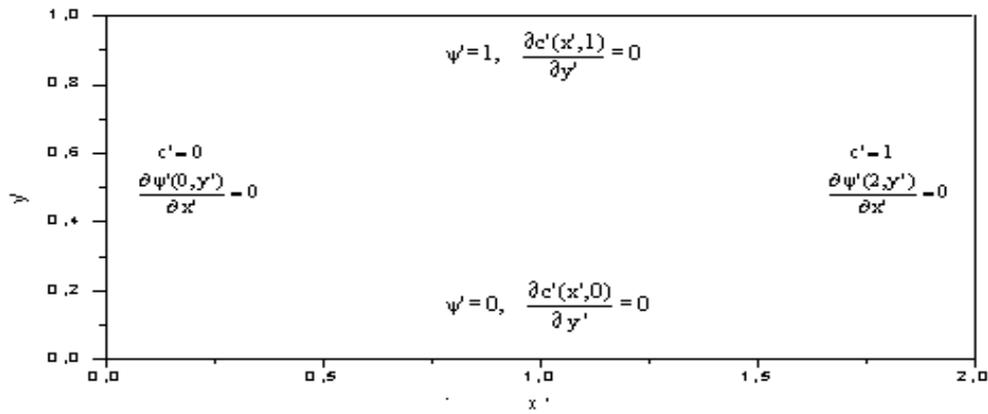
$$\bar{q} = -\frac{\kappa}{\mu}(\nabla p - \rho \bar{g})$$

la ecuación de conservación

$$\nabla(\rho \bar{q}) = 0$$

y la ecuación de transporte del soluto (sal)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (c \bar{v}) - \nabla \cdot (D \nabla c) = 0$$



Figura

3.1. Geometría del problema de Henry

Además, se asume una dependencia de la densidad del agua salada con la concentración de la forma

$$\rho = \rho_0(1 + \varepsilon c)$$

Como el parámetro adimensional $\varepsilon = (\rho - \rho_0)/\rho$ es del orden de magnitud de 0.025, la hipótesis de la aproximación de Boussinesq ($\rho \cong \rho_0$) puede asumirse y la ecuación de conservación se reduce a:

$$\nabla \vec{q} = 0$$

introduciendo las variables adimensionales definidas como:

$$x' = x/l$$

$$y' = y/d$$

$$c' = c/c_s$$

$$q' = q(d/Q)$$

$$\rho' = (\rho - \rho_0)/(\rho_s - \rho_0) = c'$$

$$t' = (D/d^2)t$$

y la función de corriente (que deriva de la condición $\nabla \vec{q} = 0$)

$$q'_x = \frac{\partial \psi'}{\partial y'}$$

$$q'_y = \frac{\partial \psi'}{\partial x'}$$

las ecuaciones generales pueden ser escritas en forma adimensional (Lee y Cheng, [1974]; Croucher y O'Sullivan, [1995]; Holzbecher, [1998] y Gotobac y col., [2003], como:

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial y'^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial c'}{\partial x'} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 c'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 c'}{\partial y'^2} - \frac{1}{b} \left(\frac{\partial \psi'}{\partial y'} \frac{\partial c'}{\partial x'} - \frac{\partial \psi'}{\partial x'} \frac{\partial c'}{\partial y'} \right) = \frac{\partial c'}{\partial t'} \quad (2)$$

Donde $a = \frac{\mu Q}{\kappa g d (\rho_s - \rho_0)}$ y $b = \frac{nD}{Q}$ y $b = \frac{nD}{Q}$ son el parámetro de descarga y el inverso del número de Peclet de infiltración ($b=1/Pe$), respectivamente (Lee and Cheng, [1974]). Las condiciones de contorno expresadas en función de las anteriores variables adimensionales, para una relación de aspecto $\xi=l/d=2$, son:

$$c'(0, y') = 0 \quad c'(2, y') = 1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial c'(x', 0)}{\partial y'} = \frac{\partial c'(x', 1)}{\partial y'} = 0 \quad (4)$$

$$\psi'(x', 0) = 0 \quad \psi'(x', 1) = 1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \psi'(0, y')}{\partial x'} = \frac{\partial \psi'(2, y')}{\partial x'} = 0 \quad (6)$$

Finalmente la condición inicial es:

$$c'(x', y', t'=0) = 0 \quad (7)$$

Los valores de las características físicas del problema se muestran en la tabla 3.1. Para el problema de Henry original (Henry, [1964]) $\xi = 2$, $a = 0.263$ y $b = 0.1$; para la versión de Pinder del problema (Pinder y Cooper, [1970]) $\xi = 2$, $a = 0.263$ y $b = 0.035$, y para el problema de

Henry modificado por Simpson y Clement (Simpson y Clement [2004]) $\xi = 2$, $a = 0.1315$ y $b = 0.2$. Las condiciones de frontera para los tres casos se muestran en la Figura 3.1.

Símbolo	Valor	Unidad
D	6.6×10^{-6} (Henry, 1964) 2.31×10^{-6} (Pinder y Cooper, 1970)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
G	9.81	m s^{-2}
K	1.020408×10^{-9}	m^2
Q	6.6×10^{-5}	m s^{-1}
N	0.35	-
μ	1.0×10^{-3}	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ρ_0	1000	kg m^{-3}
ρ_s	1025	kg m^{-3}
L	2	M
D	1	M

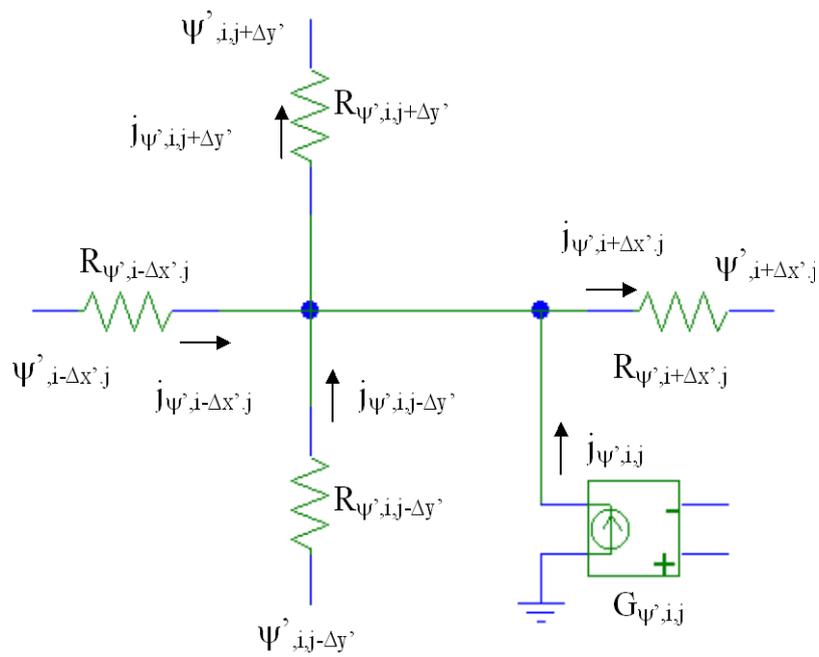
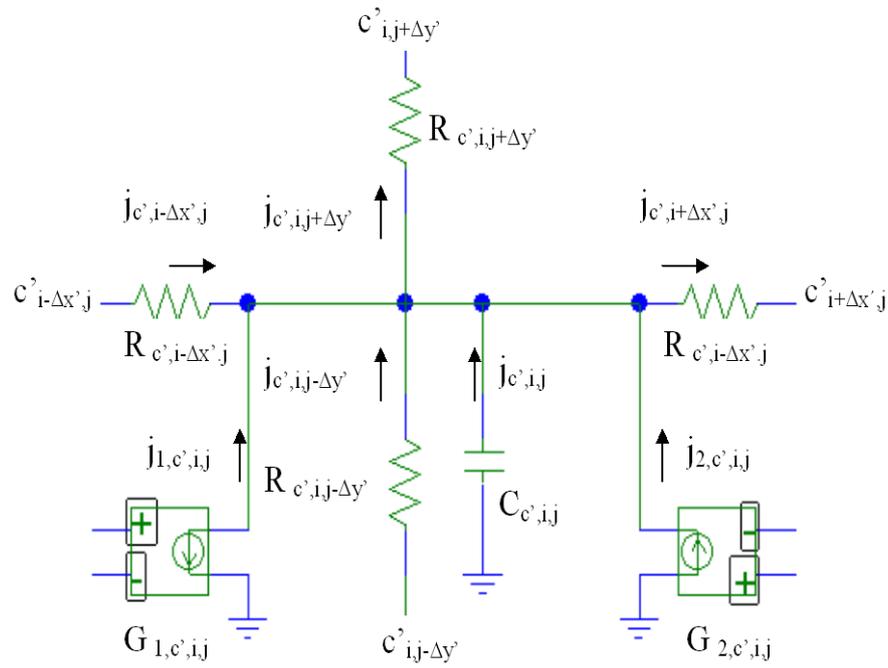
Tabla 3.1 Valores de las características físicas y parámetros geométricos del problema de Henry

III.2 MODELO EN RED DEL PROBLEMA DE HENRY

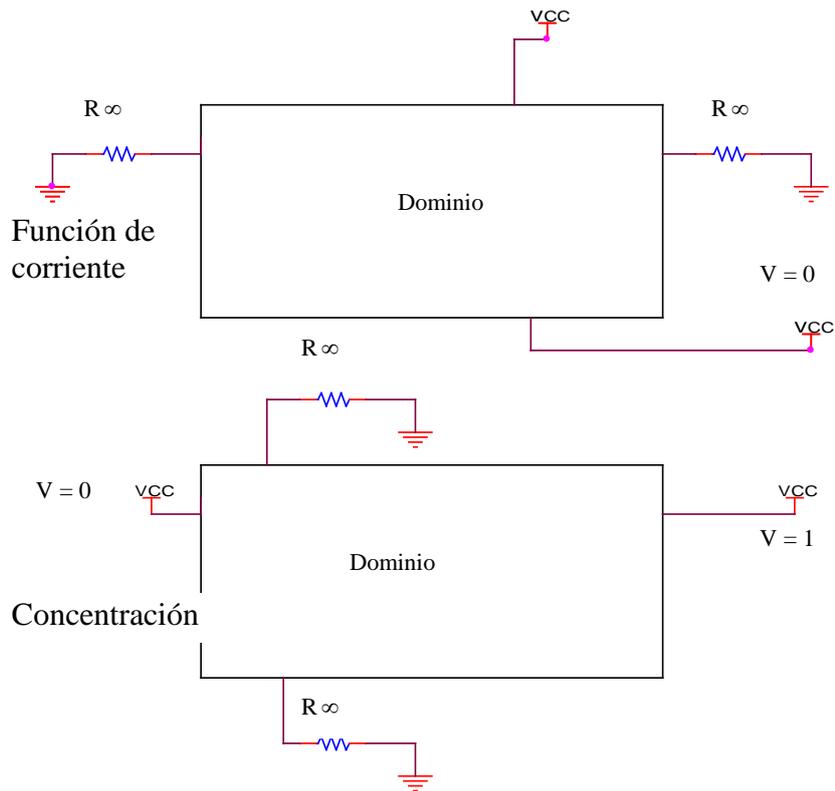
El modelo en red completo de este problema se muestra en la Figura 3.2 y ha sido diseñado por Soto y Alhama (Soto y col. [2007a]). El elemento de volumen contiene dos subcircuitos que corresponden a las variables dependientes concentración (circuito superior) y función de corriente (inferior); el primero contiene dos fuentes de corriente asociadas a los términos no lineales de la ecuación (2), las resistencias, típicos términos difusivos están asociadas a los términos lineales; el segundo, ecuación (1), sólo contiene un término no lineal (término de acoplamiento) y las resistencias asociadas a las segundas derivadas de Ψ . Estos circuitos correspondientes a una celda se conectan eléctricamente con los de las celdas contiguas para conformar el modelo del medio poroso; la conexión es directa usando simplemente una nomenclatura idéntica para los nudos comunes a las celdas contiguas.

Las condiciones de contorno se implementan mediante fuentes controladas o no controladas, o mediante resistencias de valor infinito para la condición de no flujo. FATSIM-A impone una numeración correlativa a todos los nudos del modelo permitiendo, de esta forma, una

identificación inmediata de puntos ante un eventual problema de simulación o no convergencia del modelo.



a)



b)

Figura 3.2. Problema de Henry. a: Modelo en red de una celda o elemento de volumen,
b: Modelo en red de las condiciones de contorno

III.3 MODELOS DE POZO

Los pozos representan una condición de introducción y extracción tanto para el flujo de agua como para el de soluto con la peculiaridad de que cuando introducen agua esta no lleva asociada concentración alguna de soluto. Cabe destacar que sobre todo para el caso de los pozos profundos estos a la vez que desarrollan la función de extracción e introducción de flujo como antes hemos explicado también originan una infraestructura que realiza la función de impermeabilidad tanto para el flujo de agua como para el soluto. En consecuencia el modelo en red para el circuito del soluto se representa mediante una resistencia infinita en la región en contacto con el medio acuífero. En relación con el circuito de flujo, la función de corriente toma valores constantes en los bordes del pozo para que la velocidades perpendiculares a la misma sean nulas a excepción de la abertura por la que se realizan las funciones de introducción o extracción donde existe una diferencia de potencial y x lo tanto existe una velocidad asociada a un flujo.

FATSIM-A permite implementar directamente la condición de pozo. Para ello se selecciona directamente sobre la misma las celdas que comprenden dicha retícula y pulsando el botón derecho en cada una de ellas se accede a implementar la condición adecuada, este proceso ha de repetirse para cada circuito, concentración y función de corriente. En relación con la concentración la condición implementada es la de no flujo (resistencia infinita) mientras que para la función de corriente se conecta una pila de valor constante, el correspondiente a la condición de frontera pozo.

CAPÍTULO IV

Simulación numérica

IV.1 INTRODUCCIÓN. PATRONES DE HENRY

En este apartado se muestra los efectos que produce la introducción de pozos, de diferentes profundidades y ubicadas en distintos puntos, sobre el flujo y la distribución de concentraciones.

La solución del problema de Henry, cuya formulación matemática y modelo en red han sido descritos en los apartados anteriores, se utilizará como referencia para observar los efectos de los diferentes tipos de pozos estudiados. Además se evalúa el efecto causado por la variación de la conductividad del medio (m/s) y el caudal de entrada de agua dulce (m^3/s).

El modelo simulado en todos los casos esta formado por 1250 celdas (50 horizontales por 25 verticales). Las Figuras 4.1 y 4.2 representan las soluciones estacionarias de la función de corriente y de la concentración salina en el estado estacionario. Puede apreciarse en ellas que la intrusión salina alcanza prácticamente el centro del acuífero. El flujo entrante de agua dulce se concentra en la región superior del acuífero conforme avanza hacia el interior, confinándose en la región superior izquierda. El agua salada, por el contrario, presiona el flujo marino hacia el interior del acuífero donde se mezcla (en la zona de transición) con el agua dulce entrante y fuerza al flujo salado a recircular desde la región de transición hacia la región de salida.

Es importante apreciar la isolínea 0,1 (que se encuentra siempre limitando con el área blanca en las figuras de concentración) que marcará a todos los efectos la zona de separación agua dulce-agua salada. El origen de coordenadas se sitúa en el borde inferior izquierdo del acuífero.

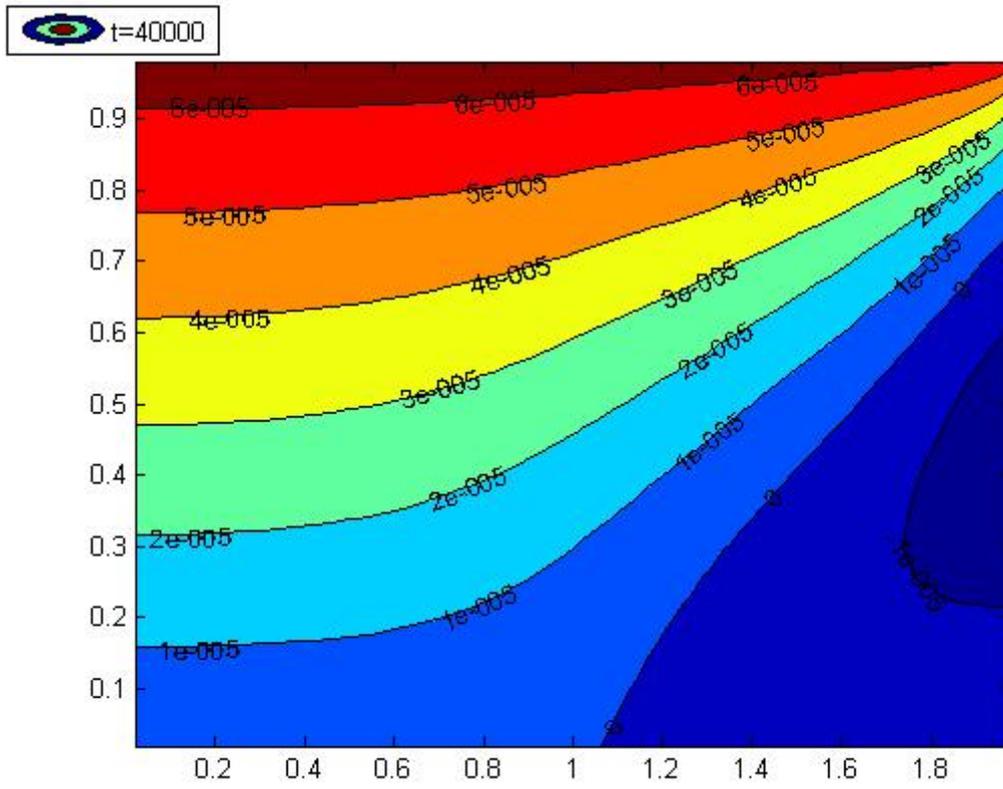


Figura 4.1 Problema de Henry. Función de corriente (Streamfunction)

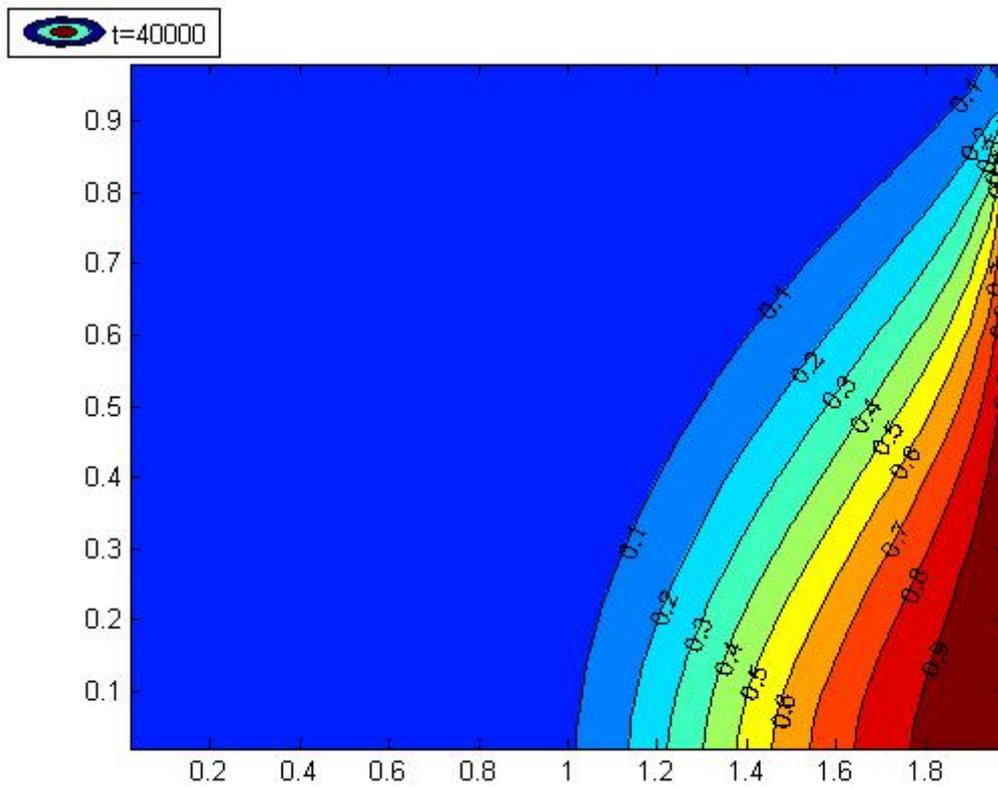


Figura 4.2 Problema de Henry. Isolíneas (Concentración)

IV.2 DISPOSICIÓN DE POZOS

Estos pozos, ilustrados en las figuras 4.3 y 4.4, parten de la superficie del acuífero y se proyectan verticalmente hacia el fondo. La anchura de las pozos, en todos los casos, es de 0,04 m, mientras que la longitud de los mismos tomará valores de 0,04 m (ubicado casi de forma superficial) y 0.48 m (a media altura del acuífero) para cada una de las ubicaciones escogidas.

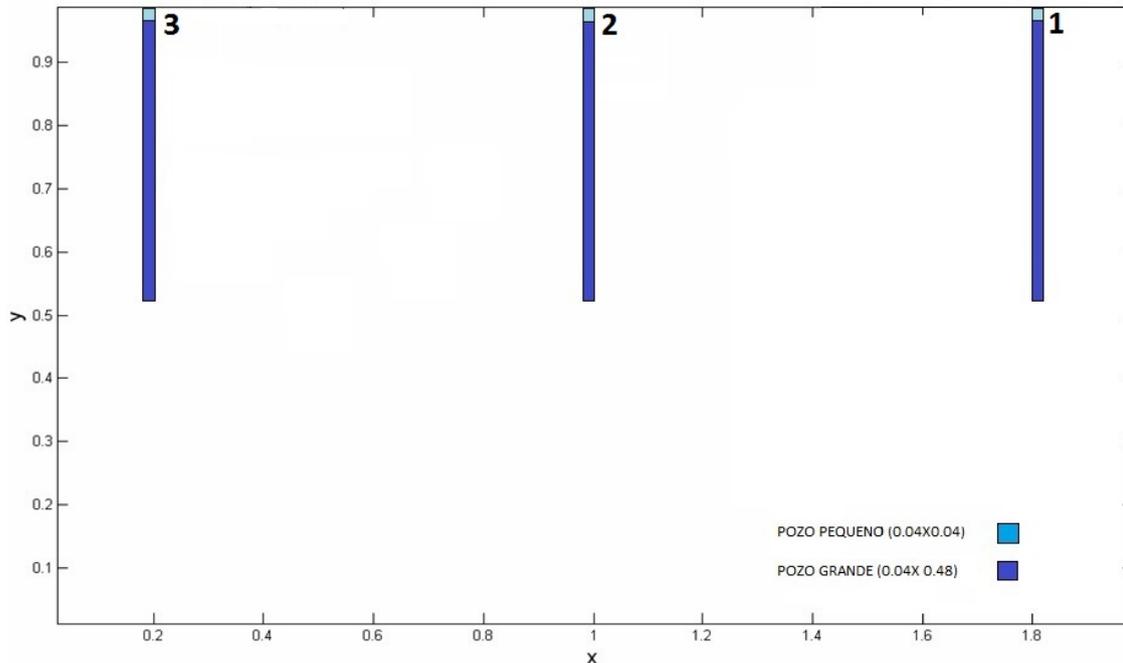


Figura 4.3. Esquema de la situación de los pozos individuales.

En este caso dispondremos de los pozos de forma simultanea.

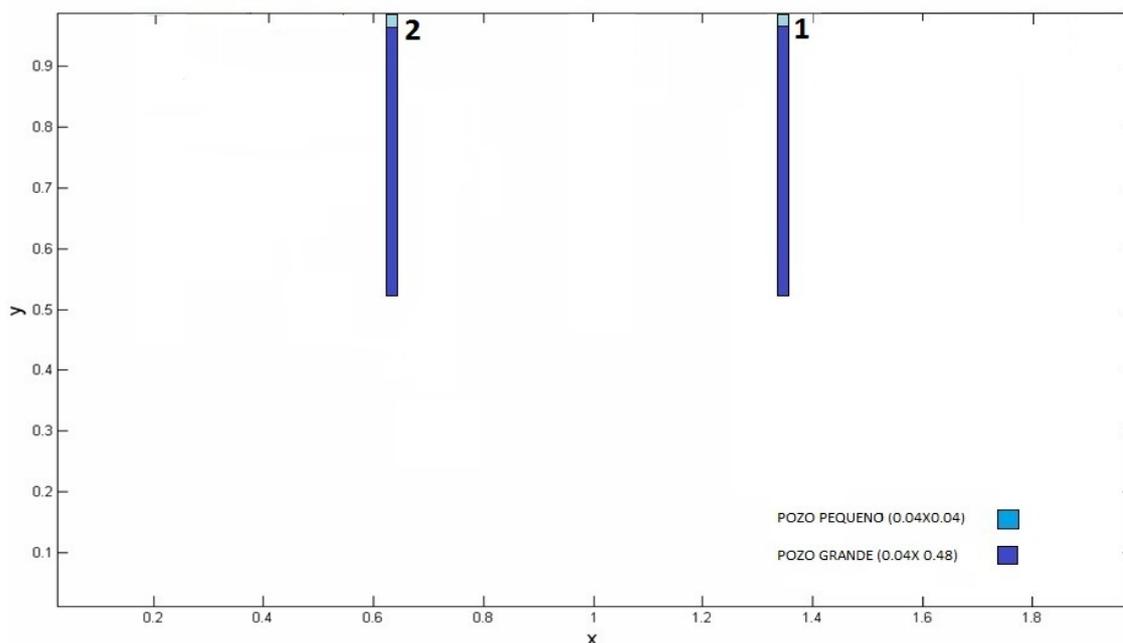


Figura 4.4. Esquema de la situación de pozos en paralelo.

IV.3 POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA “PEQUEÑOS”

La primera disposición de pozos “pequeños” tiene una profundidad de 0.04 m y sus ubicaciones son:

1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

Los resultados se muestran en las Figuras 4.5 a 4.10. Para esta disposición se aprecia que conforme los pozos de extracción se van alejando del borde derecho, donde se encuentra la mayor concentración salina la cuña salina va aumentando ya que esta es absorbida y desplazada hacia el orificio de entrada del pozo. Este aumento de la cuña salina es del orden de unos 50 cm, para el caso más extremo que sería la situación **3**, respecto del problema de Henry original. En general el acuífero queda igual o más contaminado con la inclusión de este tipo de pozos.

En relación con el campo de velocidades la única observación notable es que las líneas de flujo superiores son absorbidas por el pozo.

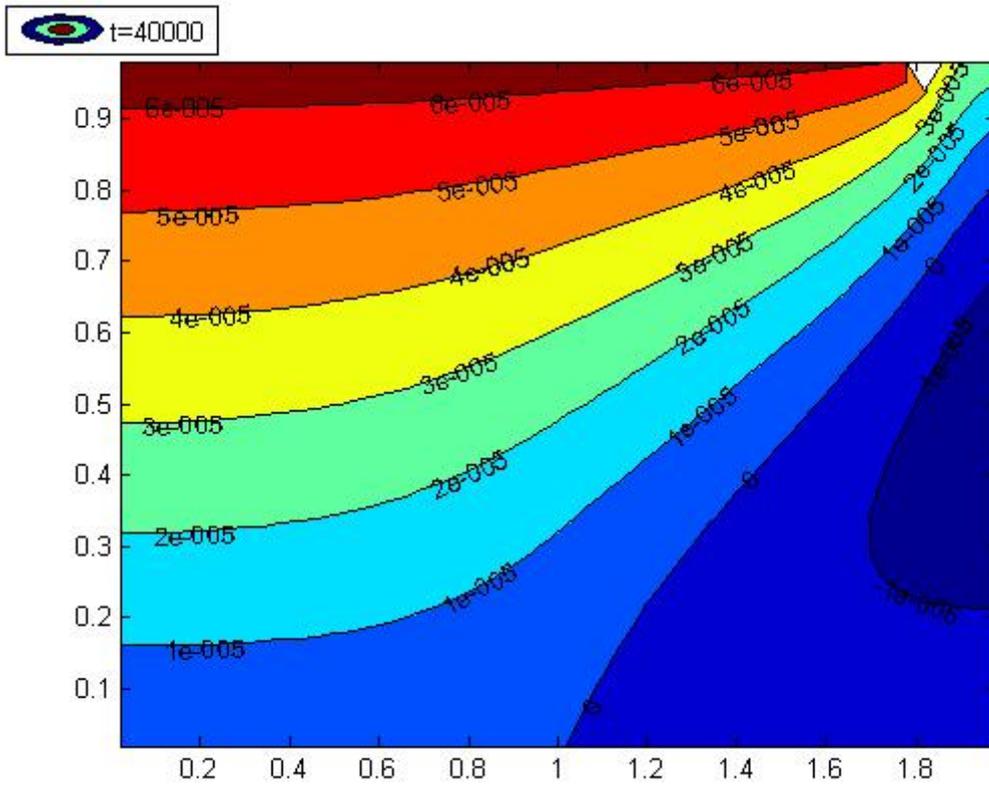


Figura 4.5. Función de corriente para el pozo 1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,96-1,00$

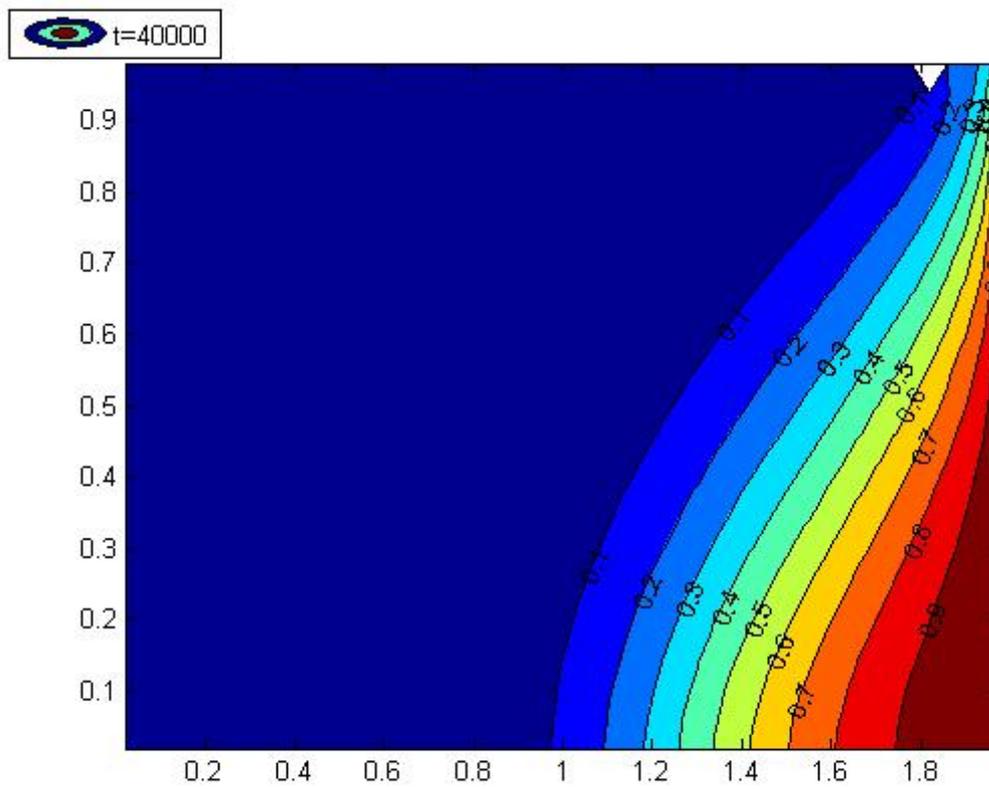


Figura 4.6. Isolíneas para el pozo 1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

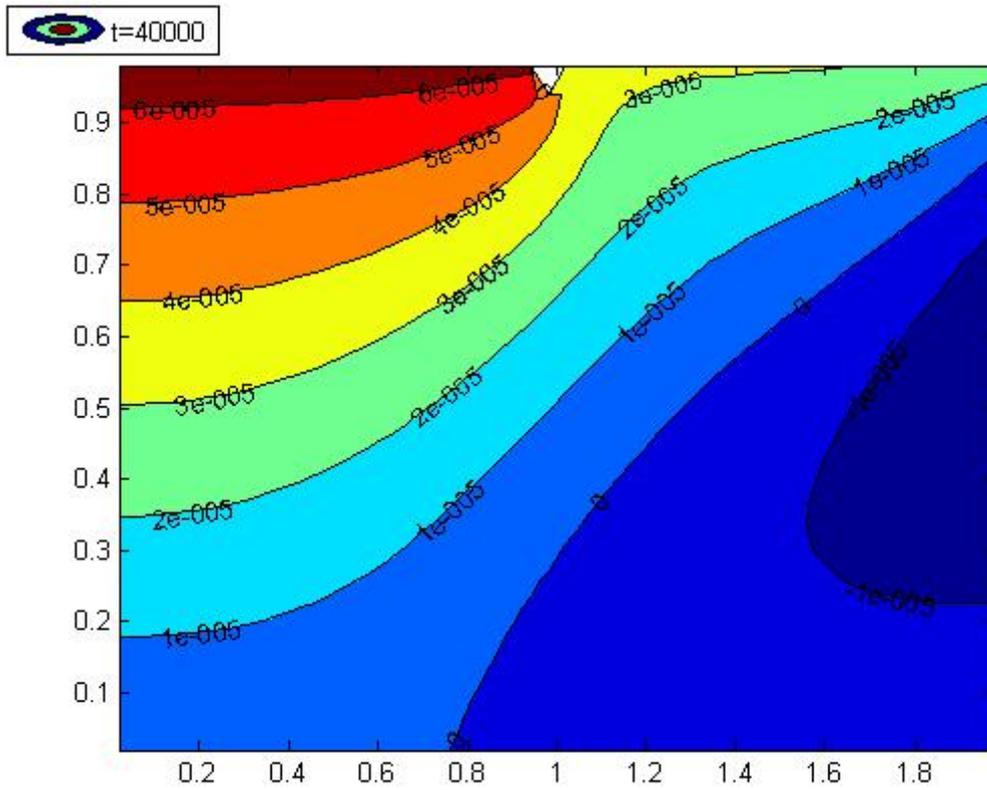


Figura 4.7. Función de corriente para el pozo 2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

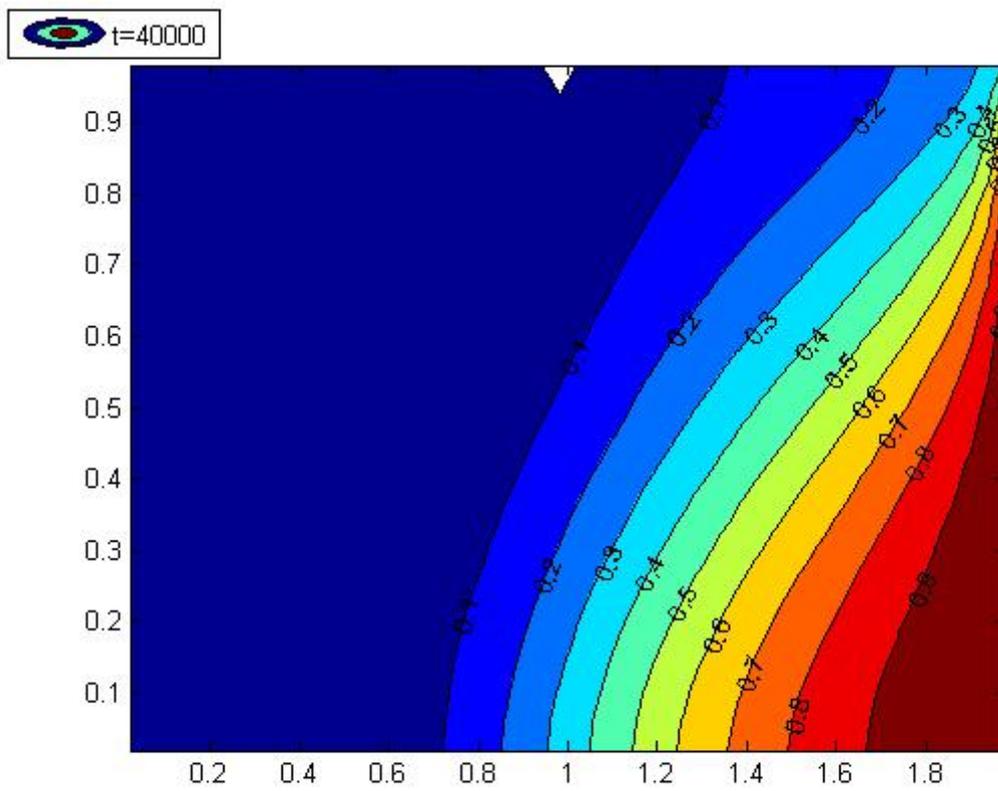


Figura 4.8. Isolíneas para la el pozo 2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

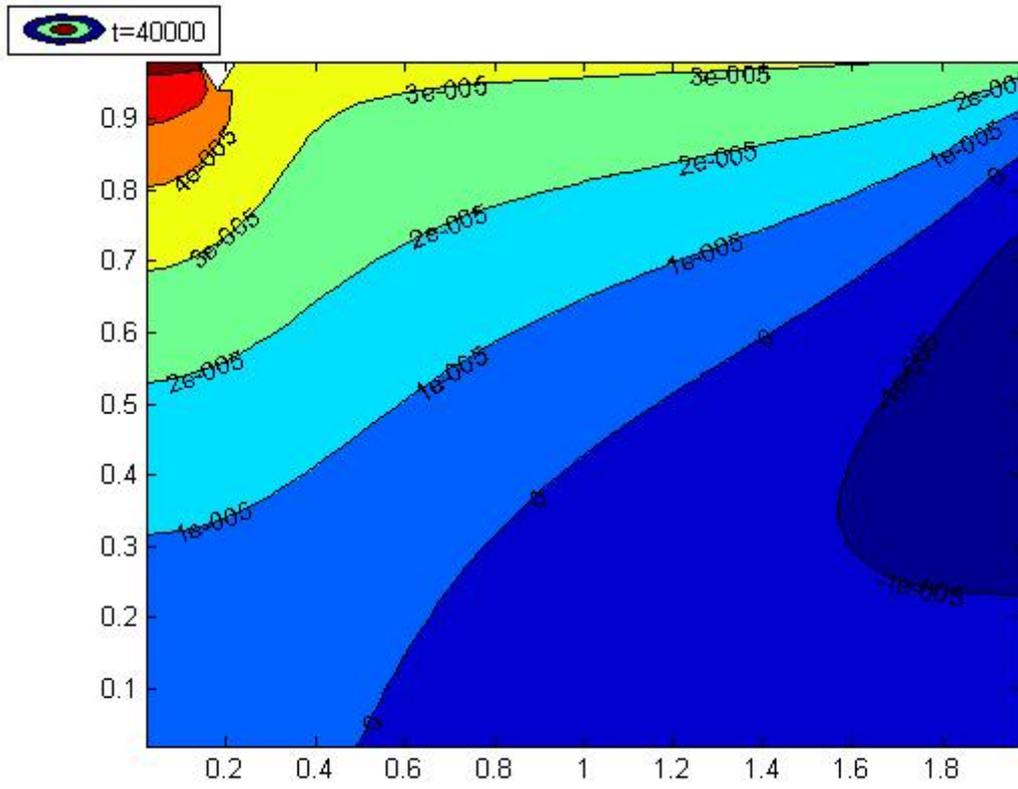


Figura 4.9. Función de corriente para el pozo 3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

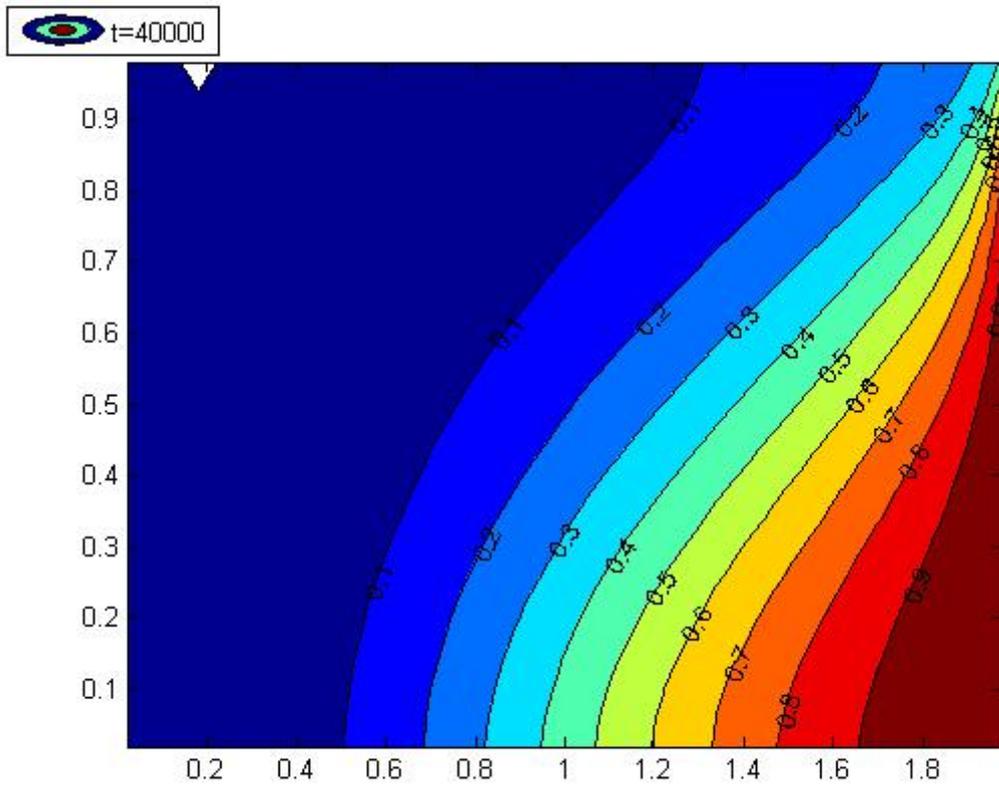


Figura 4.10. Isolíneas para el pozo 3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

IV.4 POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA “GRANDES”

La siguiente disposición de pozos “grandes” tiene una profundidad de 0.48m y sus ubicaciones son:

1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

Los resultados se muestran en las Figuras 4.11 a 4.16. Al igual que para el caso anterior la cuña salina va aumentando cuando más alejados del borde derecho situamos los pozos, aunque para este caso existe la peculiaridad de que al tratarse de pozos profundos estos a su vez actúan como diques con lo que se produce un mayor aislamiento de la concentración salina y por lo tanto una menor contaminación del acuífero, sobre todo para el caso **1** en el que la reducción de la isólinea 0,1 es del orden de 0,5m con lo cual la zona de intrusión marina se vería bastante reducida.

En relación con el campo de velocidades caben los mismos comentarios mencionados en la tanda anterior, añadiendo que la acción del pozo en forma de diques se aprecia a la perfección.

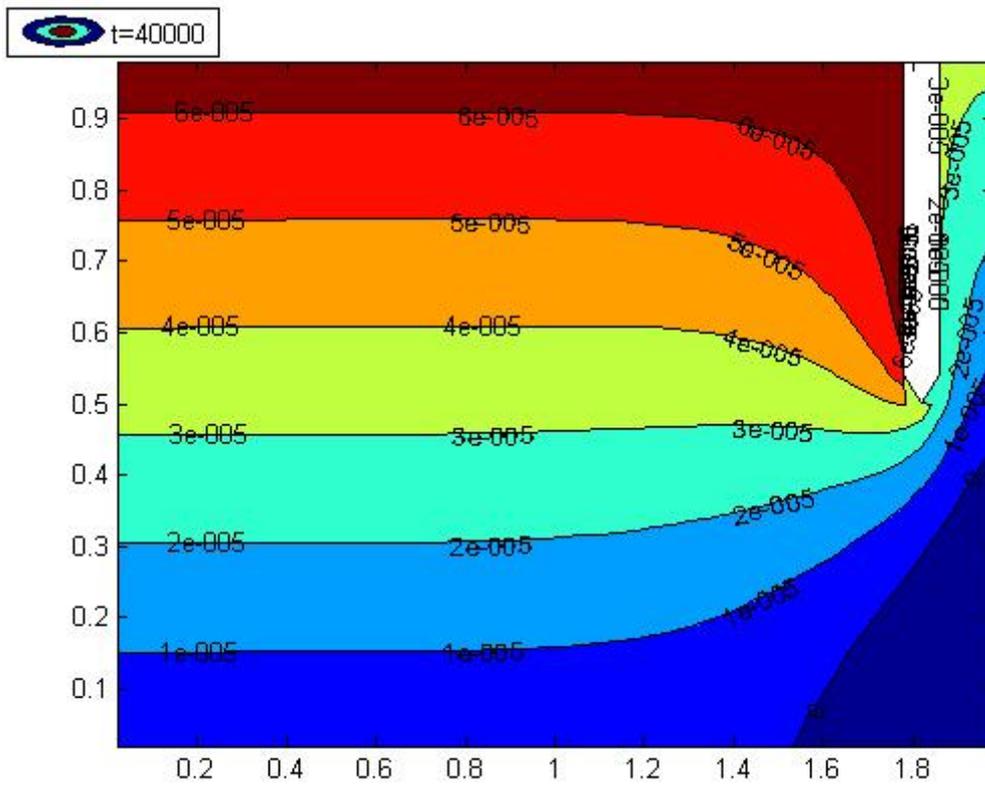


Figura 4.11. Función de corriente para el pozo 1: $x=1,80-1,84m$; $y=0,52-1,00 m$

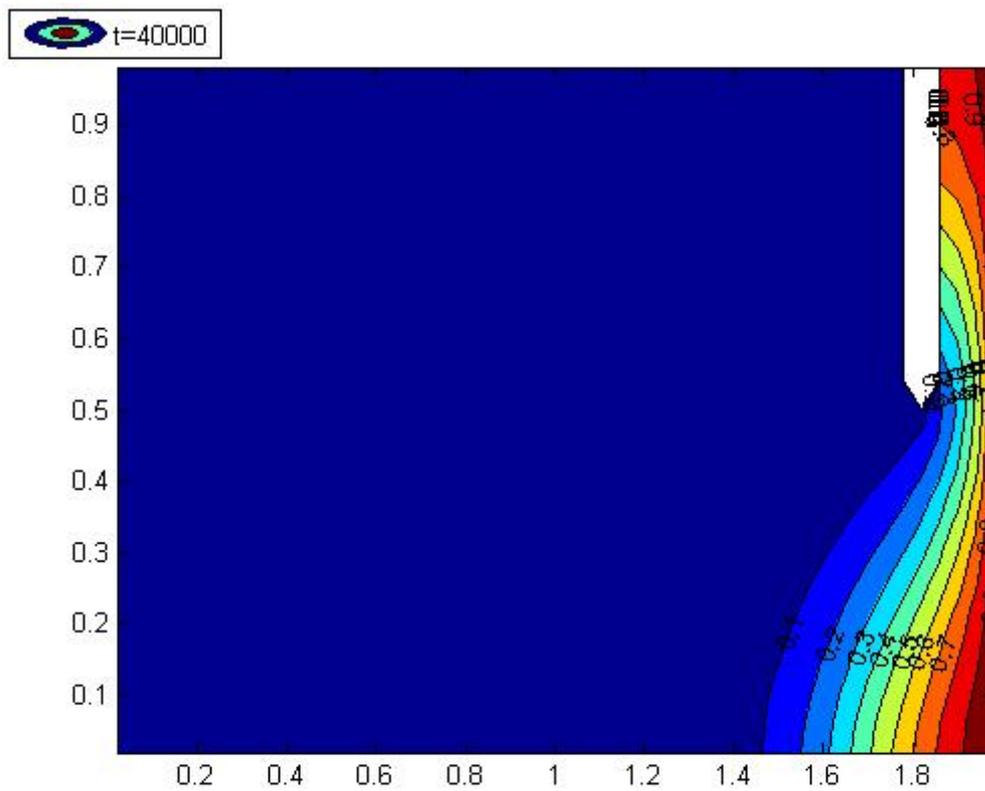


Figura 4.12. Isolínea para el pozo 1: $x=1,80-1,84m$; $y=0,52-1,00 m$

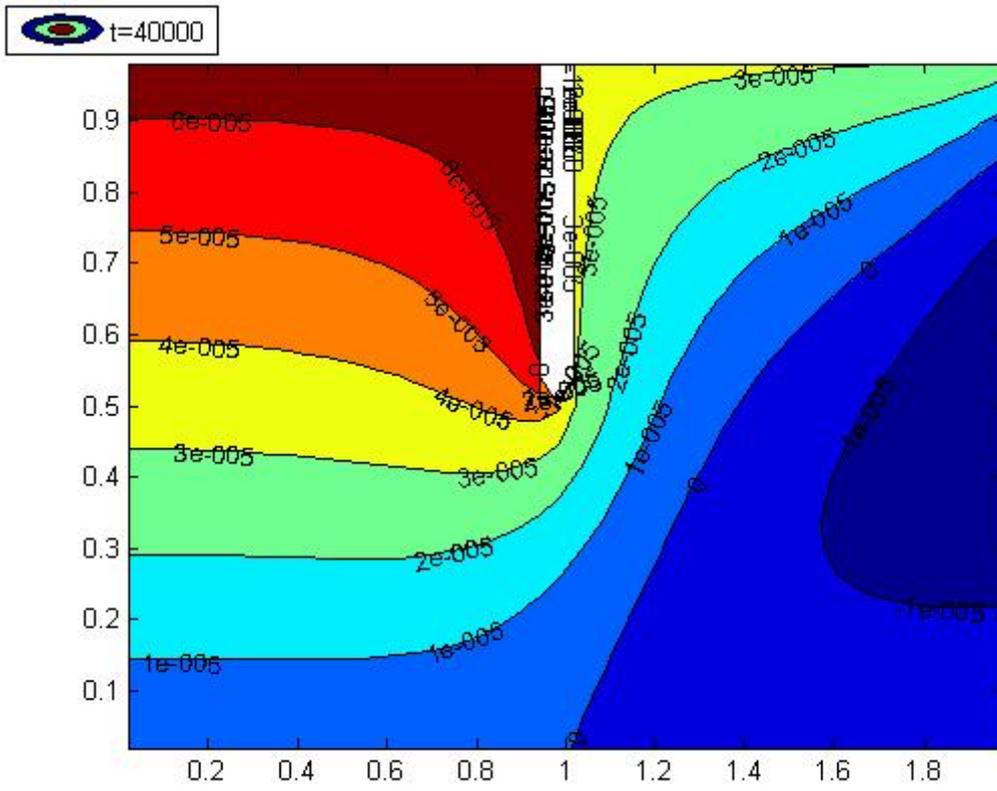


Figura 4.13. Función de corriente para el pozo 2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

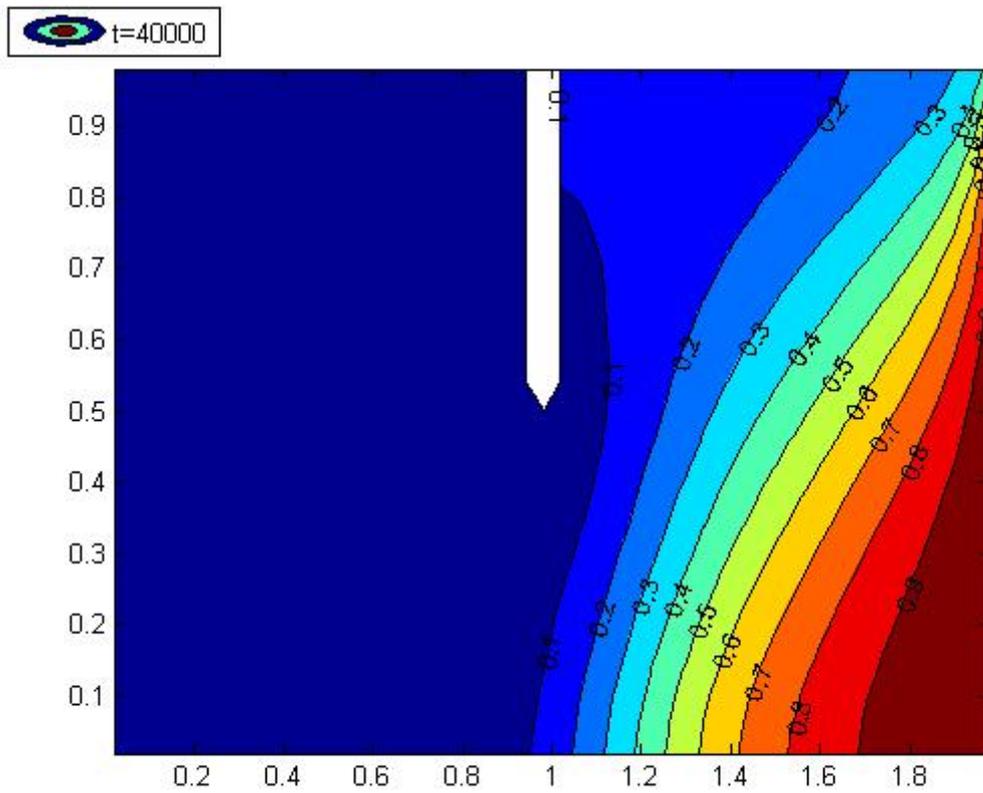


Figura 4.14. Isolínea para el pozo 2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

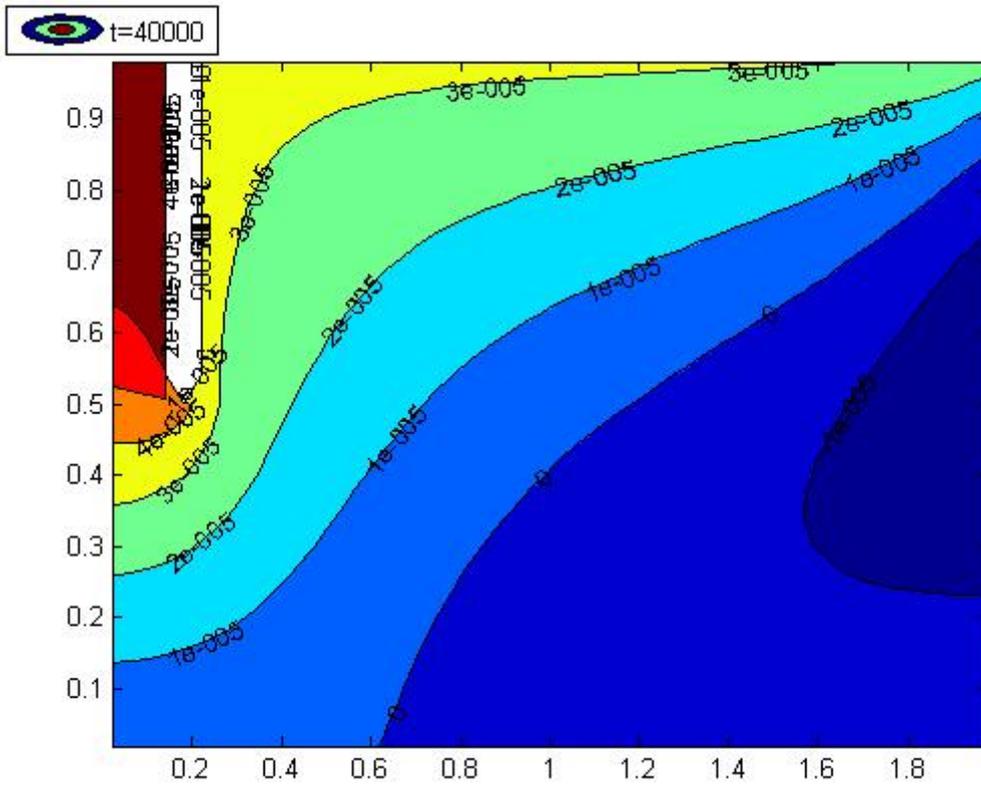


Figura 4.15. Función de corriente para la el pozo 3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

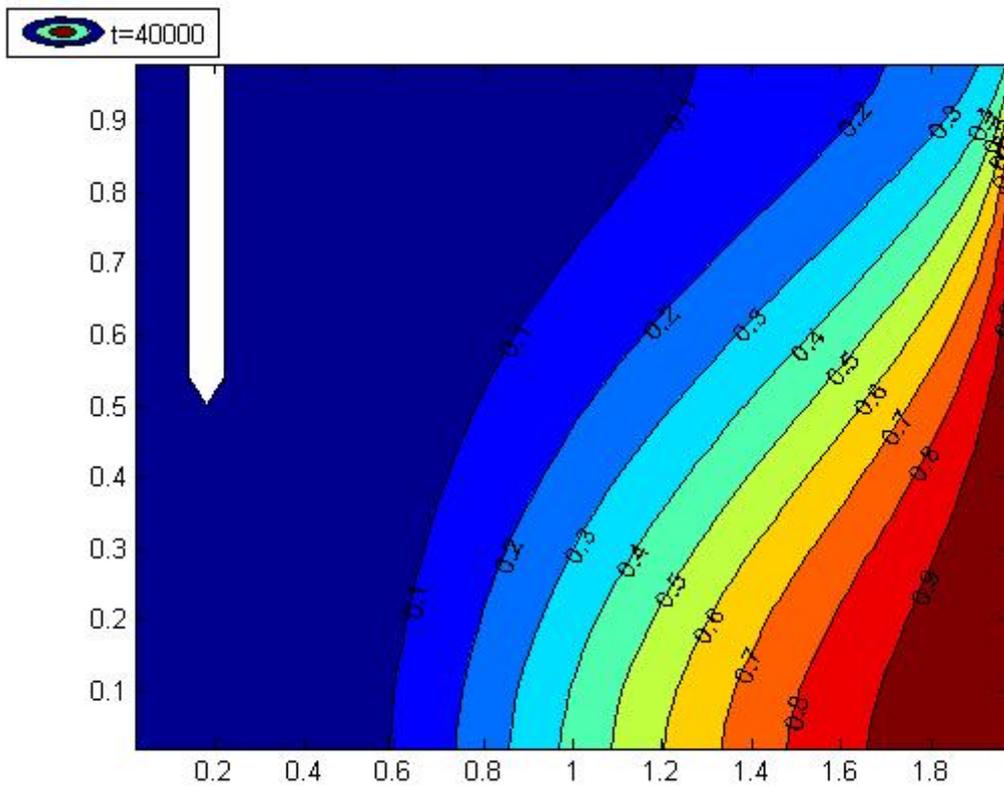


Figura 4.16. Isolínea para el pozo3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,52-1,00$

IV.5 POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA PEQUEÑOS “ EN PARALELO ”

La primera disposición de pozos “pequeños” tiene una profundidad de 0.04 m y sus ubicaciones son:

1: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

Los resultados se muestran en las Figuras 4.17 a 4.18. Esta disposición produce un efecto muy similar al del primer caso (**pozo pequeño de extracción 1**) ya que el caudal de extracción de los pozos en paralelo es similar al de un solo pozo. Lo único destacable es la leve variación que se produce hacia la izquierda en la cuña salina debido a que existen dos bocas de extracción y una de ellas se ubica bastante a la izquierda. Este aumento de la cuña salina es del orden de unos 25 cm con respecto al problema de Henry original. En general el acuífero queda igual o más contaminado con la inclusión de este tipo de pozos.

En relación con el campo de velocidades la única observación notable es que las líneas de flujo superiores son absorbidas por los pozos.

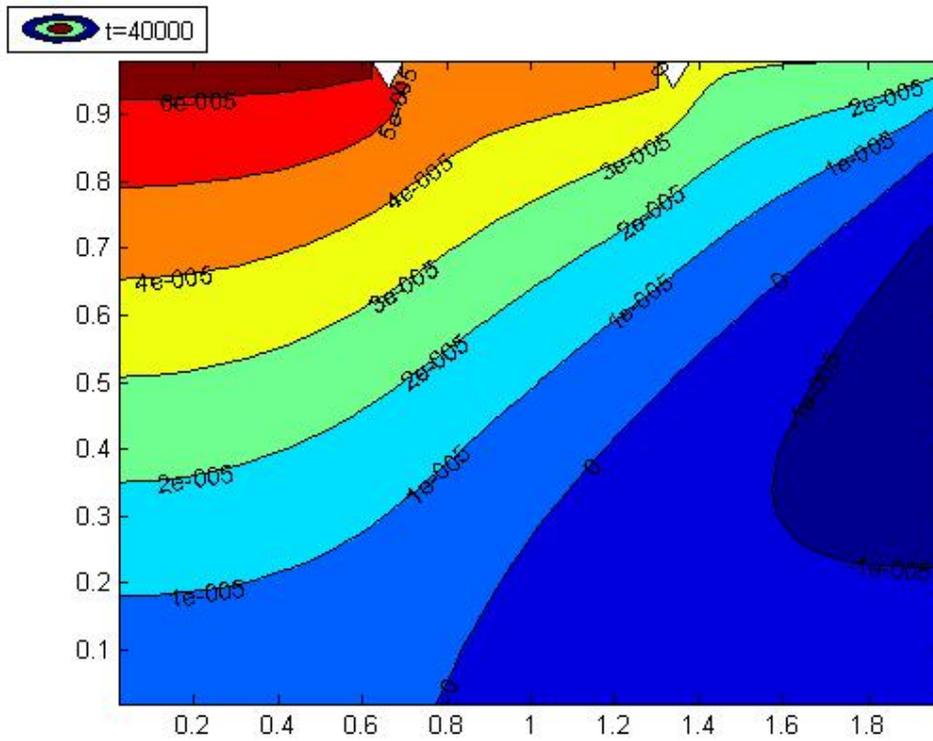


Figura 4.17. Función de corriente para los pozos 1: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$
 2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

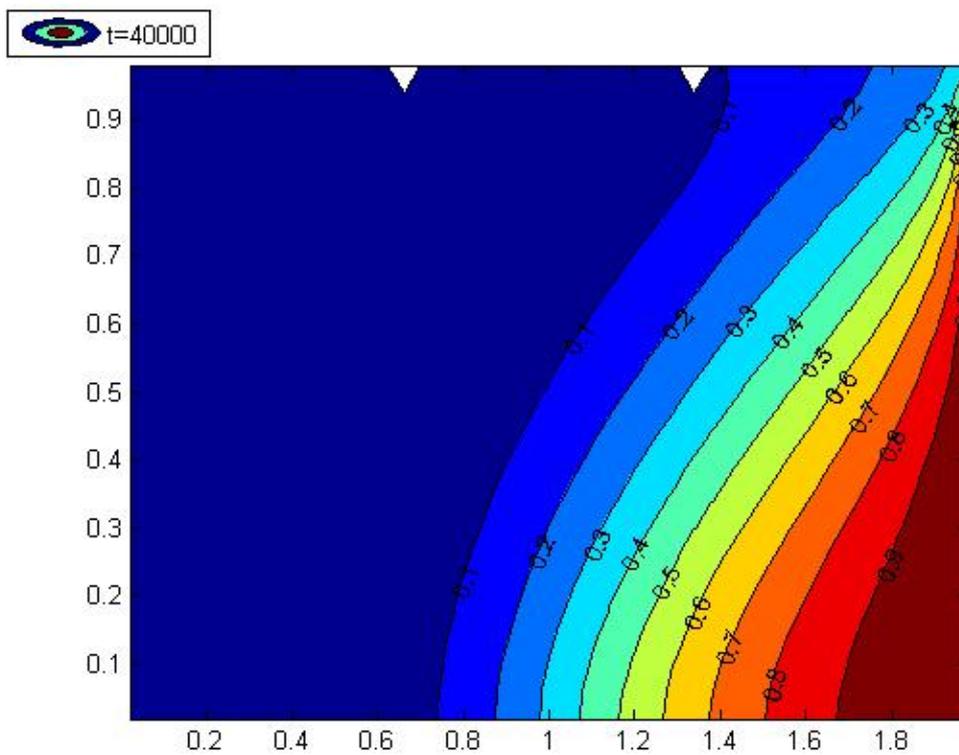


Figura 4.18. Isolínea para los pozos 1: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$
 2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

IV.6 POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA GRANDES “ EN PARALELO ”

La siguiente disposición de pozos “grandes” tiene una profundidad de 0,48 m y sus ubicaciones son:

1: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

Los resultados se muestran en las Figuras 4.19 a 4.20. Con esta disposición se produce un mayor aislamiento de la cuña salina provocado principalmente por el efecto dique del pozo situado a la derecha. La reducción de la cuña salina es del orden de unos 20 cm por lo que mejora la situación de contaminación en el pozo.

En relación con el campo de velocidades la única observación notable es que las líneas de flujo superiores son absorbidas por los pozos, cabe destacar la claridad visual con la que se aprecia la extracción de las los 2 primeras franjas de corriente por el pozo 2 y de la dos siguientes por el pozo 1.

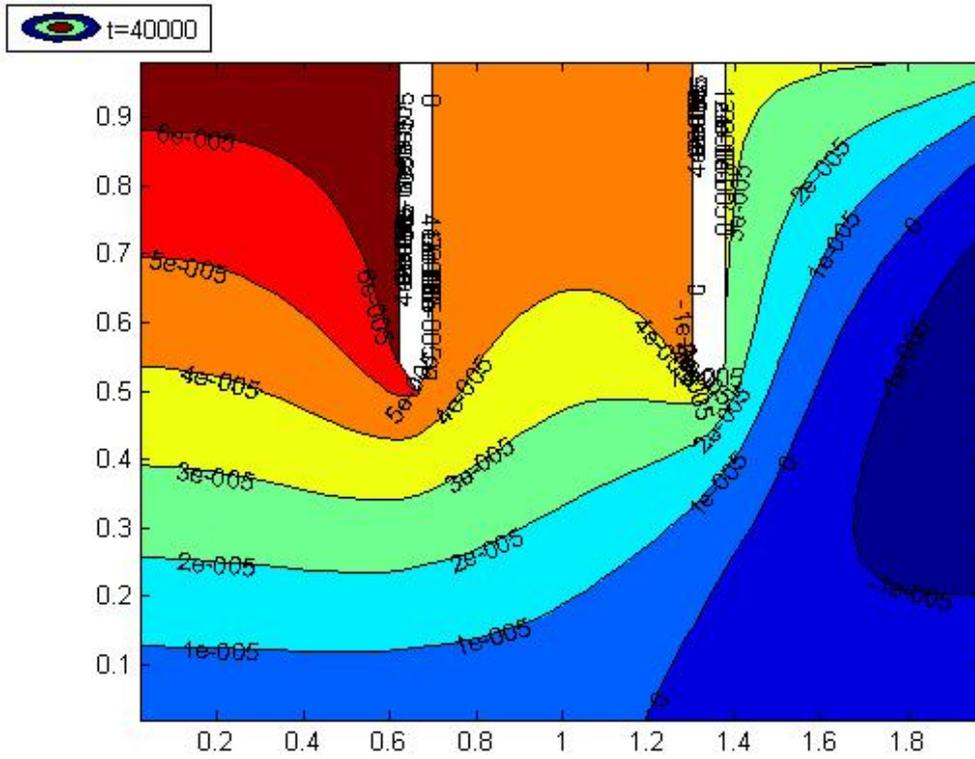


Figura 4.19. Función de corriente para los pozos 1: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$
 2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

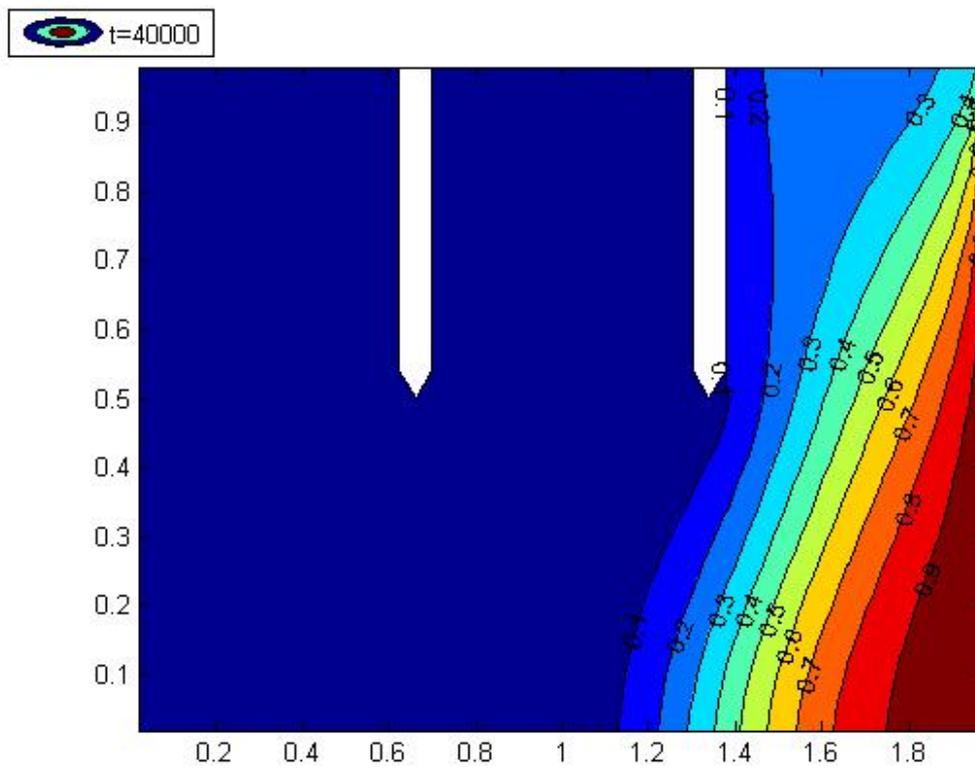


Figura 4.20. Isolínea para los pozos 1: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$
 2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

IV.7 POZOS DE INTRODUCCIÓN DE AGUA “PEQUEÑOS”

Esta disposición de pozos “pequeños” tiene una profundidad de 0.04 m y sus ubicaciones son:

1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0.96-1,00\text{ m}$

2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0.96-1,00\text{ m}$

3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0.96-1,00\text{ m}$

Los resultados se muestran en las Figuras 4.21 a 4.26. Para esta disposición se aprecia que conforme los pozos de introducción se van alejando del borde derecho, donde se encuentra la mayor concentración salina, la cuña salina va disminuyendo ya que esta es desplazada hacia la zona de mayor salinidad (la zona derecha del acuífero) concentrándola ahí. Esta disminución de la cuña salina es del orden de casi unos 40 cm, para el caso más extremo que sería la situación **3**, respecto del problema de Henry original. En general el acuífero queda bastante menos contaminado con la inclusión de este tipo de pozos.

Cabe destacar y como es lógico que la repercusión de la introducción de agua provoca unos efectos totalmente opuestos a los ocasionados por la extracción, siendo la introducción la decisión acertada en cuanto a materia en contaminación.

En relación con el campo de velocidades la única observación notable es la creación de nuevas líneas de flujo fruto del pozo de introducción.

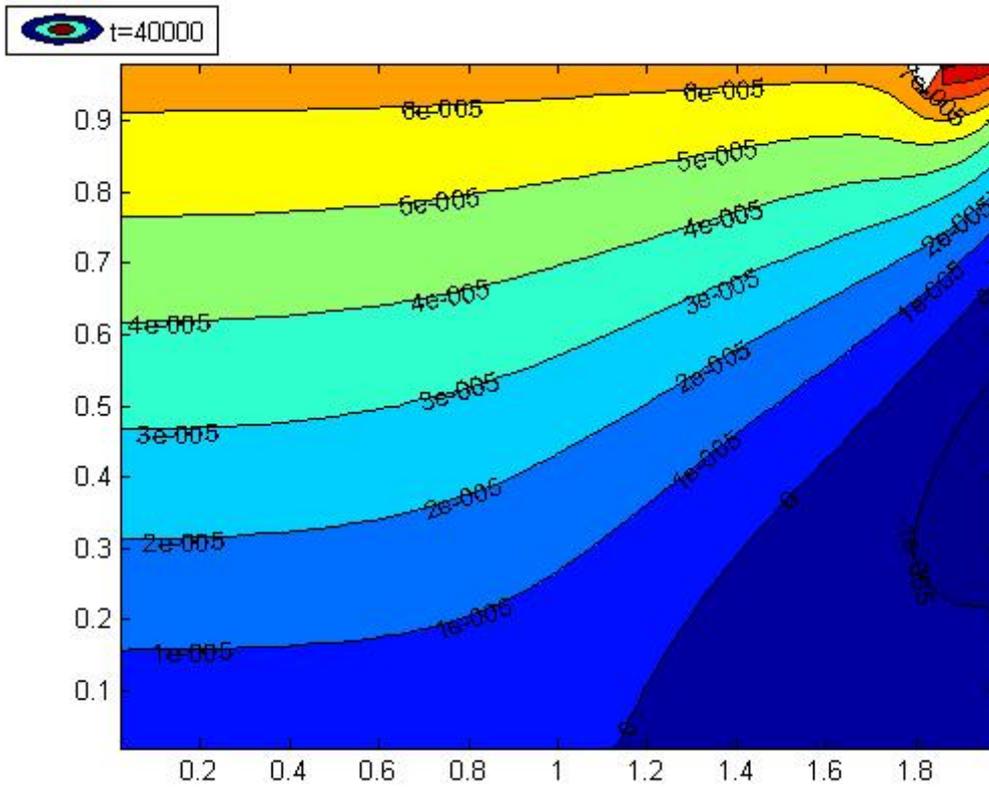


Figura 4.21. Función de corriente para el pozo 1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,96-1,00$

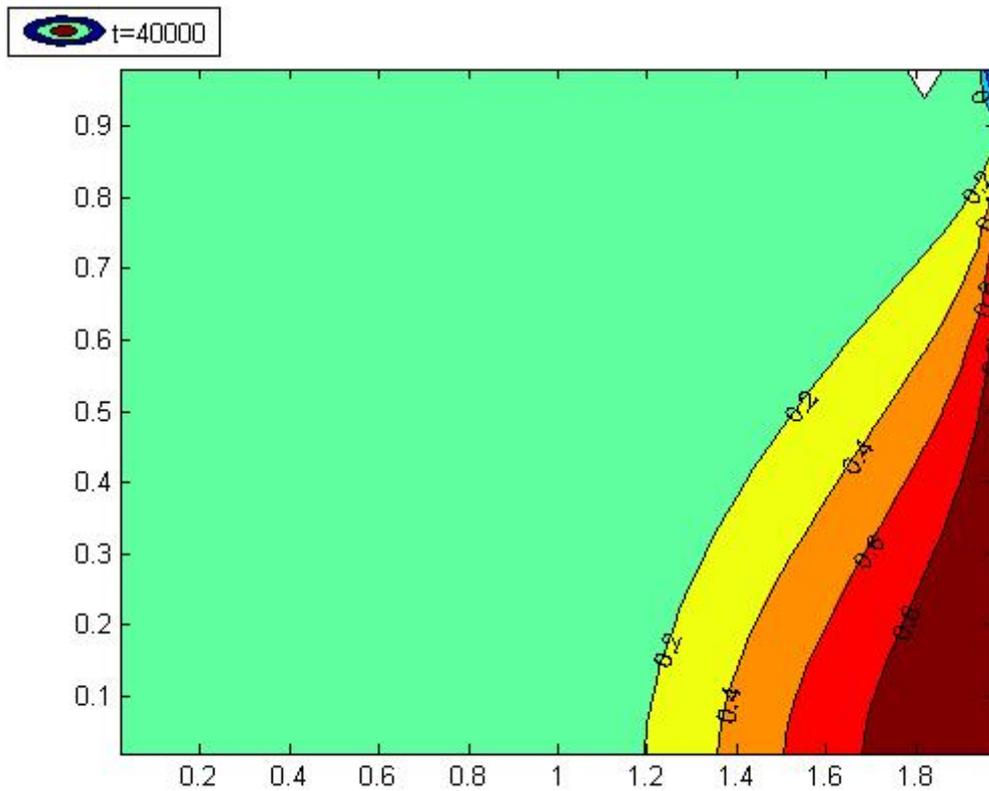


Figura 4.22. Isolíneas para el pozo 1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

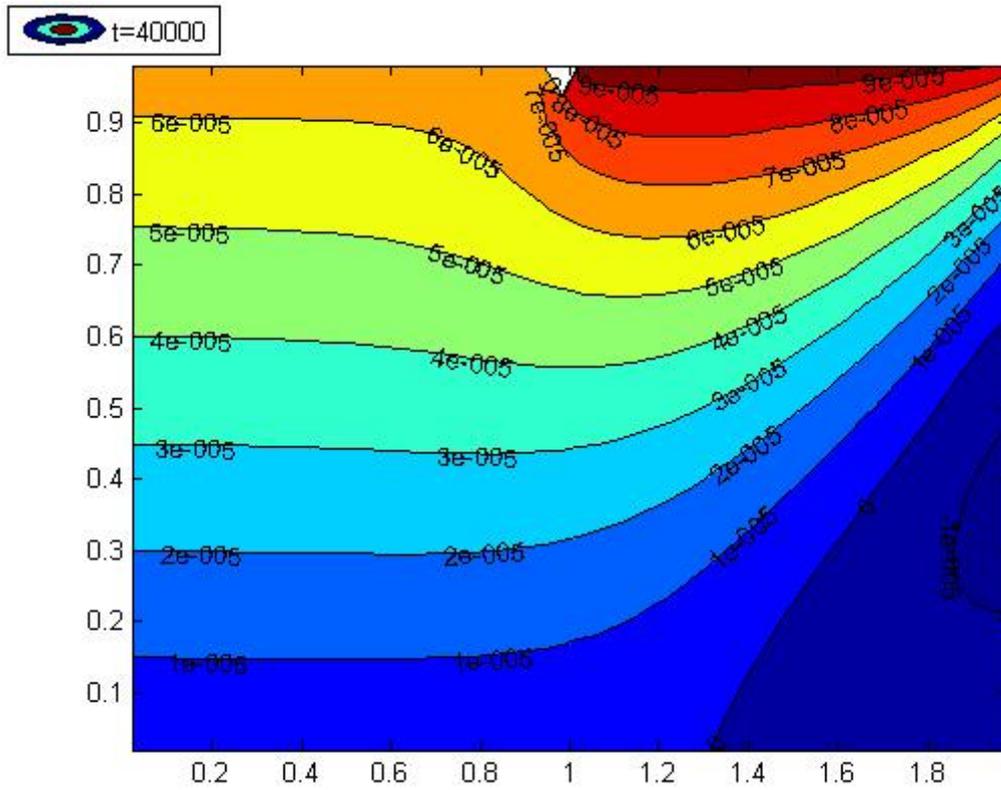


Figura 4.23. Función de corriente para el pozo 2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

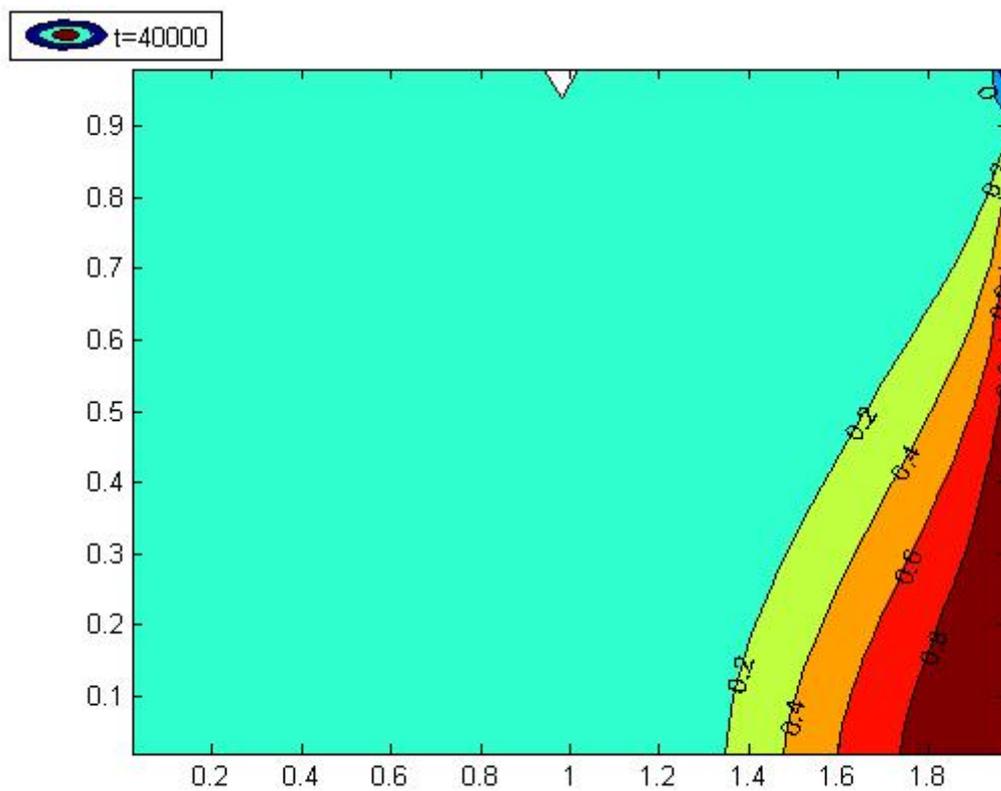


Figura 4.24. Isolíneas para la el pozo 2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

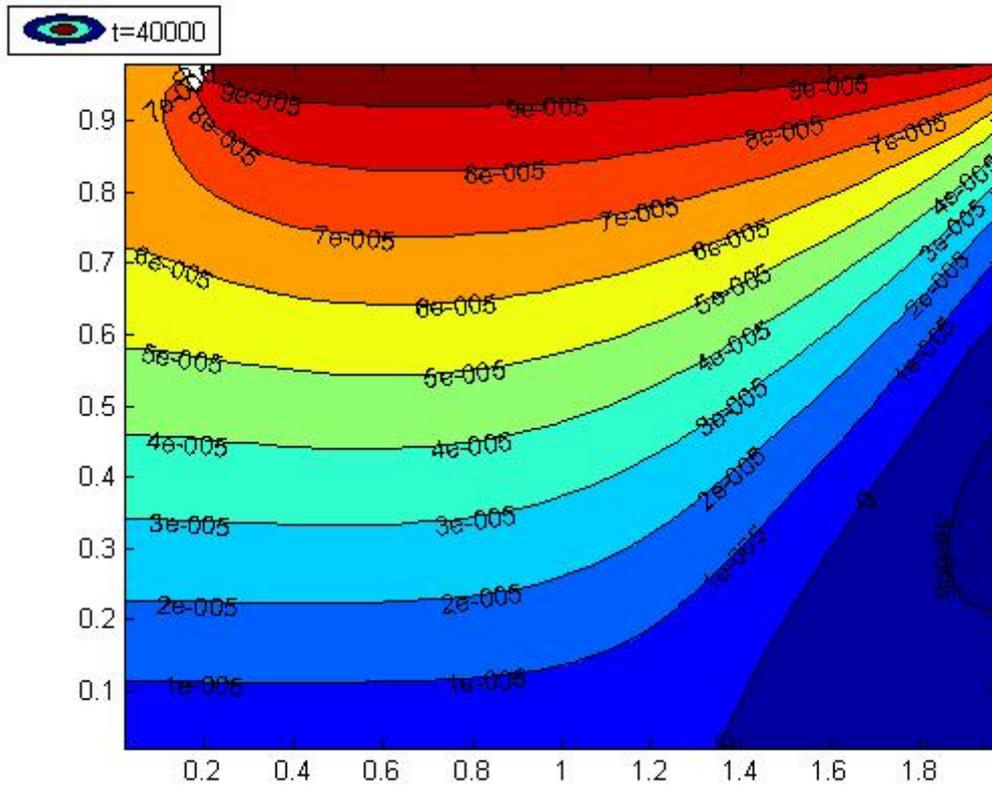


Figura 4.25. Función de corriente para el pozo 3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

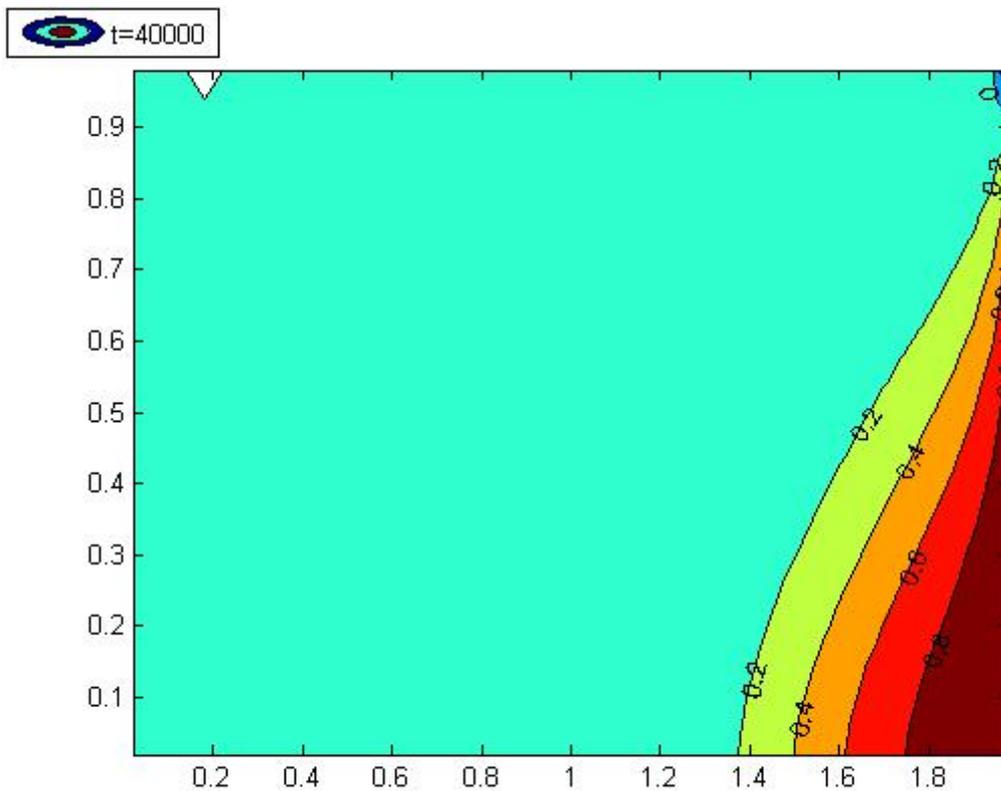


Figura 4.26. Isolíneas para el pozo 3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

IV.8 POZOS DE INTRODUCCIÓN DE AGUA “GRANDES”

La siguiente disposición de pozos “grandes” tiene una profundidad de 0.48m y sus ubicaciones son:

1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

Los resultados se muestran en las Figuras 4.27 a 4.32. A diferencia del caso anterior la cuña salina va aumentando cuando más alejados del borde derecho situamos los pozos, esto se debe gracias a que al tratarse de pozos profundos estos a su vez actúan como diques con lo que se produce un mayor aislamiento de la concentración salina y por lo tanto una menor contaminación del acuífero, sobre todo para el caso **1** en el que la reducción de la isolínea 0,1 es del orden de 0,6m por lo que con lo visto hasta el momento sería la medida mas eficaz en cuanto a la reducción de la cuña salina y contaminación del acuífero.

En relación con el campo de velocidades caben los mismos comentarios mencionados en la tanda anterior, añadiendo que la acción del pozo en forma de diques se aprecia a la perfección.

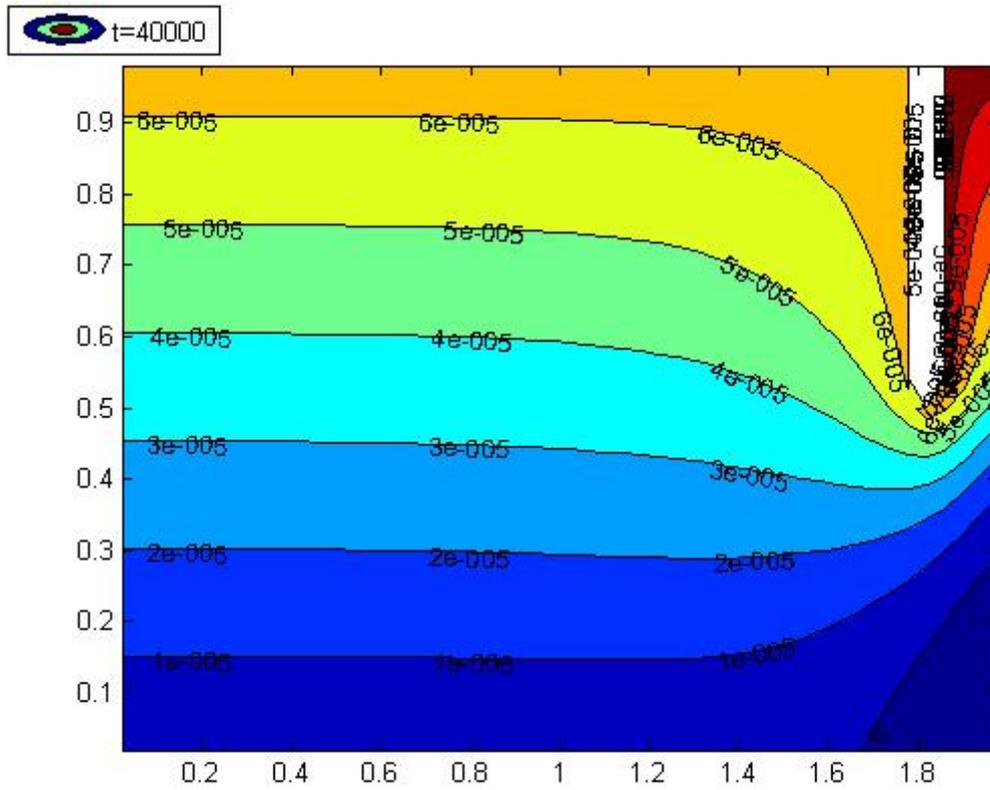


Figura 4.27. Función de corriente para el pozo 1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,52-1,00$ m

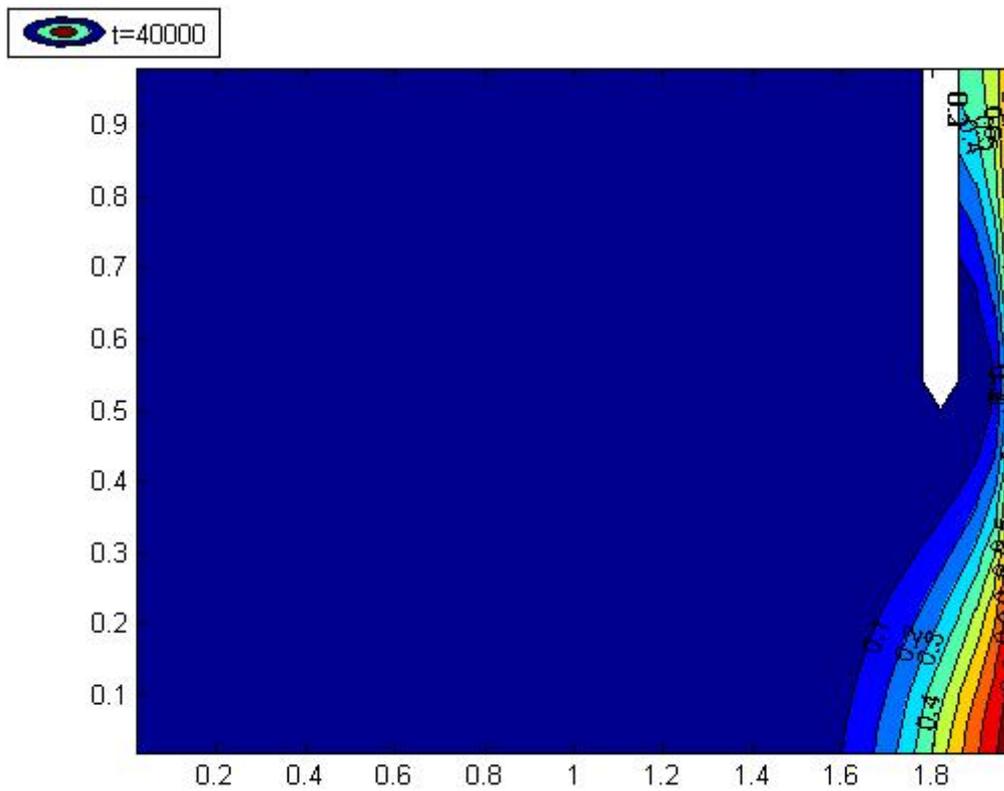


Figura 4.28. Isolínea para el pozo 1: $x=1,80-1,84\text{m}$; $y=0,52-1,00$ m

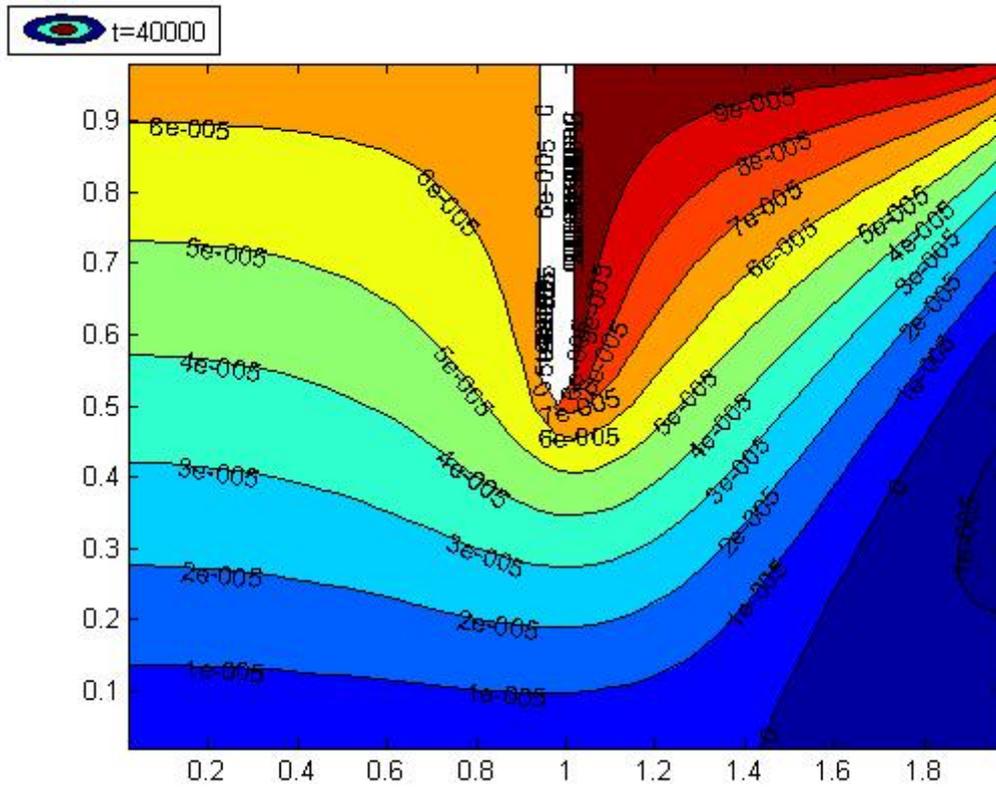


Figura 4.29. Función de corriente para el pozo 2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

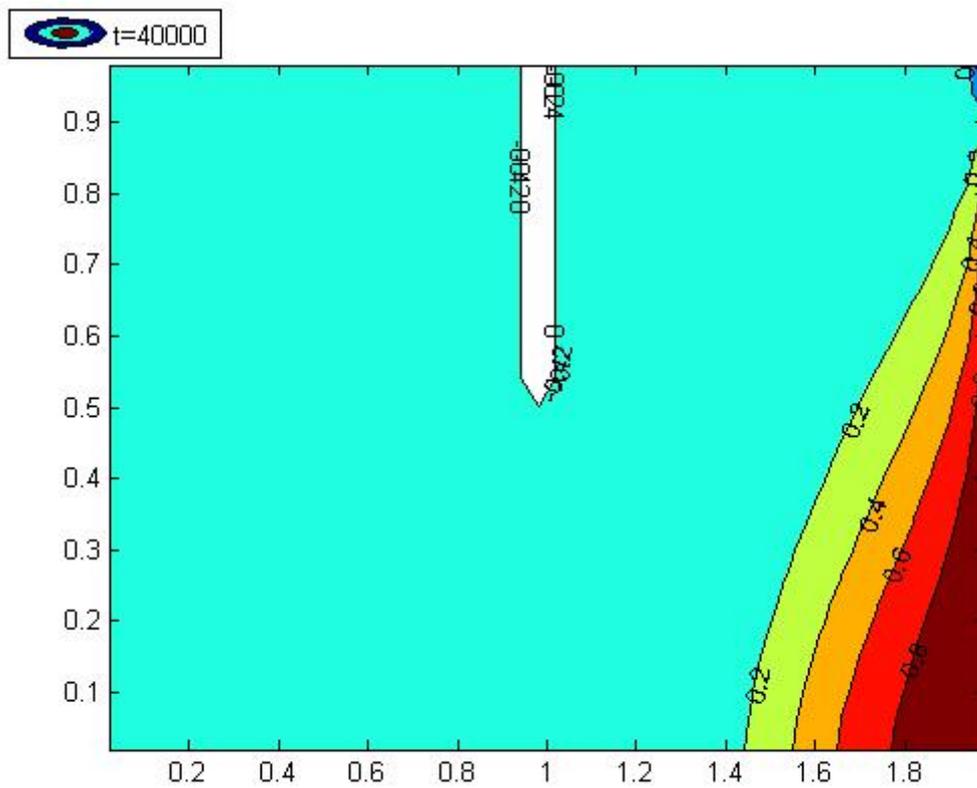


Figura 4.30. Isolínea para el pozo 2: $x=0,96-1,00\text{m}$; $y=0,52-1,00\text{ m}$

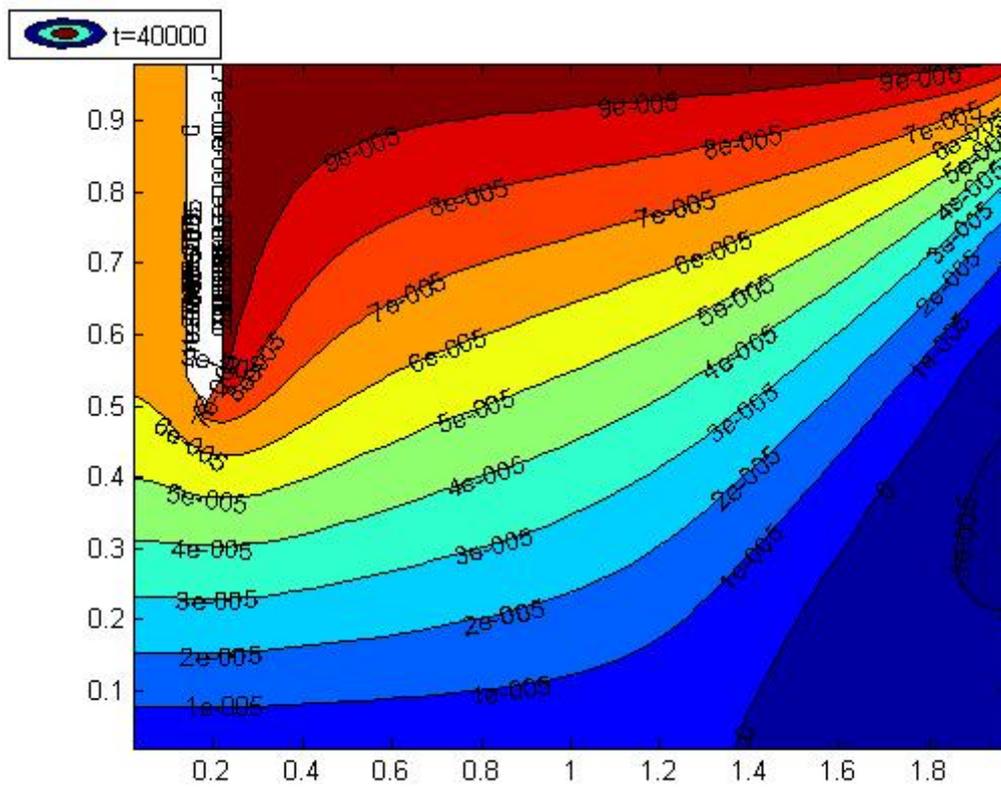


Figura 4.31. Función de corriente para la el pozo 3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,52-1,00$ m

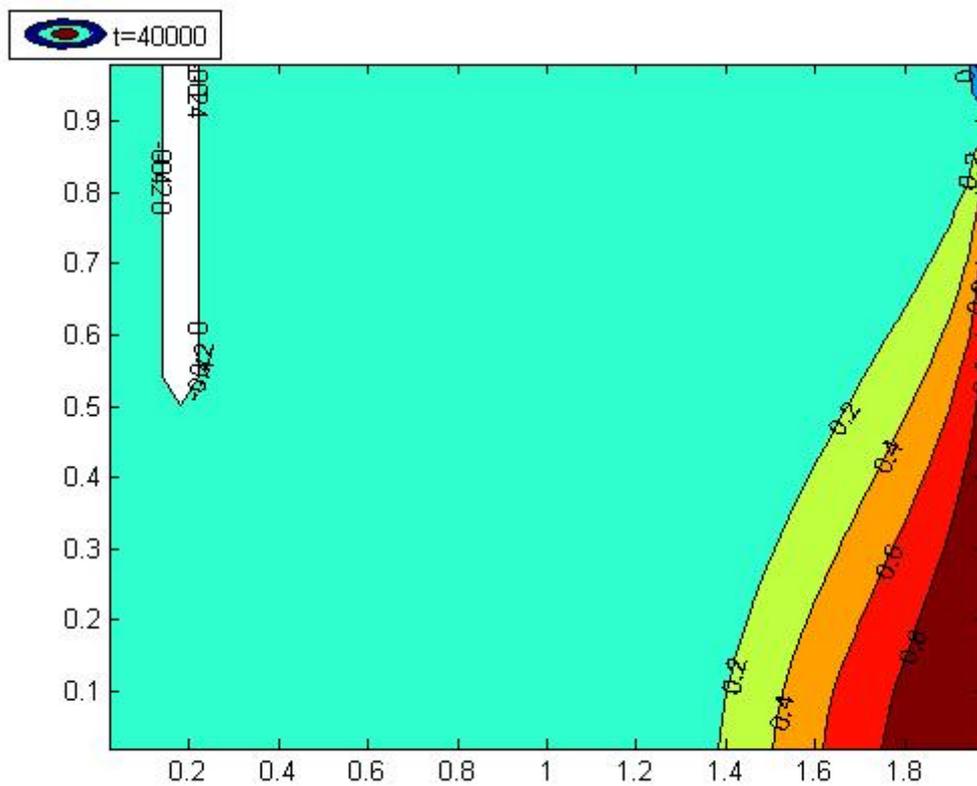


Figura 4.32. Isolínea para el pozo 3: $x=0,16-0,20\text{m}$; $y=0,52-1,00$

IV.9 POZOS DE INTRODUCCIÓN DE AGUA PEQUEÑOS “ EN PARALELO ”

La primera disposición de pozos “pequeños” tiene una profundidad de 0.04 m y sus ubicaciones son:

1: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

Los resultados se muestran en las Figuras 4.33 A 4.34. Esta disposición produce un efecto muy similar al del caso (**pozo pequeño de extracción 2 y 3**) ya que el caudal de extracción de los pozos en paralelo es similar al de un solo pozo y la situación de estos también se acerca a la colocación de este caso. La disminución de la cuña salina para este caso es del orden de unos 25 cm con respecto al problema de Henry original. En general el acuífero menos contaminado aunque no es la mejor de las soluciones al problema.

En relación con el campo de velocidades la única observación notable es la creación de nuevas líneas de flujo por parte de ambos pozos de introducción.

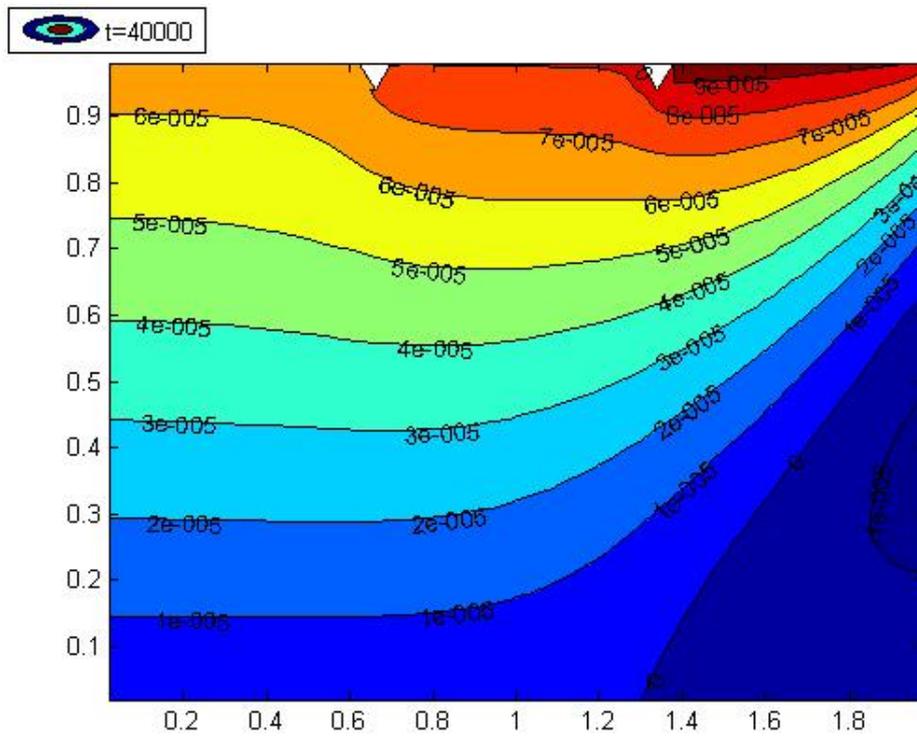


Figura 4.33. Función de corriente para los pozos **1**: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$
2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

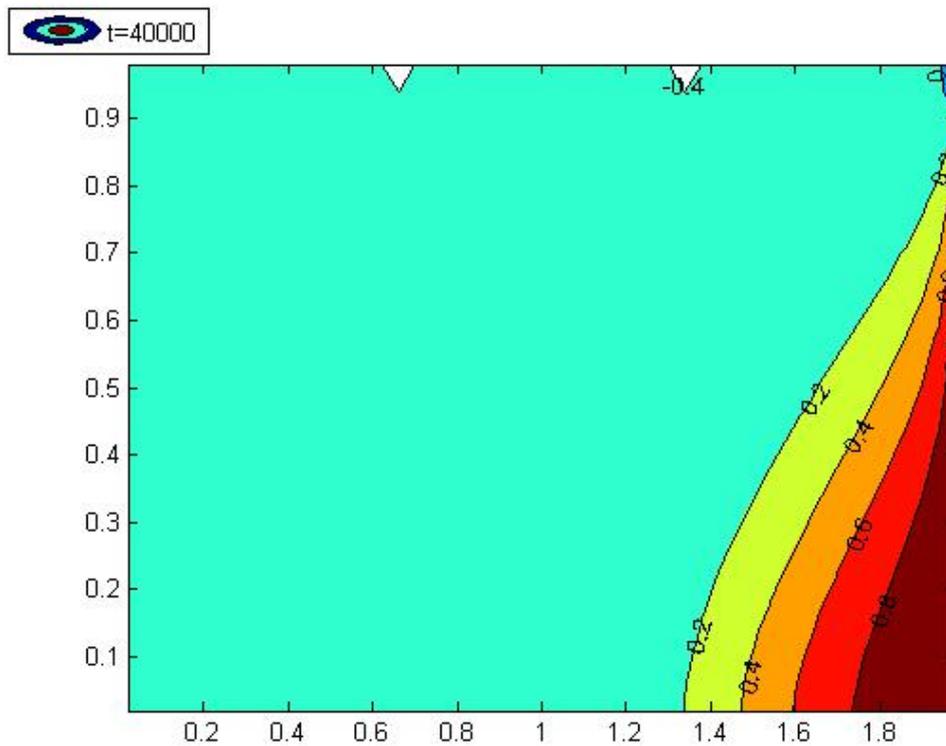


Figura 4.34. Isolínea para los pozos **1**: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$
2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,96-1,00\text{ m}$

IV.10 POZOS DE INTRODUCCIÓN DE AGUA GRANDES “ EN PARALELO ”

La siguiente disposición de pozos “grandes” tiene una profundidad de 0,48 m y sus ubicaciones son:

1: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0.52-1,00\text{ m}$

2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0.52-1,00\text{ m}$

Los resultados se muestran en las Figuras 4.35 a 4.36. Con esta disposición se produce un mayor aislamiento de la cuña salina provocado principalmente por el efecto dique del pozo que se sitúa a la derecha. La reducción de la cuña salina es del orden de unos 55 cm por lo que mejora la situación de contaminación en el pozo considerablemente.

En relación con el campo de velocidades la única observación notable es la creación de nuevas líneas de flujo, cabe destacar la claridad visual con la que se aprecia este fenómeno.

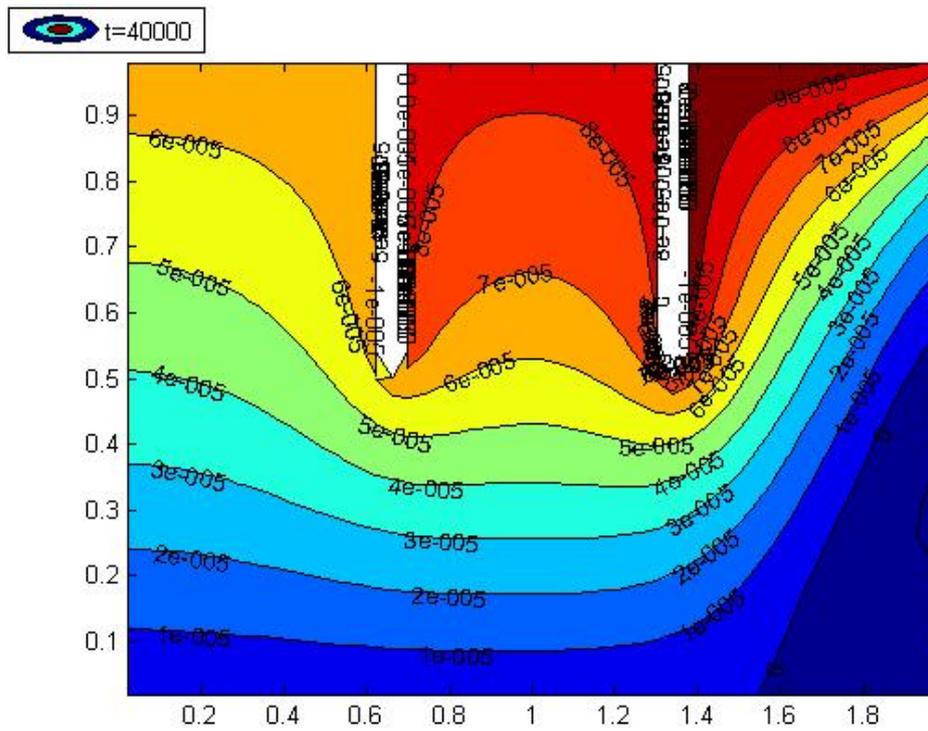


Figura 4.35. Función de corriente para los pozos **1**: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,52-1,00$ m
2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,52-1,00$ m

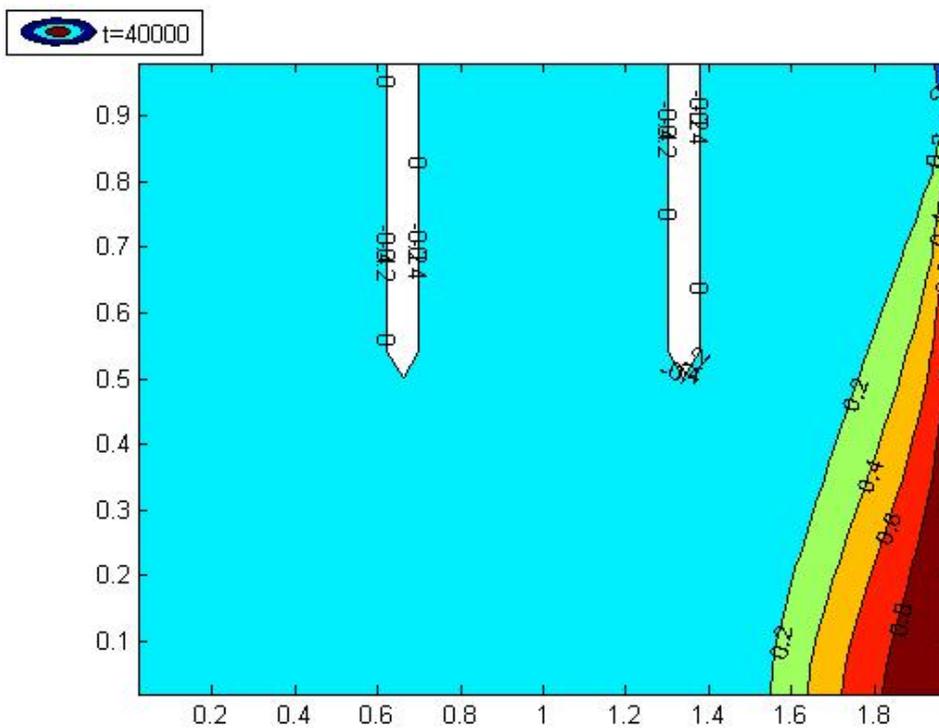


Figura 4.36. Isolénea para los pozos **1**: $x=0,64-0,68\text{m}$; $y=0,52-1,00$ m
2: $x=1,32-1,36\text{m}$; $y=0,52-1,00$ m

IV.11 DUPLICADO DE CAUDAL EN AUSENCIA DE POZOS

A modo de curiosidad para el siguiente caso no existe utilización alguna de pozos sino que hemos duplicado el caudal de entrada para estudiar sus efectos.

Los resultados se muestran en las Figuras 4.37 y 4.38. Se aprecia que con el solo hecho de incrementar el caudal entrante de agua dulce, este provoca una disminución de la cuña salina de aproximadamente unos 50 cm lo cual es bastante considerable y además sin la utilización de ningún tipo de pozo.

Cabe destacar que en cuanto a las líneas de corriente se puede apreciar levemente como las líneas de flujo son algo mas tendidas ya que la intensidad es mayor y no se ven tan influenciadas por la corriente entrante con de salina.

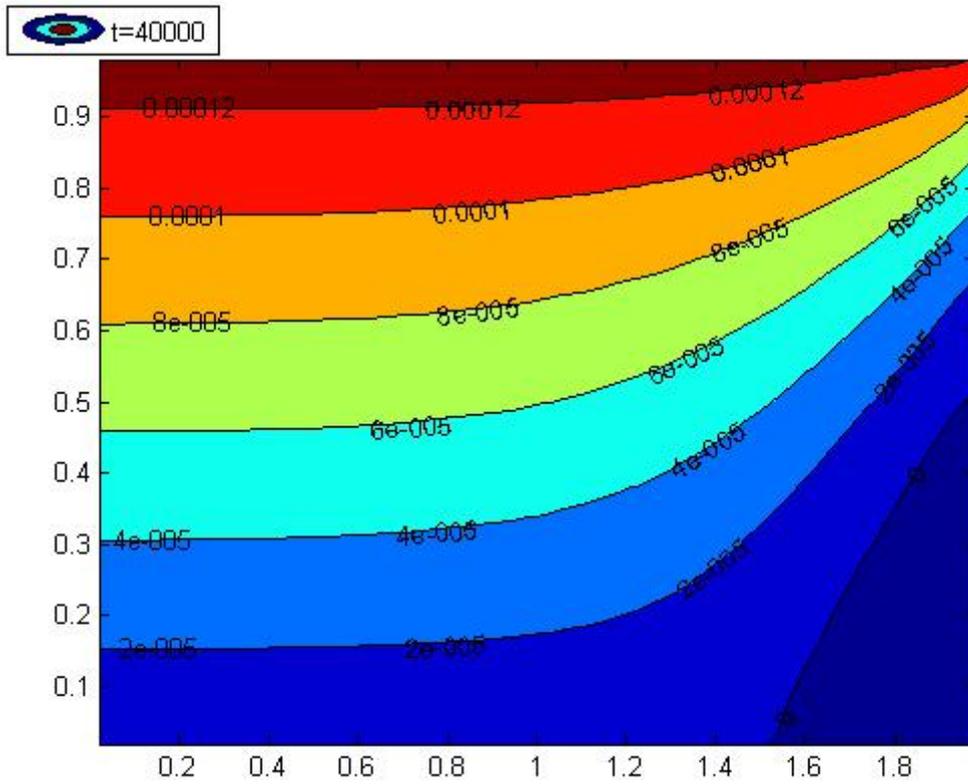


Figura 4.37. Función de corriente para caudal entrante X2.

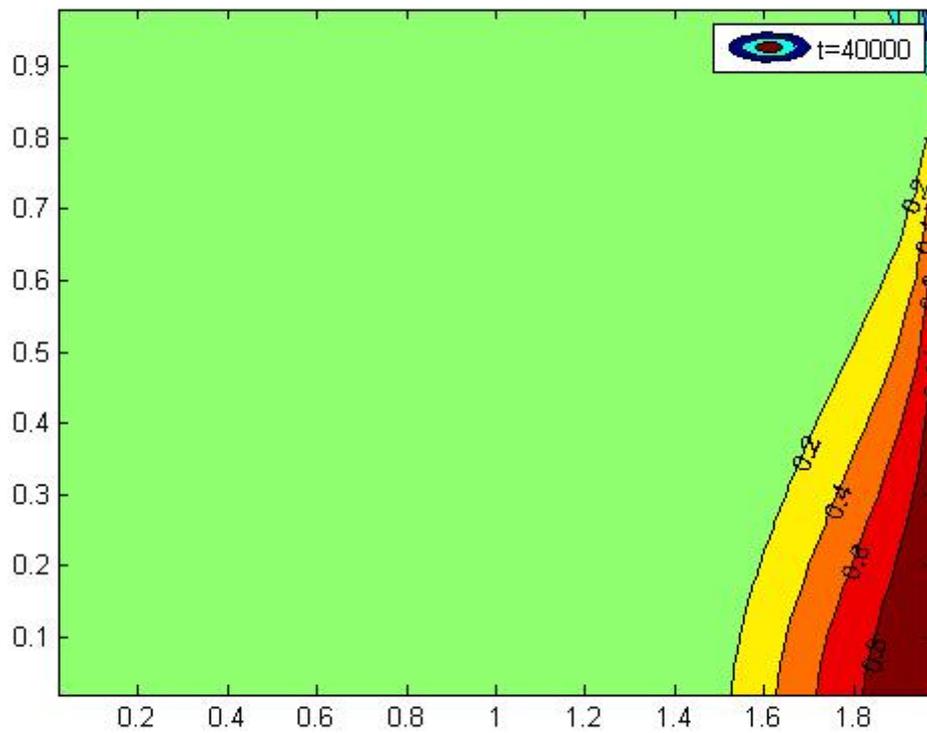


Figura 4.38. Isolínea. Para caudal entrante X2

CAPÍTULO V

Conclusiones

De la observación de los distintos casos planteados se pueden obtener una serie de conclusiones generales que se exponen a continuación:

- No para todos los casos la colocación de pozos provocó el retroceso del frente de contaminación respecto al estado del sistema inicial (problema de Henry).
- Para los casos de pozos de extracción estudiados, el frente de contaminación se mantiene o incluso aumenta para la mayoría de los casos sobre todo cuando los pozos están situados más a la derecha. A excepción de los casos de pozos grandes que situados a la derecha del acuífero si disminuyen el frente de contaminación debido al efecto dique que provocan.
- Para los casos de pozos de introducción estudiados, el frente de contaminación disminuye para todos los casos, produciéndose una mayor disminución del frente a medida que los pozos se sitúan a la izquierda para los casos en que los pozos son pequeños, y al contrario para el caso de pozos grandes (es decir que a medida que situamos los pozos hacia la derecha disminuye el frente de contaminación debido al efecto dique).
- Tanto para pozos de extracción como para pozos de introducción, el aumento en la longitud de los pozos provoca el retroceso del frente de contaminación, quedando éste prácticamente confinado al espacio comprendido entre el pozo y el borde derecho del acuífero.

- En general la utilización de pozos de introducción favorece la disminución del frente de contaminación en mayor medida que la de los pozos de extracción de agua.
- Los pozos de mayor longitud provocan que la recirculación de agua salada en el acuífero quede limitada al espacio comprendido entre el pozo y el borde derecho salado del acuífero. Esta recirculación disminuye con el acercamiento del pozo al borde derecho del acuífero.
- La utilización de pozos en paralelo no resulta viable ya que no produce mejores resultados que la utilización de pozos individuales y su complejidad es mayor.
- El aumento del caudal de entrada de agua dulce en el acuífero por su borde izquierdo provoca un leve retroceso del frente de contaminación hacia el borde derecho del acuífero, disminuyendo la superficie afectada por la contaminación.

REFERENCIAS

- Alcaraz, D., Alhama, F. y González-Fernández C. F. (2003). A network model to simulate transient non-linear thermal processes in metals and alloys with allotropic transformations. *Trans. Tech. Publications*. 432, 3927-3932
- Alhama, F., López-Sánchez, J. F., y González-Fernández, C. F. (1997). Heat conduction through a multilayered wall with variable boundary conditions. *Energy* 22, 797-803
- Alhama, F. y González-Fernández, C.F., Transient thermal behaviour of phase change processes in solid foods with variable thermal properties. *J. Food Engineering*, 54(4), 331-336, 2002
- Alhama, I., Soto, A., Marín, J. y Alhaqma F. (2010). FATSIM-A ©, “Flow and transport simulator”, en fase de registro de propiedad intelectual (2010). Murcia
- Alhama, I, Soto, A. Rodríguez Estrella, T. y Alhama, F. Characterization of sceneries of salt intrusion in coastal aquifers. SWIN, Madeira, Portugal (2010a)
- Alhama, I, Soto, A. y Alhama, F. Dimensionless parameters of the Henry problem when diffusive effects are negligible. SWIN, Madeira, Portugal (2010b)
- Alhama, I, Soto, A. y Alhama, F. Control parameters of the anisotropy extended Elder problem by discriminated dimensional analysis. IAHR Int. Ground Water Symposium. Valencia, España (2010a)
- Alhama, I, Soto, A. y Alhama, F. Simulation of geometrical flow in anisotropic domain by network method. The Yusa problem. IAHR Int. Ground Water Symposium. Valencia, España (2010b)
- Bear, J., Cheng, A. H. D., Sorek, S., Ouazar, D. y Herrera, I. (1999). *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers- Concepts, Methods and Practices*. Kluwer Academic Publishers, London
- Cooper, H. H. (1959). A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. *J. Geophys. Res.* 64, No.461-467
- Croucher, A. E., O’Sullivan, M. J., 1995. The Henry problem for saltwater intrusion, *Water Resour. Res.* 31 (7), 1809–1814.
- Evans, D.G. y Raffensperger, J.P. (1992). On the stream function for variable-density groundwater flow. *Water Res. Res.* 28 (8) 2141-2145
- Frind, E. O., (1982). Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater. *Adv. Water Resour.* 5, 73-88
- Frind, E. O. y Matanga, G. B. (1985). The dual formulation of flow for contaminant transport modelling. 1. Review of theory and accuracy aspects. *Water Res. Res.* 21 (2) 159-169

- Galeati, G., Gambolati, G. y Neuman, S. P. (1992). Coupled and partially coupled Eulerian-Lagrangian model of freshwater-seawater mixing, *Water Res. Res.* 28 (1), 149– 165
- González-Fernández, C.F. (2002). Applications of the network simulation method to transport processes, in *Network Simulation Method*. Ed. J. Horno, Research Signpost, Trivandrum, India
- González-Fernández, C. F., García Hernández, M. T. y Horno, J. (1995). Computer simulation of a square scheme with reversible and irreversible charge transfer by the network method. *J. Electroanal. Chem.* 395, 39-44
- Gotovac, H., Andricevic, R., Gotovac, B., Kozulic, V. y Vranjes, M. (2003). An improving collocation method for solving the Henry problem, *Journal of Contaminant Hydrology* 64, 129-149
- Henry, H. R. (1960). *Salt intrusion into coastal aquifer*, Intern. Ass. of Scient. Hydrology Publ., No. 52, 478-487
- Henry, H. R., 1964. Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers, in *Sea Water in Coastal Aquifers*, U.S. Geol. Surv. Supply Pap. 1613-C, 70– 84.
- Holzbecher, E. (1998). *Modelling Density-driven Flow in Porous Media*. Springer, Berlín
- Huyakorn, P. S., Andersen, P. F., Mercer, J. W. y White Jr., H. O. (1987). Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three dimensional finite element model. *Water Res. Res.* 23, 293–312
- Kolditz, O., Ratke, R., Diersch, H-J. y Zielke W. (1998). Coupled groundwater flow and transport: 1. Verification of variable density flow and transport models, *Adv. Water Resour.* 21 (1), 27–46
- Lee, C. H., y Cheng, R. T. (1974). On seawater encroachment in coastal aquifers, *Water Res. Res.* 10(5), 1039-1043
- Moreno Nicolás, J. A., Gómez de León Hyjes y F. Alhama. Solution of temperature fields in hydrodynamics bearing by the numerical network model. *Tribology International* 40, 139-145 (2007)
- Nagel, L. W. (1975). *SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits*. Memo. N°. UCB/ERL M520. Electronic Research Laboratory, Univ. de California, Berkeley, CA 94720
- Nagel, L.W. (1977). *SPICE (Simulation program with integrated circuit emphasis)*. Berkeley, CA; University of California, Electronics Res. Lab., ERL-M382
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere, New York
- Pinder, G. F. y Cooper Jr., H. H. (1970). A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front. *Water Res. Res.* 6 (3), 875–882.
- PSPICE 6.0, 1994. Microsim Corporation Fairbanks, Irvine, California.

- Segol, G. (1994). *Classic Groundwater Simulations Proving and Improving Numerical Models*. Prentice-Hall, Old Tappan, N. J. 531 p
- Segol, G., Pinder, G. F. y Gray, W. G. (1975). A Galerkin-finite element technique for calculating the transient position of the saltwater front, *Water Res. Res.* 11 (2), 343– 347
- Senger, R.K. y Fogg, G. E. (1990). Stream functions and equivalent freshwater heads for modelling regional flow of variable-density groundwater, I , Review of theory and verification, *Water Res. Res.* 26 (9), 2089-2096
- Simpson, M. J., Clement, T. P., 2003. Theoretical analysis of the worthiness of the Henry and Elder problems as benchmarks of density-dependent groundwater flow models, *Adv. Water Resour.* 26, 17– 31.
- Simpson, M.J., Clement, T.P., 2004. Improving the worthiness of the Henry problem as a benchmark for density-dependent groundwater flow models, *Water Resour. Res.* 40 W01504.
- Soto, A. Simulación numérica de procesos de intrusión salina en acuíferos mediante el Método de Simulación por Redes. Tesis Doctoral. UPCT 2007, Cartagena
- Soto, A., Alhama, F. y González-Fernández, C.F. (2006a). Transient simulation of a real 2-D aquifer by network method. *First Int. Joint Salt Water Intrusion Conference, 1st SWIM-SWICA*. Proceedings p.22. Cagliari, Italia
- Soto Meca, A., Alhama, F y González Fernández, C. F. (2006b). Numerical solution of salt-dome by network method. *IASME/WSEAS Int. Conference on Water Resources Hydraulics and Hydrology*, Chalkida, Greece
- Soto Meca, A., Alhama, F. y González Fernández, C. F. (2006c). A new 2-D numerical model to simulate density-driven flow and solute transport problem. *IASME/WSEAS Int. Conference on water resources Hydraulics and Hydrology*, Chalkida, Greece.
- Soto Meca, A., Alhama, F, Alhama, I. y González Fernández, C. F. (2006d). Patterns of stream function and solute concentration for a wide range of Rayleigh numbers applied to salt dome problem using network method. *IASME Transactions*, Issue 3, Vol. 1, March 2006, p. 252-259
- Soto Meca, A., Alhama, F. y González Fernández, C. F. (2006e). Numerical solution of the Salt lake problem by network method. *IASME/WSEAS Transactions on fluid mechanics*. 3, Vol.1 March 2007, pp. 244-251
- Soto Meca, A., Alhama, F. y González-Fernández, C. F. (2007a). An efficient model for solving density driven groundwater flow problems based on the network simulation method. *J. Hidrol* 339, 39-53 (2007a)
- Soto Meca, A., Alhama, I. y Alhama, F. (2007b). Numerical simulation of salt water intrusion with velocity dependent dispersion coefficient by network method. *TIAC'07, III Int. Symp. Om Tech. of Sea Water Intrusion into Coastal Aquifers*. Almeria

- Soto Meca, A., Alhama, F. y González-Fernández, C. F. (2007c). Density-driven flow and solute transport problems. A 2-D numerical model based on the network simulation method. *Computer Physics Communications* 177, 720-728 (2007b)
- Vladimirescu, A. (1994). *The spice book*. John Wiley & Sons, Inc., New York
- Voss, C. I. y Souza, W. R. (1987). Variably density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow fresh-water saltwater transition zone. *Water Res. Res.* 23 (10), 1851– 1866
- Zueco, J., Alhama, F. y González-Fernández, C. F. (2003). An inverse determination of unsteady heat fluxes using a Network Simulation Method. *J. Heat Transfer* 125, 1178-1183