

## NUMERICAL STUDY OF THE TEMPERATURE AND FLOW FIELDS IN WELLS NEAR THERMAL RESERVOIRS

Sepede, Gennaro; Gómez Lopera, Salvador Angel; Cánovas Vidal, Manuel  
Universidad Politécnica de Cartagena

This work presents a numerical study of the temperature and flow fields in wells near thermal reservoirs into a homogeneous porous media by means of FAHET software, which simulates using the numerical network method. The geothermal reservoir studied, (height 1000 m, width 6127.5 m), is modeled by 1000 cells, with thermal fire at the bottom left (15 cells) and the water flow comes from the top of the domain. Three simulation stages are studied: different well positions (without well, 2125 and 3000 m from the right side of the reservoir), different well depths (550, 600, 900 with the well in the centre of the domain) and calculation of the velocity vector of the fluid. It has been calculated the variation of the temperature and stream function isolines and the variation of the stream function with depth in a vertical at  $x = 1750$  m. Simulations determine how the presence, depth and position of the well change the temperature and stream function isolines, in particular in the extraction well point. In a real case, using this numerical study enable to find the best configuration for a correct geothermal exploitation.

**Keywords:** Geothermal energy; Temperature fields; Stream function

## ESTUDIO NUMÉRICO DEL CAMPO DE TEMPERATURAS Y FLUJO EN POZOS EN LAS CERCANÍAS DE FOCOS TÉRMICOS

Este trabajo estudia numéricamente los campos de temperatura y flujo en pozos en las cercanías de focos térmicos en un medio poroso homogéneo mediante el programa FAHET, que utiliza el método de simulación por redes eléctricas. El reservorio (altura 1000 m, anchura 6127.5 m) se modela con una malla de 1000 celdas, tiene foco caliente en la parte inferior izquierda (15 celdas) y flujo entrante por la parte superior. Se han estudiado tres configuraciones variando la posición del pozo (sin pozo, 2125, y 3000 m desde el lado izquierdo del reservorio), la profundidad de extracción (550, 600, 900 m con pozo central), y el vector velocidad del fluido sin pozo y con pozo en el centro del dominio. Se ha calculado la variación de las isolíneas de temperatura y de función de corriente así como la variación de la función de corriente con la profundidad sobre la vertical  $x = 1750$  m. Los resultados permiten determinar cómo la presencia, posición y profundidad del pozo modifican la forma de las isolíneas de temperatura y de corriente, en particular, en el punto de extracción. Este estudio numérico permite determinar la mejor configuración de un sistema real para un correcto aprovechamiento geotermal.

**Palabras clave:** Energía geotérmica; Campo temperaturas; Función de corriente;

Correspondencia: Salvador A. Gómez-Lopera - salvador.glopera@upct.es

Agradecimientos: Los autores agradecemos al Departamento de Física Aplicada de la UPCT y al grupo de I+D "Nanopartículas y Dispersiones" la financiación de este trabajo, así como al profesor Francisco Alhama, director del grupo de I+D "Simulación por Redes", por sus comentarios y facilitarnos el programa FAHET

## 1. Introducción

Uno de los principales problemas en el aprovechamiento de energía térmica a través del recurso geotérmico es la sostenibilidad medioambiental y la factibilidad del sistema en términos de demanda energética extraíble del reservorio. En este trabajo se ha realizado un estudio numérico para determinar la variación de los campos de temperaturas y de flujo en reservorios 2D situados en las cercanías de focos térmicos y en los cuales hay un pozo de extracción. A partir de sus resultados se puede determinar si el recurso es rentable en términos de energía térmica producida y si cómo quedan modificadas las características del reservorio en términos de flujo, caudales y temperatura. En este trabajo se han desarrollado simulaciones numéricas basadas en la teoría de redes (Peusner, 1987). En particular, se ha estudiado el problema de Yusa (véase Cánovas et al. 2015 o Holzbecher y Yusa 1995, y Yusa 1983) con las siguientes modificaciones: foco térmico situado a la izquierda del reservorio y presencia de un pozo de extracción con distintas profundidades y situado en diferentes posiciones del dominio. A continuación se presentan los principales resultados obtenidos en las distintas simulaciones en cuanto a temperatura, función de corriente y vector velocidad en todo el reservorio.

## 2. Modelo físico de transferencia de calor y flujo de fluidos en medios porosos

### 2.1 Formulación física del problema

El problema físico se basa sobre la resolución de las expresiones de Darcy del flujo de velocidad horizontal y vertical (1), la ecuación de conservación de la masa (2) (I. Alhama, Cánovas y F. Alhama, 2014), y la ecuación de conservación de la energía en términos de la variable temperatura (I. Alhama, Cánovas y F. Alhama, 2015), y (Lou, et al. 2015) (3),

$$u = -\left(\frac{K_x}{\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \quad v = -\left(\frac{K_z}{\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z} + g\rho\right) \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right) = 0 \quad (2)$$

$$(\rho_f c_{p,f}) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_f c_{p,f}) u \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) + (\rho_f c_{p,f}) v \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = k_{m,x} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + k_{m,z} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (3)$$

donde  $K$  es la conductividad hidráulica (m/s),  $P$  la presión (N/m<sup>2</sup>),  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  la aceleración de gravedad (m/s<sup>2</sup>),  $\mu$  la viscosidad del fluido (kg/m<sup>-1</sup>/s<sup>-1</sup>),  $c_{p,f}$  el calor específico (J/kg°C),  $k$  la conductividad térmica, y  $f$  y  $s$  se refieren a las características de la matrices del sólido o del fluido. Siendo la conductividad térmica media  $k_m = [\phi k_f + (1-\phi)k_s]$ ,  $\phi$  es la porosidad, utilizando la aproximación de Boussinesq (hipótesis ampliamente utilizada en este campo), (Holzbecher, 1998) la variación de densidad del agua es:

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = -\rho_0\beta\Delta T \quad (4)$$

donde  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica (°C<sup>-1</sup>) y el subíndice 0 se refiere a la temperatura de referencia. La ecuación del momento derivada de (1), (2) y (4) será (5)

$$\left(\frac{K_z}{K_x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) - \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) = -\left(\frac{K_z g \rho \beta}{\mu}\right)\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (5)$$

El problema será solucionado en términos de función de corriente como se expresa en la ecuación (6) (I. Alhama, Cánovas y F. Alhama, 2014),

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial z} \qquad v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \qquad (6)$$

## 2.2 Condiciones inicial y de frontera

Las condiciones iniciales (7) y (8) y la condiciones de frontera (9) y (10) serán calculadas como:

$$T|(x,y,t)|_{t=t_0} = T_0(x,y) \quad (x,y) \in \Omega \qquad (7)$$

$$\Psi|(x,y,t)|_{t=t_0} = \Psi_0(x,y) \quad (x,y) \in \Omega \qquad (8)$$

Donde  $T_0(x,y,t_0)$  y  $\Psi_0(x,y,t_0)$  representan las condiciones iniciales de temperatura y de función de corriente en el dominio  $\Omega$ .

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_1} = \text{const.} \quad T(x,y,t) \in \Gamma_1 \qquad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = \text{const.} \quad \Psi(x,y,t) \in \Gamma_2 \qquad (10)$$

El termino  $\partial T/\partial n$  representa el valor de la temperatura con normal  $n$  a la frontera  $\Gamma_1$  del reservorio y del pozo. El término  $\partial \Psi/\partial n$  representa el valor de la función de corriente con normal  $n$  a la frontera del reservorio  $\Gamma_2$  en el reservorio y en el pozo. Para una explicación más detallada sobre las ecuaciones que rigen la física del problema se puede consultar la documentación del programa de calculo FAST-C (Holzbecher, 1998), y el capítulo 10 de Benjan (1987) (I. Alhama, Soto Meca y F. Alhama, 2010a).

## 3. Solución numérica del modelo

El método numérico para solucionar el conjunto de ecuaciones a las derivadas parciales es el MESIR, (González-Fernández 2002), basado en la teoría de redes, simulado realizando un circuito eléctrico equivalente al modelo matemático, y la solución del mismo será obtenida mediante el programa Pspice 6.0 (1994). En el método las relaciones que existen entre las variables son (I. Alhama, Soto Meca y F. Alhama, 2010a)

$$J \text{ (flujo de calor, J/m}^2\text{s)} \Leftrightarrow i \text{ (corriente eléctrica, A)}$$

$$T \text{ (temperatura, K o }^\circ\text{C)} \Leftrightarrow V \text{ (potencial eléctrico, V)}$$

El sistema eléctrico será generado en variables adimensionales como I. Alhama et al. (2014) mediante el programa FAHET, flow and heat transport simulator, (I. Alhama, Soto Meca y F. Alhama, 2010b).

## 4. Casos de estudio

### 4.1. Configuraciones de estudio

El método numérico se aplica a tres configuraciones. Las configuraciones y los casos de estudio así como la variables calculadas están reflejados en los esquemas 1 y 2.

**Esquema 1. Distintas configuraciones de análisis calculadas**

I	II	III
Pozo de extracción en distintas posiciones con profundidad 550 m	Pozo de extracción con distintas profundidades situado en el centro del dominio	Pozo de extracción en distintas posiciones con profundidad 550 m
Sin pozo (A); Pozo izquierda (B) $x=1125$ m; Pozo en el centro (C) $x=3000$ m;	Profundidad pozo $z=600$ m(D); Profundidad pozo $z=900$ m(E);	Sin pozo (A); Pozo en el centro (C);

**Esquema 2. Variables calculadas en cada caso.**

Configuration I	Configuration II	Configuration III
$T(x,z)$	$\Psi(x,z)$	Vector velocidad $\vec{V}$ a partir de la función $\Psi(x,z)$
$\Psi(x,z)$	-	-
$T(x=1750\text{ m},z)$	-	-
$\Psi(x=1750\text{ m},z)$	-	-
$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right _{x=1750\text{ m}}$	-	-

### 4.2. Condiciones iniciales y de frontera

En la tabla 1 y en figura 1, se presentan las principales características del sistema, las constantes utilizadas y las condiciones de frontera para la implementación del mismo.

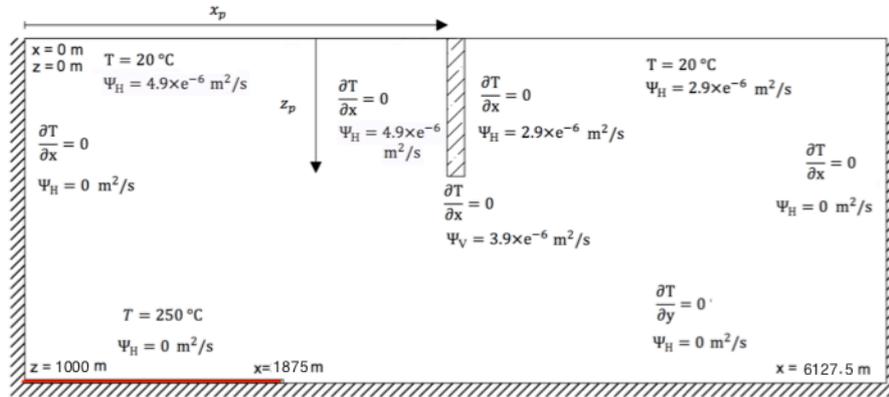
**Tabla 1. Características geométricas, y físicas del reservorio**

Geométricas	Anchura dominio (m)	N.Celdas en horizontal	Anchura celdas (m)	Altura dominio (m)	N.Celdas en vertical	Altura celda (m)	
	I	50	$\Delta_x$	h	20	$\Delta_z$	
	6127.5		125	1000		50	
Físicas	Permeabilidad ( $m^2$ )		Difusividad térmica ( $m^2/s^{-1}$ )		Max. $\Delta\rho$ del fluido ( $Kg/m^{-3}$ )	Viscosidad dinámica ( $Kg/m/s$ )	Calor Específico o fluido ( $J/Kg/K$ )
	$k_x$	$k_z$	$D_x$	$D_z$	$\Delta\rho$	$\mu_z$	$c_w$
	$1.0 \times 10^{-14}$	$1.0 \times 10^{-14}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	200	$2.0 \times 10^{-3}$	4180

Se simula el reservorio compuesto de paredes laterales aisladas, en términos de flujos de temperaturas y de fluidos, en la parte superior se supone la temperatura constante igual a 20°C y flujo constante distinto de cero, y foco térmico de temperatura 250 °C en el lado izquierdo bajo. La variación de la función de corriente en la parte superior del dominio,

a la izquierda  $\Psi_j$  y a la derecha  $\Psi_i$  del pozo, debe definir el caudal del pozo de acuerdo con la expresión  $q_{\text{pozo}} = (\Psi_j - \Psi_i) / \Delta x$ . En la celda inferior del pozo se toma el valor medio  $\Psi_m$ .

**Figura 1. Características geométricas, y condiciones de frontera**



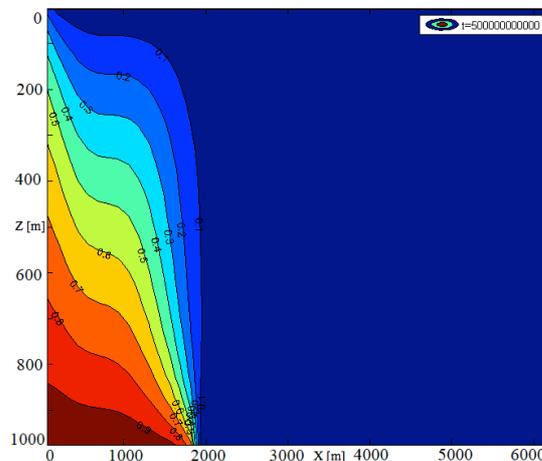
## 5 Resultados

Se presentan los resultados obtenidos para las configuraciones en el dominio, estudiando las variables del esquema 2 en el tiempo entre  $t_0 = 5.0 \times 10^{10}$  s y  $t_{fin} = 1.2 \times 10^{12}$  s, a incrementos de tiempo de valor  $\Delta t = 5.0 \times 10^{10}$  s. Se presentan los principales resultados de los análisis obtenidos para los diferentes casos en el instante de tiempo  $t = 5.0 \times 10^{11}$  s, para el cual el sistema ha alcanzado el estado estacionario.

### 5.1 Configuración I: Pozo en distintas posiciones

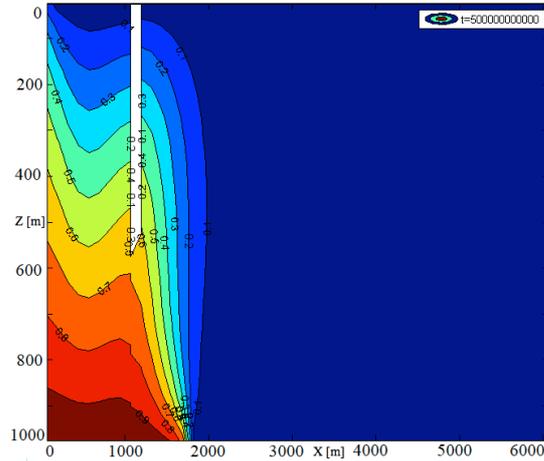
En las figuras 2, 3 y 4 se presentan las gráficas con las isolíneas de temperatura adimensional ( $T=0=20^\circ\text{C}$ , y  $T=1=250^\circ\text{C}$ ) para los casos (A), (B) y (C). En la figura 2 se aprecia que las isolíneas de temperatura, cuando no hay pozo de extracción, alcanzan un máximo absoluto (en altura) a la izquierda del reservorio y uno relativo situado ligeramente a la derecha de la posición  $x=1000$  m, que se encuentra justamente a la mitad de la zona ocupada por la fuente térmica. La no simetría se debe a las condiciones de contorno. Si el foco térmico se hubiese encontrado posicionado en la mitad inferior del dominio en lugar de la su izquierda no se habría encontrado tal asimetría.

**Figura 2. Isolíneas de la función de temperatura, caso (A)**



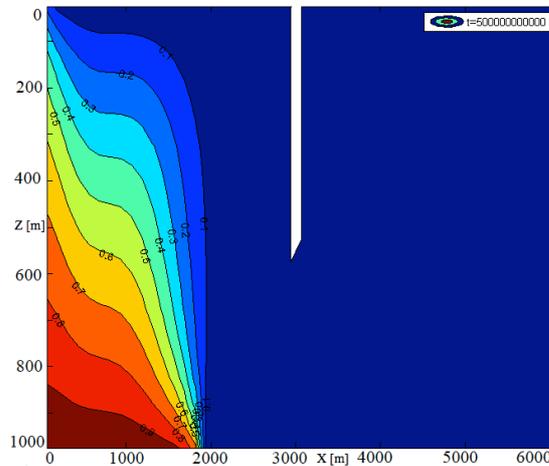
A diferencia del caso (A), en el caso (B) (figura 3), la presencia del pozo distorsiona las isolíneas de temperatura disminuyendo su valor en la posición  $x = 0$  m y aumentándolo a la derecha del pozo, donde está el máximo local (en altura). Las isolíneas situadas a mitad de distancia entre la pared izquierda del reservorio y el pozo de extracción, sufren una reducción en altura apareciendo mínimo absoluto. La temperatura (adimensional) del fluido en la celda inferior del pozo es próxima al valor 0.7.

**Figura 3. Isolíneas de la función de temperatura, caso (B)**



En figura 4 se aprecia que cuando el pozo se encuentra a la derecha de la vertical del foco térmico, la tendencia de las isocurvas de temperatura sigue la que se ha descrito en el caso sin pozo de figura 2.

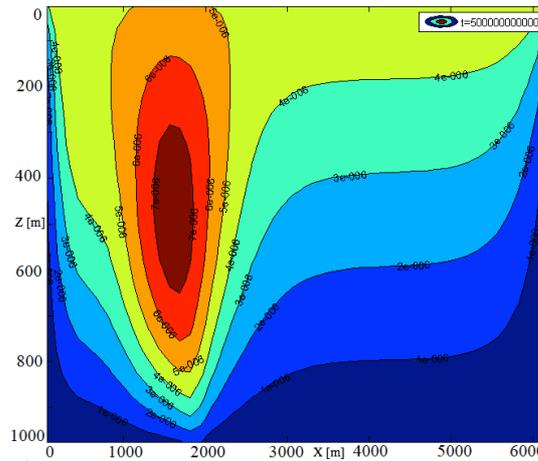
**Figura 4. Isolíneas de la función de temperatura, caso (C)**



En segundo lugar, se estudia la distribución de flujo de corriente en el dominio, según se ha descrito en el esquema 1 y 2.

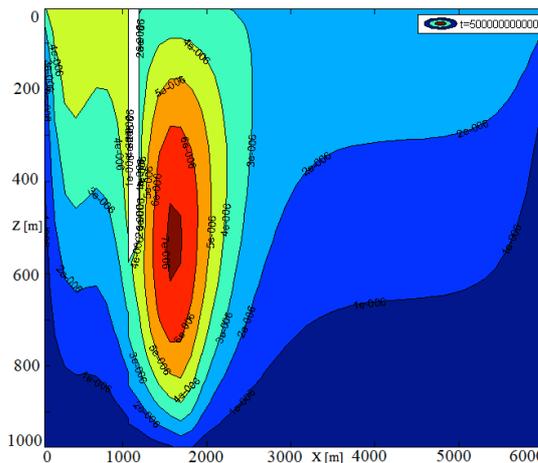
En figura 4 se aprecia que para el caso (A) en toda la parte superior del dominio, a excepción de la vertical en la que se encuentra el foco térmico, la función de corriente alcanza un valor de  $4.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , próximo al correspondiente a la condición de contorno ( $4.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), mientras que en las paredes laterales y en la parte inferior del reservorio geotérmico el flujo es nulo (condición de contorno). Se puede apreciar la formación de isolíneas de forma ovoidales sobre la vertical derecha del foco térmico  $x=1875$  m.

**Figura 5. Isolneas de la función de corriente, caso (A)**



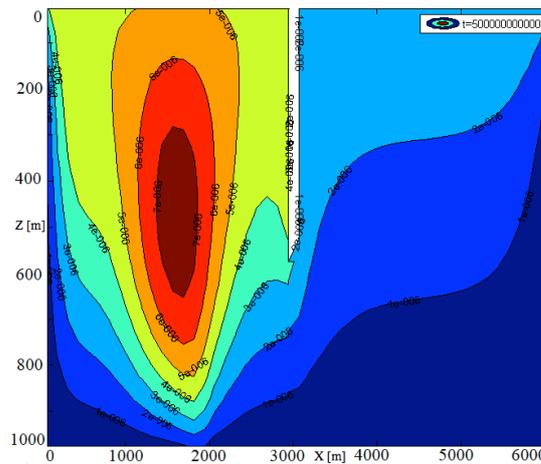
En la figura 6 se presenta el caso (B). Con respecto al anterior se encuentra una variación de forma y valores de las isolneas de corriente en todo el reservorio, debida al caudal de fluido extraído en el pozo ( $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), y la formación de isolneas de forma ovoidales sobre la vertical derecha del foco térmico  $x=1875 \text{ m}$  que presentan valores menores.

**Figura 6. Isoléneas de la función de corriente, caso (B)**



En el caso (C) presentado en figura 7, se encuentra una fuerte variación de las isolneas de corriente ovoidales en la posición  $x=1875 \text{ m}$ , que presentan valores mayores que en el caso anterior de figura 6. Como en los anteriores se encuentran diferencias en los valores de las isolneas de corriente en todo el dominio. En este caso se aprecia la variación del valor y de la forma de la función de corriente en las proximidades del punto de extracción del pozo con respecto al caso (B).

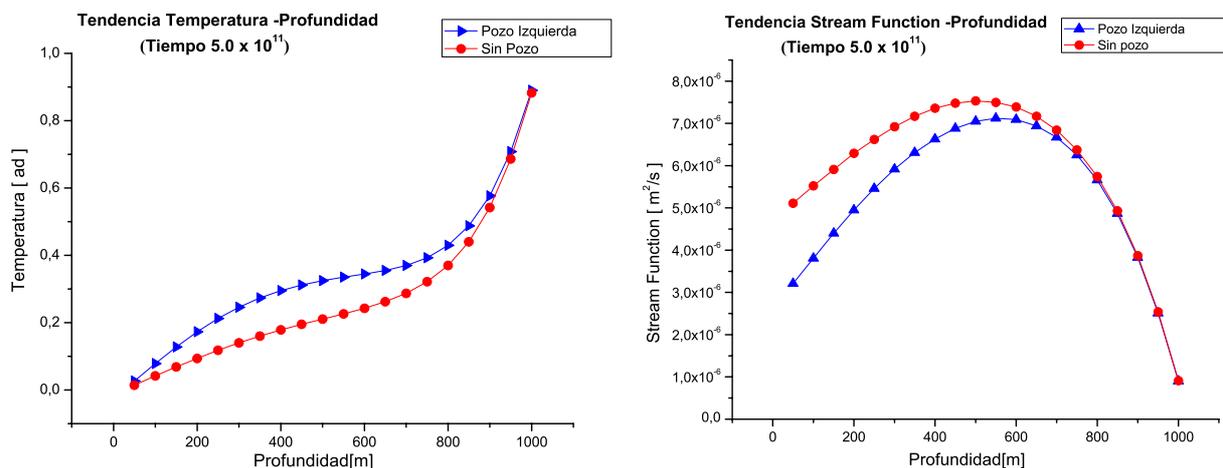
**Figura 7. Isolíneas de la función de corriente, caso (C)**



En las figuras 8 y 9 se presentan las curvas de la temperatura, de la función de corriente y de su derivada con la profundidad ( $z$ ), sobre la vertical  $x = 1750$  m. Se ha elegido esta última posición por ser el lugar con valores máximos de la función de corriente y donde aparecen mayores particularidades en sus isolíneas.

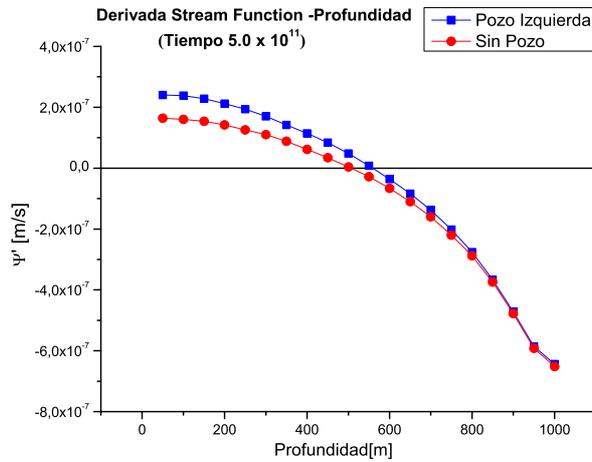
En la gráfica correspondiente a la temperatura, la presencia del pozo hace disminuir el valor de la temperatura en la vertical de análisis con una diferencia de temperatura de 0.17 para la profundidad  $z = 400$  m. Al igual que en los casos de las figuras 6 y 7, la extracción de fluido en el pozo hace disminuir los valores de la función de corriente hasta una profundidad de 800 m con respecto al caso sin pozo. A partir de ahí los valores son idénticos, esto es, los efectos del pozo de extracción desaparecen. La diferencia máxima es de  $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para  $z = 0$  m.

**Figura 8. Curva temperatura-profundidad (derecha) y función de corriente-profundidad (izquierda), sobre la vertical  $x=1750$  m, casos (A) en rojo, y (B) en azul.**



Para entender mejor a qué profundidad se producen los mayores cambios en la función de corriente, se ha calculado su derivada con respecto a la profundidad  $z$  de las curvas presentadas en figura 8 (derecha). En la figura 9 podemos destacar que la función de corriente aumenta hasta llegar a una profundidad cercana a  $z = 600$  m y disminuye más rápidamente desde esa profundidad hasta  $z = 1000$  m que aumentaba antes.

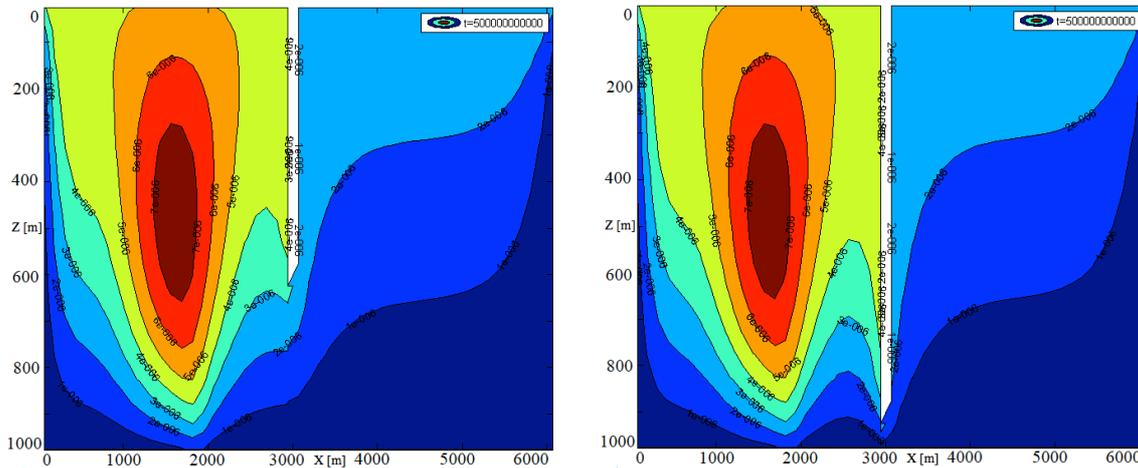
Figura 9. Curvas  $\left. \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right|_{x=1750m}$  sobre la vertical  $x=1750m$ , casos (A) en rojo, y (B) en azul.



### 5.2 Configuración II: pozo con distintas profundidades

En la configuración II se ha calculado la función de corriente para dos casos de análisis, (D) con pozo de profundidad  $z=600m$ , y (E)  $z=900m$ . En figura 10 se aprecia que la profundidad del pozo afecta en términos de variación de función de corriente solo en la parte del reservorio situada entre la vertical derecha del foco térmico y la pared izquierda del pozo, haciendo cambiar el perfil de las isolíneas. En el dominio se ven isolíneas de forma ovoidal sobre la vertical derecha del foco térmico, posición  $x=1875m$ , de valores comprendidos entre  $5.0 \times 10^{-6} m^2/s$  y  $7.0 \times 10^{-6} m^2/s$ . Podemos concluir que la profundidad del pozo apenas afecta sobre la respuesta del dominio geotérmico y lo hace en la zona alrededor de la parte inferior de aquel.

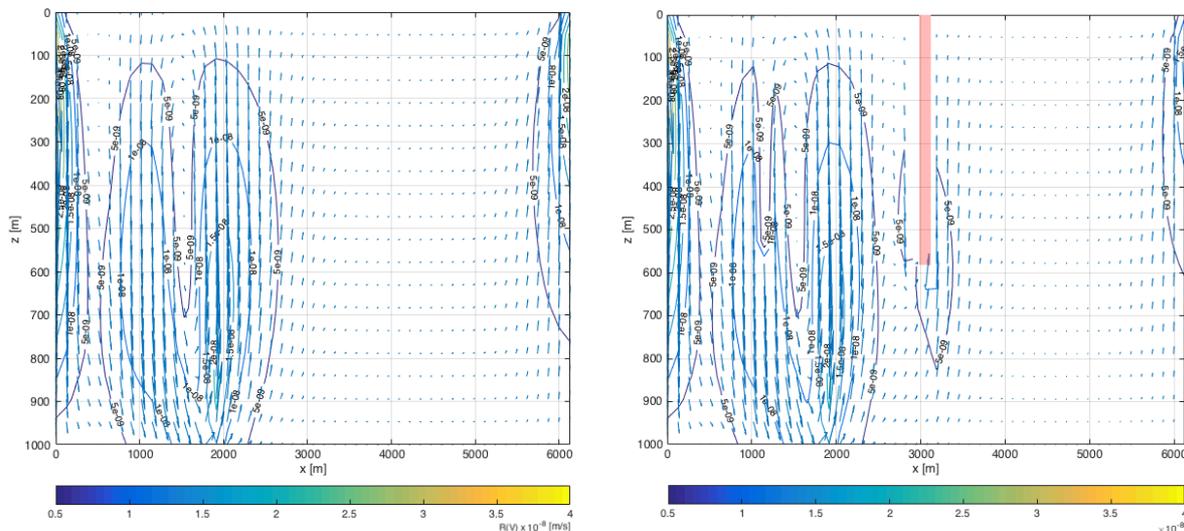
Figura10. Isolíneas de la función de corriente, casos (D) izquierda, y (E) derecha.



### 5.3 Configuración III: Cálculo del vector velocidad

En la figura 11 (configuración III) se presentan los resultados concernientes al vector velocidad para los casos de análisis (A) y (C). Como puede apreciarse, el vector velocidad se ve alterado de manera más relevante en el centro del dominio debido al efecto de extracción del fluido para el caso (C). Se puede apreciar también la formación de isolíneas con forma ovoidal.

**Figura 11. Representación vector velocidad, caso (A) sin pozo figura a la izquierda, y caso (C) con pozo en el centro (marcado en rojo) figura a la derecha.**



## 6. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un estudio numérico para determinar la variación de los campos de temperaturas y de flujo en reservorios 2D situados en las cercanías de focos térmicos y en los cuales hay un pozo de extracción. Se ha estudiado el problema de Yusa con las siguientes modificaciones: foco térmico situado a la izquierda del reservorio y presencia de un pozo de extracción con distintas profundidades y situado en diferentes posiciones del dominio.

Para la configuración I se ha encontrado que la posición del pozo influye sobre la distribución de la temperatura en el dominio cuando el pozo se encuentra sobre la vertical del foco geotérmico (entre  $x=0$  y  $x=1875$  m) en el caso (B). Se puede apreciar que cuanto más a la derecha del foco térmico se encuentra el pozo, más las isolíneas de corriente tienen mayores valores, y la formación de isolíneas ovoidales en la posición  $x=1875$  m.

Para la configuración II se ha visto que la profundidad del pozo apenas afecta sobre la respuesta del dominio geotérmico y lo hace en la zona alrededor de la parte inferior de aquel.

Para la configuración III el vector velocidad se ve alterado de manera más relevante en el centro del dominio debido al efecto de extracción del fluido para el caso (C). Se puede apreciar también la formación de isolíneas con forma ovoidal.

A la vista de los resultados obtenidos, el método numérico y las herramientas utilizadas pueden abordar la mayoría de los casos reales, con el fin de asegurar que en la realización de una instalación geotérmica la presencia del pozo, su posición, su profundidad, y el caudal extraído influyan de manera menor desde un punto de vista medioambiental, asegurando al mismo tiempo la mejor respuesta posible en términos de aprovechamiento de energía.

## 7. Bibliografía

Alhama, I., Alcaraz, M., Trigueros E., & Alhama, F. (2014). Dimensionless characterization of salt intrusion benchmark in anisotropic media, *Applied mathematics and computation*, 247, 1173-1182.

- Alhama, I., Cánovas, M., & Alhama, F. (2015). Simulation of fluid flow and heat transport coupled processes using Fahet software. *Journal of porous media*, 18(5),537-546.
- Alhama, I., Cánovas, M., & Alhama, F. (2014). One the on the nondimensionalization process in complex problems: Application to natural convection in anisotropic porous media. *Mathematical problems in engineering*, 13.
- Alhama, I., Soto Meca, A., & Alhama, F. (2010a). Simulador de flujo y trasporte de calor FAHET, Manejo y aplicaciones. User's manual. Version 4.5 © UPCT (Universidad Politécnica de Cartagena), Cartagena.
- Alhama, I., Soto Meca, A., & Alhama, F. (2010b). Programa FAHET (flow and heat transport simulator). Version 4.5 © UPCT (Universidad Politécnica de Cartagena), Cartagena.
- Bejan, A. (1987). Convective heat transfer in a porous media. En: Kakac, S., Shah, R. K., & Aung, W. Eds. *Handbook of single-phase convective heat transfer*. Wiley, New York.
- Cánovas, M., Alhama, I., Trigueros, E., & Alhama, F. (2016). A review of classical dimensionless numbers for the Yusa problem based on discriminated nondimensionalization of the governing equations. *Hydrological Processes*.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Libraire des Corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris.
- Diersch, H.J. (1996). Interactive, graphics-based finite-element simulation system -FEFLOW- for modelling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes. FEFLOW User's Manual. Version 4.5.
- 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.
- Holzbecher, E. (1998). *Modelling Density-driven Flow in Porous Media*. Springer, Berlín.
- Holzbecher, E. & Yusa Y. (1995). Numerical experiments on free and forced convection in porous media . *Int. J. Heat mass transfer*, 38 (11), 2109-2115.
- Lou Z., Wang Y., Zhou. S., & Wu X. (2015). Simulation and prediction of conditions for effective development of shallow geothermal energy, *Applied thermal engineering*, 91, 370-376.
- Peusner, L. (1987). *The principles of network thermodynamics: Theory and biophysical applications*. Entropy, Lincoln, Massachusetts.
- PSPICE, versión 6.0 (1994): Microsim Corporation, 20 Fairbanks, Irvine, California.
- Yusa, Y. (1983). Numerical experiment of groundwater motion under geothermal condition-Vying between potencial flow and termal convective flow (in Japanese). *J. Geoth. Res. Soc. Jpn.*, 5(1), 23-38.