

MODELO PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE AGUAS PRODUCIDAS TRATADAS DE YACIMIENTOS GASOPETROLÍFEROS CARBONATADOS EN ACUÍFEROS CÁRSICOS LITORALES SOMEROS SALINIZADOS. 3. TRANSFERENCIA DE CALOR.

A model for the final disposal of produced water from carbonate oil & gas fields in shallow coastal karst salinised aquifers 3. heat transfer

L.F. Molerio León
INVERSIONES GAMMA, S.A.,
PO Box 6246, CP 10600, Habana 6, Ciudad de La Habana, Cuba;
E-mail: especialistaprincipal@gmail.com

RESUMEN

Se presenta el modelo conceptual y matemático derivado del propuesto por Stallman-Cartwright (1960-1975) para evaluar los procesos de transferencia y distribución de calor en el acuífero cársico somero carsificado. El intercambio térmico se produce entre aguas producidas con una temperatura promedio de 358.15°K (85°C) y aguas subterráneas con una temperatura promedio de 297.15°K (24°C). La variación neta absoluta de temperatura en 334.15°K (61°C) se evalúa en función de la disipación de calor en una inyección instantánea y su efecto sobre los coeficientes osmóticos del KCl en un rango entre 283.15 y 298.15°K (Modelo de Amado y Blanco) y los coeficientes de actividad del NaCl entre 10-25°C (Modelo de Xiaoyan et al., 2000)

Palabras clave: acuífero cársico, aguas producidas, inyección de aguas de capa, petróleo, teoría de la interacción iónica

ABSTRACT

The basic methodology to identify the feasibility of the application of the Pitzer Model is developed in this paper. The properties of the reception body are described as well as those procedures that have to be fulfilled by the produced waters, the reception body and the treatment, recharge and control techniques to ensure that the shallow disposal system could be properly designed and operated with economic and environmental efficiency.

Key words: injection of formation waters, karst aquifer, oil, produced waters, theory of ionic interaction

TEORÍA BÁSICA

Las aguas de capa que se pretende simular se extraen del yacimiento con una temperatura relativamente alta; en nuestro caso, de alrededor de 81°C y, durante el proceso de tratamiento se rebajan hasta alrededor de 30,5°C como promedio. Con esta temperatura son inyectadas en capas ya no productivas del yacimiento a profundidades entre 2000 y 3000 metros. El estudio que se conduce, cuyos principios básicos han sido enunciados en artículos anteriores de esta serie y en Molerio (2015) evalúa la posibilidad de reducir al mínimo la

presión de inyección y, preferiblemente, evitarla, disponiendo las aguas de capa tratadas en un acuífero somero libre a semilibre carsificado y salinizado por intrusión marina que yace entre 20 y 40 m de profundidad. Este artículo examina los resultados de la aplicación de un modelo de simulación de disipación de temperatura para condiciones de borde asumibles en esta etapa del estudio.

La modelación de los procesos de intercambio de temperatura se ha basado en los enunciados de Stallman (1960, 1965) y Cartwright (1968, 1974). De acuerdo con estos autores, la transferencia simultánea de calor y fluido (Modelo de Stallman-Cartwright) puede expresarse del modo siguiente (Fig. 1):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{c_w \rho_w}{k} \left(\frac{\partial v_x T}{\partial x} + \frac{\partial v_y T}{\partial y} + \frac{\partial v_z T}{\partial z} \right) = \frac{c \rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde,

T, es la temperatura en cualquier punto en el tiempo t

x, y, z coordenadas cartesianas de referencia

v, velocidad del flujo en la dirección indicada por los subíndices x,y,z

c_w, calor específico del agua

c, calor específico del complejo roca-fluido

ρ, densidad del complejo roca-fluido

ρ_w, densidad del agua

k, conductividad térmica del complejo roca-fluido

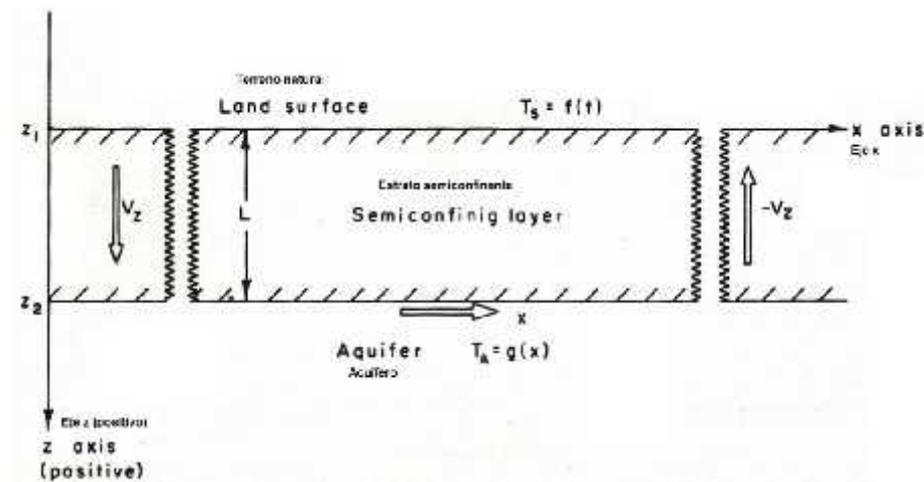


Fig. 1. Modelo conceptual del sistema de flujo (según Cartwright, 1974)

Habida cuenta que el fluido y el flujo conductivo de calor ocurren verticalmente paralelos al eje z en régimen permanente y flujo uniforme y bajo la condición adicional de que la temperatura del fluido y la roca son las mismas todo el tiempo en todo el sistema. Condición de borde adicional es que las

propiedades térmicas son constantes en tiempo y espacio para flujo unidimensional vertical de calor y fluido la ecuación anterior se simplifica a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \left(\frac{c_w \dots w v_z}{k} \right) \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde ahora,

es la difusividad térmica que equivale a $\frac{c_w \dots w v_z}{k}$

t, tiempo desde el inicio del flujo

P, período de la fluctuación de temperatura del aire

La oscilación anual de calor se describe por una onda sinusoidal de temperatura:

$$T_s = f(t) = T_m + Tr \sin\left(\frac{2ft}{P}\right) \text{ para el caso } z = 0$$

La temperatura en el infinito se asume que está afectada por la temperatura ambiente en superficie que, en el límite, es igual a la temperatura ambiente media y por la del fluido, que en el límite es igual a la temperatura media del agua inyectada; es decir,

$$\lim_{z \rightarrow \infty} T_z = T_{mz}$$

La solución general del modelo es:

$$T_z = T_r \exp\left[-z \left(\sqrt{\left(\sqrt{E^2 + \frac{F^4}{4}} \right) + \frac{F^2}{2}} \right) - F \right] * \left[\left(\sin \frac{2fT}{P} \right) - \left(z \sqrt{\left(\sqrt{E^2 + \frac{F^4}{4}} \right) + \frac{F^2}{2}} \right) \right]$$

En la que,

$$E = \frac{f}{r_0} P$$

$$F = \frac{c_w \dots w v_z}{2k_0}$$

Esta ecuación, debida a Cartwright (1974), describe el flujo simultáneo de calor y fluido en un medio poroso uniforme y puede aplicarse en la descripción del flujo de calor entre la superficie y un acuífero somero considerando que el efecto de la onda sinusoidal de temperatura del aire es despreciable en la interface entre la capa confinante y el acuífero y que la temperatura del acuífero es constante.

El efecto de flujo horizontal sobre la temperatura del suelo puede encontrarse determinando la temperatura del acuífero y asumiéndola constante en cualquier punto añadiéndole los efectos de conducción del calentamiento/enfriamiento periódicos de la superficie al flujo permanente de calor entre el acuífero y la superficie. Para flujo de calor permanente en la zona no saturada (que se hace 0 en condiciones de semiconfinamiento o aislamiento del sistema aplicando propagación de δ Dirac), la solución es:

$$T_{za} = -\frac{z_1 T_A - z_2 T_m}{L} + \frac{(T_A - T_m)z}{L}$$

En la que,

T_{za} , es la temperatura resultante de los efectos del acuífero

T_A , la temperatura a la profundidad z_2 (la interface acuífero-capa confinante)

T_m es la temperatura media del suelo

L , espesor de la capa confinante

Para cualquier profundidad (puesto que T no es función del tiempo) la solución simultánea es:

$$T_{z=} = T_r \exp\left[-z(E)^{1/2}\right] \sin\left[\left(\frac{2ft}{P}\right) - z(E)^{1/2}\right] - \frac{z_1 T_A - z_2 T_m}{L} + \frac{(T_A - T_m)z}{L}$$

En la que,

$$L = z_2 - z_1$$

La distribución de T a lo largo de una la distancia x en la línea superior de flujo (tope del acuífero) es:

$$T_A = g(x) = T_{Acuandox=0} + \frac{k_A x}{c_w \dots v_x} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DEL TRANSPORTE DE CALOR

El decrecimiento de la onda de temperatura con la profundidad en un semi espacio semi-infinito puede expresarse entonces como:

$$T = T_0 \exp\left(-x \sqrt{\frac{f}{pr}}\right)$$

Donde,

T , amplitud de la onda a la profundidad x (°C)

T_0 , la amplitud de la onda en superficie (°C)

X, profundidad (cm)
 P, período de la onda (segs)
 , difusividad térmica (cm²)

El calor añadido a una columna de roca se define como:

$$H_w = (T_r - T_g) + (T_{capa} - T_{ac}) C_w h_w$$

Donde,

H_w, calor añadido

T_r-T_g, la temperatura media del agua de lluvia menos la temperatura media de los primeros 200 cm de suelo

C_w, la capacidad calorífica del agua

H_w, la columna de agua que ingresa en el suelo

El cambio de temperatura que resulta de la adición de calor a una columna de suelo de espesor L es igual al calor añadido dividido por la capacidad calorífica total de la columna de suelo; es decir:

$$\Delta T = \frac{H_w}{L} (C_{s \dots s} + C_{w \dots w} a)$$

Los valores de entrada y salida del modelo se resumen en la Tabla 1. La Fig. 1 muestra los resultados de la simulación.

Tabla 1. Variables y valores de entrada/salida del modelo de transporte de calor

Variables	Entrada	Salida
Espesor de la columna de suelo	200 cm	
Temperatura del agua de capa	60°C	
Temperatura del agua del acuífero	24°C	
Temperatura del agua de capa tratada en el punto de inyección	31,5°C	
Diferencia de temperatura (agua de lluvia-suelo)	2°C	
Densidad del suelo	1,78 g/cm ³	
Densidad del agua	1 g/cm ³	
Calor añadido		1900 cal/cm ²
Cambio de temperatura por calor añadido		7,5°C
Distancia desde la fuente a la que se disipa totalmente el calor añadido		12 m

CONCLUSIONES

La aceptabilidad ambiental del acuífero cársico salinizado de aguas de alta temperatura es uno de los elementos básicos para fundamentar el proyecto de inyección somera de aguas de capa tratadas (Molerio, 2015). Los resultados obtenidos, aunque susceptibles de ser refinados aún más, son suficientemente rigurosos y satisfactorios para justificar el proyecto. La forma en que ello afecta

la movilidad de los componentes (macro, y microelementos) no afecta sustancialmente el cuadro ambiental general. Pero desde el punto de vista teórico, se trabaja en la modelación de la zona de influencia cercana; es decir, en los 12 metros alrededor del punto de inyección. Una limitación de este estudio y, en general, de investigaciones similares, como ha señalado Covington et al. (2011), es el hecho de que los modelos propuestos para calcular el intercambio de calor entre el agua subterránea y los conductos cársicos descansan en presunciones que no han sido examinadas en detalle tanto desde la perspectiva teórica como desde las observaciones de campo.

En particular, el tema de la convección resulta de especial significación, toda vez que la mayor parte de los modelos asumen que la transferencia de calor entre el agua (o el aire) y los conductos son controladas por transporte convectivo. Asumiendo una temperatura constante de la roca en las paredes del conducto. Esto último, sin embargo, es consistente con resultados obtenidos por el autor y tiene una importancia destacada en el control de los procesos de evaporación/condensación en los conductos cársicos (Molerio, 1992a, 1992b; Molerio, Fariñas, Azcue, 1990; Molerio, Guerra y Leal, 2013).

Especialmente importante es definir el efecto de la conducción, convección, evaporación, condensación en los conductos cársicos, la tasa de flujo y la radiación en los aportes y los flujos superficiales y subterráneos y la mezcla entre ambos. El papel de conductos saturados completamente no se conoce y es tema de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Amado G., E. ,L.H. Blanco.2010. Aplicación del Modelo de Interacción Iónica de Pitzer a coeficientes osmóticos de soluciones de KCl en función de la temperatura Revista BISTUA :31-46

Cartwright, K.1968. Temperature prospecting for shallow glacial and alluvial aquifers in Illinois. III. Geol Surv. Circ. 433, 41:

Cartwright, K.1974. Tracing shallow groundwater systems by soil temperatures. Water Resourc. Res. 10:847-855

Ji Xiaoyan, X. Lu, S. Li, L. Zhang, Y. Wang, J. Shi.2001. Determination of the activity coefficients of NaCl in the system NaCl-NH₄Cl-H₂O. Jour sol. Chem., 30(5)

Molerio León, Leslie F.; E. Fariñas Padrón & O. Azcue Manso (1990): Procesos Termodinámicos en la Cueva de La Virgen, Ciudad de La Habana, Cuba. Congr. 50 Aniv.Soc.Espel. Cuba, La Habana: 53

Molerio León, Leslie F. (1992a): Modelo de Transporte de Masa en la Zona No Saturada de los Acuíferos Cársicos. 1/Algoritmo ADRIANA (versión 2.91). 1er Taller Iberoamericano de Informática y Geociencias, Acad. Cienc. Cuba, La Habana, : 34

Molerio León, Leslie F. (1992b): Procesos de Transporte de Masa en la Zona No Saturada de los Acuíferos Cársicos Tropicales. GTICEK. Taller Internac. sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló,:1-15.

Molerio León, L.F; M.G. Guerra Oliva, R.M. Leal (2013): Modelo Difusivo de Transporte de Masa (Algoritmo Adriana, Versión 2.91) y Curvas de Retención

de Humedad en la Zona No Saturada de los acuíferos cársicos (Modelo RETC). Aplicación a las cuevas del tercio superior del curso subterráneo del río San Antonio, Artemisa, Cuba. Mapping Latino. 23 Septiembre 2013, 51:<http://mappinglatino.com/blog/2013/09/23/modelo-difusivo-de-transporte-de-masa-algoritmo-adriana-versin-2-91-y-curvas-de-retencion-de-humedad-en-la-zona-no-saturada-de-los-acuiferos-carsicos-modelo-retc-apl/>

Molerio-León, L. 2015. Disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados. Ciencias de la Tierra y el Espacio, Vol.16, No.1: 75-87

Stallman, R.W.1960. Notes on the use of temperature data for computing groundwater velocity. 6th assembly on Hydraulics. Rep 3:1-7. Soc. Hydrotech de France, Nancy, France (reproducido en Bentall, R. [Éd] 1963. Methods of collecting and interpreting ground water data. U.S.Geol.Surv.Water Supply Pap. 1544-H-36-46

Stallman, R.W.1965. Steady one dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with semisolid surface temperature. J. Geophys.Res. 70(12):2821-2827

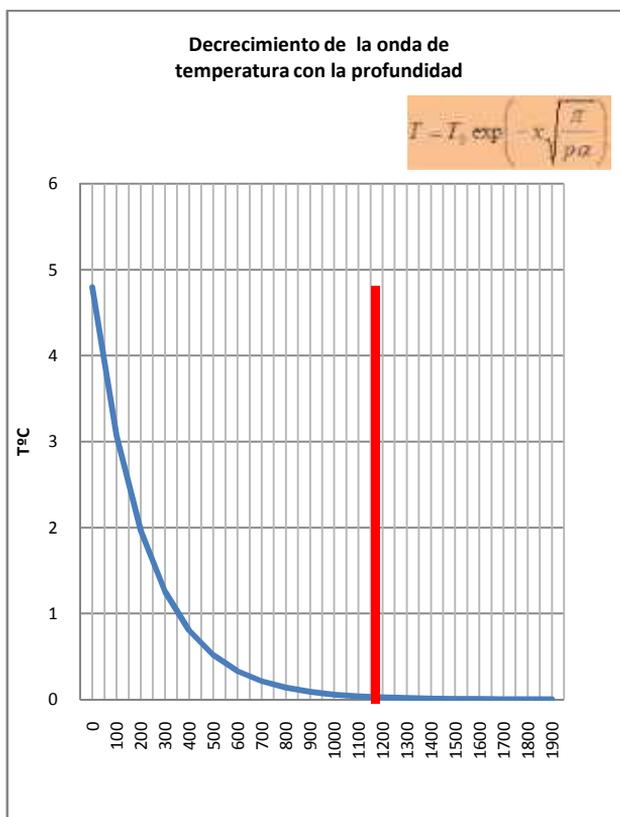


Fig. 1. Disipación de la onda de temperatura del agua con la profundidad. La línea vertical marca la distancia desde el origen en que se anula totalmente el cambio de temperatura.