

# GEOTERMIA

## REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

ISSN 0186-5897

Volumen 18, No. 2

Julio-Diciembre de 2005

### CONTENIDO

<b>Editorial</b>	1
<b>Gradiente de presión de un flujo bifásico sólido-líquido de dos regiones en pozos horizontales</b> R. Salazar Mendoza, A. García Gutiérrez y G. Espinosa Paredes	2
<b>Análisis de la automatización y del control de las condiciones de producción de los pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, México</b> Isaac Murillo-Zamora, Juan de Dios Ocampo Díaz y Gilberto de la Peña Reyna	16
<b>Estudio del deslizamiento de masa en la ribera noroeste del Lago de Chapala, Jal., México</b> Víctor Manuel Hernández-Madrigal, Víctor Hugo Garduño-Monroy, Dolores Ibáñez-Garduño, Eleazar Arreygue-Rocha y Román Álvarez	21
<b>Application of ethanol as a geothermal tracer: a field test in the Los Azufres geothermal field, Michoacan, Mexico</b> Enrique Tello-Hinojosa, Mahendra Pal-Verma, Mario C. Suárez-Arriaga, Víctor Barrera-González and Fernando Sandoval-Medina	32
<b>Foro</b>	44
<b>Una extraña raza de gato</b> Traducción de un artículo original de Carl F. Austin aparecido en el <i>Bulletin</i> del GRC, realizado por José Luis Quijano-León.	45
<b>El Mundo de la Energía</b> Información de Alfredo Mañón Mercado	51
<b>Congreso Geotérmico Mundial (World Geothermal Congress) 2005</b> Rosa María Barragán-Reyes y Luis C.A. Gutiérrez-Negrín	54

La revista **GEOTERMIA** es un órgano virtual de información técnica publicado por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de edición semestral. Su Certificado de Licitud de Título es el número 2784 del 2 de octubre de 1985, y su Licitud de Contenido es el número 2514 del 1 de diciembre de 1986, ambos expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. **GEOTERMIA – REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA** es nombre registrado en la Dirección General de Derechos de Autor de la Secretaría de Educación Pública, con la Reserva 01.86. Reservados todos los derechos de reproducción del material publicado. Registro ISSN 0186-5897.

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos no asume ninguna responsabilidad con relación a la veracidad o exactitud de los datos o conclusiones presentados en los artículos. Tampoco avala ni sugiere el uso de productos comerciales, los cuales son eventualmente citados sólo con fines descriptivos.

La autorización para citar fuentes ajenas a la Comisión Federal de Electricidad corre a cargo de los autores. Las opiniones vertidas son responsabilidad exclusiva de ellos y no reflejan necesariamente las opiniones, políticas o programas oficiales de la Comisión Federal de Electricidad.

## **EDITORES**

**Director:** José Luis Quijano León  
**Editor:** Luis C.A. Gutiérrez Negrín

### **Consejo Editorial:**

Alejandro Becerril Zavala  
Jesús de León Vivar  
Magaly Flores Armenta  
Serafín López Ríos  
Raúl Sánchez Velasco  
Jaime Vaca Serrano

### **Editores asociados:**

Alejandro Abril Gaspar (GPG)  
Víctor Arellano Gómez (IIE)  
Víctor Hugo Garduño Monroy (UMSNH)  
Susan F. Hodgson (Historiadora de temas geotérmicos y petroleros)  
Alfredo Mañón Mercado (Consultor)  
José Manuel Romo Jones (CICESE)  
César Suárez Arriaga (UMSNH)

### **Secretaria:**

Enedelia Calderón Ochoa  
**Responsable de sitio en página de la UMSNH:**  
Lucina Arce Ávila

### **Oficinas:**

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas  
Morelia, Mich., 58290  
Tel. (443) 322-7072  
Correo: [luis.gutierrez03@cfe.gob.mx](mailto:luis.gutierrez03@cfe.gob.mx)

## Editorial

Este es el tercer número de la nueva época en versión digital de la revista *Geotermia*. Se incluyen un par de artículos sobre los campos geotérmicos mexicanos de Cerro Prieto y Los Azufres, un trabajo sobre un deslizamiento de masa en la costa del principal cuerpo de agua de México, el Lago de Chapala, en cuyos bordes hay varias zonas termales, y un bien documentado artículo sobre flujo bifásico en pozos horizontales.

En la sección del Foro, que integra ensayos y notas de interés sin la rigurosidad de una publicación técnica formal, presentamos la traducción de un irreverente y provocador ensayo sobre la exploración geotérmica que apareció originalmente en inglés en el número 1, volumen 34, del *Bulletin del Geothermal Resources Council*, correspondiente a enero-febrero de este año. Su autor, el Dr. Carl F. Austin, es socio fundador y actual Jefe de Exploración de la compañía norteamericana Idatherm LLC, que explota el campo geotérmico de Coso. El Dr. Austin, quien sin duda sabe de lo que habla después de medio siglo de hacer exploración y desarrollo geotérmico, invita a quienes se dedican a la exploración a abandonar los caminos trillados para probar enfoques novedosos, y a tener especial cuidado en separar los datos objetivos de la interpretación subjetiva. Y si bien su crítica a los modelos ortodoxos resulta demoledora, no conviene perder de vista que, finalmente, la inducción es un método científico que implica la existencia de un modelo probado con el cual comparar todo dato nuevo. O para usar el mismo símil que el Dr. Austin, si uno está buscando un tipo de árbol en particular, hay que coincidir con él cuando dice que no debe permitirse que el panorama del bosque impida fijarse en los árboles individuales; pero es asimismo conveniente saber de qué tipo de bosque se trata, porque tal vez en él no se encuentre el tipo de árbol que se busca, por muy bien que se examine cada uno.

También en el Foro aparece una nota de la Dra. Rosa María Barragán sobre el Congreso Geotérmico Mundial de 2005 (WGC 2005), celebrado en Antalya, Turquía, en mayo pasado. Vale la pena destacar de ahí la participación de los especialistas geotérmicos de América Latina, que en total enviaron al congreso 78 trabajos, según se desglosa en la tabla incluida en la nota. Si se asume que el tipo de trabajos presentados por estos especialistas es más o menos representativo del tipo de actividad geotérmica que se desarrolla actualmente en la región, llama la atención que casi el 40 por ciento esté concentrada en la geoquímica y la ingeniería de yacimientos. Es también interesante constatar que la mayor parte de tal actividad está enfocada al desarrollo y explotación de campos conocidos, mientras que los trabajos eminentemente exploratorios constituyeron una reducida minoría. Esto parece reflejar de manera bastante fiel la situación de la geotermia en Latinoamérica, donde han sido muy pocos los campos geotérmicos nuevos que se han incorporado a la explotación, sea para usos directos o para generar energía eléctrica, en los últimos tiempos.

Finalmente reitero, a nombre del Consejo Editorial, la invitación a nuestros lectores para enviar trabajos técnicos originales y someterlos al proceso de arbitraje de la revista, así como ensayos y opiniones que consideren interesante compartir con la comunidad geotérmica hispanoparlante.

*Luis C.A. Gutiérrez-Negrín*

# Gradiente de presión de un flujo bifásico sólido-líquido de dos regiones en pozos horizontales

<sup>1,4</sup>R. Salazar Mendoza, <sup>2,1</sup>A. García Gutiérrez y <sup>3</sup>G. Espinosa Paredes

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Prolongación Av. Palmira esq. Apatzingan, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor., 62490, México.

<sup>2</sup>Gerencia de Geotermia, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Ave, Reforma No. 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor., C.P. 62490, México.

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco # 186 Col. Vicentina, México, D.F., C.P. 09340, México. [gepe@xanum.uam.mx](mailto:gepe@xanum.uam.mx)

<sup>4</sup>Competencia de Producción de Hidrocarburos, Instituto Mexicano del Petróleo, Av. Periférica Norte s/n esq. 35-B, Col. San Agustín del Palmar, Cd. del Carmen, Camp., C.P. 24118, México.

---

## Resumen

Se presenta un análisis teórico del problema de transporte de recortes de perforación en pozos horizontales. Se estudia el flujo bifásico sólido-líquido en dos regiones donde la región inferior es un lecho estacionario de recortes, considerado como medio poroso, mientras que la región superior es un flujo bifásico disperso sólido-líquido. Se aplica el método de promediado en volumen para derivar de manera matemáticamente rigurosa el modelo de dos regiones. El modelo incluye las ecuaciones de transporte promediadas en volumen para cada región y términos que resultan de un balance de fuerzas macroscópico. La solución del modelo permite evaluar el comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad, la fracción de volumen de recortes total y la relación de la altura del lecho estacionario y del diámetro de la tubería, y ésta se basa en una aproximación discreta hacia atrás de diferencias finitas explícitas. El sistema físico simulado es una tubería horizontal de 4.135 m de longitud y 0.0508 m de diámetro. Se usa una cuadrícula unidimensional de malla centrada de 10 nodos. Los resultados numéricos se compararon con datos experimentales encontrándose una comparación satisfactoria entre los perfiles medidos y los simulados.

**Palabras Clave:** Perforación de pozos, Transporte de recortes, Flujo en dos fases, Sólido-líquido, Simulación, Promediado en Volumen.

## Pressure gradient of a two-region solid-liquid flow in horizontal wells

### Abstract

A theoretical analysis is presented for the problem of cuttings transport in a two-region, slurry-flow system in horizontal pipes, with a stationary bed of drill cuttings as a porous medium ( $\omega$ -region) below a two-phase dispersed flow ( $\eta$ -region). Volume averaging was applied to derive a rigorous mathematical model where each variable is precisely defined. The model includes volume-averaged transport equations for both the two-phase dispersed flow and the porous-medium regions, and terms from a macroscopic forces balance. The solution of the two-region model allowed evaluation of the behavior of the pressure gradient as a function of velocity, total volume fraction of cuttings, and the relationship between the height of the stationary bed and pipe diameter. It is based on a backward, finite-difference explicit scheme. The simulated physical system is a pipe of 4.135 m in horizontal length and 0.0508 m in diameter. A one dimensional, mesh-centered grid is

used, consisting of 10 nodes. The numerical results were compared with experimental data on slurry flows and a good agreement was found.

**Keywords:** Well drilling, Cuttings transport, Two-phase flow, Solid-liquid, Simulation, Volume averaging.

---

## 1. Introducción

En las industrias química, de la minería y petrolera se presenta el flujo bifásico sólido-líquido a través de tuberías horizontales. Este tipo de flujo es muy complejo (Doron y Barnea, 1993), debido a la presencia de las dos fases. Si los sólidos son de tamaño pequeño mayores a  $40 \mu\text{m}$  (Kunii y Levenspiel, 1991), la floculación a menudo resulta en una estructura de asociación de partículas la cual resiste la sedimentación (Gillies y col., 1991). Estas mezclas no-Newtonianas con frecuencia presentan un esfuerzo de cedencia y se conocen como mezclas "non-settling" (Gillies y col., 1991). Un modelo de flujo homogéneo (Wallis, 1969) es apropiado para describir este tipo de mezclas. Sin embargo, debido a que las partículas de tamaño mayor a 1 mm tienden a sedimentarse en el fondo de la tubería, se pueden observar diferentes patrones de flujo dependiendo del gasto de flujo de mezcla (Doron y Barnea, 1993) y la clasificación más común es (Doron y col., 1987): 1) flujo con lecho estacionario, 2) flujo con lecho móvil, 3) flujo bifásico disperso y 4) flujo pseudo-homogéneo. Para dichos patrones de flujo un modelo de flujo homogéneo es inapropiado.

El parámetro más importante del flujo bifásico sólido-líquido es el gradiente de presión. El comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad en un flujo bifásico sólido-líquido es sustancialmente diferente del comportamiento de un flujo monofásico.

Datos experimentales del comportamiento del gradiente de presión en sistemas bifásicos sólido-líquido en tuberías horizontales han sido obtenidos en varios trabajos (Durand, 1953; Zandi y Govatos, 1967; Babcock, 1971; Carleton y col., 1978; Chhabra y Richardson, 1983; Noda y col., 1984, Doron y col., 1987; Doron y Barnea, 1993; Doron y Barnea, 1995; Doron y col., 1997). La predicción de las caídas de presión y los patrones de flujo es un problema muy complejo (Doron y col., 1987). Las dos aproximaciones principales que se han usado son: 1) correlaciones de datos empíricos, usando posiblemente un razonamiento semi-teórico (por ejemplo: Newwitt y col., 1955; Zandi y Govatos, 1967; Turian y Yuan, 1977; entre otros), y 2) desarrollos de aproximaciones teóricas basadas en una modelación fenomenológica, tal como los modelos de dos capas de Wilson (1976, 1988), Televantos y col. (1979), Doron y col. (1987), Gillies y col. (1991) y los modelos de tres capas de Doron y Barnea (1993) y Doron y col. (1997), entre muchos otros. No obstante la principal limitación de los modelos teóricos existentes es su inhabilidad para predecir, de manera suficientemente exacta, la existencia de los patrones de flujo bifásico sólido-líquido, por ejemplo el flujo con un lecho estacionario a gastos de flujo de mezcla bajos, mientras que las correlaciones empíricas tienen un intervalo limitado de aplicabilidad.

En la industria petrolera, la perforación horizontal se usa para explotar yacimientos que exhiben zonas productoras delgadas, para resolver problemas de conificación de agua y gas, para obtener una mayor área de drenaje y para maximizar el potencial productivo en yacimientos naturalmente fracturados (Cho y col., 2000). Sin embargo, entre los problemas operacionales más importantes que enfrentan los perforadores de pozos horizontales y desviados es la formación y limpieza de camas de recortes de perforación (Ramadan y col., 2001). Los recortes de perforación son los fragmentos sólidos de roca que son generados por una barrena durante la perforación de un pozo (Santana y col., 1998).

En este trabajo se presenta un análisis teórico del problema de transporte de recortes de perforación en pozos horizontales, para ello se deriva un modelo matemático, denominado modelo de dos regiones, usando el

concepto de flujo bifásico sólido-líquido en dos regiones con lecho estacionario y el método de promediado en volumen (Whitaker, 1999); lo cual constituye una técnica que se usa para derivar ecuaciones de transporte para sistemas multifásicos y es una de las principales aproximaciones en la modelación de flujo en dos fases (Espinosa-Paredes y col., 2002). La solución del modelo de dos regiones permite evaluar el comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad, la fracción de volumen de recortes total y la relación entre la altura del lecho estacionario y el diámetro de la tubería. Se utilizó una aproximación discreta hacia atrás de diferencias finitas explícitas con una cuadrícula unidimensional de malla centrada de 10 nodos. El sistema físico simulado es una tubería horizontal de 4.135 m de longitud y 0.0508 m de diámetro. Los resultados numéricos se compararon con datos experimentales de Doron y col. (1987) y Doron y Barnea (1993), encontrándose una comparación satisfactoria entre los perfiles medidos y los simulados.

## 2. Descripción del modelo conceptual

Considérese el flujo bifásico sólido-líquido en una tubería horizontal. Si el gasto de flujo de mezcla es alto, todas las partículas sólidas viajarán suspendidas en un patrón de flujo bifásico disperso. Si el gasto de flujo se reduce, las partículas sólidas cuya densidad sea más grande que el líquido que las transporta, tienden a sedimentarse y aglomerarse en el fondo de la tubería, formando un lecho móvil, arriba del cual fluye una mezcla heterogénea. Este comportamiento llevó al modelo de dos capas de Doron y col. (1987). Una reducción mayor del gasto causa que la altura de la cama móvil se incremente mientras que su velocidad disminuye. De acuerdo con el modelo de dos capas el lecho llega a ser estacionario cuando la suma de las fuerzas de arrastre actuando sobre el lecho es menor que la suma de las fuerzas que se oponen al movimiento del lecho. Aunque el modelo de dos capas funciona bastante bien para el flujo con lecho móvil, falla en la mayoría de los casos para predecir la existencia de un lecho estacionario, el cual sí ha sido observado experimentalmente (Doron y Barnea, 1993).

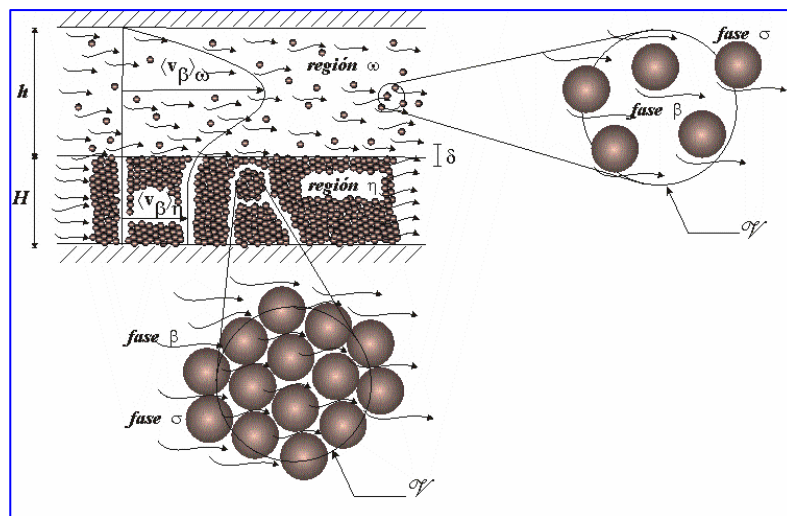


Fig. 1. Modelo conceptual

El modelo conceptual, que se muestra en la Figura 1, consta de dos regiones: la región superior  $\omega$  y la región inferior  $\eta$ . La región  $\omega$  es un flujo bifásico disperso sólido-líquido, en la cual la fase sólida  $\sigma$  viaja dispersa en la fase líquida  $\beta$  continua. La región inferior  $\eta$  es una cama de recortes estacionaria, la cual se considera como un medio poroso, donde la fase líquida  $\beta$  fluye a través de los espacios vacíos de la fase sólida  $\sigma$ . La longitud característica de cada región ( $h, H$ ) es mucho mayor que el tamaño del volumen promedio  $V$ , que a su vez es mucho mayor que el tamaño individual de los recortes.

Las diferencias del modelo de dos regiones que se propone en este trabajo con los modelos de dos y tres capas existentes, son que es un modelo matemático riguroso donde se trabajan las fases de manera separada en cada región y para el caso del lecho estacionario esto permite que el líquido pueda viajar a través de los intersticios que forman los sólidos del medio poroso.

## 3. Metodología

El punto de partida para la obtención del modelo de dos regiones son las ecuaciones de conservación locales e instantáneas en tres dimensiones y régimen transitorio de masa y cantidad de movimiento para cada una de las fases en cada región, así como las condiciones iniciales, de frontera, de frontera interfacial y de salto interfacial de masa y cantidad de movimiento. Dichas ecuaciones y condiciones están dadas por:

*i) Para la región  $\omega$  (Salazar-Mendoza y col., 2004)*

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_\beta = 0 \quad \text{en la fase } \beta \quad (1)$$

$$\rho_\beta \left[ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_\beta + \nabla \cdot (\mathbf{v}_\beta \mathbf{v}_\beta) \right] = -\nabla p_\beta + \nabla \cdot \mathbf{T}_\beta + \rho_\beta \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_\sigma = 0 \quad \text{en la fase } \sigma \quad (3)$$

$$\rho_\sigma \left[ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_\sigma + \nabla \cdot (\mathbf{v}_\sigma \mathbf{v}_\sigma) \right] = -\nabla p_\sigma + \nabla \cdot \mathbf{T}_\sigma + \rho_\sigma \mathbf{g} \quad (4)$$

*ii) Para la región  $\eta$  (Ochoa-Tapia y Whitaker, 1995)*

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_\beta = 0 \quad \text{en la fase } \beta \quad (5)$$

$$0 = -\nabla p_\beta + \rho_\beta \mathbf{g} + \mu_\beta \nabla^2 \mathbf{v}_\beta \quad (6)$$

*iii) Condiciones de salto interfacial (Ishii, 1975)*

$$(\mathbf{v}_k - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n}_{km} = 0 \quad \text{en } A_{km} \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{k=\beta,\sigma \\ k \neq m}} (-p_k \mathbf{I} + \mathbf{T}_k) \cdot \mathbf{n}_{km} = 0 \quad \text{en } A_{km} \quad (8)$$

en las cuales  $\rho$ ,  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{T}$  son variables locales que representan a las densidades, los vectores de velocidad y el tensor de esfuerzos total (laminar y turbulento), respectivamente;  $p$  es la presión,  $\mathbf{g}$  es el vector aceleración de la gravedad,  $\mathbf{w}$  es el vector de velocidad interfacial,  $\mathbf{n}_{km}$  es el vector unitario normal dirigido de la fase  $k$  a la fase  $m$ , para  $k$  y  $m = \beta, \sigma$  con  $k \neq m$ . La presión de la fase sólida,  $p_\sigma$  en la Ec. (4), se debe a efectos cinéticos y de colisión (Huilin y Gidaspow, 2003).

Después de aplicar el método de promediado en volumen a las Ecs. (1) a (6) para derivar de manera rigurosa las ecuaciones de transporte promediadas en volumen para cada una de las regiones, se obtiene que:

*i) El modelo de fases para la región  $\omega$  es (Salazar-Mendoza y col., 2004):*

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_\beta + \langle \mathbf{v}_\beta \rangle^\beta \cdot \nabla \varepsilon_\beta + \varepsilon_\beta \nabla \cdot \langle \mathbf{v}_\beta \rangle^\beta = 0 \quad \text{en la fase } \beta \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho_\beta \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_\beta \langle \mathbf{v}_\beta \rangle^\beta) + \rho_\beta \nabla \cdot (\varepsilon_\beta \langle \mathbf{v}_\beta \rangle^\beta \langle \mathbf{v}_\beta \rangle^\beta) \\ + \rho_\beta \nabla \cdot \langle \tilde{\mathbf{v}}_\beta \tilde{\mathbf{v}}_\beta \rangle + \rho_\beta \nabla \cdot \langle \mathbf{v}_\beta \mathbf{v}_\beta \rangle_{exc} = \\ - \varepsilon_\beta \nabla \langle p_\beta \rangle^\beta + \varepsilon_\beta \nabla \cdot \varepsilon_\beta^{-1} \langle \mathbf{T}_\beta \rangle + \varepsilon_\beta \rho_\beta \mathbf{g} + \mathbf{M}_{\beta\sigma} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_\sigma + \langle \mathbf{v}_\sigma \rangle^\sigma \cdot \nabla \varepsilon_\sigma + \varepsilon_\sigma \nabla \cdot \langle \mathbf{v}_\sigma \rangle^\sigma = 0 \quad \text{en la fase } \sigma \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \rho_\sigma \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_\sigma \langle \mathbf{v}_\sigma \rangle^\sigma) + \rho_\sigma \nabla \cdot (\varepsilon_\sigma \langle \mathbf{v}_\sigma \rangle^\sigma \langle \mathbf{v}_\sigma \rangle^\sigma) \\ + \rho_\sigma \nabla \cdot \langle \tilde{\mathbf{v}}_\sigma \tilde{\mathbf{v}}_\sigma \rangle + \rho_\sigma \nabla \cdot \langle \mathbf{v}_\sigma \mathbf{v}_\sigma \rangle_{exc} = \\ - \varepsilon_\sigma \nabla \langle p_\sigma \rangle^\sigma + \varepsilon_\sigma \nabla \cdot \langle \mathbf{T}_\sigma \rangle^\sigma + \varepsilon_\sigma \langle \rho_\sigma \rangle^\sigma \mathbf{g} + \mathbf{M}_{\sigma\beta} \end{aligned} \quad (12)$$

donde el vector  $\mathbf{M}_{\beta\sigma}$  se define como:

$$\begin{aligned}\mathbf{M}_{\beta\sigma} &= \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \mathbf{n}_{\beta\sigma} \cdot [-\mathbf{I}\tilde{p}_\beta|_{\mathbf{x}+\mathbf{y}} + \tilde{\mathbf{T}}_\beta|_{\mathbf{x}+\mathbf{y}}] dA \\ &+ \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \mathbf{n}_{\beta\sigma} \cdot [-\mathbf{I}(\langle p_\beta \rangle^\beta|_{\mathbf{x}+\mathbf{y}} - \langle p_\beta \rangle^\beta|_{\mathbf{x}})] dA \\ &+ \frac{1}{V} \int_{A_{\beta\sigma}} \mathbf{n}_{\beta\sigma} \cdot [(\langle \mathbf{T}_\beta \rangle^\beta|_{\mathbf{x}+\mathbf{y}} - \langle \mathbf{T}_\beta \rangle^\beta|_{\mathbf{x}})] dA\end{aligned}\quad (13)$$

y representa la fuerza interfacial por unidad de volumen aplicada en la fase  $\beta$ . Similarmente, el vector  $\mathbf{M}_{\sigma\beta}$  representa la fuerza interfacial por unidad de volumen aplicada en la fase  $\sigma$ .

ii) El modelo promedio para la región  $\eta$  es (Ochoa-Tapia y Whitaker, 1995):

$$\nabla \cdot \langle \mathbf{v}_\beta \rangle = 0 \quad (14)$$

$$0 = -\varepsilon_\beta \nabla \langle p_\beta \rangle^\beta + \varepsilon_\beta \rho_\beta \mathbf{g} + \mu_\beta \nabla^2 \langle \mathbf{v}_\beta \rangle - \mu_\beta \Phi_\beta \quad (15)$$

donde al término viscoso de la Ec. (15) se le conoce como la primera corrección de Brinkman. Además se define que:

$$\mu_\beta \Phi_\beta = -\frac{1}{V_\beta} \int_{A_{\beta\sigma}} \mathbf{n} \cdot [-\mathbf{I}(p_\beta|_{\mathbf{x}+\mathbf{y}} - \langle p_\beta \rangle^\beta|_{\mathbf{x}}) + \mu_\beta (\nabla \mathbf{v}_\beta|_{\mathbf{x}+\mathbf{y}} - \nabla \langle \mathbf{v}_\beta \rangle^\beta|_{\mathbf{x}})] dA \quad (16)$$

para  $\Phi_\beta$ . Whitaker (1986) derivó una expresión especialmente simple para un medio poroso homogéneo y está dada por:

$$\Phi_\beta = \mathbf{K}_\beta^{-1} \cdot \langle \mathbf{v}_\beta \rangle \quad \text{para la región homogénea } \eta \quad (17)$$

donde  $\mathbf{K}_\beta$  representa el tensor de permeabilidad de la Ley de Darcy, y se utiliza la ecuación de Blake-Kozeny (Bird y col., 2002) para expresarse como:

$$K_{zz} = \frac{d_p^2 \varepsilon_\beta^3}{\lambda(1-\varepsilon_\beta)^2} \quad (18)$$

donde  $\mathbf{K}_\beta = K_{zz} \mathbf{e}_z \mathbf{e}_z$ ,  $d_p$  es el diámetro de partícula efectivo y  $\lambda$  es una constante obtenida de pruebas de laboratorio. Ochoa y Whitaker (1995) y Whitaker (1996) reportan que  $\lambda = 180$  mientras que Bird y col. (2002) reportan que  $\lambda = 150$ .

En el modelo de fases separadas de la región  $\omega$  se definieron los *términos de exceso* de una manera similar a la de Ochoa y Whitaker (1997), para evitar imponer restricciones de escala de longitud. Esta forma no-local de las ecuaciones de transporte promediadas en volumen las hace válidas en la frontera interregional  $\omega$ - $\eta$ . Fuera de la frontera interregional  $\omega$ - $\eta$ , la forma no-local de las ecuaciones de transporte promedio se reducen a las clásicas ecuaciones de transporte promediadas en volumen cuando se imponen las siguientes restricciones de escala de longitud clásicas del método de promediado en volumen (Zanotti y Carbonell, 1984; Carbonell y Whitaker, 1984):  $\ell_\sigma, \ell_\beta \ll r_0 \ll h$ .

El siguiente paso es obtener un modelo de una ecuación para la región  $\omega$ , el cual considera al flujo sólido-líquido como un todo y no como dos fases separadas, y evidentemente es más simple que el modelo de fases separadas. Sin embargo para obtenerlo es necesario sumar las Ecs. (9) con (11) y (10) con (12) e introducir el principio de equilibrio hidrodinámico con las siguientes definiciones:

$$\{p\}_\omega = \varepsilon_\sigma \langle p_\sigma \rangle^\sigma + \varepsilon_\beta \langle p_\beta \rangle^\beta \quad (19)$$

$$\{\mathbf{v}\}_\omega = \langle \mathbf{v}_\sigma \rangle^\sigma = \langle \mathbf{v}_\beta \rangle^\beta \quad (20)$$



$$\rho_\omega = \varepsilon_\sigma \langle \rho_\sigma \rangle^\sigma + \varepsilon_\beta \langle \rho_\beta \rangle^\beta \quad (21)$$

$$\{\mathbf{T}\}_\omega = \langle \mathbf{T}_\sigma \rangle + \langle \mathbf{T}_\beta \rangle \quad (22)$$

Con estas consideraciones el modelo de una ecuación para la región  $\omega$  se puede escribir como:

$$\nabla \cdot \{\mathbf{v}\}_\omega = 0 \quad (23)$$

$$\rho_\omega \left( \frac{\partial}{\partial t} \{\mathbf{v}\}_\omega + \nabla \cdot (\{\mathbf{v}\}_\omega \{\mathbf{v}\}_\omega) \right) = -\nabla \{p\}_\omega + \nabla \cdot \{\mathbf{T}\}_\omega + \rho_\omega \mathbf{g} \quad (24)$$

Se hace notar que los términos de dispersión son cero al aplicar la Ec. (20) en las Ecs. (9) a (12); que las fuerzas interfaciales son iguales y opuestas por lo que se cancelan al sumar las Ecs. (10) y (12) y los términos de exceso son despreciables al imponerse las siguientes restricciones de escala de longitud:

$$l_\sigma = r_o \quad l_\beta = r_o \quad r_o^2 = L^2 \quad (25)$$

Por último, la formulación en tres dimensiones y dependiente del tiempo del modelo de dos regiones para el transporte de recortes de perforación en pozos horizontales, se compone de las Ecs. (26) a (29), y se obtiene al acoplar el modelo de una ecuación para la región  $\omega$  y el modelo promedio para la región  $\eta$  mediante términos de balance macroscópico de fuerzas de interacción entre regiones y pared (Doron y Barnea, 1993; Doron y col., 1987):

$$\nabla \cdot \{\mathbf{v}\}_\omega = 0 \quad (26)$$

$$\rho_\omega \left( \frac{\partial}{\partial t} \{\mathbf{v}\}_\omega + \nabla \cdot (\{\mathbf{v}\}_\omega \{\mathbf{v}\}_\omega) \right) = -\nabla \{p\}_\omega + \nabla \cdot \{\mathbf{T}\}_\omega + \rho_\omega \mathbf{g} - \left( \frac{\{\mathbf{T}\}_{\omega w} \cdot \mathbf{n}_{\omega w}}{D_{H\omega}} \right) - \left( \frac{\{\mathbf{T}\}_{\omega \eta} \cdot \mathbf{n}_{\omega \eta}}{D_{H\omega \eta}} \right) \quad (27)$$

$$\nabla \cdot \langle \mathbf{v}_\beta \rangle_\eta = 0 \quad (28)$$

$$0 = -\varepsilon_\beta \nabla \langle p_\beta \rangle_\eta^\beta + \varepsilon_\beta \rho_\beta \mathbf{g} + \mu_\beta \nabla^2 \langle \mathbf{v}_\beta \rangle_\eta - \mu_\beta \mathbf{K}_{\beta \eta}^{-1} \cdot \langle \mathbf{v}_\beta \rangle_\eta + \left( \frac{\{\mathbf{T}\}_{\omega \eta} \cdot \mathbf{n}_{\eta \omega}}{D_{H\omega \eta}} \right) \quad (29)$$

donde  $\{\mathbf{T}\}_{\omega w}$  es el esfuerzo de pared en la región  $\omega$ ,  $\{\mathbf{T}\}_{\omega \eta}$  es el esfuerzo interregional entre las regiones  $\omega$  y  $\eta$ ,  $\mathbf{n}_{\omega w} (= -\mathbf{n}_{w\omega})$  es el vector unitario normal dirigido de la región  $\omega$  a la pared  $w$  y  $\mathbf{n}_{\eta \omega} (= -\mathbf{n}_{\omega \eta})$  es el vector unitario normal dirigido de la región  $\eta$  a la región  $\omega$ , como se ilustra en la Figura 2;  $D_{H\omega}$  es el diámetro hidráulico de la región  $\omega$  y  $D_{H\omega \eta}$  es el diámetro hidráulico interregional.

El conjunto de Ecs. (26) a (29) se complementa con la siguiente condición de frontera interregional, la cual es:

$$\text{C.F.1} \quad \{p\}_\omega = \langle p_\beta \rangle_\eta^\beta, \quad \text{en} \quad A_{\omega \eta} \quad (30)$$

Por otra parte, se debe hacer notar que en la frontera interregional  $\omega-\eta$ , las fracciones de volumen de líquido y recortes,  $\varepsilon_\beta$  y  $\varepsilon_\sigma$  respectivamente, presentan cambios significativos en una distancia igual al radio del volumen promedio  $r_o$ , como se ilustra en la Figura 3. En esta figura,  $\delta$  representa el espesor de la frontera interregional  $\omega-\eta$  donde existen cambios rápidos en  $\varepsilon_\beta$  y  $\varepsilon_\sigma$ . También en la frontera interregional  $\omega-\eta$ ,

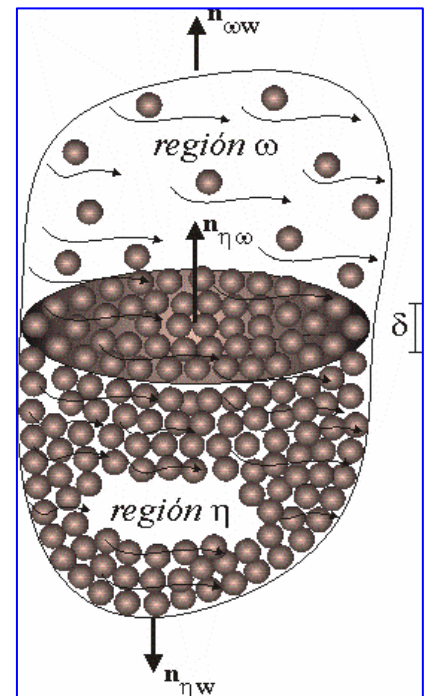


Fig. 2. Vectores unitarios

la Figura 4 muestra la continuidad de los vectores de velocidad de cada región. Por lo que en futuros desarrollos nos enfocaremos en encontrar las condiciones de salto interregional entre las regiones  $\omega$  y  $\eta$  para el transporte de recortes de perforación.

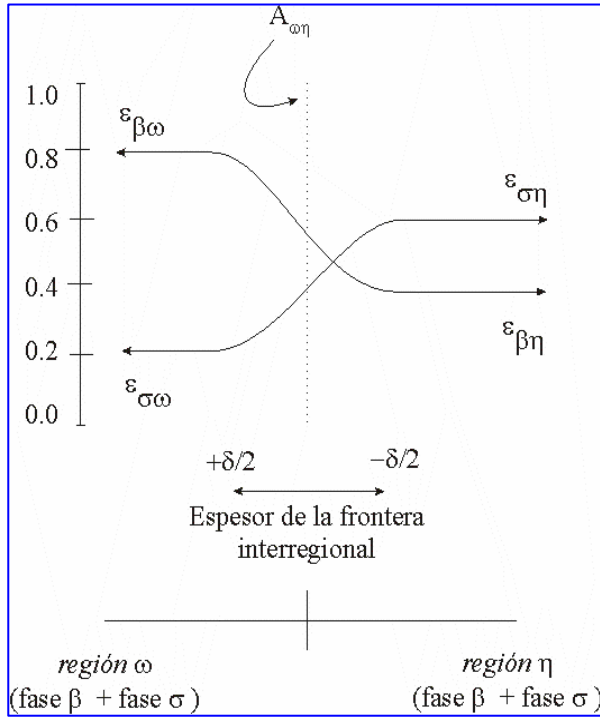


Fig. 3. Variación de la fracción de volumen en la vecindad de la zona no-homogénea.

La formulación unidimensional y dependiente del tiempo del modelo de dos regiones para el transporte de recortes de perforación, que es la que se resuelve numéricamente en este trabajo, se obtiene al realizar el producto punto de los vectores de las Ecs. (26) a (29) con el vector unitario  $e_z$  en la dirección de la coordenada axial  $z$  de un sistema de coordenadas cilíndricas y suponer flujo incompresible:

$$\frac{d}{dz} \{v_z\}_\omega = 0 \quad (31)$$

$$\rho_\omega \frac{\partial}{\partial t} \{v_z\}_\omega + \frac{d}{dz} \{p_z\}_\omega = -\frac{\{\tau_{zz}\}_{\omega\omega}}{D_{H\omega}} - \frac{\{\tau_{zz}\}_{\omega\eta}}{D_{H\omega\eta}} \quad (32)$$

$$\frac{d}{dz} \langle v_{\beta z} \rangle_\eta = 0 \quad (33)$$

$$\frac{d}{dz} \varepsilon_\beta \langle p_{\beta z} \rangle_\eta^\beta = -\mu_\beta K_{\beta\eta zz}^{-1} \langle v_{\beta z} \rangle_\eta + \frac{\{\tau_{zz}\}_{\omega\eta}}{D_{H\omega\eta}} \quad (34)$$

donde los esfuerzos de pared e interregional se expresan como:

$$\{\tau_{zz}\}_{\omega\omega} = \frac{1}{2} f_\omega \rho_\omega (\{v_z\}_\omega)^2 \text{ y}$$

$$\{\tau_{zz}\}_{\omega\eta} = \frac{1}{2} f_{\omega\eta} \rho_\omega (\{v_z\}_\omega - \langle v_{\beta z} \rangle_\eta)^2 \quad (35)$$

y los factores de fricción se evalúan de

$$f_\omega = \alpha \text{Re}_\omega^{-\gamma} \quad (36)$$

y de la fórmula modificada de Colebrook (Televantos y col., 1979)

$$\frac{1}{\sqrt{2f_{\omega\eta}}} = -0.86 \ln \left( \frac{\frac{d_p}{D_{H\omega}}}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}_\omega \sqrt{2f_{\omega\eta}}} \right) \quad (37)$$

donde los coeficientes para flujo turbulento son:  $\alpha = 0.046$ ;  $\gamma = 0.2$  y para flujo laminar son:  $\alpha = 16$ ;  $\gamma = 1$ .

Nótese sin embargo que en la configuración de flujo que se muestra en la Figura 1, para la región superior no se presenta el flujo laminar.

El número de Reynolds se define como:

$$\text{Re}_\omega = \frac{\rho_\omega \{v_z\}_\omega D_{H\omega}}{\mu_\omega} \quad (38)$$

donde la densidad es:

$$\rho_\omega = \varepsilon_{\sigma\omega} \rho_{\sigma\omega} + \varepsilon_{\beta\omega} \rho_{\beta\omega} \quad (39)$$

y la viscosidad de la mezcla en la región superior es calculada de acuerdo con Ishii y Mishima (1984)

$$\mu_{\omega} = \mu_{\beta\omega} \left(1 - \frac{\varepsilon_{\sigma\omega}}{0.65}\right)^{-1.625} \quad (40)$$

La fracción de volumen de recortes total es:

$$\varepsilon_{\sigma} = 1 - \varepsilon_{\beta} = \varepsilon_{\sigma\omega} + \varepsilon_{\sigma\eta} \quad (41)$$

mientras que la fracción de volumen de líquido total es:

$$\varepsilon_{\beta} = 1 - \varepsilon_{\sigma} = \varepsilon_{\beta\omega} + \varepsilon_{\beta\eta} \quad (42)$$

Es común encontrar la suposición de que, para un flujo bifásico con lecho estacionario, en la región inferior las partículas son esféricas y se acomodan en un empaque cúbico, por lo que el máximo empaquetamiento es  $\varepsilon_{\sigma\eta} = 0.52$ . Sin embargo, en este trabajo se introduce la definición de esfericidad de partículas con un valor de 0.8, lo que permite asumir que la fracción de volumen de recortes máxima en la región inferior  $\varepsilon_{\sigma\eta}$  es constante e igual a 0.65. Esto también se utilizó en la fórmula de la Ec. (40), para calcular la viscosidad de la mezcla en la región superior.

Otra suposición común es que la fracción de volumen de recortes en la región superior  $\varepsilon_{\sigma\omega}$  es igual a la fracción de volumen de recortes total. Sin embargo, como se observa en la Figura 5, ésta es función de la fracción de volumen de recortes total del empaquetamiento máximo en la región inferior y de la relación  $H/D$ . En este trabajo se expresa como sigue:

$$\varepsilon_{\sigma\omega} = (\varepsilon_{\sigma} A + \varepsilon_{\sigma\eta} A_{\eta}) / A_{\omega} \quad (43)$$

El diámetro hidráulico de la región superior es:

$$D_{H\omega} = \frac{4A_{\omega}}{S_{\omega} + S_{\omega\eta}} \quad (44)$$

y el diámetro hidráulico interregional es:

$$D_{H\omega\eta} = \frac{4A_{\omega}}{S_{\omega\eta}} \text{ para la región } \omega \text{ y } D_{H\omega\eta} = \frac{4A_{\eta}}{S_{\omega\eta}} \text{ para la región } \eta \quad (45)$$

La forma discretizada de las Ecs. (31) a (34) se puede escribir de manera matricial como

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (46)$$

donde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\Delta t} & \frac{1}{\rho_{\omega}\Delta z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

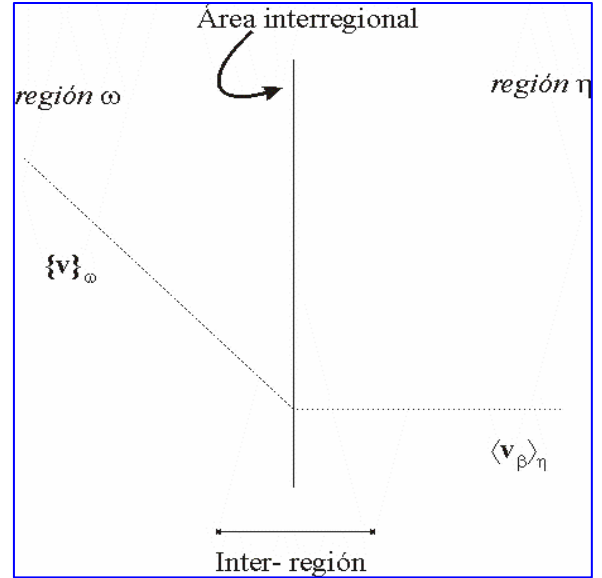


Fig. 4. Continuidad de la velocidad promedio especial global.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \{v_z\}_{\omega i}^{t+\Delta t} \\ \{p_z\}_{\omega i}^{t+\Delta t} \\ \langle v_{\beta z} \rangle_{\eta i}^{t+\Delta t} \\ \langle p_{\beta z} \rangle_{\eta i}^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \{v_z\}_{\omega i-1}^{t+\Delta t} \\ \frac{\{v_z\}_{\omega i}^t}{\Delta t} + \frac{\{p_z\}_{\omega i-1}^{t+\Delta t}}{\rho_\omega \Delta z} - \frac{f_\omega \rho_\omega (\{v_z\}_{\omega i}^t)^2}{2\rho_\omega D_{H\omega}} - \frac{f_{\omega\eta} \rho_\omega (\{v_z\}_{\omega i}^t - \langle v_{\beta z} \rangle_{\eta i}^t)^2}{2\rho_\omega D_{H\omega\eta}} \\ \langle v_{\beta z} \rangle_{\eta i-1}^{t+\Delta t} \\ \langle p_{\beta z} \rangle_{\eta i-1}^{t+\Delta t} - \mu_\beta K_{\beta\eta zz}^{-1} \langle v_{\beta z} \rangle_{\eta i}^t \Delta z + \frac{f_{\omega\eta} \rho_\omega (\{v_z\}_{\omega i}^t - \langle v_{\beta z} \rangle_{\eta i}^t)^2 \Delta z}{2D_{H\eta\omega}} \end{bmatrix} \quad (49)$$

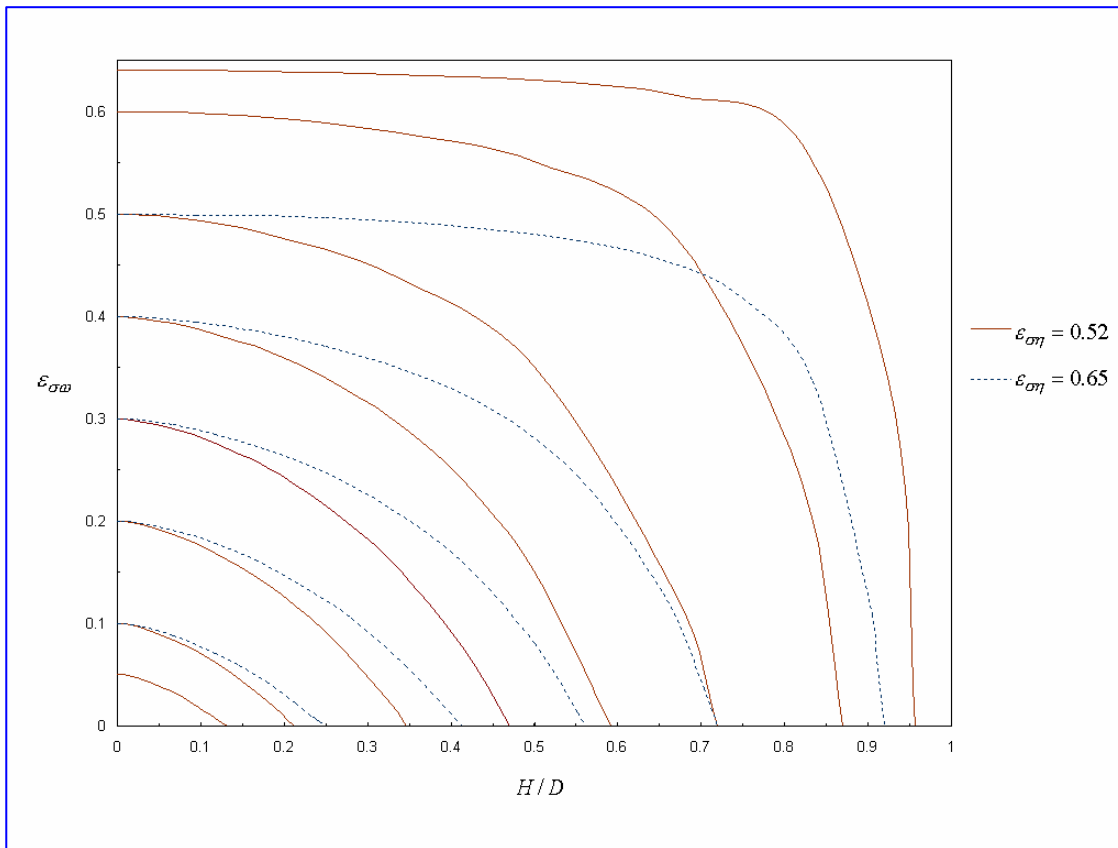


Fig. 5. Comportamiento de la fracción de volumen de recortes en la región superior como función de la fracción de volumen de recortes total, del empaquetamiento máximo en la región inferior y la relación H/D.

Utilizando algunas condiciones de operación y las propiedades físicas de las dos fases, el sistema de Ecs. (47) a (49) se resuelve para obtener los perfiles de presión y velocidad en cada una de las regiones como función de la posición y el tiempo.

También se calculan los parámetros geométricos como lo son: el área total,  $A = \pi r_a^2$ , donde  $r_a$  es el radio de la tubería, el perímetro mojado total,  $S = 2\pi r_a$ , y el diámetro hidráulico total,  $D_H = 2r_a$ . Para ángulos

$0 \leq \theta \leq 90^\circ$  donde  $\theta$  es el ángulo de contacto del lecho estacionario con la tubería de acuerdo a la Figura 6, el área de la región superior es  $A_\omega = A - A_\eta$ , el área de la región inferior es  $A_\eta = r_a^2(\theta - \text{sen}\theta \cos\theta)$ , el perímetro mojado de la región superior es  $S_\omega = S - S_\eta$ , el perímetro mojado de la región inferior es  $S_\eta = 2r_a\theta$ , el perímetro mojado interregional es  $S_{\omega\eta} = 2r_a \text{sen}\theta$  y la altura de la región inferior es  $H = r_a(1 - \cos\theta)$ . Para ángulos  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ , el área de la región inferior es  $A_\eta = A - A_\omega$ , el área de la región superior es  $A_\omega = r_a^2(\alpha - \text{sen}\alpha \cos\alpha)$ , el perímetro mojado de la región inferior es  $S_\eta = S - S_\omega$ , el perímetro mojado de la región superior es  $S_\omega = 2r_a\alpha$ , el perímetro mojado interregional es  $S_{\omega\eta} = 2r_a \text{sen}\alpha$ , la altura de la región superior es  $h = r_a(1 - \cos\alpha)$  y la altura de la región inferior es  $H = 2r_a - h$ .

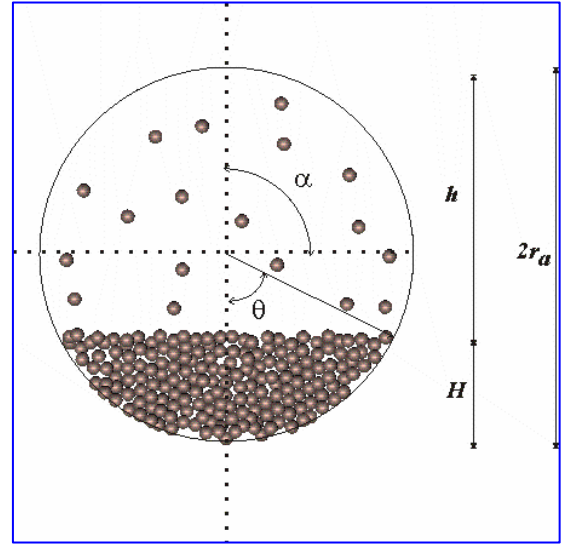


Fig. 6. Ángulos de contacto en el modelo de dos regiones.

El gradiente de presión adimensional en estado estable  $(\nabla P)^*$  (expresado en términos de metros de agua por metro de longitud de tubería,  $m/m$ ) se calcula así:

$$(\nabla P)^* = \frac{(P_{ent} - (P_{\omega sal} A_\omega + P_{\eta sal} A_\eta))}{\rho_{agua} g_r L A} \quad (50)$$

donde  $P_{ent}$  es la presión de entrada,  $P_{\omega sal}$  es la presión de salida en la región superior,  $P_{\eta sal}$  es la presión de salida en la región inferior,  $\rho_{agua}$  es la densidad del agua,  $g_r$  es la aceleración de la gravedad en la dirección radial y  $L$  es la longitud de la tubería.

#### 4. Resultados y discusión

La principal característica del modelo de dos regiones es que predice el comportamiento del flujo bifásico sólido líquido con un lecho estacionario. La Figura 7 muestra el comportamiento del gradiente de presión adimensional en estado estable  $(\nabla P)^*$  como función de la velocidad de mezcla  $V$ , la fracción de volumen de recortes total  $FVRT = \varepsilon_\sigma$  y la relación entre la altura del lecho estacionario y el diámetro de la tubería  $H/D$ . Las líneas continuas representan los resultados teóricos obtenidos en el presente trabajo, los signos +,  $\diamond$ ,  $\Delta$ ,  $\times$  representan los puntos de datos experimentales medidos por Doron y Barnea (1993) y el signo \* representa los puntos de datos experimentales medidos por Doron y col. (1987).

En la Figura 7 se observa que para gastos de flujo de mezcla bajos los datos experimentales medidos muestran el perfil de una catenaria, sin embargo los puntos no corresponden a una misma altura de lecho estacionario, de acuerdo a lo calculado con el modelo de dos regiones. Este es un resultado importante para el entendimiento del fenómeno a bajas velocidades, porque para fracciones de volumen de recortes total constantes, por ejemplo  $FVRT = 0.042$ , se tiene que conforme se aumenta el gasto de flujo de mezcla la altura del lecho estacionario disminuye. Si se pudiera experimentalmente mantener constante la altura del lecho estacionario, se llegaría a la velocidad límite calculada con el modelo de dos regiones donde el patrón

de flujo con depósito estacionario dejaría de existir, y de acuerdo a trabajos previos este cambiaría a un patrón de flujo con lecho móvil.

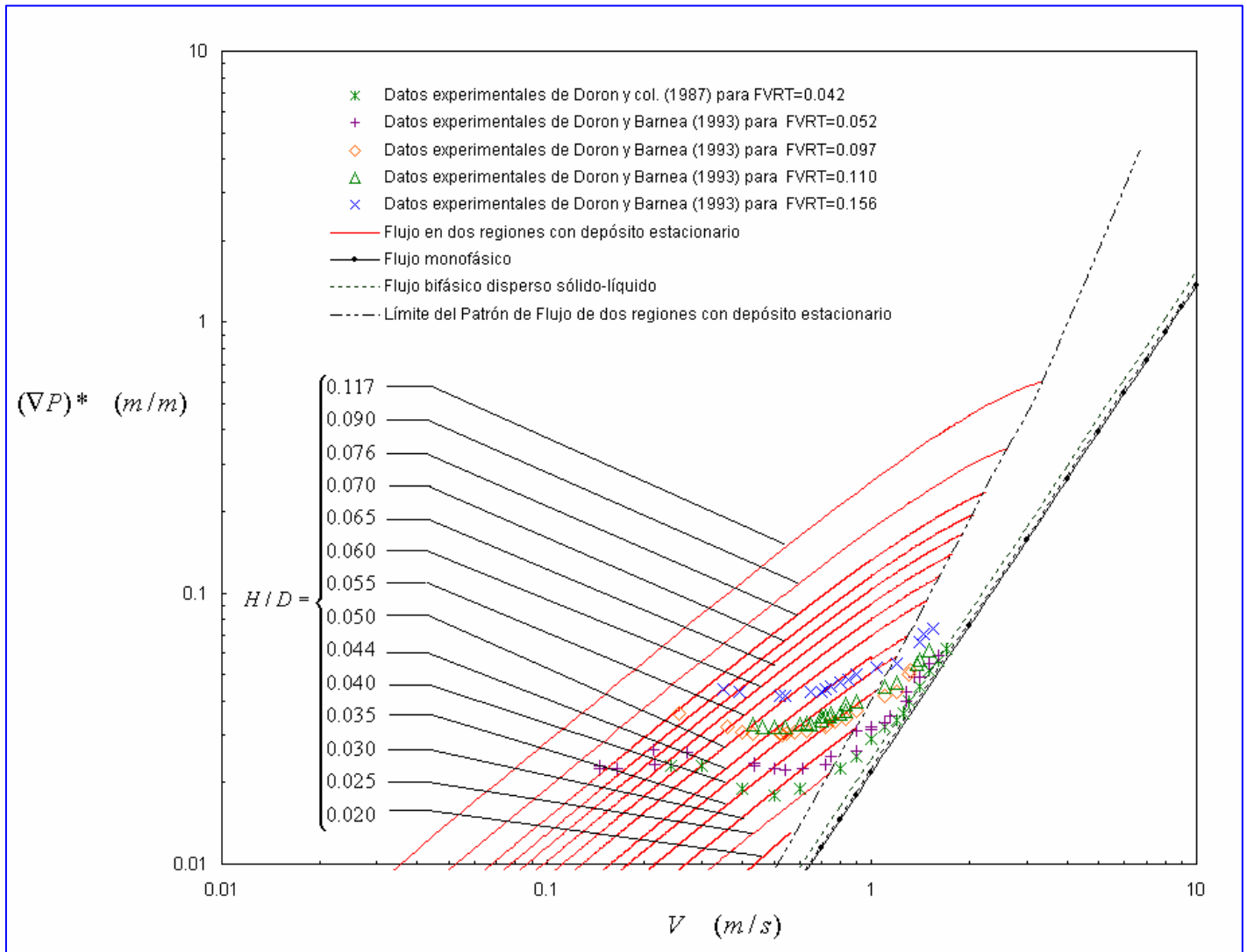


Fig. 7. Comportamiento del gradiente de presión adimensional de un flujo sólido-líquido horizontal con un lecho estacionario como función de la velocidad de mezcla; la fracción de volumen de recortes total y la relación  $H/D$ .

## 5. Conclusiones

Se obtuvo un modelo matemático unidimensional y dependiente del tiempo de dos regiones para el transporte de recortes en pozos horizontales, Ecs. (31) a (34), a partir de la derivación teórica de los modelos promedio para cada una de las regiones, que satisfacen las restricciones de escala de longitud clásicas del método de promediado en volumen (Zanotti y Carbonell, 1984; Carbonell y Whitaker, 1984). El propósito del modelo es predecir el comportamiento del gradiente de presión como función de la velocidad de mezcla, la fracción de volumen de recortes total y la relación de la altura del lecho estacionario y del diámetro de la tubería, los cuales representan los parámetros principales que participan en el mecanismo de transporte de recortes durante la perforación horizontal.

## Agradecimientos

Se agradecen las Becas-Crédito para el desarrollo de este trabajo (Conacyt-67148; SEP-G93027; IMP-13934). También se agradece a la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa y al Instituto de Investigaciones Eléctricas el apoyo para el desarrollo y publicación de este trabajo.

## Referencias

- Babcock, H.A. (1971). Heterogeneous flow of heterogeneous solids. In: *Advances in Solid Liquid Flow in Pipes and its Applications* (Edited by Zandi, I.), pp. 125-148, Pergamon Press, Oxford.
- Bird, R.B., W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot (2002). *Transport Phenomena*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Carbonell, R.G. and S. Whitaker, (1984). Heat and mass transport in porous media, In: *Mechanics of Fluids in Porous Media*, Edited by: J. Bear and M. Y. Corapcioglu, Martinus Nijhoff, Bruselas. Bélgica.
- Carleton, A.J., R.J. French, J.G. James, B.A. Broad, and M. Streat (1978). Hydraulic transport of large particles using conventional and high concentration conveying. *Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes*, Hanover, Paper D2, pp. 15-28.
- Chhabra, R.P. and J.F. Richardson (1983). Hydraulic transport of coarse gravel particles in a smooth horizontal pipe. *Chem. Eng. Res. Des.*, **61**, pp. 313-317.
- Cho, H., S.N. Shah, and S.O. Osisanya. (2000). A three-layer model for cuttings transport with coiled tubing horizontal drilling. SPE Paper 63269, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, TX, October 1-4.
- Doron, P. and D. Barnea (1993). A three-layer model for solid-liquid flow in horizontal pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, **19** (6), pp. 1029-1043.
- Doron, P. and D. Barnea (1995). Pressure drop and limit deposit velocity for solid-liquid flow in pipes. *Chem. Eng. Sci.*, **50** (10), pp. 1595-1604.
- Doron, P., D. Granica, and D. Barnea (1987). Slurry flow in horizontal pipes - Experimental and modeling results. *Int. J. Multiphase Flow*, **13** (4), pp. 535-547.
- Doron, P., M. Simkhis, and D. Barnea (1997). Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, **23** (2), pp. 313-323.
- Durand, R. (1953). Basic relationships of the transportation of solids in pipes – Experimental research. *Proc. 5<sup>th</sup> International Hydraulics Convention*, Minneapolis, Minn., pp. 89-103.
- Espinosa-Paredes, G., O. Cazarez-Candia, A. García-Gutiérrez, and J. Martínez-Méndez (2002). Void propagation in a bubbly two-phase flow with expansion effects. *Annals of Nuclear Energy*, **29**, pp. 1261-1298.
- Gillies, R.G., C.A. Shook, and K.C. Wilson (1991). An improved two layer model for horizontal slurry pipeline flow. *Can. J. Chem. Eng.*, **69**, pp. 173-178.

- Huilin, L. and D. Gidaspow (2003). Hydrodynamics of binary fluidization in a riser: CFD simulation using two granular temperatures. *Chem. Eng. Sci.*, **58**, pp. 3777-3792.
- Ishii, M. (1975). *Thermo-Fluid dynamic theory of two phase flow*. Ed. Eyrolles, París, Francia.
- Ishii, M. and K. Mishima (1984). Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations. *Nuclear Engineering and Design*, **82**, pp. 107-126.
- Kunii, D. and O. Levenspiel (1991). *Fluidization Engineering*, Second Edition. Butterworth-Heinemann Reed Publishing, Boston, Mass., USA.
- Newitt, D.M., J.F. Richardson, M. Abbott, and R.B. Turtle (1955). Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes. *Trans. Instn Chem. Eng.*, **33**, pp. 93-113.
- Noda, K., H. Takahashi, and T. Kawashima (1984). Relation between behavior of particles and pressure loss in horizontal pipes. *Proc. 9<sup>th</sup> International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes*, Rome, Paper D4, pp. 191-205.
- Ochoa-Tapia, J.A. and S. Whitaker (1995). Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid I: Theoretical developments. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **38**, pp. 2635-2646.
- Ochoa-Tapia, J.A. and S. Whitaker (1997). Heat transfer at the boundary between a porous medium and homogeneous fluid. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **40**, pp. 2691-2707.
- Ramadan, A., P. Skalle, S.T. Johansen, J. Svein, and A. Saasen (2001). Mechanistic model for cuttings removal from solid beds in inclined channels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **30**, pp. 129-141.
- Salazar-Mendoza, R., G. Espinosa-Paredes, A. García, O. Cazarez-Candia, A. Díaz, and A. Vázquez (2004). Averaging Model for Cuttings Transport in Horizontal Drilling, *Geothermal Resources Council Transactions* 28, August 29-September 1, Indian Wells, CA., U.S.A., pp. 169-175.
- Santana, M., A.L. Martins, and A. Sales (1998). Advances in the modeling of the stratified flow of drilling cuttings in high angle and horizontal wells. *SPE International Petroleum Conference and Exhibition*, Villahermosa, Tabasco, México, SPE Paper 39890.
- Televantos, Y., C. Shook, A. Carleton, and M. Streat (1979). Flow of slurries of coarse particles at high solids concentrations. *Can. J. Chem. Eng.*, **57**, pp. 255-262.
- Turian, R.M. and T.F. Yuan (1977). Flow of slurries in pipelines. *AIChE J.*, **23**, pp. 232-243.
- Wallis, G.B. (1969). *One-Dimensional Two-Phase Flow*. McGraw-Hill, Inc., New York.
- Whitaker, S. (1986). Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law. *Transport in Porous Media*, **1**, pp. 3-25.
- Whitaker, S. (1996). The Forchheimer Equation: A theoretical development. *Transport in Porous Media*, **25**, pp. 27-61.



- Whitaker, S. (1999). *The Method of Volume Averaging*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- Wilson, K.C. (1976). A unified physically-based analysis of solid-liquid pipeline flow. *Proc. 4<sup>th</sup> International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes*, Banff, Alberta, Paper A1, pp. 1-16.
- Wilson, K.C. (1988). Evaluation of interfacial friction for pipeline transport models. *Proc. 11<sup>th</sup> Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes*, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, U.K., pp. 107-116.
- Zandi, I. and G. Govatos (1967). Heterogeneous flow of solid in pipelines. *Proc. ASCE, J. Hydraul. Div.*, **93** (HY3), pp. 145-159.
- Zanotti, F. and R.G. Carbonell (1984). Development of transport equations for multiphase systems I: Generalized development for two-phase systems. *Chem. Eng. Sci.*, **39**, pp. 263-278.

# Análisis de la automatización y del control de las condiciones de producción de los pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, México

<sup>1</sup>Isaac Murillo-Zamora, <sup>2</sup>Juan de Dios Ocampo Díaz y <sup>3</sup>Gilberto de la Peña Reyna

<sup>1</sup>CFE, Residencia General de Cerro Prieto, Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26,5, Mexicali, BC, México.

E-mail: [isaac.murillo@cfe.gob.mx](mailto:isaac.murillo@cfe.gob.mx)

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería Mexicali, B.C., México. E-mail:

[juandios@telnor.net](mailto:juandios@telnor.net)

<sup>3</sup>CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, Morelia, Mich.,

México. E-mail: [gilberto.delapena@cfe.gob.mx](mailto:gilberto.delapena@cfe.gob.mx)

---

## Resumen

A través de los 31 años de desarrollo del campo geotérmico de Cerro Prieto el número de pozos en operación así como la distancia entre ellos se ha estado incrementado. Ahora hay más de 150 pozos produciendo una cantidad de mezcla de agua y vapor a diferentes rangos, dependiendo de las características del yacimiento (presión, temperatura, profundidad, etc.) y de las condiciones de operación de las instalaciones superficiales (diámetros de placas de orificio obstruidos, presión de los separadores, etc.). Como resultado la CFE ha dado inicio a un plan de pruebas para llevar a cabo la automatización y control de las condiciones de operación de los pozos productores, e instalar un sistema con equipos para recolección de datos del campo, cuyos primeros resultados se presentan en este artículo.

**Palabras clave:** Control, automatización, recolección de datos, telemetría, Cerro Prieto, México.

## Analysis of the automation and control of the well production conditions in the Cerro Prieto geothermal field, Mexico

### Abstract

Through 31 years of development of the Cerro Prieto geothermal field, the number of wells in operation and the distances between them has been increasing. Now there are 150 wells producing a mixture of water and steam at different ratios, depending on the reservoir characteristics (pressure, temperature, depth, etc.) and the operation conditions in the superficial installations (obstructions in the orifice plates diameter, separator pressures, etc.). Therefore, CFE has started a pilot plan to handle the automation and control of the operating conditions of production wells, and to install a data production acquisition system. The initial results of the system are in this paper.

**Keywords:** Control, Automation, Data acquisition system, Telemetry, Cerro Prieto, Mexico.

---

## 1. Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto se localiza en el estado de Baja California, ubicado en el valle de Mexicali a 55 kilómetros al sureste de la frontera con Estados Unidos. Cerro Prieto es uno de los más grandes

campos geotérmicos del mundo, y empezó a ser explotado en 1973. Hoy en día, después de 31 años de explotación, cuenta con más de 250 pozos perforados a diferentes profundidades, de los cuales 150 de ellos son de producción y se encuentran distribuidos en áreas de producción identificadas como CP1, CP2, CP3 y CP4 (Fig. 1).

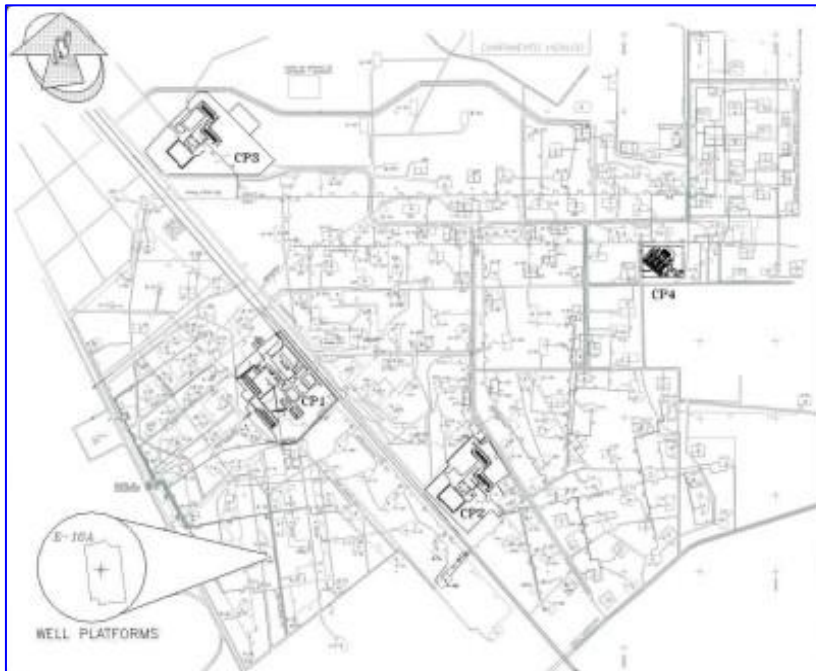


Fig. 1. Sectores del campo de Cerro Prieto

superficie a través de un pozo. Mientras el fluido va en ascenso por la tubería y accesorios del pozo, su presión decrece, el vapor se expande y parte del líquido se transforma en vapor. Una vez que el fluido llega a la superficie, debe ser procesado antes de utilizarlo como fluido de trabajo para las plantas generadoras de energía eléctrica.

Cada uno de los pozos productores del campo es caracterizado de manera individual. Son determinados por factores relacionados con la productividad del estrato en el yacimiento y por los del mismo pozo, como lo son su profundidad, longitud y diámetro de la tubería, condiciones mecánicas y de acabado. Ello es debido a que en el yacimiento se pueden encontrar diferentes rangos de temperatura, presión, entalpía, flujos y composiciones químicas del fluido. La Tabla 1 muestra los datos de producción para cada área de Cerro Prieto, tomados en diciembre del 2003.

## 2. Equipo típico superficial

Para poder extraer la energía del fluido almacenado en el yacimiento geotérmico, aquél debe ser conducido primero hacia la

Sector	No. de pozos productores	Vapor de alta presión (t/h)	Vapor de baja presión (t/h)	Producción de agua (t/h)	Producción de mezcla (t/h)
CP1	20	331.6	0	1,049.2	1,380.9
CP2	58	2,021.5	281.5	3,518.9	5,821.9
CP3	54	1,825.1	131.1	2,594.5	4,550.7
CP4	16	950.7	69.7	765.0	1,785.4
<b>Total</b>	<b>148</b>	<b>5,128.9</b>	<b>482.3</b>	<b>7,927.6</b>	<b>13,538.9</b>

Tabla 1. Características de los sectores de producción de Cerro Prieto

El proceso consiste básicamente en la separación del líquido (salmuera) y el vapor, utilizando equipo superficial e instalaciones montadas sobre la plataforma de cada uno de los pozos. Estos equipos incluyen básicamente: ensambles de válvulas (“árbol de navidad”), separadores de alta y baja presión, válvula esférica, tubería para la conducción de vapor, tubería para la conducción de salmuera, silenciador y sistemas de medición y monitoreo de datos de producción.

Los parámetros productivos que se miden usualmente en los equipos superficiales instalados en la plataforma de los pozos son los siguientes: presión del cabezal, presiones alta y baja en la separación, presión diferencial en líneas de vapor de alta y baja presión, presión en línea después de separadores y nivel de agua en separadores de alta y baja presión.

Actualmente la mayoría de los pozos cuentan con instalaciones para doble separación (Fig. 2).

Esto significa que incluyen un separador primario o separador de alta presión, y un separador secundario o de baja presión. El separador secundario es utilizado para extraer energía residual del agua separada, la cual se emplea para cubrir las necesidades de vapor de algunas de las unidades generadoras que admiten vapor de baja presión.

### 3. Equipo de automatización y control

El primer pozo seleccionado para instalar el equipo de automatización y control fue el Pozo 227, ubicado en el área de producción de CP2. El control de la producción se llevó a cabo mediante accesorios compatibles de tecnología *modbus*, como las válvulas con actuadores neumáticos.

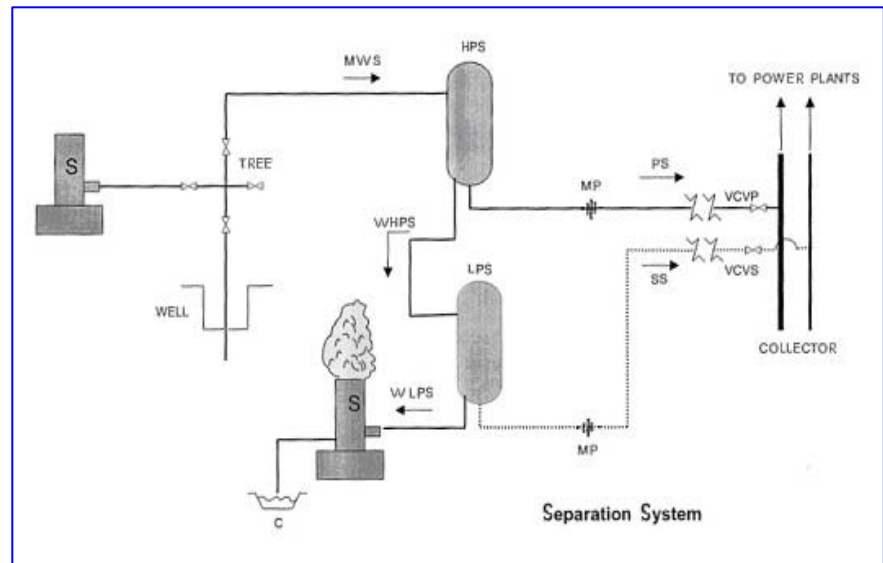


Fig. 2. Equipo superficial típico de los pozos de Cerro Prieto

Algunos otros instrumentos utilizados fueron principalmente: dos transductores de nivel (alta y baja presión), dos válvulas neumáticas de 4 pulgadas de diámetro entre separadores y de 6 pulgadas de diámetro en el sistema de regulación de agua separada, una válvula motorizada de 8 pulgadas de diámetro en el cabezal del pozo, dos transductores para rango de flujo tipo *annubar* en líneas de alta y baja presión de vapor, y un transductor de presión diferencial para medir el flujo en la línea de agua separada. Se utilizó una UTR

(Unidad de Transmisión Remota) para ligar los datos del campo directamente con la oficina de trabajo o control. Esto significa que pueden residir un determinado número de procedimientos complejos directamente en los equipos dispersos en el campo. Todo este equipo fue conectado a una red de área local (LAN) (Fig. 3).

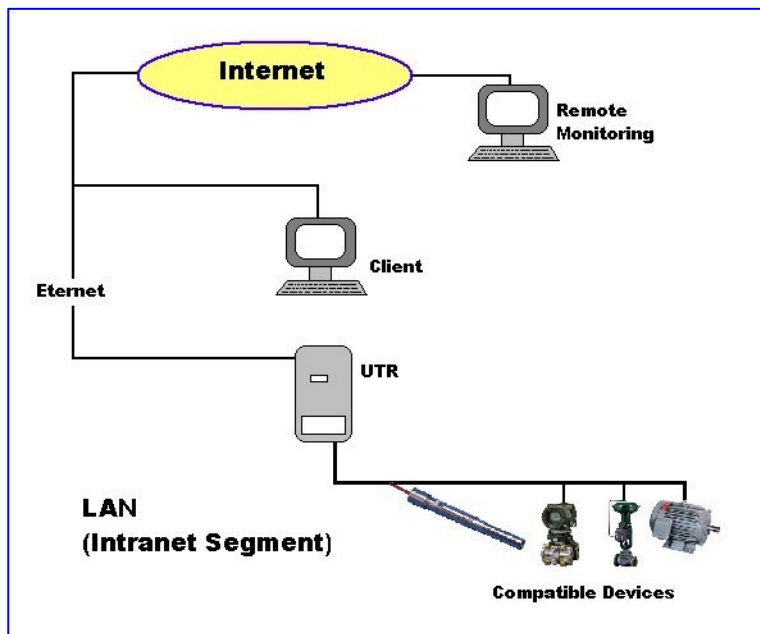


Fig. 3. Segmento de red de área local (LAN)

Hoy en día todo tipo de datos viajan por el mundo a través de redes de comunicación. Con los accesorios instalados en el campo, actuando como portal para información, se puede llevar a cabo la grabación de los datos obtenidos del campo, y los datos medidos de temperatura y presiones pueden ser entregadas a la oficina de control por medio de una red de comunicación.

Para este proyecto, la transmisión de los datos se realizó a través de frecuencia de radio,

utilizando un protocolo muy abierto y con sistemas flexibles. La Figura 4 muestra la interfaz con los datos obtenidos del equipo disperso en el campo; los canales mostrados dependen del protocolo utilizado y de la flexibilidad del sistema.

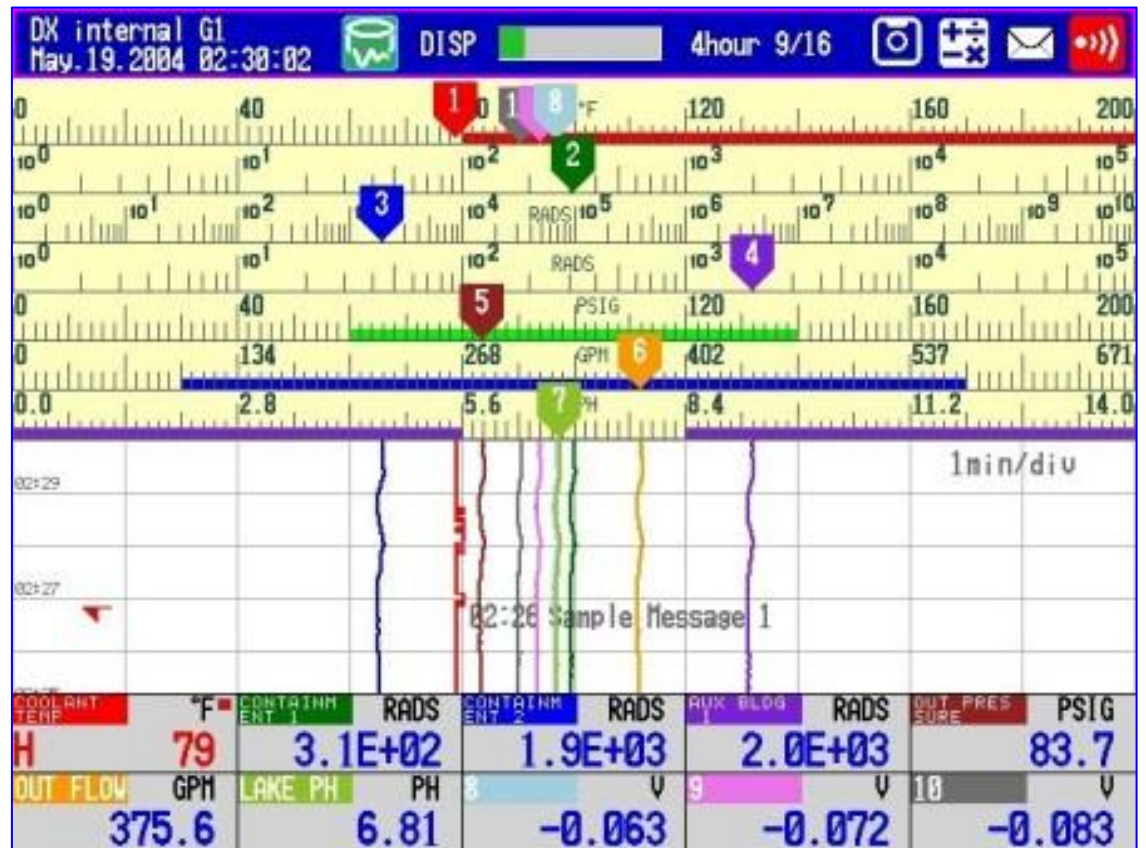


Fig. 4. Interfaz de datos

Las fotos 1 a 3, muestran diversos aspectos del proyecto de automatización y de algunos instrumentos instalados en el pozo 227.



Foto 1.  
Instalaciones para el control en el cabezal del Pozo 227.

#### 4. Conclusión

Se instaló el primer equipamiento para la automatización y el control de pozos productores en Cerro Prieto, con accesorios neumáticos, para mejorar el control de las condiciones de producción del Pozo 227 del área de CP2. Los resultados obtenidos fueron muy buenos, y muestran una gran oportunidad para mejorar el manejo del fluido geotérmico, haciéndolo de una manera más eficiente, así como la operación de los propios pozos productores, utilizando así nuevas tecnologías.

#### Referencias



Residencia de Construcción (2002). Sistema de Automatización y control de las condiciones de la Producción del Pozo 227. Reporte Interno de la Residencia General de Cerro Prieto, CFE. Inédito.

Residencia de Operación de Pozos (2003). Reporte de Producción Mensual del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Reporte Interno de la Residencia General de Cerro Prieto, CFE. Inédito.



Foto 2. Transmisor de presión en cabezal del Pozo 227



Foto 3. Sistema de regulación entre separadores de alta y baja presión.

# Estudio del deslizamiento de masa en la ribera noroeste del Lago de Chapala, Jal., México

<sup>1,2</sup>Víctor Manuel Hernández-Madrigal, <sup>1</sup>Víctor Hugo Garduño-Monroy, <sup>3</sup>Dolores Ibáñez-Garduño, <sup>1</sup>Eleazar Arreygue-Rocha y <sup>2</sup>Román Álvarez

<sup>1</sup>Depto. de Geología y Mineralogía, IIM, UMSNH (52-443-316-8355), Morelia, Mich., México.

<sup>2</sup>Instituto de Geografía, UNAM, México.

<sup>3</sup>Petróleos Mexicanos

---

## Resumen

Se determinó la presencia de un área inestable de 10.34 hectáreas, localizada en la ribera noroeste del Lago de Chapala, 500 metros al oeste de la ciudad del mismo nombre, que presenta un movimiento en dirección principal N-S, según su morfología analizada a través de fotografías aéreas, mapas topográficos y mapas de pendientes. La estructura interna del área en deslizamiento se deduce de observaciones de campo, estando constituida por tres cuerpos inestables desarrollados en tiempos diferentes, pero que en la actualidad se deslizan y cabalgan uno sobre otro, formando una estructura tipo *Rough*. Se detectaron también discontinuidades litológicas producidas por superficies de falla en el subsuelo del deslizamiento, mediante técnicas geofísicas con georradar.

**Palabras Clave:** Geomorfología, deslizamientos de masa, fallas, Lago de Chapala, georradar.

## Study of the landslide on the Northwestern shore of Lake Chapala, Jal., Mexico

### Abstract

An unstable area of 10.34 hectares was found on the northwestern shore of Lake Chapala, 500 meters away from the city of the same name. The area shows movement mainly in a north-south direction, according to the morphology that was studied with aerial photographs, topographic maps, and slope maps. The internal structure of the sliding area was deduced by field reconnaissance and contains three unstable parts developed in different times. The parts slide and ride one upon the other by forming a structure of a *Rough* type. Some lithologic discontinuities, produced by faulting planes at the subsurface of the landslide, were detected by geophysical measurements with a geo-radar.

**Keywords:** Geomorphology, Landslides, Faults, Chapala Lake, Geo-radar.

---

## 1. Introducción

El crecimiento sin control de manchas urbanas, el desarrollo de vías de comunicación terrestres, factores geológicos y cambios climáticos, están provocando que puntos geográficos cercanos a la población se conviertan en áreas de alto peligro hidrogeológico. Deslizamientos como el Jizukiyama en Japón (Nakamura y Motizuki, 1987), los ocurridos en Quebec, Canadá (Evans et al., 1997), Nicaragua (Sheridan *et al.*, 1999) y

México (Lugo *et al.*, 1996; Lugo, 2000; Arreygue-Rocha *et al.*, 1998, 1999, 2002; Garduño *et al.*, 2001), han provocado una gran preocupación en la comunidad internacional.

En México el estudio de los Procesos de Deslizamiento de Masa (PDM) se inicia con los deslizamientos de la autopista Tijuana-Ensenada (Rico *et al.*, 1969), y con la inestabilidad de laderas y taludes de las carreteras Toluca-Morelia, Puebla-Orizaba, Guadalajara-Ixtlahuaca y Huixtla-Motozintla (Rico y Del Castillo, 1974).

Sin embargo, el estudio de PDM en zonas urbanas ha sido, como tantos otros riesgos hidrogeológicos, poco desarrollado, debido a la poca atención del tema en las Ciencias de la Tierra así como al hecho de no existir normatividad que regule el desarrollo urbano y que demande estudios geotécnicos en la construcción civil.

En Colima, Jalisco y Michoacán la inestabilidad de taludes es común, siendo ocasionalmente acelerada por fenómenos meteorológicos y por la actividad sísmica. Se han identificado paleodeslizamientos asociados a las fallas sísmicamente activas de Acambay-Morelia, en la zona de Pátzcuaro, y en edificios volcánicos con grandes estructuras en herradura (Garduño-Monroy *et al.*, 2001). En Jalisco, en particular, sobresalen los trabajos de Barrera (1996) y de Hernández-Madrigal (1999) sobre el PDM de Chapala.

En Jalisco, el Lago de Chapala forma parte del Punto Triple (PT) del occidente del Cinturón Volcánico Mexicano. Con una dirección E-W, este brazo del PT empieza en el actual Lago de Chapala para después migrar al sur y formar la depresión del Citlala. Las fallas E-W en ambas depresiones han generado una intensa inestabilidad en los taludes de las fallas, provocando continuamente grandes deslizamientos y flujos de detritos que han causado daños a zonas urbanas (Garduño-Monroy *et al.*, 1992). Otro tipo de inestabilidad de taludes son los que tienen velocidades pequeñas, pero que están generando daños importantes en zonas urbanas (Hernández-Madrigal, 1999). Tal es el caso del PDM de Chapala, el cual comienza a observarse en la década de los setenta (Barrera, 1996). La inestabilidad de la zona estudiada fue asociada por Barrera (1996) al efecto expansión-contracción de las arcillas lacustres más que al propio deslizamiento. Sin embargo, estudios posteriores hechos por los autores de este artículo aplicando la técnica geofísica del georradar, además de análisis geológicos y geomorfológicos, muestran la existencia de superficies de deslizamiento que afectan al subsuelo de toda esta zona.

En este trabajo presentaremos los resultados de un estudio geológico y geofísico realizado en un cuerpo inestable en la ribera norte del Lago de Chapala describiéndose la geometría y posible localización de esta zona inestable.

## 2. Geología y geomorfología

El sector norte del Lago de Chapala se caracteriza por un intenso fallamiento E-O que ha generado el basculamiento hacia el N de todas las unidades del Mioceno y Pleistoceno. Esta geometría permite observar en la base de la columna estratigráfica brechas volcánicas muy alteradas de composición andesítica y fechadas del Mioceno Tardío (Garduño *et al.*, 1992).

Sobreyaciendo a esas unidades volcánicas se observan alternancias de lavas, brechas y productos piroclásticos también de composición andesítica, además de depósitos lacustres formados por importantes desarrollos diatomíticos, arenas, calizas, arcillas y niveles volcánicos de pómez y ceniza volcánica; esta última unidad ha sido considerada del Plioceno (Rosas-Elguera *et al.*, 1989). Cubriendo a todas estas unidades se observan depósitos de flujos de detritos y suelos.

En un pozo en el hotel Villa Montecarlo (Fig. 1), se encontraron más de 30 metros de arcillas con eventuales niveles volcánicos. Cerca de este pozo se observaron bloques de la brecha volcánica basal en medio de una secuencia de material arcilloso de tipo lacustre.



En taludes de la carretera Chapala-Ajijic (Fig. 1), se observaron alternancias de arenas y arcillas lacustres que evidencian facies proximales de un lago.

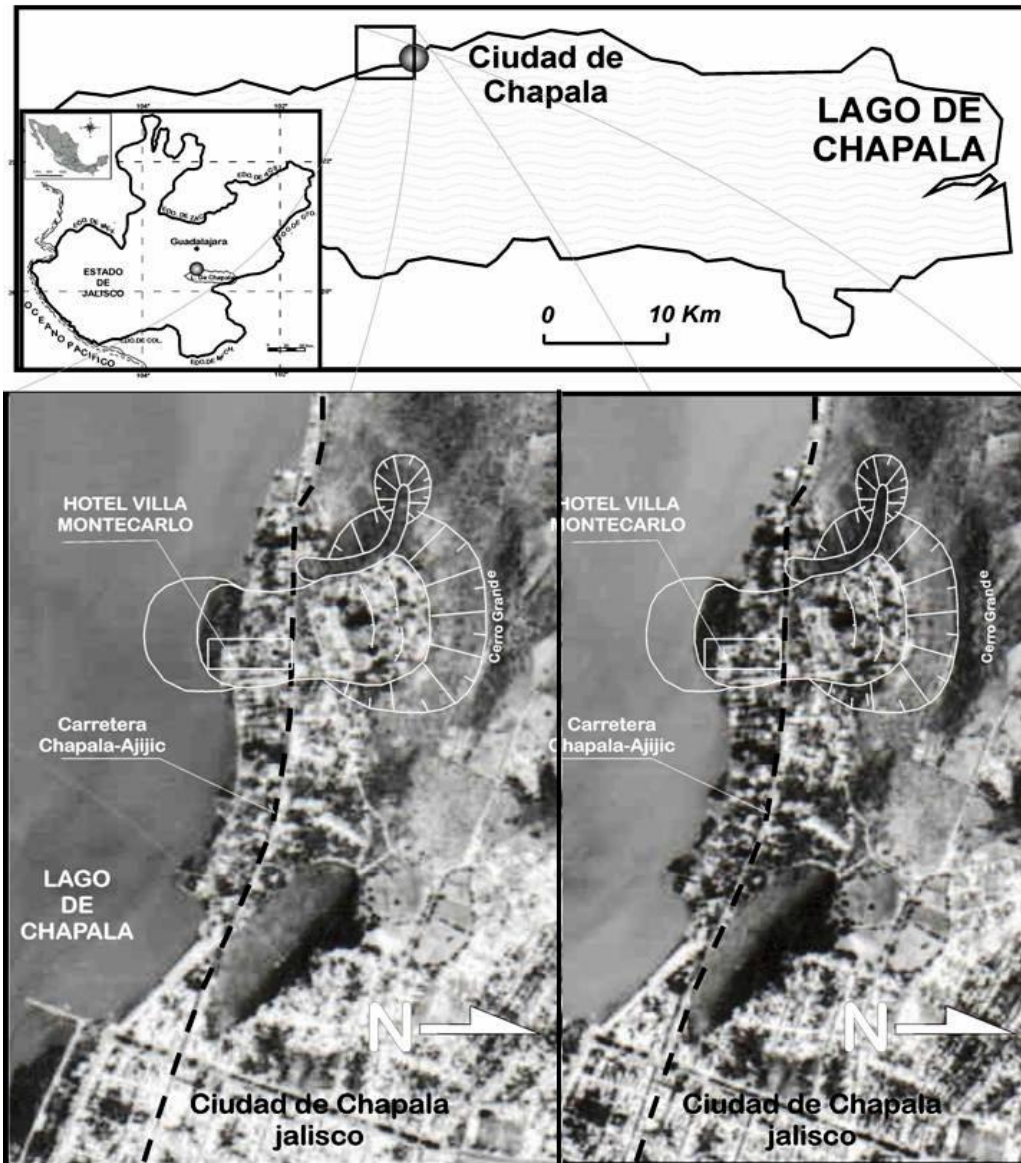


Fig. 1. Localización y par estereoscópico del movimiento de masa de Chapala, a partir de fotografías aéreas escala 1/75000, tomadas en noviembre de 1993 por el INEGI

El PDM de Chapala puede ser observado con gran claridad desde fotografías aéreas a escala 1:75,000 (Fig. 1) destacándose la gran inclinación de la ladera sur del Cerro Grande (más de  $70^\circ$ ) sobre la cual se ha desarrollado el escarpe principal del PDM de Chapala, así como una alta densidad de construcciones sobre su cuerpo. Nótese además que el borde del lago en esta zona forma una línea curva con concavidad hacia el Cerro Grande, lo cual delata el frente de avance del cuerpo inestable (Fig. 1).

A partir del análisis fotogeológico pueden describirse las siguientes formas de relieve en la periferia del área de estudio. Al noroeste destaca la formación montañosa de la sierra El Travesaño con orientación E-W e inclinación de laderas hacia el norte y sur; la vertiente sur, de apenas un kilómetro de longitud, limita con un gran piedemonte de 2 km de ancho por 3 km de largo, sumamente erosionado por una red de drenaje tipo dendrítico con una dirección franca hacia el E, determinada por el fallamiento E-W que domina en esta zona.

Al sur de la sierra El Travesaño resalta un pequeño horst, denominado Cerro Grande, cuyos taludes con dirección perpendicular al sistema E-W presentan una diferencia de pendientes bastante marcada, siendo la parte sur la más inclinada con un valor de hasta  $50^\circ$ , y sobre la cual se ha desarrollado el PDM de Chapala.

Al este y oeste del cuerpo inestable se localizan los poblados de Chapala y Ajijic, respectivamente, asentados en su mayoría sobre pequeñas planicies de origen lacustre que limitan al sur con la ribera noroeste del Lago de Chapala.

### 3. Descripción del deslizamiento de masa de Chapala

Este cuerpo inestable se localiza en la ribera norte del Lago de Chapala, 500 metros al oeste de la Ciudad de Chapala. El área inestable es limitada al norte por las laderas del Cerro Grande y al sur por la ribera del Lago de Chapala (Fig. 1). Las deformaciones que se desarrollan en esta superficie son típicas de un Deslizamiento Rotacional Múltiple: escarpes secundarios, grabens, agrietamientos perpendiculares al eje principal de movimiento (dirección N-S), varios lóbulos de deslizamientos en las partes bajas de la ladera y una gran cantidad de viviendas con daños estructurales. Estos van desde simples grietas en muros hasta deformaciones en columnas, traveses y losas, provocando en estos últimos casos que la demolición del inmueble sea inevitable, tal como sucedió con los módulos de lavandería del Hotel Villa Montecarlo y varios condominios ubicados al norte de este hotel.

Las deformaciones producidas por este fenómeno han sido percibidas desde 1970 por los primeros pobladores de esta zona, según el reporte del censo de afectación hecho por Barrera (1996), que ya observaba grietas en el suelo de más de 12 metros de profundidad, así como fisuras en muros de casas habitación. En la actualidad la mancha urbana de la ciudad ha crecido sin medida ni control, provocando que ahora la superficie del cuerpo inestable se encuentre totalmente cubierta por una zona residencial, lo que trae como consecuencia un incremento de los daños estructurales, altos valores de vulnerabilidad y por lo tanto un riesgo elevado.

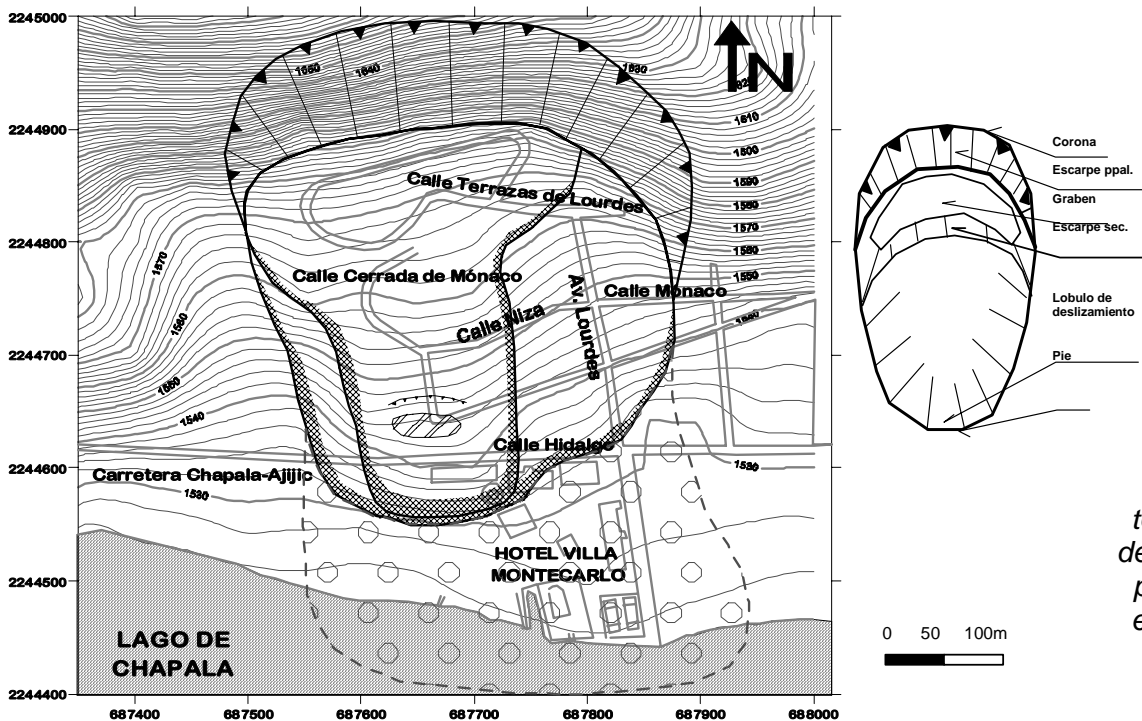


Fig. 2. Plano topográfico y urbano del área de estudio, a partir del plano base escala 1:7500 del H. Ayuntamiento de Chapala, Jalisco.

En la Figura 2 se muestra el relieve del área específica de estudio así como la distribución urbana desarrollada sobre la superficie del cuerpo inestable, el cual es evidenciado por la morfología desarrollada por las curvas de nivel del plano topográfico.

Se elaboró un mapa de pendientes (Fig. 3) a partir del modelo digital del terreno del área de estudio. En él se evidencia con bastante claridad la presencia del cuerpo inestable delimitado al norte por un gran escarpe principal que se presenta en forma de herradura, típica de los deslizamientos rotacionales, con pendientes que van de los  $70^\circ$  a los  $87^\circ$ . Estas pendientes significan una gran densidad de drenaje y un continuo desprendimiento de materiales térreos que se depositan en la cabeza del cuerpo, lo cual trae como consecuencia un incremento en los momentos motores actuantes en el cuerpo, y la disminución de los momentos resistentes, esto último a través del incremento de la presión de poro en los materiales saturados por efecto de la acumulación del agua drenada.

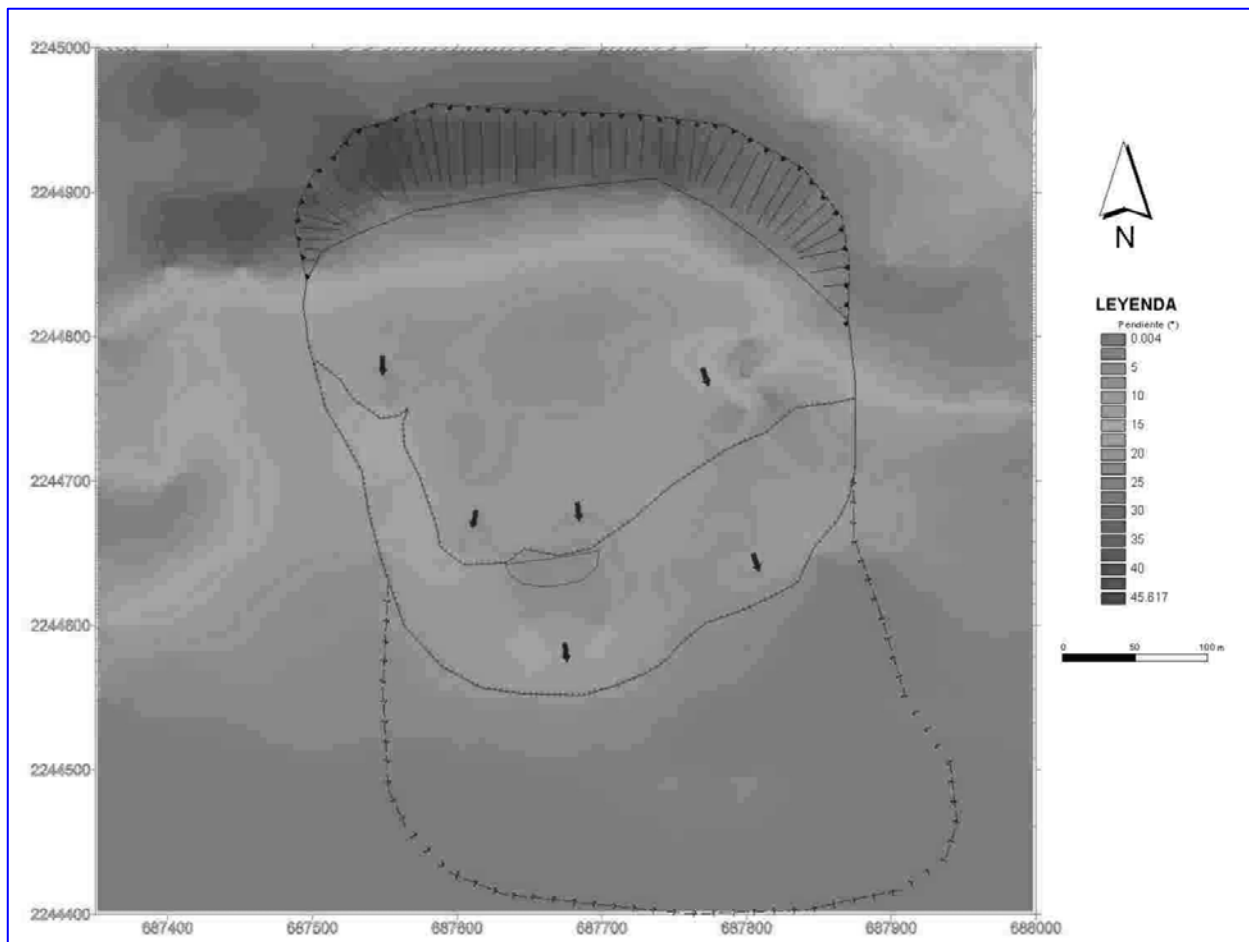


Fig. 3. Mapa de Pendientes creado a partir del Modelo Digital del Terreno

En la parte inferior al escarpe se observa el cuerpo con una dirección de movimiento N-S, delimitado al E, W y S por pendientes promedio de hasta  $76^\circ$ . Sobre el cuerpo se observan superficies con pendientes más suaves que revelan pequeños grabens y terrazas naturales producidas por movimientos secundarios de tipo rotacional. Finalmente las áreas próximas a la orilla del lago adoptan inclinaciones mucho más suaves que van de los  $5^\circ$  a los  $40^\circ$  pero sin dejar de ser una zona inestable. El color gris oscuro del mapa, hacia el sur, representa el cuerpo del Lago de Chapala.

El deslizamiento de masa de Chapala, ocupa una superficie total de 103,388 m<sup>2</sup> (10.339 Ha), con una longitud y ancho máximos de 373 m y 365 m, respectivamente. El vector principal del movimiento adopta una dirección principal N-S con ligeras variaciones hacia el SW.

Los daños ocasionados por este fenómeno van desde agrietamientos de centímetros en muros y losas, hasta desplazamientos horizontales de más de 5 m (Barrera, 1996). En el Hotel Villa Montecarlo, localizado en la parte inferior del deslizamiento, las instalaciones de lavandería se han visto fuertemente deformadas hasta llegar al derrumbe. Al norte de este hotel y sobre la calle Hidalgo que forma parte de la carretera Chapala-Ajijic se han realizado constantes trabajos de renivelación para corregir el desplazamiento horizontal y vertical de su eje. Ladera arriba y hasta llegar al circuito de Terrazas de Lourdes se han desarrollado conjuntos habitacionales, residencias y casas-habitación, que tienen que estar en continua reparación para seguir siendo funcionales a causa de las deformaciones causadas por la inestabilidad del terreno.

#### 4. Aplicación del georradar

Al estudiar los PDM, las técnicas geofísicas encaminadas a la identificación de anomalías o discontinuidades litológicas en el subsuelo del área inestable resultan ser una invaluable herramienta al momento de establecer hipótesis que expliquen la génesis, comportamiento dinámico y descripción geométrica del cuerpo inestable.

Las técnicas de prospección geofísica son amplias y variadas, así como su uso en el estudio de los deslizamientos de masa. Abarcan desde el uso de magnetómetros por Hetunakhin en 1956 (Bhandari, 1990), con objeto de determinar desplazamientos a diferentes profundidades en el interior de un cuerpo inestable, hasta la aplicación del sonar en un estudio hecho por Ashi (1999), quien mediante imágenes de sonar (*side-scan*), logró la detección de planos de deslizamiento en sedimentos submarinos de la costa oeste de Noruega, que dieron origen al deslizamiento submarino conocido como Storegga Slide.

La técnica de prospección geofísica con georradar consiste en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (1-10 nanosegundos) en la banda de frecuencias de UHF-VHF (habitualmente entre 100 Mhz y 1 Ghz) (Lorenzo, 1994). Estas ondas electromagnéticas se propagan en el subsuelo, reflejándose y refractándose según encuentren contrastes en las propiedades eléctricas, particularmente la conductividad y la permisividad eléctricas. Con las ondas reflejadas que se detectan en la superficie se pueden construir imágenes del subsuelo, conocidas como radargramas, que resultan de gran utilidad para observar discontinuidades y deformaciones en la estructura somera (0 a 20 metros) del subsuelo.

Esta técnica tuvo sus primeras aplicaciones en el campo de las ciencias de la tierra, con los estudios hechos por Unterberger en 1974 para el dimensionamiento de minas, así como en la detección de fallas en rocas metamórficas en 1977 por Rubin y Fowler (Lorenzo, 1994). Esto último ha sido el antecedente más directo del uso del georradar en el estudio de los deslizamientos de masa.

En un primer reconocimiento del área de estudio, se observaron en las partes bajas de los jardines del Hotel Villa Montecarlo, a menos de 20 m de la orilla del lago, bloques de brechas volcánicas de hasta 3 m de diámetro los cuales corresponden a la litología del Cerro Grande que se encuentra a 350 m hacia el norte, ladera arriba, por lo que llama la atención su actual ubicación. Por otra parte, es muy clara la formación de dos frentes de avance (lóbulos de deslizamiento) con dirección N-S y con una alineación E-W, el primero de ellos sobre los mismos jardines del hotel Villa Montecarlo y el segundo aproximadamente 10 m arriba de la carretera Chapala-Ajijic.

La posición actual de los bloques de brechas, frentes de avance y comportamiento inestable de la ladera, se explica por el movimiento de una masa en deslizamiento constituida por tres cuerpos inestables que se

deslizan y cabalgan uno sobre otro, formando una estructura tipo Roughly, tal como se muestra en la Figura 4.

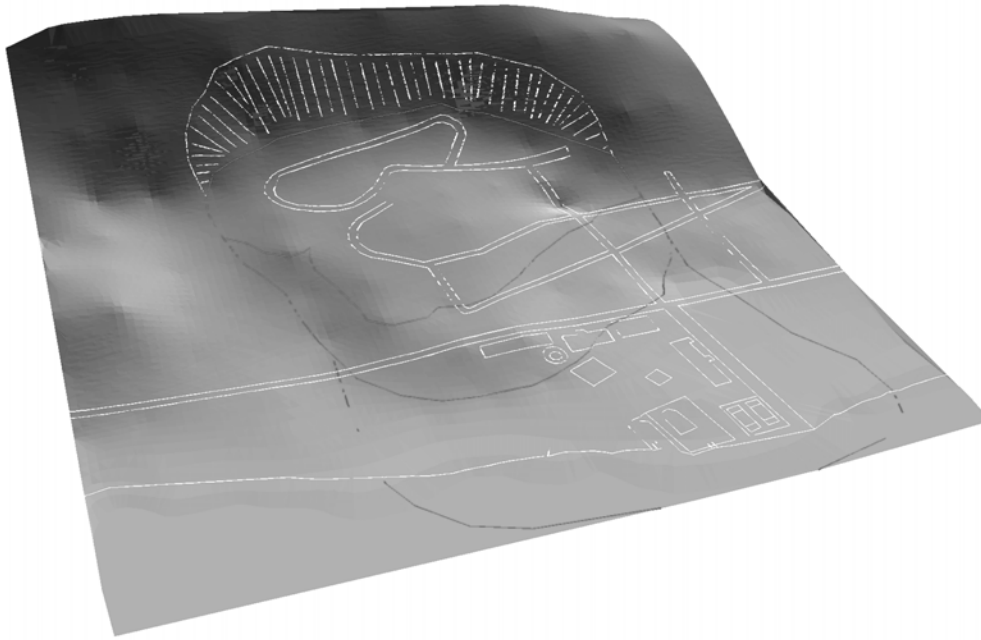


Fig. 4. Modelo tridimensional del deslizamiento de masa de Chapala. Nótese la relación de los lóbulos de deslizamiento con los resultados del perfil levantado con el georradar.

Empleando el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), que toma como parámetros de referencia la granulometría y los índices de plasticidad de los suelos en cuestión, se determinó que el cuerpo superior e inferior están constituidos por fragmentos de roca empacados en una matriz arcillosa, mientras que el cuerpo intermedio está formado por una arcilla inorgánica de alta plasticidad (arcilla lacustre). Los tres cuerpos se encuentran depositados sobre un estrato de arcilla lacustre que es soportada por un estrato de basalto compacto (Hernández-Madriral, 1999) (Fig. 5).

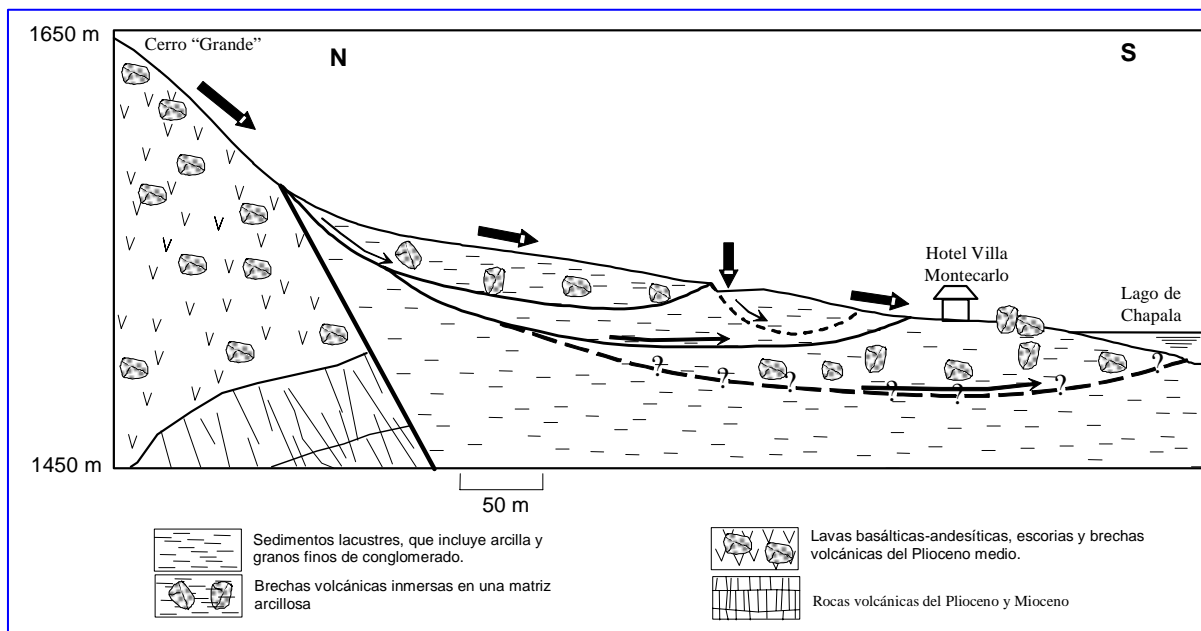


Fig. 5. Sección transversal del PDM de Chapala, Jalisco.



## 5. Resultados

En el radargrama obtenido (Fig. 6) se registran dos eventos en los primeros metros de profundidad. El más superficial, conocido como “onda de aire”, se produce por una señal que viaja de la antena transmisora a la antena receptora sobre la superficie del terreno. El segundo evento se conoce como “onda directa del terreno” y es una señal que viaja a través de la capa más superficial del terreno (Ibáñez y Álvarez, 1998). Después se registran las reflexiones producidas por las diferentes estructuras del subsuelo, y con estas últimas se puede hacer la identificación de las superficies de deslizamiento (Ibáñez, 1998).

El eje vertical izquierdo del radargrama representa los tiempos dobles de la señal y el eje vertical derecho marca la profundidad de los reflectores. Los estratos con colores oscuros presentan discontinuidades en la secuencia horizontal, las cuales indican rupturas. Si la ruptura se separa revela una zona de distensión, pero si se encima indica una zona de compresión. Para el caso de los deslizamientos de masa esta última corresponde a lóbulos de deslizamiento en superficie.

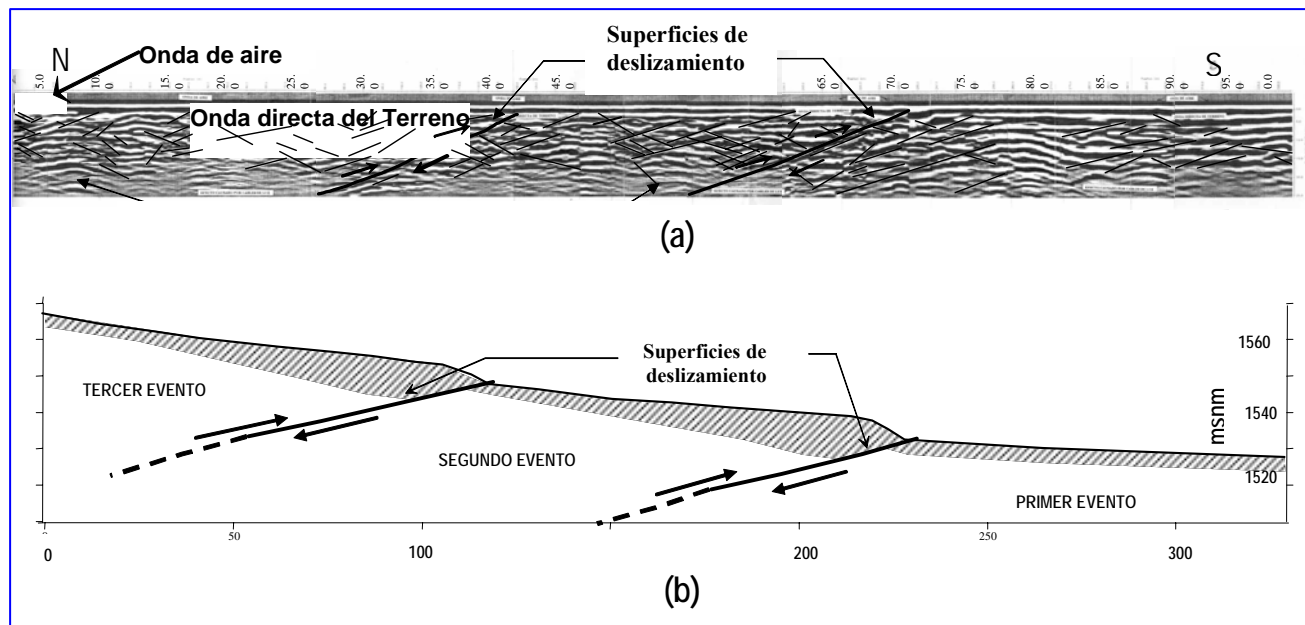


Fig. 6. (a) Radargrama, perfil bidimensional del subsuelo de la avenida Lourdes. (b) Interpretación del radargrama, en el cual se señalan las dos principales discontinuidades de los estratos, interpretadas como superficies de deslizamiento.

En el radargrama (Fig. 6) se destaca la presencia de dos superficies de deslizamiento principales, amén de gran cantidad de pequeñas fallas antitéticas y sintéticas que constituyen superficies secundarias de deslizamiento. La primera superficie de deslizamiento principal se registra a partir de los 80 metros de distancia con respecto al origen del perfil, y continúa hasta intersectar la superficie del terreno, 40 m ladera abajo (hacia los 120 m desde el origen; Fig. 6b). Esta superficie de deslizamiento se define por la inclinación del grupo de fallas antitéticas que en esa zona se presentan, como se puede observar en el radargrama (Fig. 6a); casi todas las fallas antitéticas encontradas dentro de dichos límites coinciden en cuanto a su inclinación. Las fallas sintéticas de esta zona son causadas por el cabalgamiento del cuerpo superior sobre el cuerpo intermedio de la masa en deslizamiento.

La segunda superficie de deslizamiento se registra a partir de los 180 m y se desvanece sin llegar a la superficie, justo hacia los 230 m desde el origen, debido a que una parte del cabalgamiento del cuerpo intermedio ya lo ha rebasado. Todas las fallas sintéticas y antitéticas formadas en la parte superior a esta

superficie de deslizamiento son producto del cabalgamiento y particularmente del abombamiento producido por este.

Se sospecha la existencia de una tercera superficie de deslizamiento, ladera abajo, aproximadamente a 80 m de la segunda superficie, pero se localizaría bajo la superficie del Lago de Chapala, por lo que no puede ser identificada por este método.

De acuerdo a la posición de las superficies de deslizamiento en el radargrama (Fig. 6), la primera correspondería al lóbulo de deslizamiento encontrado sobre la avenida Lourdes, entre las calles Niza y Mónaco. La segunda superficie corresponde al frente de avance observado en los jardines del Hotel Villa Montecarlo. Por último, la probable tercera superficie de deslizamiento estaría en las inmediaciones de la orilla del Lago de Chapala, tal como se esquematizó en la Figura 4.

Correlacionando los datos del radargrama con las unidades litológicas y el análisis fotogeológico, se concluye que el PDM de Chapala se encuentra constituido internamente por los tres cuerpos inestables esquematizados en la Figura 5. El primer cuerpo está compuesto por fragmentos de brechas empacados en una matriz arcillosa, destacándose la presencia de los bloques de brechas volcánicas localizados en las partes bajas de los jardines del hotel Villa Montecarlo. El segundo cuerpo está compuesto básicamente por arcillas lacustres, cuyo frente principal se encuentra en la parte superior de los jardines de dicho hotel, y que cruza la avenida Lourdes aproximadamente a 8 metros de la esquina con la avenida Hidalgo. El tercer cuerpo está compuesto, al igual que el primero, por fragmentos de brechas volcánicas empacadas en una matriz arcillosa, teniendo su frente de avance a lo largo de la calle Niza, cruzando la avenida Lourdes a la altura de la calle Mónaco. La tipología del PDM de Chapala, corresponde a un deslizamiento rotacional múltiple.

## 6. Conclusiones

Las deformaciones estructurales presentes en la zona de estudio, son causadas principalmente por la actividad dinámica del proceso de movimiento de masa de Chapala, que origina zonas de hundimiento diferencial y zonas de abombamiento, además de grietas debidas al movimiento horizontal.

Es importante tener presente que la combinación de una precipitación pluvial abundante con un movimiento sísmico, incrementa aun más el riesgo en la zona de estudio, pues la masa inestable podría moverse a mayor velocidad, por una parte, y por la otra, la ladera sur del Cerro Grande podría sufrir grandes desprendimientos de material (en forma de flujos de detritos) debido a su gran declive, lo que pondría en grave riesgo las viviendas localizadas en esta zona, que se ubican justo al pie del escarpe principal.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (CIC-UMSNH) y al Municipio de Chapala, Jalisco, México.

## Referencias

Arreygue, E., P. Canuti, A. Iotti and V.H. Garduño-M. (1998). Hydrogeological hazard in the urban area of Morelia, Mich. (Mexico), *Proceedings of the Eight International Congress. Association for Engineering Geology and the Environment*, Vancouver, Canada: Rotterdam, A.A. Balkema, 3, pp. 2245-2250.

- Arreygue, E., P. Canuti, N. Casagli, A. Iotti y V.H. Garduño M. (1999). Las condiciones de riesgo hidrogeológico en la ciudad de Morelia (Michoacán, México), Patrimonio Mundial de la Humanidad. *Memorias de la Asamblea Internacional y Congreso Mundial de Conservación del Patrimonio Monumental de ICOMOS (Internacional Council of Monuments and Sites)*, Roma, 14 pp.
- Arreygue-Rocha, E., V.H. Garduño-Monroy, Paolo Canuti, Nicola Casagli, Alberto Iotti y Sergio Chiesa (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19 (2), pp. 91-106.
- Ashi, J. (1999). Large submarine landslides associated with decomposition of gas hydrate. *Landslide News*, No. 12, pp. 17-20.
- Barrera, E. (1996). *Estudio geológico estructural, geohidrológico y sísmico, en el Municipio de Chapala, Jalisco*. Publicación del Centro de Ciencias de la Tierra, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara, México.
- Bhandari, R.K. (1990). Some practical lessons in the investigation and field monitoring of landslides. Special lecture: *Landslides, glissements de terrain*. Vol. 3, pp. 1435-1457.
- Evans, S.G., C. Bégin, D.E. Lawrence, D. Demers, G. Grondin, J.M. Ayksworth, M. Parent, Y. Michaud, and G.R. Brooks (1997). A massive retrogressive landslide in sensitive Champlain sea sediments near Saint-Boniface-de-Shawinigan, Québec, Canada, April 1996. *Landslides News*, No.10, pp.17-19.
- Garduño, V.H, J. Spinnler and E. Ceragioli (1992). Geological and structural study of the Chapala Rift, State of Jalisco, Mexico. *Geofísica Internacional*, Vol. 32, No. 3, pp. 487-499.
- Garduño M, V., E. Arreygue R., I. Israde A. y G. Rodríguez T. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-54.
- Hernández-Madrigal, V.M. (1999). Estudio de un deslizamiento de ladera en el km 0+500 de la carretera Chapala-Ajijic, en el municipio de Chapala, Jalisco, México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, 87pp. Inédito.
- Ibáñez, G.D. y A. Alvarez (1998). Informe del estudio de prospección geofísica usando la técnica de georradar en poblaciones de Michoacán, Guanajuato y Jalisco. Informe interno del Instituto de Geofísica de la UNAM. Inédito.
- Ibáñez, G.D. (1998). Prospección en zonas de falla y sitios arqueológicos mediante la técnica de radar de penetración somera. Tesis de Maestría en Exploración Geofísica. Instituto de Geofísica, UNAM. Inédito.
- Lorenzo, C.E. (1994). Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a obras civiles. Memoria presentada para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Físicas. Facultad de Ciencias Físicas. Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Universidad de Madrid, España. Inédito.
- Lugo, J., T. García, J. Zamorano and O. Salas (1996). Landslide in Metztitlan (State of Hidalgo), Mexico. *J. Geomorph.* N.F. Suppl.- Bd. 103, pp. 323-343.



- Lugo, J. (2000). *La superficie de la Tierra I. Un vistazo a un mundo cambiante*. Colección La Ciencia para Todos, Fondo de Cultura Económica, México. pp. 121-127.
- Nakamura, H. and K. Motizuki (1987). Disaster of the Jizukiyama landslide (July 26, 1985, Nagano City). *Landslide News*, No. 1, pp. 8-9.
- Rico, A. y L. del Castillo (1974). La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Apuntes, Facultad de Ingeniería, UNAM. Inédito.
- Rico, A., J. Springall y G. Springall (1969). *Deslizamientos en la autopista Tijuana-Ensenada*. Contribución de la Secretaría de Obras Públicas al VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, México, pp. 213.
- Rosas-Elguera J., J. Urrutia-Fucugauchi y R. Maciel-Flores (1989). Geología del extremo oriental del Graben de Chapala, breve discusión sobre su edad: zonas geotérmicas de Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, Mexico. *Geotermia*, Vol. 10, No. 1 , pp.14-29.
- Sheridan, M.F., C. Bonnard, R. Carreño, C. Siebe, W. Strauch, M. Navarro, J.C. Calero and N.B. Trujillo (1999). Report on the 30<sup>th</sup> October 1998 rock fall / avalanche and breakout flow of La Casita Volcano, Nicaragua, triggered by Hurricane Mitch. *Landslide News*, No. 12, pp. 2-4.

# Application of ethanol as a geothermal tracer: a field test in the Los Azufres geothermal field, Michoacan, Mexico

<sup>1</sup>Enrique Tello-Hinojosa, <sup>2</sup>Mahendra Pal-Verma, <sup>3</sup>Mario C. Suárez-Arriaga, <sup>4</sup>Víctor Barrera-González and <sup>4</sup>Fernando Sandoval-Medina

<sup>1</sup>CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Morelia 58290, Mich., México, [eth74091@cfe.gob.mx](mailto:eth74091@cfe.gob.mx)

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma No. 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México, [mahendra@iie.org.mx](mailto:mahendra@iie.org.mx)

<sup>3</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, [msuarez@zeus.umich.mx](mailto:msuarez@zeus.umich.mx)

<sup>4</sup>CFE, Residencia de Los Azufres, AP 46, Ciudad Hidalgo, Mich., México, [fsm718@cfe.gob.mx](mailto:fsm718@cfe.gob.mx)

---

## Abstract

The thermal decomposition rate of ethanol, rhodamine WT and fluorescein was determined from laboratory data obtained under conditions of temperature and pressure that simulated a geothermal reservoir. It was found that ethylic alcohol had better thermal stability than rhodamine and fluorescein.

Using data obtained from de-ionized water experiments after 168 hours and 200°C of temperature, the rhodamine WT and fluorescein presented a degradation of 99.4% and 99.7%, respectively, while for the ethanol the degradation percentage under the same conditions was only of 44.6%. According to this, ethylic alcohol can be used as a conservative tracer up to about 250°C, while rhodamine WT and fluorescein can be used only at less than 200°C, and only where the transit return time is expected to be less than 7 days.

Ethanol was used as a conservative tracer in a field test in the southern zone of the Los Azufres geothermal field. The highest concentration was detected in a monitoring well in the steam phase 15 days after the injection, and in the liquid phase, or brine, 34 days after the injection. This suggests that alcohol fractionates preferentially in the steam phase and moves or migrates twice as fast than it does in the liquid phase. The tracer speed can be calculated in 176 m/day in the steam phase and 77.5 m/day in the brine. The ethanol presents good enough characteristics to be used as a tracer in both phases in geothermal environments.

**Keywords:** Tracers, Los Azufres, Ethylic alcohol, Ethanol, Fluorescein, Rhodamine.

## Uso del etanol como trazador geotérmico: prueba de campo en Los Azufres, Michoacán, México

### Resumen

Se determinó la velocidad de descomposición térmica del etanol, la rodamina y la fluoresceína a partir de datos de laboratorio obtenidos bajo condiciones de presión y de temperatura que simulan las de un yacimiento geotérmico. Se encontró que el alcohol etílico presenta una mayor estabilidad térmica que la rodamina y la fluoresceína.

Empleando los datos obtenidos de experimentos con agua de-ionizada después de 168 horas y a 200° C de temperatura, la rodamina y la fluoresceína presentaron una degradación del 99.4% y del 99.7%,

respectivamente, mientras que para el etanol el porcentaje de degradación en las mismas condiciones fue de sólo el 44.6%. Consecuentemente, puede usarse alcohol etílico como un trazador confiable hasta unos 250° C, mientras la rodamina y la fluoresceína pueden utilizarse sólo a menos de 200° C y únicamente donde el tiempo de retorno esperado sea menor de 7 días.

Se empleó etanol como trazador en una prueba de campo en la zona sur del campo geotérmico de Los Azufres. La máxima concentración se detectó en un pozo monitor en la fase de vapor 15 días después de la inyección, y en la fase líquida o salmuera la máxima se detectó 34 días después de la inyección. Esto sugiere que el alcohol se fracciona preferentemente en la fase de vapor y que se mueve o migra el doble de rápido que en la fase líquida. La velocidad del trazador puede calcularse en 176 metros por día en la fase de vapor y en 77.5 metros por día en la salmuera. El etanol presenta características suficientemente buenas para usarse como trazador en las dos fases en ambientes geotérmicos.

**Palabras clave:** Trazadores, Los Azufres, alcohol etílico, etanol, fluoresceína, rodamina.

---

## 1. Background

During the last 15 years, tracer tests have been carried out in different geothermal fields of the world. For instance, in Wairakei, NZ, fluorescent tints, inert gases, organic compounds and radioactive isotopes have been proven (Bixley *et al.*, 1995). In the case of fluorescein it was proven that these tracers are not significantly degraded in periods of two weeks and at temperatures up to 230°C (Bixley *et al.*, 1995).

The kinetics of the rhodamine WT decay was studied by Rose and Adams (1994) and it was used like a tracer by them in the well 3-1 of Steamboat Hill. Also halogenated alkenes as vapor tracers were tested by Adams *et al.* (1991) in the low pressure area of the Southeast Geysers geothermal field. Two tracers, R-12 and R-13, were injected into the NCPA well C-11. Tracer was found in 38 of the 44 production wells monitored during the 51-days test.

In Ahuachapan, El Salvador, between 1987 and 1990 five tests were carried out using I-131 in wells AH-2, AH-5 and AH-29; the injected concentration was equal to 0.8 curies and the radioactive recovery was 25% in well AH-1. The maximum concentration was detected only 20 days after the tracer was injected, although the detection started two days after the test started (Mc Cabe *et al.*, 1990).

Research on aromatic acids as geothermal tracers has also been carried out at the UURI (Adams *et al.*, 1992).

This activity is important because knowing the direction of fluid displacement in the reservoir improves locating injection wells and estimating injection fluid rates. It makes it possible to estimate if the arrival of the injected liquid is too fast so that it could diminish the fluid enthalpy cooling down the system.

In the Mexican geothermal field of Los Azufres, six tests using inorganic and radioactive tracers were carried out between August 1983 and July 1987. The tests were done in wells located both in the northern and the southern sectors. The tracers were KI (iodine of potassium) and iridium 192 (Horne and Gutiérrez, 1989). The first test was carried out with KI in well AZ-8 and the second one with Ir-192 in well AZ-7. According to the test analysis, the tracers could not be detected—probably because the tracer was not appropriate or the tracer return was at such low concentrations to avoid detection.

In February 1992, production tests were performed to verify the connection between wells AZ-8 (injector) and AZ-46 (producer) (Fig. 1). During this stage, 10 to 225 tons per hour (t/h) of liquid were injected in the well AZ-8. After 21 days of maximum injection, response was noticed at well AZ-46 (Fig. 2). The injection

well AZ-8 is 1330 m deeper than the production well and the horizontal distance between them is 2630 m. An average flow speed between both areas could be estimated at around 124.8 m/day. Assuming that the flow takes place in a plane defined by both wells, a pressure gradient of 0.054 bar/m was calculated. Applying Darcy's law in two dimensions, a global permeability of 11 Darcys was deduced ( $\sim 1.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ). On the basis of the above-mentioned facts, it was deduced that the fluid transport in this area is conditioned by faults and fractures oriented E-W (Suárez, 1996).

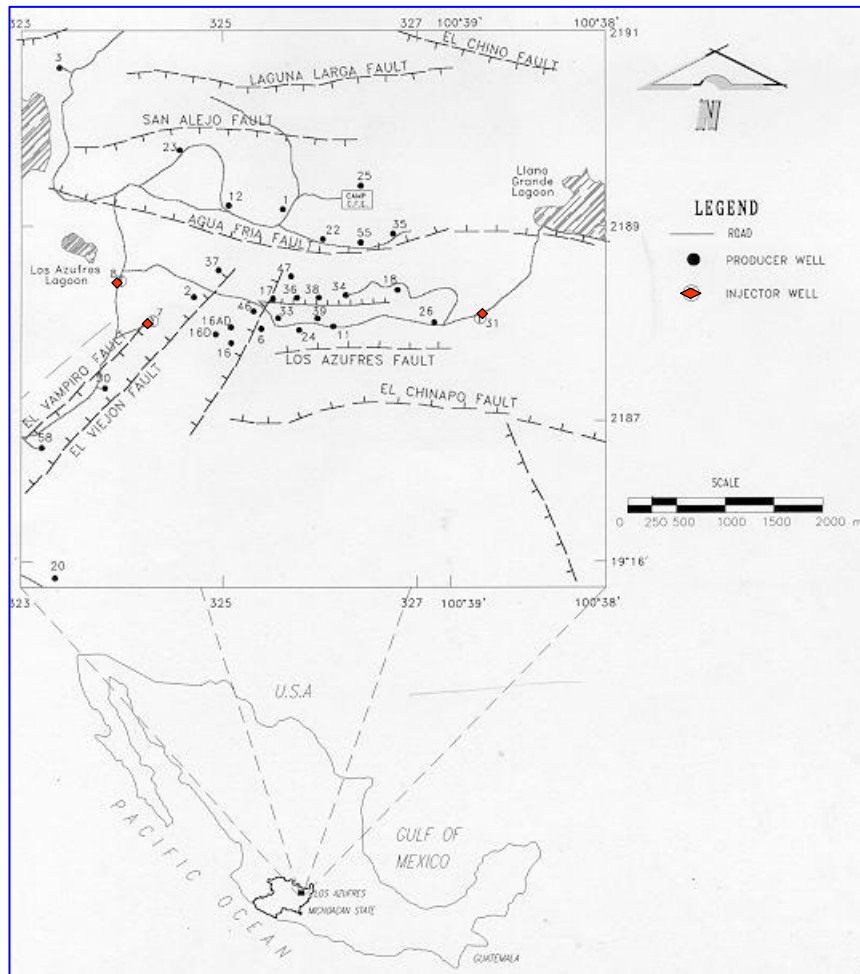


Fig. 1. Map of the Los Azufres geothermal field showing location of wells in the south zone.

of Los Azufres. This made the use of tracers necessary to confirm if the chemical changes were due to the influence of injected fluids. To confirm this, we decided to test ethanol as a tracer in the geothermal reservoir.

The objectives of the tests included:

- To accurately know the type and amount of interaction between extraction and injection zones to define some geo-hydrological aspects of the system and to establish the mass balance between extraction and injection fluids.
- To know the relative amounts of injected fluid that every well is receiving.
- To define preferential trajectories between producing and injection wells.
- To verify if the injection is cooling the reservoir.
- To find out the most appropriate tracer for the typical temperatures existing in Mexico's geothermal fields.

## 2. Objective of the tests

Tracers have become an important tool for understanding geothermal reservoirs, because with them we can determine underground water speed, flow direction, porosity, etc. However, it is important first to know their thermal stability—to determine the magnitude of their degradation when they are subjected to high temperatures, as in geothermal conditions.

In the present work, experiments were carried out simulating reservoir conditions using ethanol, rhodamine and fluorescein as tracers, determining their behavior and their changes in the laboratory under varying temperatures and time conditions. The tracer studies were carried out at the Mexican Institute of Electrical Research (IIE).

In addition to the above-mentioned studies, an increment of some chemical constituents in the separated water and in the gases was observed in most production wells of the southern zone

Some parameters, such as porosity, permeability, flow speed and effective distances traveled by fluids, could also be indirectly estimated.

### 3. Tracer types

A tracer is a simulator. It must be very similar to the substance that it has to trace in every respect that is of importance in the tracing process. It must also be very different so as to be identifiable. These are two contradictory conditions. Thus the selection of a tracer is a compromise. For the tracer not to influence the process itself, it must be used in quantities as small as possible (Vetter and Zinnow, 1981).

Tracers can be classified as natural and artificial. The natural ones, such as N<sub>2</sub> of atmospheric origin, are introduced into the injection wells together with the brine. It can be clearly observed how the nitrogen content increases in the samples of gases taken from production wells located near the injectors (Hirts, 1995). This phenomenon was observed in the Los Azufres field, for example, at wells AZ-6 and AZ-16AD located to the east of injectors AZ-8 and AZ-7.

Artificial tracers, as the name suggests, are substances industrially manufactured and ready to be injected.

According to the necessary amount for a given job, tracers can be divided into two groups: chemical and radioactive. Tracers can also be classified as chemical and isotopic. The chemical ones, in turn, can be classified as organic and inorganic.

Chemical tracers are those that have to be identified by general analytical methods such as conductivity, refractive index, elemental spectrometry, etc., while radioactive tracers are detected by their emitted radiation—usually beta or gamma. The amount of a tracer to be used is determined by the detection limits of these methods. Liquid scintillation counters for beta-radiation and gamma spectrometers are by many orders of magnitude more sensitive than other more conventional determination methods and instruments (Hirts, 1995).

The isotopic tracers are of two types: radioactive and stable. Radioactive tracers require specialized personnel and sophisticated equipment, besides environmental formalities and compulsory requirements, which imply higher costs.

Inorganic tracers have some advantages over the radioactive ones. For example, they are easily determined, but it is necessary to use relatively higher quantities than for organic tracers, and some of them also react with geothermal fluids.

A good geothermal tracer should have good chemical stability, not react with the rock, and not exist in a natural form in the reservoir. It must be not expensive or toxic and be easy to handle.

### 4. Determination of tracer degradation

The experiment consisted of making a solution of 20 liters of distilled water and a tracer such as rhodamine (2.5 ppm), 2000 ppm of ethanol (ethylic alcohol at 96°) and fluorescein (2.5 ppm). From that solution, 500 ml of fluid were separated. This amount of fluid was kept with no abrupt temperature changes. From the remaining solution, we took 600 ml that were introduced into the Cement Curing Test Cylinder in the

laboratory. This solution was placed inside the oven and heated to different temperatures (100°C, 150°C, 200°C, 250°C), for specific times (12, 24, 48, 72, 120 and 168 hours).

At the beginning of the experiments, a sample of 600 ml was placed inside the cell and exposed to a temperature of 200°C for 12 hours. Once the test was initiated, variations of pressure and temperature were carefully controlled every hour. Once the time of the experiment elapsed, the equipment was switched off and let to cool down at ambient temperatures. Then the cell was taken out from the oven and the sample was quantified. Next 100 ml of solution were separated and put in a plastic bottle and labeled with the following data: code of the experiment, initial volume ( $V_i$ ), final volume ( $V_f$ ), Temperature (°C), Time (T), and Net (content in the bottle).

Later on, the remaining solution was placed again in the cell and the 200°C experiment continued for 24 hours. The separation process was repeated. Using the same procedure, the solution was subject to the same temperature for different periods, up to 168 hours. The following experiments were carried out, varying the temperature at 250 and 150°C, for the same periods of 12, 24, 48, 72 and 168 hours.

After that, the samples obtained from the different stages of each experiment were analyzed in the chemical laboratory of the Los Azufres field. The concentrations for each substance are shown in Table 1 and in the figures 2, 3 and 4.

Sample No.	Time (hours)	T (°C)	Ethanol (ppm)	Rhodamine (ppb)	Fluoroscein (ppb)
Series to 150°C					
A1	12	150	1,603	673.10	1306.1
A2	24	150	1,577	609.59	1032.4
A3	48	150	1,539	471.98	744.3
Series to 200°C					
B1	12	200	1,688	694.27	1488.6
B2	24	200	1,631	577.83	1149.8
B3	48	200	1,579	450.81	769.7
B4	72	200	1,359	355.54	470.1
B5	120	200	1,318	165.00	135.3
B6	168	200	1,109	14.91	8.5
Series to 250°C					
C1	12	250	1,702	260.27	366.7
C2	24	250	1,533	37.67	64.3
C3	48	250	1,293	0.00	3.5
C4	72	250	1,015	0.00	0.0

Table 1. Thermal behavior of ethanol, rhodamine and fluorescein tracers.

According to Table 1, concentrations are quite distinct for each tracer (rhodamine, fluorescein and ethanol). In the A series (at 150°C), the original concentration of ethanol (2000 ppm) went down to 1603 ppm after 12 hours, and to 1539 ppm after 48 hours. In the B series (at 200°C), the concentration decreased to 1688 ppm in 12 hours and to 1109 ppm in 168 hours (seven days). In the C series, the concentrations are not so low (1702 ppm) in short times (12 hours), but they drop to 1015 ppm after 72 hours.

The general behavior of the ethanol is plotted in Figure 2, and a preliminary conclusion is that it seems to be more stable at high temperatures (250°C) than at low temperatures (150°C) for a short period of time (12 hours), which is contrary to what one could expect. However, for more prolonged times (1, 2 or more days), the thermal stability of ethanol is higher at low temperatures.

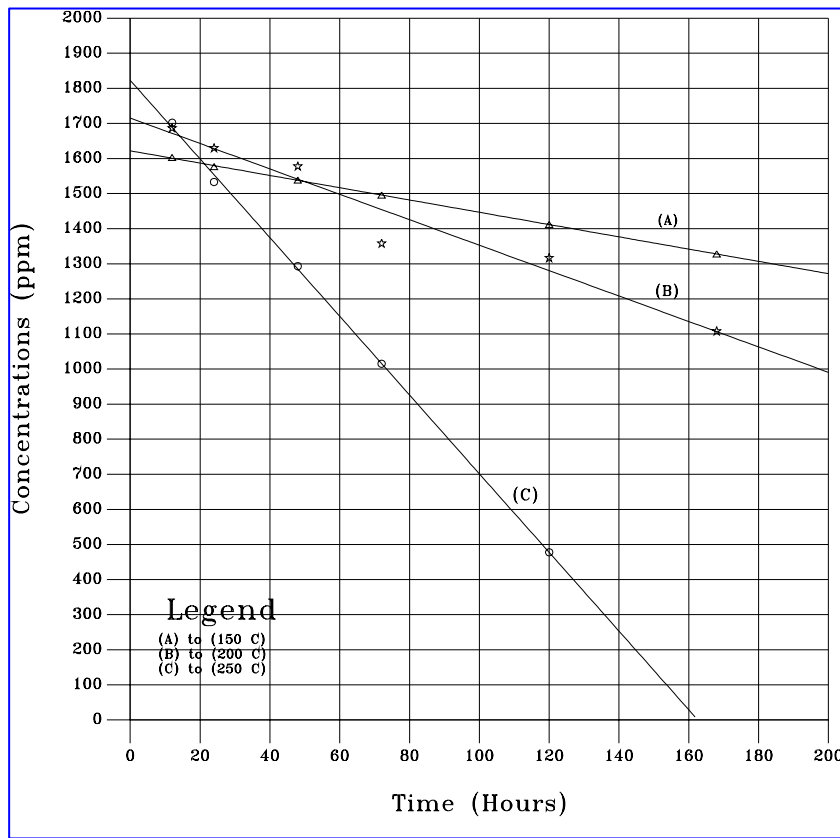


Fig.2. Decay of ethanol in de-ionized water at 150°C, 200°C and 250°C.

and rhodamine. This is because the decay and/or loss of alcohol were consistently smaller than those for rhodamine or fluoroscein. Particularly in the B series after 168 hours and at 200°C, the rhodamine and the fluoroscein presented a degradation of 99.4% and 99.7%, respectively, while for the ethanol the degradation percentage in the same series B, was only 44.6%. For the maximum temperature (250°C), rhodamine and fluoroscein practically disappear after 48 hours, but the ethylic alcohol only loses 35.4% of its original concentration, and 49.3% after three days (Table 2).

On the other hand, the rhodamine tracer presents in the series A concentrations from 673 to 472 ppb, while in the series B concentrations from 694 to 15 ppb, and in the series C from 260 to 0 ppb (Fig. 3).

Fluoroscein presents concentrations in series A ranging from 1306 to 744 ppb, while in the B series concentrations from 1489 to 8.5 ppb are observed, and in the series C concentrations are from 367 to 0 ppb (Fig. 4).

The degradation of each substance is presented in Table 2. It was calculated as the loss of concentration for each one (ethanol, rhodamine and fluoroscein) from the original concentration (2000 ppm, 2.5 ppm and 2.5 ppm, respectively), and expressed as a percentage of this.

According to those results, it is possible to say that when tracer tests are carried out under the previously described conditions, alcohol ethylic presented better thermal stability than fluoroscein

Temperature	Time elapsed	% of Degradation of Original Concentration of		
		Ethanol	Rhodamine	Fluoroscein
150°C	48 hours	23.1	81.1	70.2
	72 hours	32.1	85.8	81.2
	168 hours	44.6	99.4	99.7
200°C	48 hours	35.4	100	99.9
	72 hours	49.3	100	100

Table 2. Degradation of the tested tracers.

## 5. Analytical techniques

### Colorimetric technique

Gases chromatography is the advisable analytical technique to analyze organic substances using a flame ionization detector. In 1996, this technique was not available at the Los Azufres laboratory, and therefore a



colorimetric technique was used to determine the presence of ethanol in liquids. This technique is used by some police institutions to detect alcohol contained in blood, and also was used to determine alcohol in geothermal brine, giving satisfactory results. Solutions having well-known ethanol concentrations were prepared providing the corresponding calibration curves. The estimated detection limit is high, approximately 30 mg of ETOH/100 ml of water (300 ppm), but it was good enough for these tests (Fig. 5). The technique is based on the oxidation of alcohol to give acetic acid by the dichromate potassium method, according to the following reactions:

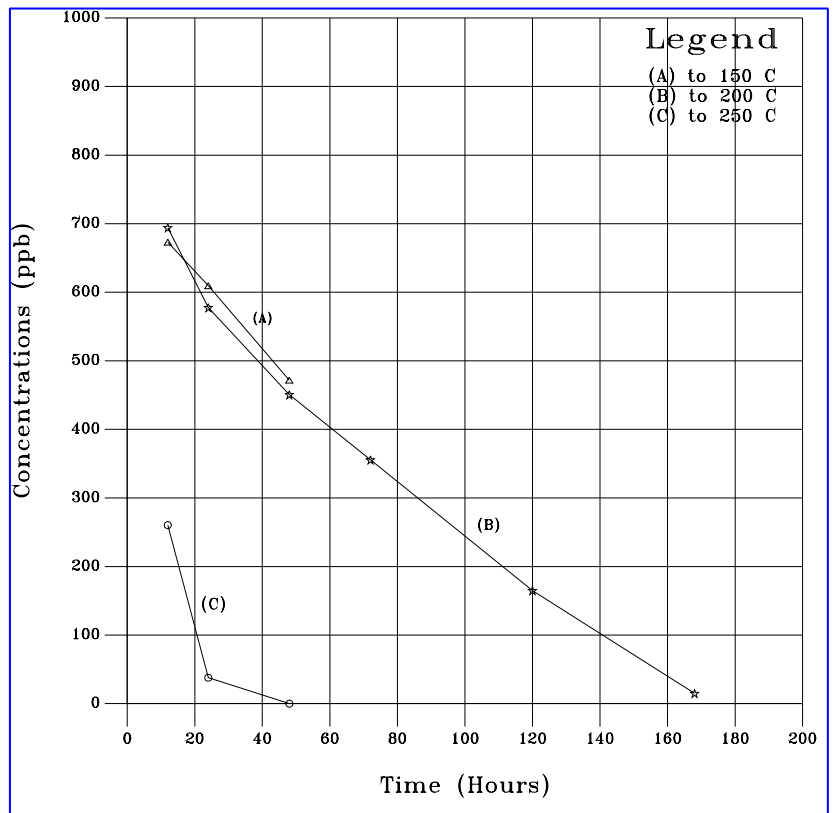
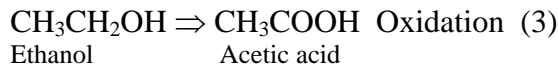
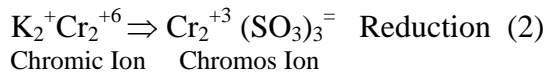
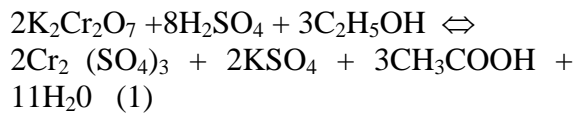
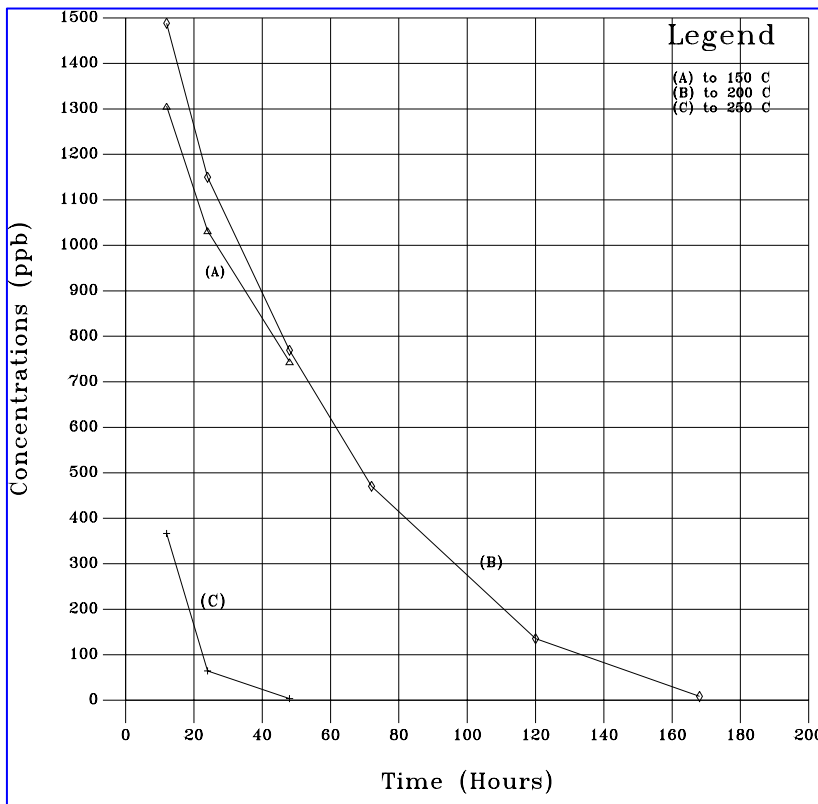


Fig. 3. Decay of rhodamine in de-ionized water at 150°C, 200°C and 250°C.



**Reagents**

To prepare a solution oxidizer:

- potassium dichromate = 4.165 g
- distilled water = 200 ml
- sulfuric acid = 250 ml

It is appraised to 1000 ml and stored in an amber recipient.

Saturated solution with potassium carbonate: The solution gets ready in distilled water with continuous agitation until no more is dissolved.

Witness Solution: A milliliter of the solution oxidizer is diluted in 4 ml of distilled water.

Fig. 4. Decay of fluorescein in de-ionized water at 150°C, 200°C and 250°C.



Standard Solution: 0.187 ml of ethanol is dissolved in 100 ml of distilled water.

This produces a solution with a concentration of 150 mg of ETOH/100 ml of water (1500 mg/l). If 1 ml of alcohol is dissolved in 100 ml of water the concentration would be 8000 ppm.

### **Procedure**

Inside the Conway camera, 2 ml of mixture oxidizer, 1 ml of solution saturated with potassium carbonate and 1 ml of the solution-problem are placed in the external compartment. The camera is covered and let to spin round, in order to mixing perfectly the solution-problem with the potassium carbonate. The mixture is left at ambient temperature during 12 hours or, in a hurry, the mixture is put in a stove at a temperature between 80-85°C during 30 minutes. A target is prepared using the same treatment as for the samples. The boxes are taken out of the stove and 1 ml of solution from the interior of the Conway box is mixed with 4 ml of previously prepared distilled water. The readings are made in the spectrophotometer at 440 nm, gauged with distilled water.

### **Calibration curve for ethanol**

To prepare the calibration curve, standard measures of 50, 100, 150, and 200 mg of ETOH/100 ml of water were prepared. In this range of concentrations a regression coefficient  $r$  equal to 0.99 was observed. This value indicates good fit with a linear model. At concentrations higher than 300 mg this fitting is not preserved. The resulting equation from the calibration curve is (Figure 5):

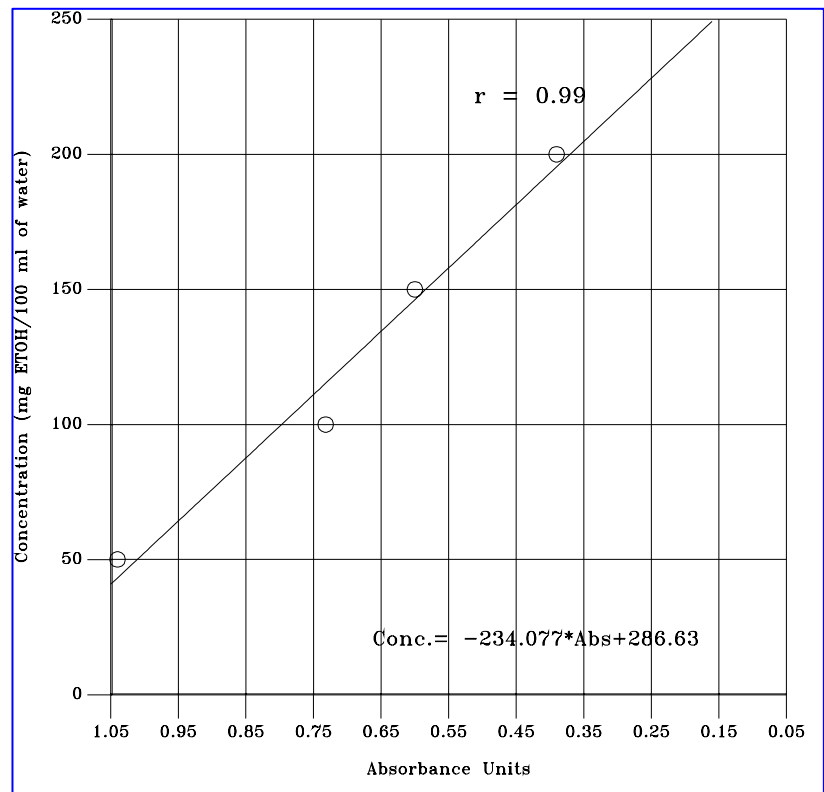


Fig. 5. Calibration curve for ethanol.

$$\text{Conc. ETOH} = -234.077\text{ABS} + 286 \quad (4)$$

The colorimeter used to prepare the curve was a Spectronic 21, Bausch & Lomb, from the chemistry laboratory of the Los Azufres geothermal field.

### **Calibration curve for rhodamine**

For the rhodamine calibration curve, patterns from 1 to 85 ppb were prepared. These standards were analyzed using a fluor-meter (Turner, Model 111), with automatic temperature compensator, obtaining a correlation coefficient of 0.99 (Figure 6). It was found out that the detection limit for rhodamine is 8 ppb.

### **Calibration curve for fluorescein**

For this calibration curve, standard measures from 2 to 100 ppb were prepared. These standards were analyzed using the same fluor-meter used for rhodamine. The corresponding correlation coefficient was equal to 0.998, indicating a very good linear fit. The minimum detectable concentration is 2 ppb (Fig. 7).

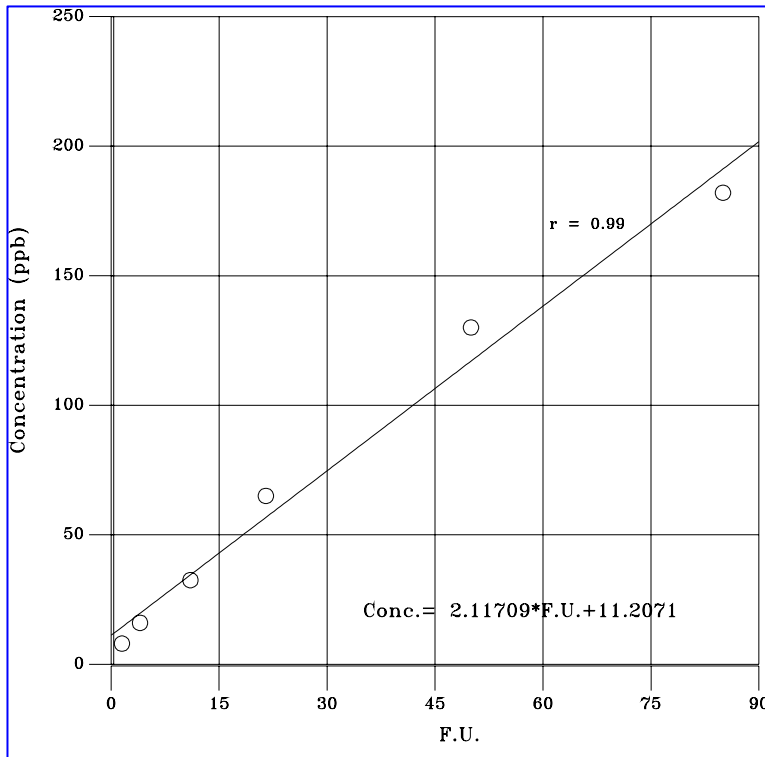


Fig. 6. Calibration curve for rhodamine.

### 6. Field test with ethanol

In accordance with the above-mentioned characteristics, ethanol was selected as an organic tracer and was tested in the Los Azufres geothermal field (Sámamo and Tello, 1996). This tracer was injected in the well AZ-8 (Figure 8). The feeding zone of this well is located at depths of 2040 m. The ethylic alcohol was injected directly into the wellhead, and the injection rate of brine was kept at 84 t/h during the test. Wells AZ-46, AZ-2, AZ-37, AZ-16D and AZ-33 were used as monitors (Fig. 1).

In August 14, 1996, five hundred liters of ethylic alcohol were injected in well AZ-8, at a rate of 45.5 liters per minute. The injection lasted 11 minutes, beginning at 18:42 hours and concluding at 18:53 hours (Tello, 1997).

The concentration of injected ethanol in the well can be calculated as follows:

Quantity of ethanol (tracer): 500 liters in 11 minutes, or 45.5 liters per minute

Dissolvent agent (geothermal brine): 84 t/h, or 1400 liters per minute

Concentration of ethanol in injected brine:  $45.5 / 1400 = 0.0325$ , or 3.25 l / 100 l of brine.

Considering that if 1 liter of ethanol diluted in 100 liters of water is equivalent to 8000 ppm, 3.25 liters has to be equivalent to:  $3.25 \times 8000 = 26,000$  ppm. Therefore, the ethanol concentration presented at the moment of tracer injection and mixing with 84 t/h of separated water was 26,000 ppm.

Sampling in the monitoring wells began 12 hours after the tracer was injected. As shown in Figure 1, the monitor wells cover practically all the possible routes for the fluids, under the assumption that the injected fluids migrate from west to east through faults and fractures existing in the zone.

Due to alcohol volatility, samples of separated water and condensed vapor were

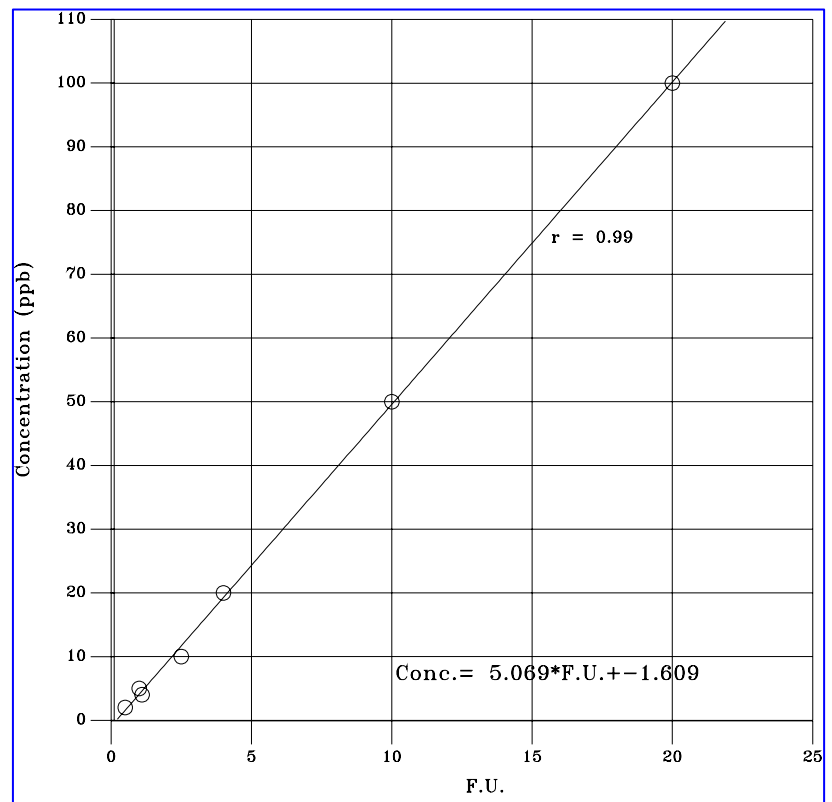


Fig. 7. Calibration curve for fluorescein.

taken at each monitor well. The sampling was done every 12 hours, including weekends, during three months. A total of 334 samples of separated water and 444 of condensed vapor were taken (Table 3).

WELL	SEPARATED WATER	CONDENSED STEAM
AZ-2	89	89
AZ-16AD	89	89
AZ-33	67	88
AZ-37	0	89
AZ-46	89	89
<b>SUBTOTAL</b>	<b>334</b>	<b>444</b>
<b>TOTAL</b>	<b>778</b>	

Table 3. Samples of separated water and condensed vapor.

There was no flame ionization detector in the Los Azufres laboratory at that time. The colorimetric technique is not enough sensitive to analyze low concentrations because its lowest limit of detection is 300 ppm. No ethanol could be detected in those 778 samples from the colorimetric method (Tello, 1997).

Therefore, 24 samples from the well AZ-46 (12 from separated water and 12 from condensed water) were selected and sent to an external

laboratory able to read concentrations up to 1 ppb by using the gas chromatography method with an ionization flame detector. These samples covered a period of two months after the injection, from August 19 to October 17.

### 7. Results of the analyses and conclusions

Table 4 presents the results of the analyses made on these 24 samples from the well AZ-46 (Tello, 1997). The highest concentrations of ethanol were detected in the steam phase in sample 3, taken 15 days after the injection, and in the liquid phase in samples 7 and 8, taken 34 and 39 days after the injection started, respectively (Figure 9).

The fact that the highest concentration of ethanol in the steam phase occurred 15 days after the injection, while the maximum one in the liquid phase or brine occurred 34 days later, suggests that alcohol fractionates preferentially in the steam phase and moves or migrates two times faster than in the liquid phase.

Considering that the distance from the injector well AZ-8 to the monitoring well AZ-46 is about 2630 m, it can be estimated that the tracer traveled at an average of 176 m/day in the steam, equal to 77.5 m/day in the brine. Thus, an average fluid speed of 126.7 m/day is very similar to the fluid velocity value of 124.8 m/day obtained by production tests. The percentage of recovered tracer at the well AZ-46 was 3%.

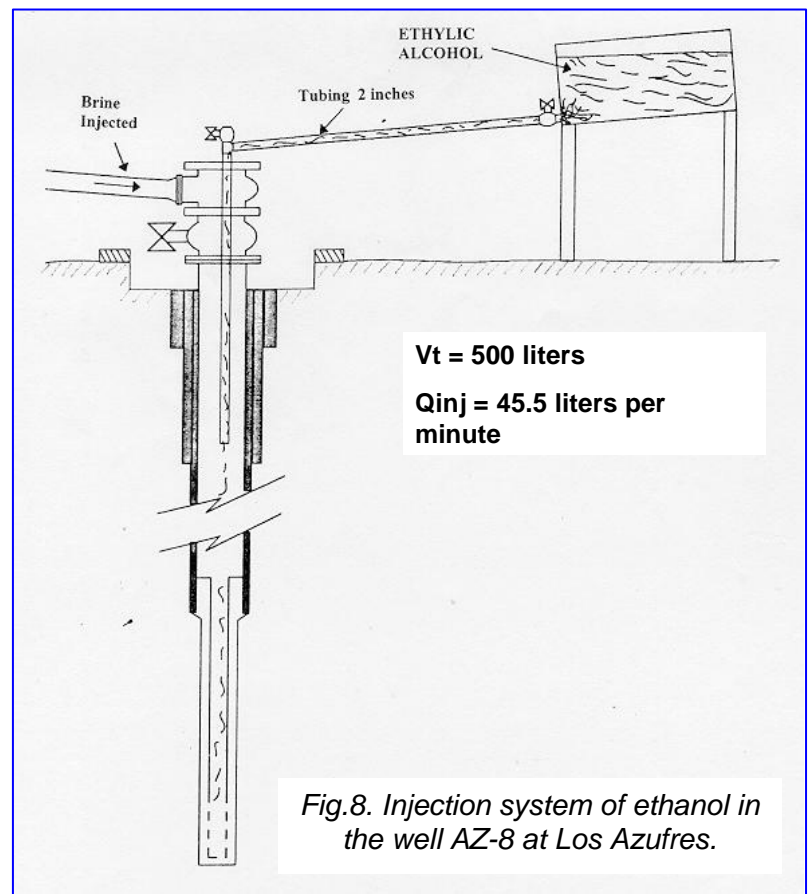


Fig.8. Injection system of ethanol in the well AZ-8 at Los Azufres.

From the results of this tracer analysis, it is possible to conclude that ethanol presents good enough characteristics (chemical, thermal, and physical) to be used as a tracer in both phases in geothermal environments.

SAMPLES		ETHANOL (ppm) IN:	
No.	Date	Condensed steam	Separated brine
1	19/08/96	0.39	0.22
2	24/08/96	0.42	0.26
3	29/08/96	5.48	0.34
4	03/09/96	0.74	0.31
5	08/09/96	0.19	1.72
6	13/09/96	0.37	0.94
7	18/09/96	0.57	5.03
8	23/09/96	0.21	5.07
9	28/09/96	0.19	0.9
10	03/10/96	0.51	0.31
11	12/10/96	0.95	0.35
12	17/10/96	0.54	0.26

Table 4. Analyses of ethanol by gases chromatography using flame ionization detector on samples form well AZ-46.

References

Adams, M.C., J.J. Beall, L.S. Eney, and P. Hirts (1991). The application of halogenated alkanes as vapor-phase tracers: A field test at the southeast Geysers. *GRC Transactions*, Vol. 15, pp. 457-462.

Adams, M.C., J.N. Moore, L. Fabry, and A.H. Ahn (1992). Thermal stabilities of aromatic acids as geothermal tracers. *Geothermics*, Vol. 21, pp. 323-339.

Bixley, P.F., R.B. Glover, W.J. McCabe, B.J. Barry, J.T Jordan (1995). *Tracer Calibration Test at Wairakei Geothermal Field*. Publication of the ECNZ Wairakei Power Station. Private Bag 2001, Taupo, New Zealand.

Hirts, P. (1995). Tracer dilution measurements for two-phase geothermal production: Comparative testing and operating experience. *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy.

Horne, R.N., and H. Gutiérrez P. (1989). Tracer testing at Los Azufres, Michoacan, Mexico. *Proceedings, 14<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, pp. 197-199.

McCabe, W.J., E. Mayen, y P. Hernández (1990). Avance de las pruebas de radiotrazado en el campo geotérmico de Ahuachapán, El Salvador, C.A. Reporte interno del Centro de Investigaciones Geotérmicas de la CEL, El Salvador. Inédito.

Rose, P.E., and M.C. Adams (1994). The application of rhodamine

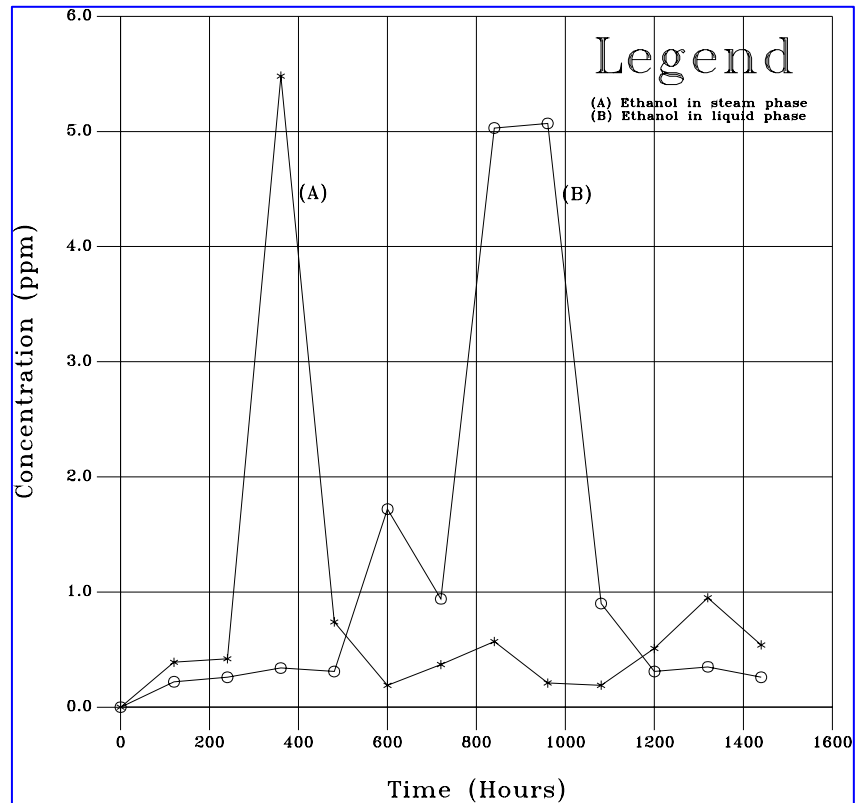


Fig. 9. Ethanol return curves in both phases steam and brine in samples from the monitoring well AZ-46.

WT as a geothermal tracer. *GRC Transactions*, Vol. 18, pp. 237-240.

Sámano S., E., y E. Tello H. (1996). Prueba con trazador alcohol etílico anh. en el pozo AZ-8 del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Internal report of CFE No-OIY-AZ-017/96. Unpublished.

Suárez A., M.C. (1996). Some mismatches occurred when simulating fractured reservoirs as homogeneous porous media. *Proceedings, 21st. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, pp. 150-155.

Tello H., E. (1997). Pruebas con trazadores orgánicos. Los Azufres, Mich. (Fase final). Internal report of CFE No. DEX-AZ-001-97. Unpublished.

Vetter, O.J., and K.P. Zinnow (1981). Evaluation of well-to-well tracers for geothermal reservoirs. Part 1. Literature survey. Part 2. Laboratory work. Publication of the Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.

# **Foro**

Sección con artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos de los artículos técnicos usuales y que no han sido sometidos a arbitraje técnico.

## Una extraña raza de gato

Un ensayo acerca de los exploradores geotérmicos, basado en más de 50 años en el negocio

*Carl F. Austin*

Fundador del proyecto geotérmico de Coso.

Traducción del artículo original, publicado en el *Bulletin del Geothermal Resources Council (GRC)* Volumen 34, No. 1, Enero-Febrero de 2005, reproducido con permiso del editor. Traducción de José Luis Quijano León.

---

Los prospectos geotérmicos de alta temperatura son lugares en los que la perforación permite que los fluidos y gases fluyan hacia la superficie, a una temperatura y con un volumen suficientes para operar una máquina primaria. ¿Cómo se puede encontrar un yacimiento así? En la actualidad, la mayor parte de la actividad perforatoria se realiza cerca de manantiales termales, bajo el supuesto de que abajo hay una fuente de calor. Esto es similar a la forma en que la industria petrolera empezó, perforando cerca de los rezumaderos de petróleo. La industria petrolera se dio cuenta de que la situación era un poco más complicada. La industria geotérmica no ha logrado dar el salto en sus conceptos exploratorios.

La geología consiste en reunir hechos y hacer interpretaciones. Sin embargo, las interpretaciones son comentarios, no hechos. Por ejemplo, mapeo una discontinuidad lineal y la interpreto como una falla. Como está emergiendo vapor, puedo concluir que existe un recurso geotérmico, cuya salida está controlada por esa falla. El rasgo lineal es un hecho. Los tipos de roca a los lados de este rasgo lineal son hechos. El vapor que emerge a lo largo de este rasgo lineal es un hecho. Todo lo demás es interpretación basada en suposiciones.

Cito a un personaje de una novela de Tom Clancy: ‘Las suposiciones son la madre de todas las estropicios’. Una vez un geofísico me dijo que la versión del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de lo que ocurría a profundidad, era la única explicación posible. Quedó aturdido cuando le mostré una docena de interpretaciones compatibles con la geología factual. La habilidad de buscar interpretaciones alternas es la razón por la que los exploradores encuentran ocasionalmente yacimientos valiosos, y es la razón por la que los geocientíficos académicos y del gobierno —quienes están atorados buscando la “única respuesta verdadera”— consideran a los exploradores como un grupo de idiotas extraviados.

En su texto de la geología de California, Norris y Webb (1976) ofrecieron un ejemplo clásico de la mentalidad académica: “El panorama a menudo puede pasar desapercibido por el geólogo cuando encuentra una abundancia de detalles bien expuestos”. Los yacimientos son anomalías. Si uno está casado con el panorama amplio nunca los reconocerá. Parafraseando a Norris y Webb: “Los geólogos, cuando se enfrentan con el panorama amplio, pierden de vista los detalles.” El dinero está en el detalle, no en el panorama amplio.

Una tarea mayor para los exploradores es separar los hechos de las suposiciones e interpretaciones que llenan la literatura. Un ejemplo increíble que ha obstaculizado la exploración es la interpretación, patrocinada por el gobierno [norteamericano], de que la provincia de *Basin and Range* [Cuencas y Sierras] en el Oeste Norteamericano son una serie de ‘grabens’ y ‘horsts’, y que son el resultado de una extensión. Los exploradores de minerales difíciles abandonaron esa noción hace más de 30 años.

Mientras desarrollaba los 270 MW del proyecto geotérmico de Coso, en la Base Naval de China Lake en la parte central de California, me dijeron repetidamente que el proyecto era imposible. El modelo del USGS demostraba que Coso era imposible debido al tipo de roca y porque es un área de extensión. El modelo del

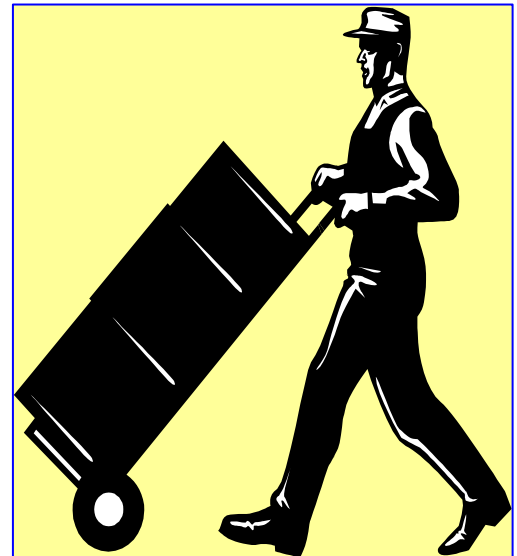


Departamento de Energía (DOE) indicaba que Coso era imposible porque el calor no se acumularía en un área de extensión. Yo leí estas conclusiones durante la ceremonia de inauguración de cada una de las nueve turbinas.

Con respecto a los modelos, se pueden crear modelos de panorama amplio (el bosque), modelos regionales (los árboles) y modelos locales (un árbol viejo y nudoso). Un explorador NUNCA confía en ningún modelo popular. Por ejemplo, una gran compañía petrolera perforó en un prospecto de oro en la provincia *Basin and Range*, con objeto de probar la presencia del “único modelo verdadero.” Su modelo no apareció, así que el proyecto se abandonó. Otro explorador probó otras interpretaciones que podrían producir dinero, y el resultado fue una mina de oro a cielo abierto altamente exitosa.

Como lo definió bellamente Erskine (2001), la provincia *Basin and Range* ¿es extensional o es una serie de semi-anticlinales y cabalgaduras partida por la mitad? Si es un sistema de semi-anticlinales, las fuentes de calor magmático deben estar debajo de las cabalgaduras. Para ajustarse al grupo de los extensionalistas, gran parte de los mapas publicados de Coso deja fuera las fracturas que no encajan en el panorama amplio; pero Coso es una anomalía. Por supuesto, el panorama amplio no debe dar cabida a la anomalía, que se supone físicamente imposible.

El secreto industrial, aunado a las políticas académicas y gubernamentales, ocasiona que las interpretaciones, que se caracterizan mejor como nociones, se perpetúen en la literatura. Por ejemplo, en una reunión donde presenté los resultados de una intrincada interpretación a una foto de satélite, corroborada por una vasta cantidad de trabajo de campo, un joven doctor en geología irrumpió con una carretilla cargada con una pila de libros cuyo contenido completo, según afirmó, probaba que mi trabajo geológico estaba equivocado. Sin embargo, cada artículo de su carretilla estaba basado en los supuestos de los otros, no en datos. En otro caso, puedo recordar una reunión técnica, en la que se le preguntó a un conferenciante del USGS: “¿Cree usted realmente en lo que acaba de decir en su presentación?” El expositor respondió sin pensarlo mucho: “¡Desde luego que sí, todo aquel que no lo ha hecho ha sido despedido!” Esta declaración fue probablemente su último acto oficial.



Continuando con *Basin and Range*, consideremos los puntos calientes migratorios. ¿Es esto un hecho? No, y si estamos tratando con semi-anticlinales y cabalgaduras apiladas, con los planos de cabalgadura como el lugar más probable de emplazamiento de intrusivos, entonces el concepto de puntos calientes que migran es irrelevante, es decir, no importa cómo o por qué la fuente de calor granítico llegó ahí, el hecho es que ahí está. ¿Estamos tratando con magmas diferenciados o con granitización? Como se menciona en la Memoria 28 de la Sociedad Geológica Americana (Read, 1948): “Este asunto del origen de granito es probablemente el más vivo de los tópicos geológicos actuales; sin embargo debemos recordar que siempre lo ha sido.”

Escoger a ciegas “la única interpretación verdadera” implica que un yacimiento será localizado al azar, y no por una toma razonada de decisiones. Para ejemplificar, recientemente le eché un vistazo a un yacimiento con metales base, metales preciosos y mercurio. Las publicaciones muestran que la ubicación de este yacimiento está controlada por gran una falla normal. ¿Es así? Esta “falla normal” presenta alteración hidrotermal masiva en el “lado del piso”, y más atrás, en el “bloque caído”, se encuentran depósitos epitermales adicionales, zonas impresionantes de alteración, y unos pocos kilómetros dentro de este bloque hay escapes de vapor. ¿Es ésta una falla normal, o más bien estamos viendo un escape que asciende por un

plano de cabalgadura? ¿Es por esto que un pozo profundo, cercano a una de las zonas de alteración, no encontró nada de interés a profundidad, esto es que el pozo se perforó en rocas frías debajo de una falla de cabalgadura casi horizontal? Algún día haré geología de detalle en esa zona, trazaré tantas secciones interpretativas diferentes como pueda, que sean consistentes con la geología superficial y, si existen indicios de objetivos de alta temperatura, perforaré. Hasta ahora, la literatura publicada muestra que no hay ahí nada de interés.



Conozco varios yacimientos geotérmicos, con inversiones de temperatura importantes y sin una fuente de calor identificada, que desconciertan a los operadores. Quizá deberían jugar a ser exploradores, comenzando con la geología superficial factual y ver después cuántas interpretaciones del subsuelo son posibles. Este trabajo interpretativo, apoyado con los estudios “de cajón” necesarios para sentirse a gusto, puede quizá llevarlos a un recurso de alta temperatura. El calor no se acumula mágicamente, como una gota de tinta en un papel.

Para ilustrar, un maestro Sigma Xi de una importante escuela de minería ha publicado ampliamente que todos los granitos son resultado de una diferenciación magmática de Bowen. Me pidieron que llevara a esta Vaca Sagrada al campo y que no lo importunara hasta la hora de su clase vespertina, por lo que llevé al exquisito caballero a ver un ejemplo de granitización que desafiaba su suposición. Después de echarle un vistazo al área, me dijo, con un guiño de ojos, que apreciaba realmente que le hubiese mostrado ese ejemplo tan sorprendente. Después me dijo: “No espere que admita esto en público, porque tengo una posición pública que mantener.” Esta experiencia me convenció de la necesidad de separar los hechos de las interpretaciones y las suposiciones.

La mayoría de las secciones geológicas publicadas de áreas con rocas volcánicas las muestran alimentadas por rasgos verticales. ¿Por qué? Algunas secciones publicadas muestran que los depósitos minerales, en una mina de plata, se sitúan adyacentes a un ‘stock’ limitado verticalmente. Un geólogo minero con inclinaciones exploratorias postuló que el ‘stock’ con sus bordes verticales podría ser realmente sólo un delgado ‘sill’. Con una perforación se demostró que el ‘stock’ no estaba ahí. La falsa interpretación todavía está incrustada en la literatura.

Volviendo al concepto de semi-anticlinales para la provincia de *Basin and Range*, ¿son todas las sierras semi-anticlinales espaciados entre sí unos 100 km? No, pero asumir ciegamente que todas esas sierras son ‘grabens’ y ‘horsts’, o bloques posicionados por fallas extensionales curvas, tampoco es muy sabio. Un explorador nunca sabe la respuesta, sino sólo algunas de las posibilidades a tomar en cuenta.

Conocer posibilidades, no respuestas contundentes, es lo que hace al explorador impopular entre los académicos, los geólogos de agencias gubernamentales y, muy a menudo, entre la alta gerencia, todos los cuales practican lo que Feynman (1974) llamó la ‘Ciencia del Culto al Carguero’. A todos nos gusta decir, “YO SÉ... bla, bla, bla...”, engañándonos con nuestra brillantez a nosotros mismos y a los que nos escuchan. ¡No es lo que no sabemos lo que nos fastidia, sino lo que sabemos que no es! La alta gerencia, especialmente

si tiene formación ingenieril, se horroriza cuando el geólogo dice: “Bueno, tengo como 30 interpretaciones y, por lo menos seis de ellas servirían para hacer dinero, si realmente estuvieran ahí”. Este geólogo es absolutamente honesto, pero su carrera corporativa será más bien corta, a no ser que la gerencia tenga un punto de vista exploratorio.

¿Cómo evaluamos un proyecto geotérmico, en caso de que encontremos uno, sea por accidente o por un brillante esfuerzo geológico? ¿Qué pasa ahí abajo? Se requiere una fuente de calor, un fluido que recoja el calor, y un sistema hidráulico que permita al fluido moverse hacia el pozo, que transporta al fluido de donde está a donde lo queremos. Un sello, que favorezca la acumulación del recurso, en lugar de que el fluido se derrame como manantiales termales o minerales, es vital.

Los exploradores que buscan recursos de alta temperatura necesitan comprender los procesos magmáticos. Un libro obligatorio para el explorador es *Algunos Aspectos del Papel del Agua en las Rocas Fundidas*, escrito por Kennedy (1955). Los exploradores deben haber leído mucho y tener mucha experiencia sobre los sistemas de depósitos de mena, sus estructuras, y las condiciones paleoclimáticas que afectaron el sello y las condiciones a profundidad. La evaluación de prospectos requiere comprender cómo se comportará la roca huésped y el fluido con la caída de presión al acercarse el fluido al pozo, cómo se comportará el fluido al moverse en el pozo, y luego cómo se comporta el fluido enfriado y cómo interactúa con la porción del yacimiento donde se inyecta, especialmente si está contaminado con oxígeno. Los fluidos oxigenados son la muerte en un yacimiento que contenga diques felsíticos. Cerca de 20 principales variables mineralógicas controlan la capacidad de producción a largo plazo y ‘hacer reventar’ un pozo para mantenerlo abierto puede impresionar a los inversionistas pero el autobrechamiento lo puede arruinar.

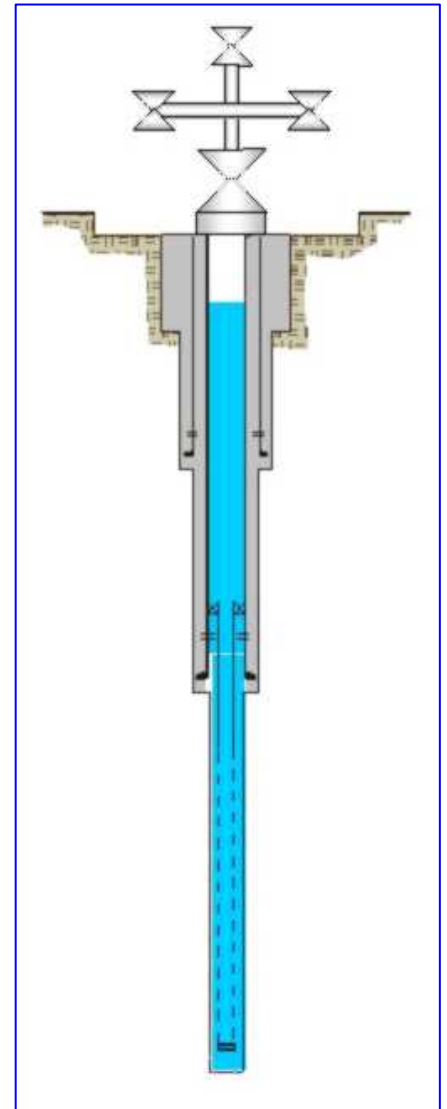
¿Qué proporciona el calor? Un recurso potencial de alta temperatura que estudié en la Costa Este parece ser resultado de un intenso metamorfismo local. En el occidente de Estados Unidos, la evidencia abrumadora es que uno está tratando primariamente con sistemas magmáticos, que pueden estar en movimiento o no, siendo el recurso geotérmico resultante un sistema de depósito de mena en cierta etapa particular de su ciclo de vida. Los exploradores geotérmicos harían bien en estudiar la Historia de la Teoría de los Depósitos de Mena, escrita por Crook (1933), y los conceptos de alteración hidrotermal propuestos por Sales y Meyer (1948) y Lovering (1949). Mientras trabajaba en poner a Coso en producción, los registros identificaron patrones de fracturas y de alteración muy similares a los observados en la Amethyst Mine en Creede, Colorado. Por eso consideré a Coso como un tipo yacimiento sistema de vetas de amatista. Asimilando estructura y geoquímica, uno puede a menudo escoger una mina, descender, y estudiar un yacimiento comparable en tres dimensiones.

Una gran mina de cobre a cielo abierto, en el oeste de los Estados Unidos, es un ejemplo soberbio de lo que uno esperaría en un yacimiento geotérmico. Después de que ocurrió la mineralización, el depósito completo fue volteado y descansa ahora en uno de los lados. Se puede empezar por uno de los extremos del tajo en la roca huésped, sujeto a condiciones epitermales, y caminar a lo largo –varios miles de metros-- para terminar de nuevo en la roca huésped pero ahora sujeta a altas condiciones mesotermiales o hipotermiales. Las lecturas sugeridas incluyen el trabajo de Stringham (1952) sobre la estabilidad de la alteración mineral, y el texto de Aguilera (1955), *Yacimientos Fracturados Naturalmente*. Una lista de los textos y artículos pertinentes podría constituir un libro en sí misma [la Parte C del Reporte número 13 del Nevada Bureau of Mines tiene un artículo (Austin, 1966) sobre la exploración geotérmica con cerca de 600 referencias, todas las cuales vale la pena leer].

Perforar un pozo geotérmico como si fuera un pozo de gas o de petróleo es un desastre. Me viene a la mente un pozo que se terminó con 370° C y nunca produjo ni una gota de fluido. El propietario preguntó quejumbrosamente por qué con esa temperatura, además de evidentes zonas fracturadas encontradas durante la perforación, no hubo producción de fluido. Al perforar con un lodo muy pesado y no cambiar a aire una vez que se entró a la zona potencialmente productora, se había creado un agujero revestido de cerámica.

Después, ignorando el daño que ya se había causado al perforar con lodo, se cementó una tubería de revestimiento hasta el fondo, convirtiendo el pozo en un agujero revestido de acero y cemento. Fracasaron los intentos de hacerlo producir con perforadores de pistola y cargas cónicas, debido a la temperatura existente. Como perforadores de gas y petróleo, esta gente era muy competente. Sin embargo, no tenían ni la menor idea sobre cuáles podrían ser las condiciones del yacimiento o sobre cómo perforar para permitir la producción de fluido geotérmico.

La mayoría de los prospectos geotérmicos en el oeste norteamericano tienen estructuras similares a las de los yacimientos minerales en la misma región: conductos brechados, diques de escombros, juego de esfuerzos conjugados, sistemas de fracturas cimera y de cola de caballo, echados horizontales, cabalgaduras a lo largo de planos de estratificación y capas favorables con permeabilidad y porosidad primaria y secundaria por fracturamiento. Muchos hidrólogos de agua subterránea creen que los granitos no pueden contener agua. Mientras se desarrollaba el proyecto geotérmico de Coso, el USGS proclamó que no se encontraría ningún recurso en Coso, porque la roca huésped era granito. Las rocas graníticas pueden despedazarse si son plegadas y sometidas a esfuerzos, dando por resultado tremenda porosidad y permeabilidad. He visto un caudal de un metro cúbico por segundo derramarse a través de una zona de fractura en un granito. ¡Imagínense la producción que uno vería si tal zona de fractura fuera atravesada por un pozo, a unos cientos de grados Celsius! Tal parece que a pocos hidrólogos se les enseña la diferencia entre propiedades constituyentes (propiedades de los minerales que componen la roca), propiedades del material (propiedades de la roca fresca con calidad lapidaria descritas en tablas de ingeniería) y propiedades de conjunto (propiedades de la gran masa fracturada y alterada del yacimiento). Los exploradores geotérmicos han tenido que afilar mejor sus conocimientos básicos sobre yacimientos minerales.



Los conductos brechados son rasgos importantes. En una ocasión observé a un operador perforar un excelente pozo productor en lo que, para mí, era un evidente conducto brechado vertical. Se quedó estupefacto porque tenía un pozo seco a sólo 100 metros de distancia. Cuando me pidieron un comentario, utilicé el la brecha de Crystal Hill como ejemplo. Este conducto está intensamente alterado y mineralizado. Los bordes del conducto son precisos y bien definidos. La diferencia entre un buen pozo productor (en el conducto) y uno no productor (fuera del conducto) puede ser cuestión de unos cuantos metros en su ubicación. Incidentalmente, el pozo 75-7, con el que se descubrió Coso, estaba localizado en un obvio conducto brechado.

Las provincias metalogénicas y su relación con la química de los yacimientos minerales; las implicaciones geoquímicas del cinturón de minerales de arsénico que se extiende desde Tick Canyon cerca de Los Angeles hasta Mercur, Utah (Joralemon, 1978); los enfoques sobre disparos dispersos o dirigidos (Joralemon, 1984); El Papel de la Suerte en la Exploración Minera (Baillo, 1979); y cómo entenderse con ingenieros y administradores sin conocimientos geológicos: todos ellos son asuntos de interés para el explorador. El explorador puede resultar molesto para el geólogo casado con “la única interpretación verdadera”, pero será el explorador quien localice la siguiente generación de sistemas geotérmicos grandes, profundos y poderosos.

## REFERENCIAS

- Aguilera, R. (1995). *Naturally Fractured Reservoirs*. Pennwell Publishing Co., Tulsa, Oklahoma, 521 pp.
- Austin, C.F. (1966). Selection Criteria for Geothermal Prospects. *Part C, Report 13*, Nevada Bureau of Mines, pp. 93-125.
- Bailly, P.A. (1979). The Role of Luck in Mineral Exploration. *American Mining Congress Journal*, pp. 56-61.
- Crook, T. (1933). *History of the Theory of Ore Deposits* (con un capítulo sobre el Surgimiento de la Petrología). Thomas Murley and Co., London, 163 pp.
- Erskine, M.C. (2001). Structural Overlap of Basin and Range Stratigraphic Packages onto the Colorado Plateau Cratonic Package in South Western Utah. *Utah Geological Association Publication No. 30*, Mackin Volume.
- Feynman, R.P. (1974). *Cargo Cult Science*. 1974 Caltech commencement address.
- Joralemon, P. (1978). A Major Gold Belt Takes Shape in Nevada. *Mining Engineering*, v. 30, no. 7, pp. 759-762.
- Joralemon, P. (1984). Sharpshooter and Scattergun in the Golden Hills of Nevada. *International Mining*, pp. 24-30.
- Kennedy, G.C. (1955). Some Aspects of the Role of Water in Rock Melts. *Proceedings of Crust of the Earth - A symposium*. Geological Society of America Special Paper 62, pp. 489-504.
- Lovering, T.S., et al. (1949). Rock Alteration as a Guide to Ore, East Tintic District, Utah. *Economic Geology Monograph I*, pp. 1-64.
- Norris, R.M., and R.W. Webb (1976). *Geology of California*. Wiley and Sons, 365 pp.
- Read, H.H. (1948). Granites and Granites. *Geological Society of America Memoir 28*, on Origin of Granite, ed. por J. Gilluly.
- Sales, R.H. and C.H. Meyer (1948). Wall Rock Alteration at Butte, Montana. *Mining Technology*, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers.
- Stringham, B. (1952). Fields of Formation of Some Common Hydro-Thermal Alteration Minerals. *Economic Geology*, v. 47, no. 6, pp. 661-664.



## El Mundo de la Energía

(Con información recopilada por Alfredo Mañón Mercado)

### □ La demanda de paneles fotovoltaicos supera la oferta

Los fabricantes de paneles solares para la producción de electricidad tienen problemas para abastecer el mercado mundial, debido al importante incremento de la demanda, especialmente del mercado alemán, y al estancamiento de la oferta de células de silicio, componente básico de los paneles fotovoltaicos.

En España esta escasez de silicio está limitando las posibilidades de crecimiento de la energía solar fotovoltaica. Desde hace tiempo los instaladores de paneles fotovoltaicos tienen dificultades para obtener paneles, y la previsión que hacen los fabricantes españoles es que este desabastecimiento se prolongará hasta comienzos de 2007.

La razón fundamental estriba en la limitada oferta de silicio de grado semiconductor, componente fundamental de la mayor parte de los paneles fotovoltaicos que se fabrican en la actualidad. Aunque el silicio es un material muy abundante en la tierra, su depuración y cristalización está en manos de solo 6 empresas en el mundo.

Más información:

[http://www.ecologistasenaccion.org/article.php3?id\\_article=1452](http://www.ecologistasenaccion.org/article.php3?id_article=1452)

### □ Debate sobre la energía eólica "tierra adentro" en Gran Bretaña

La Fundación de Energía Renovable (REF), ha llamado a revisar la política energética del Reino Unido, argumentando que el énfasis que se da a la energía eólica requiere cambios.

Se afirma que los políticos están promoviendo las turbinas de viento como una energía verde haciendo creer al público que así es, cuando en realidad esta energía es muy costosa y no puede

satisfacer las necesidades de energía de Gran Bretaña pero si puede destruir el campo.

La Fundación REF dice que para alcanzar el 10% de generación eléctrica con energías renovables se requiere de 39 mil turbinas eólicas distribuidas en toda Gran Bretaña. REF indica que apoya a las energías renovables, pero que también desea salvaguardar los paisajes del Reino Unido de la industrialización insostenible. En búsqueda de soluciones, la REF destaca la necesidad de una política energética integral equilibrada, ecológicamente sensible y eficaz.

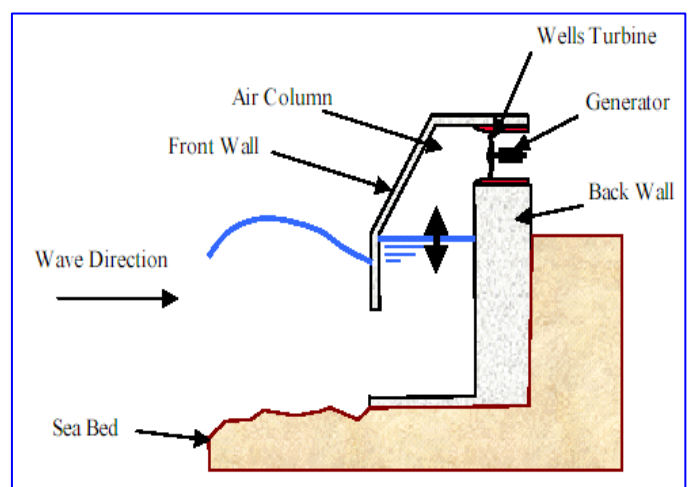
El botánico David Bellamy dijo que una turbina del viento "no es verde; destruye los paisajes; mata pájaros; mata murciélagos."

Más información:

<http://www.guardian.co.uk/international/story/0,,1425850,00.html>

### □ Energía de las olas

Las olas del océano son una forma derivada de energía solar, con el viento como agente de transferencia de la energía solar a la superficie del mar. El desigual calentamiento solar de la Tierra genera viento y al soplar el viento sobre la superficie del mar, genera olas.



Una característica única de las olas del océano es que una vez generadas, pueden viajar grandes distancias con pérdidas insignificantes de energía. Consecuentemente, la energía de las olas generadas en cualquier parte del océano finalmente llega a la costa virtualmente intacta.

Mientras que la radiación solar y los vientos se distribuyen sobre la superficie entera del planeta, la energía de la onda se recolecta sólo a lo largo de sus líneas de costa, que suman 336 mil kilómetros de longitud. A un índice de renovación global de 1012 a 1013 watts, el flujo medio de la energía de las olas en el mundo es del orden de varios a algunas decenas de kilowatts por metro de litoral (kW/m), que es el flujo típico que recibiría un dispositivo de conversión de energía de olas. En comparación, las densidades medias anuales de energía solar y de viento son del orden de centenares de watts por metro cuadrado de área de panel solar o de área barrida por el rotor de una turbina eólica. Así, la densidad de la energía de las olas del océano es por lo menos un orden de magnitud mayor que los procesos naturales que los generan.



La elevada densidad de energía de las olas del océano ha atraído la atención de los inventores por más de dos siglos. La primera patente fue publicada en París en 1799, por los Girards, padre e hijo, que previeron una “nave” unida a la orilla por una palanca gigantesca que movería bombas o maquinaria. Los primeros usos prácticos de la energía de las olas fueron a mediados del siglo XVIII usando dispositivos oscilantes de columna

del agua para presurizar el aire, utilizado para accionar las sirenas de niebla en faros y boyas costa afuera. La primera vez que se generó electricidad con las olas fue a principios del siglo XIX, pero la exploración extensa de la energía de las olas no ocurrió hasta el embargo petrolero de 1973 por la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) que provocó una década de incremento en los precios de los combustibles fósiles en todo el mundo.

Como con otras tecnologías de energía renovable, el embargo petrolero de la OPEP condujo al establecimiento de varios programas nacionales auspiciados por los gobiernos para la investigación y desarrollo de tecnologías para aprovechar las olas. Los mayores esfuerzos ocurrieron en gran medida en el Reino Unido, Noruega y Japón. Aunque no como grandes programas nacionales, fue significativa la participación en las pruebas de prototipos operacionales en el océano, que se han conducido en Suecia y Dinamarca. Otras naciones que también han emprendido el desarrollo de tecnología y efectuado pruebas recientes de dispositivos en el océano incluyen a la India y a China.

En 1991, el primer programa multinacional de energía de olas de Europa comenzó y continúa hoy, con el primero de sus proyectos experimentales de 500 kWe, denominado LIMPET, puesto en operación en la isla escocesa de Islay.

Más información:

<http://www.wavegen.co.uk>

[http://www.wavegen.co.uk/what\\_we\\_offer\\_limpet\\_islay.htm](http://www.wavegen.co.uk/what_we_offer_limpet_islay.htm)

#### □ Según el WEC, el mundo no padece escasez de recursos energéticos

No hay escasez de biomasa, de viento o de recursos geotérmicos en el mundo, según un estudio del Consejo Mundial de Energía (WEC por sus siglas en inglés).

Potencialmente, la biomasa es la fuente de energía más grande y sustentable del mundo, pero para pasar de la etapa “potencial” a la de producción y



uso de la biomasa, esta última debe modernizarse, concluye la vigésima edición del Consejo Mundial de Energía sobre "Investigación de las Fuentes de Energía".

Después de la hidroelectricidad, la energía del viento es considerada como la más avanzada de las energías renovables. Las granjas eólicas mar adentro estimulan la entrada al mercado de turbinas de 5 MW de capacidad. El incremento de la participación de energía eólica hará que muchos sistemas eléctricos se enfrenten a nuevos retos en materia de estabilidad de redes eléctricas y en sistemas de control de potencia.

"La geotermia es un recurso renovable importante que se puede destinar a la producción de electricidad como carga base", continúa el estudio. Los casi 9 mil MW de capacidad instalada mundial pueden producir electricidad con un factor de carga que excede el 90%.

La naturaleza volátil del precio del petróleo ha quedado clara en los últimos dos años. Y a pesar de que los precios se han triplicado, esto no ha sido provocado por una disminución en las reservas.

Las reservas globales de gas natural son "considerablemente más grandes" que las reservas de petróleo, pero llevar más gas al mercado es un desafío significativo que requerirá una inversión enorme para construir nuevas redes de tuberías. Se estima que el gas natural licuado (LNG por sus siglas en inglés) incrementará su importancia en abastecer mercados alejados de las fuentes de producción, y sus costos de producción declinarán como resultado de progresos tecnológicos en procesos de licuefacción y producción.

"Aunque no hay escasez, la concentración física de los recursos estratégicos principales en solamente algunas regiones es una preocupación seria para muchos países dependientes de las importaciones", dice el informe del WEC. "Una mezcla diversificada de la energía es absolutamente vital para la estabilidad de precios, y se debe tomar en consideración cuando los países desarrollen planes nacionales de energía o estrategias de negocio de largo plazo."

Más información:

<http://www.geopower.ca/pdf/Report%20from%20the%20World%20Energy%20Council.pdf>

#### □ Paneles solares termodinámicos

Calentar un fluido que se encuentra a una temperatura entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $-15^{\circ}\text{C}$ , que se gasifica con el cambio de temperatura captada por el panel solar, y comprimirlo luego para elevar su temperatura hasta  $110^{\circ}\text{C}$  a  $130^{\circ}\text{C}$ : esto es a grandes rasgos lo que propone la empresa Solar PST, un nuevo concepto que mezcla dos tecnologías: los colectores solares y la bomba de calor.

El funcionamiento parte de la circulación de un fluido refrigerante que está en los paneles solares en forma líquida de  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $-15^{\circ}\text{C}$ . Los paneles captan la radiación solar durante las horas de sol, absorben la temperatura superior del ambiente durante todo el día e, incluso, de la lluvia, que también es mayor. Esta variación de temperatura provoca que el fluido se gasifique, y se envía a un bloque termodinámico.



En este punto, el compresor del bloque, mediante presión, eleva la temperatura del fluido entre  $110^{\circ}\text{C}$  y  $120^{\circ}\text{C}$ , la que es transmitida al circuito de agua mediante un intercambiador de temperatura. Los componentes principales de una instalación solar termodinámica son los captadores solares, el compresor, el condensador y la válvula de expansión. Los diferentes elementos están unidos entre sí mediante tuberías de cobre deshidratado.

Más información: [www.solarpst.com](http://www.solarpst.com)

## Congreso Geotérmico Mundial (*World Geothermal Congress*) 2005

*Rosa María Barragán-Reyes y Luis C.A. Gutiérrez-Negrín*

El tercer Congreso Mundial de Geotermia (*World Geothermal Congress* 2005) se efectuó del 24 al 29 de Abril de 2005 en la ciudad de Antalya, Turquía. Este es el tercer evento internacional que organiza la International Geothermal Association (IGA), habiéndose realizado los anteriores en Italia, en 1995, y en Japón, en 2000. El lema central del WGC 2005 fue: “Energía geotérmica: la opción verde, doméstica y renovable”.



El Comité Organizador del WGC 2005 estuvo encabezado por James Koenig, de Estados Unidos, con representantes de Turquía, México, Japón, Rumania, Nueva Zelanda, Italia y Macedonia en los diversos comités. El Comité Técnico fue encabezado por Roland Horne, de Estados Unidos, y por Ender Okandan, de Turquía. El congreso contó con un Comité Honorario Turco, formado por varios ministros de la República de Turquía y por los gobernadores de las

provincias de Izmir y de Antalya, y un Comité Honorario Internacional, constituido por funcionarios de alto nivel de diversos países con desarrollo geotérmico y del Banco Mundial.

Antalya se localiza en la costa del Mediterráneo desde donde se aprecian hermosos paisajes tanto del océano como de las montañas. El congreso se desarrolló en las instalaciones del Centro Cultural de Antalya y de la Pirámide de Cristal, en un gran auditorio, cinco salas de conferencias, un amplio hall de exhibición y espacio adicional para colocación de las presentaciones tipo póster. Se registraron más de mil 300 participantes (entre ponentes y acompañantes), provenientes de 83 países.

El domingo 24 de abril se llevó a cabo el registro de participantes y al concluir se ofreció una fiesta de bienvenida al aire libre, a la que acudieron alrededor de 500 personas.

La ceremonia de inauguración del WGC 2005 se efectuó en la mañana del 25 de abril con doce pláticas plenarias, impartidas por importantes funcionarios de Turquía y de otros países. Las conferencias fueron impartidas por el Primer Ministro de Turquía y los ministros del Interior, de Energía y Recursos Naturales, y de Bosques y Medio Ambiente, así como el Presidente de la Comisión de Energía de la Gran Asamblea General de Turquía, los gobernadores de las provincias de Antalya y de Izmir, y el Presidente de la Asociación Geotérmica de Turquía (quien también fungió como Vicepresidente del Comité Organizador). Participaron igualmente el Presidente de la IGA, el presidente del Comité Organizador, el Secretario de Energía de Filipinas, la Ministra de Industria y Comercio de Islandia, el Director de Fuentes de Energía

Nuevas y Renovables de la Comisión Europea y el Director General del Ministerio Federal para el Ambiente, la Conservación de la Naturaleza y la Seguridad Nuclear de Alemania.

Después de la ceremonia de apertura, el 25 de abril por la tarde tuvieron lugar cinco pláticas invitadas (*keynote*) plenarias sobre la energía geotérmica en Turquía, la situación actual de la generación geotermoeléctrica en el mundo, los usos directos de la energía geotérmica en el mundo, la situación energética de Turquía y el desarrollo de plantas de generación geotermoeléctrica. Posteriormente se presentaron 30 trabajos en seis sesiones simultáneas en los temas: Ingeniería de Yacimientos 1 (Fundamentos), Reportes Nacionales 1, Geología 1, Corrosión e Incrustación 1 y Aspectos Legales y Regulatorios.

El martes 26 de abril se inició con dos sesiones de cuatro pláticas invitadas simultáneas, sobre temas como: la evaluación mundial de la geotermia, la geotermia y los Juegos Olímpicos de 2008 en Beijing, 25 años de los programas de geotermia de las universidades de Auckland (Nueva Zelanda) y de Islandia, los seis años del Secretariado de la IGA en Italia, los cambios de percepción de la geotermia desde la época medieval hasta el presente en Islandia, los costos de la energía geotérmica, y el acuerdo e implementación del programa de geotermia de la Agencia Internacional de Energía.

El mismo martes 26 de abril se presentaron otras 75 ponencias de manera oral en cinco sesiones simultáneas agrupadas en segmentos de poco más de hora y media de duración, entre las 10:40 y las 12:20 horas, las 13:20 y las 15:00 horas y las 15:30 y 17:10 horas. Las ponencias abordaron los temas: Geoquímica 1, Reportes Nacionales 2 y 3, Aspectos Ambientales y Sociales 1 (la Geotermia en la Sociedad), Software para Aplicaciones Geotérmicas 1 (Visualización), Distritos de Calefacción, Ingeniería de Yacimientos 2 (Análisis Numéricos), Geología 2, Corrosión e Incrustación 2 (Tecnologías Anti-incrustantes), Sistemas Energéticos Integrados (Usos en Cascada), Bombas de Calor 1, Geofísica 1 (Sondeos Profundos), Tecnologías Avanzadas 1 (Roca Seca Caliente y Sistemas Geotérmicos Mejorados), Casos Históricos 1, y Economía, Financiamiento y Privatización.



El miércoles 27 de abril se ofrecieron también 75 ponencias orales, en las mismas cinco sesiones simultáneas, pero agrupadas ahora en horarios de las 8:30 a las 10:10, de las 10:40 a las 12:20 y de las 13:20 a las 15:00 horas. Los temas de este día fueron: Ingeniería de Yacimientos 3 y 4 (Yacimientos Fracturados y Análisis Multidisciplinarios de Yacimientos), Geofísica 2 (Métodos Resistivos), Tecnologías Avanzadas 2 (Ingeniería de Yacimientos y Generación en Sistemas Geotérmicos Mejorados y de Roca Seca Caliente), Casos Históricos 2, Geoquímica 2 (Modelado Teórico), Reportes Nacionales 4, Aspectos Ambientales y Sociales 2 (Asuntos Químicos), Software para Aplicaciones Geotérmicas 2 (Análisis), Turismo, Balneología y Salud, Bombas de Calor 2, Geología 3, Corrosión e Incrustación 3 (Erosión e Inspecciones de Riesgos), y Sustentabilidad.



Por la tarde del miércoles, entre las 15:30 y las 17:10 horas, se realizó la Sesión Póster 1. Se programó la presentación de 169 trabajos, descontando aquellos cuyos autores avisaron con anticipación que no asistirían, de los cuales se presentaron efectivamente alrededor de 135. Algunos de ellos ya habían sido presentados oralmente, reemplazando ponencias que finalmente no se presentaron.

El jueves 28 de abril se siguió un esquema similar al día anterior, presentándose 75 ponencias orales en cinco sesiones simultáneas en los mismos horarios, agrupadas en los temas: Ingeniería de Yacimientos 5 (Yacimientos de Temperatura Moderada), Geofísica 3 (Métodos Sísmicos y Gravimétricos), Tecnologías Avanzadas 3 (Caracterización Geofísica de Sistemas Geotérmicos Mejorados y de Roca Seca Caliente), Tecnología de Perforación y Terminación 1, Geoquímica 3 y 4 (Efectos de la Producción y Aspectos Ambientales), Reportes Nacionales 5, Aspectos Ambientales y Sociales 3 (Asuntos Físicos), Hidrogeología 1, Agricultura, Bombas de Calor 3, Exploración 1, Generación Eléctrica 1, y Tecnologías de Inyección.

Por la tarde del jueves se realizó la segunda sesión póster. Se habían programado 179 trabajos, de los cuales se estima que se presentaron en realidad alrededor de 140, varios de los cuales también se presentaron en forma oral.

El viernes 29 de abril fue el último día del evento. Bajó un esquema similar a los del miércoles y jueves, se presentaron otras 75 ponencias orales en las cinco sesiones simultáneas usuales y en los mismos horarios. Los temas de las sesiones de este día fueron: Ingeniería de Yacimientos 6 (Yacimientos de Alta Temperatura), Geofísica 4 (Métodos Térmicos), Exploración 2, Tecnología de Perforación y Terminación 2, Tecnologías Avanzadas 4 (Caracterización Geológica, Química y Térmica de Yacimientos de Roca Seca Caliente y Sistemas Geotérmicos Mejorados), Geoquímica 5 y 6 (Casos de Estudio I y II), Reportes Nacionales 6, Aspectos Ambientales y Sociales 4 (Disposición y Abatimiento de Gases), Hidrogeología 2, Manejo de Campos, Bombas de Calor 4, Exploración 3, Generación Geotermoeléctrica 2 y Políticas Energéticas.



A las tres y media de la tarde del viernes 29 se inició la sesión de clausura del congreso, la cual contó con las intervenciones del Presidente de la Asociación Geotérmica de Turquía, del Presidente del Comité Organizador, del Presidente de la IGA y de un representante del Banco Mundial. Igualmente, el Ministro de Energía de Turquía le pasó simbólicamente la estafeta a su homólogo de Indonesia, país que será la sede del próximo Congreso Geotérmico Mundial, que deberá celebrarse en 2010 en la conocida isla turística de Bali. La delegación de Indonesia presentó también un programa musical y de danza típica de ese

país. Con ello se dio por concluido formalmente el congreso, aunque todavía al día siguiente partieron varios viajes de campo que visitaron localidades termales e históricas de Turquía.

En resumen, se ofrecieron 343 ponencias y conferencias técnicas orales, sin contar las pláticas plenarias invitadas de los funcionarios en la sesión inaugural, pero incluyendo las pláticas técnicas invitadas (*keynote speakers*). Se presentaron igualmente alrededor de 275 trabajos tipo póster. Si se considera que un 15% de estos últimos también fueron ponencias orales, puede estimarse que en total se presentaron efectivamente unos 575 trabajos técnicos, lo cual sin duda es una cifra impresionante para la geotermia.

La exhibición técnica y comercial contó con la participación de 39 compañías y organismos no lucrativos que se dedican a la geotermia, que promovieron sus productos y servicios. Entre ellas estuvieron: Ormat, Kuster, y Baker Hughes de Estados Unidos, Orme Geothermal, la principal compañía geotérmica turca, Mitsubishi y Fuji Electric de Japón, SKM de Nueva Zelanda, PNOG de Filipinas, y organismos como el Departamento de Energía de EUA, la Agencia Internacional de Energía, la IGA, el gobierno indonesio y la Asociación Geotérmica de Turquía. La exposición se montó en la Sala Toros de la Pirámide de Cristal, y estuvo abierta al público de las 9 a las 17:30 horas del lunes 25 al viernes 30. En los pasillos del derredor se colocaron los trabajos tipo póster.

El Comité Organizador del congreso ofreció un total de 179 apoyos económicos (*fellowships*) para participantes de países menos desarrollados. Siete de esos apoyos no pudieron finalmente ser aprovechados por los beneficiarios, por lo que hubo un total efectivo de 172. La mayoría de los apoyos (103) fueron completos, incluyendo costo de pasajes, inscripción, alojamiento y viáticos para alimentación, y los restantes fueron parciales con distintas coberturas. 58 de los participantes con apoyo parcial también fueron apoyados para asistir al curso corto Desarrollo de Proyectos Geotérmicos que organizó el Banco Mundial en los días previos al congreso (22 al 24 de abril). Adicionalmente, el Comité Organizador condonó el pago de inscripción a otros 70 asistentes. Los recursos económicos para los apoyos provinieron de compañías privadas como PB Power y SKM de Nueva Zelanda y Marubeni Energy Services Corporation de Filipinas, así como de organismos como las universidades que las Naciones Unidas financian en Islandia y Japón, el Banco Mundial, las asociaciones geotérmicas de Turquía e Islandia y el Consejo Turco para la Investigación Técnica y Científica.

La IGA, por su parte, llevó a cabo su décimo sexta Asamblea General, la cual, de acuerdo con sus estatutos, debe celebrarse anualmente. La asamblea se realizó el miércoles 27 de abril, de las 12:30 a las 13:00 horas, aprovechando uno de los recesos del congreso. Se aprobaron las minutas de la décimo quinta Asamblea General, el Directorado rindió su informe anual, se aprobaron los estados financieros y se aprobó la modificación de las Reglas 7(b) y 11 para hacerlas compatibles con los Estatutos.



Cabe comentar que los especialistas geotérmicos de América Latina participaron en el WGC 2005 con 78 trabajos que aparecen publicados en las memorias del mismo, editadas en un disco compacto que se repartió

en el congreso. Esos 78 trabajos técnicos representan más del 13% del total, lo cual resulta más o menos proporcional al porcentaje de la capacidad geotermoeléctrica instalada en países latinoamericanos con respecto a la capacidad mundial (que es del orden del 15%).

Resulta interesante destacar que los 78 trabajos elaborados por especialistas de América Latina se distribuyeron en los temas que se presentan en la Tabla 1, lo que puede dar una idea del tipo de trabajo que están desarrollando preferentemente.

<b>Tema</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje</b>
Geoquímica	16	20,5
Ingeniería de Yacimientos	14	17,9
Reportes Nacionales	9	11,5
Corrosión e Incrustación	8	10,3
Estudio de Casos Históricos	6	7,7
Aspectos Sociales y Ambientales	5	6,4
Software para Aplicaciones Geotérmicas	4	5,1
Generación Geotermoeléctrica	3	3,8
Geología	2	2,6
Tecnologías de Perforación y Terminación de Pozos	2	2,6
Tecnologías de Inyección	2	2,6
Economía, Financiamiento y Privatización	2	2,6
Geofísica	1	1,3
Tecnologías Avanzadas	1	1,3
Políticas Energéticas	1	1,3
Manejo de Campos	1	1,3
Salud, Balneología y Turismo	1	1,3
<b>Totales</b>	<b>78</b>	<b>100</b>

*Tabla 1. Temas abordados por los trabajos de América Latina presentados en el WGC 2005.*

La delegación de América Latina al WGC 2005 fue de 50 personas, casi la mitad de las cuales (23) fueron de México, de instituciones como el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), el Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada (CICESE), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y universidades como la Autónoma de México (UNAM), la Autónoma de Baja California (UABC) y la de Michoacán (UMSNH).

El programa cultural del WGC 2005 consistió básicamente en un espectáculo denominado Noches Turcas, realizado la noche del martes 26 de abril en el Centro Cultural de Antalya a partir de las ocho de la noche. La primera parte, que duró unos 40 minutos, consistió en varios bailes folklóricos interpretados por los Derviches de Mevlevi, destacándose las típicas danzas giratorias que requieren una excepcional velocidad y habilidad de los bailarines, y que incluyó bailables de las regiones del Mar Negro y del Cáucaso. Después de un intermedio en el que se sirvieron bebidas y bocadillos, se presentó la Orquesta Filarmónica de Antalya en un concierto especial dirigido por el conocido especialista geotérmico suizo Ladislao Rybach. El doctor Rybach, especialista en flujo térmico y bombas de calor, es también el Director Musical de una orquesta de Zurich. Participó con ocho trabajos técnicos en el congreso, y la noche del martes 26 presentó un programa musical que incluyó obras de Mozart, Brahms y Wagner además de compositores turcos, con lo que hizo realidad uno de sus sueños: combinar sus dos principales intereses en un solo evento, según declararía después a la prensa local.





## CIRCULAR 1

La ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA MEXICANA, AC invita a su

# CONGRESO ANUAL 2005

Y convoca a sus miembros a su

## XIII ASAMBLEA ANUAL

**FECHA:** Domingo 27 y Lunes 28 de noviembre de 2005

**LUGAR:** Campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

### PROGRAMA GENERAL:

**Domingo 27** (a partir de las 17 horas):  
Arribo de los asistentes, registro y acomodo en las cabañas.

#### Lunes 28

8 - 9 hrs: Desayuno.  
9 - 13 hrs: Presentación de ponencias.  
13 - 14:30 hrs: Asamblea Anual.  
14:30 - 16 hrs: Comida de despedida.  
16:00: Regreso de los asistentes.

**COSTO:** Miembros de la AGM al corriente de su cuota anual: 1,400 pesos. No miembros: 1,800 pesos. El costo incluye alojamiento y alimentación.

### PRESENTACIÓN DE TRABAJOS TÉCNICOS:

La AGM invita a sus miembros y a la comunidad geotérmica en general a enviar trabajos técnicos relacionados con la geotermia, bajo los siguientes criterios y fechas clave:

1. Los trabajos deberán abordar temas relacionados con la geotermia.
2. Los interesados enviarán un resumen en español o inglés no mayor a una cuartilla a cualquiera de las direcciones electrónicas indicadas abajo a más tardar el 30 de septiembre de 2005. El resumen se adjuntará como archivo en MS Word al mensaje.





3. Los autores de los trabajos seleccionados para presentación serán notificados el 14 de octubre. En principio los trabajos seleccionados se presentarán oralmente disponiendo cada uno de un tiempo de 20 minutos con cinco para preguntas y respuestas, pero podrían seleccionarse algunos para presentación tipo póster. La presentación puede ser en español o inglés.
4. El trabajo en extenso deberá enviarse a las mismas direcciones a más tardar el 31 de octubre. Se enviará el texto en archivo de MS Word, sin formato especial, incluyendo tablas, y las gráficas y figuras como archivos gráficos en formato \*.jpg ó \*.gif. Si el texto está en español deberá incluir un resumen en inglés, y viceversa. El trabajo será sometido a arbitraje por parte de miembros distinguidos de la AGM, quienes podrán sugerir cambios y modificaciones al trabajo extenso antes de su publicación.
5. En principio se editará y distribuirá en el congreso un CD con las memorias del congreso, pero además se publicarán algunos de ellos o todos en una edición especial de la revista *Geotermia*. Para la preparación del trabajo en extenso se sugiere consultar las Instrucciones de Publicación en el número más reciente de esta misma revista (<http://www.geothermal.org>).
6. Se otorgará constancia escrita de los trabajos presentados.

### MAYOR INFORMACIÓN:

En la Circular 2 se incluirán más detalles sobre el congreso y la asamblea, particularmente en lo que se refiere a pre-inscripciones, formas de pago y accesos al campo de Los Azufres. También se puede dirigir a las siguientes direcciones electrónicas:

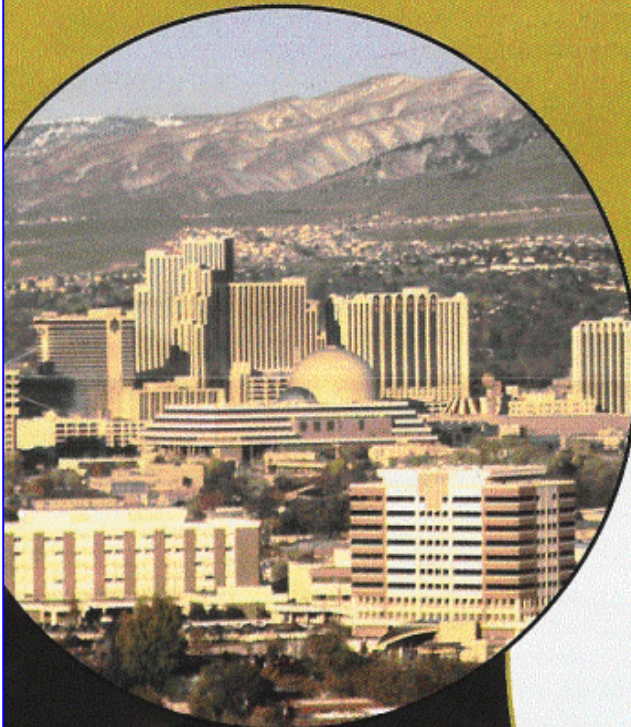
José Luis Quijano León (Vicepresidente de la AGM): [luis.quijano@cfe.gob.mx](mailto:luis.quijano@cfe.gob.mx)  
Luis C.A. Gutiérrez Negrín (Tesorero de la AGM): [luis.gutierrez03@cfe.gob.mx](mailto:luis.gutierrez03@cfe.gob.mx)



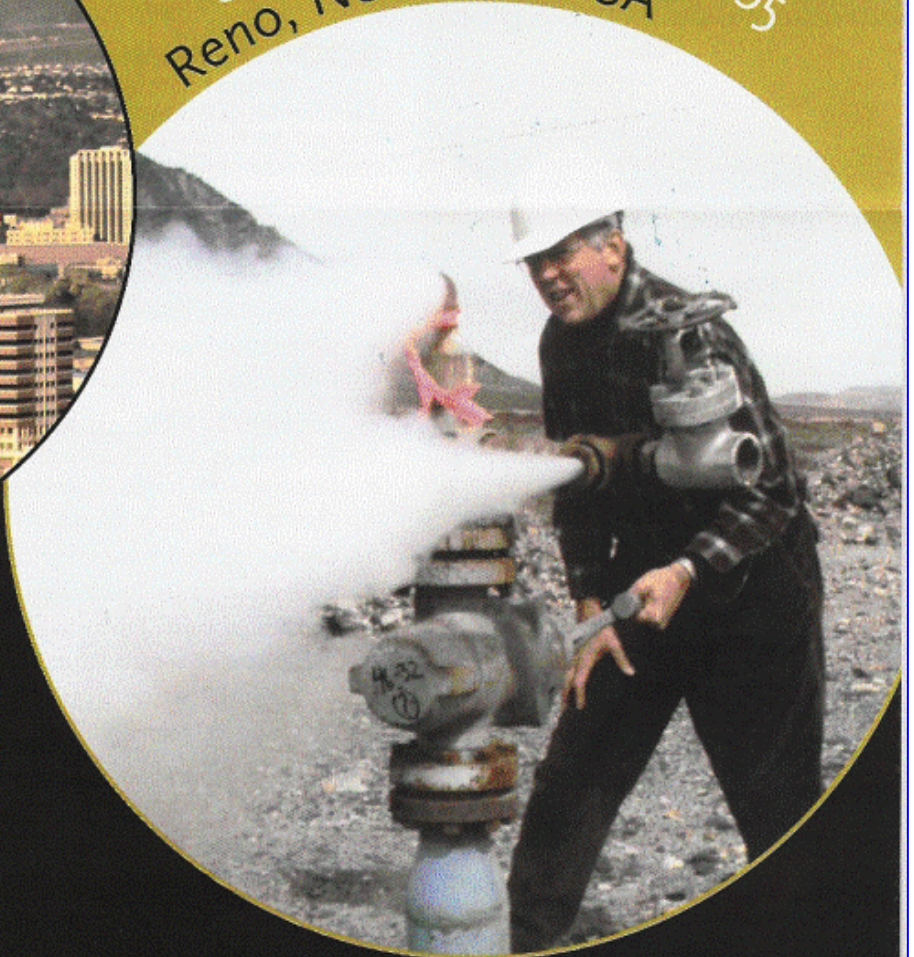


GEOTHERMAL RESOURCES COUNCIL  
2005 ANNUAL MEETING

GEOTHERMAL ENERGY  
THE WORLD'S BURIED TREASURE



September 25 – 28,  
Reno, Nevada – USA, 2005



**El *Geothermal Resources Council* invita a la comunidad geotérmica a participar en su reunión anual 2005. Toda la información sobre este evento en:**

**<http://www.geothermal.org>**



---

---

## INSTRUCCIONES DE PUBLICACIÓN EN LA REVISTA GEOTERMIA

*Geotermia* está abierta a la participación de investigadores de instituciones tanto nacionales como del extranjero quienes deben dirigir sus contribuciones a:

**GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA**

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.

Morelia, Mich., C.P. 58290, México

Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

[luis.quijano@cfe.gob.mx](mailto:luis.quijano@cfe.gob.mx), [luis.gutierrez03@cfe.gob.mx](mailto:luis.gutierrez03@cfe.gob.mx)

Los trabajos deberán cumplir con las siguientes instrucciones de publicación.

1. El artículo debe ser inédito y relacionado con la geotermia, las fuentes alternas no convencionales de energía o con ramas afines.
2. Enviar una copia impresa a doble espacio, así como disquete con el archivo en formato MS-Word. También puede enviarse el archivo por correo electrónico a las direcciones indicadas arriba. Se aceptan trabajos en español con resumen en inglés, o en inglés con resumen en español.
3. Las tablas, cuadros y figuras deberán incluirse al final del texto. Las figuras y gráficas pueden ser en color o en blanco y negro, tener buena calidad y no rebasar el tamaño carta. Su cantidad deberá ser la suficiente para la comprensión o ilustración del trabajo expuesto. Deberán incluirse en las copias impresas, al final del texto, así como en el disquete en forma de archivos independientes en formato de imagen (\*.gif, \*.tif, \*.jpg) que puedan importarse como tales desde MS-Word.
4. *Geotermia* es una revista virtual que se publica en formato \*.pdf en el portal interno de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos y en otros portales públicos. Por lo tanto, es importante que todas las figuras y gráficas tengan la resolución suficiente para poder apreciarse al convertirse a archivos de imagen.
5. Todo artículo será sometido a revisión y arbitraje de un mínimo de dos especialistas en la materia. Para facilitar la imparcialidad de la revisión se mantendrá el anonimato entre autores y árbitros. Se enviarán reconocimientos escritos a quienes colaboraron como árbitros.
6. Se ofrecerá apoyo especial a los autores sin hábitos de publicar resultados por no constituir la publicación una parte rutinaria de su trabajo, y que, en consecuencia, requieran de indicaciones adicionales. El Consejo Editorial se encargará de hacer las modificaciones o correcciones pequeñas que no justifiquen la aplicación de un nuevo arbitraje.
7. El contenido de los trabajos deberá abordar los temas que se indican a continuación. Se subrayan las partes consideradas como indispensables, aunque su contenido pueda aparecer bajo otra sección o con otro título. Las otras secciones son opcionales, aunque pudiera haber otras a juicio del autor: Título, Autor, Adscripción laboral, Dirección de correo electrónico, Resumen en español, Palabras Clave en español, Título en inglés, Resumen (Abstract) en inglés, Palabras Clave (Keywords) en inglés, Antecedentes o Introducción, Objetivo, Metodología, Datos, Procesamiento, Interpretación, Interpretaciones alternativas, Conclusiones, Verificación, Agradecimientos, Referencias, Apéndices.
8. Todas las referencias deberán estar citadas en el texto y todas las citas deberán estar incluidas en las referencias. En el texto se empleará el sistema Harvard (apellido y año): "Algunos autores (González, 1995)...", o bien "González (1995) reporta que...". En caso de dos autores la cita deberá incluirlos a ambos (González y Rodríguez, 1995) y en caso de más autores deberá utilizarse la convención *et al.* (González *et al.*, 1995). La lista de referencias irá en orden alfabético y deberá incluir a todos los autores con todos los detalles de la publicación; si se emplean abreviaturas de publicaciones científicas, deberán estar de

acuerdo con el *World List of Scientific Periodicals*. Solamente las iniciales del primer autor irán después del apellido, y se colocará entre paréntesis el año de la publicación después del apellido del último autor. El título de la revista o libro referenciado deberá escribirse en cursivas. Ejemplos:

Cedillo-Rodríguez, F. (1999). Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia*, Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García (1984). Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L. (1970). *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.

9. Si lo desea, puede solicitar una copia de los formatos de arbitraje y utilizar como guía para el contenido de su contribución los artículos ya publicados en esta revista.

10. Eventualmente aparecerá como parte de la revista una sección intitulada FORO, la cual dará cabida a artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos precedentes, pero que a juicio del Consejo Editorial pueden resultar de interés para los lectores de la misma. Estas colaboraciones no serán sometidas a arbitraje técnico. Si desea que su colaboración sea considerada para publicarse en FORO, por favor indíquelo así al remitirla.

---



---

## DIRECTIONS FOR CONTRIBUTORS

*Geotermia* is open to Mexican and foreign contributors, who should send all contributions to:

GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA  
Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.  
Morelia, Mich., C.P. 58290, México  
Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín  
[luis.quijano@cfe.gob.mx](mailto:luis.quijano@cfe.gob.mx), [luis.gutierrez03@cfe.gob.mx](mailto:luis.gutierrez03@cfe.gob.mx)

Contributions must follow these guidelines:

1. A submitted paper must be unpublished and related to geothermics, nonconventional energy sources or similar subjects.
2. Submit a printed copy, double spaced, and a diskette with the file in MS-Word format. The file may be sent by e-mail to an e-address indicated above. Contributions in Spanish with abstracts in English, or in English with abstracts in Spanish, are acceptable.
3. Tables, figures and graphs must be placed at the end of the text. They must be of good quality, either in color or black and white, and not larger than letter-sized paper. Include all tables, figures and graphs needed by a reader to understand the paper. Place them on the diskette as independent files in image-format (\*.gif, \*.tif, \*.jpg), which can be imported from MS-Word.
4. *Geotermia* is a digital magazine published in a \*.pdf format at the internal website of the Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos and at other public websites. Therefore, all figures and graphs must have enough resolution to be clear when they are converted to image-files.
5. All contributions will undergo review and arbitration by at least two specialists in the field. To encourage fair evaluations, the authors will receive anonymous reviews. The reviewers will receive an acknowledgement letter from the editorial board.

6. *Geotermia* offers special support to first-time authors for whom publishing papers is not part of their jobs. The editorial board can make small modifications or corrections to such papers without a new peer-review process.
7. All papers must include the following sections. Those considered as indispensable are underlined, yet they can be included under other chapters or subtitles. The other parts are optional, plus authors can include additional sections: Title, Author(s), Company or institution, Address, Abstract in Spanish, Keywords in Spanish, Title in English, Abstract in English, Keywords in English, Introduction or background, Objective, Methodology, Data, Processing, Interpretation, Alternative interpretations, Conclusions, Verification, Acknowledgement, References, Appendix.
8. All references must be cited in the text, and all citations must be included in the References. In the text, the Harvard citation system (last name and year) must be used: "Some authors (González, 1995)...", or: "González (1995) indicates that..." In the case of two authors, the citation must include both (González and Rodríguez, 1995), and in the case of more than two authors the convention *et al.* (González *et al.*, 1995) must be used. The list of references must be arranged alphabetically and include all the authors and details of the cited publication. All abbreviations must be from the *World List of Scientific Periodicals*. Initials of the first author must follow the last name, putting into parenthesis the year of publication after the last author. The title of a magazine or book must be written in italics. Examples:
 

Cedillo-Rodríguez, F. (1999). Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia*, Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García (1984). Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L. (1970). *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.
9. You may ask for a copy of the review of any paper published in *Geotermia* and use it as a guide for your contribution.
10. Eventually, a section named FORO will constitute the last part of the magazine. The section will include contributions, notes and essays that may or may not meet any or all of the stipulations for papers, but that the editorial board considers of interest to the readers. Contributions included in FORO will not undergo peer review. If you want a contribution be placed in FORO, please indicate this upon submission.