

## Modelación de la subsidencia en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

**Olga Sarychikhina<sup>1</sup>, Ewa Glowacka<sup>1</sup>, Miguel Guzmán<sup>3</sup> y Francisco Suárez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Sismología, CICESE, <sup>2</sup>Departamento de Geología, CICESE, <sup>3</sup>Facultad de Ingeniería, UABC. E-mail: [osarytch@cicese.mx](mailto:osarytch@cicese.mx)

### Resumen

En estudios anteriores se demostró que los desplazamientos del terreno en el campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se deben al desarrollo de su explotación y al movimiento tectónico. En el presente trabajo usamos deformaciones horizontales y el modelo sismotectónico (Bennett *et al.*, 1996) de la región, junto con datos de las nivelaciones de precisión realizadas por la Comisión Federal de Electricidad (Lira y Arellano, 1997) y el CICESE (Glowacka *et al.*, 1999) para la modelación de la parte tectónica y antropogénica de subsidencia. Usando los resultados de la modelación e información sobre los volúmenes de extracción y reinyección, se evalúa el volumen de la recarga regional.

**Palabras clave:** Cerro Prieto, desplazamientos de terreno, modelación.

### Modeling of subsidence in the Cerro Prieto, BC, geothermal field

### Abstract

Previous studies have shown that the ground displacements in the Cerro Prieto geothermal field are due to the development of fluid exploitation and tectonic movements. In the present work we used horizontal deformations data and the seismotectonic model (Bennett *et al.*, 1996) of the region together with precise leveling measurements made by the Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Lira y Arellano, 1997) and the CICESE (Glowacka *et al.*, 1999) to modeling the tectonic and anthropogenic subsidence parts. Using the modeling results and information about the extraction and reinjection volumes, the volume of the regional recharge is evaluated.

**Keywords:** Cerro Prieto, ground displacements, modeling.

### 1. Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se localiza en el norte de la península de Baja California, en el valle de Mexicali, Baja California, México, y dentro de la porción sur de la provincia geológica de la cuenca de Salton, considerada como una de las provincias geológicas con mayores recursos geotérmicos en el mundo (Fig. 1).

El campo es operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), quien empezó a explotarlo a partir de 1973 para producir electricidad aprovechando el recurso geotérmico. En 1989 empezó la reinyección de las aguas residuales de la extracción, y actualmente alrededor del 20% del fluido extraído está siendo reinyectado.

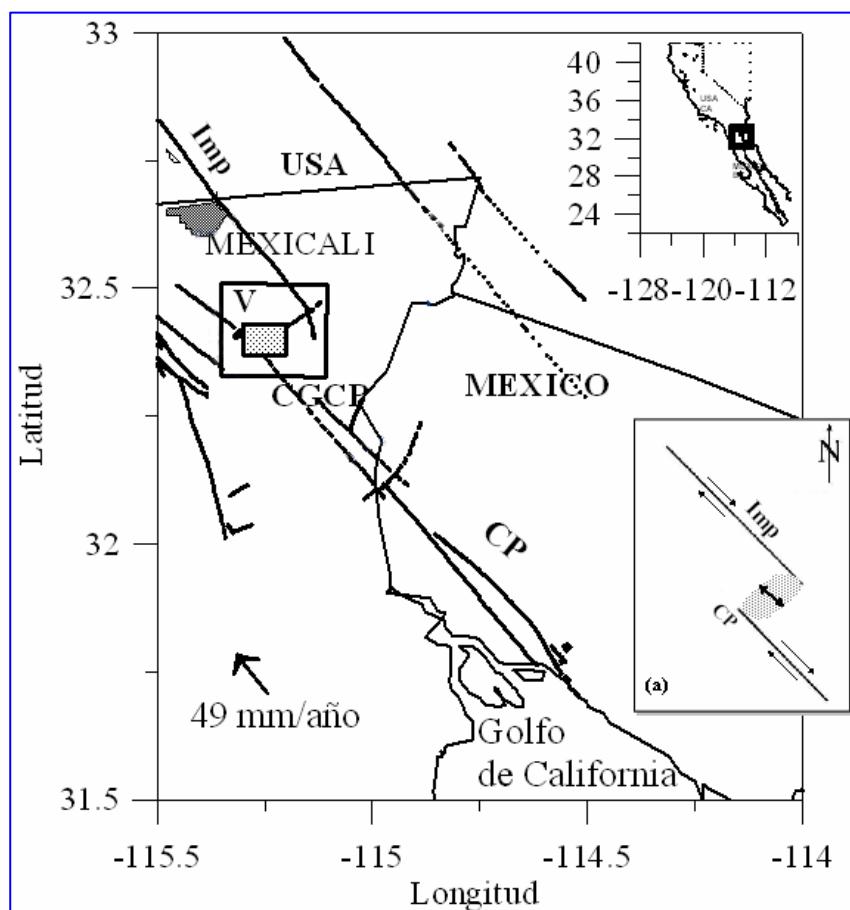


Fig. 1. Mapa de localización.  
CGCP – Campo Geotérmico de Cerro Prieto (rectángulo chico).  
El rectángulo grande es el área del estudio. Imp es la Falla Imperial, CP es la Falla Cerro Prieto. Recuadro (a): Esquema de la zona de dispersión.

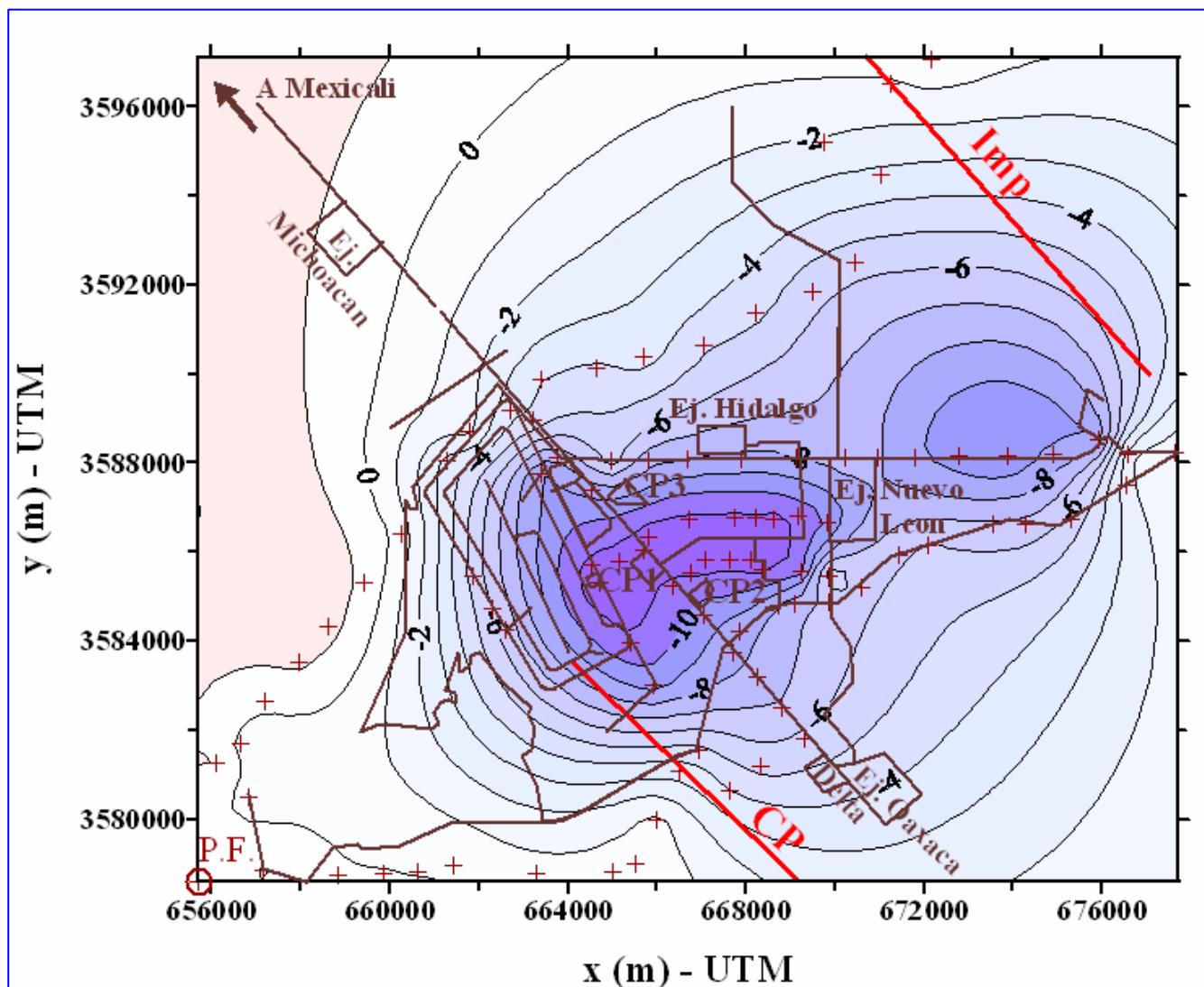
El CGCP se localiza dentro de un área tectónicamente muy activa, en la frontera entre las placas del Pacífico y de Norteamérica, en una cuenca de tipo *pull-apart* delimitada por fallas transformantes del sistema San Andrés con movimiento relativo intraplacas de 4.9 cm/año (Bennett *et al.*, 1996). El CGCP se encuentra en una zona de extensión, entre las fallas Imperial y Cerro Prieto ambas con movimiento lateral derecho (Fig. 1a).

Es bien conocido y ampliamente documentado que las deformaciones del terreno pueden acompañar a la explotación de los campos geotérmicos (por ejemplo, Allis *et al.*, 1998; Glowacka *et al.*, 1999; Fialko and Simons, 2000). En la zona que engloba el CGCP, hasta los años 90 las deformaciones observadas se atribuían solamente al tectonismo regional. Actualmente, tras 30 años de extracción de fluidos, estudios de nivelación y monitoreo sísmico, se ha podido determinar que los desplazamientos del terreno en el CGCP se deben tanto al movimiento tectónico regional como a la explotación de los fluidos del yacimiento (Glowacka *et al.*, 1997; Glowacka *et al.*, 1999).

En el presente trabajo se modela la parte tectónica y antropogénica de la subsidencia y se evalúa el volumen de la recarga regional.

## 2. Datos

Se emplearon los datos de nivelación de precisión publicados en Glowacka *et al.* (1999). Dicha nivelación fue realizada por la CFE (Lira y Arellano, 1997) y el CICESE (Glowacka *et al.*, 1999) en el periodo de 1994 a 1997 en el área que engloba al CGCP. La nivelación incluye 95 puntos y el punto de referencia está ubicado en la Sierra Cucapá (Fig. 2). La tasa de subsidencia observada se presenta en la Figura 2.



*Fig. 2. Subsistencia observada (1994 – 1997) en cm/año.  
Las cruces cafés son las bases de nivelación. P.F. es el punto fijo.*

La zona tiene dos centros de subsidencia con velocidades máximas de 12 y 9 cm/año, respectivamente. Cabe mencionar que la zona de máxima subsidencia (~12 cm/año) coincide con la zona del campo geotérmico. El segundo centro de subsidencia (~9 cm/año), situado entre el área de pozos y la Falla Imperial, probablemente puede estar relacionado con el área del acuífero de agua fría que es una fuente de la recarga para el yacimiento geotérmico bajo las condiciones de su explotación actual (Glowacka *et al.*, 1999).

### 3. Modelación de la parte tectónica de la subsidencia

Se calculó la deformación vertical producida por el movimiento lateral derecho entre las placas de Norteamérica y del Pacífico. Las velocidades de desplazamiento de las placas a lo largo de las fallas Cerro Prieto e Imperial fueron estimadas por Bennett *et al.* (1996) mediante mediciones de posicionamiento global (GPS) (junio 1994 – marzo 1997) y son del orden de 4.2 cm/año y 3.5 cm/año, respectivamente. Las trazas de las fallas Imperial y Cerro Prieto, así como las posiciones de sus extremos, fueron determinadas usando observaciones de campo de González y otros (1998). Se asumió que las fallas son verticales con movimiento transcurrente puro y se extienden desde la superficie hasta una profundidad de 15 km, ya que los sismos en la zona ocurren hasta aproximadamente esta profundidad.

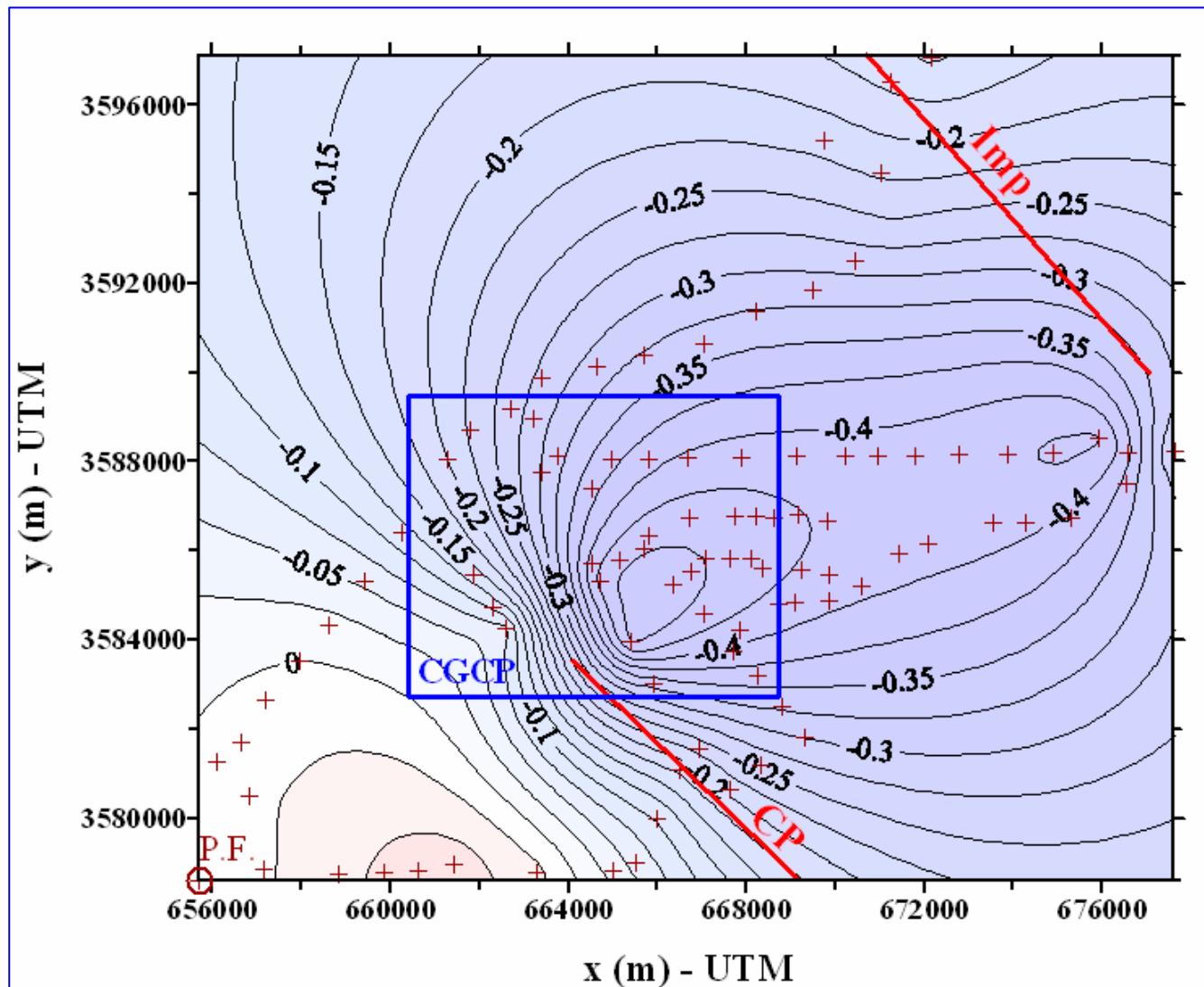


Fig. 3. Tasa de subsidencia tectónica acumulada por año (cm/año).

La subsidencia se calculó empleando el programa Coulomb 2.0 (King *et al.*, 1994; Toda *et al.*, 1998). La tasa de subsidencia tectónica relativa al punto fijo se presenta en la Figura 3 en la que aparecen dos anomalías de subsidencia de forma elipsoidal, de orientación noreste–suroeste aproximadamente y

perpendiculares a las fallas Imperial y Cerro Prieto. El máximo valor de subsidencia (0.45 cm/año) coincide con el área del CGCP. La anomalía en la parte noreste del área de estudio coincide con la zona definida anteriormente como zona de recarga. El orden de la subsidencia tectónica en el área de estudio concuerda con la subsidencia estimada usando otros métodos para algunas áreas cercanas a ésta (Contreras *et al.*, 2002; Johnson *et al.*, 1983).

De acuerdo con nuestros resultados, la subsidencia asociada a procesos tectónicos representa solamente 4% de la subsidencia total observada y ocurre, probablemente, durante los sismos.

#### 4. Modelación de la parte antropogénica

La modelación de la parte antropogénica de subsidencia se realizó usando el modelo hidrológico del CGCP (Halfman *et al.*, 1984; Lippmann *et al.*, 1991), como información básica sobre el posicionamiento de los acuíferos. Se usaron los modelos matemáticos de fracturas rectangulares, tensionales, para modelar el efecto de compactación de acuíferos localizados en los estratos sedimentarios y limitados por fallas, así como los modelos de fracturas de cizalla para modelar discontinuidades en la forma de subsidencia. La modelación fue realizada mediante el método de prueba y error empleando el programa Coulomb 2.0.

El modelo resultante consiste de cinco acuíferos: dos acuíferos de agua fría: R.G. y r.ch., y tres acuíferos correspondientes a los reservorios geotérmicos:  $\alpha$ ,  $\beta_1$ , y  $\beta_2$ . La fractura de cizalla CImp representa el fenómeno de deslizamiento asísmico (*creep*) observado en el extremo sur de la Falla Imperial. Los parámetros del fractura CImp son: largo de ~3 km, extensión a profundidad de 0.2 a 1 km, 173° de azimut, 70° del echado hacia oeste y 7 cm/año de deslizamiento normal. Los parámetros de las fracturas tensionales rectangulares del modelo final se presentan en la Tabla 1.

Fractura	Parámetros							
	Centro de fractura (m)				(m)		(grados)	
	x	y	z	p	c1	c	Azimut	Echado
$\alpha$	664032	3584530	1100	-0.05	3471	2019	140	1
$\beta_1$	666667	3586700	2100	-0.1	1099	2144	138	4
$\beta_2$	669000	3586000	2250	-0.12	737	2293	138	4
r.ch.	673352	3590150	1500	-0.079	2907	2333	142	7
R.G.	669057	3587291	996	-0.04	5806	6347	139	1

Claves: p: Cierre de la fractura; c1: semilargo de la fractura; c: semiancho de la fractura.

*Tabla 1. Parámetros de las fracturas tensionales rectangulares del modelo final obtenido para la modelación de la subsidencia antropogénica*

El error mínimo cuadrado (RMS) del modelo es de 0.7 cm/año. La proyección de las fracturas del modelo a la superficie se presenta en la Figura 4, mientras que la comparación entre la subsidencia antropogénica modelada y la subsidencia observada se presenta en la Figura 5. El residuo del modelo se muestra en la Figura 6.

## 5. Estimación de la recarga regional

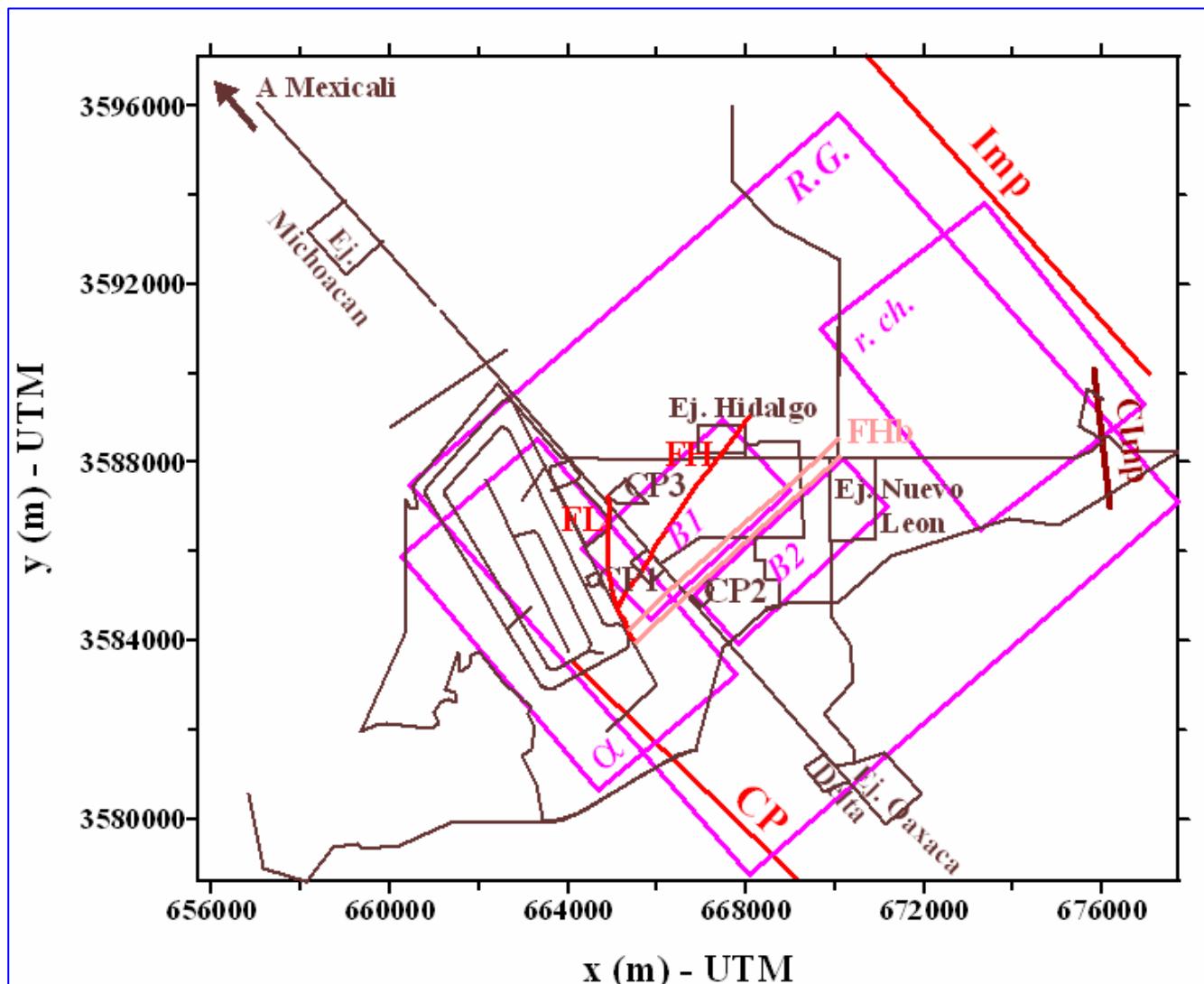
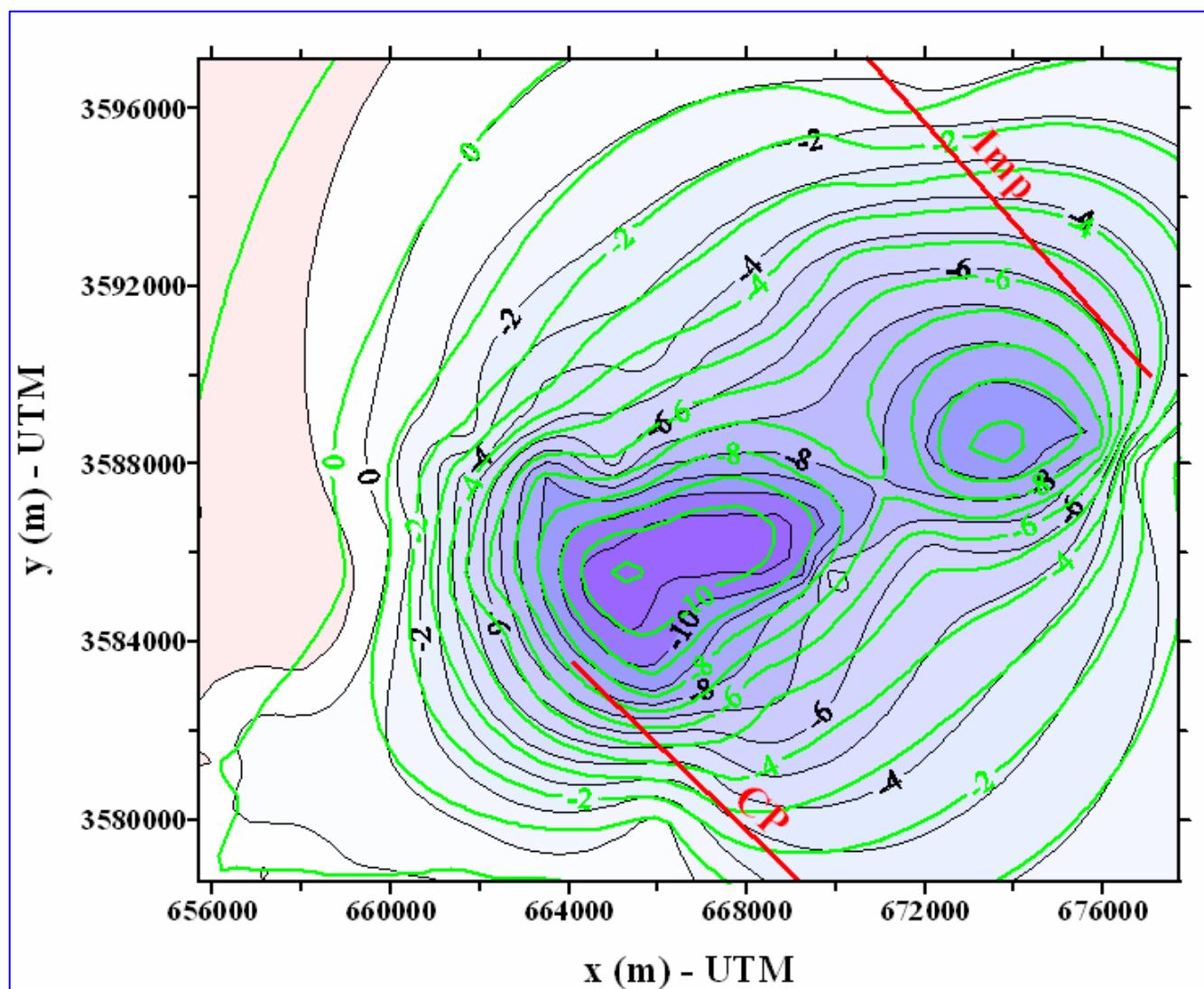


Fig. 4. Modelación de la subsidencia antropogénica.

Proyección de las fracturas del modelo final a la superficie. FL es la Falla L, FH es la traza de la Falla H en la superficie, FHb es la intersección de la falla H con el techo del reservorio  $\beta$ .

Los valores calculados de cierre de las fracturas tensionales y los tamaños de éstas permiten calcular el cambio de volumen de los reservorios. Si comparamos este cambio con la tasa de extracción (o de la extracción menos la inyección), podemos evaluar el volumen de la recarga externa o regional en el CGCP.

Para los años de 1994 a 1997, la tasa de extracción promedio es de  $1.05 \times 10^8$  ton/año, 18% de la cual ( $1.88 \times 10^7$  ton/año) ha sido reinyectada. El cambio de volumen producido por el cierre de fracturas del modelo compensa solamente ~10% de la reducción de volumen que debería de ocurrir por causa de la extracción. De este 10% solamente 3% se debe a la reducción del volumen de los reservorios del yacimiento y otro 7% a la reducción del volumen de los reservorios con agua fría (Tabla 2). Por lo tanto, 72% del volumen se compensa por la entrada de agua del acuífero regional.



*Fig. 5. Modelación de la subsidencia antropogénica.  
Comparación de la subsidencia observada (isolíneas negras) con la subsidencia modelada  
(isolíneas verdes)*

## Agradecimientos

Los resultados y conclusiones presentados en este trabajo son solamente de los autores y no necesariamente expresan el punto de vista de la CFE ni del CICESE. El proyecto es financiado parcialmente por el CONACyT y cuenta con el apoyo e intercambio de información de la CFE.

## Referencias

- Allis, R.G., X. Zhan and A. Clotworthy (1998). Predicting Future Subsidence at Wairakei Field, New Zealand. *Geothermal Resources Council Trans.*, 22: pp. 43-47.

<b>Fractura</b>	<b>Cambio de volumen (<math>m^3</math>)</b>
$\alpha$	$1.4 \times 10^6$
$\beta_1$	$1 \times 10^6$
$\beta_2$	$0.8 \times 10^6$
r.ch.	$2.1 \times 10^6$
R.G.	$6 \times 10^6$
<b>Total</b>	<b><math>1.1 \times 10^7</math></b>

*Tabla 2. Cambio de volumen producido por el cierre de las fracturas tensionales rectangulares del modelo final obtenido para la modelación de la subsidencia antropogénica.*

*Research*, 195 (B9), pp. 21781-21793.

Glowacka E., H. Fabriol, L. Munguía, and J.J. González (1997). Seismicity and surface deformation around the Cerro Prieto Geothermal Field. *Rockbursts and Seismicity in mines*, ed. Gibowicz, Lasocki, pp. 397-401.

Glowacka, E., J.J. Gonzalez and H. Fabriol (1999). Recent Vertical deformation in Mexicali Valley and its Relationship with Tectonics, Seismicity and Fluid Operation in the Cerro Prieto Geothermal Field. *Pure and Applied Geophysics*, 156, pp. 591-614.

González, J.J., E. Glowacka, F. Suárez, G. Quiñónez, M. Guzmán, J.M. Castro, F. Riviera y M.G. Felix (1998). Movimiento reciente de la Falla Imperial, Mexicali, B.C. *Divulgare, Ciencia para todos*, Mexicali, B.C, 6 (22), pp. 4 -15.

Halfman, S.E., M.J. Lippmann, R. Zelwer and J.H. Howard (1984). A geologic interpretation of the geothermal fluid movement in Cerro Prieto field, Baja California, Mexico. *Assoc. Pet. Geological Bulletin*, 68, pp. 18-30.

Johnson, N.M., C.B. Officer, N.D. Opdyke, G.D. Woodard, P.K. Zeitler, and E.H. Lindsay (1983). Rates of late Cenozoic Tectonism in the Vallecito – Fish Creek basin. *Geology*, 11, pp. 664 – 667.

King, G.C.P., R.S. Stein, and J. Lin (1994). Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (3), pp. 935 – 953.

Lippmann, M.J., A.H. Truesdell, A.M. Mañón and S.E. Halfman (1991). A review of the hydrogeologic-geochemical model for Cerro Prieto. *Geothermics*, 20, pp. 39-52.

Lira, H., y J.F. Arellano (1997). Resultados de la nivelería de precisión realizada en 1997, en el campo geotérmico Cerro Prieto. Informe interno No. RE 07/97, CFE, México. Inédito.

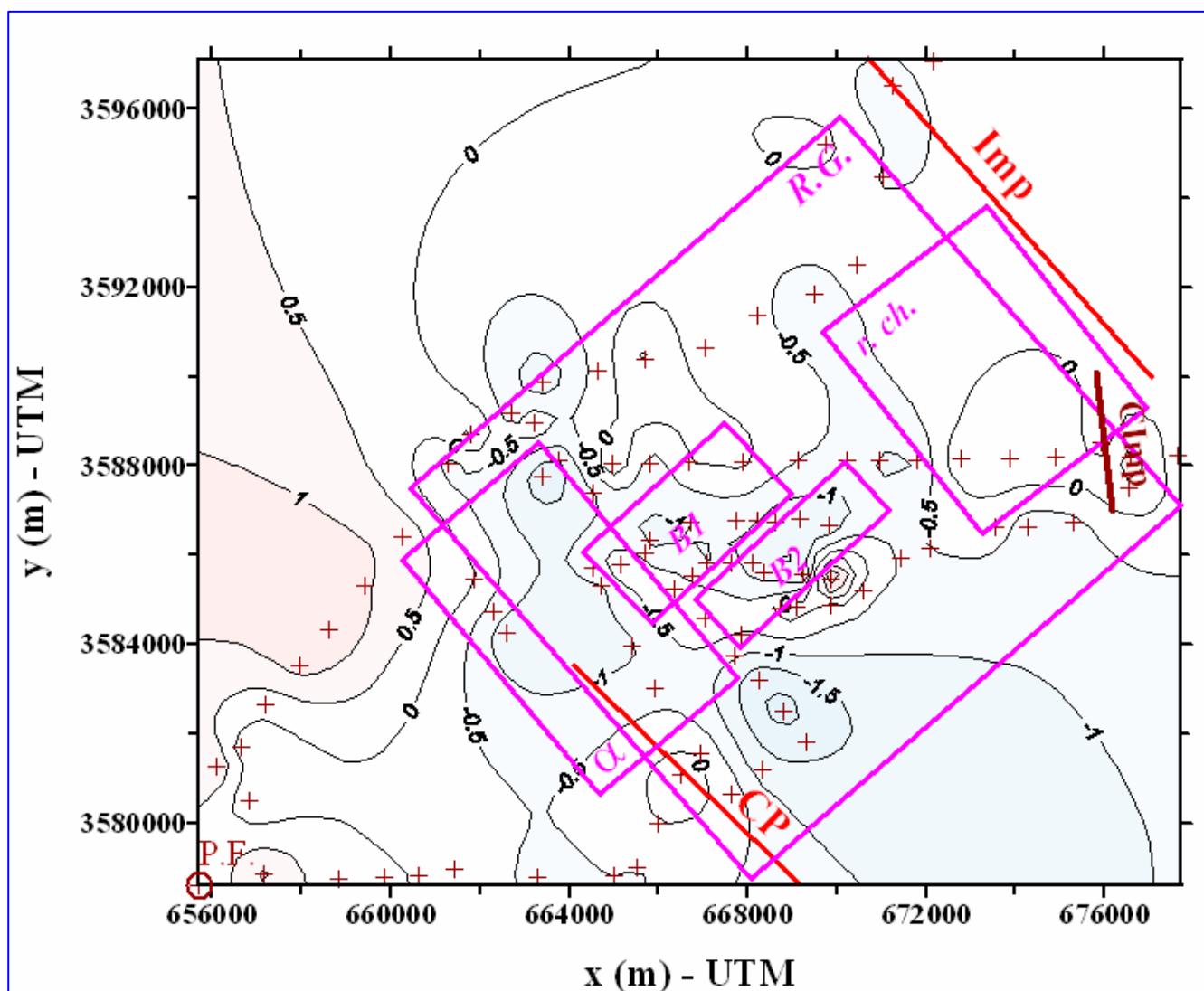


Fig. 6. Modelación de la subsidencia antropogénica. Residuo del modelo final en cm/año.

Toda, S., R.S. Stein, P.A. Reasenberg, and J.H. Dieterich (1998). Stress transferred by the Mw = 6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *Journal of Geophysical Research*, 103, pp. 24543-24565.