

Resumen de la evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja

Eduardo R. Iglesias, Rodolfo J. Torres, J. Ignacio Martínez-Estrella y Neftalí Reyes-Picasso

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia. Correo: iglesias@iie.org.mx

Resumen

En 2003 publicamos nuestra primera estimación de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja ($T \leq 200^{\circ}\text{C}$) con base en datos de 1358 manifestaciones superficiales identificadas en ese momento. Debido a falta de información en uno o más parámetros relevantes, como coordenadas geográficas, temperatura de muestra o del yacimiento, etc., dicha evaluación incluyó aproximadamente 30% de las manifestaciones identificadas. Desde entonces nuestro grupo incrementó significativamente la cantidad de la información en la base de datos, mediante compilación de datos de diferentes fuentes y trabajo de campo. Posteriormente desarrollamos una base de datos relacional y la implementamos en un Sistema de Información Geográfica (SIG). En este trabajo presentamos un resumen de nuestra evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja resultante de nuestra base de datos actualizada, que incluye 2361 manifestaciones geotérmicas. Como en la versión precedente, utilizamos el método volumétrico y simulaciones Montecarlo para estimar los recursos geotérmicos y sus correspondientes incertidumbres para cada sistema geotérmico identificado. Estos sistemas geotérmicos frecuentemente incluyen más de una manifestación superficial, lo que incrementa la confiabilidad de las correspondientes estimaciones. En total estimamos los recursos de 918 sistemas geotérmicos que incluyen 1797 manifestaciones superficiales (como anteriormente, un porcentaje significativo de las manifestaciones identificadas carecen de información relevante), localizados en 26 de los 32 estados del país. En la mayoría de los casos estos recursos serían clasificados como “recursos inferidos” en la terminología utilizada en el Código Geotérmico Australiano. A continuación, calculamos los recursos geotérmicos agregados de cada estado, mediante la “suma Montecarlo” de las energías térmicas de los sistemas geotérmicos correspondientes. Finalmente, estimamos los recursos geotérmicos agregados de México, mediante la “suma Montecarlo” de los recursos estimados para cada uno de los 918 sistemas geotérmicos identificados. Con la distribución estadística resultante estimamos que la energía térmica agregada correspondiente a los 918 sistemas geotérmicos se encuentra entre 1168 EJ y 1274 EJ con 90% de confianza. La distribución estadística de las temperaturas de yacimiento inferidas (conservadoramente) indica que 5% de los sistemas tiene temperaturas entre 151 y 208°C , 40% de los sistemas tienen temperaturas entre 102 y 151°C , 50% de los sistemas tienen temperaturas entre 60 y 102°C y 5% de los sistemas tienen temperaturas entre 36 y 60°C . Estos recursos contienen cantidades masivas de energía térmica con temperaturas apropiadas para una variedad de aplicaciones directas de calor y para generación eléctrica. Son potencialmente importantes para la economía de al menos 26 estados. Cabe destacar que este trabajo no incluye ningún intento para estimar el factor de recuperación de los recursos estimados.

Summary of the 2010 assessment on medium- to low-temperature geothermal resources in Mexico

Abstract

In 2003 we published our first assessment of the medium- to low-temperature ($T \leq 200^{\circ}\text{C}$) Mexican geothermal resources. It was based on a database of 1,358 geothermal manifestations (surface

manifestations, e.g. springs, fumaroles, water wells, etc.) identified at that time. Due to lack of information on one or more relevant parameters, such as geographical coordinates, reservoir or surface temperature, type of fluid, etc., that assessment included only about 30% of the geothermal manifestations in the database. Since then our group significantly increased the amount of information in the database by field work and data compilation from different sources, developed a relational database and linked it with a Geographical Information System. This work presents an updated assessment of the medium- to low-temperature Mexican geothermal resources based on our current database which includes 2,361 geothermal manifestations. As before, we relied on the volume method and Montecarlo simulations to estimate geothermal resources and their uncertainties for each identified geothermal system. These geothermal systems very often include more than one geothermal manifestation, generally increasing the reliability of the individual estimations. In all, we estimated the geothermal resources of 918 individual geothermal systems which included 1,797 geothermal manifestations (as before, a significant fraction of the identified manifestations lack relevant information) located in 26 of the 32 Mexican States. In most cases these resources would be classified as “inferred resources”, according to the Australian Geothermal Code. We then added the inferred thermal energy statistical distributions of the 922 geothermal systems by Montecarlo simulation, to obtain the total estimable geothermal resources of the 26 Mexican States and its uncertainty. With the resulting statistical distribution we estimated that the total thermal energy stored in the 922 geothermal systems lies between 1,168 EJ and 1,274 EJ with 90% confidence. The statistical distribution of the (conservatively) inferred reservoir temperatures indicates that 5% of these systems have temperatures between 151 and 208°C, 40% of these systems have temperatures between 102 and 151°C, 50% of these systems have temperatures between 60 and 102°C and 5% of these systems have temperatures between 36 and 60°C. These resources contain massive amounts of thermal energy that could be used in a wide variety of direct applications and power generation. They are potentially important for the economy of 26 of the 32 Mexican States.

Antecedentes

Debido a sus particulares y complejas condiciones geológico-estructurales, México cuenta con abundantes recursos geotérmicos. Un porcentaje significativo de los mismos es de alta temperatura ($T > 200^{\circ}\text{C}$) y está siendo explotado en cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto (B.C.), Los Azufres (Mich.), Los Hornos (Pue.) y Las Tres Vírgenes (B.C.S.). Se espera que el campo geotérmico Los Hornos (Jal.), que tiene un potencial de 75 MWe, entre en operación en el corto plazo. Además, varios prospectos de alta temperatura se encuentran en diferentes etapas de exploración o evaluación. La situación es muy diferente para los recursos de temperatura intermedia a baja ($T < 200^{\circ}\text{C}$). Los mismos están seriamente sub-explotados, siendo la balneología su mayor aplicación. En el actual escenario energético es importante para México contar con información acerca de este abundante recurso.

En 2003 nuestro grupo publicó una primera evaluación de los recursos geotérmicos Mexicanos de temperatura intermedia a baja (Iglesias y Torres, 2003). La misma partió de datos publicados por Torres Rodríguez *et al.* (1993), en los que se identificaban 1,538 manifestaciones superficiales (manantiales, fumarolas, pozos de agua, etc.). Recientemente publicamos una versión mucho más detallada del trabajo mencionado, en la que se desglosaron los recursos geotérmicos agregados de 20 Estados de la República Mexicana (Iglesias y Torres, 2009).

A través de varios años nuestro grupo incrementó significativamente la cantidad de información contenida en nuestra base de datos, mediante trabajos de campo y compilación de datos de diferentes fuentes. También desarrollamos una nueva base de datos relacional (Torres *et al.*, 2005) y la ligamos

con un sistema de información geográfica (Martínez Estrella *et al.*, 2005). En este trabajo presentamos una evaluación actualizada de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja, efectuado a partir de nuestra base de datos actual que contiene 2361 manifestaciones superficiales. La Fig. 1 ilustra su distribución geográfica, y la ubicación de los cuatro campos geotérmicos actualmente explotados.

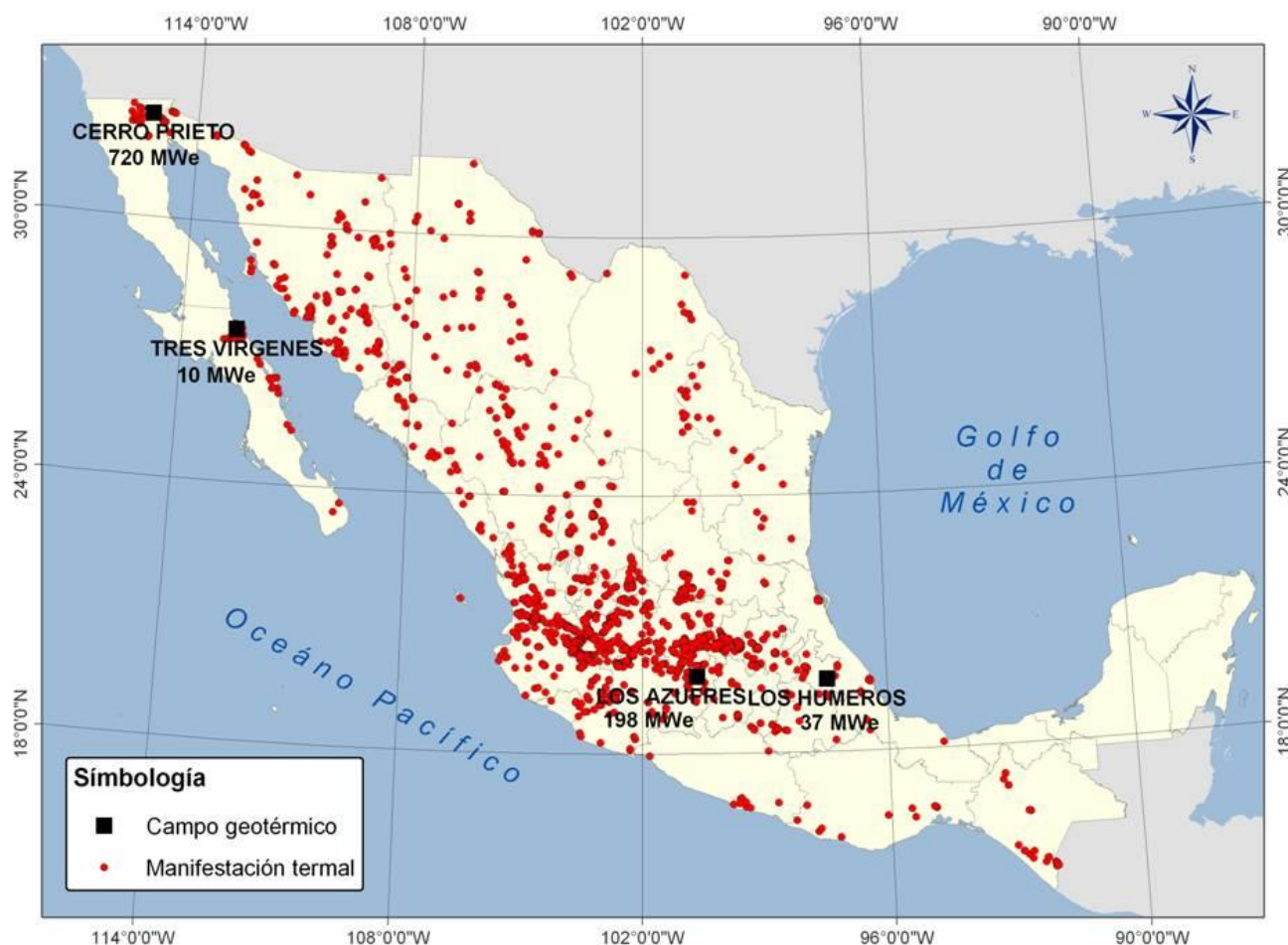


Fig. 1. Distribución geográfica de las manifestaciones geotérmicas superficiales identificadas en la base de datos.

Método

En este trabajo se adoptó el método volumétrico para la evaluación de los recursos. Con este método se estima la cantidad de calor presente en un determinado volumen de roca y agua como (e.g. Brook *et al.*, 1978)

$$q_R = \rho_C A h (T - T_{ref}) \quad (1)$$

donde q_R es la energía térmica en el reservorio, en kJ, ρ_C el calor específico volumétrico de la roca más agua (2,700 kJ/m³°C), A el área del reservorio (m²), h el espesor del reservorio (m), T la temperatura media del reservorio (°C), y T_{ref} es la temperatura de referencia (temperatura media anual local, °C). El calor específico volumétrico se calculó suponiendo que el correspondiente a la roca es 2,500 kJ/m³°C y que la porosidad del reservorio es 15%. Como la mayor parte del calor está contenida en la roca (e.g.,

Grant *et al.*, 1982), esta estimación depende sólo débilmente de la magnitud supuesta para la porosidad. Cabe destacar que este trabajo no incluye ningún intento para estimar el factor de recuperación de los recursos estimados.

Para cuantificar la incertidumbre inherente en la caracterización del recurso utilizamos métodos estadísticos en el cálculo de las energías térmicas, siguiendo a Brook *et al.* (1978) y Natheson (1978). Las incertidumbres en la energía térmica resultan mayormente de las incertidumbres en los valores estimados para A , h , T y T_{ref} . Con la excepción de T_{ref} , estos valores provienen de juicios educados basados en geología, geofísica, geoquímica, geotermometría y mediciones a fondo de pozo. La incertidumbre en T_{ref} proviene de utilizar promedios regionales que, por razones topográficas o geográficas, pueden diferir de la temperatura media local.

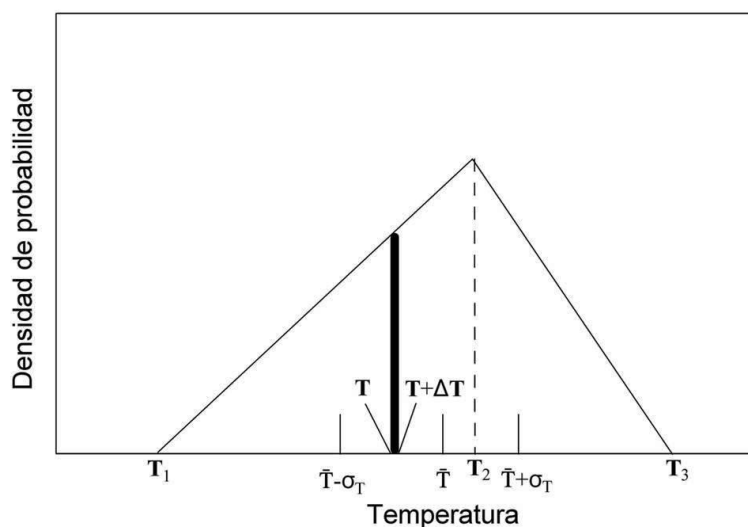


Fig. 2. Ejemplo de cálculo de variables de temperatura

Para determinar la incertidumbre en estos estimadores, asignamos a cada variable en el lado derecho de la ecuación (1) una distribución estadística triangular, que representa nuestro juicio subjetivo de la verdadera distribución. La Figura 2 presenta un ejemplo con la variable T . Los parámetros de la Fig. 2 se definen como: T_1 = temperatura mínima del yacimiento; T_2 temperatura más probable del yacimiento; y T_3 temperatura máxima del yacimiento. En la figura se muestran también \bar{T} , la media de la distribución, y σ_T , su desviación estándar. El área de la banda oscura representa la probabilidad de que la temperatura característica del reservorio se encuentre entre T y $T + \Delta T$.

En este trabajo utilizamos estas distribuciones triangulares de densidad de probabilidad para computar las densidades de probabilidad de la energía térmica de cada localidad geotérmica, como se define en la ecuación (1), por el método de Montecarlo. De este modo obtenemos histogramas y ajustes, y una variedad de estadísticas que incluyen la media, moda, mediana, desviación estándar, variancia, percentiles, etc. Por ello podemos determinar intervalos de confianza para la energía térmica estimada. De este modo, cuantificamos la incertidumbre de la variable inferida.

Después de computar las distribuciones de energía térmica para las 918 localidades geotérmicas individuales incluidas en esta evaluación, calculamos a partir de las mismas la distribución de la energía térmica total correspondiente a todas las localidades de cada Estado. Este problema es intratable analíticamente (e.g., Natheson, 1978). Por ello utilizamos nuevamente el método de Montecarlo para computar la densidad de probabilidad de la energía térmica total de cada Estado. Esto requirió primero ajustar densidades de probabilidad analíticas a los 918 histogramas estimados para las energías térmicas de las localidades consideradas, y después correr una simulación Montecarlo con las correspondientes a cada Estado. Con estas densidades de probabilidad, inferimos intervalos de confianza para evaluar la incertidumbre asociada con la energía térmica total de cada Estado. Similarmente, estimamos el valor agregado de la energía térmica correspondiente a los veinte Estados

corriendo una simulación de Montecarlo con las 918 distribuciones de energía térmica de las localidades geotérmicas en dichos Estados.

Las simulaciones Montecarlo producen distribuciones *muestra* que convergen a las distribuciones verdaderas (*población*) a medida que crece el número de iteraciones. Por prueba y error arribamos a 5,000 iteraciones como el número óptimo para utilizar en cada simulación Montecarlo. Un número mayor de iteraciones (probamos entre 500 y 10,000) tiene una incidencia mínima en los resultados. Las simulaciones se llevaron a cabo con el paquete de software @Risk.

Datos e hipótesis para la estimación de las reservas

Obtuvimos los datos necesarios de nuestra base de datos, que contiene información detallada acerca de 2361 manifestaciones geotérmicas superficiales con temperaturas de muestra mayor que 28°C. Para cada manifestación la información incluye un código de identificación alfanumérico, coordenadas geográficas, Estado, municipio, nombre local, temperatura de la muestra, flujo de calor, seis códigos descriptivos (listados más abajo) y temperatura de yacimiento inferida por cinco geotermómetros. Los códigos descriptivos indican: (1) tipo de fluido, (2) tipo de manifestación superficial, (3) fuente de calor inferida, (4) clase de temperatura de yacimiento basada en el geotermómetro de sílice, (5) tipo de sistema geotérmico y (6) edad geológica de la zona productiva.

Área del yacimiento

Es difícil obtener áreas de yacimiento precisas, aun en campos bien estudiados y ampliamente perforados. Cuando la única evidencia de la existencia de un yacimiento geotérmico es una sola manifestación superficial, asignamos al mismo un área más probable $A_2 = 2.688 \text{ km}^2$, definida por un círculo de radio igual a 925 m. También asignamos un área mínima $A_1 = 0.5 A_2$ y un área máxima $A_3 = 1.5 A_2$. La experiencia internacional (e.g., Brook *et al.*, 1978) indica que estas son hipótesis razonables.

Cuando las áreas más probables de manifestaciones geotérmicas vecinas se superponen (e.g., Fig. 3) tomamos como el área más probable de la correspondiente localidad geotérmica el área del polígono resultante. Y como antes, asignamos un área mínima $A_1 = 0.5 A_2$ y un área máxima $A_3 = 1.5 A_2$. Las áreas de los polígonos fueron computadas automáticamente con el SIG desarrollado por nuestro grupo.

Temperatura de yacimiento

Para asignar valores a T_1 , T_2 y T_3 para cada localidad, establecimos las siguientes reglas: (a) T_1 = al máximo de todas las temperaturas de muestra en la localidad; (b) si la temperatura indicada por cualquiera de los geotermómetros es menor que T_1 , no incluir dicho(s) geotermómetro(s); (c) si después de este filtrado quedan menos de dos geotermómetros en la localidad, no considerar dicha localidad; (d) T_2 = promedio entre todos los geotermómetros restantes en la localidad más temperaturas de muestra; (e) T_3 = temperatura máxima indicada por los geotermómetros disponibles. Nótese que nuestras estimaciones de la temperatura más probable del yacimiento están sesgadas hacia temperaturas más bajas, debido a la inclusión de las temperaturas de muestra en el promedio descrito en (d). Hemos adoptado esta aproximación conservadora para prevenir posibles estimaciones demasiado optimistas de la temperatura de yacimiento.

Espesor del yacimiento

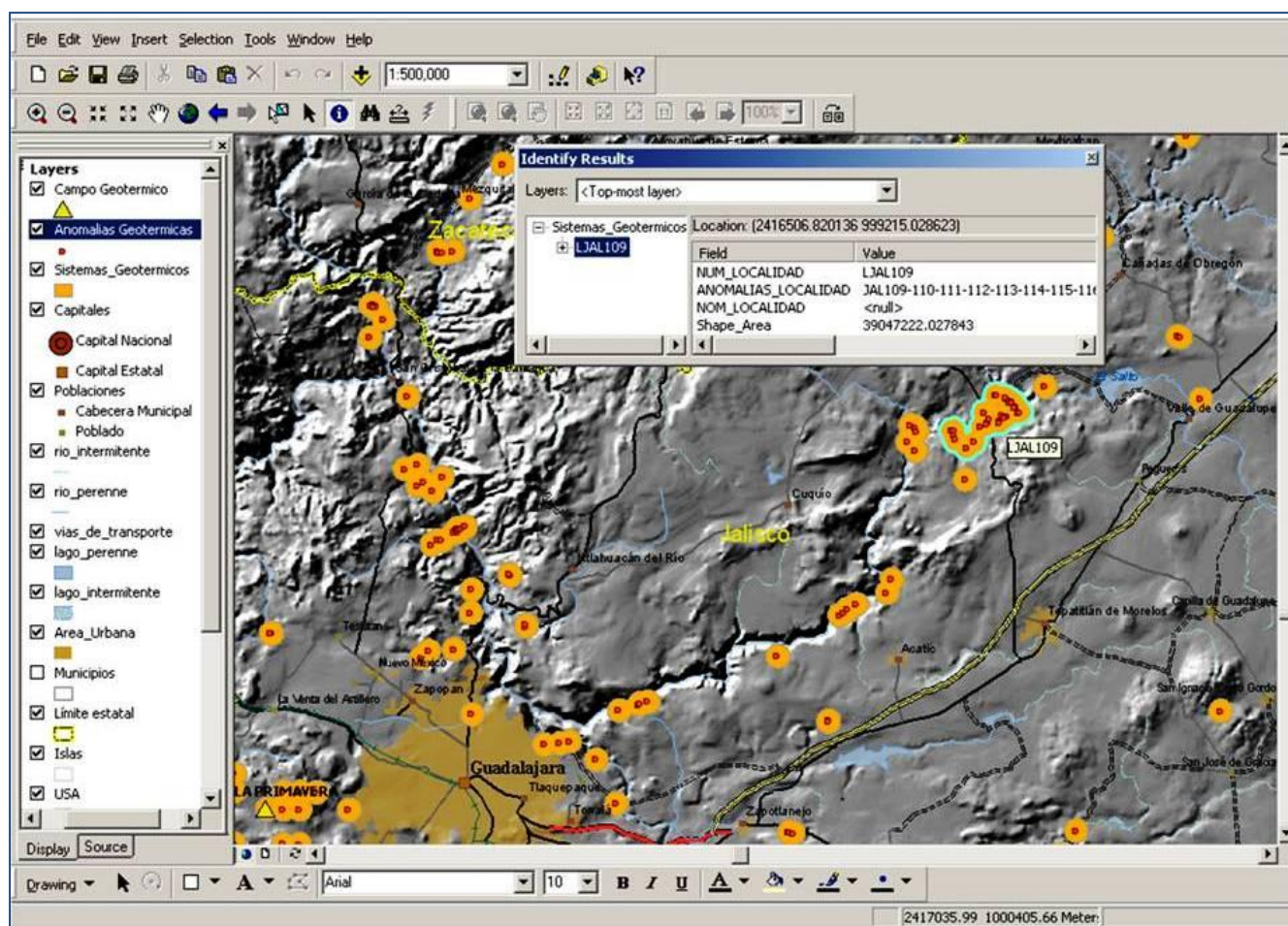


Fig. 3. Ejemplo de área de una localidad geotérmica (polígono en verde) en la que se identificaron varias manifestaciones (puntos en rojo).

Por simplicidad, hemos supuesto espesores uniformes sobre toda el área del yacimiento. Siguiendo a Brook *et al.* (1978) las estimaciones de esta caracterización incluyen la energía térmica hasta una profundidad máxima de 3 km, que conservadoramente es lo que puede explotarse tecnológica y económicamente en forma razonable en la actualidad. Debido a esto, se supone que la profundidad del fondo del yacimiento es de 3 km, a menos que exista evidencia que sugiera profundidades menores. Si datos de levantamientos geofísicos o de perforación proveen alguna indicación de la cima del yacimiento, esos datos fueron utilizados para estimar el espesor. De otro modo, se supusieron profundidades hasta la cima del yacimiento de: mínima 0.5 km, máxima 2 km y más probable 1.5 km. Las profundidades de cimas de yacimientos en sistemas geotérmicos con perforaciones extensas están típicamente en dicho rango. Por lo antedicho, nuestras estimaciones estándar de espesor son $h_1 = 1,000$ m, $h_2 = 1,500$ m y $h_3 = 2,500$ m. Conviene notar que para la mayoría de los yacimientos las incertidumbres en cuanto a espesor son pequeñas comparadas con las del área respectiva (Brook *et al.*, 1978).

Temperatura de referencia

Para las temperaturas de referencia mínima, más probable y máxima adoptamos promedios anuales de largo plazo para el Estado correspondiente, publicados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2009) en su página web.

Resultados y discusión

Una fracción significativa (23.89%) de las 2361 manifestaciones geotérmicas superficiales en nuestra base de datos carecen de uno o más parámetros necesarios para estimar sus correspondientes energías térmicas de acuerdo a las reglas descritas en la sección precedente. Por ello sólo 1797 manifestaciones superficiales fueron utilizadas para la presente estimación. En la mayor parte de los casos nuestras estimaciones deben ser consideradas como “recursos inferidos”.

Usando los criterios de la sección precedente encontramos que las 1797 manifestaciones pueden agruparse en 918 localidades geotérmicas, localizadas en 26 de los 32 Estados Mexicanos. Para cada una de las 918 localidades nuestras simulaciones Montecarlo generaron distribuciones de probabilidad para la correspondiente energía térmica, y los parámetros estadísticos mencionados en secciones precedentes. Como un ejemplo de estos resultados, la Figura 4 presenta la distribución correspondiente al sistema geotérmico LJAL109, que incluye 36 manifestaciones superficiales.

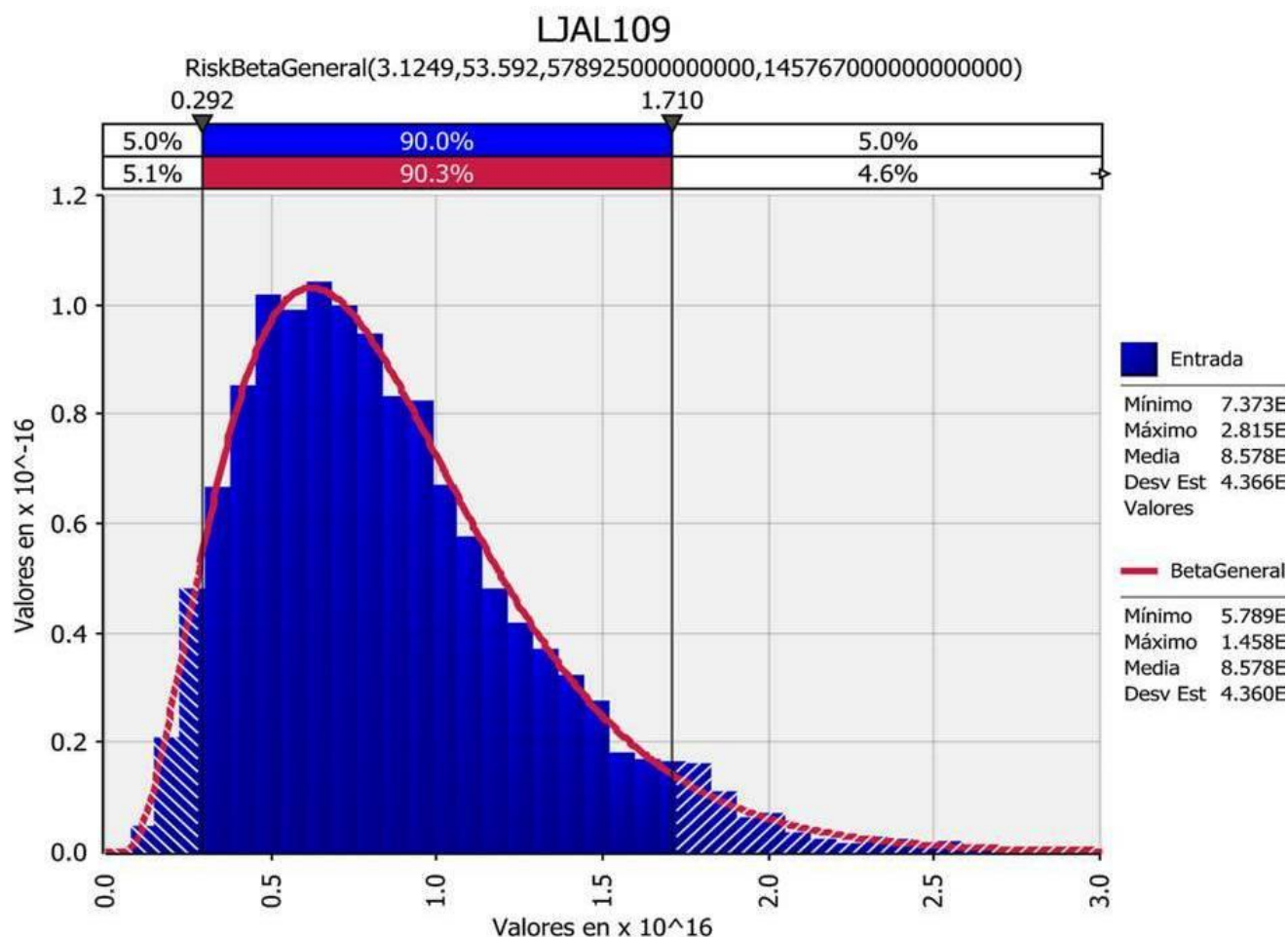


Fig. 4. Ejemplo de densidad de probabilidad para la energía térmica de la localidad geotérmica LJAL109 (energía en kJ).

La Tabla 1 resume nuestros resultados para la densidad de probabilidad de la energía térmica agregada de todas las localidades en cada Estado. Las temperaturas medias conservadoramente estimadas para las localidades varían entre 36 y 208°C. Estas temperaturas son potencialmente útiles para una cantidad

de aplicaciones en el entorno económico de México, como secado de frutas, cereales y bloques de cemento; evaporación de leche; calor de proceso para las industrias textil, papelera, azucarera, cervecera, etc.; invernaderos; cría de peces; y balnearios. Los sistemas de temperaturas más altas podrían ser utilizados para la generación eléctrica y aplicaciones en cascada.

Estado	# de sistemas	# de manifestaciones	Energía térmica e intervalo 90%(EJ)		
			5%	Media	95%
Aguascalientes	16	49	22.111	28.422	35.618
Baja California	17	47	2.757	4.044	5.517
Baja California Sur	28	38	26.720	31.590	36.883
Chiapas	15	26	19.457	26.093	34.046
Chihuahua	24	56	25.861	29.938	34.420
Cohauila	12	17	12.034	15.270	18.912
Colima	3	4	1.662	2.981	4.576
Durango	47	54	34.119	37.955	42.117
Estado de Mexico	9	18	10.602	14.102	18.033
Guanajuato	89	146	123.112	135.806	149.202
Guerrero	10	10	4.585	5.908	7.510
Hidalgo	37	93	75.652	92.359	111.437
Jalisco	175	355	253.373	277.243	302.779
Michoacan	69	135	93.662	104.997	116.861
Morelos	6	10	5.480	8.170	11.353
Nayarit	69	134	100.865	115.551	131.387
Nuevo Leon	8	8	6.292	8.788	11.437
Oaxaca	11	12	6.615	8.442	10.445
Puebla	14	16	18.017	23.838	18.017
Queretaro	32	102	91.356	118.110	151.155
San Luis Potosi	25	45	27.438	33.442	39.908
Sonora	128	154	99.352	106.159	113.351
Tamaulipas	8	8	6.305	8.803	11.603
Tlaxcala	3	3	2.144	3.481	5.084
Veracruz	14	15	8.618	10.837	13.375
Zacatecas	49	76	62.366	72.042	83.079
TOTAL	918	1,631			

Tabla 1. Resumen de las energías térmicas estimadas en cada estado.

más probables estimadas para los 918 sistemas geotérmicos. Las mismas cubren el rango 36-208°C. De acuerdo con la Fig. 6, 5% de estos sistemas tienen temperaturas entre 151 y 208°C, 40% de estos sistemas tienen temperaturas entre 102 y 151°C, 50% de estos sistemas tienen temperaturas entre 60 y 102°C y 5% de estos sistemas tiene temperaturas entre 36 y 60°C.

Sumario y Conclusiones

Hemos estimado las energías térmicas correspondientes a 918 (76%) de las localidades geotérmicas de temperatura intermedia a baja de México, y las correspondientes incertidumbres.

Como se mencionó, también estimamos la densidad de probabilidad correspondiente a la energía térmica agregada de las 918 localidades geotérmicas. Estos resultados se ilustran en la Figura 5. La energía térmica agregada de las 918 localidades está entre 1168 EJ y 1274 EJ con 90% de confianza. Las estadísticas principales de dicha distribución son: media = 1219 EJ, moda = 1215 EJ, mediana = 1218 EJ, desviación estándar = 32.33 EJ.

Estos recursos representan una cota inferior para los recursos geotérmicos de temperatura intermedia a baja de México, ya que (a) no fue posible estimar la energía térmica correspondiente a 23.89% de las manifestaciones geotérmicas catalogadas debido a la carencia de datos relevantes para las mismas; y (b) es posible que existan recursos no descubiertos todavía.

La Figura 6 presenta la distribución de las temperaturas de yacimiento

Identificamos 1797 manifestaciones geotérmicas superficiales, agrupadas en 918 sistemas geotérmicos, con suficientes datos como para estimar las energías térmicas asociadas a los mismos. Los 918 sistemas se localizan en 26 de los 32 estados mexicanos. Estimamos las energías térmicas y los correspondientes intervalos de 90% de confianza para los 918 sistemas. La energía térmica media estimada de estos sistemas está en el rango 2.98 – 277.24 EJ. Con estos resultados estimamos los valores agregados de la energía térmica correspondiente a cada uno de los 26 estados mexicanos y sus incertidumbres. Estos resultados se presentan en la Tabla 1.

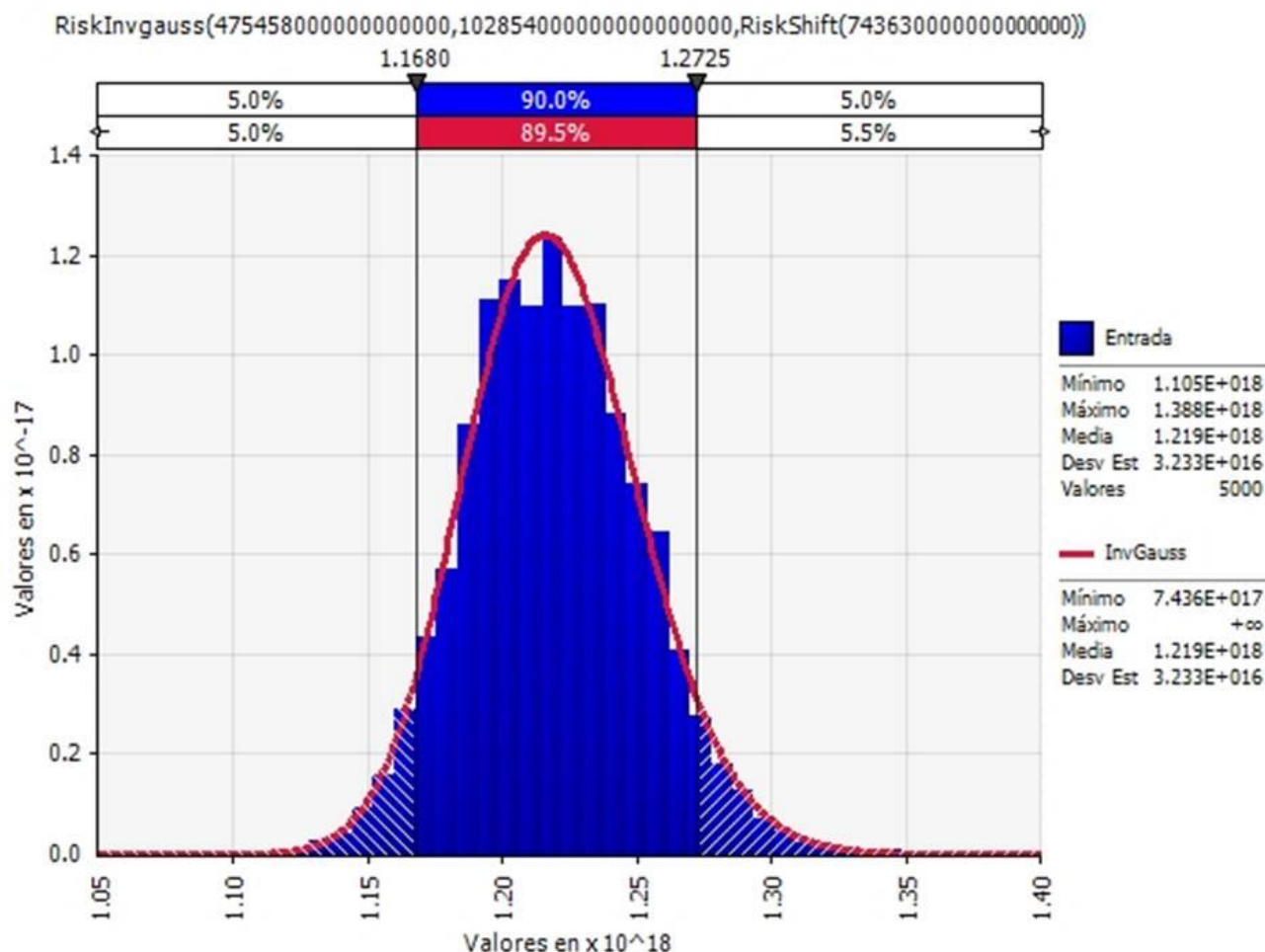


Fig. 5. Densidad de probabilidad de la energía térmica agregada (en kJ) correspondiente a las 918 localidades geotérmicas investigadas.

Estimamos también las energías térmicas agregadas de los 918 sistemas geotérmicos. Estas se encuentran en el intervalo 1168 – 1274 EJ con 90% de confianza. Esta estimación representa una cota inferior para los recursos geotérmicos de temperatura intermedia a baja, porque incorpora solamente el 76% de las manifestaciones superficiales catalogadas, y porque podrían existir otros recursos geotérmicos aún no identificados.

Nuestras las temperaturas de yacimiento más probables estimadas para los 918 sistemas geotérmicos cubren el rango 36-208°C. Cinco por ciento de estos sistemas tienen temperaturas entre 151 y 208°C, 40% de estos sistemas tienen temperaturas entre 102 y 151°C, 50% de estos sistemas tienen temperaturas entre 60 y 102°C y 5% de estos sistemas tiene temperaturas entre 36 y 60°C.

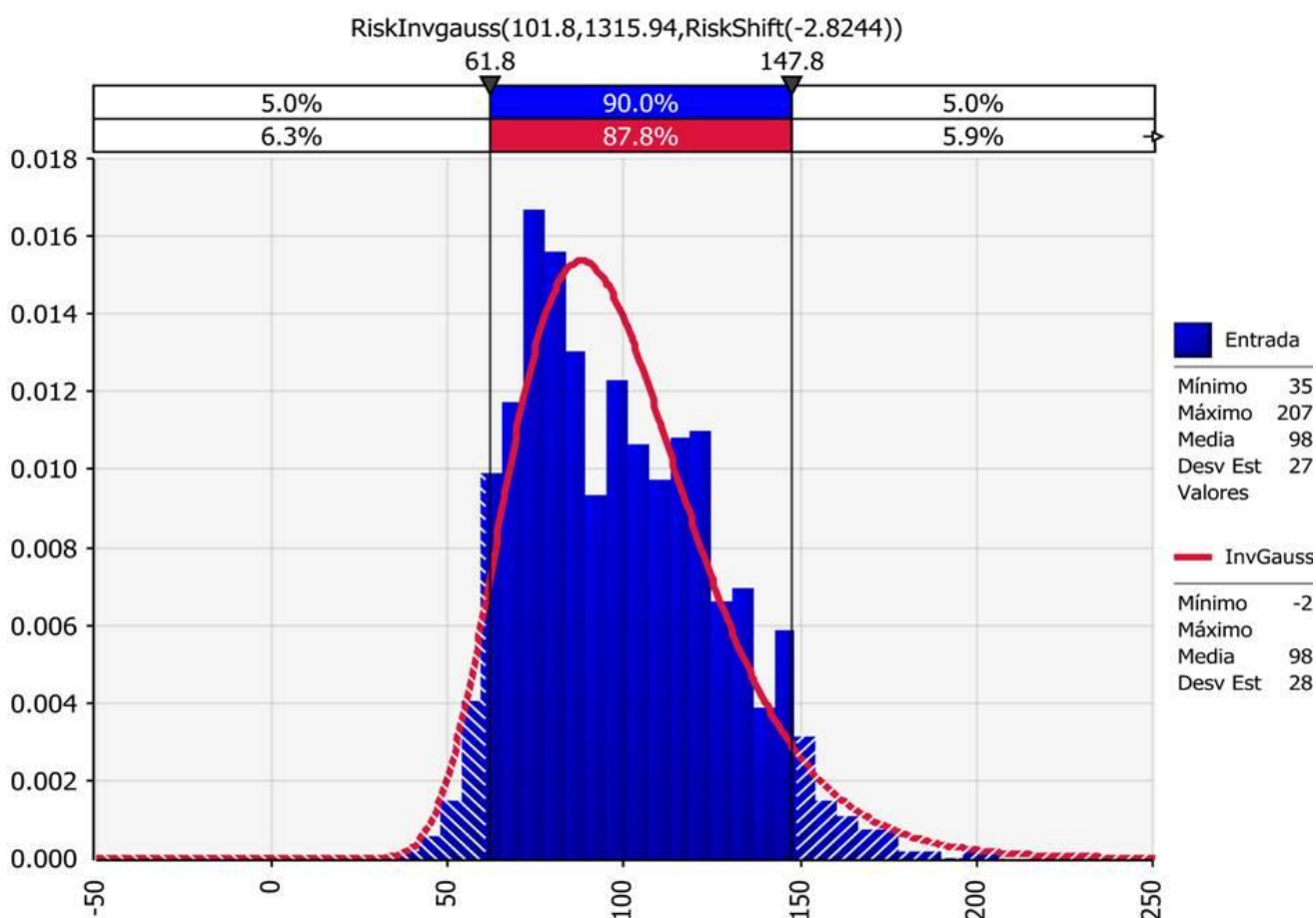


Fig. 6. Distribución de las temperaturas de yacimiento más probables estimadas para los 918 sistemas geotérmicos.

La magnitud de los recursos geotérmicos inferidos y de sus temperaturas asociadas es potencialmente importante para impactar positivamente el desarrollo económico de la República Mexicana.

Referencias

- Brook, C.A., Mariner R.H., Mabey D.R., Swanson J.R., Guffanti M., y Muffler L.J.P.: Hydrothermal Convection Systems with Reservoir Temperatures $\geq 90^{\circ}\text{C}$. In: Muffler L.P.J., Assessment of Geothermal Resources of the United States – 1978, Circular 790, U.S. Geological Survey, pp. 18-85 (1978).
- Grant, M.A., Donaldson, I.G. y Bixley, P.F., *Geothermal Reservoir Engineering. Chapter 3: Simple quantitative models*. Academic Press pp. 46-75 (1982).
- Iglesias, E.R. y Torres, R.J.: Low- to medium-temperature geothermal reserves in Mexico: a first assessment, *Geothermics*, vol. 43, pp. 711-719 (2003).

- Iglesias, E.R. y Torres, R.J., 2009 “Primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja de veinte Estados de México”, *Geotermia* **22** (2), 54-65.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), México, *página web* <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/ags/temper-tot-mens.cfm> (2009)
- Martínez-Estrella, I., Torres, R.J. e Iglesias, E.R., A GIS-based information system for moderate-to low-temperature Mexican geothermal resources, *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, paper 1725, 8 pp. (2005).
- Natheson, M., Methodology of determining the uncertainty in accesible geothermal resource base of identified hydrothermal convection systems, *US Geological Survey Open-File Report 78-1003*, p. 50 (1978)
- Torres, R.J., Martínez-Estrella, J.I. e Iglesias, E.R., Database of Mexican medium- to low-temperature geothermal resources. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, paper 1724, 4 pp. (2005)
- Torres-Rodríguez, V., Arellano-Gómez, V., Barragán-Reyes, R.M., González-Partida, E., Herrera-Franco, J. J., Santoyo Gutiérrez, E. y Venegas-Salgado, S., 1993. In: *Geotermia en México*. (Ed. Vicente Torres-Rodríguez), Universidad Nacional Autónoma de México.