

Primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja en veinte estados de México

Eduardo R. Iglesias y Rodolfo J. Torres

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia.
Reforma 113, 62490 Cuernavaca, Morelos México. Correo: iglesias@iie.org.mx

Resumen

En este trabajo se hace una primera estimación, parcial, de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja de México. La estimación incluye 29.16% de las manifestaciones geotérmicas identificadas en la base de datos pública utilizada. Para estimar las reservas se utilizó el método de volumen, suplementado con simulaciones por el método de Montecarlo, con el fin de cuantificar las incertidumbres inherentes. Las estimaciones se presentan estado por estado. Estos resultados indican que las reservas agregadas de los 20 estados considerados están entre 7.7×10^{16} y 8.6×10^{16} kJ, con 90% de confianza. La distribución de las temperaturas de yacimiento más probables varía entre aproximadamente 60 y 180° C, con un valor medio de 111° C. La enorme magnitud de estas reservas, y sus temperaturas asociadas, son potencialmente importantes para el desarrollo económico de las poblaciones ubicadas en su cercanía.

Palabras clave: Baja a media temperatura, México, método volumétrico, potencial geotérmico, reservas geotérmicas.

First assessment of low- to medium-temperature geothermal reserves in 20 Mexican states

Abstract

A first, partial, assessment is included of the low- to medium-temperature geothermal reserves in 20 Mexican States and their aggregate value. The assessment covers about 29.16% of the identified geothermal-surface manifestations in the public database. For reserve assessments, we use the volumetric method, supplemented with Montecarlo simulations and statistics, to quantify inherent uncertainties. Our estimations are presented on a state-by-state basis. We estimate the aggregated reserves of the 20 states as between 7.7×10^{16} and 8.6×10^{16} kJ, with 90% confidence. The most likely reservoir temperatures range between 60-180° C, with a mean of 111° C. Such massive amounts of recoverable energy—and the associated temperatures—are potentially important for the economic development of nearby localities and the nation.

Keywords: Low- to medium-temperature, Mexico, volumetric method, geothermal potential, geothermal reserves.

1. Introducción

Debido principalmente a sus interacciones con las placas del Pacífico y de Cocos, y posiblemente, también a su interacción con la Placa del Caribe, México cuenta con abundantes recursos geotérmicos. La mayor parte de los recursos geotérmicos de alta temperatura ($T > 200^\circ \text{C}$), apropiados para la generación de electricidad, han sido explorados y evaluados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Actualmente la CFE explota los campos geotérmicos de Cerro Prieto (BC), Los Azufres (Mich.), Los Humeros (Pue.) y Las Tres Vírgenes (BCS) que suman una capacidad instalada de 958 MWe (Gutiérrez-Negrín, 2007).

La situación es muy diferente para los recursos geotérmicos mexicanos de temperaturas intermedias a bajas ($T < 200^{\circ}\text{C}$), apropiados mayormente para aplicaciones directas de calor. Su capacidad instalada total es de aproximadamente 164 MWt (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2005), mayormente en balnearios. La experiencia internacional indica que los recursos geotérmicos de temperaturas intermedias a bajas son órdenes de magnitud más abundantes que los de alta temperatura. Podemos por lo tanto inferir, sin temor a equivocarnos, que los recursos geotérmicos de temperaturas intermedias a bajas están vastamente sub-explotados en México. Una razón importante para que prevalezca esta situación es el virtual desconocimiento de su potencial.

En este trabajo hacemos una primera estimación, parcial, de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja de México, con base a su distribución por estado. Sobre esta base se estimaron también las reservas agregadas de los 20 estados.

Método

Las metodologías utilizadas para caracterizar recursos geotérmicos pueden dividirse en cuatro categorías mayores: (1) flujo térmico superficial, (2) método volumétrico, (3) fractura plana y (4) presupuesto de calor magmático. Muffler y Cattaldi (1978) concluyeron que el método volumétrico es el más conveniente, por las siguientes razones: (a) es aplicable a cualquier entorno geológico; (b) los parámetros requeridos pueden ser medidos o estimados; (c) los inevitables errores se compensan parcialmente; y (d) las mayores incertidumbres (el factor de recuperación y la recarga de calor) van a disminuir a futuro.

Por lo antedicho, en este trabajo se adoptó el método volumétrico. Con este método se calcula primero la cantidad de calor presente en un determinado volumen de roca y agua. Posteriormente, para calcular reservas, se estima qué fracción de dicha energía es recuperable. La energía térmica se calcula 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 ($2,700 \text{ kJ/m}^3\text{C}$), A el área del reservorio (m^2), h el espesor del reservorio (m), T la temperatura media del reservorio ($^{\circ}\text{C}$), y T_{ref} es la temperatura de referencia (temperatura media anual local, $^{\circ}\text{C}$). El calor específico volumétrico se calculó suponiendo que el correspondiente a la roca es $2,500 \text{ kJ/m}^3\text{C}$ 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.

Para cuantificar la incertidumbre inherente en la caracterización de las reservas 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.

Para determinar la incertidumbre en estos estimadores, asignamos a cada variable una distribución estadística triangular, que representa nuestro juicio subjetivo de la verdadera distribución (e.g., Fig. 1). Los parámetros de la Figura 1 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 $T+\Delta T$.

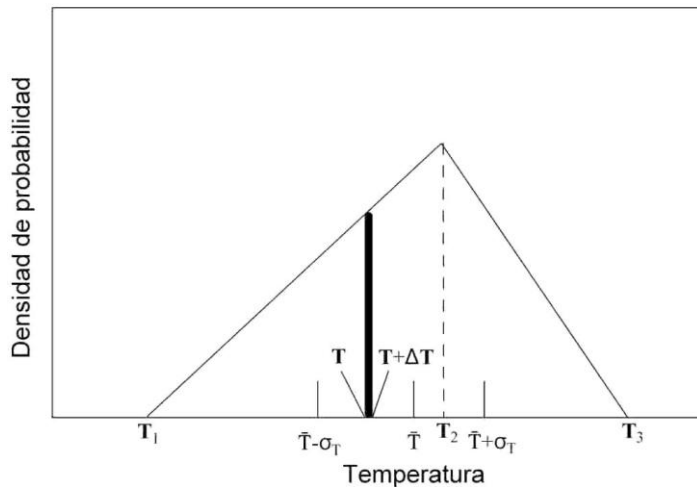


Fig. 1. Ejemplo de distribución estadística triangular utilizada para estimar la incertidumbre de las variables de entrada para la estimación de reservas (ver texto donde se explica la nomenclatura).

valores medios del área, espesor y diferencia entre valores medios de T y T_{ref} para computar valores medios de la energía térmica de localidades geotérmicas individuales. La multiplicación de valores medios es válida únicamente si las variables A , h y T son estadísticamente independientes en el yacimiento considerado. No es posible desechar alguna dependencia estadística entre algunas o todas estas variables. Usando el método de Montecarlo evitamos la necesidad de suponer independencia estadística de las variables mencionadas.

Después de computar las distribuciones de energía térmica para las 276 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 276 histogramas estimados para las energías térmicas de las localidades consideradas, y después correr una simulación Montecarlo con las correspondientes a cada estado. Y, con estas densidades de probabilidad, inferir 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 276 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 a 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 (2001).

Las reservas se estiman como la fracción accesible de la energía térmica almacenada, que puede ser producida legal y económicamente hoy, con la tecnología actual. Lo usual es estimar reservas como el producto de la energía térmica accesible almacenada y un factor llamado de recuperación R . Este factor resume las limitaciones físicas y tecnológicas que impiden extraer toda la energía térmica almacenada en el

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.

Utilizando el método de Montecarlo hemos mejorado significativamente el método utilizado por otros autores (e.g., Brook *et al.*, 1978) para estimar las energías térmicas de localidades individuales. Estos autores utilizaron productos de

reservorio. Siguiendo a Bodvarsson (1974), Natheson (1975) y Natheson y Muffler (1975), hemos supuesto un valor de 0.25 para R , como una primera aproximación para nuestra estimación de reservas.

Finalmente, todas las cantidades inferidas en este trabajo deben ser consideradas como estimaciones de orden de magnitud. Sin embargo, nuestras estimaciones no son menos confiables que las publicadas para otros recursos energéticos, porque involucran probablemente menos especulación acerca de evidencia invisible (Armstead y Tester, 1978).

Datos e hipótesis para la estimación de las reservas

Obtuvimos los datos necesarios de una compilación de Torres Rodríguez *et al.* (1993). Esta compilación contiene información detallada acerca de 1,310 manifestaciones geotérmicas identificadas en México, con temperaturas superficiales mayores de 30° 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.

Un número importante de dichas manifestaciones carece de información necesaria para estimar la energía térmica asociada con el correspondiente reservorio. Por ello, nos vimos forzados a eliminar de esta caracterización a todas las manifestaciones que carecen de información en uno o más de los siguientes parámetros: coordenadas geográficas, tipo de fluido, tipo de manifestación superficial, fuente de calor inferida, temperatura de la muestra, y todas las manifestaciones que tienen datos en menos de dos geotermómetros. Esto lo hicimos para mejorar la confiabilidad general de nuestras estimaciones de la temperatura del reservorio.

A continuación, agrupamos las manifestaciones en localidades geotérmicas. El criterio principal para agruparlas fue que dos manifestaciones adyacentes se encontraran dentro de un rectángulo de 1,000 por 2,000 m, y que las fuentes de calor inferidas fueran del mismo tipo.

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.

Es difícil obtener áreas de reservorio precisas, aun en yacimientos bien estudiados, con perforación extensiva en los mismos. Siguiendo a Brook *et al.* (1978), cuando la única evidencia de la existencia de un reservorio de agua caliente es una sola manifestación superficial, asignamos un área mínima $A_1 = 1 \text{ km}^2$, un área más probable $A_2 = 2 \text{ km}^2$ y un área máxima $A_3 = 3 \text{ km}^2$. Para localidades que incluyen más de una manifestación superficial, asignamos áreas mínima, más probable y máxima de 1, 2 y 3 km^2 , respectivamente, a cada manifestación, y computamos A_1 , A_2 y A_3 como la superposición (unión lógica) de los respectivos conjuntos de áreas.

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 tecnológicamente 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).

Resultados y discusión

Después de filtrar los datos de acuerdo a los criterios que se describen en la sección precedente obtuvimos 276 localidades geotérmicas, distribuidas en 20 estados de la República Mexicana (Fig. 2). Por razones de espacio es imposible presentar aquí nuestros resultados detallados correspondientes a cada una de las 276 localidades geotérmicas. Por ello nos limitamos a presentar los resultados principales correspondientes a los estados.

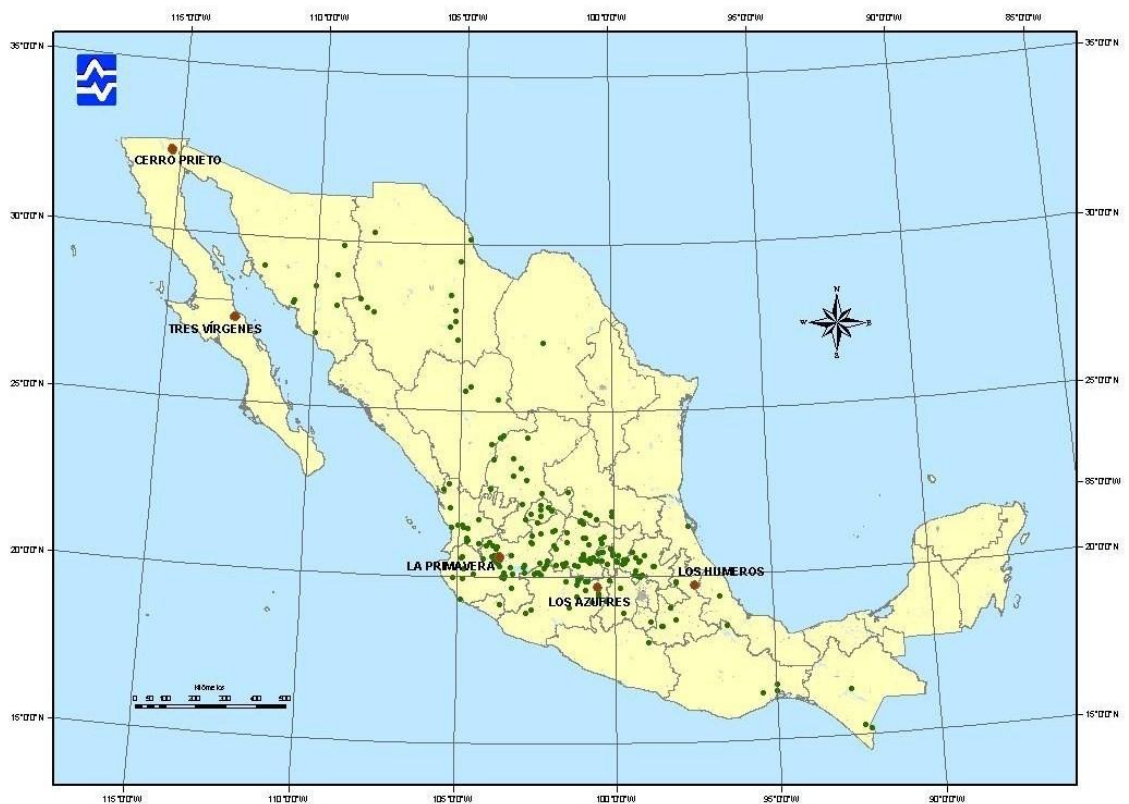
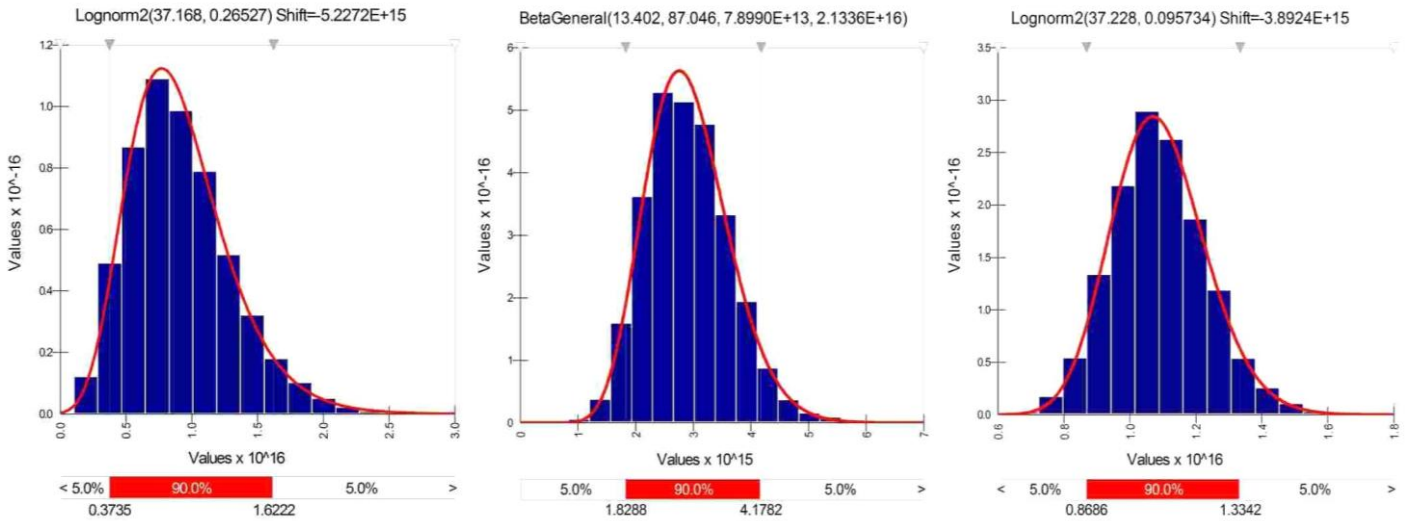


Fig. 2.
Distribución
geográfica de las
276 localidades
geotérmicas
incluidas en este
estudio.

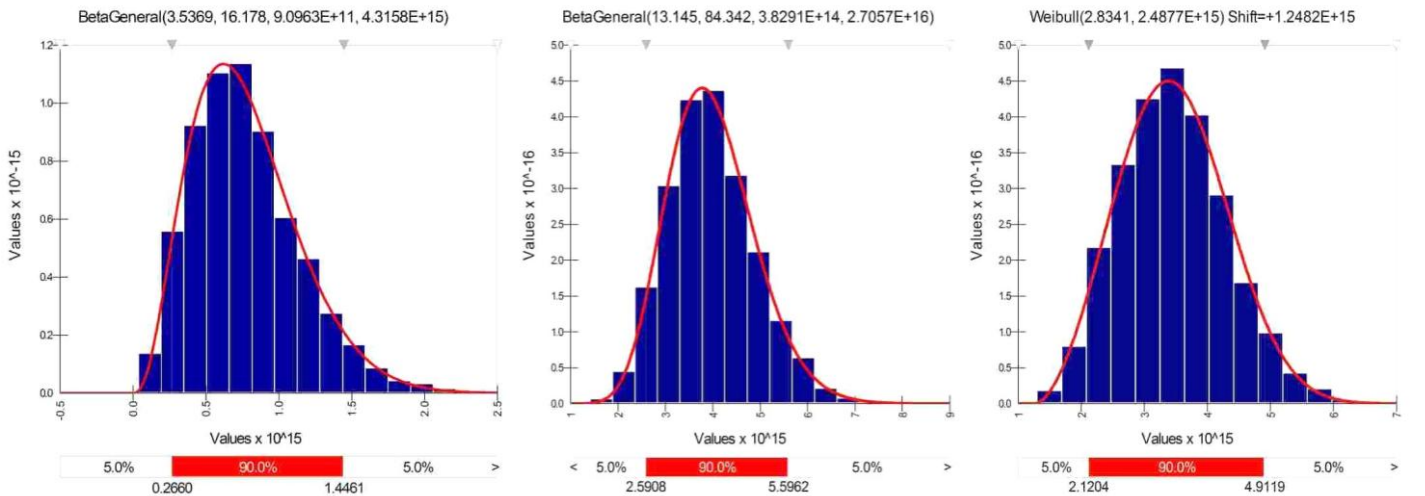
En las figuras 3 a 22 presentamos las gráficas de las estimaciones de *la energía térmica* para cada estado. Estas figuras incluyen los histogramas generados por la simulación de Montecarlo para estimar la energía térmica agregada de las localidades incluidas en el cálculo para el estado, la función estadística que mejor ajusta dicho histograma, con los parámetros correspondientes, y el intervalo de 90% de confianza para la energía térmica agregada.

En la Tabla 1 presentamos un resumen de las estimaciones de *reservas* por Estado. Para mantener esta tabla dentro de límites razonables hemos incluido en la misma solamente las medias de las distribuciones de las

reservas estimadas para cada estado y los correspondientes intervalos de confianza de 90%. Las medias de las distribuciones de *energía térmica* correspondientes y sus respectivos intervalos de confianza se pueden reconstruir multiplicando los correspondientes valores de las reservas por $1/R = 4$, para comparar estos resultados con los presentados en las figuras 3 a 22.



Figuras 3 (izquierda), 4 (centro) y 5 (derecha). Estimación de la energía térmica correspondiente a los estados de Aguascalientes (izquierda), Chiapas (centro) y Chihuahua (derecha).

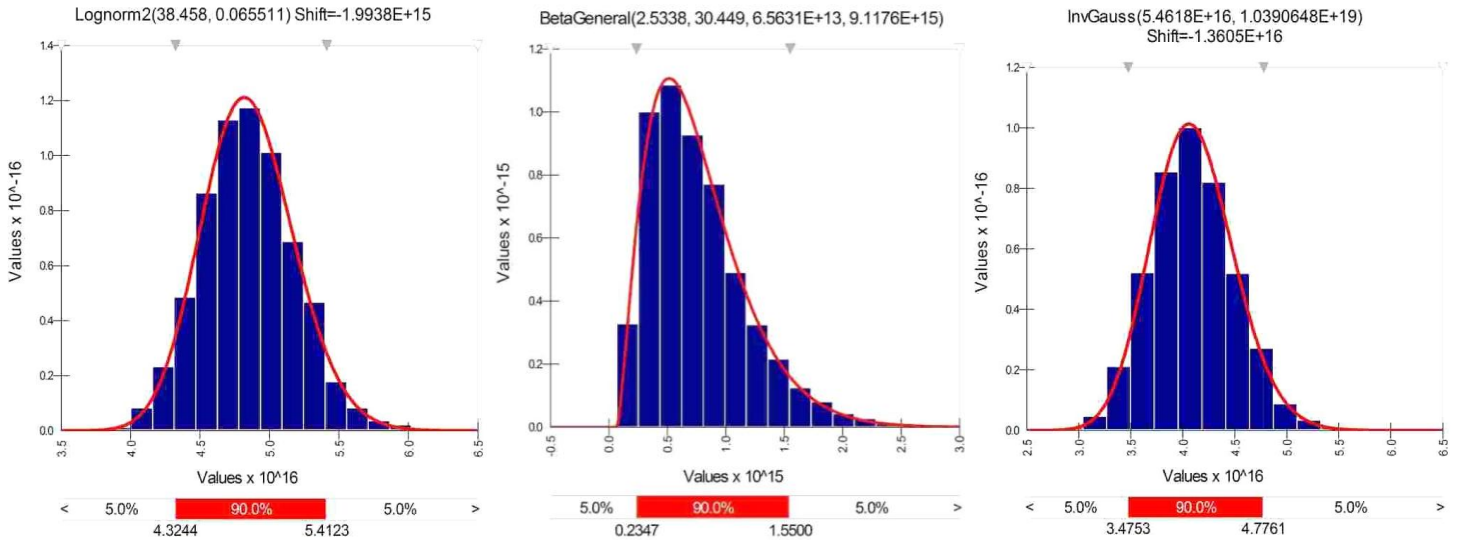


Figuras 6 (izquierda), 7 (centro) y 8 (derecha). Estimación de la energía térmica correspondiente a los estados de Colima (izquierda), Durango (centro) y México (derecha).

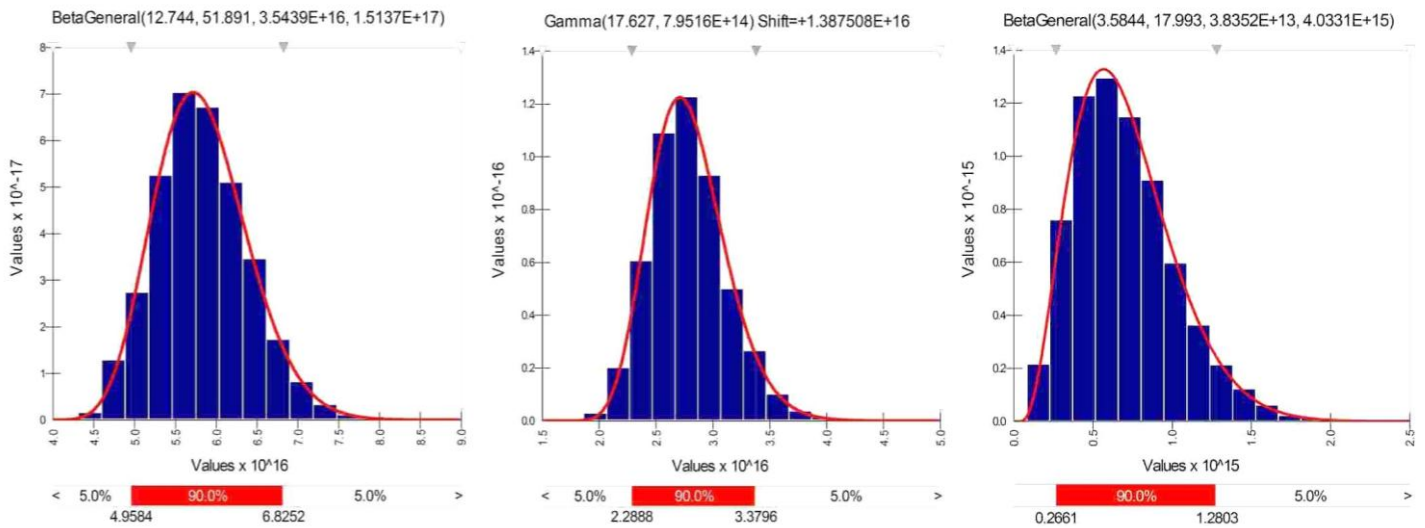
Para dar una idea de las temperaturas de yacimiento consideradas para la estimación de reservas, hemos incluido en la Tabla 1 el valor medio de las temperaturas más probables consideradas para cada localidad en el estado, y su correspondiente desviación estándar.

El número de localidades incluidas en la estimación de las energías térmicas agregadas de cada estado, y de las correspondientes reservas, varía considerablemente (Tabla 1). Como sería de esperar, existe una fuerte correlación ($r^2 = 0.948694$) entre la media de la distribución de reservas geotérmicas en el estado y el número de localidades geotérmicas incluidas en cada estimación (Fig. 23). Por ello concluimos que el porcentaje de

localidades geotérmicas conocidas incluidas en la estimación (Tabla 1) provee una medida de la significancia de la estimación de reservas de dicho estado.



Figuras 9 (izquierda), 10 (centro) y 11 (derecha). Estimación de la energía térmica correspondiente a los estados de Guanajuato (izquierda), Guerrero (centro) e Hidalgo (derecha).

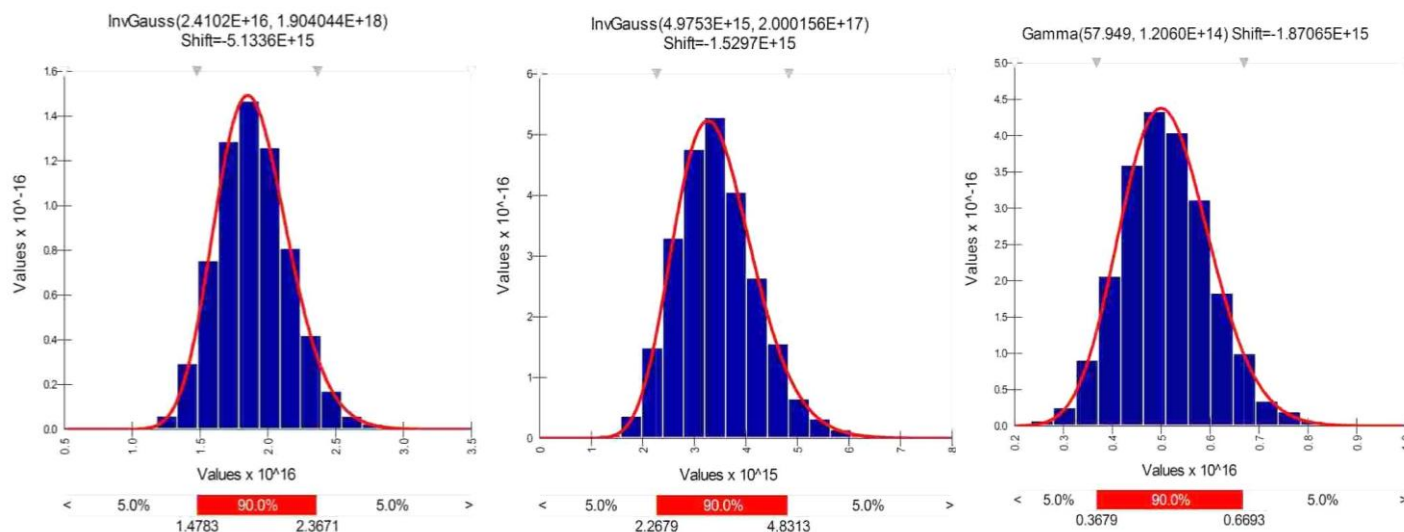


Figuras 12 (izquierda), 13 (centro) y 14 (derecha). Estimación de la energía térmica correspondiente a los estados de Jalisco (izquierda), Michoacán (centro) y Morelos (derecha).

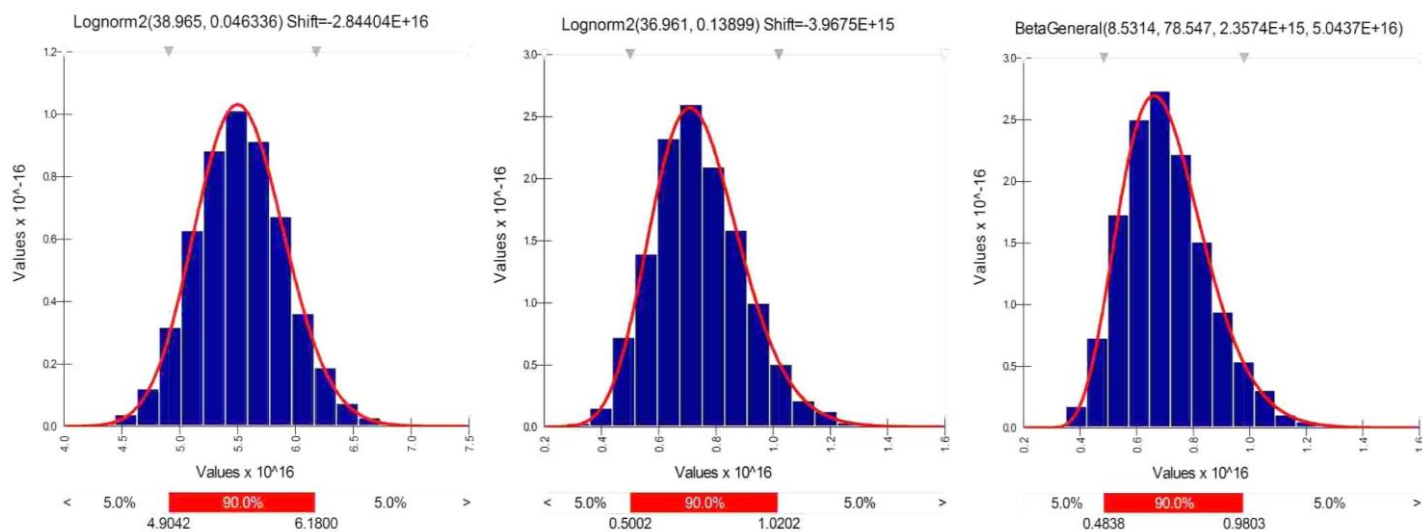
También presentamos las estadísticas principales de las 276 localidades geotérmicas consideradas en este estudio. La Figura 24 presenta la distribución de temperaturas más probables para las 276 localidades. La moda de la distribución es 110° C, su media 111.25° C y su desviación estándar es 20.53° C. La localidad aislada que aparece en el extremo superior de la cola de la distribución tiene una temperatura más probable igual a 202.9° C, apenas por encima del límite superior del rango de temperaturas ($T < 200^{\circ} \text{C}$) considerado en este estudio, de modo que no la suprimimos.

La Figura 25 presenta nuestros resultados para la distribución de la media de energía térmica para las 276 localidades. Nótese el estrecho agrupamiento de la energía térmica alrededor de 0.9×10^{15} kJ y la larga cola

hacia los valores más altos. El factor principal que determina la energía térmica es usualmente el área de la localidad; la temperatura del yacimiento generalmente juega un papel menor.



Figuras 15 (izquierda), 16 (centro) y 17 (derecha). Estimación de la energía térmica correspondiente a los estados de Nayarit (izquierda), Oaxaca (centro) y Puebla (derecha).



Figuras 18 (izquierda), 19 (centro) y 20 (derecha). Estimación de la energía térmica correspondiente a los estados de Querétaro (izquierda), San Luis Potosí (centro) y Sonora (derecha).

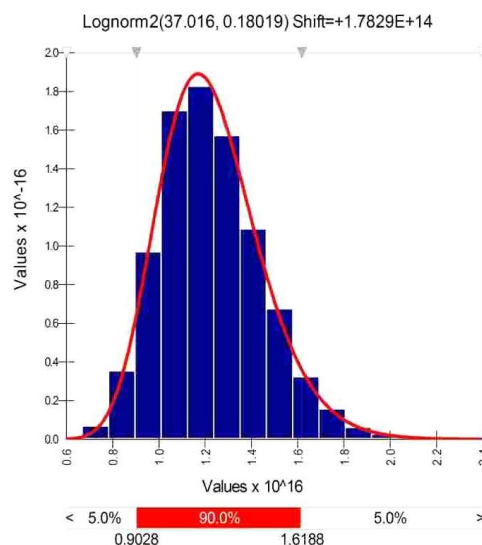
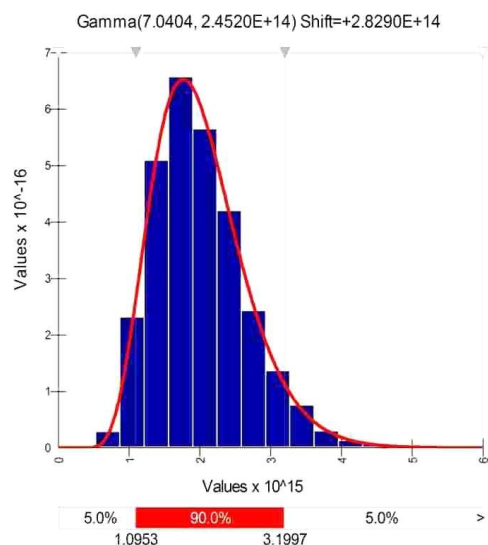
La Figura 26 presenta nuestros resultados de la *energía térmica* total almacenada en las 276 localidades. Estos resultados se ajustan muy bien con una distribución lognormal2, con los valores de los parámetros μ , σ y *shift* (corrimiento) que se muestran, en ese orden, en la parte superior de la figura. La energía térmica total estimada con 90% de confianza está entre 3.08×10^{17} y 3.45×10^{17} kJ (8.56×10^{10} a 9.58×10^{10} MW_t). Los estadísticos principales de la distribución son: media = 3.26×10^{17} kJ (9.06×10^{10} MW_t), desviación estándar = 1.12×10^{16} kJ (3.11×10^9 MW_t).

Aplicando el factor de recuperación $R = 0.25$, estimamos que las *reservas* totales de las localidades evaluadas se encuentran entre 7.7×10^{16} y 8.6×10^{16} kJ (2.14×10^{10} a 2.39×10^{10} MW_t), con 90% de confianza, con una

media igual a 8.15×10^{16} kJ (2.26×10^{10} MW_t) y una desviación estándar igual a 0.28×10^{16} kJ (7.78×10^8 MW_t).

Estado	Número de manifestaciones geotérmicas			Número de localidades incluidas en el estudio	Reservas (kJ)			Promedio de las temperaturas medias de las localidades (°C)	
	En el estado	Incluidas en el estudio			Min. intervalo de confianza de 90%	Máximo intervalo de confianza de 90%	Media de la distribución	Media	Desviación estándar
		Número	%						
Aguascalientes	49	18	36.7	7	2.36E+15	5.58E+15	3.80E+15	119.41	22.25
Chiapas	14	3	21.4	3	4.57E+14	1.04E+15	7.30E+14	139.01	26.49
Chihuahua	53	13	24.5	11	2.17E+15	3.34E+15	2.73E+15	104.72	22.00
Colima	3	1	33.3	1	6.03E+13	3.63E+14	1.93E+14	114.79	76.65
Durango	55	5	9.1	5	6.48E+14	1.40E+15	9.95E+14	85.20	12.94
Edo. de México	6	5	83.3	3	5.30E+14	1.23E+15	8.65E+14	129.81	8.52
Guanajuato	172	75	43.6	47	1.08E+16	1.35E+16	1.21E+16	114.92	17.64
Guerrero	10	1	10	1	6.00E+13	3.80E+14	1.92E+14	78.05	92.38
Hidalgo	76	43	56.6	28	8.69E+15	1.19E+16	1.03E+16	112.50	16.75
Jalisco	391	66	16.9	41	1.24E+16	1.71E+16	1.46E+16	113.44	21.83
Michoacán	71	27	38	24	5.72E+15	8.45E+15	6.98E+15	119.15	25.29
Morelos	2	1	50	1	6.50E+13	3.20E+14	1.74E+14	95.80	64.37
Nayarit	56	19	33.9	13	3.70E+15	5.92E+15	4.75E+15	110.57	17.22
Oaxaca	12	5	41.7	4	5.67E+14	1.21E+15	8.63E+14	112.93	13.18
Puebla	17	7	41.2	6	9.20E+14	1.67E+15	1.28E+15	106.68	15.97
Querétaro	172	63	36.6	54	1.23E+16	1.55E+16	1.38E+16	107.22	12.64
San Luis Potosí	20	7	35	6	1.25E+15	2.55E+15	1.86E+15	108.72	46.64
Sonora	77	9	11.7	8	1.21E+15	2.45E+15	1.77E+15	87.16	13.19
Veracruz	10	2	20	2	2.74E+14	8.00E+14	5.03E+14	108.11	13.86
Zacatecas	44	12	27.3	11	2.26E+15	4.05E+15	3.08E+15	107.48	17.66
Total	1310	382	29.16	276					

Tabla 1. Reservas por estado y temperaturas promedio estimadas



Figuras 21 (izquierda) y 22 (derecha). Estimación de la energía térmica correspondiente a los estados de Veracruz (izquierda) y Zacatecas (derecha).

Nótese que, a consecuencia del filtrado, el número de manifestaciones superficiales incluidas en las estimaciones para cada estado es significativamente menor que el número de manifestaciones registradas en la base de datos. Por ello, solamente 382 (29.16%) de las 1,310 manifestaciones geotérmicas registradas en la base de datos fueron incluidas en esta evaluación (Tabla 1). Por lo mismo, los resultados de este trabajo representan un límite inferior para las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja de cada estado y de las reservas agregadas de la República Mexicana.

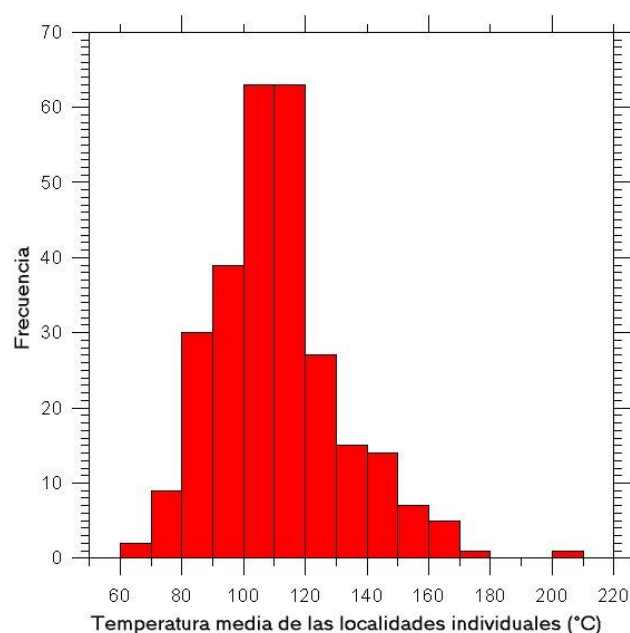
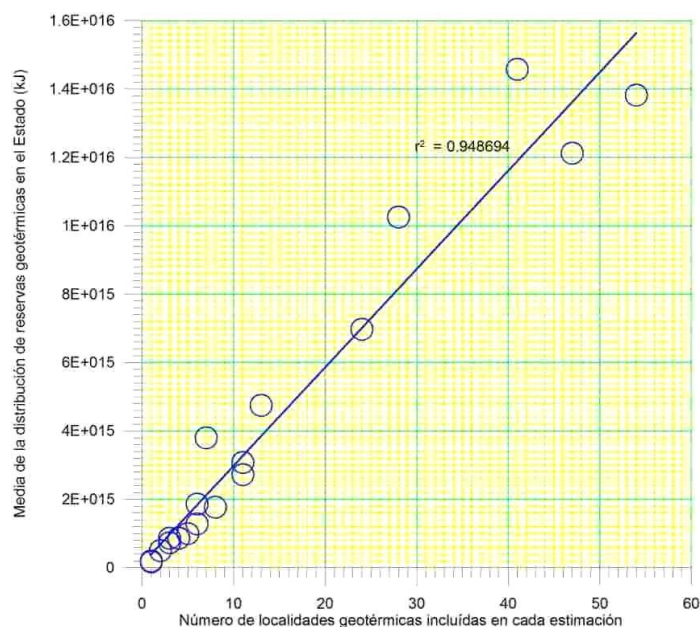


Fig. 23. (Izquierda). Correlación entre la media de la distribución de las reservas geotérmicas del estado y el número de localidades geotérmicas incluidas en cada estimación.

Fig. 24 (Derecha). Distribución de temperaturas más probables para las 276 localidades geotérmicas.

Aunque constituyen un límite inferior, las reservas estimadas en este trabajo contienen cantidades masivas de energía térmica. Por ejemplo, 8.15×10^{16} kJ, el valor medio estimado de las reservas, equivale a aproximadamente 2.14×10^{15} metros cúbicos de gas natural o a aproximadamente 1,900 millones de barriles de petróleo tipo *Arabian Light*.

Con la capacidad instalada actual de 164 MWt el valor medio de las reservas estimadas duraría 15,700 años. Esta energía es recuperable con la tecnología actual. Por ello, las reservas geotérmicas estimadas en este trabajo tienen el potencial de producir un impacto positivo e importante en las economías locales.

Sumario y conclusiones

La presente es la primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja de la República Mexicana, estado por estado. La misma incluye 29.16% de las manifestaciones geotérmicas superficiales registradas, porque la información disponible para el resto no cumplía con los requisitos necesarios para obtener estimaciones de calidad. Encontramos que las 276 localidades geotérmicas evaluadas se encuentran repartidas en 20 estados de la República. Para cada uno de dichos estados hemos estimado intervalos de 90% de confianza de sus correspondientes reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja, valores medios y otros estadísticos relevantes. Investigamos la dependencia de la media de la distribución de *reservas* geotérmicas en el Estado y el número de localidades geotérmicas incluidas en cada

estimación y concluimos que el porcentaje de localidades geotérmicas conocidas incluidas en la estimación provee una medida de la significancia de la estimación de las reservas de dicho estado.

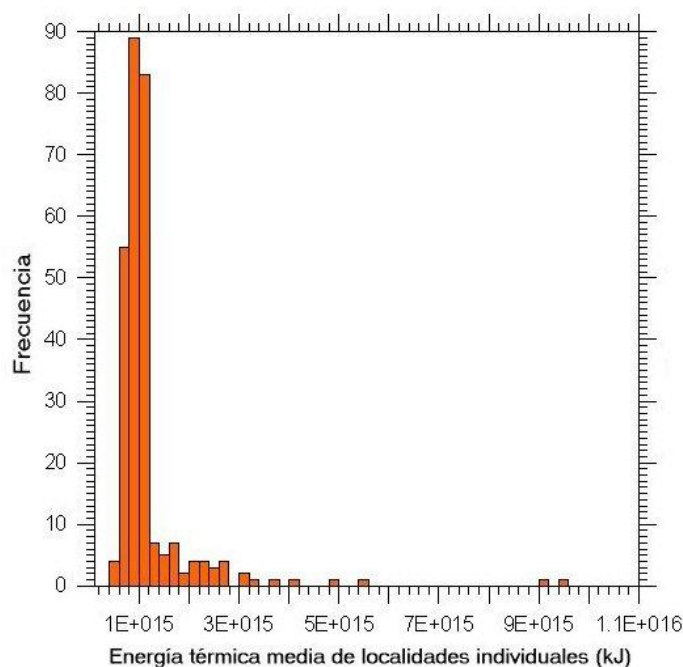


Fig. 25. Distribución de la media de energía térmica para las 276 localidades geotérmicas.

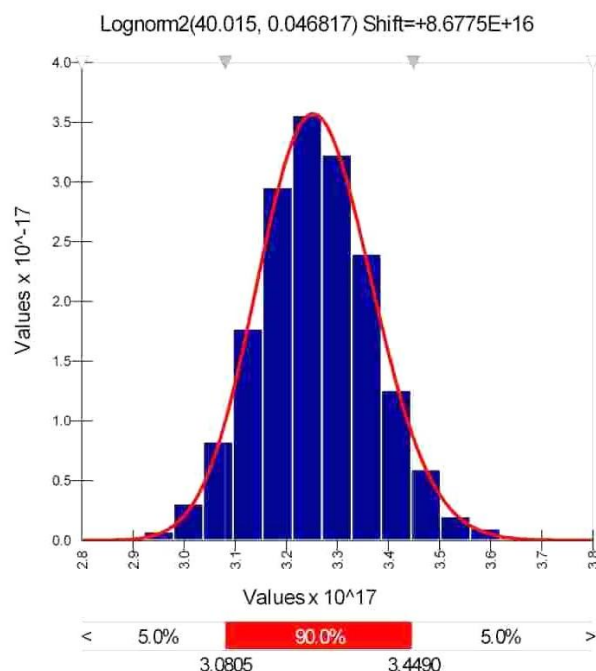


Fig. 26. Distribución de la energía térmica total para las 276 localidades geotérmicas.

Encontramos que las reservas térmicas agregadas de las 276 localidades geotérmicas estudiadas se encuentran entre 7.7×10^{16} y 8.6×10^{16} kJ (2.14×10^{10} a 2.39×10^{10} MW_t), con 90% de confianza, con una media igual a 8.15×10^{16} kJ (2.26×10^{10} MW_t) y una desviación estándar igual a 0.28×10^{16} kJ (7.78×10^8 MW_t). La energía térmica total correspondiente a dichas reservas, estimada con 90% de confianza, está entre 3.08×10^{17} y 3.45×10^{17} kJ (8.56×10^{10} a 9.58×10^{10} MW_t). Los estadísticos principales de la distribución son: media = 3.26×10^{17} kJ (9.06×10^{10} MW_t), desviación estándar = 1.12×10^{16} kJ (3.11×10^9 MW_t).

Aunque constituyen un límite inferior, las reservas estimadas en este trabajo contienen cantidades masivas de energía térmica, que son recuperables con la tecnología actual. De acuerdo con la distribución inferida de las temperaturas más probables, estas reservas podrían ser utilizadas en una amplia gama de aplicaciones directas, y las de mayor temperatura, en generación eléctrica. Por ello, las reservas geotérmicas estimadas en este trabajo tienen el potencial de producir un impacto positivo e importante en las economías locales.

Referencias

Armstead, H.C.H., and J.W. Tester, 1978. *Heat Mining*. E. & F.N. Spon Ltd., London.

@RISK, 2001. *Advanced Risk Analysis for Spreadsheets*, ver. 4. Palisades Corporation, Newfield, NY, USA, www.palisade.com.

Bodvarsson, G., 1974. Geothermal resource energetics. *Geothermics* 3, 83-92.

- Brook, C.A., R.H. Mariner, D.R. Mabey, J.R. Swanson, M. Guffanti, and L.J.P. Muffler, 1978. In: *Assessment of geothermal resources of the United States – 1978*, Circular 790 (Ed. L.J.P. Muffler), U.S. Geological Survey, 1978, p.18.
- Grant, M. A., I.G. Donaldson, P.F. Bixley, 1982. *Geothermal Reservoir Engineering*, Academic Press, p. 61.
- Gutiérrez-Negrín, Luis C.A., 2007. Commissioning of Unit 8 at Los Humeros. *IGA News No. 70*, October-December 2007, pp. 7-8.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A. and J.L. Quijano-León, 2005. Update of geothermics in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005, paper 0102.
- Muffler, L.J.P., and R. Cataldi, 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* 7, 53-89.
- Natheson, M., 1975. *U.S. Geological Survey Open-File Report 75-525*. U.S. Geological Survey.
- Natheson, M., 1978. *U.S. Geological Survey Open-File Report 78-1003*. U.S. Geological Survey.
- Natheson, M., and L.J.P. Muffler, 1975. In: *U.S. Geological Survey Circular 726* (Eds. D.E. White and D.L. Williams), U.S. Geological Survey, p. 104.
- Torres-Rodríguez, V., S. Venegas-Salgado, J.J. Herrera-Franco, y E. González-Partida, 1993. En: *Geotermia en México*. (Ed. Vicente Torres-Rodríguez), Universidad Nacional Autónoma de México, p. 32.