

Potencial Teórico SGM en los Afloramientos del Basamento en México

E.R. Iglesias¹, R.J. Torres¹, J.I. Martínez-Estrella¹, R. Lira-Argüello², A. Paredes-Soberanes¹, N. Reyes-Picasso¹, R.M. Prol³, O.M. Espinoza-Ojeda⁴, S. López-Blanco¹ e I. González-Reyes¹

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, Morelos. ²IIE, Gerencia de Energías Renovables. ³UNAM, Instituto de Geofísica, México, DF. ⁴UMSNH, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Morelia, Mich. Correo: iglesias@ie.org.mx

RESUMEN

En el marco del proyecto CeMIE-Geo P07 “Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México”, hemos estimado el Potencial Teórico de los afloramientos del basamento cristalino en México. La metodología utilizada en este proyecto es la descrita en “A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential” (Beardsmore et al., 2010). El Potencial Teórico se define como “la energía físicamente utilizable disponible durante cierto período en una región dada”. Está definido solamente por los límites físicos de su uso y constituye el límite superior de la energía teóricamente obtenible en el período y región dados. Sólo una fracción del Potencial Teórico será accesible y extraíble, lo que representará un Recurso Geotérmico como se define en los Códigos de Reporte públicos. En este artículo presentamos la distribución geográfica del basamento que aflora en la parte continental de México, así como su tipo de roca, en una malla con celdas de 5'x5' (latitud y longitud) de lado, como requiere el protocolo. La estimación incluye 2,785 celdas y un intervalo de profundidad de 3 a 10 km. La estimación descansa sobre las siguientes hipótesis: (i) todo el calor con temperatura mayor que la temperatura base (T de superficie + 80°C) es teóricamente recuperable en todas las localizaciones; (ii) el período de generación es de 30 años; (iii) la eficiencia térmica del ciclo es una función de la temperatura del recurso, según la tabulación del Protocolo. El Potencial Teórico estimado para los afloramientos del basamento cristalino en la porción continental de México asciende a 17,894,409.28 MWe. Los seis estados con mayor potencial en sus afloramientos de basamento son: Oaxaca (4,821,469.56 MWe), Guerrero (2,851,275.90 MWe), Baja California (2,735,239.59 MWe), Sonora (1,572,280.26 MWe), Jalisco (1,117,772.67 MWe) y Chiapas (1,007,850.21 MWe). Se presenta una tabla que incluye los potenciales de todos los estados y para nueve de ellos se estima un Potencial Teórico nulo, debido a la inexistencia de basamento que aflore. Se incluyen también mapas que presentan la distribución geográfica del Potencial Teórico discriminado por los siete niveles de profundidad, cada uno de 1 km de espesor, que se consideraron en la estimación, de acuerdo al Protocolo. Considerando que el área de basamento que aflora constituye sólo 10.67% del área total continental de México, se infiere que el Potencial Teórico de todo el territorio continental es mucho mayor que 17,894,409.28 MWe.

Palabras Clave: Sistemas Geotérmicos Mejorados, EGS, Potencial Teórico, basamento cristalino, protocolo, Recurso Geotérmico.

EGS Theoretical Potential of basement outcroppings in Mexico

ABSTRACT

Within the scope of the Project CeMIE-Geo P07 “Estimation of the power generation potential of the Enhanced Geothermal Systems (EGS) in Mexico”, we have estimated the Theoretical Potential of the crystalline basement outcrops in Mexico. We used the methodology described in “A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential” (Beardsmore et al., 2010). In it, the Theoretical

Potential is defined as “an estimate of the physically usable energy supply over a certain time span in a given region”. It is defined solely by the physical limits of use and thus marks the upper limit of the theoretically realizable energy supply contribution”. Only a portion of the Theoretical Potential will be accessible and extractable and represent a Geothermal Resource as defined by public Reporting Codes. Here we present the geographical distribution of the outcropping basement in continental Mexico and its rock type, on a grid of 5'x5' cells (latitude, longitude), as required by the Protocol. The estimation includes 2,785 cells and a depth interval of 3 to 10 km. The estimation is derived using the following assumptions: (i) all the heat above the base temperature (surface T + 80°C) is theoretically recoverable in all locations; (ii) 30 years life span of power generation; (iii) the cycle thermal efficiency is a function of resource temperature as per the tabulation recommended by the Protocol. The Theoretical Potential estimated for the outcropping basement in continental Mexico is 17,894,409.28 MWe. The six states with greater potential, in decreasing order are Oaxaca (4,821,469.56 MWe), Guerrero (2,851,275.90 MWe), Baja California (2,735,239.59 MWe), Sonora (1,572,280.26 MWe), Jalisco (1,117,772.67 MWe) and Chiapas (1,007,850.21 MWe). We present a table with the estimated Theoretical Potential of all the Mexican states; for nine of them potential is zero because of lack of outcropping basement. Furthermore, we present maps of the geographical distribution of Theoretical Potential for seven depth levels (3 to 10 km), each 1 km thick, as required by the Protocol. Considering that the area of the outcropping basement amounts to only 10.67% of the Mexican continental area one concludes that the Theoretical Potential of continental Mexico is significantly greater than 17,894,409.28 MWe.

Key words: Enhanced Geothermal Systems, EGS, Theoretical Potential, crystalline basement, Protocol, Geothermal Resource.

Antecedentes

Este artículo presenta un resultado parcial del proyecto P07 del CeMIE-Geo “Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México”. La metodología utilizada en este proyecto es la descrita en el Protocolo de Beardsmore et al. (2010).

Una meta importante del Protocolo es la estimación del Potencial Teórico del área estudiada. El Potencial Teórico se define como “la energía físicamente utilizable disponible durante cierto período en una región dada”. Está definido solamente por los límites físicos de su uso y constituye el límite superior de la energía teóricamente obtenible en el período y región dados. Sólo una fracción del Potencial Teórico será accesible y extraíble, lo que representará un Recurso Geotérmico como se define en los Códigos de Reporte públicos.

De acuerdo con el Protocolo, la superficie de nuestro modelo está dividida en celdas de 5'x5' (latitud, longitud); debajo de cada celda contiene 10 bloques de 1 km de espesor cada uno, por lo que la profundidad del modelo es de 10 km. El número total de celdas asciende a 26,315; correspondientemente el número total de bloques es igual a 263,150 (Iglesias et al., 2015).

La estimación del Potencial Teórico del territorio continental de México requiere, en primer lugar, asignar datos geográficos, litológicos, volumen y propiedades físicas a cada uno de los bloques mencionados. Posteriormente, es necesario estimar el flujo de calor, la temperatura, la energía térmica y el Potencial Teórico de cada bloque.

En este trabajo aprovechamos la oportunidad que ofrece el basamento que aflora en aproximadamente el 10% de la superficie del territorio continental. El número de bloques y la complejidad litológica a considerar para estimar su Potencial Teórico se reduce en gran medida, en relación con lo necesario para estimar dicho potencial para el área continental de la República. Los resultados permiten adelantar resultados parciales pero instructivos para la meta mencionada.

Método

Sucintamente, el protocolo adopta un modelo simple de dos capas en el que los sedimentos sobrepasan al basamento y el transporte de calor es vertical; la profundidad del modelo es 10 km. En la base del modelo ingresa el flujo térmico proveniente del manto, el calor fluye verticalmente en el basamento, mediado por su conductividad térmica K_B (W/mK); adicionalmente las rocas del basamento generan calor por decaimiento de elementos radioactivos, cuantificado por A_B (W/m³), incrementando el flujo térmico; eventualmente el flujo térmico del basamento Q_B (W/m²) alcanza la interfaz con el sedimento, donde se repite el proceso de conducción mediado por K_S (W/mK) y generación de calor cuantificado por A_S (W/m³). Finalmente el flujo térmico local Q_o (W/m²) emerge en la superficie.

La resolución espacial del modelo se define dividiendo el área estudiada (en nuestro caso la parte continental de México) con una malla de 5'x5'; debajo de cada una de estas celdas se definen diez bloques de 1 km de profundidad cada uno. Es necesario determinar o estimar el tipo y propiedades físicas de las rocas en esta malla 3D para poder estimar las distribuciones verticales de temperatura, flujo de calor y energía térmica en cada elemento del modelo.

Adicionalmente, es necesario determinar o estimar la distribución superficial del flujo térmico en la superficie continental de México, que constituye la base de los cálculos que se utilizan para estimar el flujo térmico y la temperatura y energía térmica a profundidad en el modelo. También es necesario desarrollar un mapa de la temperatura media anual de la superficie, que se utilizará como referencia para los cálculos de energía térmica, y superponerlo con la malla de 5'x5'. Además, es necesario desarrollar un mapa topográfico con la resolución espacial de la malla de 5'x5', que constituye la referencia para medir profundidades para el modelo.

Naturalmente, en este trabajo sólo se considera el flujo térmico a través del basamento que aflora. Por ello se simplifican considerablemente las estimaciones de las distribuciones verticales de temperatura, flujo de calor y energía térmica en cada elemento del modelo, en el área estudiada.

Datos

La distribución territorial del basamento aflorante, así como los correspondientes tipos de roca se obtuvieron de INEGI (2002). Sobrepusimos dicha información sobre la malla de 5'x5', como se presenta en la Figura 1 (todas las figuras al final del texto); esto resultó en 2,785 celdas correspondientes únicamente al basamento que aflora. Las propiedades físicas de dichos tipos de roca se tomaron de la base de datos compilada en el proyecto (Iglesias et al., 2015).

El mapa de temperatura media anual con resolución de 5'x5' y topografía (Iglesias et al., 2015) se presenta en la Figura 2.

El mapa de flujo térmico en la superficie Q_o (W/m²), con resolución de 5'x5' para el basamento que aflora en la zona continental de México se desarrolló especialmente para este trabajo. En ArcGIS se

superpuso el mapa con 2,785 celdas del basamento aflorante con el mapa de flujo térmico medido y extrapolado como se indica en el Protocolo (Iglesias et al., 2015). Esto proporcionó datos de Q_0 para una fracción del basamento que aflora, debido a que no cubre todo el basamento observado en superficie. El flujo térmico para el resto de las celdas de basamento que aflora se estimó, como sugiere el Protocolo, mediante la ecuación (1):

$$Q_0 = 0.032 + b A_B, \quad (1)$$

donde b (m) es el espesor del basamento (igual a 10,000 m en este caso) y A_B (W/m^3) es la generación de calor del basamento debido a la desintegración de isótopos radioactivos en la roca, correspondiente al tipo de roca de que se trate. El mapa de Q_0 para el basamento que aflora se presenta en la Figura 3.

Estimación del Potencial Teórico

Siguiendo el Protocolo, la estimación del Potencial Teórico se hace con la resolución de 5'x5', partiendo de la temperatura media anual en la superficie T_0 ($^{\circ}\text{C}$) (Fig. 2) y del flujo térmico en la superficie Q_0 (W/m^2) (Fig. 3).

El primer paso es estimar la temperatura a profundidad X que representa la temperatura media inicial del bloque, mediante

$$T_X = T_0 + (Q_0 X / K_B) - A_B (X^2 / 2 K_B), \quad (2)$$

donde K_B ($\text{W}/(\text{mK})$) es la conductividad térmica del basamento y A_B (W/m^3) se definió previamente; en esta aproximación se asume que los valores de dichas propiedades no varían con la profundidad y son iguales a las del tipo de roca de basamento que aflora en la celda correspondiente (Fig. 1). Este cálculo se efectuó para las 2,785 celdas correspondientes al basamento aflorante. Siguiendo el Protocolo, se efectuaron los cálculos para las profundidades de 3,500, 4,500, 5,500, 6,500, 7,500, 8,500, y 9,500 m.

El segundo paso es estimar la energía térmica contenida en cada bloque de 5'x5' x 1,000 m. Para ello fue necesario calcular V_c (m^3), que es el volumen de cada uno de los 27,850 bloques mediante las herramientas provistas por el Sistema de Información Geográfica codificado en el software ArcGIS que utilizamos y Excel (nótese que el área de las celdas y consecuentemente el volumen de los correspondientes bloques disminuye al incrementarse la latitud). También fue necesario asignar a cada bloque valores de densidad ρ (kg/m^3) y capacidad calorífica específica C_p ($\text{J}/(\text{kgK})$); los valores de dichas variables se extrajeron de la base de datos compilada en el proyecto (Iglesias et al., 2015). La energía térmica de cada bloque H (exajoules EJ) se estimó mediante

$$H = 10^{-18} \rho C_p V_c (T_X - T_r). \quad (3)$$

En la ecuación (2) T_X es la temperatura media inicial del bloque y T_r ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura a la que se puede reducir teóricamente la del bloque mediante la utilización de la energía térmica (temperatura de rechazo). El Protocolo asume $T_r = T_0 + 80^{\circ}\text{C}$.

Para estimar el Potencial Teórico, el Protocolo asume lo siguiente: (1) todo el calor (H) con temperatura mayor que T_r es teóricamente recuperable en todas las locaciones; (2) la vida económica de la generación eléctrica es de 30 años (9.46×10^8 s); (3) la eficiencia térmica del ciclo, η_{th} , es una

función de la temperatura del recurso, como se presenta en la Tabla 3.1, páginas 3-13 de MIT (2006). Los mismos autores derivaron la siguiente ecuación:

$$\eta_{th} = 0.00052 T + 0.032. \quad (4)$$

El Protocolo recomienda utilizar dicha ecuación, con la salvedad de utilizar para T la temperatura media entre la inicial del fluido y la de rechazo:

$$T = (T_x + T_0 + 80^\circ\text{C}) / 2. \quad (5)$$

El potencial teórico de generación P (MW_e) para un bloque de 1,000 m de espesor con una energía térmica H es entonces:

$$P = 10^{12} H \eta_{th} / 9.46 \cdot 10^8. \quad (6)$$

Resultados y discusión

El Potencial Teórico de generación obtenido se tabuló para todo el basamento aflorante en la parte continental de México, por estado y por nivel de profundidad. El potencial de cada estado se estimó sumando el potencial de los niveles en el mismo. El potencial de la República Mexicana se obtuvo sumando los potenciales de los estados. Los resultados por estado se presentan en la Tabla 1.

Nótese que en dicha tabla no aparecen los estados de Campeche, Morelos, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tlaxcala, Yucatán y la actual Ciudad de México, debido a que en ellos no hay afloramientos del basamento.

Un resultado importante (Tabla 1) es que el Potencial Teórico combinado de todos los Estados en los que sí aflora el basamento asciende a 17,894,409 MWe. Como se mencionó, sólo en aproximadamente el 10% de la superficie del territorio continental mexicano hay afloramientos del basamento, por lo que se infiere que el Potencial Teórico de territorio total es mucho mayor que el estimado para el basamento aflorante.

La Tabla 1 indica también que los estados con mayor Potencial Teórico en el basamento aflorante son, en orden decreciente, Oaxaca, Guerrero, Baja California, Sonora, Jalisco y Chiapas, que conjuntamente representan casi 79% del total. Por conveniencia, la Tabla 1 consigna el porcentaje acumulado de Potencial Teórico por estado.

El Potencial Teórico por unidad de área de basamento que aflora en el estado se presenta en la última columna de la Tabla 1. El promedio por Estado es igual a 74.446 MWe/km² con una desviación estándar igual a 16.750 MWe/km².

En las Figuras 4 a 10 se presentan las distribuciones geográficas del Potencial Teórico estimado por nivel de profundidad y los correspondientes valores agregados. En esas figuras se constatan incrementos significativos del Potencial Teórico con el incremento de profundidad del nivel, tanto local como regionalmente, tal como era de suponer. En el nivel de 5 a 6 km de profundidad, que coincide aproximadamente con las profundidades de Sistemas Geotérmicos Mejorados que se han desarrollado total o parcialmente a la fecha, como el de Soultz-sous-Forêts (Francia) y Habanero (Australia), se revelan enormes áreas con Potencial Teórico de hasta 1,000 MWe por celda, grandes áreas en Oaxaca y Guerrero con Potencial Teórico de 2,000 a 3,000 MWe por celda, y algunos sitios

aislados en Baja California, Jalisco y Sinaloa con Potencial Teórico de entre 3,000 y 6,000 MWe por celda. Desde luego, debe recordarse que sólo una fracción de ese Potencial Teórico será accesible y extraíble.

Tabla 1. Potencial Teórico del basamento aflorante total en la República Mexicana, y por estado.

Estados	No. de celdas del basamento	Potencial Teórico (MWe)	Potencial Teórico acumulado (%)	Área de las celdas del basamento (m ²)	Número de celdas por estado	Potencial Teórico unitario (MWe/km ²)
República Mexicana	2,785	17,894,409.28	100.00	2.0880E+11	26,315	85.700
Oaxaca	568	4,821,469.56	26.94	4.5431E+10	1,181	106.127
Guerrero	389	2,851,275.90	42.88	3.0817E+10	805	92.524
Baja California	506	2,735,239.59	58.16	3.5142E+10	1,156	77.834
Sonora	290	1,572,280.26	66.95	2.0264E+10	2,567	77.589
Jalisco	191	1,117,772.67	73.20	1.4421E+10	994	77.508
Chiapas	170	1,007,850.21	78.83	1.3898E+10	959	72.516
Sinaloa	159	965,380.77	84.22	1.2084E+10	782	79.892
Michoacán	117	680,739.31	88.03	9.1712E+09	744	74.226
Baja California Sur	127	506,428.23	90.86	6.9699E+09	1,147	72.660
México	45	406,343.67	93.13	3.6311E+09	278	111.906
Puebla	62	344,994.98	95.06	5.0251E+09	427	68.655
Durango	28	216,569.97	96.27	2.1503E+09	1,593	100.716
Chihuahua	38	216,562.16	97.48	2.6018E+09	3,342	83.236
Colima	25	123,557.27	98.17	1.8246E+09	92	67.719
Zacatecas	16	82,572.86	98.63	1.2456E+09	963	66.290
Tamaulipas	18	62,590.44	98.98	1.3996E+09	1,075	44.720
Coahuila	11	60,590.78	99.32	8.2924E+08	2,024	73.068
Guanajuato	9	48,976.84	99.59	7.1210E+08	383	68.778
Nayarit	8	39,053.43	99.81	5.5892E+08	384	69.873
Nuevo León	3	11,825.16	99.88	2.2832E+08	840	51.792
Aguascalientes	2	9,341.85	99.93	1.5699E+08	70	59.505
Veracruz	2	7,605.04	99.97	1.6104E+08	938	47.226
Hidalgo	1	5,388.34	100.00	7.9359E+07	258	67.898

Sumario y conclusiones

En el marco del proyecto P07 del CeMIE-Geo “Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México”, hemos estimado el Potencial Teórico de los afloramientos del basamento cristalino en México.

El Potencial Teórico combinado de todos los estados en los que aflora el basamento asciende a 17,894,409 MWe.

El basamento aflora en el 10% aproximadamente de la superficie del territorio continental mexicano, por lo que se infiere que el Potencial Teórico de dicho territorio es mucho mayor que el estimado para el basamento que aflora.

Los Estados con mayor Potencial Teórico en el basamento que aflora son, en orden decreciente, Oaxaca, Guerrero, Baja California, Sonora, Jalisco y Chiapas, que conjuntamente representan casi 79% del total. La Tabla 1 consigna el porcentaje acumulado de Potencial Teórico por Estado.

El promedio del Potencial Teórico por unidad de área de basamento aflorante por estado es igual a 74.446 MWe/km² con una desviación estándar igual a 16.750 MWe/km².

Los valores del Potencial Teórico estimados por nivel de profundidad se incrementan significativamente con la profundidad, como era de esperar, tanto local como regionalmente.

En el nivel de 5 a 6 km de profundidad, que coincide aproximadamente con las profundidades a las que se han desarrollado algunos de los Sistemas Geotérmicos Mejorados existentes, se revelan enormes áreas con Potencial Teórico de hasta 1,000 MWe por celda, grandes áreas en Oaxaca y Guerrero con Potencial Teórico de 2,000 a 3,000 MWe por celda, y algunos sitios aislados en Baja California, Jalisco y Sinaloa con Potencial Teórico de entre 3,000 y 6,000 MWe por celda.

Nuestras conclusiones permiten adelantar resultados parciales pero instructivos para la meta de estimar el Potencial Teórico de la fracción continental de la República Mexicana.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) y al CONACYT por su apoyo institucional y económico para realizar este trabajo.

Referencias

- Beardmore, G.R., L. Rybach, D. Blackwell y C. Brown, 2010. A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential. *Geothermal Resources Council Transactions*, vol. 34, pp. 301-312.
- Iglesias, E.R, J.I Martínez-Estrella, R.J. Torres, S. López Blanco, R. Lira-Argüello, N. Reyes Picasso, A. Paredes-Soberanes, I. González Reyes, M.F. Morales-Reyes, R.M. Prol-Ledesma, O.M. Espinoza-Ojeda, B. Román-Fernández, K. Romero-Santiago, V.N. Cedillo-Vallejo, J.E. Juárez-Hernández, 2015. Proyecto P07 - Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México – REPORTE ETAPA 2, Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, 124 pp.
- INEGI, 2002. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000 *Rocas.shp*, disponible en <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/infoescala.aspx>
- MIT (Massachusetts Institute of Technology), 2006. The Future of Geothermal Energy – Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century. MIT Press.

(Figuras en las páginas siguientes)

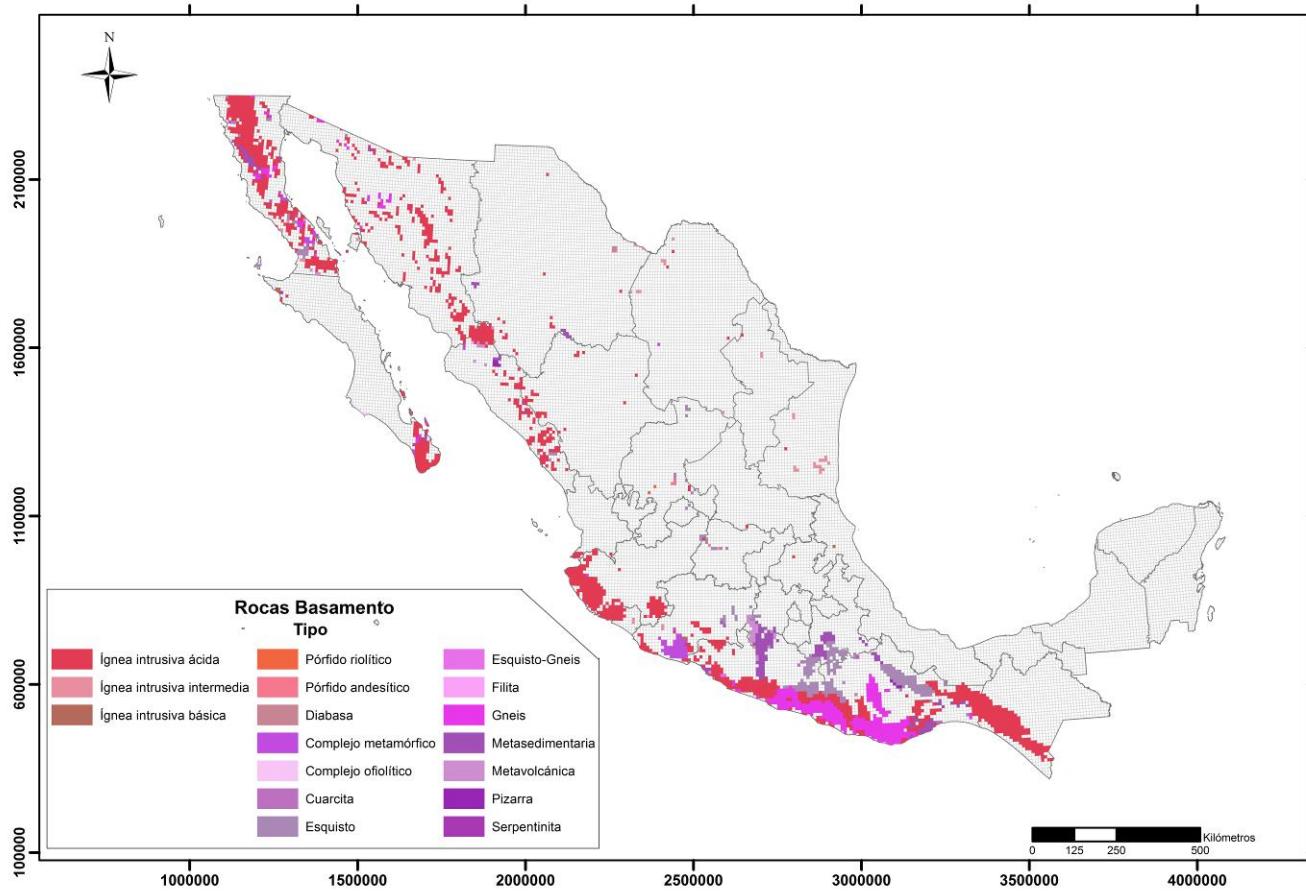


Fig. 1. Afloramientos del basamento por tipo de roca, con resolución de 5'x5'.

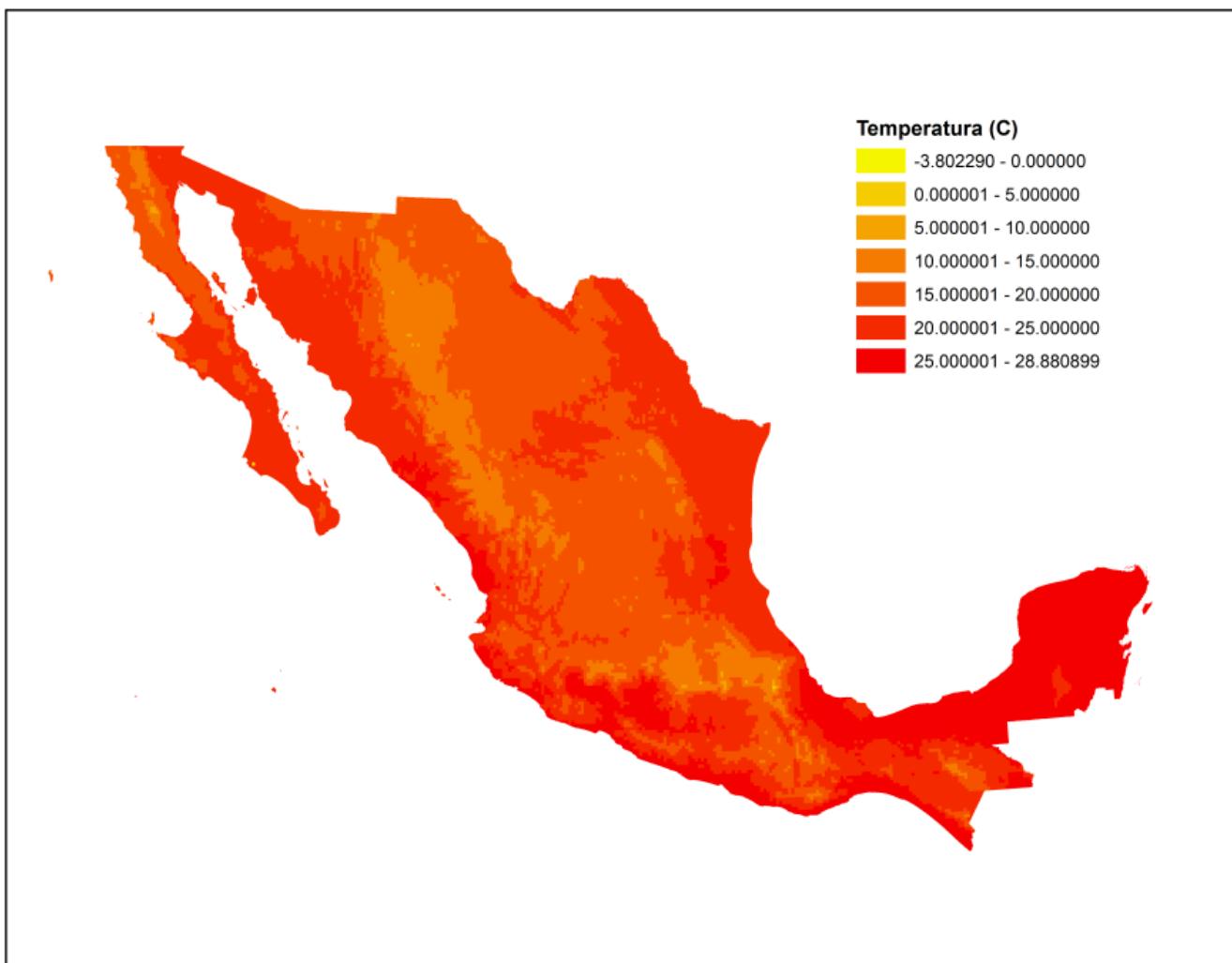


Fig. 2. Mapa de temperatura media anual con topografía y resolución de 5'x5'.

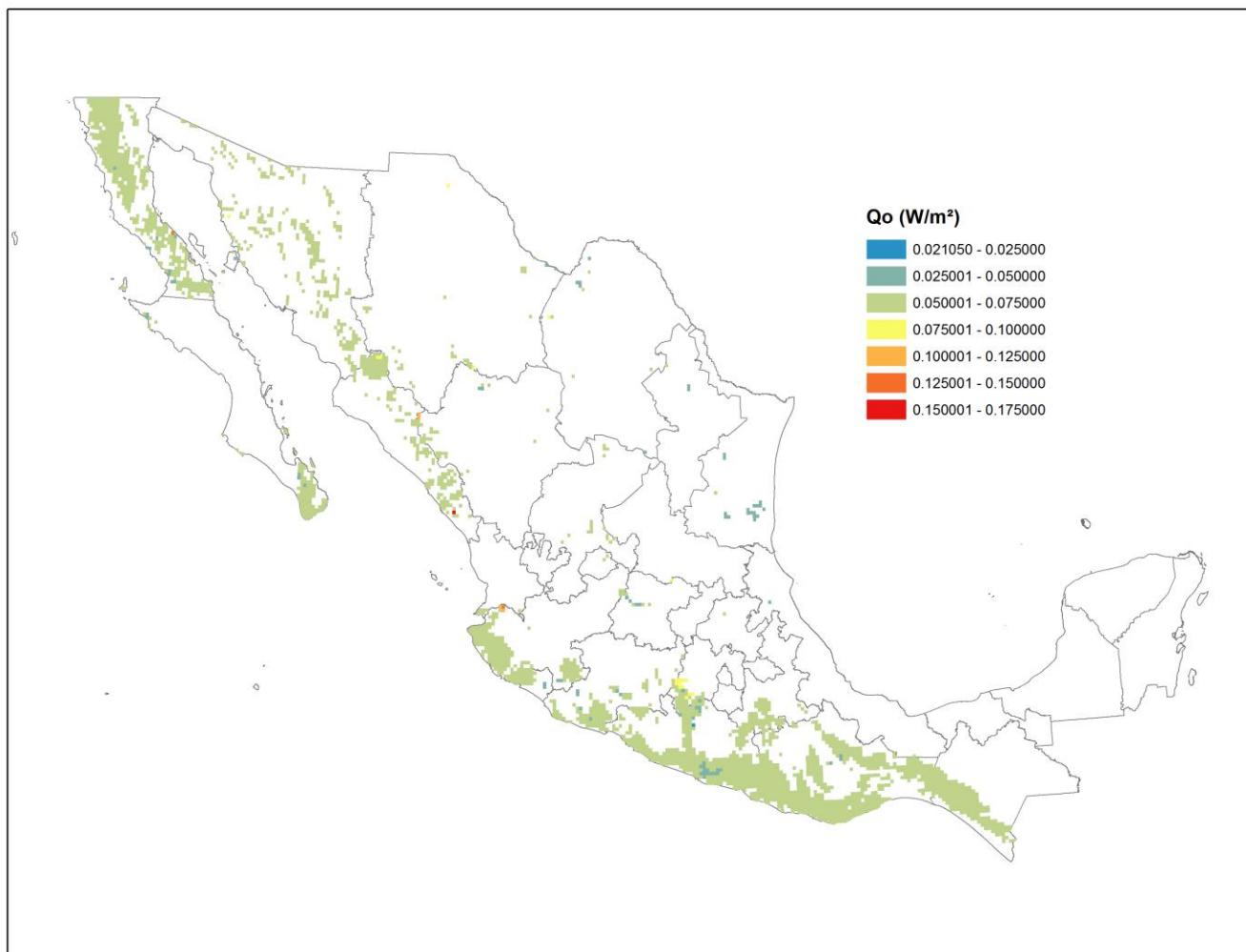


Fig. 3. Mapa de flujo térmico en la superficie Q_o (W/m²), con resolución de 5'x5'.

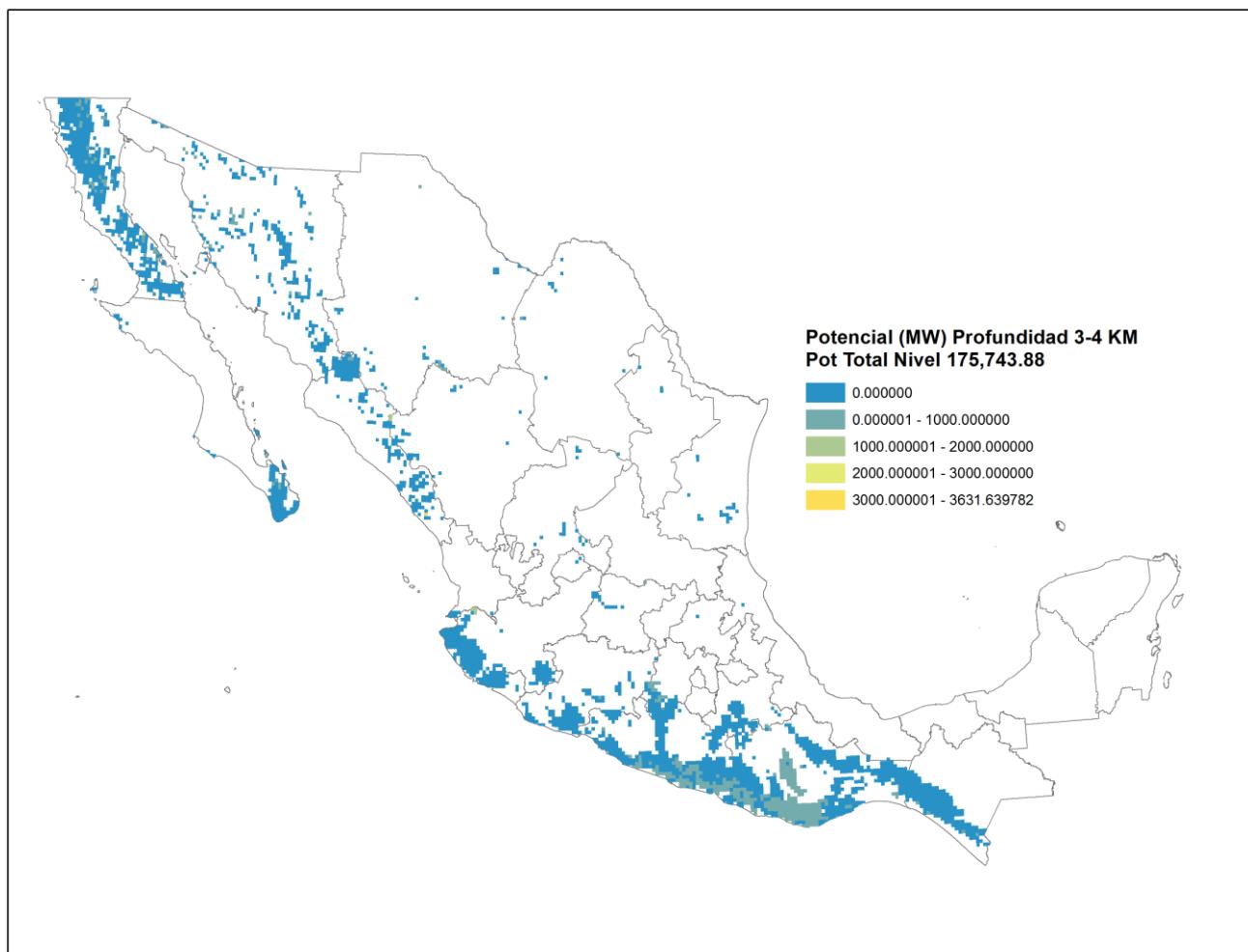


Fig. 4. Distribución geográfica del Potencial Teórico estimado para el nivel 3000-4000 m.

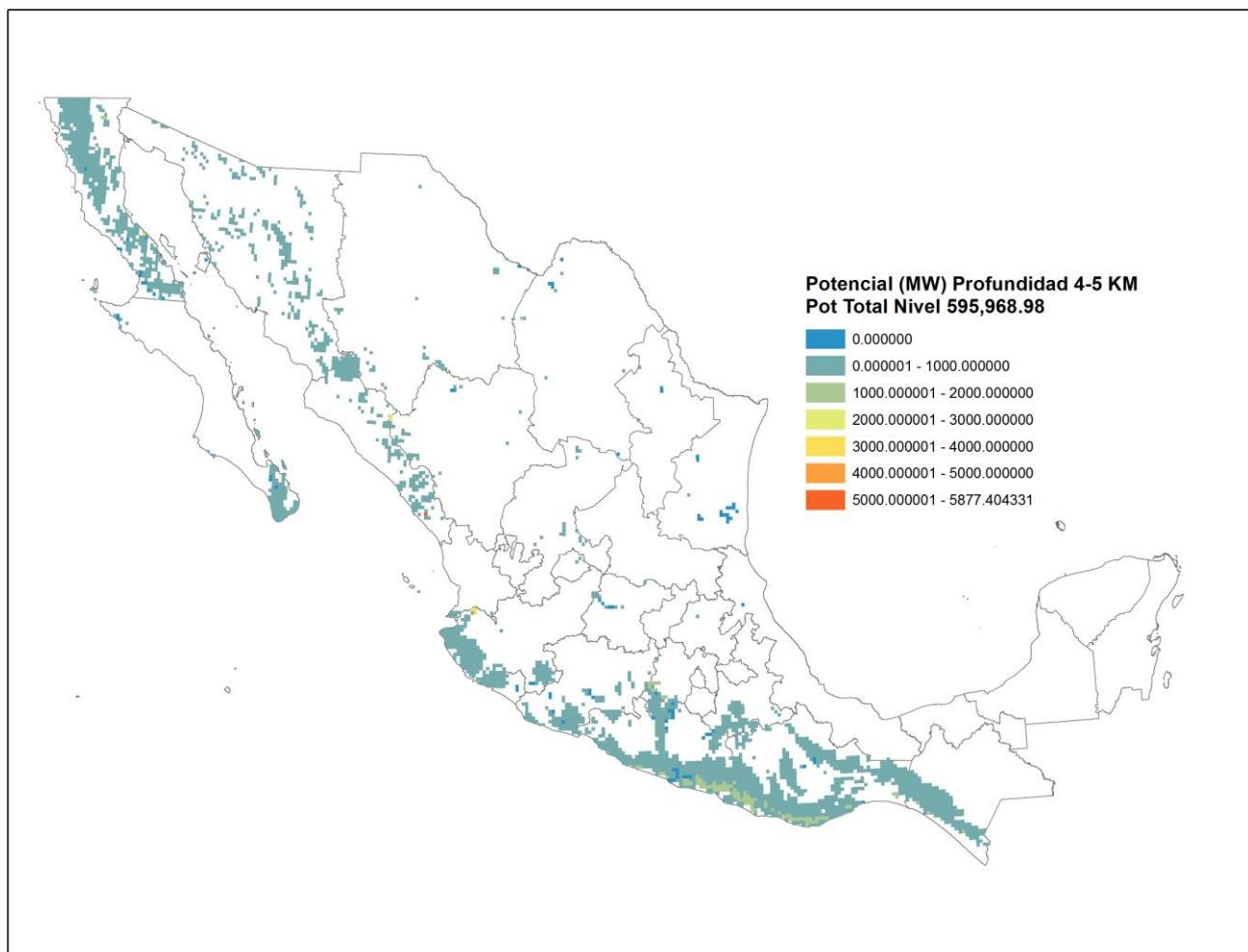


Fig. 5. Distribución geográfica del Potencial Teórico estimado para el nivel 4000-5000 m.

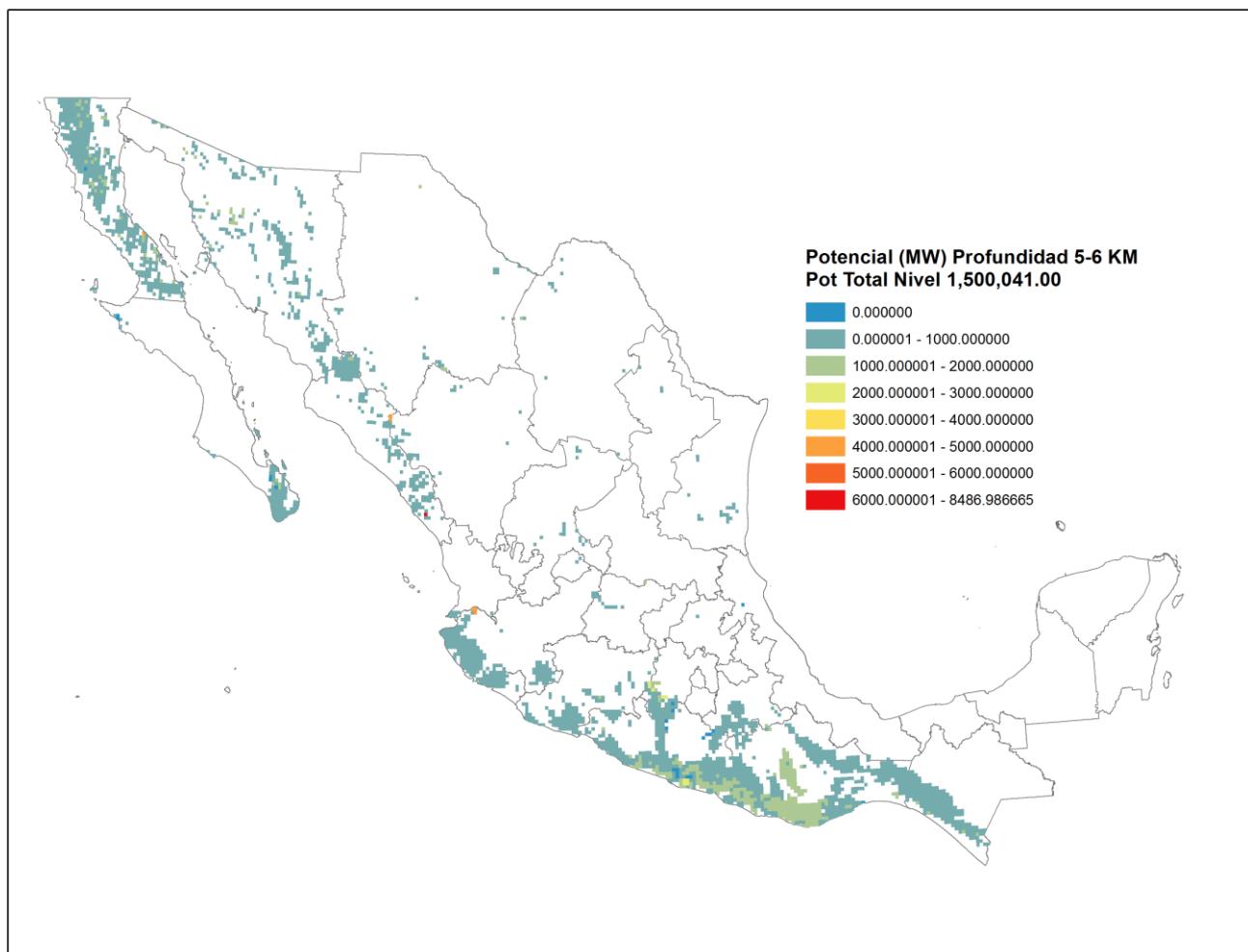


Fig. 6. Distribución geográfica del Potencial Teórico estimado para el nivel 5000-6000 m.

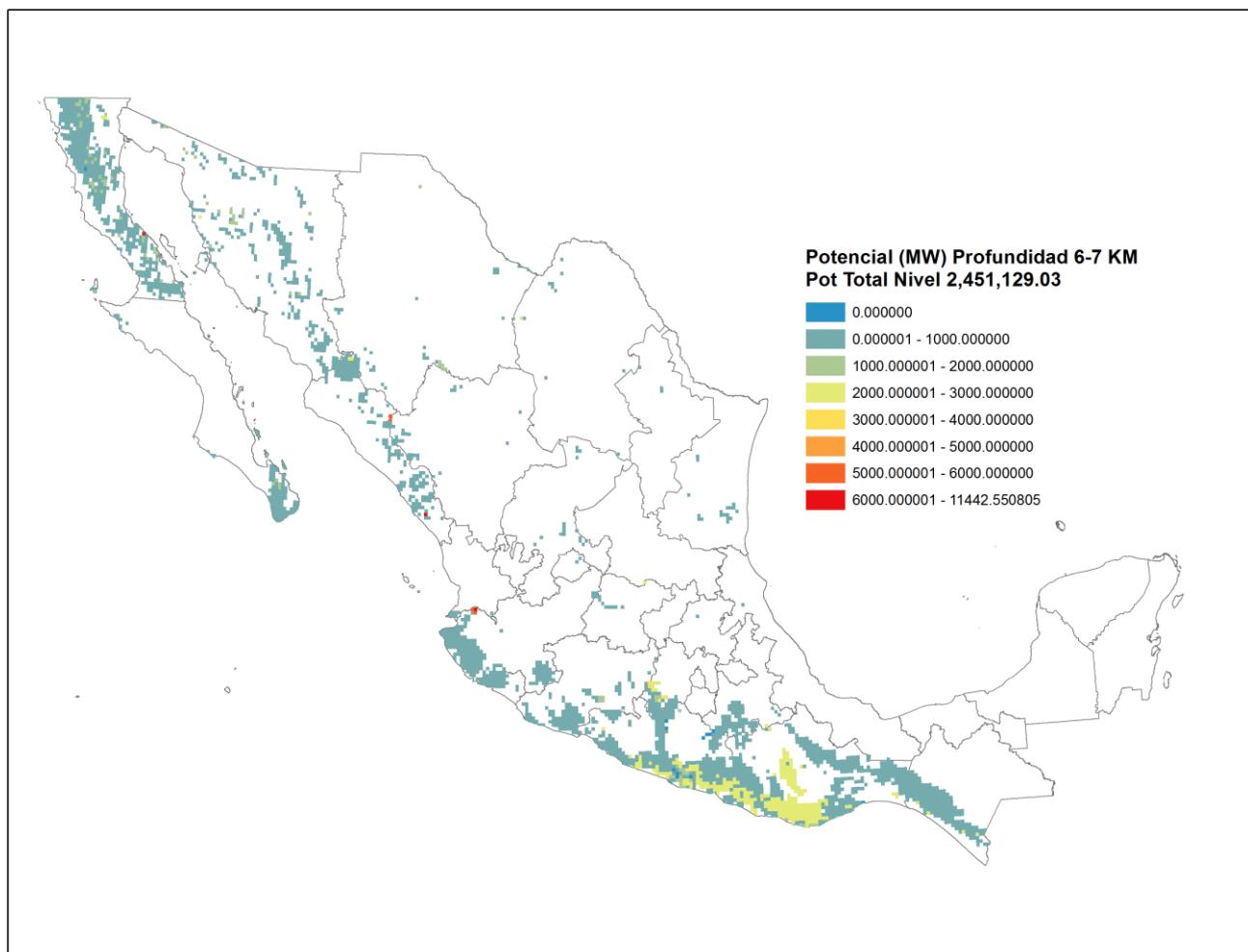


Fig. 7. Distribución geográfica del Potencial Teórico estimado para el nivel 6000-7000 m.

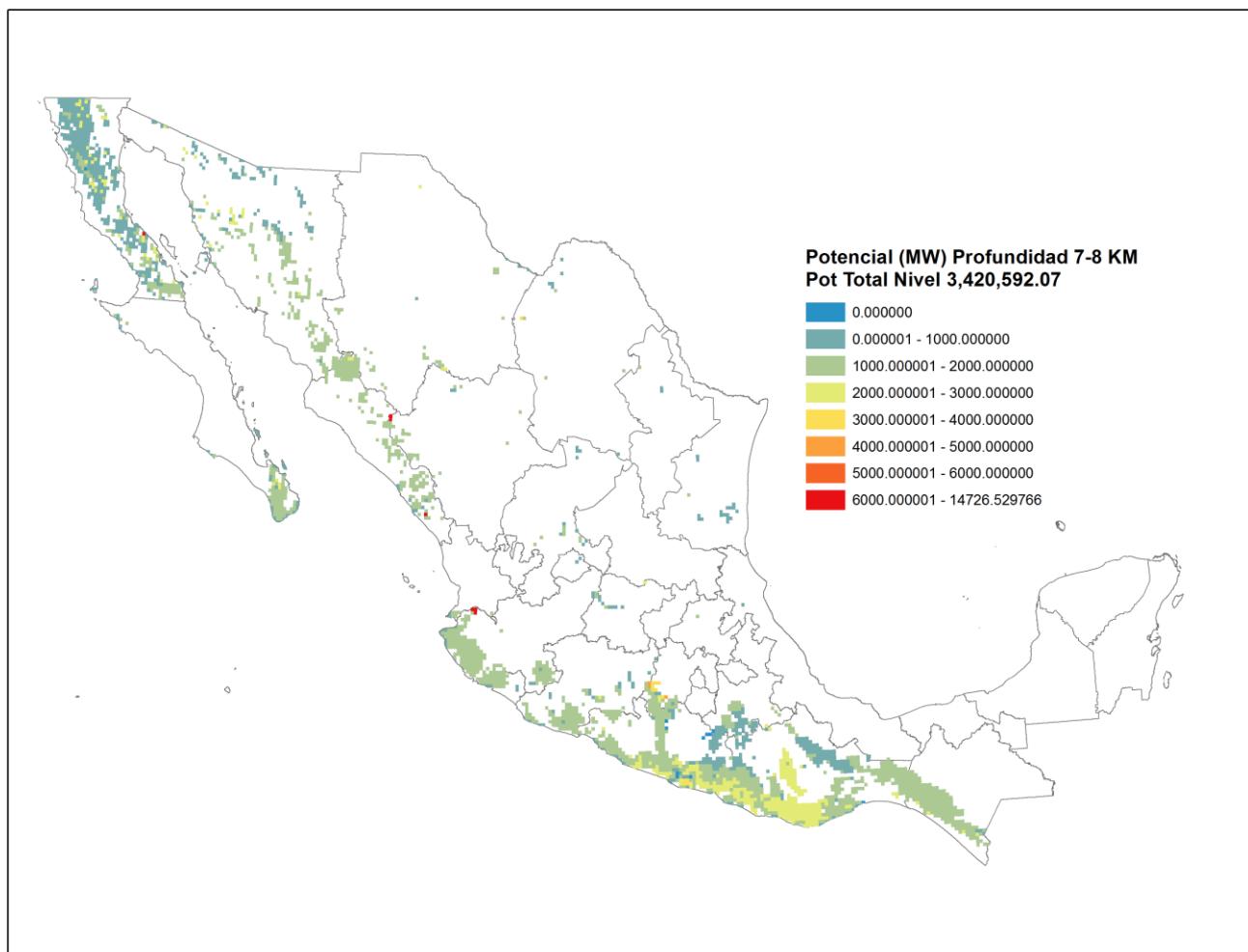


Fig. 8. Distribución geográfica del Potencial Teórico estimado para el nivel 7000-8000 m.

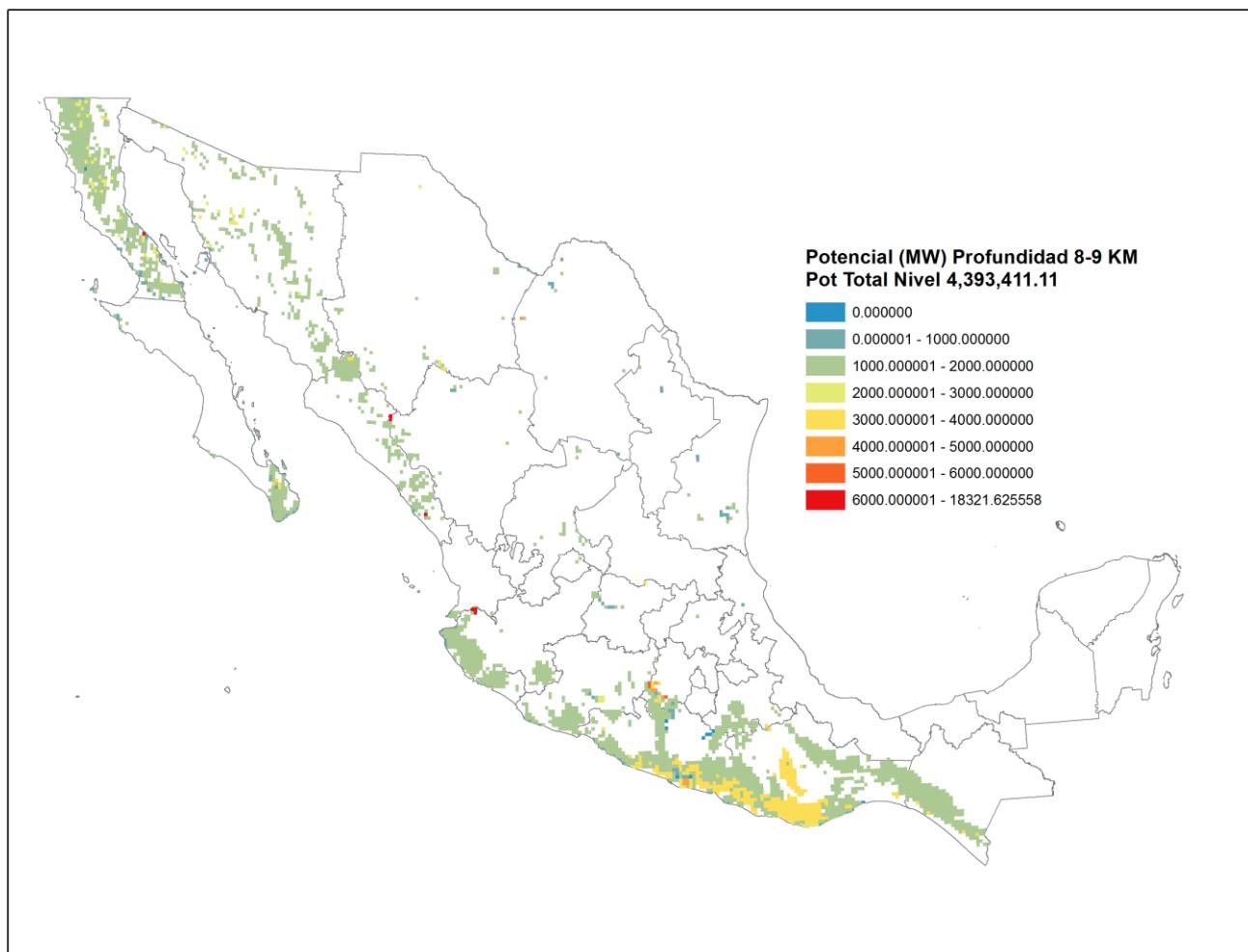


Fig. 9. Distribución geográfica del Potencial Teórico estimado para el nivel 8000-9000 m.

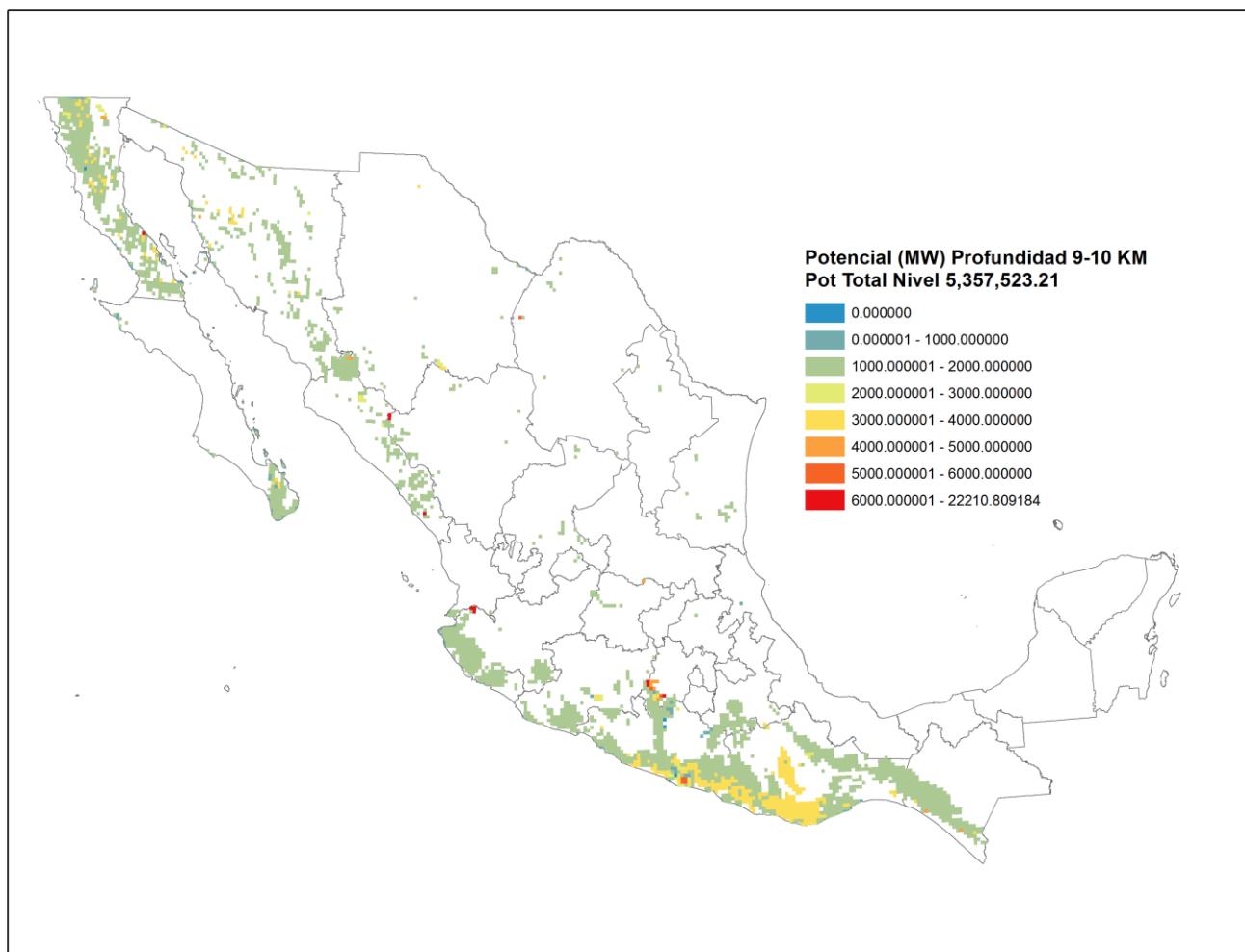


Fig. 10. Distribución geográfica del Potencial Teórico estimado para el nivel 9000-10000 m.