

## **Estimación preliminar del Potencial Teórico de los Sistemas Geotérmicos Mejorados en México**

**E.R. Iglesias<sup>1</sup>, S. López-Blanco<sup>1</sup>, J.I. Martínez-Estrella<sup>1</sup>, R.J. Torres<sup>1</sup>, A. Paredes-Soberanes<sup>1</sup>, N. Reyes-Picasso<sup>1</sup>, I. González-Reyes<sup>1</sup>, I. Romano-Vázquez<sup>1</sup>, R.M. Prol-Ledesma<sup>2</sup>, O.M. Espinoza-Ojeda<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Gerencia de Geotermia, INEEL, Cuernavaca, Morelos. <sup>2</sup>Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad de México. <sup>3</sup>Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH, Morelia, Michoacán. Correo: [siomara.lopez@iie.org.mx](mailto:siomara.lopez@iie.org.mx)

### **RESUMEN**

Como parte de los avances del proyecto P07 del CeMIE-Geo, presentamos en este trabajo una estimación preliminar del Potencial Teórico de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México. La metodología utilizada es la descrita por Beardsmore et al. (2010) en *A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential*. Primeramente, se desarrolló un modelo geológico 3D sedimento-basamento en bloques 5' x 5' x 1 km sobre toda el área continental de la república. Posteriormente, con base en la generación de calor y conductividad térmica de las rocas y en la estimación del flujo térmico en la superficie, se estimó la temperatura ( $T_x$ ) en el centroide de cada bloque del modelo, para cada intervalo de profundidad de 1 km entre 3 y 10 km de profundidad. A partir de estos resultados, se evaluó la energía térmica disponible (H) en cada uno de los 184,205 bloques en total. Para estimar el Potencial Teórico, el Protocolo asume que: (a) toda la energía térmica (H) con temperatura mayor que la temperatura base ( $T_r$ ) es teóricamente recuperable en todas las locaciones; (b) la vida económica de la generación eléctrica es de 30 años ( $9.46 \times 10^8$  s); y (c) la eficiencia térmica del ciclo ( $\eta_{th}$ ) es una función de la temperatura del recurso. El Potencial Teórico estimado para todo el territorio continental de México asciende a 12,816,678 GWe. Como referencia, la capacidad instalada del sistema eléctrico nacional en 2015 ascendía a 68 GWe. Claramente, el potencial SGM del país constituye un recurso gigantesco. De acuerdo con los resultados obtenidos, los estados con mayor Potencial Teórico SGM son, en orden decreciente, Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango, Tamaulipas, Campeche, Veracruz, Michoacán, Nuevo León, Zacatecas, Jalisco, Chiapas y San Luis Potosí, que conjuntamente representan casi 72% del total estimado.

**Palabras clave:** Sistemas Geotérmicos Mejorados, Potencial Teórico, República Mexicana, energía térmica.

## **Preliminary estimate of the Theoretical Potential for Enhanced Geothermal Systems in Mexico**

### **ABSTRACT**

As part of the results of the CeMIE-Geo's project P07, this work presents a preliminary estimate of the Theoretical Potential for Enhanced Geothermal Systems (EGS) in Mexico. The methodology used is described by Beardsmore et al. (2010) in their work *A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential*. Firstly, a 3D sediment-basement geological model was developed in 5' x 5' x 1 km blocks over all the continental areas in Mexico. Secondly, based on the heat generation and thermal conductivity of the rocks, as well as on the estimation of heat flow on the surface, the temperature ( $T_x$ ) was estimated in the centroid of each model block for each depth interval of 1 km between 3 and 10 km deep. With these results, the available thermal energy (H) in each of the total 184,205 blocks was evaluated. For the estimation of the Theoretical Potential, the Protocol assumes: (a) that the heat (H)

above the base temperature ( $T_r$ ) is theoretically recoverable in all locations; (b) a 30-year life span of power generation; and (c) that the cycle thermal efficiency ( $\eta_{th}$ ) is a function of the resource temperature. The Theoretical Potential estimated for the entire continental area of Mexico is 12,816,678 GWe. As a reference, the installed capacity of the national electrical system in 2015 was 68 GWe. Clearly, the EGS potential in Mexico represents a huge resource. According to our results, the states with the higher EGS Theoretical Potential are Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango, Tamaulipas, Campeche, Veracruz, Michoacán, Nuevo León, Zacatecas, Jalisco, Chiapas and San Luis Potosí in a decreasing order, which all together account for approximately 72% of the total potential.

**Key words:** Enhanced Geothermal Systems, Theoretical Potential, Mexican Republic, thermal energy.

## Introducción

La energía geotérmica es la energía térmica existente en la corteza terrestre. Las fuentes de calor son el núcleo y el manto terrestre, así como el decaimiento radiactivo de isótopos de U, Th y K en la corteza. Existen zonas en la corteza con intrusiones magmáticas relativamente recientes en las que el flujo y el gradiente térmico son significativamente mayores al gradiente térmico promedio ( $\sim 30^\circ\text{C}/\text{km}$ ). En estas zonas, relativamente escasas, se encuentran los sistemas hidrotermales de alta temperatura y permeabilidad; estos son los recursos geotérmicos que actualmente se explotan de forma convencional (hasta la elaboración de este artículo, la capacidad mundial instalada asciende a más 13 GWe; Richter, 2016). Fuera de estas zonas, y también en ellas, a profundidades típicamente mayores a 3 km, existen formaciones rocosas de baja permeabilidad, con temperaturas de interés para la generación eléctrica. A estos recursos se les denomina recursos de Roca Seca Caliente (RSC), cuya distribución geográfica es enormemente más amplia que la de los recursos geotérmicos hidrotermales (Iglesias, 2014).

Desde hace varias décadas se concibió y se fue perfeccionando la tecnología de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM; o EGS por sus siglas en inglés), con el fin de recuperar estos recursos para la generación eléctrica (Iglesias, 2014). Sin embargo, fue hasta 2010 que se propuso un protocolo para la estimación y mapeo del potencial de generación eléctrica de los SGM a nivel global (Beardmore et al., 2010).

El Protocolo establece dos tipos de potencial: el Teórico y el Técnico. 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. El Potencial Técnico, por su parte, describe la fracción del Potencial Teórico que puede ser extraído después de considerarse las limitaciones técnicas actuales (Beardmore et al., 2010; Rybach, 2010).

Este artículo presenta una estimación preliminar del Potencial Teórico de los SGM en México entre los 3 y los 10 km de profundidad. Los resultados obtenidos pertenecen al 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 propuesto por Beardmore et al. (2010).

## Antecedentes

El principal postulado del Protocolo es que el transporte de calor desde el manto hasta la corteza es dominado por la conducción vertical. El Protocolo asume además que para aproximar la geología desde la superficie hasta 10,000 m de profundidad en toda el área continental, se puede utilizar un modelo geológico simple de dos capas, donde los sedimentos sobreyacen al basamento. También se requiere dividir la región de estudio en celdas 5' de latitud por 5' de longitud y estimar la conducción de calor en cada una de las celdas (Beardsmore et al., 2010).

De acuerdo a los términos del Protocolo, la superficie de nuestro país queda dividida en 26,315 celdas de 5' x 5' (latitud y longitud); debajo de cada celda se tienen 10 bloques de 1 km de espesor cada uno, por lo que la profundidad del modelo geológico es de 10 km. El número total de bloques asciende a 263,150 bloques de 5' x 5' x 1 km (Iglesias et al., 2015).

Iglesias et al. (2016b; 2016c) desarrollaron un modelo geológico 3D sedimento-basamento desde la superficie hasta 10 km de profundidad. El modelo contiene información sobre la litología representativa en cada uno de los 263,150 bloques que integran al modelo. También provee información acerca de la profundidad de la cima de basamento y a partir de ello, se establece la interfaz sedimento-basamento. Una síntesis del desarrollo y resultados de este modelo se presenta en otro trabajo incluido en estas memorias (Martínez-Estrella et al., 2017).

Por otro lado, para estimar el perfil de temperatura en la corteza, Iglesias et al. (2015) crearon un mapa de temperatura media anual en la superficie, a partir de la información de 12 mapas mensuales de temperatura en el período 1979-2009 con una resolución espacial de 1 km x 1 km en toda la República Mexicana. Este mapa cuenta además con información de la elevación de superficie en cada una de las celdas 5' x 5'. La información de la elevación fue descargada de la página del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Previamente, usando parte de la información anterior, Iglesias et al. (2016a) publicaron una estimación del Potencial Teórico para los afloramientos del basamento cristalino en la porción continental de México, el cual asciende a más de 17,894 GWe. 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 debe de ser mucho mayor de esa cantidad.

## **Metodología**

La estimación del Potencial Teórico del territorio continental de México requiere, en primer lugar, asignar datos geográficos, litológicos, propiedades térmicas, propiedades físicas y volumen a cada uno de los bloques de cada intervalo de profundidad, desde la superficie hasta 10 km de profundidad. Posteriormente, es necesario estimar el flujo de calor, la temperatura, la energía térmica y, finalmente, el Potencial Teórico de cada bloque. El potencial debe estimarse en el punto medio de cada intervalo de profundidad (1,000 m de espesor) entre 3,000 y 10,000 m de profundidad.

Como se mencionó anteriormente, nuestro modelo geológico está constituido por 263,150 bloques con dimensiones de 5' x 5' x 1 km de espesor, de los cuales 73,537 corresponden a bloques de sedimento y 189,613 a bloques de basamento. A cada uno de estos bloques se les asignaron las siguientes propiedades térmicas: generación de calor ( $A$ , W/m<sup>3</sup>) y conductividad térmica ( $K$ , W/mK), así como las propiedades físicas: densidad ( $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>) y calor específico ( $C_p$ , J/kg°K). Las propiedades termo-físicas de las rocas se tomaron de la base de datos compilada en el proyecto (Iglesias et al., 2016c). Además, se realizó el cálculo de volumen ( $V_c$ , m<sup>3</sup>) en cada uno de los bloques mencionados.

Para realizar la predicción del perfil de temperatura, el proceso requiere valores únicos de generación de calor y de conductividad térmica, tanto en la secuencia sedimentaria como en el basamento. La conductividad térmica se calcula mediante la media armónica ponderada por el espesor y la generación de calor mediante la media aritmética ponderada por el espesor.

También es necesario contar con un mapa de flujo de calor en superficie,  $Q_0$  ( $W/m^2$ ).  $Q_0$  está definido como la suma del flujo de calor del manto ( $Q_M$ ,  $W/m^2$ ) más el calor generando dentro de la corteza. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_0 = Q_M + b \times A_B + S \times A_S \quad \text{Ec. 1}$$

El parámetro  $b$  se refiere al espesor del basamento en metros (m) y está definido en función del espesor de la cubierta sedimentaria ( $S$ , m) mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } S < 3,000 \text{ m}, b = 10,000 \text{ m} \quad \text{Ec. 1a}$$

$$\text{Si } S > 3,000 \text{ m}, b = (13,000 - S) \text{ m} \quad \text{Ec. 1b}$$

Para estimar el perfil de temperatura se requieren dos pasos. El primero se refiere a la estimación de la temperatura en la interfaz sedimento-basamento ( $T_S$ ,  $^{\circ}C$ ), la cual está en función del flujo de calor en superficie ( $Q_0$ ,  $W/m^2$ ), la temperatura en superficie ( $T_0$ ,  $^{\circ}C$ ), el espesor de la cubierta sedimentaria ( $S$ , m), la conductividad térmica del sedimento o basamento ( $K_{S,B}$ ,  $W/mK$ ) y la generación de calor en el sedimento ( $A_S$ ,  $W/m^3$ ).  $T_S$  depende del espesor de la cubierta sedimentaria.

Si  $S < 4,000$  m:

$$T_S = T_0 + [(Q_0 \times S)/K_S] - A_S \times [S^2/(2 \times K_S)] \quad \text{Ec. 2a}$$

Si  $S > 4,000$  m, la conductividad de la parte del sedimento superior a 4,000 m es  $K_B$ . En este caso, primero se calcula  $T_{4km}$  usando  $S = 4,000$  m en la Ec. 2a, entonces:

$$T_S = T_{4km} + [(Q_0 - 4000 \cdot A_S) \times (S - 4000)/K_B] - A_S \times [(S - 4000)^2/(2 \times K_B)] \quad \text{Ec. 2b}$$

El flujo de calor en la interfaz sedimento-basamento ( $Q_S$ ,  $W/m^2$ ) se deriva por la substracción del total de la contribución de calor del sedimento de  $Q_0$ :

$$Q_S = Q_0 - S \times A_S \quad \text{Ec. 3}$$

El segundo paso, es determinar la temperatura en el punto medio ( $T_X$ ,  $^{\circ}C$ ) en cada bloque para cada intervalo de profundidad entre 3 y 10 km de profundidad. Es decir,  $X$  tendrá valores de 3,500 m, 4,500 m, 5,500 m, 6,500 m, 7,500 m, 8,500 m y 9,500 m. Para la estimación de  $T_X$  en el sedimento, Igleisas et al. (2016b) propusieron la Ec. 4<sup>a</sup>, mientras que el Protocolo propone la Ec. 4b para estimar  $T_X$  dentro del basamento (Beardsmore et al., 2010).

$$T_X = T_0 + [(Q_0 \times X)/K_S] - A_S \times [X^2/(2 \times K_S)] \quad \text{Ec. 4a}$$

$$T_X = T_S + [(Q_S \times (X - S))/K_B] - A_B \times [(X - S)^2/(2 \times K_B)] \quad \text{Ec. 4b}$$

El siguiente paso es la estimación de la energía térmica disponible ( $H$ , EJ) en cada bloque (Ec. 5). El

calor disponible dentro de un volumen de roca es proporcional a  $T_x$ ,  $\rho$ ,  $C_p$  y  $V_c$ . Además, sólo puede estimarse con relación a una 'temperatura base' ( $T_r$ , °C) definida como la temperatura a la que se reduciría la de la corteza debido a la utilización del calor geotérmico ( $T_r = T_0 + 80^\circ\text{C}$ ), (Beardsmore et al., 2010).

$$H = \rho \times C_p \times V_c \times (T_x - T_r) \times 10^{-18} \quad \text{Ec. 5}$$

Finalmente, para estimar el Potencial Teórico, el Protocolo asume que: (a) toda energía térmica ( $H$ ) con temperatura mayor que la temperatura base ( $T_r$ ) es teóricamente recuperable en todas las locaciones; (b) la vida económica de la generación eléctrica es de 30 años ( $9.46 \times 10^8$  s); y (c) la eficiencia térmica del ciclo ( $\eta_{th}$ ) es una función de la temperatura del recurso.

El Protocolo recomienda utilizar la Ec. 6 (MIT, 2006) para estimar la eficiencia térmica sobre una escala global.

$$\eta_{th} = 0.00052 \times T + 0.032 \quad \text{Ec. 6}$$

donde

$$T = (T_x + T_0 + 80^\circ\text{C})/2 \quad \text{Ec. 7}$$

El potencial de generación de energía, para un espesor de volumen de roca de 1,000 m con calor disponible ( $H$ ), es:

$$P = H \times 10^{12} \times \eta_{th} / 9.46 \times 10^{18} \quad \text{Ec. 8}$$

## Resultados y discusión

Primeramente se asignaron las propiedades termo-físicas (conductividad térmica, generación de calor, densidad y calor específico) y se calculó el volumen en cada uno de los bloques que conforman el modelo geológico. Además, se generó un mapa de flujo de calor en superficie para la República Mexicana (Fig. 1; todas las figuras al final del texto) a partir de: (a) la información de mediciones de flujo de calor en México reportados por diferentes autores y (b) la estimación de  $Q_0$  a partir de la Ec. 1.

Con base en la conductividad térmica ( $K$ ), la generación de calor ( $A$ ), el espesor de la cubierta sedimentaria ( $S$ ), el flujo de calor en superficie ( $Q_0$ ), la temperatura en superficie ( $T_0$ ) y mediante las Ec. 2a, 2b y 3 se calcularon la temperatura y el flujo de calor en la interfaz sedimento-basamento,  $T_s$  y  $Q_s$  respectivamente. A partir de éstos resultados se generaron los mapas correspondientes, mismos que se presentan en las Figs. 2 y 3.

En el mapa  $T_s$  (Fig. 2) las temperaturas mínimas registradas corresponden a los afloramientos del basamento, donde el espesor de sedimento es cero. También se observa que existe un incremento esperable en la temperatura conforme aumenta la profundidad de la cima de basamento. Respecto a  $Q_s$  (Fig. 3), se observó un proceso inverso respecto a lo observado con la temperatura, es decir, el flujo de calor es mayor donde la cima del basamento se encuentra a menor profundidad; esto se debe al incremento del espesor de roca que genera calor por debajo de la interfaz sedimento-basamento.

Posteriormente, se realizaron los cálculos de la temperatura en el punto medio ( $T_x$ ) para cada bloque

en cada intervalo de profundidad entre 3 y 10 km. Los mapas de las Figs. 4 y 5 presentan las temperaturas estimadas a las profundidades de 6.5 km y 9.5 km, respectivamente. A 6.5 km de profundidad (Fig. 4) se observa que las temperaturas se encuentran en su mayor parte dentro de un rango de 100°C a 160°C. Mientras que en la estimación de temperatura a 9.5 km de profundidad (Fig. 5), la mayor densidad de resultados se encuentra entre 160°C y 200°C. En ambas figuras, se observa que existe un incremento en la temperatura conforme incrementa la profundidad. También se aprecia, como es de esperar, que el incremento de  $T_x$  depende de los valores de  $Q_0$ .

Continuando con la aplicación de la metodología, mediante la Ec. 5 se realizó la estimación de la energía térmica disponible (H) en cada bloque. En dicha ecuación, se observa que H es una variable dependiente de la temperatura base ( $T_r$ ) y la temperatura inicial del bloque ( $T_x$ ). Al obtener valores de  $T_x$  menores a  $T_r$ , la diferencia entre ambas temperaturas es negativa y, por tanto, el valor de H es nulo. Bajo esta consideración, se presentaron varios casos donde el resultado del cálculo de energía térmica disponible fue igual a cero. Sin embargo, este número de casos, donde  $H = 0$  EJ, disminuyó al incrementarse la profundidad. Asimismo, se observó que la energía térmica disponible (H) aumenta conforme se incrementa la profundidad, esto debido a que  $T_x$  se incrementa de igual manera.

Finalmente, se realizó la estimación preliminar del Potencial Teórico (P) aplicando la Ec. 8 en cada bloque de 5' x 5' x 1 km, para cada intervalo de profundidad. Se estimaron valores de P para un total 184,205 bloques.

A partir de los resultados obtenidos, se generaron los mapas del Potencial Teórico (P) para la República Mexicana. En las Figs. 6 y 7 se presentan los mapas correspondientes de P entre 6 y 7 km de profundidad y P entre 9 y 10 km de profundidad. Se observa que el Potencial Teórico aumenta con el incremento de la profundidad.

La Fig. 8 presenta el mapa del Potencial Teórico total incluyendo los 7 niveles de profundidad de 1 km de espesor comprendidos entre 3 y 10 km.

Los valores del Potencial Teórico total estimado para la República Mexicana y por cada estado se presentan en la Tabla 1. Se observa que para todo el país el valor total estimado de P asciende a 12,816'678,004 MWe (12'816,678 GWe). Desde luego, debe recordarse que sólo una fracción de ese potencial será accesible y extraíble. Por otro lado, se obtuvo un potencial teórico unitario promedio de 6,786 MWe/km<sup>2</sup> con una desviación estándar igual a 1,458 MWe/km<sup>2</sup>.

Tabla 1. Potencial Teórico de la República Mexicana, total y por estado.

Estados	No. de celdas	Potencial Teórico (MWe)	Potencial Teórico acumulado (%)	Área de las celdas (m <sup>2</sup> )	No. Celdas Estado	Potencial Teórico unitario (MWe/km <sup>2</sup> )
República Mexicana	26,254	12,816,678,004	100.00	1.9516E+12	26,315	6,567
Chihuahua	3,340	1,697,979,586	13.25	2.4618E+11	3,342	6,897
Coahuila	2,024	1,146,758,038	22.20	1.5027E+11	2,024	7,632
Sonora	2,567	837,012,698	28.73	1.8134E+11	2,567	4,616
Durango	1,593	759,232,610	34.65	1.2253E+11	1,593	6,197
Tamaulipas	1,075	607,965,935	39.39	7.8968E+10	1,075	7,699
Campeche	753	565,157,695	43.80	5.7036E+10	753	9,909
Veracruz	938	559,120,377	48.17	7.1410E+10	938	7,830
Michoacán	743	527,789,258	52.28	5.8574E+10	744	9,011
Nuevo León	838	521,711,602	56.35	6.4083E+10	840	8,141



Zacatecas	963	513,840,349	60.36	7.4958E+10	963	6,855
Jalisco	994	511,969,600	64.36	7.7569E+10	994	6,600
Chiapas	958	479,603,482	68.10	7.3738E+10	959	6,504
San Luis Potosí	770	448,921,602	71.60	6.0254E+10	770	7,450
Oaxaca	1,181	411,929,569	74.82	9.4079E+10	1,181	4,379
Baja California Sur	1,110	408,032,115	78.00	7.1276E+10	1,147	5,725
Quintana Roo	651	334,771,965	80.61	4.4430E+10	651	7,535
Baja California	1,155	327,097,451	83.16	7.3365E+10	1,156	4,459
Yucatán	543	277,121,648	85.33	3.9987E+10	543	6,930
Sinaloa	782	274,327,236	87.47	5.6667E+10	782	4,841
Guanajuato	383	243,442,755	89.37	3.0366E+10	383	8,017
Guerrero	789	240,012,465	91.24	6.1675E+10	805	3,892
Puebla	427	202,983,685	92.82	3.4397E+10	427	5,901
Tabasco	322	198,851,685	94.37	2.4572E+10	322	8,093
Nayarit	384	181,086,300	95.79	2.7885E+10	384	6,494
México	278	155,813,681	97.00	2.2328E+10	278	6,978
Hidalgo	258	154,116,650	98.21	2.0527E+10	258	7,508
Querétaro	145	87,809,626	98.89	1.1502E+10	145	7,634
Morelos	60	45,363,632	99.24	4.8444E+09	60	9,364
Colima	91	31,063,200	99.49	5.7767E+09	92	5,377
Aguascalientes	70	30,738,917	99.73	5.5014E+09	70	5,587
Tlaxcala	50	24,272,348	99.92	4.0133E+09	50	6,048
Ciudad de México	19	10,780,245	100.00	1.5267E+09	19	7,061

En la Tabla 1 también se observa que los estados con mayor Potencial Teórico estimado son, en orden decreciente, Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango, Tamaulipas, Campeche, Veracruz, Michoacán, Nuevo León, Zacatecas, Jalisco, Chiapas y San Luis Potosí, que conjuntamente representan casi 72% del total calculado.

Los resultados obtenidos indican el inmenso potencial teórico de los SGM en el país, el cual constituye claramente un recurso gigantesco. Para dar una idea de los que representan estas magnitudes, basta mencionar que en el año 2015 la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional fue de 68,044 MWe (SENER, 2016). Recordando que uno de los ejes fundamentales del Gobierno Federal, establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo 2016-2018, es atender los retos de nuestro país en materia de diversificación y seguridad energética mediante la utilización de fuentes de energía renovables (SEGOB, 2014), nuestros resultados indican que los recursos SGM podrían, potencialmente, llegar a constituirse en la principal fuente de energía eléctrica del país, por muchos años.

También es importante mencionar que el proyecto P01 del CeMIE-Geoestá desarrollando un mapa actualizado del flujo de calor en la República Mexicana. Nuestro proyecto considera eventualmente utilizar los resultados de dicho proyecto para hacer una revisión del mapa de flujo de calor en superficie ( $Q_0$ ) empleado en la presente estimación. Es probable que, con una densidad mayor de información medida acerca de  $Q_0$  que la aquí utilizada, los resultados obtenidos hasta el momento, los cuales consideramos como provisionales, puedan variar de un modo significativo.

## Conclusiones

En el presente trabajo se describió la aplicación de la metodología utilizada para la estimación del Potencial Teórico de los Sistemas Geotérmicos Mejorados en México, así como los resultados obtenidos con esa estimación.

La estimación preliminar del Potencial Teórico de los SGM en México, entre 3 y 10 km de profundidad, asciende a 12'816,678 GWe, el cual constituye claramente un recurso gigantesco. Nuestros resultados indican que los recursos SGM podrían, potencialmente, llegar a ser la principal fuente de energía eléctrica del país, por muchos años.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) y al CONACYT por el apoyo para la realización de este trabajo. Así mismo, el segundo autor agradece al Dr. Abel Felipe Hernández Ochoa y al M.C. Aldo Azoños Figueroa por sus comentarios y sugerencias para la mejora de este trabajo.

## Referencias

- Beardsmore, G.R., Rybach, L., Blackwell, D. and Baron, C., 2010. A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential. *GRC Transactions*, **34**, 301-312.
- Iglesias, E.R., 2014. Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México. *Boletín IIE*, abril-junio 2014, 78-79.
- Iglesias, E.R., Martínez-Estrella, J.I., Torres, R.J., López-Blanco, S., Lira-Argüello, R., Reyes-Picasso, N., Paredes-Soberanes, A., González-Reyes, I., Morales-Reyes, M.F., Prol-Ledesma, R.M., Espinoza-Ojeda, O.M., Román-Fernández, B., Romero-Santiago, K., Cedillo-Vallejo, N. y Juárez-Hernández, J.E., 2015. Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México, Reporte Etapa 2. *Informe para el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, IIE/11/14619/I 02/P/DC*, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Morelos, México, 124 p. Inédito.
- Iglesias, E.R., Torres, R.J., Martínez-Estrella, J.I., Lira-Argüello, R., Paredes-Soberanes, A., Reyes-Picasso, N., Prol, R.M., Espinoza-Ojeda, O.M., López-Blanco, S. y González-Reyes, I., 2016a. Potencial Teórico SGM en los Afloramiento del Basamento en México. *Memorias del XXIII Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana*, Morelia, Michoacán, 10-11 de marzo 2016, 1-17.
- Iglesias, E.R., Martínez-Estrella, J.I., López-Blanco, S., Torres, R.J., Paredes-Soberanes, A., Reyes-Picasso, N., González-Reyes, I., Prol-Ledesma, R.M., Espinoza-Ojeda, O.M., Robles-Trigueros, N.G., Juárez-Hernández, J.E., Cedillo-Vallejo, V.N., Lira-Argüello, R. y Morales-Reyes, M.F., 2016b. Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México, Reporte Etapa 3. *Informe para el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, IIE/11/14619/I 03/P/DC*, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Morelos, México, 190 p. Inédito.
- Iglesias, E.R., López-Blanco, S., Torres, R.J., Martínez-Estrella, J.I., Paredes-Soberanes, A., Reyes-Picasso, N., González-Reyes, I., Romano-Vázquez, I., Prol-Ledesma, R.M., Espinoza-Ojeda,



O.M., Gutiérrez-Negrín, L.-C.A., 2016c. Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México, Reporte Etapa 4. *Informe para el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, INEEL/11/14619/I 04/P/DC*, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Morelos, México, 198 p. Inédito.

Martínez-Estrella, J.I., López-Blanco, S., Iglesias, E.R., Paredes-Soberanes, A., Reyes-Picasso, N., Torres, R.J., Lira-Argüello, R., González-Reyes, I., Román-Fernández, B., Romero-Santiago, K., Romano-Vázquez, I., Juárez-Hernández, J.E., Cedillo-Vallejo, V.N., Robles-Trigueros, N.G., Gutiérrez-Negrín, L.C.A., Dávalos-Elizondo, E., 2017. Un modelo geológico simplificado de la corteza continental hasta 10 km de profundidad para estimar el potencial de los Sistemas Geotérmicos Mejorados en México. *Memorias del XXIV Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana*, por publicar.

MIT (Massachusetts Institute of Technology), 2006. *The Future of Geothermal Energy – Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21<sup>st</sup> century*. MIT Press.

Richter, A., 2016. Latest Top 10 List of Geothermal Countries – November 2016 (power generation capacity). Disponible en:  
<http://www.thinkgeoenergy.com/latesttop10listofgeothermalcountriesnovember2016powergenerationcapacity/>

Rybach, L., 2010. The future of geothermal energy and its challenges. *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali*, Indonesia, 25-29 April, 1-4.

Secretaría de Energía (SENER), 2016. *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2016-2030*. Disponible en:  
[http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98308/PRODESEN-2016-2030\\_1.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98308/PRODESEN-2016-2030_1.pdf)

Secretaría de Gobernación (SEGOB), 2014. Iniciativa de decreto por el que se expide la Ley de Energía Geotérmica.

### **FIGURAS EN LAS PÁGINAS SIGUIENTES**

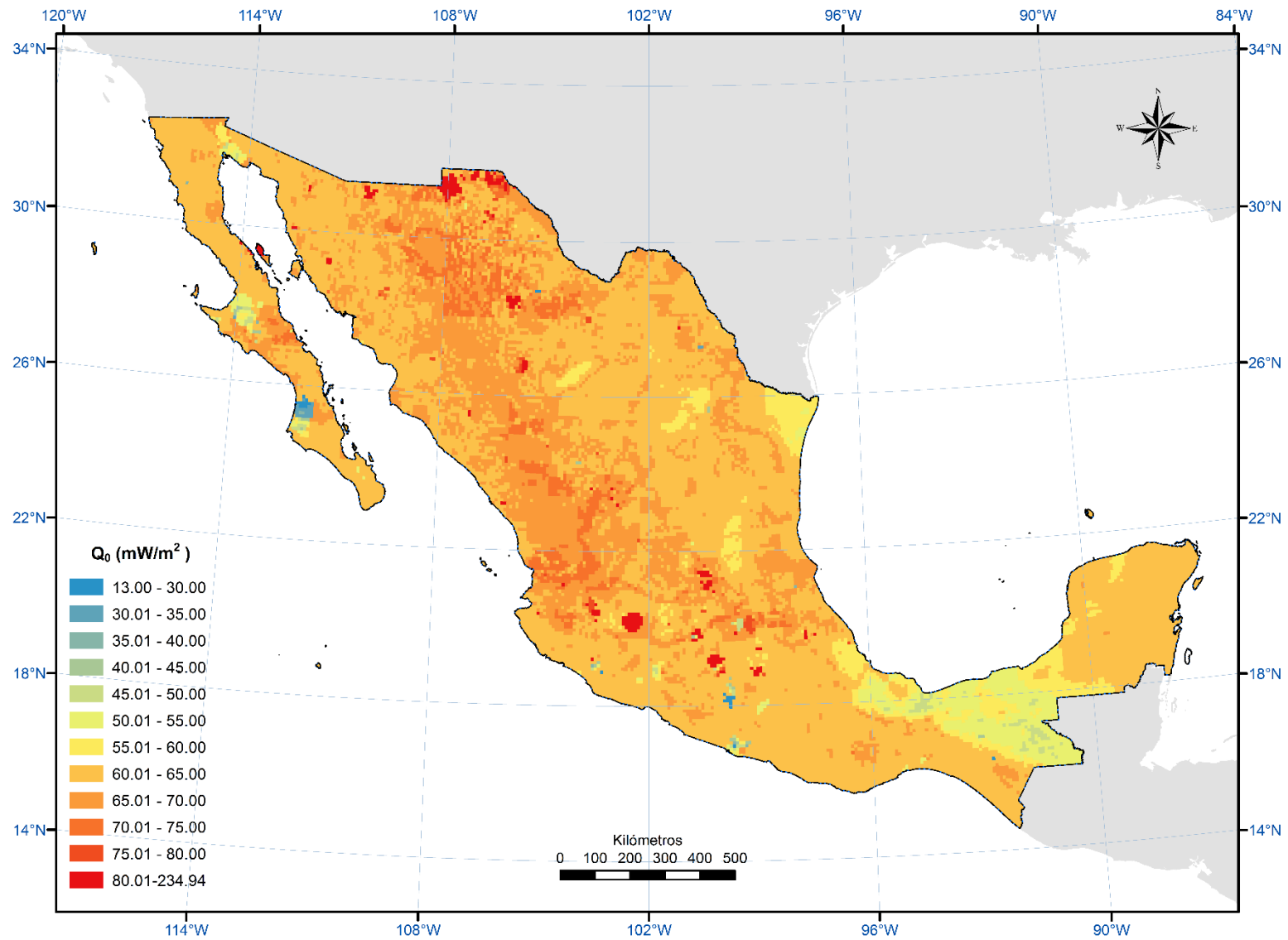


Fig. 1. Mapa de flujo de calor en superficie para la República Mexicana.

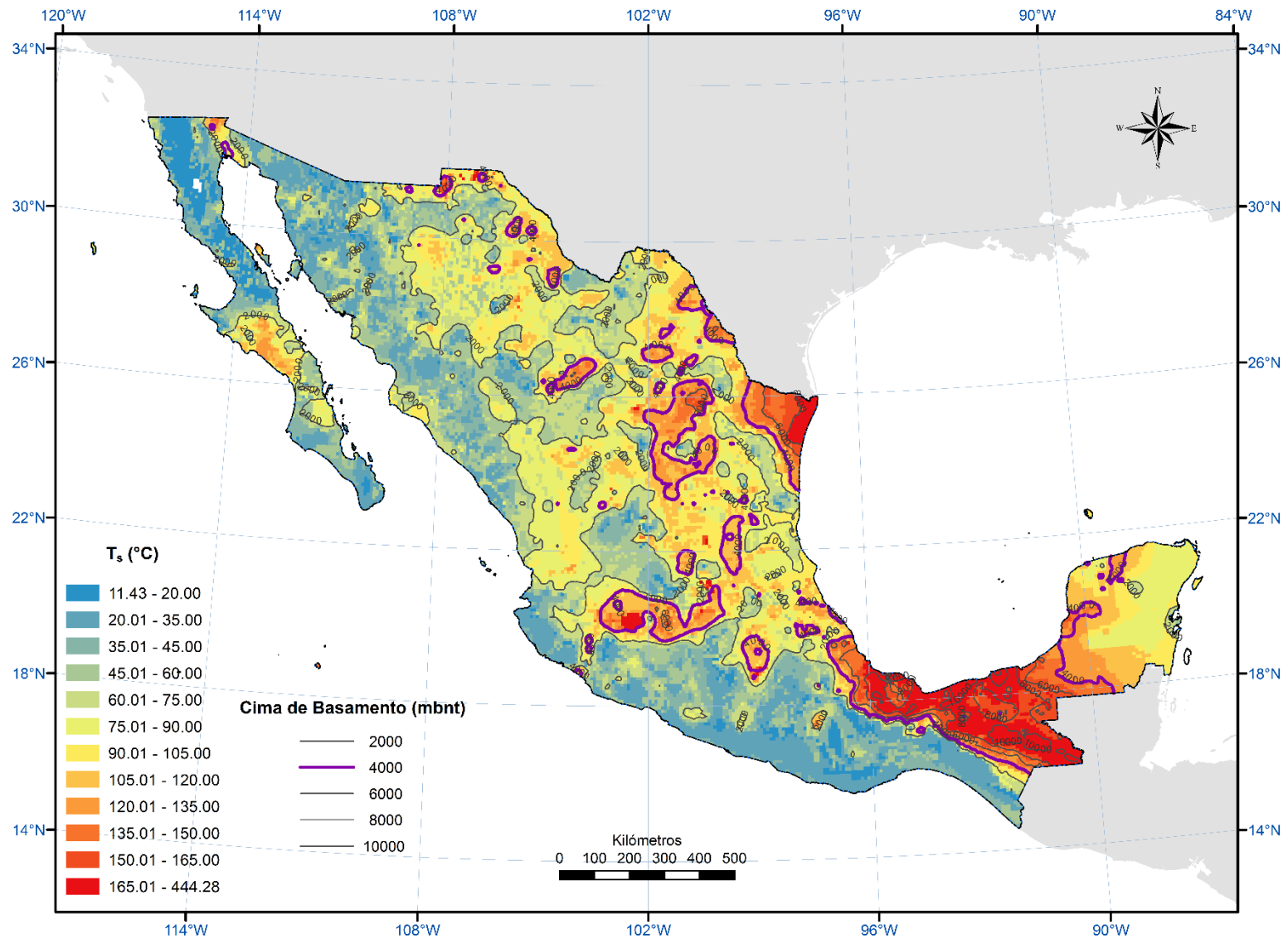


Fig. 2. Mapa de temperatura en la interfaz sedimento-basamento de la República Mexicana.

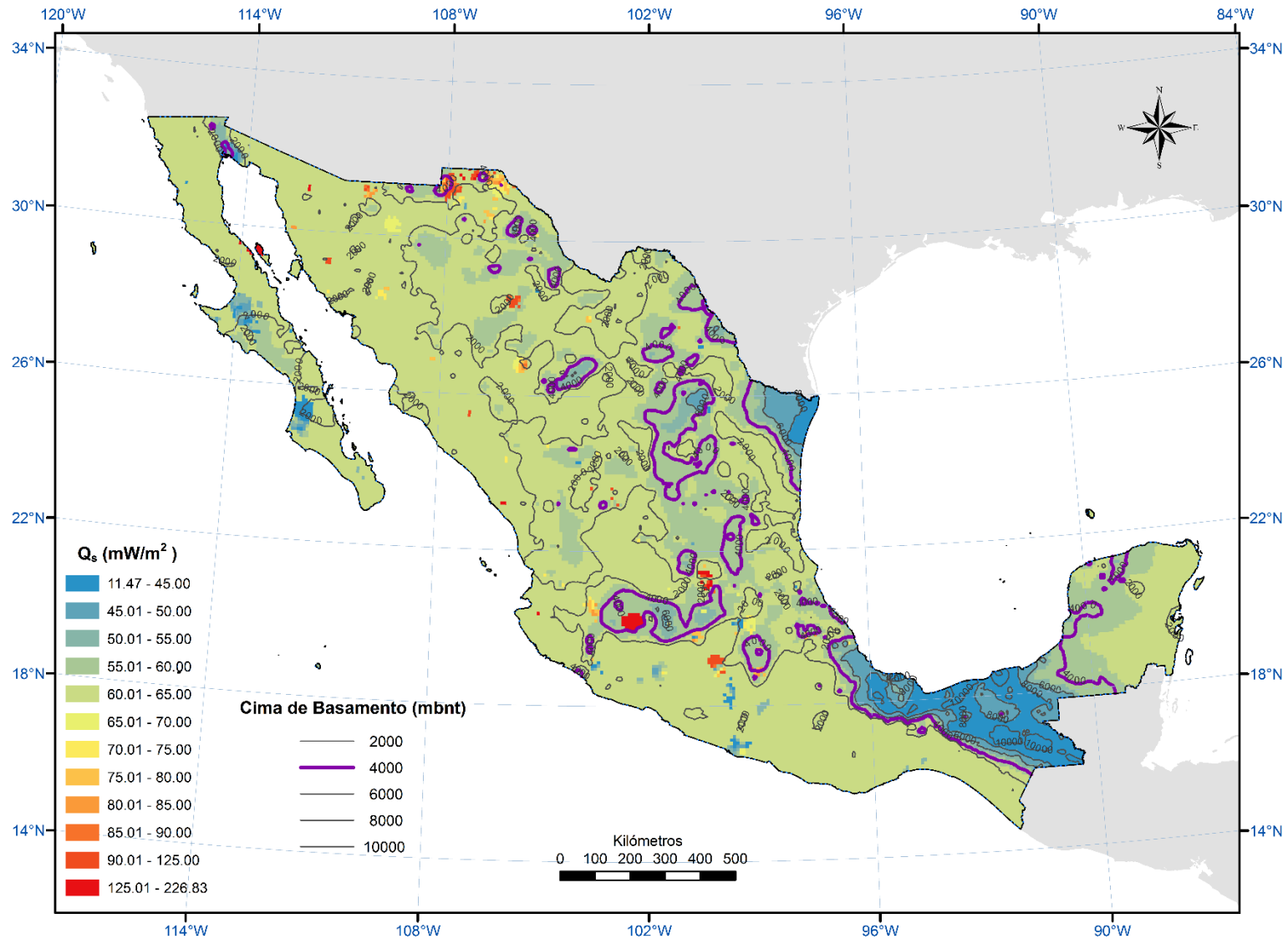


Fig. 3. Mapa de flujo de calor en la interfaz sedimento-basamento de la República Mexicana.

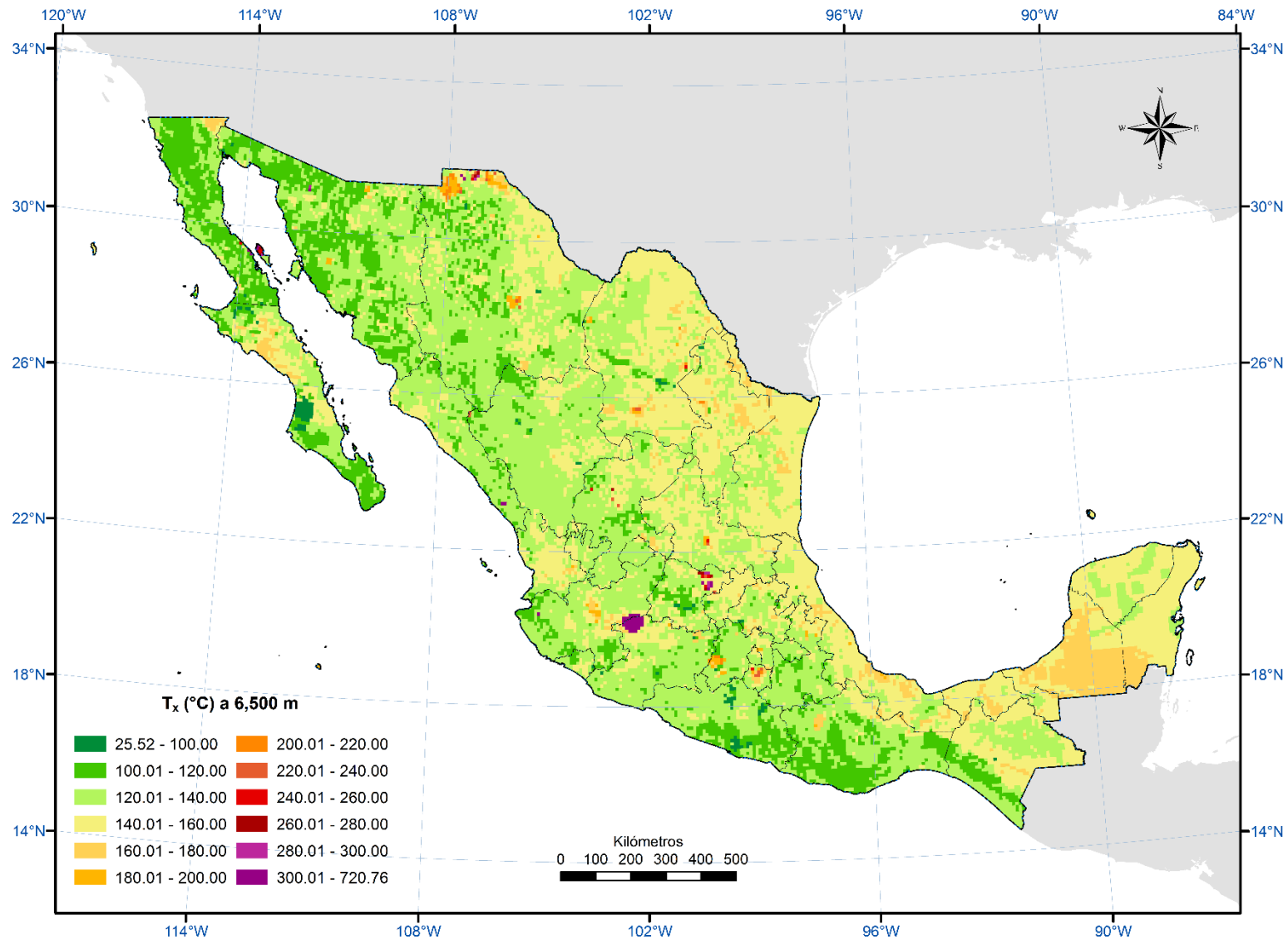


Fig. 4. Mapa de temperatura a 6.5 km de profundidad para la República Mexicana.

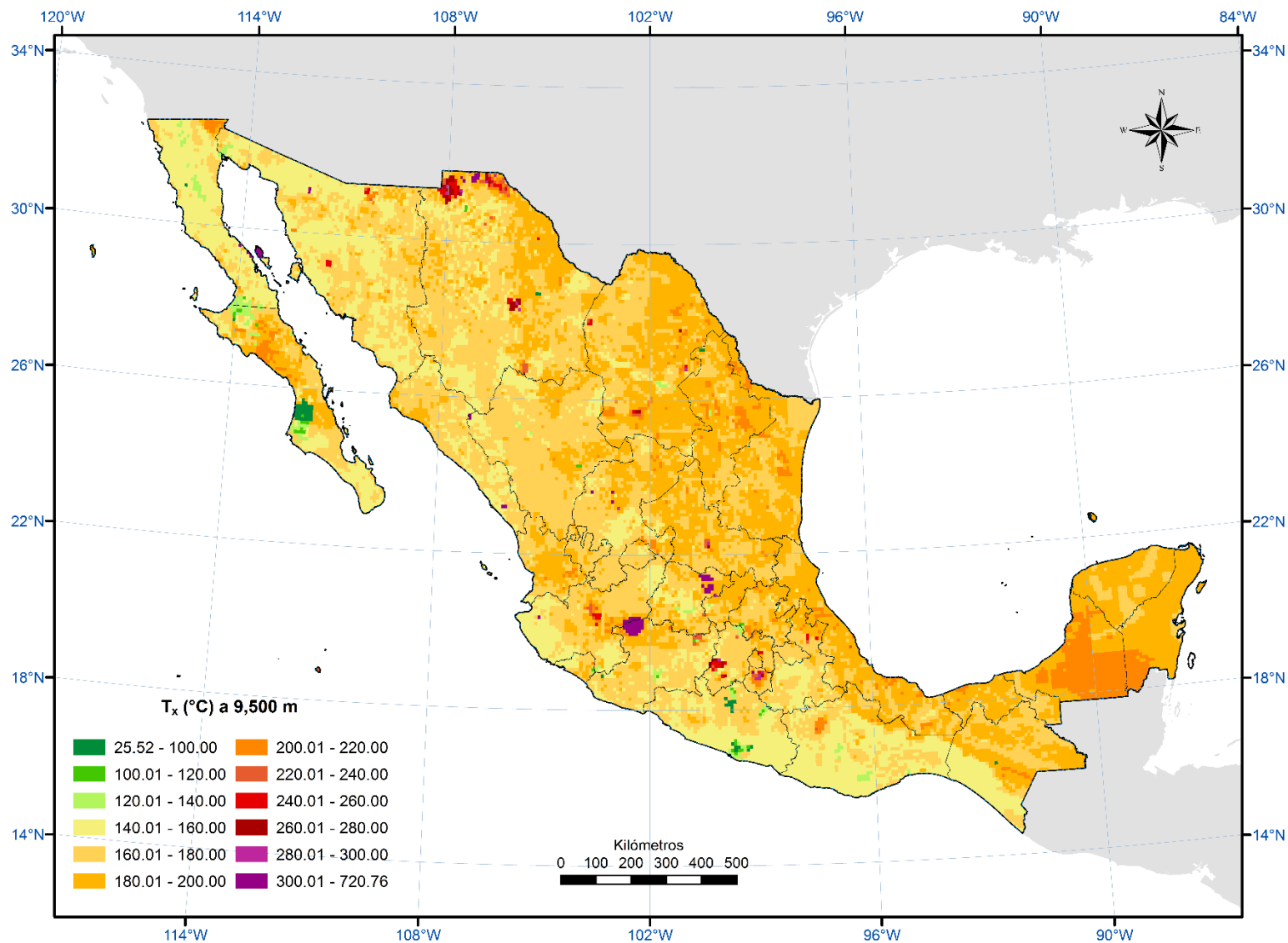


Fig. 5. Mapa de temperatura a 9.5 km de profundidad para la República Mexicana.



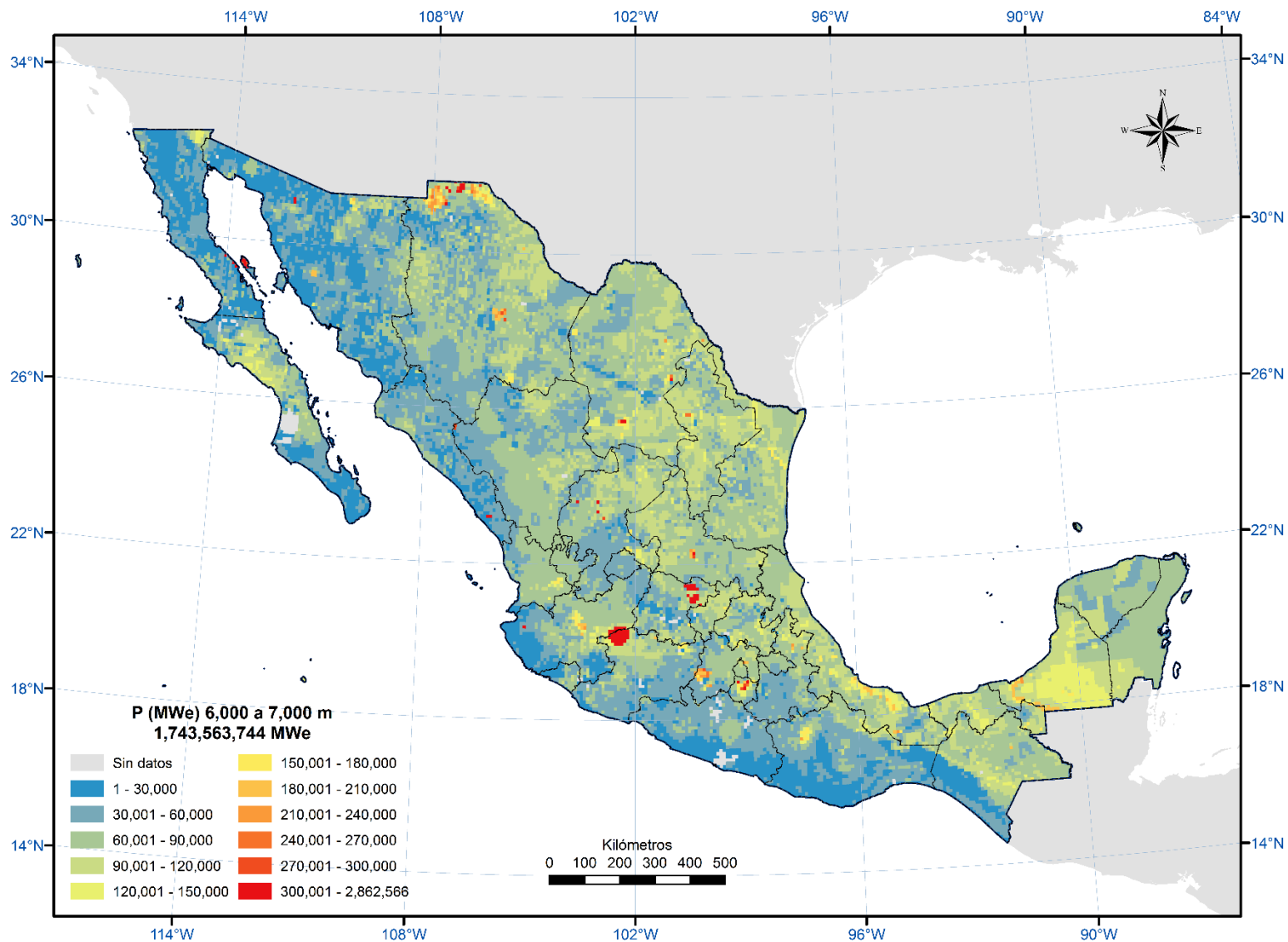


Fig. 6. Mapa de Potencial Teórico entre 6 y 7 km de profundidad para la República Mexicana.

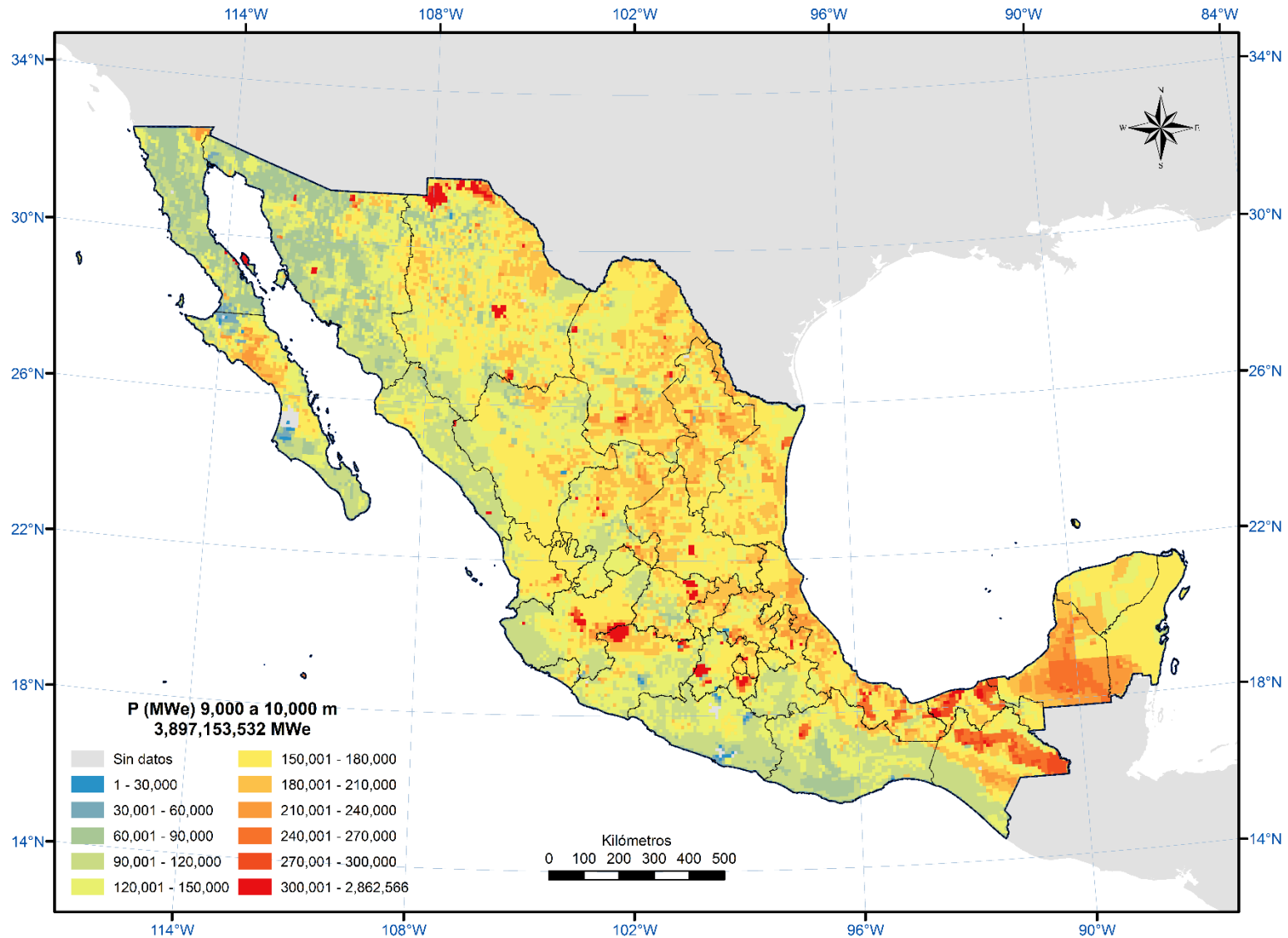


Fig. 7. Mapa de Potencial Teórico entre 9 y 10 km de profundidad para la República Mexicana.

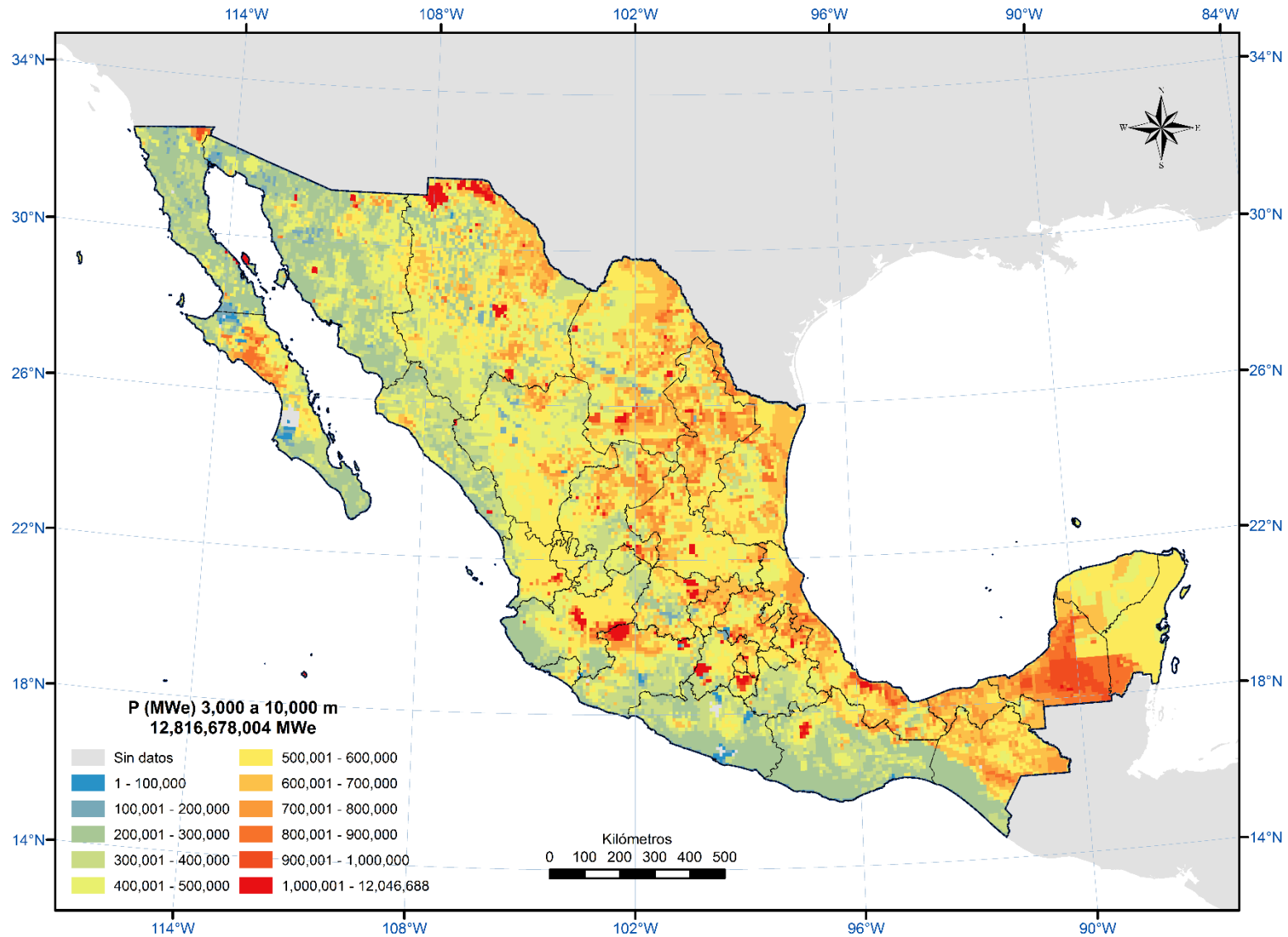


Fig. 8. Mapa de Potencial Teórico total de 3 a 10 km de profundidad para la República Mexicana.