

Un modelo geológico simplificado de la corteza continental hasta 10 km de profundidad para estimar el potencial de los Sistemas Geotérmicos Mejorados en México

J.I. Martínez-Estrella^{1,2}, S. López-Blanco^{1,2}, E.R. Iglesias^{1,2}, A. Paredes-Soberanes^{1,2}, N. Reyes-Picasso^{1,2}, R.J. Torres^{1,2}, R. Lira-Argüello^{1,2}, I. González-Reyes^{1,2}, B. Román-Fernández^{1,2}, K. Romero-Santiago^{1,2}, I. Romano-Vázquez^{1,2}, J.E. Juárez-Hernández^{1,2}, V.N. Cedillo-Vallejo^{1,2}, N.G. Robles-Trigueros^{1,2}, L.C.A. Gutiérrez-Negrín^{2,3} y E. Dávalos-Elizondo¹

¹Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, Morelos. ²Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo). ³Geocónsul, S.A. de C.V. Correo: jiime@iie.org.mx

RESUMEN

El proyecto P07 del CeMIE-Geo tiene como objetivo realizar la primera estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en la República Mexicana. Para este fin, se basa en la metodología propuesta por Beardsmore et al., 2010 (*A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential*) la cual asume que la conducción es el mecanismo dominante de transferencia de calor a través de la corteza y que la geología de los 10 km superiores puede aproximarse mediante un modelo simple de dos capas, donde “sedimentos sobreyacen a basamento”. El presente trabajo describe el desarrollo de un modelo geológico en ArcGIS® como base para evaluar los SGM en México bajo los términos establecidos en el Protocolo. La conformación del modelo involucró inicialmente dividir el territorio nacional en una malla regular de celdas de 5' de latitud x 5' de longitud. Posteriormente, con base en información geológica y geofísica recopilada de la literatura, se mapeó el espesor promedio de la cubierta sedimentaria a partir de estimar la profundidad a la cima del basamento en cada celda. Una vez delineada la interfaz sedimento-basamento, se procedió a definir una litología representativa de basamento o de sedimento, según correspondiera, para cada celda 5' x 5' y para cada intervalo de 1 km de profundidad, desde la superficie hasta 10 km. De esta manera, quedó conformado un modelo 3D constituido por 26,315 columnas litológicas ‘representativas’ (una por cada celda) y 263,150 bloques con dimensiones de 5' de latitud x 5' de longitud x 1 km, cada uno asignado con su atributo litológico. Finalmente, de acuerdo con el tipo de roca predominante interpretado para cada bloque, se asignaron sus consecuentes propiedades térmicas y físicas, las cuales fueron requeridas eventualmente para realizar los cálculos de energía térmica y del potencial teórico correspondientes a cada bloque. Mientras que en el alcance de nuestro proyecto el modelo descrito permitió caracterizar la estructura geológica y térmica en el subsuelo a través del territorio nacional, se considera que este modelo (y la base de datos que lo sustenta), siendo susceptible de mejora, puede representar un aporte útil a las geociencias en México y constituir un punto de partida para la conformación, a futuro, de un modelo sedimento-basamento de todo el país con utilidad práctica en la industria y la academia.

Palabras clave: Sistemas Geotérmicos Mejorados, corteza continental, modelo geológico, basamento, sedimento, México, SIG.

A simplified geological model of the continental crust to 10 km depth for estimating EGS potential in Mexico.

ABSTRACT

The CeMIE-Geo project P07 aims to perform the first estimate of the power potential of EGS in Mexico. For this purpose, it follows the methodology proposed by Beardsmore et al., 2010 (*A Protocol*

for *Estimating and Mapping Global EGS Potential*) which assumes that conduction is the dominant mechanism for heat transfer through the crust and that the geology of the uppermost 10 km can be approximated by a simple two-layer model ('sediment overlying basement'). This paper describes the development of a geological model in ArcGIS® as a basis for the assessment of EGS potential in Mexico under the terms established in the Protocol. The conformation of the model initially involved dividing the national territory into a regular grid of 5' x 5' latitude/longitude cells. Subsequently, based on geological and geophysical information compiled from the literature, the average thickness of the sedimentary cover was mapped from an estimate of the depth to the basement top in each cell. Once the sediment-basement interface was delineated, a representative lithology of basement or sediment, as appropriate, was defined for each 5' x 5' cell and for each interval of 1 km depth, from the surface to 10 km. In this way, a 3D model was formed consisting of 26,315 'representative' lithological columns (one for each cell) and 263,150 blocks of 5' x 5' x 1 km, each assigned with its lithological attribute. Finally, according to the predominant rock type interpreted for each block, its corresponding thermal and physical properties were assigned. These were eventually required to perform the calculations of thermal energy and theoretical potential corresponding to each block. While in the scope of our project the described model allowed us to characterize the geological and thermal structure in the subsurface throughout the national territory, it is considered that this model (and its underlying database), being prone to improvement, could represent a useful contribution to the geosciences in Mexico and constitute a starting point for the future conformation of a sediment-basement model of the whole country with practical use in industry and academia.

Keywords: Enhanced Geothermal Systems, continental crust, geological model, basement, sediment, Mexico, GIS.

1. Introducción

Los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM; *Enhanced Geothermal Systems*, EGS por sus siglas en inglés) se caracterizan, a diferencia de los sistemas hidrotermales convencionales, por la ausencia de fluidos. Esto se debe a las características geológicas propias de estos sistemas, generalmente localizados en rocas cristalinas y no permeables denominadas genéricamente como Roca Seca Caliente (MIT, 2006).

Un SGM consiste básicamente en la creación de un yacimiento fracturado de manera artificial mediante técnicas de fracturamiento hidráulico para generar o incrementar la permeabilidad en formaciones con temperaturas de interés para la generación de electricidad. El yacimiento es interceptado a profundidad por al menos dos pozos. Por uno de estos pozos se inyecta inicialmente agua a temperatura ambiente la cual es calentada por conducción al entrar en contacto con la roca caliente a profundidad, donde eventualmente adquiere las condiciones de presión y temperatura de la roca huésped. El agua y el vapor es recuperado mediante un segundo pozo productor para su aprovechamiento en una planta geotérmica de ciclo binario en superficie. El agua extraída se reinyecta después en el yacimiento, formando un ciclo cerrado.

Como integrante del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), la Gerencia de Geotermia del INEEL lleva a cabo el proyecto estratégico P-07 *Estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México*, el cual constituye el primer trabajo con este objetivo en el país. Dicha estimación se ajusta al protocolo propuesto por Beardsmore et al., 2010 (*A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential*), respaldado por la *International Geothermal Association* (IGA), el cual establece una metodología estandarizada para la evaluación y mapeo del potencial de estos sistemas a nivel mundial.

En su fase inicial, el Protocolo establece la necesidad de contar con un mapa del espesor de la cubierta sedimentaria (o profundidad a la cima del basamento) a nivel nacional, a partir del cual pueda modelarse, en forma tridimensional, la estructura geológica de los 10 km más superficiales de la corteza continental.

En el caso de México, hasta donde hemos investigado, no se conoce la existencia de algún mapa o base de datos que contenga información sobre el espesor de sedimento o cima del basamento geológico cristalino en todo el territorio nacional. Es sabido que empresas estatales como PEMEX y CFE han realizado numerosas perforaciones profundas y estudios geológico-geofísicos regionales con fines petroleros y geotérmicos, respectivamente, que han llegado a las rocas del basamento o bien han interpretado la profundidad del mismo, tanto a nivel regional como local. Sin embargo, por razones de confidencialidad, sólo parte de esta información ha sido plasmada en la literatura abierta. Por este motivo, para fines de nuestro proyecto se hizo necesaria la creación de este mapa fundamental.

En el presente trabajo se describen los aspectos metodológicos generales y se presentan los resultados del desarrollo de un modelo geológico 3D simplificado para evaluar el potencial de los SGM en México, de acuerdo a los términos establecidos en el protocolo. La elaboración de este modelo ha representado una tarea laboriosa y compleja, pero permitió finalmente caracterizar la estructura geológica y térmica en el subsuelo a través del territorio nacional a partir de lo cual se estimó la energía térmica disponible a profundidad y el potencial teórico y técnico de dichos recursos.

2. Metodología

La metodología utilizada en el Protocolo para la evaluación y mapeo del potencial los SGM nivel global se divide en cinco etapas principales (Beardsmore et al., 2010):

- I. Modelar la temperatura, flujo de calor y calor disponible de la corteza terrestre hasta una profundidad de 10 km bajo la superficie.
- II. Estimar el potencial teórico de los SGM en la corteza hasta dicha profundidad.
- III. Estimar el potencial técnico que puede ser aprovechado con la tecnología actual y considerando restricciones geográficas, ecológicas, legales y regulatorias.
- IV. Definir un nivel de confianza del potencial técnico estimado en cada sitio, consistente con Códigos de Reporte públicos.
- V. Presentar los resultados utilizando una arquitectura de datos y de visualización comunes.

El protocolo asume que la geología de los 10 km superiores de la corteza puede ser aproximada a través de un modelo simple de dos capas, donde un paquete de 'sedimentos' descansa sobre un basamento cristalino, mayormente granítico (Fig. 1; todas las figuras aparecen al final del texto).

El perfil de temperatura a profundidad se estima empleando un enfoque de 'arriba hacia abajo', partiendo del valor del flujo de calor en la superficie (Q_0). El gradiente térmico promedio puede estimarse en cualquier intervalo de profundidad, y en cualquier ubicación, a partir del flujo de calor y las propiedades térmicas de las rocas.

La Figura 2 muestra un diagrama de flujo del proceso general sugerido en el protocolo para modelar la temperatura de la corteza terrestre hasta una profundidad de 10 km. El desarrollo del modelo geológico objeto del presente trabajo involucra la aplicación de los cuatro primeros pasos del proceso

ilustrado en la figura (cajas en color rojo). El desarrollo de cada uno de estos pasos se describe a continuación.

3. Desarrollo

3.1. Dividir el país en una cuadrícula de celdas con resolución de 5' de latitud x 5' de longitud

Con el programa ArcGIS 10.2® (ESRI, 2013) se generó en forma de mapa digital una malla geográfica rectangular inicialmente compuesta por 91,656 celdas de 5' de latitud x 5' de longitud, que comprendió la totalidad del territorio nacional incluida su parte oceánica. Posteriormente, se recortó esta cuadrícula a los límites continentales de la República Mexicana quedando un total de 26,315 celdas seleccionadas (Fig. 3). Cada celda constituye la unidad básica para almacenar y referir geográficamente toda la información del modelo. Dado su enorme número, fue preciso definir un sistema efectivo para identificar de forma individual y única a cada celda.

Se determinó tomar como base la nomenclatura empleada por el INEGI para su cartografía topográfica a escala 1:50,000, la cual utiliza un formato regular de 15' de latitud x 20' de longitud. Al dividir una carta escala 1:50,000 en paralelos y meridianos de 5' de latitud x 5' de longitud, se obtienen 12 áreas o celdas distribuidas en tres filas y cuatro columnas. Estas celdas son numeradas del 01 al 12 siguiendo un orden de numeración similar al empleado en la nomenclatura de la carta 1:50,000, es decir, de oeste a este y de norte a sur (INEGI, 2010). Este número se agrega a la clave de la carta correspondiente, quedando la clave de identificación de cada celda de 5' x 5' conformada como se ilustra en el ejemplo de la Fig. 3, que corresponde a la carta 1:50,000 E14A21.

De este modo se logró identificar individualmente a cada celda en una forma efectiva la cual, con un grado básico de conocimiento cartográfico, permite intuitivamente aproximar su ubicación geográfica dentro del territorio nacional. Además de su identificación, cada celda en la malla tiene otros atributos como su área, su elevación topográfica promediada a partir del mapa Continuo de Elevaciones Mexicano de INEGI (2013) a una resolución espacial de 60 m, y la temperatura media anual en superficie obtenida de mapas mensuales de temperatura con resolución de 1 x 1 km.

3.2. Mapa del espesor de sedimentos (profundidad a la cima del basamento)

El segundo paso para estimar el perfil de temperatura de la corteza a 10 km de profundidad consiste en modelar el espesor de la cubierta sedimentaria a través de la región o país de estudio. El espesor de la cobertura sedimentaria o sedimentos queda delimitado por la superficie del terreno y la profundidad a la cima del basamento geológico cristalino.

Como ya se comentó, en la literatura geocientífica del país no se ha encontrado un mapa o conjunto de datos sobre el espesor de sedimentos o cima del basamento geológico cristalino que incluya a todo el territorio nacional. Por tanto, para los fines específicos de la estimación de los SGM en México, se hizo necesaria la creación de este mapa fundamental.

Generalmente, la cima del basamento geológico se determina a partir de la integración de datos geológicos y geofísicos del subsuelo que incluyen: datos de perforación (pozos que interceptan al basamento), interpretaciones de sismica de reflexión, modelado de campos potenciales, interpretación de otros conjuntos de datos geofísicos (p. ej. magnetotélúricos), etc. El protocolo

(Beardsmore et al., 2010) considera rentable desarrollar nuevos modelos de profundidad a la cima del basamento siempre y cuando se disponga de los datos mencionados.

3.2.1. Recopilación, revisión, procesado e integración de la información existente

En México, gran parte de la información relacionada con la presencia y naturaleza del basamento cristalino en el subsuelo se restringe a las regiones o áreas con potencial y/o desarrollo petrolero y geotérmico, y esta ha sido generada mayormente por entidades como PEMEX, el IMP, la CFE, la UNAM y el Servicio Geológico Mexicano (SGM), entre otros. En muchos casos, el carácter confidencial de esta información limita su acceso y utilización, aunque parte de esta información ha sido publicada en la literatura abierta.

De este modo, se realizó una extensa búsqueda y revisión bibliográfica y cartográfica para obtener información de tipo geológico-geofísico que, de manera directa o interpretada, proporcionaran datos sobre el espesor de la cobertura sedimentaria y/o la profundidad a la cima del basamento cristalino en el país. Se hizo énfasis en datos publicados de pozos profundos, mapas y secciones geológicas, mapas y secciones geofísicas interpretadas, principalmente a partir de métodos potenciales y de sísmica de reflexión.

Se recopilaron y revisaron más de 350 artículos técnicos de revistas especializadas y memorias de congresos nacionales e internacionales, así como información de PEMEX, IMP, UNAM, tesis, etc. disponible en internet y a través de la Gerencia de Información Tecnológica (GIT) del INEEL. Además, se recurrió a la cartografía geológica y geofísica escala 1:250,000 del INEGI y del SGM. Otras fuentes de datos consultadas incluyeron mapas y modelos globales o regionales del espesor de la cobertura sedimentaria y la geometría o profundidad del basamento (p. ej. Laske y Masters, 1997).

Se integró toda la información recopilada considerada de utilidad (alfanumérica, vectorial y ráster) dentro de una base de datos geo-referenciada (BDG) con el fin de mantener la información ordenada, así como facilitar su consulta, procesamiento, y eventualmente, mapeo. De manera general, la información fue organizada en datos del basamento y datos de sedimentos. La primera incluye básicamente la profundidad o elevación a la cima del basamento cristalino y su litología, mientras que los segundos incluyen el espesor y la descripción de la secuencia sedimentaria (columnas lito-estratigráficas cortadas por pozos o interpretadas a partir de secciones geológicas o geofísicas).

3.2.2. Mapa de profundidad de la cima del basamento (espesor de sedimentos)

Se modeló la cima del basamento geológico en el subsuelo de la República Mexicana a partir de los datos geológicos y geofísicos disponibles de pozos, secciones y mapas. Todos los datos fueron referidos a una localización puntual determinada e integrados en un archivo (*shapefile*) de puntos en ArcGIS®. Estos puntos representan la localización geográfica del pozo o sondeo, o bien, el centroide de una celda 5' x 5' utilizada para referir espacialmente datos incluidos en determinada sección o mapa, vector o ráster, previamente digitalizada y geo-referenciada.

El número inicial de puntos con datos de profundidad de cima del basamento provenientes directamente de la información recopilada fue notablemente reducido, lo que aunado a su desigual distribución geográfica (mayor densidad en áreas petroleras y geotérmicas), hizo necesario inferir la probable cima del basamento en regiones con poca o ninguna información disponible. A fin de incrementar el número y mejorar la distribución de los puntos, por una parte, se extrapoló la información existente hacia zonas o celdas aledañas, mientras que en las áreas 'vacías' la cima del basamento se interpretó a partir del análisis cuidadoso de las características geológicas del subsuelo de la región o provincia correspondiente.

El protocolo sugiere qué en regiones sin datos de profundidad del basamento, la estimación del espesor de sedimentos podría determinarse incluso con base en su analogía con cuencas de edad similar en ambientes tectónicos semejantes. Resulta claro suponer que estas aproximaciones repercuten en una incertidumbre y una confianza relativamente baja en los resultados.

Con las consideraciones anteriores, una vez integrada la información directa e interpretada, se integró un nuevo *shapefile* conformado por 9,596 puntos. Utilizando los valores de profundidad a la cima de basamento en metros bajo el nivel del terreno (mbnt) y el método de interpolación de Distancia Inversa Ponderada (*IDW, Inverse Distance Weighted*) incluido en la extensión *Spatial Analyst* de ArcGIS®, se configuró un mapa de la profundidad de la cima del basamento en la República Mexicana.

La Figura 4 muestra la configuración de la profundidad de la cima del basamento representada mediante un mapa de contornos o curvas de nivel. El mapa se ha simplificado para efectos de visualización, mostrando únicamente las curvas correspondientes a los niveles de profundidad de 1000, 2000, 4000, 6000, 8000 y 10,000 mbnt. Las áreas en rojo representan afloramientos de rocas de basamento tomados de la carta geológica de INEGI escala 1:1,000,000 (INEGI, 2002). Con la excepción de sólo algunas pequeñas áreas, la mayor parte de los afloramientos de basamento quedan localizados dentro del contorno que representa el intervalo de 0 a 1000 m de profundidad.

En la Figura 5 se representa la profundidad de la cima del basamento mediante intervalos de color en un mapa ráster. Se muestran todos los intervalos de profundidad a cada 1000 m. El color rojo se utiliza para indicar que se trata del basamento cristalino. Los tonos más oscuros representan las zonas donde la cima del basamento se encuentra a mayor profundidad, superando en algunas áreas al noreste y sureste del país los 10 km.

La Figura 6 corresponde al mismo mapa anterior al cual se han sobrepuesto los principales alineamientos estructurales regionales (únicamente fallas y fracturas) incluidos en el Mapa Tectónico Digital de México, compilado por Padilla y Sánchez y colaboradores (UNAM, 2013). Esto con el propósito de comparar los resultados de nuestra configuración con la presencia de algunos rasgos estructurales mayores. Se observa la buena correspondencia entre algunos 'bajos' del basamento (áreas más oscuras) con algunas de las más importantes cuencas sedimentarias y tectónicas intra-continetales en las regiones noreste (cuenca de Burgos), sureste (cuencas de Veracruz y Terciarias del Sureste) y centro-occidente de México (grábens de Chapala, Colima y Tepic), así como en la península de Baja California (delta del Río Colorado y cuenca Purísima-Iray-Vizcaíno). También es notoria la profundización del basamento bajo la región que ocupa el Cinturón Volcánico Mexicano.

3.2.3. Distribución vertical y horizontal de bloques de basamento y sedimentos

Una vez configurada la cima del basamento y siguiendo el concepto del modelo simple de dos capas, se procedió a modelar la distribución vertical y horizontal tanto de los sedimentos (S) como del basamento (B) en la cuadrícula de 5' x 5', para cada intervalo de profundidad de 1 km. El resultado fue un modelo 3D conformado por 263,315 bloques de 5' x 5' x 1 km de espesor donde todos los bloques correspondientes al basamento se ubican por abajo del límite basamento-sedimentos, mientras que los bloques de sedimentos se encuentran encima de esta interfaz.

Dado el gran número de bloques que conforman el modelo completo, precisar de forma individual cuáles correspondían al basamento (B) o a los sedimentos (S) en cada uno de los 10 intervalos de profundidad representó una tarea más que compleja, la cual requirió de la aplicación de algunos procesos computacionales en ArcGIS® para hacerla de manera rápida y efectiva.

A grandes rasgos, a partir del mapa de configuración de la cima del basamento (Fig. 6) se realizó una conversión de datos de formato ráster a vectorial utilizando la herramienta de geo-procesamiento *Create Filled Contours* del módulo *Spatial Analyst* de ArcGIS®, dando como resultado que las áreas entre curvas de nivel (mostradas en las figuras 4 a 6) quedaran representadas como polígonos.

Esta operación nos permitió, mediante procesos más simples de superposición/intersección y selección por localización entre la malla de celdas 5' x 5' y los polígonos correspondientes a cada intervalo de profundidad de 1 km, identificar y seleccionar primeramente a las celdas de basamento (y sus correspondientes bloques), y subsecuentemente a las celdas/bloques de sedimentos. Una vez completado lo anterior, todas las celdas/bloques de basamento fueron asignadas automáticamente con el atributo B y las de sedimentos con el atributo S, siendo este el primer 'atributo geológico' asignado a cada celda/bloque.

La Figura 7 presenta un gráfico comparativo de los resultados de la determinación de bloques de basamento y sedimentos en cada intervalo de profundidad de 1 km, obtenidos a partir de la interpretación de la profundidad a la cima de basamento y de la distribución de celdas correspondientes a los 'sub-modelos' basamento y sedimentos. Se observa el incremento en la proporción de bloques de basamento con respecto a los de sedimentos conforme aumenta el intervalo de profundidad.

La Figura 8 incluye diez mapas que muestran la distribución de los bloques de basamento y sedimentos en el territorio continental de la República Mexicana en cada intervalo de profundidad considerado. En el primer mapa, correspondiente al intervalo comprendido entre la superficie (0 km) y 1 km de profundidad, la distribución de las celdas de basamento corresponde básicamente a la misma de los afloramientos de basamento mostrados en el mapa de la Figura 4. En los afloramientos la profundidad de la cima del basamento es cero (0 km), lo mismo que el espesor de sedimentos.

En ambas figuras se aprecia que los mayores 'saltos' o diferencias entre la proporción de bloques de basamento y sedimento ocurren en los primeros 5 km, donde se presentan incrementos promedio del 20% entre el número de bloques de basamento con respecto a los de sedimentos en cada intervalo de profundidad. Por abajo de los 5 km y hasta los 10 km de profundidad, la variación es muy pequeña (promedio <4%). A la profundidad de 5 km nuestro modelo indica que el 90% del territorio está constituido por rocas de basamento.

Es importante señalar que para efectos de nuestro modelado geológico, se tomó como base la clasificación litológica incluida en la cartografía digital geológica de INEGI escala 1:1,000,000. Las rocas correspondientes al 'sub-modelo' basamento incluyen rocas de las clases ígnea intrusiva y metamórfica de metamorfismo regional, mientras que las del 'sub-modelo' sedimento comprenden todas las rocas sedimentarias propiamente dichas, así como a las de las clases ígnea extrusiva (volcánicas), volcano-sedimentaria y metamórfica de contacto.

3.3. Atributos litológicos de bloques de basamento y sedimentos

Una vez definida la distribución 3D de los bloques 5' x 5' x 1 km correspondientes al basamento y a los sedimentos, se procedió a determinar la naturaleza geológica de cada uno de los bloques individuales. Para ello se desarrollaron mapas geológicos por clase y por tipo de roca para cada intervalo de profundidad en el subsuelo sobre la cuadrícula de celdas de 5' x 5', con base en los datos existentes y la interpretación de la información geológica disponible.

Inicialmente se efectuó la determinación de la litología de los bloques correspondiente a la porción del basamento dada la relativa simplicidad (homogeneidad) de la naturaleza geológica del basamento. Las rocas del basamento que en la superficie estaban originalmente mapeadas como rocas metamórficas de tipo regional, según la cartografía geológica de INEGI, se mantuvieron con su misma clase y tipo litológico hasta la profundidad de 4 km, mientras que a mayor profundidad los bloques de basamento fueron asignados con una litología correspondiente a rocas ígneas intrusivas de tipo granítico. Esta determinación tiene sustento en dos consideraciones:

- a) Para estimar el perfil de temperatura de la corteza a 10 km de profundidad, el protocolo asume que a una profundidad mayor a 4000 m la conductividad térmica del sedimento es igual que la del basamento. También supone que el basamento está constituido por una sola litología, de composición granítica, a menos que existan evidencias de lo contrario.
- b) Existen pocos datos publicados sobre la extensión del metamorfismo regional a profundidad, pero algunos trabajos reportan espesores estimados para algunas de las mayores secuencias metamórficas del país los cuales, en general, concuerdan con el criterio mencionado arriba. Por ejemplo, para el Complejo Metamórfico Acatlán, el cual constituye el basamento del Terreno Mixteco en el sur de México, Ortega-Gutiérrez (1978) y Dávalos-Álvarez (2006) reportan más de 3000 m de rocas metamórficas paleozoicas. Por otro lado, para el Complejo Oaxaqueño, Ortega-Gutiérrez (1981) estima un espesor de más de 10 km en su área-tipo en el centro de Oaxaca y menciona que el complejo está constituido por dos partes principales: una serie basal de anortosita bandeada, y una secuencia superior metamórfica compuesta principalmente por gneises y granulitas, que en conjunto alcanza espesores máximos de 2 km. En este mismo trabajo, el autor define informalmente al 'Complejo Tierra Caliente' como constituido mayormente por una secuencia metamórfica de bajo grado (facies de esquistos verdes), al cual le estima un espesor de 4 km.

Esta simplificación litológica facilitó la asignación de atributos litológicos a los bloques de basamento y aceleró de manera notable el desarrollo del modelo completo, ya que de acuerdo a los resultados el 72% de los bloques corresponde al basamento y el restante 28% a sedimentos. No obstante, para el 'sub-modelo' sedimento, aunque con menor número de bloques, se requirió invertir una mayor cantidad de tiempo para la búsqueda, interpretación y asignación de atributos geológicos debido a la mayor complejidad y heterogeneidad de la cobertura sedimentaria, e hizo necesario establecer algunos criterios para simplificar su litología.

Dada esta gran complejidad, y por razones de tiempo, para el 'sub-modelo' geológico del sedimento se determinó asignar a cada bloque de 5' x 5' x 1 km una litología predominante o representativa en cada intervalo de profundidad, tomando como base la clasificación de rocas, por clase y por tipo, empleada en la cartografía geológica de INEGI escala 1:1,000,000. No obstante, en un alto número de bloques con alta heterogeneidad litológica, donde se detectó la presencia de varios tipos de roca en un espesor o intervalo de 1 km, se optó por considerar una litología bimodal, es decir, constituida hasta por dos tipos de roca interpretados como los predominantes.

Un sustento para esta consideración es que en varios de los documentos bibliográficos revisados, así como en la cartografía de INEGI y el SGM, la litología comúnmente es reportada o descrita como una asociación de dos (y a veces más) tipos de roca, siendo esto más frecuente en el caso de las rocas sedimentarias. Ejemplos típicos son: caliza-lutita, caliza-yeso, lutita-arenisca, arenisca-conglomerado, etc. Un ejemplo real ocurre en la cuenca del Golfo de México, donde un alto número de pozos petroleros han atravesado potentes intervalos sedimentarios constituidos por alternancias de lutitas y areniscas (secuencias tipo flysch), intercalaciones de calizas-lutitas, calizas-evaporitas, siendo estas

asociaciones comúnmente encontradas en ambientes sedimentarios marinos del Jurásico-Cretácico y Terciario.

No debe dejar de mencionarse que esta interpretación y síntesis de la litología ‘más representativa’ para cada bloque individual en cada intervalo de 1 km de espesor tuvo que hacerse de manera cuidadosa, tratando de apegarse lo más posible a la información obtenida de la literatura y disponible en nuestra BDG, lo cual repercutió en el tiempo empleado en el desarrollo del modelo geológico completo. Por otro lado, no se soslaya la incertidumbre inherente a nuestra interpretación de la geología del subsuelo, particularmente en las áreas con poca o nula información de referencia, donde prácticamente fue necesario interpretar o inferir la secuencia sedimentaria desde la superficie hasta los 10 km de profundidad.

Los mapas de las figuras 9 y 10 muestran el resultado de la interpretación y modelado geológico de la secuencia sedimentaria y del basamento a profundidad en los diez intervalos de profundidad considerados en el modelo. La Figura 9 muestra la distribución de rocas de acuerdo a su clase litológica, donde puede observarse la variación de la proporción entre las distintas clases litológicas conforme se avanza en profundidad. A partir del intervalo de profundidad 4-5 km ya no aparecen rocas metamórficas en el basamento (color morado), y abajo del intervalo 5-6 km ya no hay presencia de rocas volcánicas (tonos ocre-naranjas), únicamente se observan rocas ígneas intrusivas y sedimentarias propiamente dichas. Los mapas pertenecientes a los intervalos de profundidad entre 6 a 10 km son prácticamente iguales a sus correspondientes en la Figura 8.

La Figura 10 muestra el resultado de la asignación litológica a cada bloque de 5' x 5' x 1 km del modelo completo basamento-sedimentos interpretado en términos del tipo de roca empleado en la geología-base de INEGI escala 1,000,000. La distribución de rocas en el primer intervalo de profundidad (0-1 km) se deriva en buena parte del mapa geológico superficial base de INEGI, pero a diferencia de este, los tonos amarillos no representan depósitos de aluvión o suelos, ya que en general estos son considerados de poco espesor y solo se encuentran en los niveles más superficiales de la secuencia sedimentaria.

Se puede apreciar cómo a medida que se avanza en profundidad la porción de sedimentos disminuye y, en algunas áreas, los contactos entre diferentes litologías muestran cambios muy marcados entre sí, dando un efecto ‘pixelado’ en los mapas. Estos contrastes se deben tanto a la limitada información espacial originalmente disponible sobre la litología, como al número de tipos litológicos empleados, así como también a los colores empleados para representar los distintos tipos de roca.

3.4. Propiedades térmicas y físicas de bloques de basamento y sedimento

Como se comentó al inicio de este texto, el protocolo asume que la conducción es el mecanismo dominante de transferencia de calor a través de la corteza. Bajo este supuesto, la temperatura puede predecirse a cualquier profundidad arbitraria para una estructura dada de flujo calor superficial, conductividad térmica y generación de calor. En sentido general, el gradiente térmico promedio equivale a dividir el flujo de calor en la superficie entre la conductividad térmica vertical promedio. No obstante, la tendencia del gradiente se modifica a profundidad por la influencia de la generación interna de calor en los sedimentos y en el basamento. La generación de calor es una propiedad que está estrechamente vinculada al contenido de arcilla en los sedimentos, mientras que en las rocas del basamento está más influenciada por el tipo de roca de que se trate.

Dentro de los sedimento, la estimación de la temperatura requiere fijar valores únicos de conductividad térmica vertical y generación de calor para toda la sección sedimentaria. Estos valores

se derivan de las propiedades térmicas de las formaciones individuales, las cuales varían a través de la secuencia sedimentaria de acuerdo a la litología, compactación y temperatura de dichas formaciones. Es por esta razón que el marco estratigráfico y litológico general de cada región debe ser conocido o inferido, lo cual ratifica la necesidad del desarrollo del presente modelo geológico.

El protocolo recomienda adoptar valores publicados de conductividad térmica y generación de calor para una región dada, cuando estos estén disponibles. Sin embargo, tanto a nivel global como en nuestro país hay muy pocas mediciones registradas de propiedades térmicas de rocas. En ausencia de datos específicos, el protocolo sugiere estimar la conductividad térmica de las rocas a partir de compilaciones de datos publicados para rocas de litología y edad afines, y sólo para el caso de los sedimentos, de profundidad de enterramiento similar (p. ej. Schön, 1996, en Beardsmore et al., 2010).

En caso de no contar con datos litológicos específicos, la recomendación del protocolo es asumir valores de conductividad media basados en compilaciones globales de datos medidos (p. ej. Clauser, 2006, en Beardsmore et al., 2010). Como se comentó en el apartado anterior, el protocolo supone una litología granítica para el basamento, así como que la conductividad térmica de los sedimentos es igual a la del basamento a profundidades mayores de 4000 m.

De acuerdo a lo anterior, se efectuó una búsqueda de propiedades termo-físicas para las distintas clases y tipos de rocas incluidas en nuestro modelo geológico. A partir de la revisión de una veintena de documentos bibliográficos, se obtuvieron valores de conductividad térmica, generación de calor, densidad y calor específico para 64 tipos de roca o variedades litológicas, 46 correspondientes a la cobertura sedimentaria y 18 al basamento. La Tabla 1 presenta los valores de estas propiedades para algunas de las variedades litológicas más representativas incluidas en la cartografía-base de INEGI y en nuestro modelo geológico.

Tabla 1. Propiedades termo-físicas para distintas variedades de rocas de sedimento y basamento.

Tipo de roca	K_s (W/m ² K)	K_b (W/m ² K)	A_s (W/m ³)	A_b (W/m ³)	DENSIDAD (kg/m ³)	Cp (J/kg ² K)	Capa (S/B)
Arenisca	2.80		1.27E-06		2643	1004.80	S
Arenisca-Conglomerado	3.00		2.30E-06		2687	1322.40	S
Arenisca-Limolita	2.35		1.54E-06		2597	937.40	S
Caliza	2.95		6.20E-07		2603	921.10	S
Caliza-Arenisca	2.88		9.45E-07		2623	962.95	S
Caliza-Lutita	2.51		2.36E-06		2564	1050.55	S
Caliza-Yeso	2.11		6.00E-07		2444	965.55	S
Conglomerado	3.20		1.00E-06		2730	1640.00	S
Cuarcita		6.05		3.20E-07	2563	837.40	B
Esquisto		3.30		3.15E-06	2964	800.00	B
Gneis		2.85		2.40E-06	2684	921.10	B
Ígnea extrusiva ácida	3.08		4.10E-06		2375	710.00	S
Ígnea extrusiva básica	1.82		6.30E-07		2800	1230.00	S
Ígnea extrusiva intermedia	2.70		1.90E-06		2563	815.00	S
Ígnea intrusiva ácida		2.85		3.00E-06	2723	879.20	B
Ígnea intrusiva básica		2.60		3.30E-07	2963	753.60	B
Ígnea intrusiva intermedia		2.70		1.10E-06	2850	1000.00	B
Limolita	1.90		1.80E-06		2550	870.00	S
Limolita-Lutita	1.99		2.95E-06		2538	1025.00	S

Lutita	2.07	4.10E-06	2525	1180.00	S
Lutita-Arenisca	2.44	2.69E-06	2584	1092.40	S
Sal	5.60	1.20E-08	2122	837.40	S
Yeso	1.26	1.00E-06	2285	1010.00	S

La conductividad térmica y la generación de calor se emplearon efectivamente para estimar el perfil de temperatura en la corteza, en tanto que la densidad y el calor específico se utilizaron eventualmente para los cálculos del calor disponible (energía térmica) en cada bloque, en cada intervalo de profundidad.

La asignación de estas propiedades a todos y cada uno de los bloques se realizó de manera automatizada mediante relaciones entre tablas asociando las propiedades mencionadas al tipo de roca correspondiente en cada bloque, según se definió en el apartado 3.3. Las propiedades de cada bloque se pueden consultar y visualizar dentro de los mapas geológicos por tipo de roca generados en ArcGIS® que se muestran en la Figura 10.

En la Figura 11 se ilustra, a manera de ejemplo, el resultado de la asignación de propiedades térmicas y físicas a dos diferentes bloques correspondientes al basamento y a los sedimentos, respectivamente, en distintos niveles de profundidad.

4. Resultados

Los principales resultados o productos obtenidos con el desarrollo del presente trabajo fueron:

- Un mapa de contornos de la profundidad a la cima del basamento que comprende toda la República Mexicana, el cual permitió definir el espesor de la cubierta sedimentaria y el límite sedimento-basamento para nuestro modelo geológico.
- Un modelo geológico 3D de la corteza continental a nivel nacional en los términos establecidos en el protocolo, es decir, hasta 10 km de profundidad e implementado en bloques de 5' de latitud x 5' de longitud x 1 km de espesor. El modelo incluye información sobre la litología (clase y tipo de roca) representativa o predominante para cada uno de los 263,150 bloques que integran las diez capas del modelo (26,315 bloques por cada intervalo de 1 km).
- Una base de datos de propiedades termo-físicas de rocas (conductividad térmica, generación de calor, densidad y calor específico) para 64 variedades litológicas, 46 correspondientes a rocas de los sedimentos y 18 al basamento, incluidas en la cartografía geológica de INEGI escala 1:1,000,000, que se emplearon para modelar el perfil de temperatura en la corteza y estimar el calor disponible (energía térmica) en cada bloque, en cada intervalo de profundidad del modelo.

Es relevante mencionar que dentro del alcance del proyecto P07 del CeMIE-Geo se contempla realizar una actualización de la información lo cual permitirá, eventualmente, afinar o mejorar los resultados de nuestro modelado geológico, y consecuentemente de la estimación de la temperatura, flujo de calor y calor disponible de la corteza terrestre hasta una profundidad de 10 km. Esto finalmente repercutirá en mejores resultados de la estimación del potencial teórico y técnico de los SGM en México. Para ello, es recomendable la búsqueda de nueva información publicada y bases de datos de dominio público, así como buscar el acceso a datos y/o modelos de profundidad al basamento (o espesor de sedimentos) desarrollados por agencias gubernamentales o empresas de exploración de petróleo, cuyo acceso normalmente es restringido.

5. Conclusiones

En este trabajo se han descrito la metodología y resultados del desarrollo de un modelo geológico simplificado de la corteza continental a 10 km de profundidad, el cual fue implementado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y constituyó la base para llevar a cabo la primera evaluación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Generados (SGM) en México.

La conformación del modelo involucró dividir el país en una malla regular de celdas de 5' de latitud x 5' de longitud. Posteriormente, con base en la información geológico-geofísica obtenida de la literatura, se mapeó el espesor promedio de la cubierta sedimentaria a partir de una estimación de la profundidad de la cima del basamento. Una vez definido el límite sedimentos-basamento, se procedió a integrar el modelo geológico 3D basamento-sedimentos, desde la superficie hasta 10 km de profundidad.

El resultado final fue la conformación de un modelo constituido por 26,315 'columnas litológicas representativas' (una por cada celda) y 263,150 bloques de 5' de latitud x 5' de longitud x 1 km de espesor, cada uno individualmente asignado con atributos relacionados a sus características litológicas y sus correspondientes propiedades termo-físicas: conductividad térmica, generación de calor, densidad y calor específico.

En el contexto de nuestro proyecto, el desarrollo del presente modelo permitió caracterizar la estructura geológica y térmica en los niveles más someros de la corteza continental mexicana. Hasta donde se sabe, el modelo geológico aquí presentado, incluidos mapas y base de datos que lo sustentan, constituye el primero de su tipo y alcance en el país.

Consideramos que nuestro modelo, con sus particularidades y limitaciones, y siendo susceptible de perfeccionarse, puede representar un aporte útil a las geociencias en México y constituir un punto de partida para, eventualmente, conformar un modelo sedimentos-basamento de todo el país, que tenga utilidad práctica tanto en el ámbito académico como en el industrial.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) y al CONACyT por su apoyo institucional y económico para la realización de este trabajo.

Referencias

Beardsmore, G., L. Rybach, D. Blackwell, and C. Baron C., 2010. A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential. *Geothermal Resources Council Transactions*, 34, pp. 301-312.

Dávalos-Álvarez, O.G., 2006. Evaluación Tectónica Cenozoica en la porción Norte de la Falla de Oaxaca. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias UNAM, Juriquilla, Querétaro, 123 p. Inédito.

ESRI (Environmental Systems Research Institute), 2013. ArcGIS© v. 10.2. Redlands, CA, USA.

- Iglesias, E.R., J.I. Martínez-Estrella, R.J. Torres, R. Lira-Argüello, N. Reyes-Picasso, A. Paredes-Soberanes, R.J. González-Reyes, I. López-Blanco, M.F. Morales-Reyes, R.M. Prol-Ledesma, O.M. Espinoza-Ojeda, B. Román-Fernández y K. Romero Santiago, 2014. Estimación del Potencial de Generación Eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México: Reporte Etapa No. 1, Proyecto CeMIE-Geo P07, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, 76 p. Inédito.
- Iglesias, E.R., J.I. Martínez-Estrella, R.J. Torres, S. López-Blanco, R. Lira-Argüello, N. Reyes-Picasso, A. Paredes-Soberanes, R.J. González-Reyes, M.F. Morales-Reyes, R.M. Prol-Ledesma, O.M. Espinoza-Ojeda, B. Román-Fernández, K. Romero Santiago, V.N. Cedillo-Vallejo y J.E. Juárez-Hernández, 2015. Estimación del Potencial de Generación Eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México: Reporte Etapa No. 2, Proyecto CeMIE-Geo P07, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, 124 p. Inédito.
- Iglesias E.R., J.I. Martínez-Estrella, S. López-Blanco, R.J. Torres, A. Paredes-Soberanes, N. Reyes-Picasso, I. González-Reyes, R.M. Prol-Ledesma, O.M. Espinoza-Ojeda, N.G. Robles-Trigueros, J.E. Juárez-Hernández, V.N. Cedillo-Vallejo, R. Lira-Argüello y M.F. Morales-Reyes, 2016. 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 de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México, 190 p. Inédito.
- Iglesias, E.R., S. López-Blanco, R.J. Torres, J.I. Martínez-Estrella, A. Paredes-Soberanes, N. Reyes-Picasso, I. González-Reyes, I. Romano-Vázquez, R.M. Prol-Ledesma, O.M. Espinoza-Ojeda, y L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 2016. 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*, IIE/11/14619/I 03/P/DC, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), Cuernavaca, Morelos, México, 198 p. Inédito.
- INEGI, 2002. Conjunto de datos vectoriales geológicos escala 1:1 000 000, disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/infoescala.aspx>
- INEGI, 2010. Compendio de criterios y especificaciones técnicas para la generación de datos e información de carácter fundamental; 06. Cartografía; 06.1 División y Nomenclatura de los Conjuntos de Datos Espaciales por Escala. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, Dirección General Adjunta de Información Geográfica Básica, 14 p.
- INEGI, 2013. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>
- Laske, G. and G.A. Masters, 1997. Global Digital Map of Sediment Thickness, *EOS Trans. AGU*, 78, F483, 1997 <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/sediment.html#ftp>.
- 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.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1978. Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estado de Puebla y Oaxaca. *Revista Instituto de Geología*, v. 2, no. 2, pp. 112-131.

Ortega-Gutiérrez, F., 1981, Metamorphic belts of southern México and their tectonic significance. *Geofísica Internacional*, v. 20, no. 3, pp. 177-202.

UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), 2013. *Tectonic Map of Mexico 2013*. Compiler: Padilla y Sánchez, R.J.; collaborators: Domínguez Trejo, I., López Azcárraga, A.G., Mota Nieto, J., Fuentes Menes, A.O., Rosique Naranjo, F., Germán Castelán, E.A. and Campos Arriola, S.E. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Mexico.

FIGURAS EN PÁGINAS SIGUIENTES

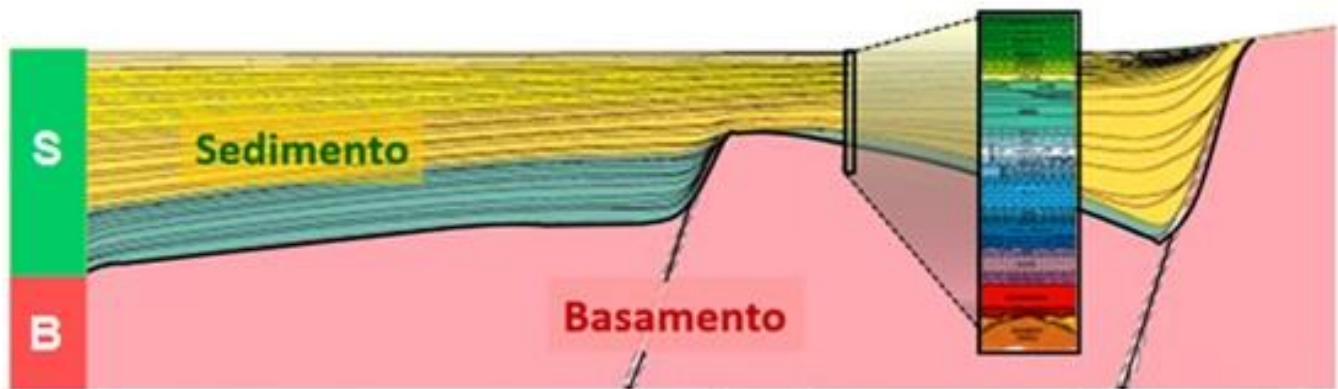


Fig. 1. Representación esquemática del modelo simple basamento-sedimento. El sedimento es más heterogéneo que el basamento. La profundidad a la cima del basamento define el espesor del sedimento en un área dada.

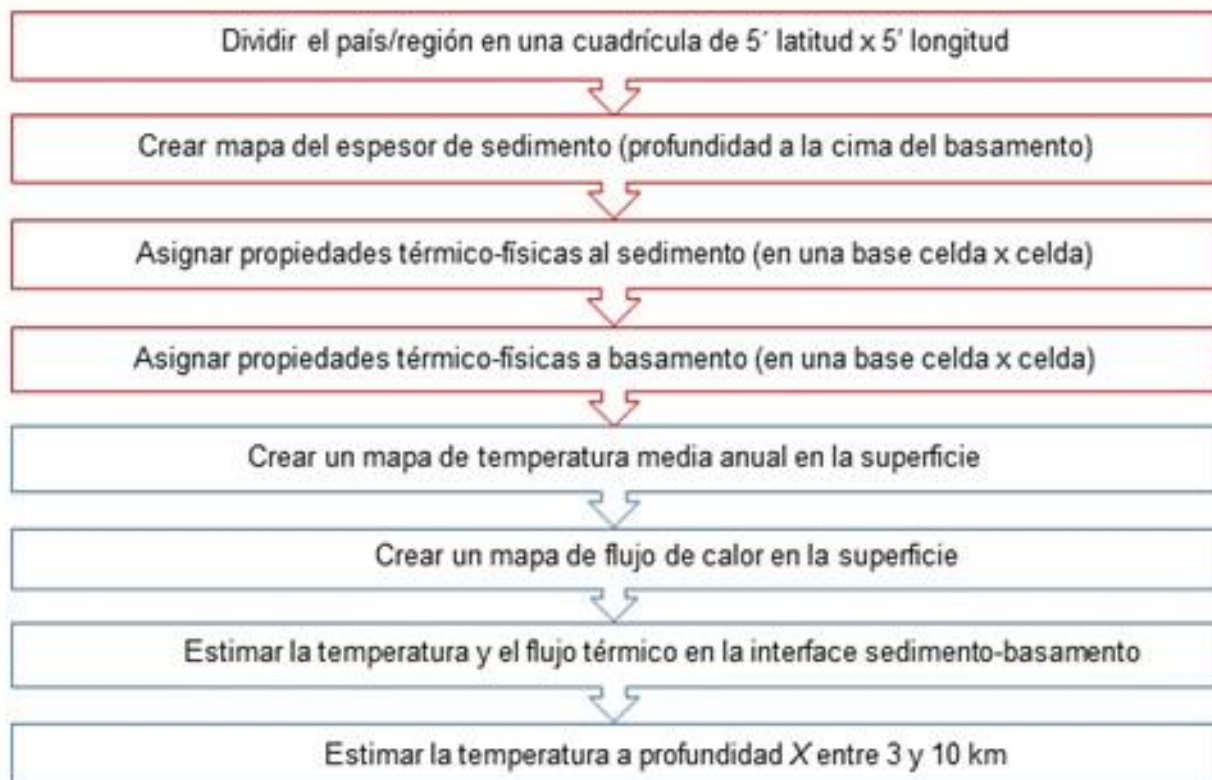


Fig. 2. Proceso general para estimar el perfil de temperatura de la corteza a 10 km de profundidad (tomado de Beardsmore et al., 2010).

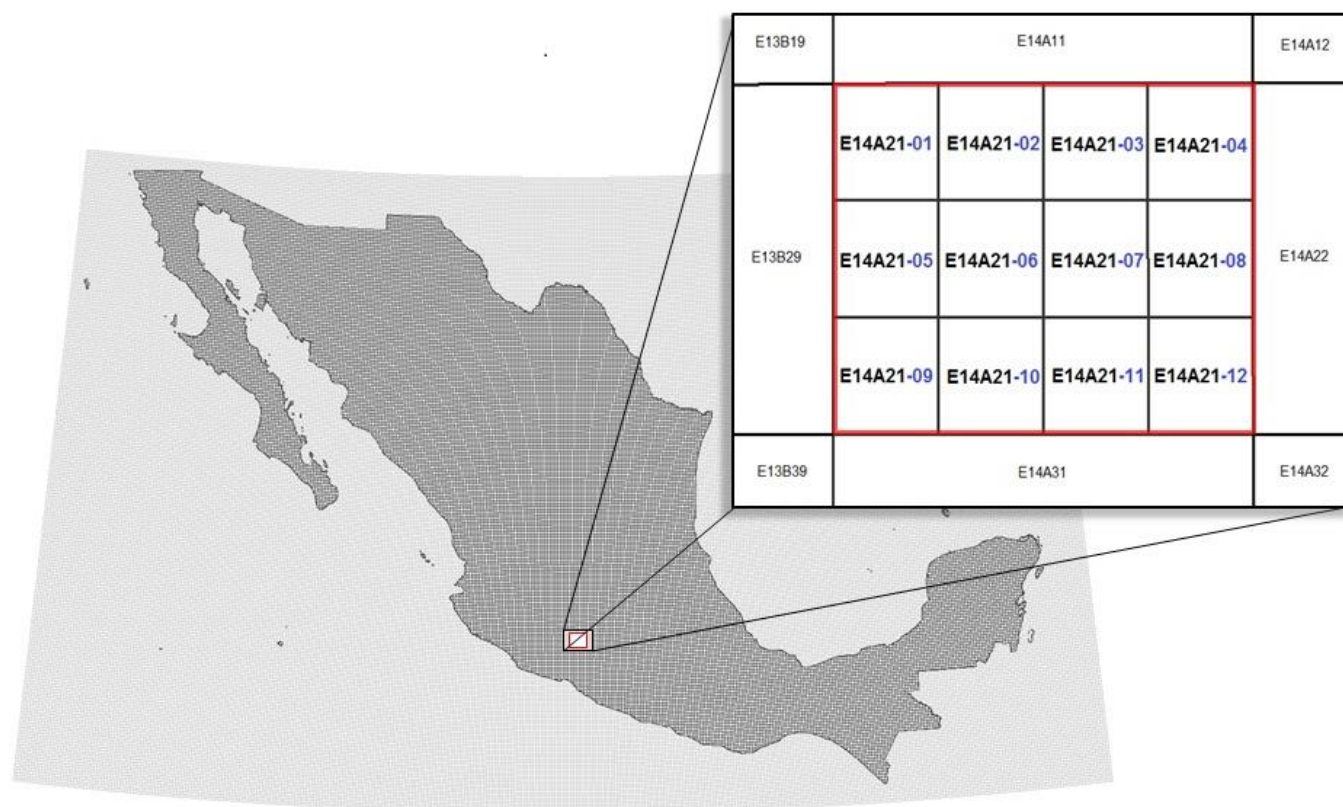


Fig. 3. Cuadrícula con resolución de 5' de latitud x 5' de longitud dentro de los límites de la República Mexicana y nomenclatura para identificación de celdas.

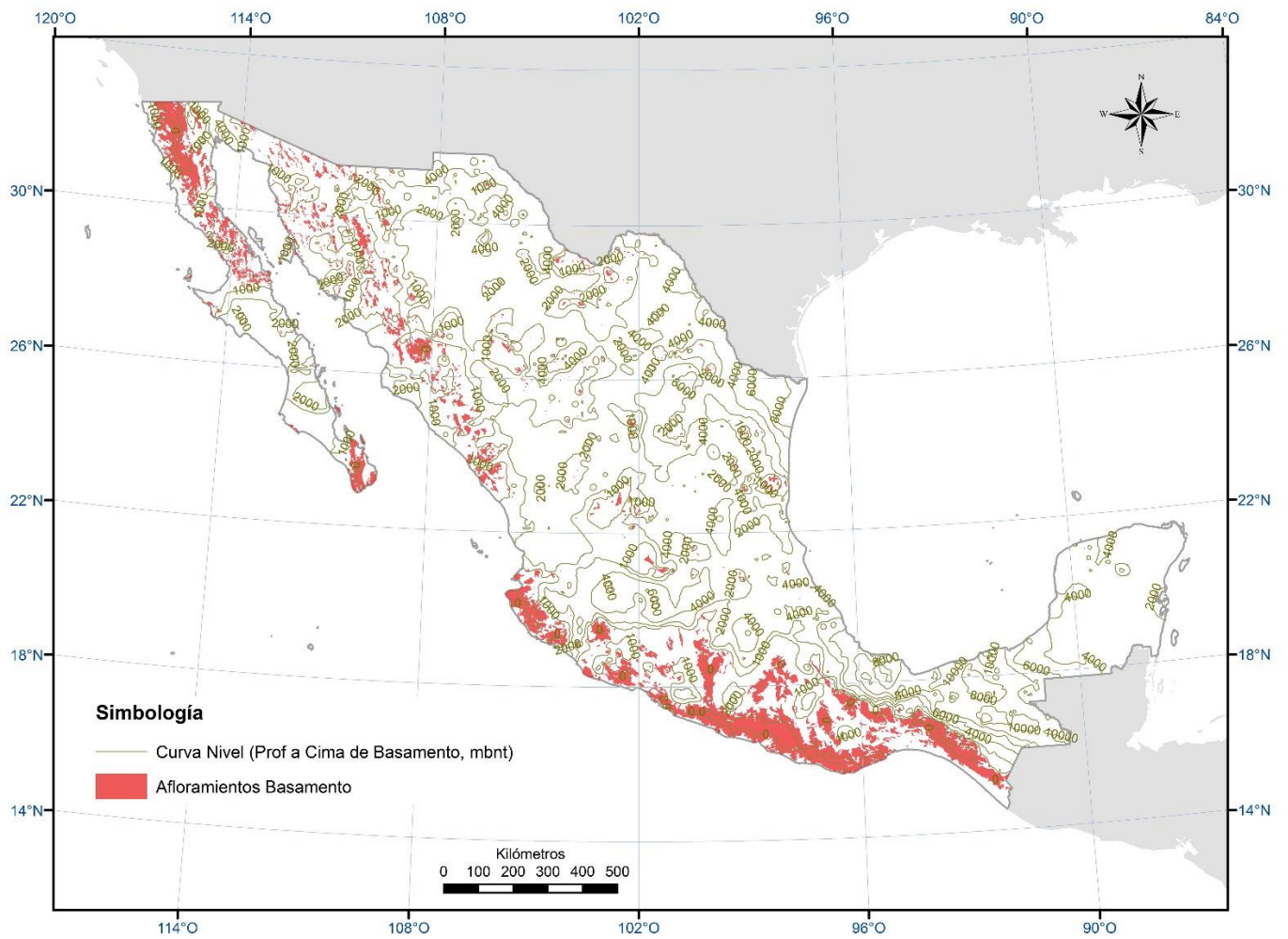


Fig. 4. Profundidad a la cima del basamento representada con contornos o curvas de nivel.

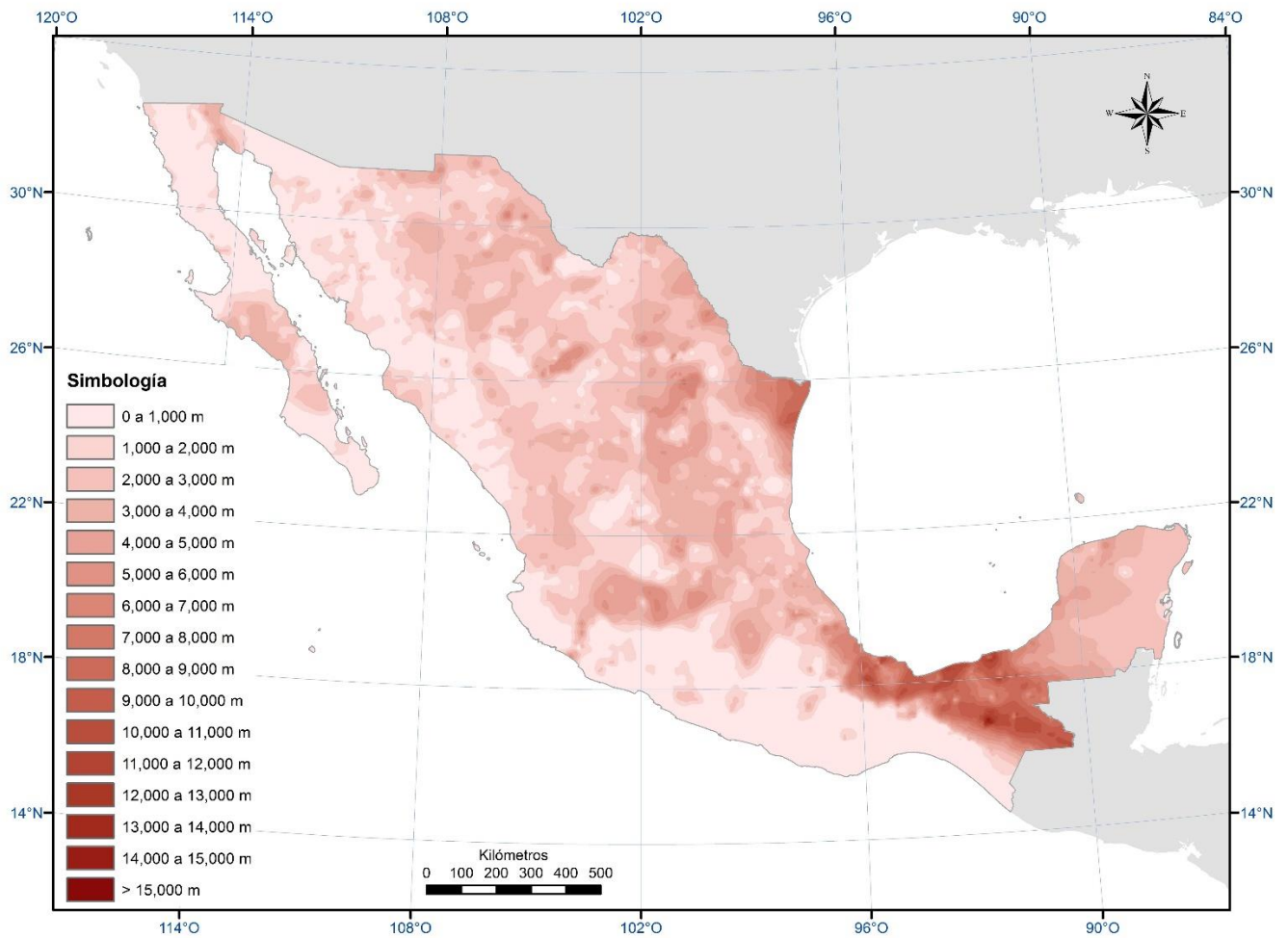


Fig. 5. Profundidad a la cima del basamento representada mediante intervalos de color.

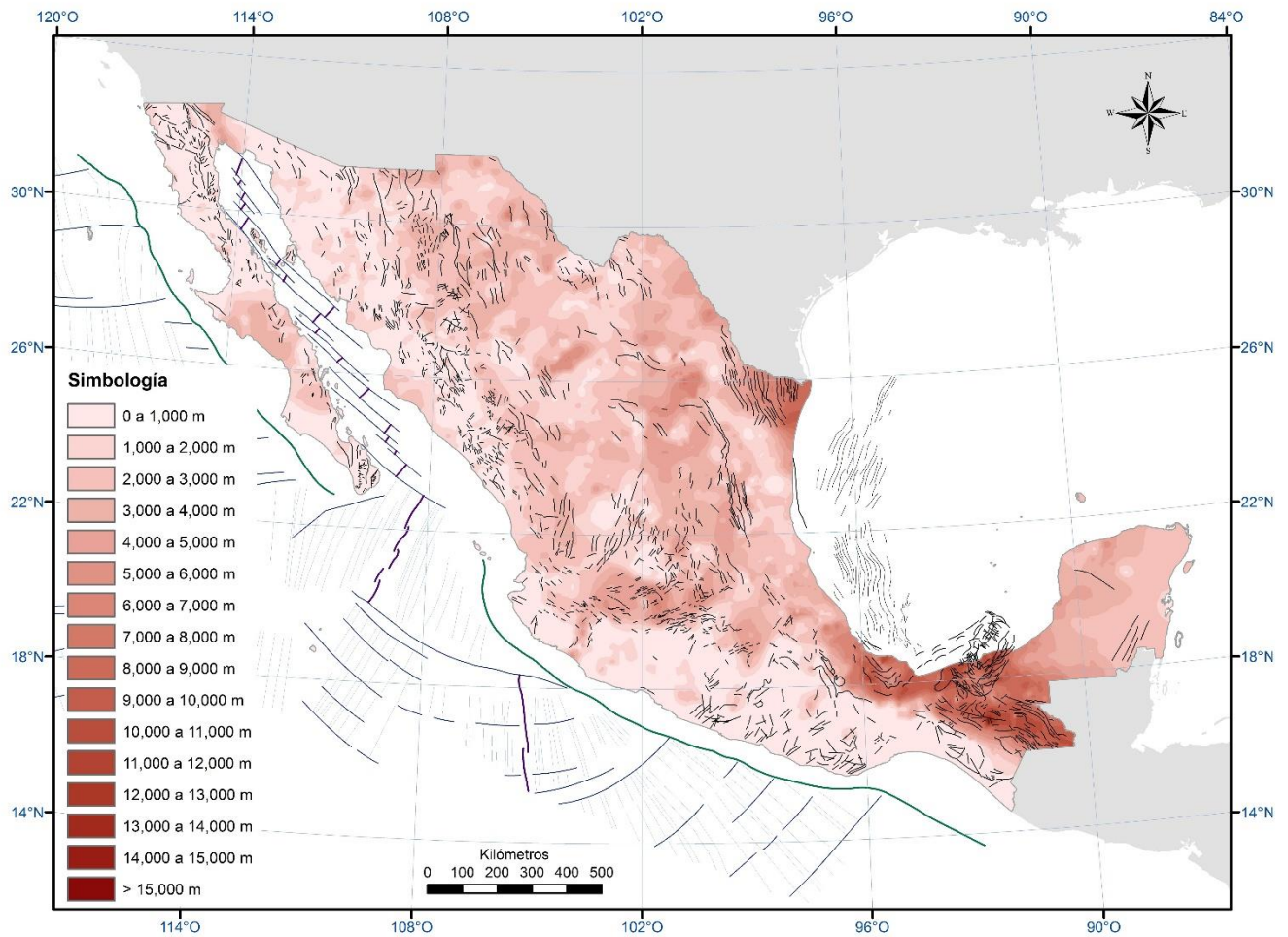


Fig. 6. Profundidad a la cima del basamento y alineamientos estructurales mayores (únicamente fracturas y fallas). Tomado de Mapa Tectónico Digital de México compilado por Padilla y Sánchez y colaboradores (UNAM, 2013).

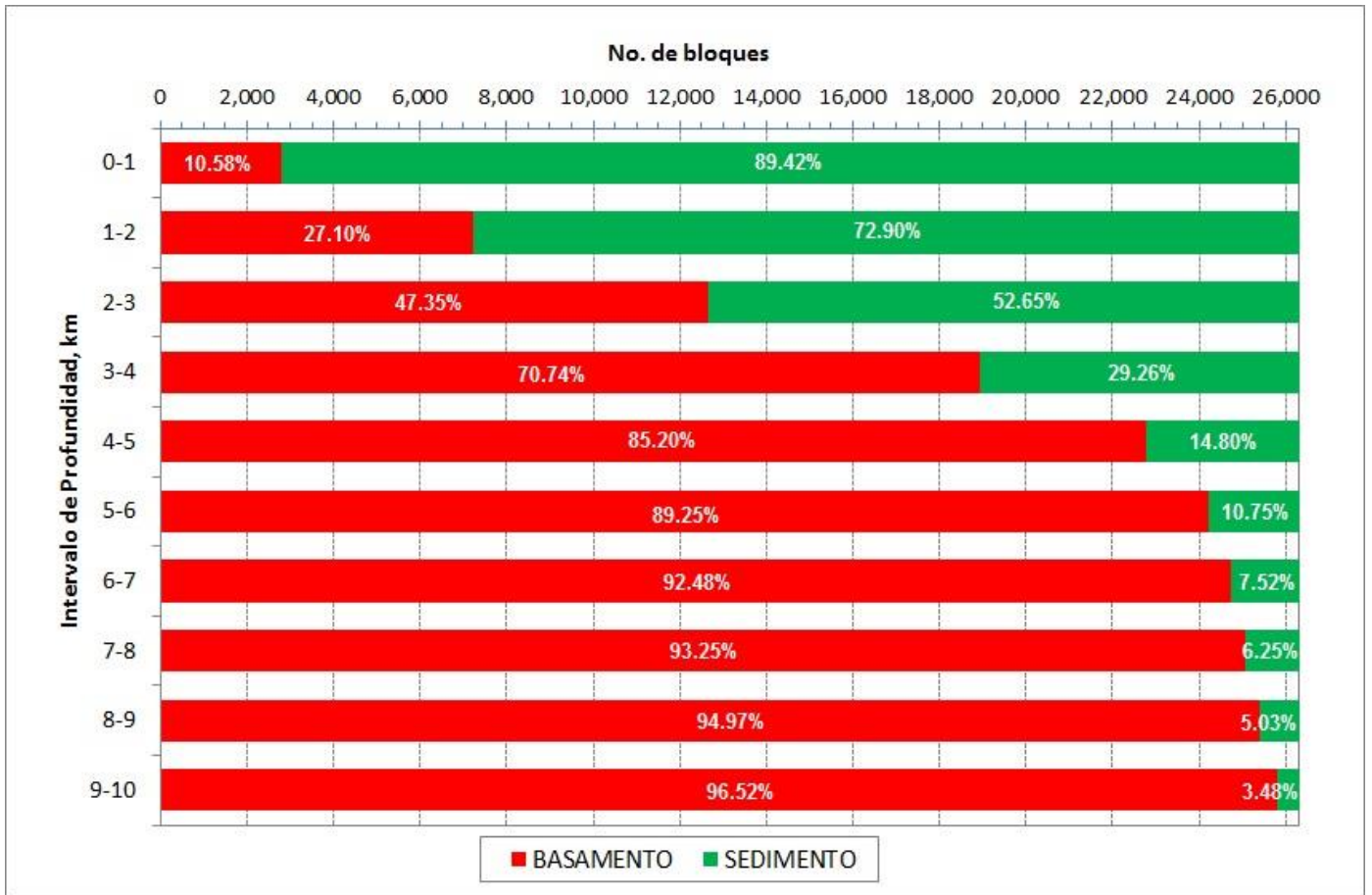


Fig. 7. Comparativo del número de bloques de basamento y de sedimentos en el modelo por cada intervalo de profundidad.

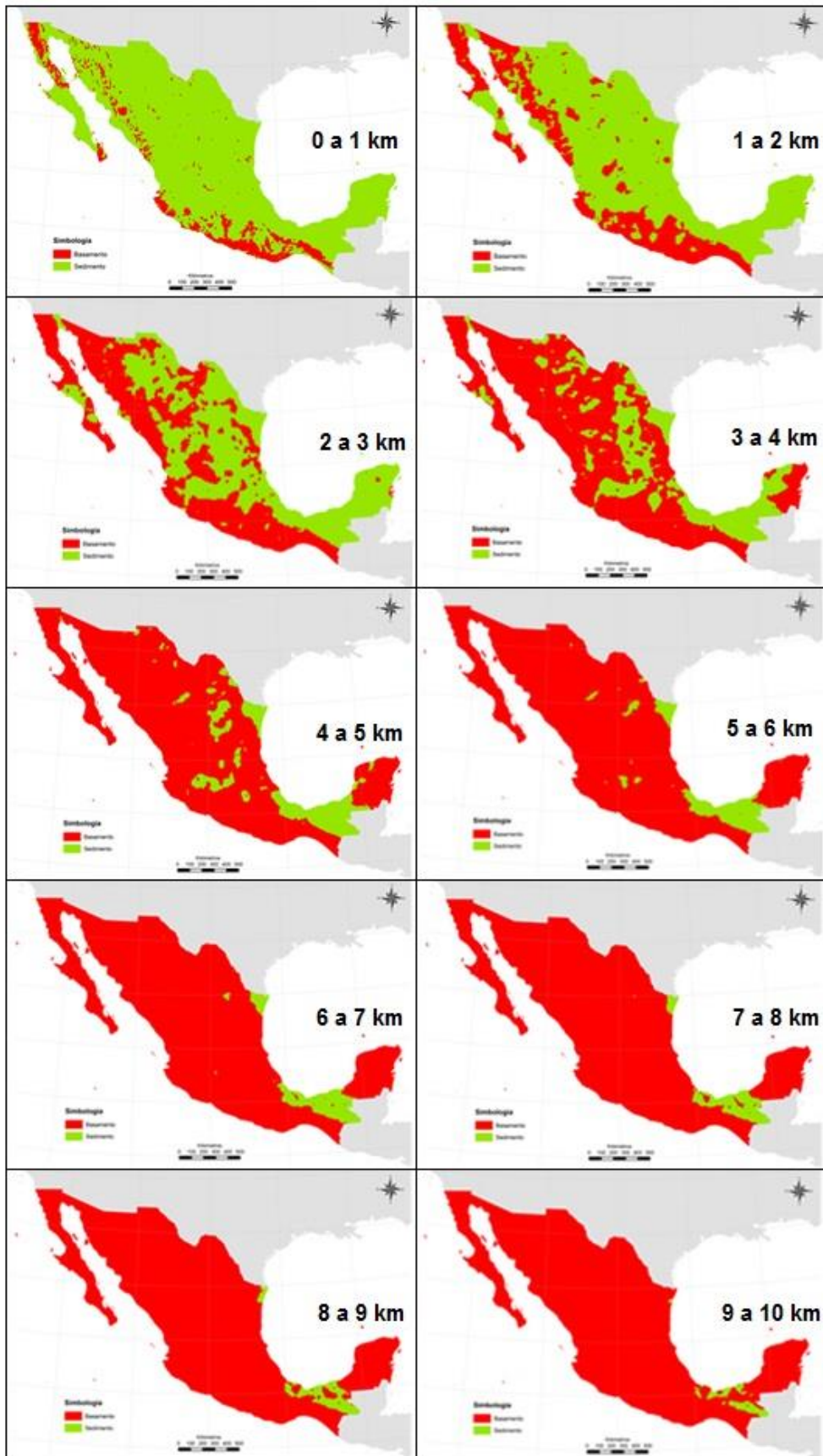


Fig. 8. Distribución de bloques de basamento y sedimento en cada intervalo de profundidad.

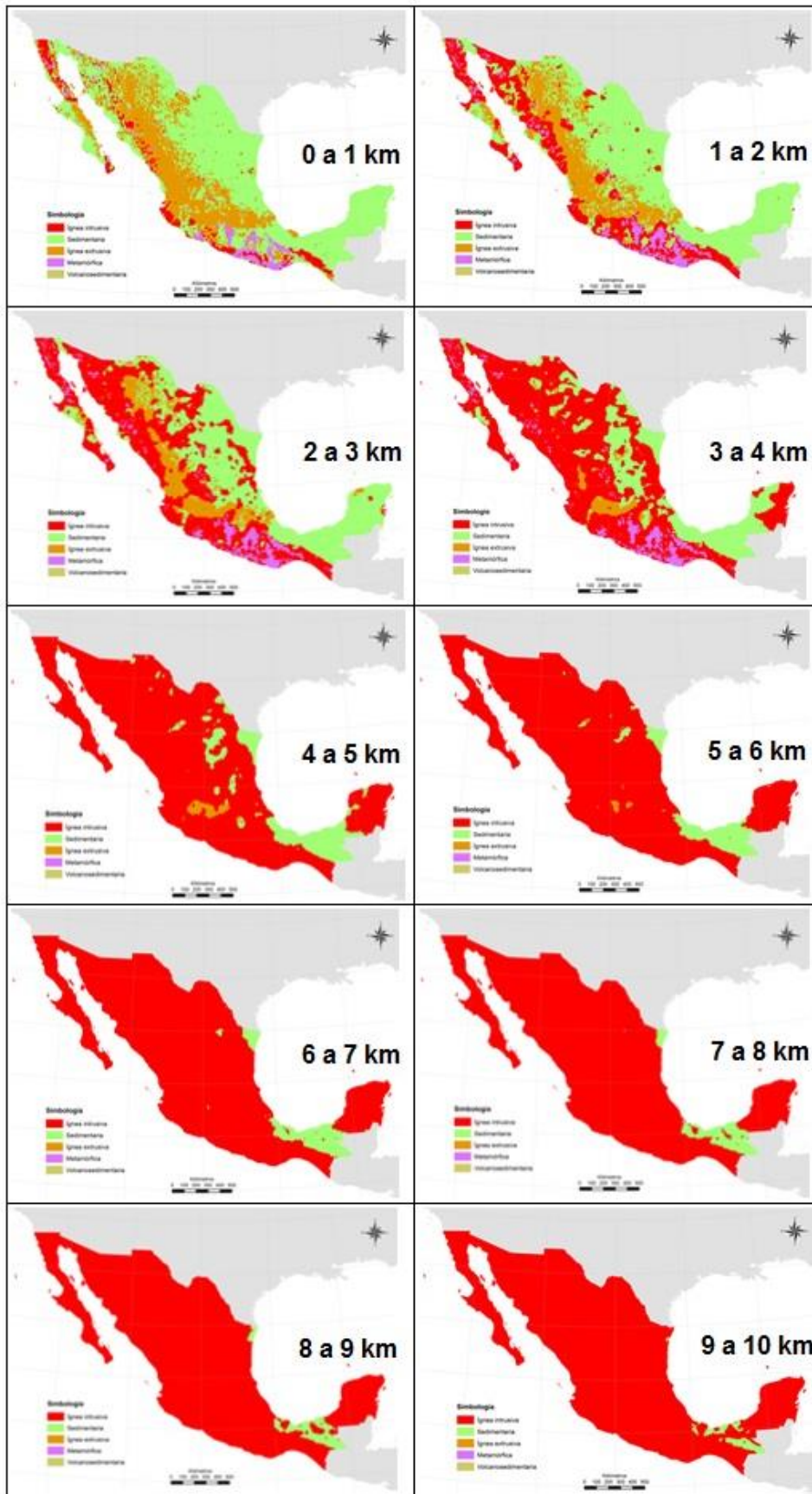


Fig. 9. Distribución de bloques por clase de roca en cada intervalo de profundidad.

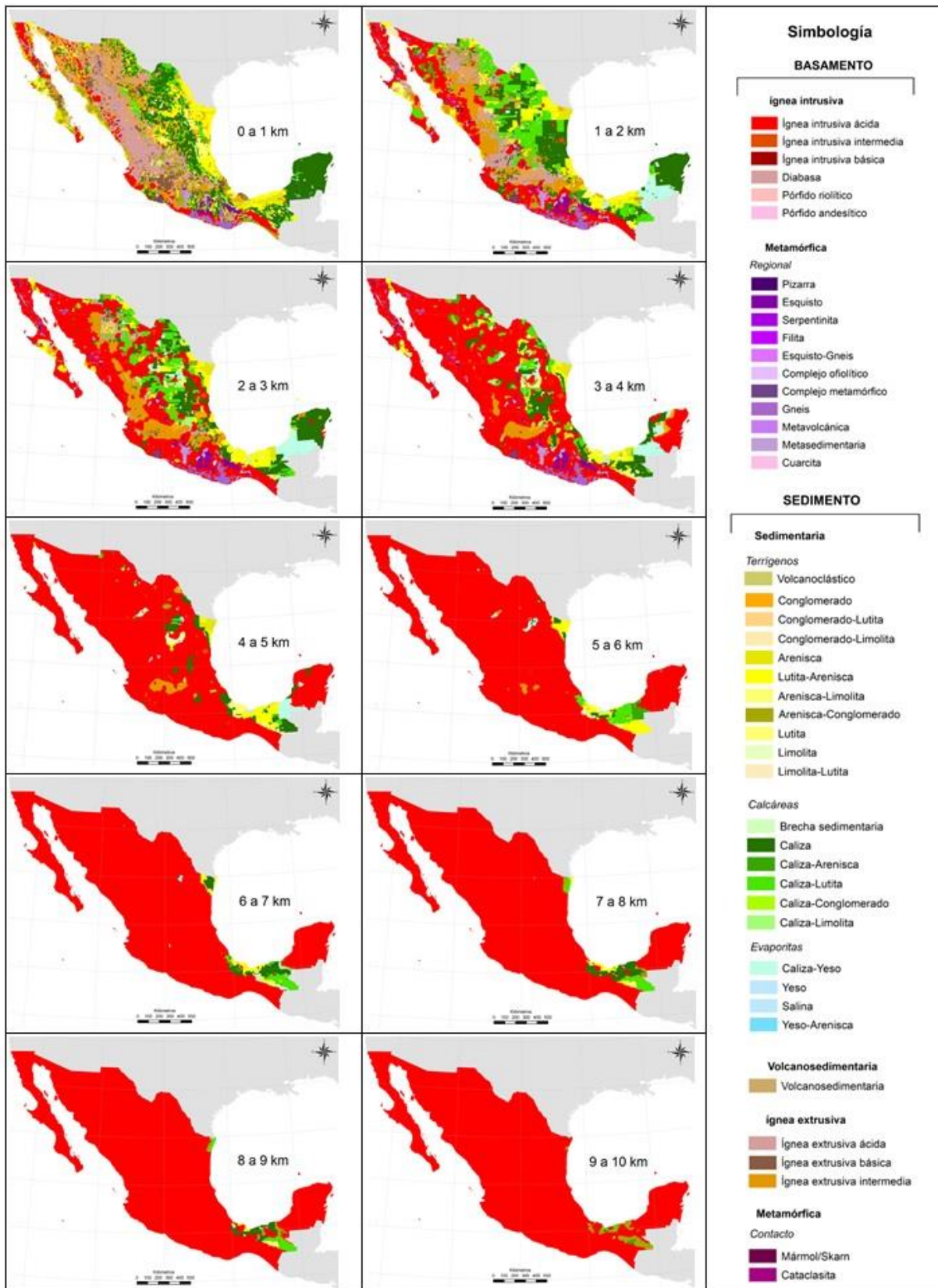


Fig. 10. Distribución de bloques por tipo de roca en cada intervalo de profundidad.

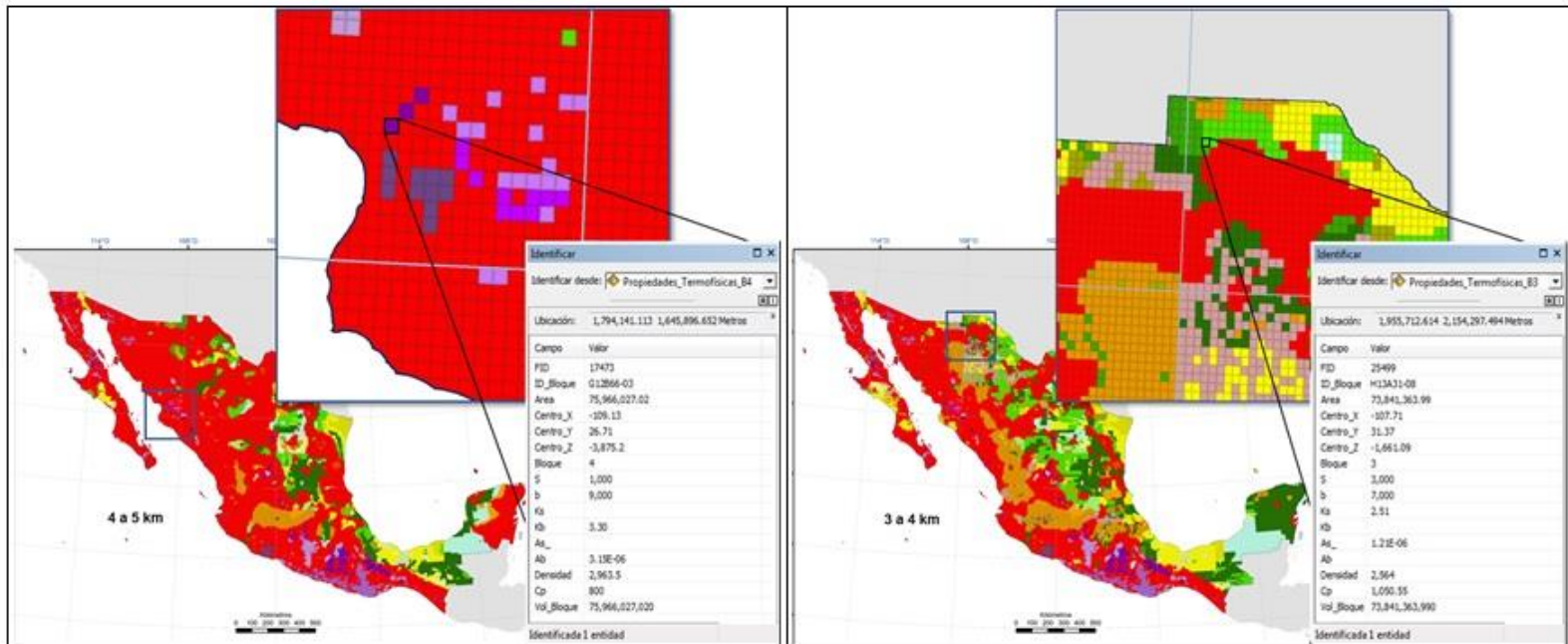


Fig. 11. Propiedades termo-físicas de rocas de bloques de basamento y sedimento vistas a través del modelo geológico implementado en ArcGIS®.