

## Avances en la estimación del potencial de generación eléctrica de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM) en México

E.R. Iglesias<sup>1</sup>, J.I. Martínez-Estrella<sup>1</sup>, R.J. Torres<sup>1</sup>, R. Lira-Argüello<sup>1</sup>, A. Paredes<sup>1</sup>, N. Reyes Picasso<sup>1</sup>, M.F. Morales Reyes<sup>1</sup>, I. González Reyes<sup>1</sup>, S. López Blanco<sup>1</sup>, R.M. Prol-Ledesma<sup>2</sup>, L.C.A. Gutiérrez-Negrín<sup>3</sup> y F. Ortega Gutiérrez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, <sup>2</sup>Instituto de Geofísica UNAM, <sup>3</sup>Geocónsul S.A. de C.V.,

<sup>4</sup>Instituto de Geología UNAM. Correo: [iglesias@iie.org.mx](mailto:iglesias@iie.org.mx)

### Resumen

Este es el proyecto 07 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), cuyos objetivos son la estimación del potencial de generación eléctrica de los SGM en México, y presentarlo en un sistema de información geográfica accesible en Internet. Estos objetivos se alcanzarán siguiendo el protocolo internacionalmente aceptado “*A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential*” (Beardsmore et al., GRC Transactions, vol. 34, pp. 301-312, 2010). Se describe el proyecto en forma resumida y los avances alcanzados hasta la preparación del artículo para el XXII Congreso Anual (2015) de la Asociación Geotérmica Mexicana. De momento se reportan los siguientes avances. Se diseñó y se desarrolló una base de datos considerando detalladamente todos los aspectos considerados en el protocolo mencionado. La misma se implementó en formato GeoDataBase en el paquete comercial de información geográfica denominado ArcGis®. Se efectuó una extensa recopilación de datos geográficos, geológicos, áreas protegidas, de gradiente y flujo térmico, de temperaturas de superficie y de propiedades físicas de rocas. Se desarrolló una malla de 5’x5’ que cubre la parte continental de México, con más de 26,000 celdas. Se superpuso la distribución topográfica de México con la malla y se adjudicaron valores promedio de elevación para las celdas. Se desarrolló un mapa de la distribución de la temperatura media anual de largo plazo sobre la República Mexicana, se superpuso con la malla y se adjudicaron valores promedio de temperatura para las celdas. Se desarrolló un mapa del flujo térmico en México y se superpuso con la malla, adjudicándose valores a las celdas de acuerdo a la metodología del protocolo. Se adelantó significativamente el modelo geológico 3D que incluye basamento y cobertura vulcano-sedimentaria en el territorio continental. Adicionalmente, se adquirió hardware y software especializado para el proyecto, de acuerdo a lo planeado, y se instalaron adecuadamente. También se capacitó personal en la utilización del paquete de información geográfica ArcGis®. Así mismo, se presentó una descripción del proyecto en un congreso internacional y se promovió el mismo en medios electrónicos.

*Palabras clave:* EGS, potencial geotérmico, malla, celdas, modelo geológico, flujo de calor.

### Antecedentes

El concepto de Sistemas Geotérmicos Mejorados (SGM, o EGS por sus iniciales en inglés) comenzó a desarrollarse hace varias décadas. El calor existente en la corteza terrestre debido al flujo térmico que fluye en la misma es una fuente de energía que potencialmente puede ser explotada en virtualmente cualquier sitio. Diversos estudios han estimado el potencial de generación eléctrica con SGMs (e.g., Blackwell et al., 2007; Tester et al., 2006; Budd et al., 2010; Hamza et al., 2010; Mongillo y Bromley, 2010) y concluido que en algunas décadas esta tecnología podría constituir una de las mayores fuentes de energía eléctrica limpia, con una distribución geográfica amplísima, por milenios.

La estimación del potencial de generación eléctrica de los SGMs en México es uno de los proyectos estratégicos del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo). Sus objetivos son estimar el potencial mencionado y presentarlo en un sistema de información geográfica accesible en Internet. El proyecto se efectúa siguiendo el protocolo internacionalmente aceptado “*A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential*” (Beardsmore et al., 2010).

## Método

Sucintamente, el protocolo adopta un modelo simple de dos capas en el que los sedimentos sobreyacen el basamento y el transporte de calor es vertical; la profundidad del modelo es 10 km (Fig. 1; todas las figuras al final del texto). 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/m<sup>3</sup>), incrementando el flujo térmico; eventualmente el flujo térmico del basamento  $Q_B$  (W/m<sup>2</sup>) 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/m<sup>3</sup>). Finalmente el flujo térmico local  $Q_0$  (W/m<sup>2</sup>) 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 minutos de longitud por 5 minutos de latitud (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 y flujo de calor y energía térmica en cada 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. Para mayores detalles se sugiere referirse al protocolo referenciado.

## Avances

### *Adquisición de software y hardware*

Para implementar el proyecto se adquirió el paquete de herramientas de software SIG ServerBox® Desktop Profesional, que incluye licencias de: ArcGIS for Desktop Advanced (ArcINFO), que se instaló en cinco computadores personales del equipo del proyecto; el módulo ArcGIS Spatial Analyst for Desktop, instalado en una workstation utilizada como servidor; el módulo ArcGIS 3D Analyst for Desktop, también instalado en la Workstation; de ServerBox® Webmapping Básico, compuesto por ArcGIS for Server Workgroup Standard, totalmente compatible con ServerBox® Desktop Profesional. Se adquirieron también dos licencias de ArcGIS v. 10.2, que se instalaron en los equipos de dos usuarios de ServerBox®. También se actualizó el programa Geographic Calculator a la versión 2014.

A fin de complementar el equipo de cómputo existente para el grupo de trabajo se adquirieron dos estaciones de trabajo HP Z230 SFF Workstation utilizadas como servidores; dos computadoras de escritorio HP ELITEDESK 800, y dos laptops (Lenovo Ideapad y HP ProBook), y tres UPSs.

### ***Diseño e implementación de la base de datos geográfica (BDG)***

El diseño se basó en la metodología propuesta por el Protocolo. La BDG utiliza los datos geográficos y productos cartográficos generados por el INEGI y adopta los sistemas de coordenadas definidos por este organismo para su cartografía.

La Fig. 2 esquematiza la estructura básica de la BDG, mostrando los temas principales de información de acuerdo al Protocolo. Una vez generada la malla 5'x5', será cargada con atributos geológicos y físicos, la temperatura media anual y el flujo de calor de cada celda a nivel superficial. Posteriormente, tomando como base la primera capa, se reproducirá la malla geográfica para los distintos niveles de profundidad establecidos en el Protocolo, y a partir de los resultados obtenidos del análisis e interpretación de todo el volumen de información recopilada, o en su defecto, utilizando los valores default recomendados en el Protocolo, se asignarán los atributos de las celdas correspondientes a las distintas capas o niveles de profundidad.

Se diseñó un sistema para la identificación individual de cada celda de 5'x5' mediante una clave única, extendiendo el sistema de identificación del INEGI para sus cartas escala 1:50,000. Este es un aspecto crítico del diseño de nuestra BDG porque facilitará el proceso de localización, integración y asociación del gran volumen de información geográfica 3D que se incluirá en la misma.

La BDG se implementó en el Paquete de Información Geográfica comercial denominado ArcGIS. La información se implementará en el formato denominado GeoDataBase. En la Fig. 3 se ilustra la estructura de la BDG implementada en ArcGIS con formato GeoDatabase.

### ***Desarrollo de la malla de 5'x5'***

Utilizando ArcGIS se desarrolló la malla de 5'x5' correspondiente a la porción continental de la República Mexicana. La misma contiene 26,315 celdas, cuya área varía con la latitud, naturalmente. Como se mencionó, cada celda está identificada con una clave única. La Fig. 4 presenta la malla con un acercamiento al Estado de Morelos y alrededores.

### ***Desarrollo del mapa de la temperatura media anual con resolución de 5'x5'***

Se utilizaron datos de superficie climática con resolución temporal mensual, interpolada a muy alta resolución espacial ("1 km") con control de calidad de los datos considerando el efecto topográfico, a partir de la superficie climática correspondiente en la base WorldClim (2014) correspondiente a los años (1950-2000), y de la base climatológica diaria (1902-2011) de más de 5,000 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (2014). Estos datos cubren desde 1902 hasta 2011, y fueron promediados para obtener la distribución de la temperatura media anual de largo plazo (109 años), y portados a la resolución espacial de 5'x5' mediante ArcGIS por nuestro grupo. La Fig. 5 presenta dichos resultados.

### ***Desarrollo del mapa topográfico con resolución de 5'x5'***

Los datos topográficos provienen de INEGI (2014a). Fueron importados y transformados por medio de ArcGIS a la resolución de 5'x5' por nuestro grupo. Los resultados se presentan en la Fig. 6.

***Avances en el desarrollo del mapa de flujo térmico superficial con resolución de 5'x5'***

Se compilaron los resultados existentes para la fracción continental de México (Prol-Ledesma, 2014; Zárate y Simoneit, 2005) que se presentan en la Fig. 7. Siguiendo el protocolo, para incrementar la cobertura espacial se determinó el flujo térmico para cada celda de 5'x5' como la media pesada por la distancia de todos los datos medidos dentro de un radio de 30 km de la celda. Estos resultados se presentan en la Fig. 8. Posteriormente se incorporarán más datos de flujo térmico provenientes de pozos profundos.

***Avances en la profundidad del basamento***

El protocolo requiere estimar la profundidad del basamento en el área estudiada. La Fig. 9 presenta la distribución del basamento que aflora en la República Mexicana, seleccionada mediante ArcGIS del mapa geológico de INEGI (2014b). La superposición de este mapa con el topográfico con resolución de 5'x5' genera el mapa topográfico del basamento aflorante.

Para estimar la profundidad del basamento cubierto por “sedimentos”, el primer paso fue seleccionar, mediante ArcGIS, la distribución superficial de “sedimentos” a partir del mapa geológico de INEGI (2014b). Dicha selección se presenta en la Fig. 10. El siguiente paso, todavía en ejecución, es la compilación de datos de pozos profundos: una fracción de los mismos intersecta el basamento y provee la profundidad del mismo. Adicionalmente, al menos una fracción de los pozos profundos proveen información acerca de sus correspondientes columnas litológicas, lo que aportará información de calidad para el modelo 3D que estamos desarrollando.

***Desarrollo de un procedimiento para adjudicar propiedades físicas de las rocas a los nodos de la red 3D del modelo***

El modelo 3D en desarrollo consta de 263,150 bloques de 1 km de altura. Sus dimensiones físicas están determinadas por la resolución de 5'x5'x1km y se deben cargar en la Geodatabase. Igualmente, se deben cargar en la Geodatabase los datos de las propiedades físicas correspondientes a cada bloque que requiere el protocolo; estas dependen del tipo de roca correspondiente y de las condiciones de temperatura y presión en el bloque.

Para el desarrollo de este procedimiento se consideraron dos opciones: utilizar ArcGIS o utilizar Excel. Por razones de velocidad de procesamiento se decidió optar por la segunda. En la Fig. 11 se presenta el diagrama de un programa en Excel desarrollado para estimar el Potencial Teórico de generación. El mismo se aplicará secuencialmente para cada bloque. Los resultados en Excel se importarán directamente a la Geodatabase.

**Conclusiones**

Se ha avanzado según lo planeado en el proyecto. Se completó la adquisición de software y hardware, el diseño e implementación en ArcGis de la Base de Datos Geográfica, el desarrollo de la malla de 5'x5', el desarrollo del mapa de temperatura media anual en la superficie con resolución de 5'x5', el mapa topográfico con resolución de 5'x5'. Se avanzó según lo previsto en el desarrollo del mapa de flujo térmico superficial con resolución de 5'x5', en la estimación de la profundidad del basamento, y en el desarrollo de un programa para adjudicar propiedades físicas de las rocas a los nodos de la red 3D del modelo.

## Referencias

- Beardsmore, G.R., Rybach, L., Blackwell, D. y Baron, C., 2010. A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential. *GRC Transactions*, vol. 34, pp. 301-312.
- Blackwell, D.D., Negraru, P.T., y Richards, M.C., 2007. Assessment of the enhanced geothermal system resources base of the United States. *Natural Resources Research*. DOI: 10.1007/s11053-007-9028-7.
- Budd, A.R., Barnicoat, A.C., Ayling, B.F., Gerner, E., Meixner, T.J., and Kirby, A.L., 2010. Australian Government's Support for Geothermal Development. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, International Geothermal Association, 7 p.
- Hamza, V.M., Cardoso, R.R., Vieira, F.P., y Guimaraes, S.N.P., 2010. Atlas nacional 2010 –IBGE – *Mapas Geotermiais*. Laboratorio de Geotermia, Coordinacao de Geofísica do Observatorio Nacional.
- INEGI, 2014a, <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>
- INEGI, 2014b, <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/infoescal>
- Mongillo, M.A., and Bromley, C.J., 2010. The International Energy Agency Geothermal Implementing Agreement –International Cooperation for Sustainable Geothermal Development. *GRC Transactions*, vol. 34, pp. 103-111.
- Prol-Ledesma, R.M., 2014. Mapas de flujo de calor y gradiente geotérmico de la República Mexicana, *Reporte de Avance del proyecto CeMIE-Geo P01*, Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, Reporte interno. Inédito.
- Tester J.W., Anderson B.J., Batchelor A.S., Blackwell D.D., Di Pippo R., Drake E.M., Garnish J., Livesay B., Moore M.C., Nichols K., Petty S., Toksoz M.N. y Veatch Jr. R. W., 2006. *The Future of Geothermal Energy – Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21<sup>st</sup> Century*, Massachusetts Institute of Technology, USA, 372 pp. <http://geothermal.inel.gov>
- Servicio Meteorológico Nacional, 2014, [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=23&Itemid=120](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=23&Itemid=120)  
[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42&Itemid=75](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)
- WorldClim, 2014, <http://www.worldclim.org/methods>
- Zarate-Del Valle, P.F., y Simoneit, B.R.T., 2005. La generación de petróleo hidrotermal en sedimentos del lago de Chapala y su relación con la actividad geotérmica del rift Citla en el estado de Jalisco, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 22, pp. 358-370.

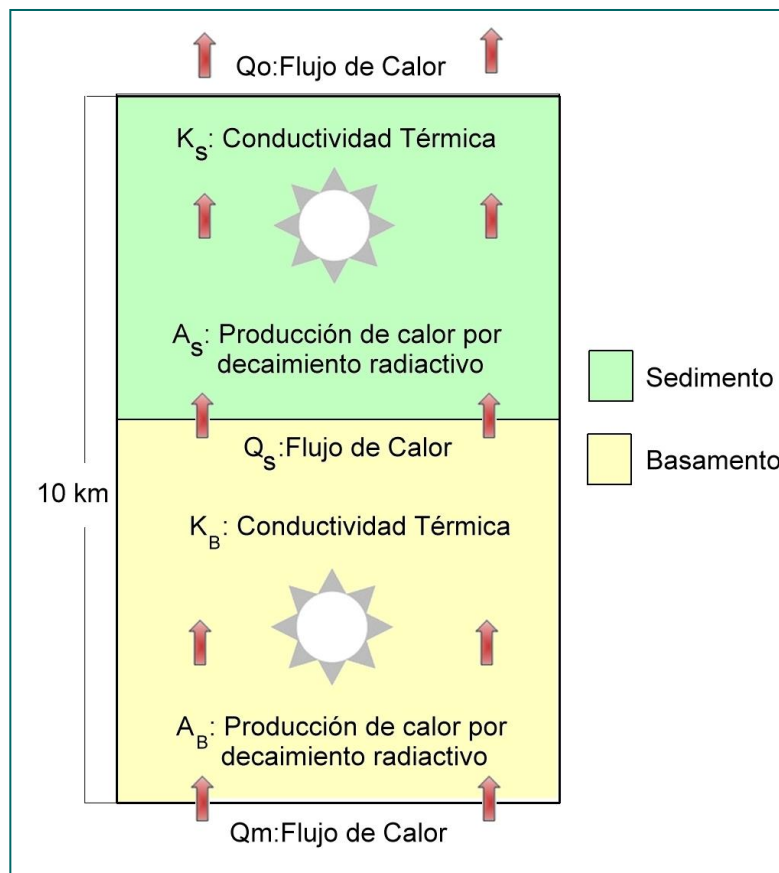
**FIGURAS**

Fig. 1. Ilustración del modelo simplificado usado por el protocolo.

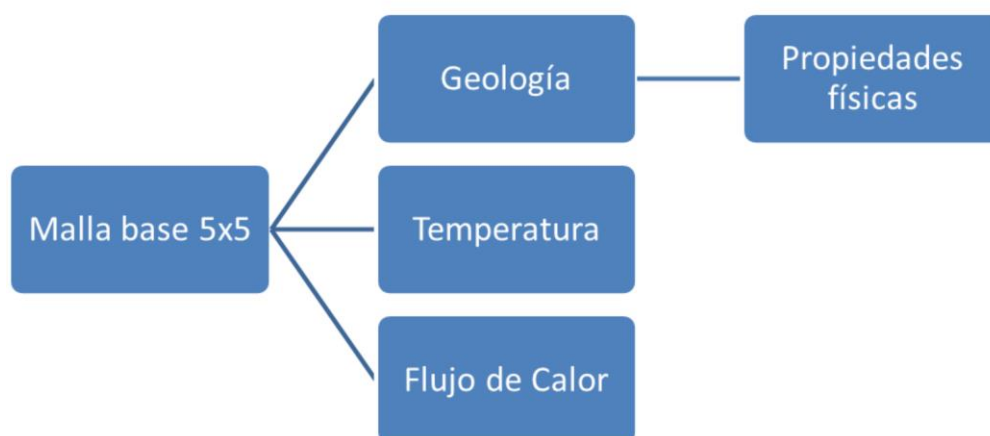
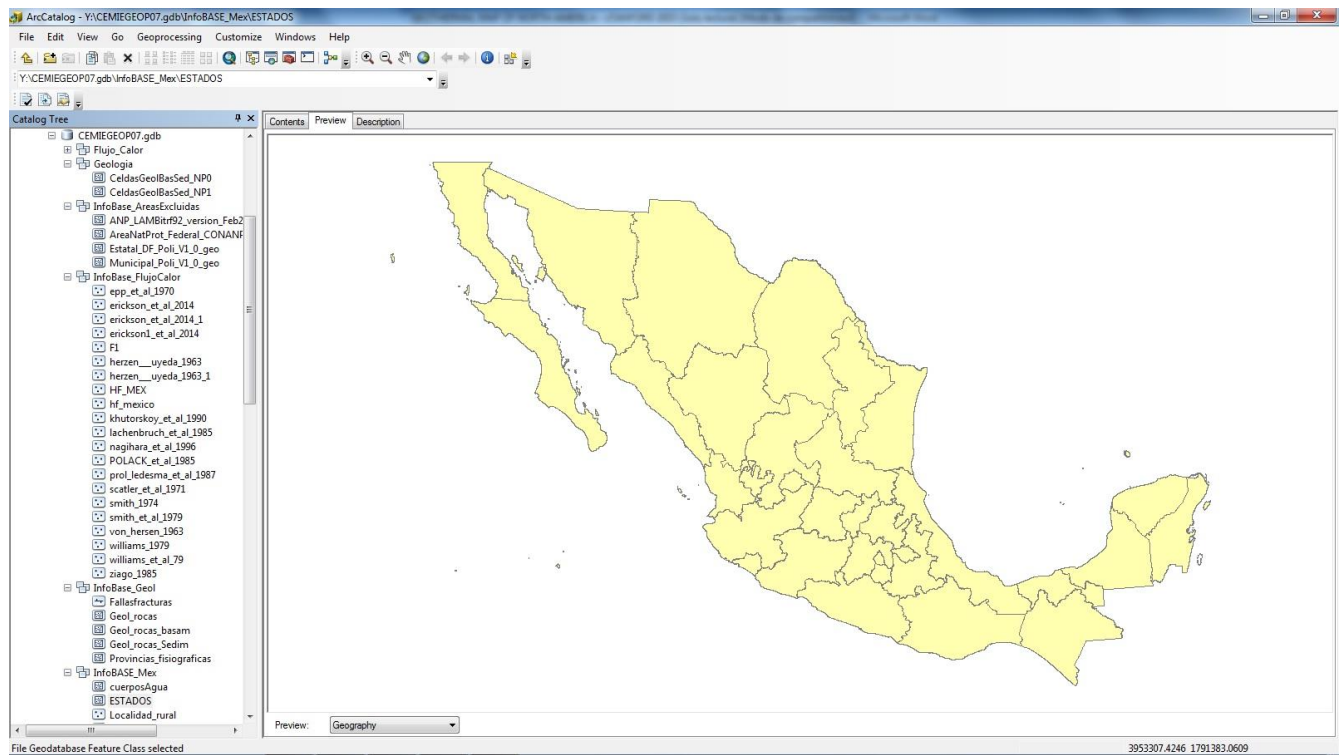


Fig. 2. Estructura básica de la BDG.





*Fig. 3. Estructura de la BDG implementada en ArcGIS con formato GeoDatabase.*



*Fig. 4. Malla de 5'x5' de la República Mexicana.*

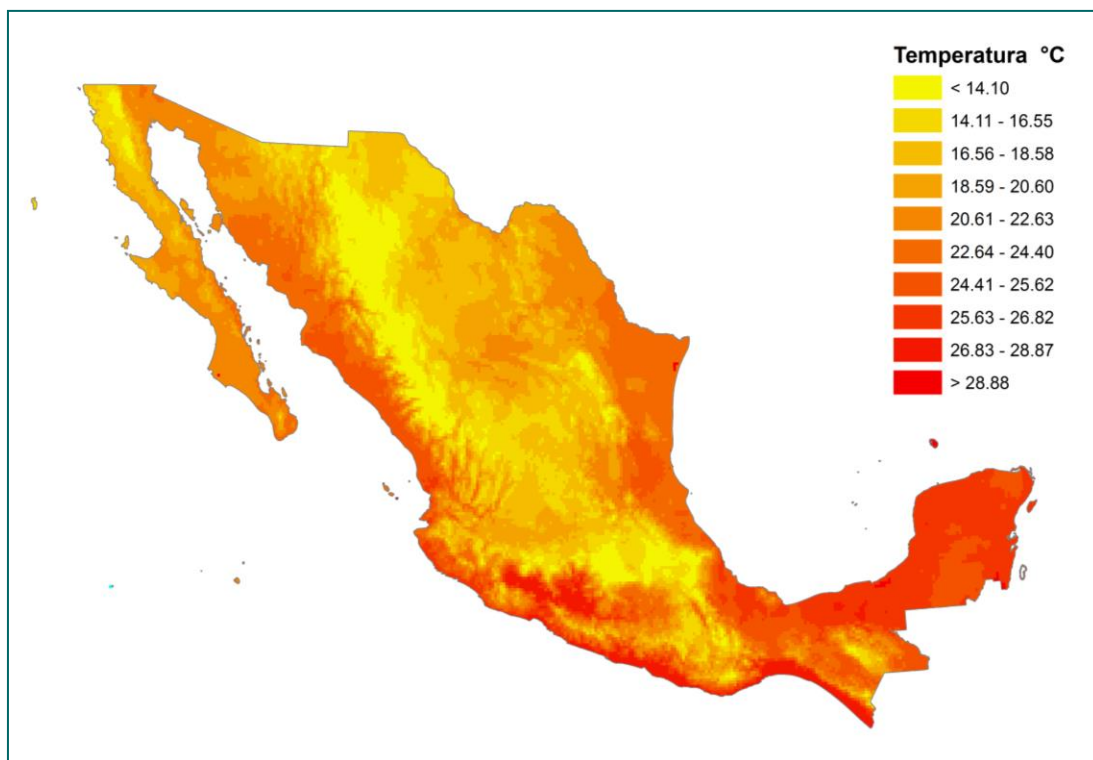


Fig. 5. Mapa de temperatura media anual de largo plazo (109 años) en resolución de 5'x5'.

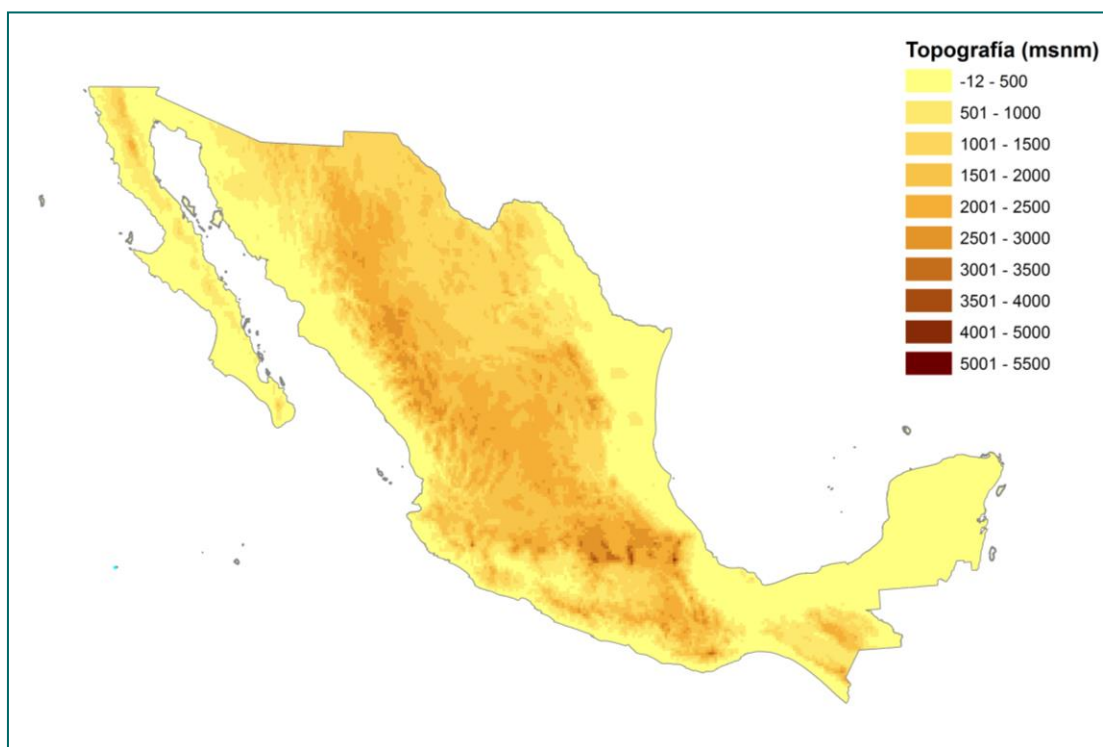
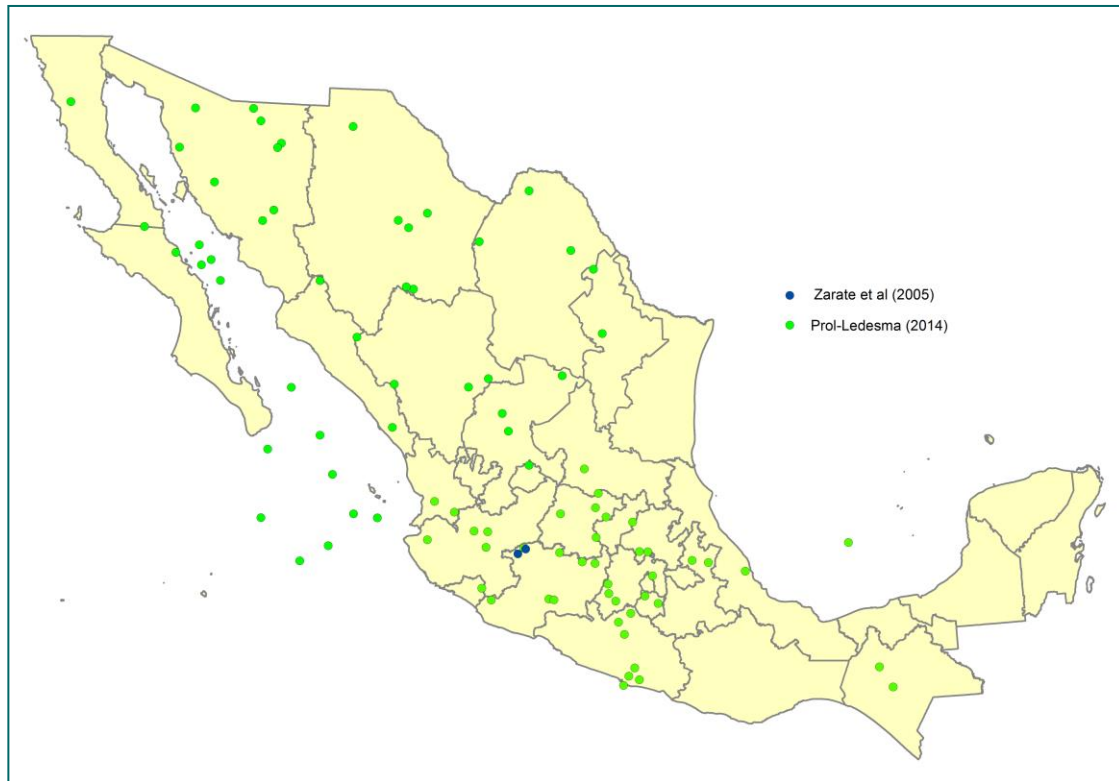
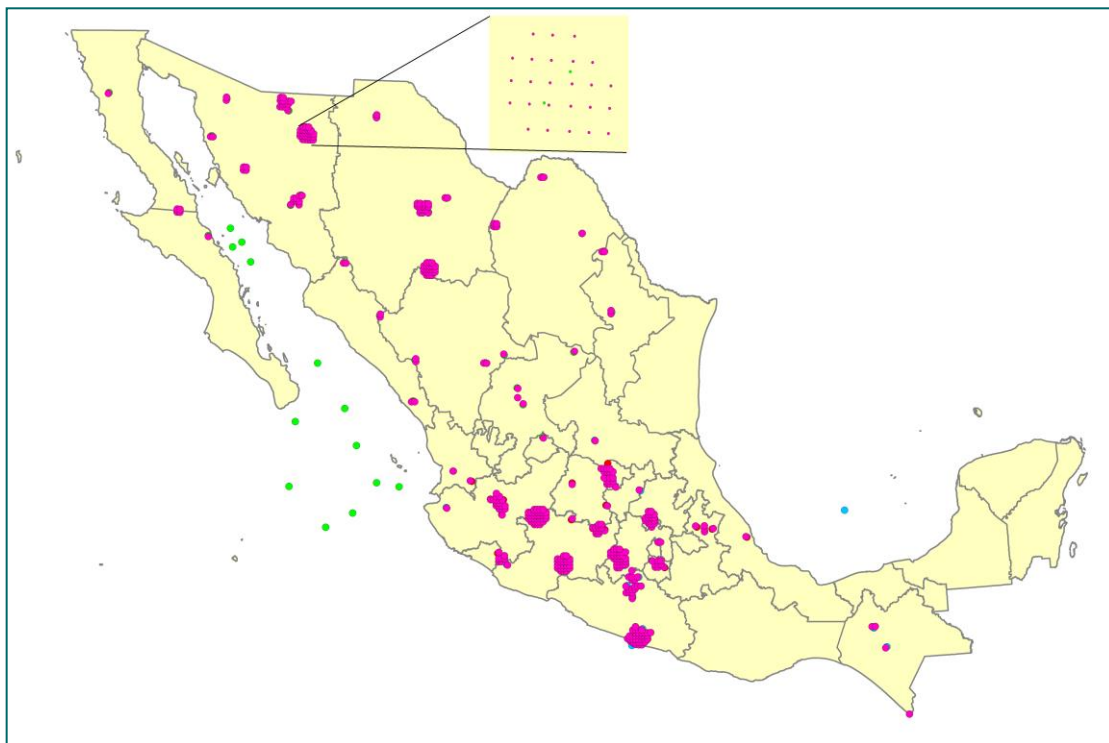


Fig. 6. Mapa topográfico con resolución de 5'x5'.





*Fig. 7. Compilación de flujo térmico medido en México, resolución 5'x5'.*



*Fig. 8. Incremento de cobertura de flujo térmico obtenido por extrapolación (ver texto).*

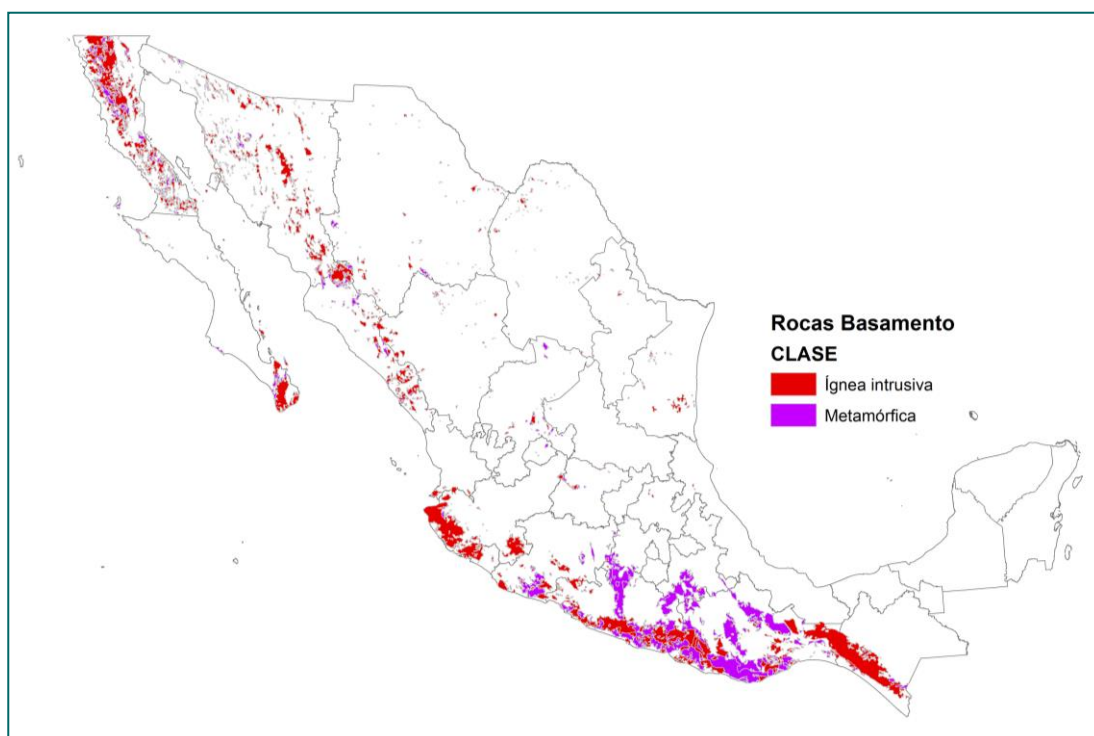


Fig. 9. Distribución de rocas de basamento que afloran en México.

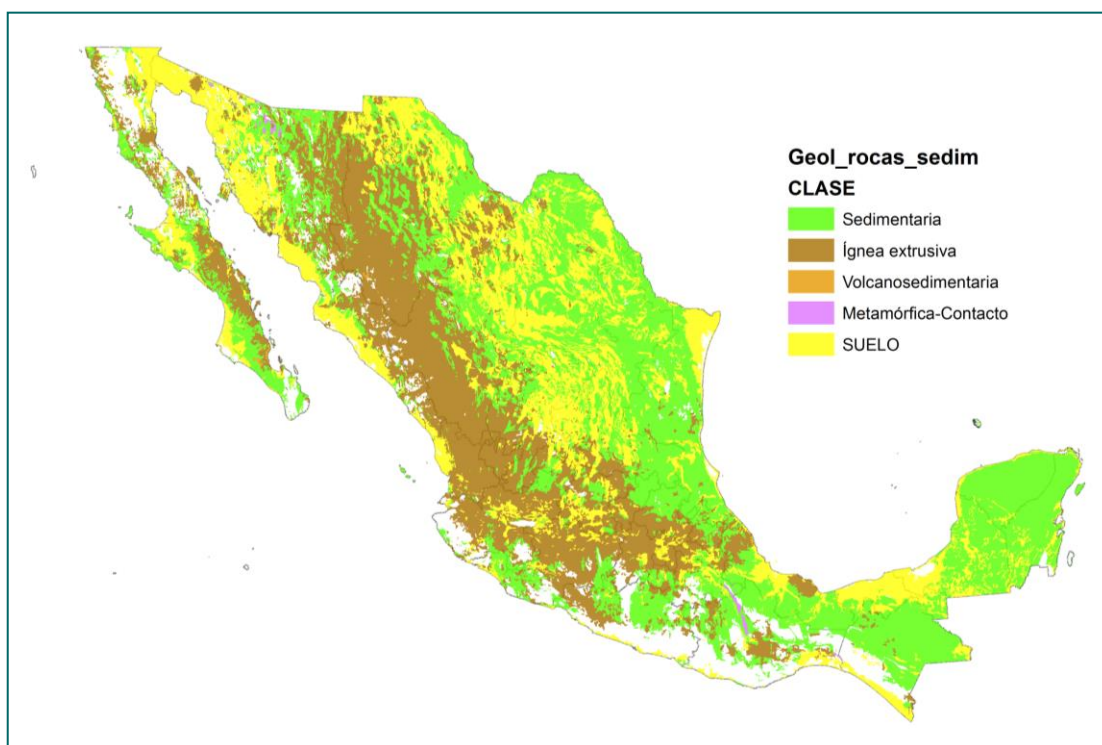


Fig. 10. Distribución de rocas sedimentarias superficiales en México. Las áreas en blanco corresponden a afloramientos del basamento.

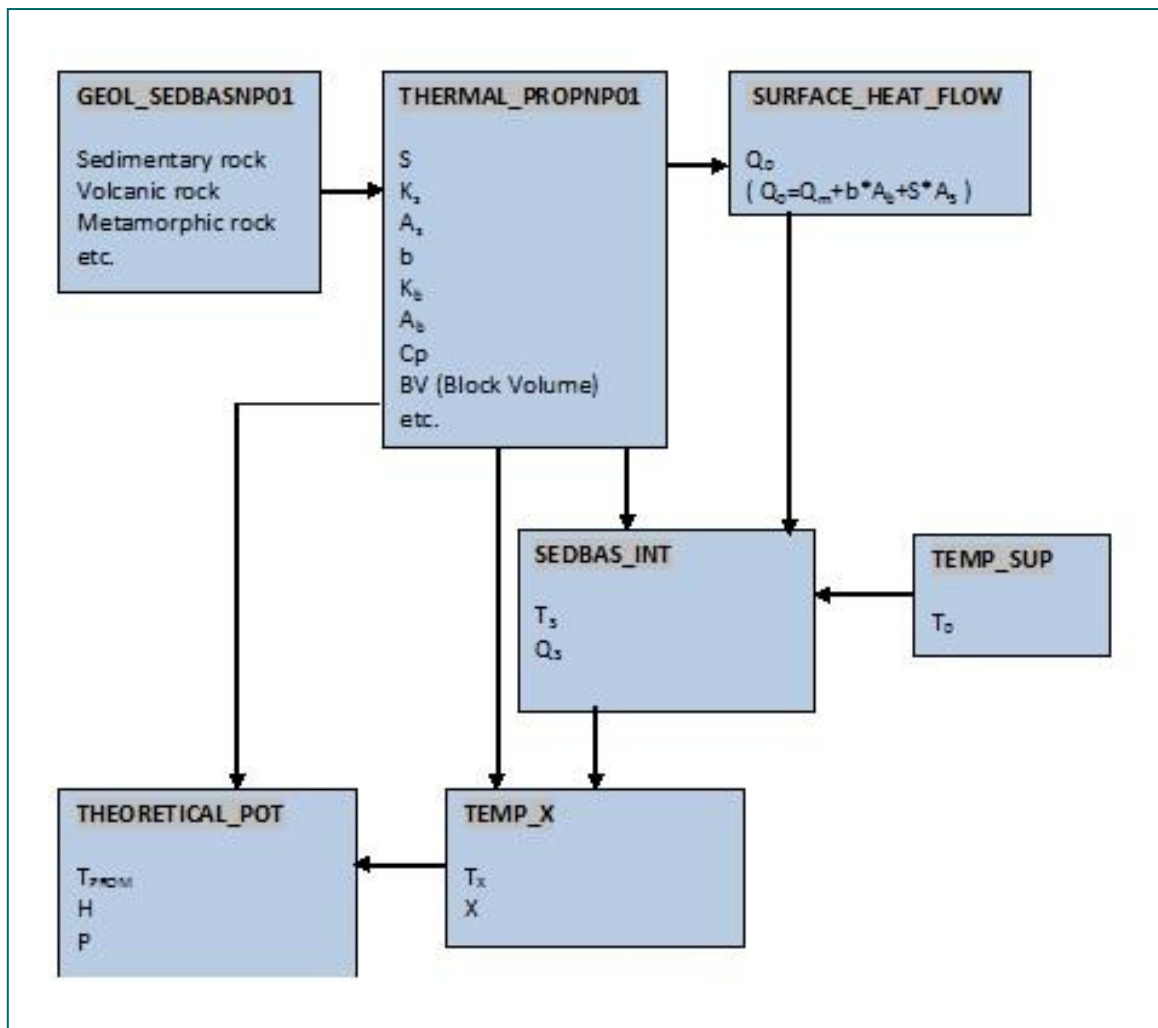


Fig. 11. Diagrama de flujo para cálculo de Potencial Teórico.