

Potencial de energía geotérmica de muy baja temperatura de Uruguay para colectores verticales cerrados

Potential of very low enthalpy geothermal energy of Uruguay for closed vertical collectors

Potencial de energia geotérmica de entalpia muito baixa do Uruguai para coletores verticais fechados

 **MARTÍN DOS SANTOS LAFUENTE** (2)

 **CINTIA ALCOBA RODRÍGUEZ** (2)

 **ETHEL MORALES** (1)

 **CARLOS BELLO CÁCERES** (2)

(1) Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.

(2) Ingeniería en Energías Renovables, Universidad Tecnológica, Uruguay

RECIBIDO: 16/7/2024 → APROBADO: 23/11/2024 ✉ martin.dossantos@utec.edu.uy

RESUMEN

Actualmente, existe a nivel mundial una marcada tendencia a fortalecer la transición energética, favoreciendo el uso y diversificación de energías renovables bajas en carbono. Las energías eólica, solar y biomasa son las más comunes, pero existen otras fuentes como la geotermia de muy baja entalpía. Esta última aprovecha el calor acumulado en los primeros metros del subsuelo, principalmente para la climatización de edificaciones. En este trabajo se presenta el primer mapa de potencial geotérmico de muy baja temperatura para colectores verticales cerrados, del territorio nacional, elaborado a partir de la cartografía geológica e hidrogeológica existente y lo establecido en la norma alemana VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) para el uso de colectores verticales cerrados. Los resultados obtenidos indican que Uruguay presenta un potencial de extracción de calor de las rocas de medio a alto (superior a 40 W/m) en más del 60 % de su territorio. Ese potencial de energía podría utilizarse tanto para climatizar edificios como para proporcionar soluciones térmicas a varias de las actividades que se desarrollan en el país (actividad forestal, papeleras, cultivos de cereales, lechería, entre otras) o fomentar el desarrollo de nuevas actividades productivas, por tratarse de una energía continua, eficiente y ambientalmente amigable.

Palabras clave: energías renovables, geotermia somera, climatización de espacio.

ABSTRACT

Currently it is a clear worldwide trend to strengthen the energy transition, favoring the use and diversification of renewable, low-carbon and environmentally friendly energies. Wind, solar and biomass energy are the most common, but there are other sources, such as the shallow geothermal energy. The latter takes advantage of the heat accumulated in the first meters of the subsoil for the heating and cooling of urban districts. This study presents the first map of shallow geothermal potential of Uruguay, for closed vertical collectors, based on the available geological and hydrogeological cartography and the German standard VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019). The results indicate that Uruguay has a potential for medium to high heat extraction from rocks (greater than 40 W/m) in more than 60 % of its territory. This shallow geothermal energy potential could be used both for air-condition buildings and to provide thermal solutions to several of the activities carried out in the country (forestry, paper mills, cereal crops, dairy farming, among others) or promote the development of new productive activities, because it is a continuous, efficient and environmentally friendly energy. **Keywords:** renewable energy, shallow geothermal energy, heating and cooling buildings.

RESUMO

Atualmente, existe uma tendência acentuada a nível mundial para o reforço da transição energética, favorecendo a utilização e a diversificação de energias renováveis de baixo carbono. As energias eólica, solar e de biomassa são as mais comuns, mas existem outras fontes, como a energia geotérmica de muito baixa entalpia. Esta última aproveita o calor acumulado nos primeiros metros do subsolo principalmente para a climatização dos edifícios. Este trabalho apresenta o primeiro mapa de potencial geotérmico de muito baixa temperatura para o território nacional, elaborado a partir da cartografia geológica e hidrogeológica existente e do que está estabelecido na norma alemã VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) para utilização de coletores verticais fechados. Os resultados obtidos indicam que o Uruguai possui um potencial médio a alto de extração de calor das rochas (superior a 40 W/m) em mais de 60 % do seu território. Este potencial energético poderá ser aproveitado tanto para climatizar edifícios, como para fornecer soluções térmicas a diversas das atividades desenvolvidas no país (silvicultura, fábricas de papel, culturas cerealíferas, laticínios, entre outras) ou promover o desenvolvimento de novas atividades produtivas, porque é uma energia contínua, eficiente e ecologicamente correta. **Palavras-chave:** energias renováveis, energia geotérmica superficial, climatização espacial.

INTRODUCCIÓN

El potencial geotérmico existente en un determinado lugar refiere a la energía contenida en los materiales de la corteza terrestre en forma de calor que puede ser aprovechada para distintos fines, tales como la producción de energía eléctrica cuando la temperatura y presión del subsuelo a determinadas profundidades son las adecuadas, o el uso directo del calor latente a poca profundidad de la superficie. La energía geotérmica de muy baja

entalpía (o somera) hace referencia a la energía térmica que contienen los materiales geológicos más superficiales (rocas, sedimentos y aguas subterráneas); en general el recurso se encuentra a menos de 30 °C. No se trata de aprovechar la energía térmica del suelo para generar electricidad, sino de su utilización directa en la climatización de edificios o en procesos industriales (secado de madera y cueros, deshidratación de leche o frutas, piscicultura, entre otros). Para trasladar este efecto a los espacios a climatizar se necesitan bombas de calor, la misma tecnología de los aparatos de aire acondicionado pero reversible, para que genere tanto frío como calor. También es necesaria la implementación de intercambiadores geotérmicos para permutar el calor con el subsuelo (García et al., 2020).

La geotermia de muy baja entalpía representa un recurso inmenso, ubicuo en todo tipo de terreno y versátil, capaz de ayudar a satisfacer la demanda de energía de la población mundial y de reducir la utilización de combustibles fósiles como energía primaria. A pesar de estas características y de que la energía geotérmica es ambientalmente eficiente, ya que sus emisiones se componen prácticamente de vapor de agua (Santoyo y Barragán-Reyes, 2010), no ha conseguido implantarse de forma masiva en la sociedad. La barrera más importante que lo ha impedido hasta el momento ha sido su costo inicial, ya que la construcción de los intercambiadores requiere una inversión económica importante. Pero la inmensidad del reto ambiental al que se enfrenta la humanidad no puede permitirse desperdiciar un recurso como la geotermia (García et al., 2020).

La explotación de la geotermia de muy baja entalpía, a diferencia de la geotermia de alta y muy alta entalpía, no está vinculada a puntos calientes del subsuelo ni a aguas termales. Puede explotarse en prácticamente cualquier lugar y su ubicuidad es una de las ventajas más representativas (Alcaraz y Vives, 2016). Debe su aplicabilidad a que, si bien en los primeros metros del subsuelo la temperatura responde al comportamiento estacional, a medida que aumenta la profundidad tiende a estabilizarse (en el entorno de los 15 metros). Esta temperatura es constante a lo largo de todo el año y se aproxima a la media anual del aire en el punto geográfico (García et al., 2020).

Para explotar la geotermia de muy baja entalpía se han diseñado diferentes tipos de infraestructura, los cuales a grandes rasgos se pueden clasificar en sistemas abiertos y cerrados. En los sistemas abiertos se bombea directamente el agua subterránea, cuya temperatura se mantiene constante a lo largo del año, con valores de entre 14 °C en zonas más frías y 17-19 °C en climas templados. El agua bombeada se puede usar directamente para climatizar espacios o pasar por una bomba de calor (Alcaraz y Vives, 2016). Los sistemas cerrados consisten en bombear un fluido por tubos cerrados, verticales u horizontales que intercambian calor con el terreno, comúnmente se utiliza una mezcla de agua con glicol (Lund et al, 2005), siendo el fluido más adecuado ya que es más eficiente y seguro para las instalaciones geotérmicas, garantizando el óptimo funcionamiento del sistema durante todo el año. Los colectores cerrados en configuración horizontal son los más sencillos de instalar, aunque requieren una superficie considerable que debe permanecer libre de edificaciones. Los sistemas en configuración vertical profundizan mucho más en el terreno, asegurando la estabilidad de la temperatura y evitando ser influenciada por cambios externos en la superficie (Pacheco, 2012).

En Uruguay, las experiencias de estudio en el uso de la geotermia somera se reducen a un único proyecto de tipo abierto, puesto en marcha en mayo de 2015 en el centro

educativo Los Pinos, del barrio Casavalle, ciudad de Montevideo (DEUMAN, 2020), y actualmente inactivo; y a varios proyectos residenciales privados de circuito cerrado.

Asimismo, existe un único antecedente en el país de estimación del potencial geotérmico de muy baja entalpía realizado para los alrededores de la ciudad de Salto (Noroeste de Uruguay), el cual arrojó un promedio de 84 W/m, para el caso de colectores verticales cerrados (Alcaraz et al, 2019).

En este trabajo se presenta el primer mapa del potencial geotérmico somero de Uruguay para el uso de colectores verticales cerrados, obtenido a partir de las cartas geológicas e hidrogeológicas disponibles para el país, y de lo establecido en la norma alemana VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) y modificaciones realizadas por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España (IDAE), en el año 2011.

Situación energética de Uruguay

Hasta el año 2000, Uruguay presentó una matriz energética primaria constituida en mayor medida por fuentes no renovables provenientes de hidrocarburos importados. La participación de energías renovables fue históricamente minoritaria, principalmente de origen hidroeléctrico, siendo la de mayor porte la represa de Salto Grande, en convenio binacional con la República Argentina. A comienzos del siglo XXI, Uruguay inició un proceso de diversificación de su matriz energética con la instalación de centrales de biomasa, que comenzaron a producir energía eléctrica. Más tarde se dio lugar a la producción eólica con la instalación de varios parques en distintos puntos del territorio, siendo en la actualidad la fuente renovable con mayor producción de electricidad en el país (Balance Energético Nacional, 2020).

La infraestructura energética actual está constituida por cuatro represas hidroeléctricas, centrales térmicas con turbinas de vapor, gas, y motores a base de combustibles fósiles y biomasa, importantes parques eólicos y solares de capitales públicos, privados y mixtos. El 60 % de la matriz energética primaria de Uruguay, que ha tenido un crecimiento neto del 150 % desde 1990 hasta 2022 (Figura 1), está representada por fuentes renovables entre las que destacan la biomasa, la eólica y la energía de origen hidroeléctrico, convirtiéndolo en un líder regional (Balance Energético Nacional, 2022). A su vez, tal como puede observarse, no existe participación de la energía geotérmica.

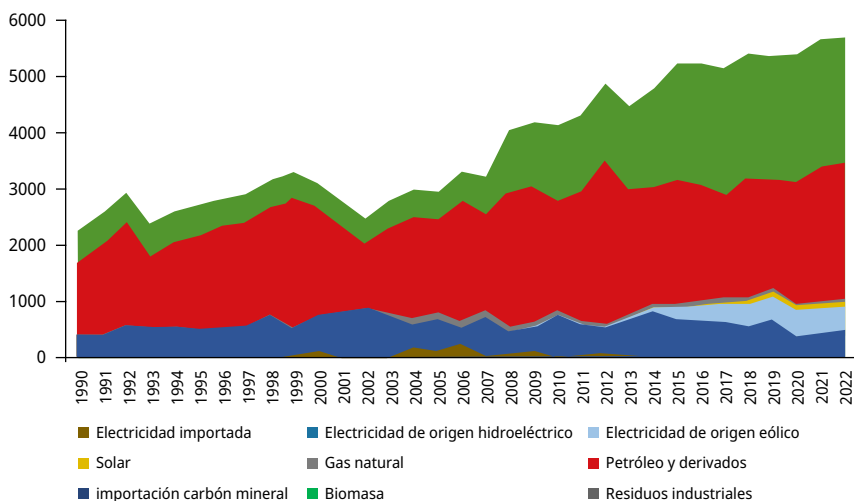


FIGURA 1. Evolución del abastecimiento de energía por tipo de fuente 1990-2022 (Balance Energético Nacional, 2022).

Los sectores de uso energético en Uruguay se han dividido históricamente en consumo residencial, transporte e industrial, siendo en su momento el sector residencial el de mayor demanda. Sin embargo, a partir de 1994 la estructura tomó otra dirección, cobrando mayor relevancia el sector del transporte. Más tarde sucedió lo mismo con el crecimiento de la industria a partir de 2008 (Balance Energético Nacional, 2022) (Figura 2).

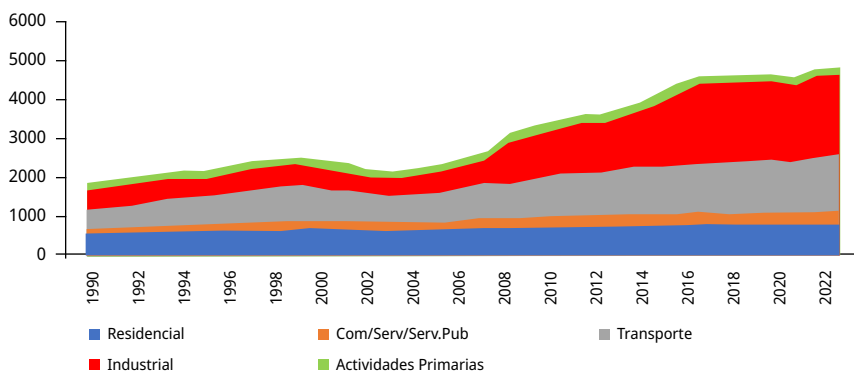


FIGURA 2. Evolución del consumo final de energía por sector 1990-2022 (Balance Energético Nacional, 2022).

El 18 % del consumo energético nacional del año 2022 correspondió al sector residencial (Balance Energético Nacional, 2022). En el año 2006 la Dirección Nacional de Energía elaboró el Balance Nacional de Energía Útil de Uruguay, el cual atribuyó a la calefacción el 32 % del consumo de energía del sector residencial (SEG, 2023) cuyas fuentes se presentan en la Figura 3. Se destaca el uso de la leña (muy arraigado a la idiosincrasia nacional), la energía eléctrica y el supergás; mientras que en menor proporción se utiliza gas por cañería y queroseno u otras fuentes (DEUMAN, 2020).

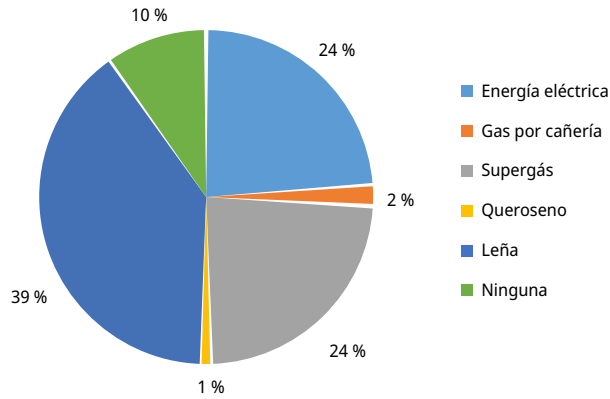


FIGURA 3. Fuentes de energía para la calefacción de viviendas (DEUMAN, 2020).

Contexto geológico

La geología de Uruguay, en su área continental, está constituida por un basamento cristalino de edad precámbrica y tres cuencas sedimentarias fanerozoicas, denominadas Norte, Santa Lucía y Laguna Merín (Figura 4).



FIGURA 4. Mapa geológico simplificado de Uruguay (modificado de Morales et al., 2021b).

El basamento cristalino ocupa aproximadamente el 44 % de la superficie del territorio nacional, aflorando principalmente al sur del Río Negro, y al norte, en las llamadas "islas cristalinas" de Cuñapirú-Vichadero (Rivera) y Aceguá (Cerro Largo). Está constituido por rocas metamórficas e ígneas, así como por diversos grupos de rocas hipoabisales.

Si bien su subdivisión en terrenos tectono-estatigráficos aún es motivo de debate; a nivel general puede ser dividido en: i) el Terreno Piedra Alta, el cual incluye rocas paleoproterozoicas no retrabajadas tectónicamente durante el Neoproterozoico (Oyhantçabal et al., 2011; Bossi y Ferrando, 2001), ii) el Terreno Nico Pérez, constituido por rocas arqueanas y paleoproterozoicas tectónicamente retrabajadas durante el Neoproterozoico (Oyhantçabal et al. 2011; Bossi y Ferrando, 2001), y iii) el Cinturón Dom Feliciano, el cual representa el ciclo orogénico Brasileño/Pan-Africano (Sánchez et al., 2010; Masquelin, 2006; Bossi y Gaucher, 2004).

Las rocas que constituyen el basamento cristalino están parcialmente recubiertas por grandes áreas de depósitos sedimentarios fanerozoicos. Al norte, se encuentran cubiertas por depósitos volcánico-sedimentarios paleozoicos a cenozoicos que forman la denominada Cuenca Norte, correspondiente a la porción sur de la Cuenca Paraná, relacionados a la evolución de Gondwana Occidental. Al sur, están parcialmente cubiertas por depósitos volcánico-sedimentarios pertenecientes al relleno de las cuencas extensionales (Santa Lucía y Laguna Merín), relacionadas a la apertura del océano Atlántico durante el Mesozoico.

La Cuenca Norte ha funcionado como una cuenca sedimentaria desde el punto de vista geológico (área subsidente de la corteza) desde el Paleozoico superior hasta finales del Mesozoico. Su relleno está constituido por un conjunto de rocas sedimentarias paleozoicas y mesozoicas e ígneas volcánicas mesozoicas, correspondientes a cuatro megasecuencias (Devónica, Carbonífero Superior-Pérmico, Jurásico-Cretácico y Cretácico Superior) y una delgada capa de rocas y sedimentos cenozoicos (Veroslavsky et al., 2022).

La Cuenca Santa Lucía presenta en la base una delgada capa de rocas ígneas extrusivas (basaltos), mientras que el relleno sedimentario está representado por rocas de origen continental, de edad Cretácico temprano y superior; y una delgada cobertura sedimentaria de edad cenozoica (Veroslavsky et al., 2004).

La Cuenca Laguna Merín, en casi toda su extensión, está cubierta por rocas y sedimentos cenozoicos, principalmente cuaternarios. Su relleno es fundamentalmente ígneo y de origen volcánico, con edades jurásicas y cretácicas, reunido en las formaciones Puerto Gómez y Arequita (Plenc, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se utilizó la carta geológica de Uruguay a escala 1:500.000, elaborada por Preciozzi et al. (1985), y sucesivas actualizaciones. Allí, los autores distinguen 61 unidades litoestratigráficas aflorantes, con edades comprendidas entre el Arqueano y el reciente en todo el territorio nacional. Resulta pertinente mencionar que, si bien la nomenclatura y edad de alguna de estas unidades litoestratigráficas ha sufrido modificaciones en sucesivos trabajos académicos o técnicos, las descripciones litológicas (que en definitiva suponen la base de datos utilizada en este trabajo) se mantienen.

Por otra parte, se han utilizado las cartas geológicas correspondientes a los departamentos de Canelones (Spoturno et al., 2004a) y San José (Spoturno et al., 2004b) a escala 1:100.000 y la del departamento de Montevideo (Spoturno et al., 2004c) a escala 1:50.000. Estas son algunas de las cartas geológicas departamentales con las que se cuenta en la actualidad y que mejoran la descripción de las distintas unidades aflorantes en cada uno de esos departamentos. También se ha utilizado la carta hidrogeológica, elaborada por DINAMIGE y correspondiente al año 2003, con la finalidad de caracterizar hidráulicamente las distintas litologías.

Una vez identificadas las diferentes unidades litoestratigráficas se procedió a su clasificación en función a lo establecido por la norma alemana VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) y modificaciones realizadas por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011; Tablas 1 y 2) para el caso de colectores cerrados verticales. Dicha norma se basa fundamentalmente en las propiedades térmicas típicas de las rocas (conductividad térmica del material) y extensas bases de datos, obtenidas a partir de experiencias que luego determinan los valores de capacidades de extracción de calor para cada una de ellas en términos de potencia por unidad de longitud de sonda (W/m). Las modificaciones realizadas a la norma alemana por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011) se corresponden con adaptaciones climáticas y meteorológicas para el territorio español, cuya temperatura media anual oscila entre 14 °C y 19 °C, mientras que en territorio alemán ronda los 10.5 °C.

Suponiendo un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes, la temperatura a cualquier profundidad z puede estimarse a partir del siguiente modelo (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2012):

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\alpha\pi}} \right) \right] \quad (1)$$

Donde $T(z, t)$ es la temperatura en °C del suelo en el tiempo t a una profundidad z , T_m es la temperatura media anual del suelo en °C tomada a una profundidad donde las variaciones de temperatura son despreciables, A_s es la oscilación de la temperatura en °C, que depende de la ubicación geográfica, el tipo de suelo y su saturación hídrica, t es el tiempo en días, t_0 es el desfase en días y α es la difusividad térmica del suelo en m²/día (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2012).

Si bien la norma VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) describe el comportamiento térmico esperado en suelo alemán, las modificaciones realizadas por IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011) para suelo español se basan en el salto térmico existente entre la superficie en España y la temperatura del subsuelo a unos 10 m de profundidad (donde la temperatura se estabiliza), en comparación con el salto térmico existente entre el suelo alemán y la temperatura del subsuelo a 10 m de profundidad donde el mismo es menor. Este salto térmico, que es mayor para el caso de España, se traduce en una mayor extracción de calor (en invierno) o una mayor cesión de calor (en verano) dado que la cantidad de calor transferida de un cuerpo a otro por unidad de tiempo y unidad de área puede ser

expresada de forma matemática mediante la Ley de Fourier. Para el caso de análisis en una dimensión (x) se tiene:

$$Q_x = -k_x A \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2)$$

En este trabajo se adoptó la modificación realizada por el instituto español dado que el territorio uruguayo presenta características similares al español en cuanto a temperaturas medias ambientales, siendo que en Uruguay la temperatura media anual registrada en 2020 osciló entre 16.6 °C y 19.6 °C (Instituto Nacional Uruguayo de Meteorología, 2022).

TABLA 1. Capacidad de extracción de calor de las rocas según la norma VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011).

Tipo de roca (litologías)	Capacidad de extracción de calor (W/m)
Gravas y arenas secas	< 25
Arcillas y margas húmedas	35 - 50
Calizas y dolomías masivas	55 - 70
Areniscas	65 - 80
Granitos	68 - 85
Rocas básicas (basaltos)	40 - 65
Rocas metamórficas (gneis)	70 - 85
Gravas y arenas saturadas de agua	65 - 80
Gravas y arenas con gran circulación de agua	80 - 100

A su vez, se definen cinco categorías que agrupan los tipos de roca con capacidad de extracción de calor en rangos similares, relacionando la descripción litológica de las unidades litoestratigráficas a clasificar con el potencial térmico esperado según propiedades físico-térmicas e hidráulicas, estas últimas referidas a la presencia o no de humedad de los materiales que conforman cada unidad (Tabla 2).

TABLA 2. Grupos de litologías según características térmicas de la roca y potencial térmico correspondiente (modificado de Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011).

Grupo	Tipo de litología	Caracterización hidráulica	Potencial térmico superficial (W/m)
A	Arenas, gravas, arcillas y limos	Muy secos y nivel muy profundo (>30m)	< 25
B	Arcillas, arcillitas y limos y limolitas	Húmedos	30 - 50
C	Calizas, dolomías, basaltos, calcarenitas, metacalizas y metadolomías, metavolcánicas básicas, anfíbolitas	Húmedos	40 - 60
D	Gravas, arenas, areniscas, granitos rocas metamórficas (esquistos y gneises)	Húmedos. Nivel somero	60 - 80
E	Gravas, arenas y areniscas	Permeables, nivel somero y elevada saturación de agua	80 - 100

En el caso de aquellas unidades litoestratigráficas constituidas por más de un tipo de roca, para realizar la clasificación se consideraron las litologías más representativas o con mayores áreas de afloramiento. Ninguna de las unidades litoestratigráficas quedó clasificada en el grupo A (sedimentos clásicos muy secos y profundos), quedando todas las unidades litoestratigráficas clasificadas como pertenecientes a los grupos B, C, D y E. La clasificación de la totalidad de las unidades litoestratigráficas de Uruguay, según la nomenclatura de Preciozzi et al. (1985), se presenta en la Tabla 3.

Con todas las unidades litoestratigráficas clasificadas se procedió a la elaboración del mapa de potencial geotérmico somero, utilizando el programa informático QGIS (QGIS.org, 2022), el cual consiste en un sistema de información geográfica de código abierto. Con el mismo es posible acceder a base de datos, trabajar con datos de tipo vectorial o ráster y contribuir con su uso en aspectos referentes a detección y corrección de errores, generación de nuevos códigos y soporte a otros usuarios.

El mapa elaborado toma como base la carta geológica de Uruguay (Preciozzi et al., 1985), en archivo shape, el cual fue cargado en el programa QGIS (QGIS.org, 2022), permitiendo visualizar los límites de las 61 unidades mencionadas con sus respectivas referencias. Se trata además de un mapa georreferenciado que permite añadir nueva información mediante el uso de coordenadas geográficas o utilizando otros programas con referencias geográficas que puedan aportar información.

Se procedieron a identificar los distintos tipos de unidades (Figura 5) según la clasificación presentada en la Tabla 2 y sobre ellas se crearon capas vectoriales de tipo poligonal para delimitar los distintos grupos en los que el territorio queda dividido.

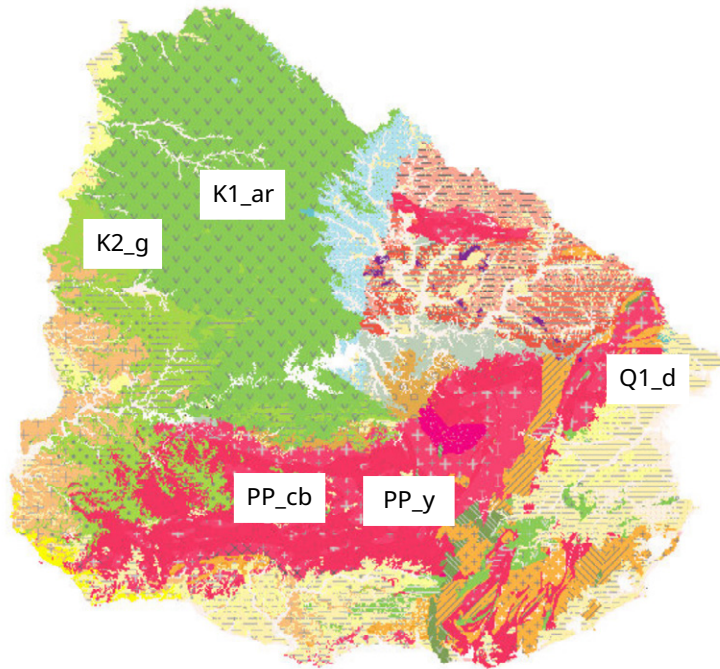


FIGURA 5. Unidades geológicas cargadas en programa QGIS en escala 1:500.000 (tomado de Preciozzi et al, 1985).

TABLA 3. Clasificación de las unidades litológicas presentes en la carta geológica de Uruguay (Preciozzi, 1985).

Código	Nombre de la unidad	Composición	Parámetro térmico
1	Cataclastitas y milonitas	Rocas metamórficas	D
2	Metavulcanitas de Ojosmín	Granitos	D
3	Unidad Berrondo	Granitos	C
4	Zócalo de las Islas Cristalina de Rivera	Granitos	D
5	Rivera	Rocas metamórficas	D
6	Granitos indiferenciados	Granitos	D
7	Complejo Basal	Rocas metamórficas	D
8	Formación Pavas	Rocas metamórficas	D
9	Formación Valentines	Rocas metamórficas	D
10	Formación Montevideo	Rocas metamórficas	D
11	Formación San José	Rocas metamórficas	D
12	Formación Arroyo Grande	Rocas metamórficas	D

Código	Nombre de la unidad	Composición	Parámetro térmico
13	Formaciones Paso Severino - Cerros de San Juan	Calizas y dolomías	D
14	Granitoides tardipostectónicos	Granitos	D
15	Granitos Sintectónicos e Indiferenciados	Granitos	D
16	Rocas metamórficas de naturaleza variada	Rocas metamórficas	D
17	Formación Paso del Dragón	Rocas metamórficas	D
18	Secuencia de metamorfismo medio	Rocas metamórficas	D
19	Secuencia de metamorfismo medio	Rocas metamórficas	D
20	Secuencia volcansedimentaria	Rocas metamórficas	D
21	Formación Sierra Ballena	Rocas metamórficas	D
22	Grupo Barriga Negra	Arcillas	C
23	Granitoides tardipostectónicos	Granitos	D
24	Formación Sierra de los Ríos	Rocas ígneas	D
25	Formación Sierra de las Ánimas	Rocas ígneas plutónicas	D
26	Formación Piedras de Afilar	Areniscas	D
27	Formación Cerrezuelo	Areniscas	D
28	Formación Cordobés	Areniscas/Arcillas	B
29	Formación La Paloma	Areniscas	D
30	Formación San Gregorio	Areniscas	D
31	Formación Tres Islas	Areniscas	E
32	Pérmico Medio Indiferenciado	Areniscas	D
33	Formación Fraile Muerto	Areniscas	B
34	Formaciones Paso Aguilar y Mangrullo	Areniscas	B
35	Formación Yaguarí	Areniscas	B
36	Basaltos mesozoicos indiferenciados	Rocas ígneas	C
37	Formación Cuaró	Rocas ígneas	C
38	Formación Tacuarembó	Areniscas	E
39	Formación Puerto Gómez	Rocas básicas (basalto)	C
40	Formación Arapey	Rocas básicas (basalto)	C
41	Conglomerado de la California	Arcillas y margas húm.	D
42	Formación Valle Chico	Granitos (muy similar)	D

Código	Nombre de la unidad	Composición	Parámetro térmico
43	Formación Arequita	Granitos (muy similar)	D
44	Formación Migues	Areniscas	D
45	Cretácico Superior indiferenciado	Areniscas	D
46	Formación Guichón	Areniscas	D
47	Formación Mercedes	Areniscas	D
48	Formación Asencio	Areniscas	D
49	Formación Fray Bentos	Areniscas	B
50	Formación Camacho	Areniscas	B
51	Formación Paso del Puerto	Areniscas	D
52	Formación Salto	Areniscas	E
53	Formación Raigón	Areniscas	E
54	Arenas indiferenciadas	Areniscas	D
55	Formación Las Arenas	Areniscas	D
56	Formación Chuy	Arcillas y margas húmedas	D
57	Formación Libertad	Areniscas-arcillas	B
58	Formación Dolores	Areniscas	B
59	Formación Villa Soriano	Areniscas	B
60	Sedimentación mixta a predominancia continental	Areniscas	D
61	Actual	Arcillas	B

RESULTADOS

Dada la complejidad de los procesos de transferencia de calor que intervienen a nivel somero, sumado a un gran número de variables que intervienen a la hora de diseñar una instalación geotérmica a este nivel, se cree conveniente la realización de varios *test* de respuesta térmica a fin de corroborar los resultados del mapa. En el caso de que se utilice este recurso se aconseja utilizar la Tabla 4 para estimar el potencial por unidad de longitud para sondas verticales cerradas.

TABLA 4. Extracción térmica esperada según conductividad (modificada de VDI 4640-2) (Verein Deutscher Ingenieure, 2019).

Tipo de suelo - Valores generales	Potencial (W/m)
Inapropiado. Sedimento seco $k < 1,5 \text{ W/mK}$	20 - 25
Normal. Roca consolidada. Sedimento saturado de agua. $1,5 \text{ W/mK} < k < 3,0 \text{ W/mK}$	50 - 60
Roca consolidada. Elevada conductividad térmica. $k > 3,0 \text{ W/mK}$	70 - 84

La Figura 6 presenta el mapa de potencial geotérmico de muy baja entalpía, temperatura o somero de Uruguay.

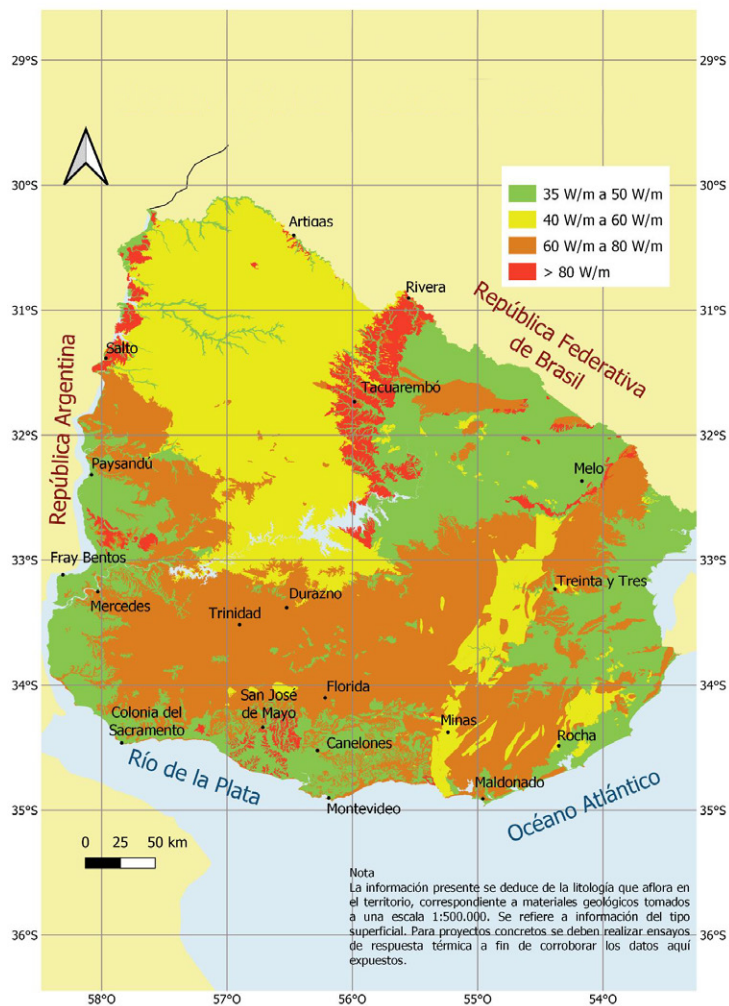


FIGURA 6. Mapa de potencial geotérmico de muy baja entalpía de Uruguay, referido según el potencial de extracción de calor en W/m (elaboración propia).

Las unidades geológicas del basamento cristalino presentan un potencial de extracción de calor de las rocas de entre 60 y 80 W/m con excepción de las áreas con predominio de secuencias metamórficas con protolito calcáreo y/o de rocas básicas, las cuales se ubican principalmente en la región Este correspondiente al cinturón Dom Feliciano. En esos casos, las rocas del basamento cristalino presentan un potencial de extracción de calor menor, entre 40 y 60 W/m.

La Cuenca Norte presenta un potencial de extracción de calor que se incrementa de Este a Oeste, en virtud del predominio de rocas sedimentarias clásticas finas al Este (unidades estratigráficas llamadas informalmente pelíticas grises), rocas ígneas básicas (basaltos de la Formación Arapey) en el sector central, y areniscas y conglomerados del Cretácico Superior al Oeste. Esta situación se ve alterada con la presencia de unidades sedimentarias con importante saturación de agua como la Formación Tacuarembó (parte integrante del Sistema Acuífero Guaraní; LEBAC, 2008), aflorante en una faja de dirección Norte-Sur en la región central de la Cuenca Norte y la Formación Salto, ubicada en los alrededores de la ciudad homónima, sobre el margen del río Uruguay.

Las áreas del país con importante cobertura sedimentaria cenozoica (cuencas Santa Lucía y Laguna Merín y litoral oeste) presentan un potencial de extracción de calor relativamente bajo, entre 35 y 50 W/m. Esto se debe a la predominancia de sedimentos o rocas sedimentarias clásticas de tamaño de grano fino (principalmente limolitas y arcillitas). Nuevamente, las unidades sedimentarias que constituyen acuíferos importantes, como es el caso del acuífero Raigón (al Sur, departamento de San José), presentan un potencial mayor, superior a 80 W/m.

En la metodología utilizada en este trabajo, para la región geográfica de los alrededores de la ciudad de Salto se indica un potencial de extracción de calor superior a 80 W/m. Esto es importante mencionar debido a que los resultados son consistentes con el único antecedente de estimación del potencial geotérmico somero en Uruguay, realizado en la misma región, el cual ha arrojado un promedio de 84 W/m, utilizando una metodología basada en el álgebra de mapas, donde el potencial y sus impactos térmicos se estiman con base en parámetros científicos y técnicos, entre ellos, la velocidad del agua subterránea, la conductividad hidráulica y las propiedades térmicas de los acuíferos según su litología. También se requieren factores adicionales basados en decisiones de gestión para limitar la explotación energética, definiendo el comportamiento térmico del acuífero (Alcaraz et al, 2019).

La demanda energética para climatización en una casa se estima a razón de 100 W cada metro cuadrado a climatizar. Una casa tipo, con tres dormitorios, se estima en 90-120 metros cuadrados. Si se desea climatizar una vivienda con una demanda energética de 15 kW mediante una instalación geotérmica con captadores verticales cerrados, y se utilizará una bomba de calor con un COP de 4. Además, considerando que la ubicación geográfica correspondiente, como los alrededores de la ciudad de Montevideo, presenta un potencial geotérmico somero de 50 W/m, se procede a calcular el número de captadores necesarios calculando la potencia térmica que debe ceder el terreno, la cual

se obtiene como la diferencia entre la potencia térmica necesaria para cubrir la demanda y la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor.

$$POT_{\text{terreno}} = Demanda - \frac{Demanda}{COP} \quad (3)$$

$$L_{\text{sonda}} = \frac{POT_{\text{terreno}}}{\text{Potencial geotérmico somero por metro de sonda}} \quad (4)$$

Para el caso planteado, la potencia térmica esperada de cesión del suelo es de 11,25 kW, equivalente a 11250 W. Y para las características térmicas del terreno cuyo potencial geotérmico somero estimado es aproximadamente 50 W/m, se necesitan 225 m de captadores verticales que podrían traducirse en 3 sondas de 80 m.

CONCLUSIONES

Uruguay presenta un potencial de extracción de calor medio a alto (superior a 40 - 60 W/m) en más del 60 % de su territorio. Ese potencial de energía geotérmica somera podría utilizarse tanto para climatizar edificios como para proporcionar soluciones térmicas a varias de las actividades que se desarrollan en el país (actividad forestal, papeleras, cultivos de cereales, lechería, entre otros) o fomentar el desarrollo de nuevas actividades productivas por tratarse de una energía continua, eficiente y ambientalmente amigable. Además, considerando que el uso directo de energía geotérmica somera se destina principalmente a la climatización de edificaciones, y dado el porcentaje significativo de la matriz energética nacional dedicado a la calefacción de viviendas, la energía geotérmica somera tiene el potencial de convertirse en un actor clave para el desarrollo energético del país.

Las áreas de basamento cristalino presentan un potencial superior a 60 W/m en casi toda su extensión, pero pueden presentar como dificultad los altos costos de perforación en las litologías que lo conforman. Las áreas de cuenca, particularmente en la Cuenca Norte, donde ocurren unidades aflorantes constituidas por litologías clásticas de tamaño de grano medio a medio-grueso, saturadas en agua, representando acuíferos ubicados a escasa profundidad tales como la Formación Tacuarembó o la Formación Salto, representan las áreas con potencial mayor y con menores costos de perforación.

Las áreas de menor potencial se corresponden con los afloramientos de unidades sedimentarias clásticas de tamaño de grano fino, que constituyen gran parte de la cobertura sedimentaria cenozoica de las cuencas Santa Lucía, Laguna Merín y la región litoral oeste del país, como así también las litologías aflorantes al Este de la Cuenca Norte.

El potencial estimado en este trabajo es teórico, por lo que la elaboración de proyectos concretos en el país requerirá la realización de estudios pertinentes *in situ* para ratificar que el potencial del lugar se encuentre en el rango establecido. Asimismo, dada la complejidad de los procesos de transferencia de calor que intervienen a nivel somero, sumado a un gran

número de variables que intervienen a la hora de diseñar una instalación geotérmica, se sugiere realizar *test* de respuesta térmica para ratificar los resultados.

REFERENCIAS

- Alcaraz, M. y Vives, L., 2016. *Geotermia somera: una energía renovable al alcance de todos* [En línea]. Buenos Aires [Consulta: 06 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.unicen.edu.ar/content/geotermia-somera-una-energ%C3%ADa-renovable-al-alcance-de-todos>
- Alcaraz, M.; Vázquez, E.; Pleitavino, M.; Sheiber, L.; River, D.; Villacreses, G.; Aravena, D.; Moreno, D.; Pedro, A.; Samaniego, L.; Ramos, A.; Carro, M.; Morillón, D.; Blessent, D.; Daniele, L.; Ramos, J. y Macías, J., 2019. *Ibero-American atlas of shallow geothermal energy by RIGS-CYTED*. San Francisco: AGU Meeting Fall.
- Balance energético nacional, 2020. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía y Minería. Dirección Nacional de Energía. Montevideo. ISSN: 2730-5295.
- Balance energético nacional, 2022. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía y Minería. Dirección Nacional de Energía. Montevideo. ISSN: 2730-5295.
- Bossi J. y Ferrando L., 2001. *Carta geológica del Uruguay escala 1/500.000. Versión digital*. Montevideo: Facultad de Agronomía.
- Bossi, J. y Gaucher, C., 2004. The Cuchilla Dionisio Terrane, Uruguay: An Allochthonous Block Accreted in the Cambrian to SW-Gondwana. En. *Gondwana Research*, 7(3), pp. 661-674. ISSN: 1342-937X.
- DEUMAN, 2020. *Elaboración de una hoja de ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial*. [En línea]. [Consulta: 29 de mayo de 2022]. Disponible en: https://www.ctc-n.org/system/files/dossier/3b/E3.1_Escenario%20actual%20de%20la%20energ%C3%ADa%20geot%C3%A9rmica.pdf
- García, A.; Garrido, E. y Mejías, M., 2020. *Geotermia somera: fundamentos teóricos y aplicación*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 9788491381051.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2011. *Evaluación del potencial de energía geotérmica*. [En línea]. Madrid [Consulta: 31 de mayo 2022]. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e9_geotermia_A_db72b0ac.pdf
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2012. *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. [En línea]. Madrid. ISBN: 978-84-96680-60-9. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_14_guia_tecnica_diseno_de_sistemas_de_intercambio_geotermico_de_circuito_cerrado_1a7cff37.pdf
- Instituto Nacional Uruguayo de Meteorología, 2022. *Estadísticas climatológicas: Tablas estadísticas*. [En línea]. Montevideo [Consulta: 1 de junio 2022]. Disponible en: <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>.
- LEBAC, 2008. *Informe Final de Hidrogeología do Projeto Aquífero Guarani*. Coord.: Gastmans, D. y Chang, H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro.

- Lund, J.; Freeston, D. y Boyd, T., 2005. Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review. En: *Geothermics*, 34, pp. 691-727.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.09.003>.
- Masquelin, H., 2006. El escudo uruguayo. En: *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Paleozoico*. Montevideo: DIRAC pp. 37-106.
- Morales, E.; Pedro, A. y De León, R., 2020. Geothermal gradients and heat flow in North Basin of Uruguay. En: *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*, 3(1), pp. 20-25. DOI: <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v3i1.43>
- Morales, E.; Veroslavsky, G.; Manganelli, A.; Marmisolle, J.; Pedro, A.; Samaniego, L.; Plenc, F.; Umpiérrez, R.; Ferreira, M. y Morales Demarco, M., 2021b. Potential of geothermal energy in the onshore sedimentary basins of Uruguay. En: *Geothermics*. 95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102165>
- Oyhantçabal, P.; Siegesmund, S. y Wemmer, K., eds., 2011. The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature [En línea], En: *Int. J. Earth. Sci.* [Consulta: 17 de mayo de 2022] DOI: <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0580-8>
- Pacheco, A., 2012. *Aprovechamiento del recurso geotérmico a través de las cimentaciones y otras estructuras*. [En línea]. Universidad Politécnica de Catalunya. [Consulta: 17 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41808248.pdf>
- Plenc Nobre, F., 2021. *Análisis magnetotelúrico de la cuenca Laguna Merín (SE, Uruguay)*. Tesis de grado. Universidad de la República. Uruguay.
- Preciozzi, F.; Sportuno, J.; Heinzen, W. y Rossi P., 1985. *Carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000* [En línea]. Montevideo: Uruguay. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología, [Consulta: 20 de diciembre de 2021].
Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Mapa%20Geol%C3%B3gico%20del%20Uruguay.pdf>
- QGIS, 2022. *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. Vers. 3.22. Bialowieza: QGIS. Disponible en: <http://qgis.org>
- Sánchez Bettucci L; Peel E. y Masquelin E., 2010. Neoproterozoic tectonic synthesis of Uruguay. En: *International Geology Review*, 52 pp. 51–78.
- Santoyo, E. y Barragán-Reyes, R., 2010. Energía geotérmica. En: *Ciencia*. 61, pp. 40-51.
DOI: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf
- SEG, 2023. *Indicadores energéticos*. Montevideo. [Consulta: 30 de Mayo de 2023].
Disponible en: https://www.segingenieria.com/wp-content/uploads/2023/05/Indicadores-Energéticos_2304.pdf
- Spoturno, J.; Oyhantçabal, P.; Goso, C.; Cazaux, S.; Aubet, N.; Huelmo, S.; Morales, E.; Piñeiro, A. y Martínez, G., 2004a. *Mapa geológico del departamento de Canelones a escala 1:100.000*. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología.
- Spoturno, J.; Oyhantçabal, P.; Aubet, N.; Cazaux, S.; Morales, E. y Loureiro, J., 2004b. *Mapa geológico del departamento de San José a escala 1:100.000*. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología.
- Spoturno, J.; Oyhantçabal, P.; Goso, C.; Aubet, N.; Cazaux, S.; Huelmo, S.; Techera, J.; Arrighetti R.; Morales, E.; Martínez, G.; y Gianotti, V., 2004c. *Mapa geológico del*

- departamento de Montevideo a escala 1:50.000*. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología.
- Verein Deutscher Ingenieure, 2019. VDI 4640-2: *Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems*. Berlin: VDI.
- Veroslavsky, G.; De Santa Ana, H. y Rossello, E., 2004. Depósitos del Jurásico y Cretácico Temprano de la región meridional de Uruguay. El lineamiento Santa Lucía–Aiguá–Merín. En: *Cuencas Sedimentarias del Uruguay-Mesozoico*. pp. 117-142.
- Veroslavsky, G.; Manganelli, A.; Aubet, N.; Pochintesta, L. y Pedro, A., 2022. Geología del área aflorante del Sistema Acuífero guaraní, Cuenca Norte. Montevideo. [en línea] En: *XXI Congreso Geológico Argentino “Geología y desarrollo, desafíos del siglo XXI”* Puerto Madryn - Argentina, 14-18 de marzo.