

Experimental analysis of soil temperature profiles for shallow geothermal applications in tropical urban environments

Christian Alexander Rivas Trinidad¹ , Mauricio Orlando Gómez Argueta² , Rudy Wilfredo Merlos Ortiz³ 
^{1,2,3} *Energy Research Institute, Don Bosco University, San Salvador, El Salvador*

Abstract– This study presents an experimental characterization of the soil temperature profile in the city of Soyapango, El Salvador, performed at an educational institution during the summer season. The objective is to evaluate, from a thermal behavior perspective, the potential applicability of low-enthalpy geothermal systems, specifically Canadian-type earth–air heat exchangers, under local urban conditions. Temperature measurements were performed at multiple depths between the surface and 3 m, and at different times of the day over a one-week period to analyze thermal gradients, daily variability, and the degree of temperature attenuation with depth. The results show a significant reduction and delay in temperature fluctuations as depth increases; however, at 3 m depth the subsurface temperature still exhibits noticeable variability, particularly under high ambient temperature conditions typical of volcanic soils with low moisture content. These findings suggest that, in similar geological contexts, greater depths or additional design considerations may be required to achieve the thermal stability necessary for effective passive air-conditioning. The study highlights the importance of local in-situ thermal measurements as a preliminary step for the design of shallow geothermal systems in tropical urban environments.

Keywords– Low-enthalpy geothermal energy, earth–air heat exchanger, soil temperature profile, passive cooling, volcanic soils

Análisis experimental de perfiles de temperatura del suelo para aplicaciones geotérmicas de baja profundidad en entornos urbanos tropicales

Christian Alexander Rivas Trinidad¹ , Mauricio Orlando Gómez Argueta² , Rudy Wilfredo Merlos Ortiz³ 
^{1,2,3} Instituto de Investigación de Energía, Universidad Don Bosco, San Salvador, El Salvador

Resumen— Este estudio presenta una caracterización experimental del perfil de temperatura del suelo en la ciudad de Soyapango, El Salvador, realizada en una instalación educativa durante la temporada de verano. El objetivo es evaluar el uso potencial de sistemas geotérmicos de baja entalpía, específicamente intercambiadores de calor suelo-aire tipo pozo canadiense, bajo condiciones urbanas locales. Las mediciones de temperatura se realizaron a varias profundidades desde la superficie hasta los 3 m y en diferentes momentos del día durante un periodo de una semana, con el fin de analizar los gradientes térmicos, la variación diaria y la atenuación de la temperatura con la profundidad. Los resultados muestran una reducción clara de la variación de temperatura a medida que aumenta la profundidad; sin embargo, a los 3 m la temperatura del suelo aún presenta cambios apreciables durante periodos de alta temperatura ambiental, típicos de suelos volcánicos con bajo contenido de humedad. Estos resultados indican que, en condiciones geológicas similares, pueden requerirse mayores profundidades de instalación o consideraciones adicionales de diseño para alcanzar la estabilidad térmica necesaria para una climatización pasiva efectiva. El estudio resalta la importancia de las mediciones locales in situ de temperatura como un paso preliminar en el diseño de sistemas geotérmicos someros en entornos urbanos tropicales.

Palabras clave— Geotermia de baja profundidad, intercambiadores de calor suelo-aire, perfil de temperatura del suelo, climatización pasiva, suelos volcánicos urbanos

I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento térmico del suelo es fundamental en el análisis de proyectos de ingeniería que involucran el intercambio de calor con el subsuelo, como los sistemas geotérmicos de baja profundidad. En este estudio se evalúa experimentalmente el comportamiento térmico del suelo en una institución educativa del municipio de Soyapango, con el objetivo de aportar criterios técnicos para la aplicación de intercambiadores de calor suelo-aire. Este tipo de sistemas aprovecha la atenuación de las variaciones térmicas del terreno a partir de cierta profundidad, donde la temperatura tiende a presentar una menor variabilidad a lo largo del tiempo y se aproxima al valor promedio anual del ambiente [1]. Bajo determinadas condiciones, esta característica convierte al subsuelo en un reservorio térmico natural con potencial para la climatización pasiva de edificaciones. Estudios recientes han explorado el potencial de los sistemas geotérmicos de baja entalpía y de los intercambiadores suelo-aire en aplicaciones de climatización

pasiva, destacando la importancia de las condiciones geológicas y climáticas locales para su desempeño [11]–[14].

Sin embargo, la profundidad a la cual se alcanza una estabilidad térmica suficiente depende de factores como el tipo de suelo, su estructura, el contenido de humedad y las condiciones climáticas locales. En entornos urbanos tropicales con suelos de origen volcánico, estas condiciones pueden diferir de las reportadas en la literatura para otros contextos geológicos y climáticos. Por ello, la caracterización térmica basada en mediciones in situ del perfil de temperatura del suelo constituye un paso preliminar relevante para analizar la atenuación térmica con la profundidad y su implicación en el diseño de sistemas geotérmicos de baja profundidad, particularmente durante condiciones de alta carga térmica como las presentes en la temporada de verano.

II. PROPIEDADES TÉRMICAS

Desde un punto de vista teórico, el suelo puede actuar como un acumulador térmico natural debido a su alta capacidad calorífica y su conductividad térmica relativamente baja. Esta última hace que el calor se transfiera lentamente a través del medio, lo cual resulta ventajoso para el almacenamiento de energía térmica más allá de profundidades del orden de 0.5 m. De acuerdo con la literatura, las variaciones estacionales de temperatura pueden alcanzar profundidades cercanas a los 2 m, mientras que a mayores profundidades la temperatura del suelo tiende a presentar una menor variabilidad. [2]

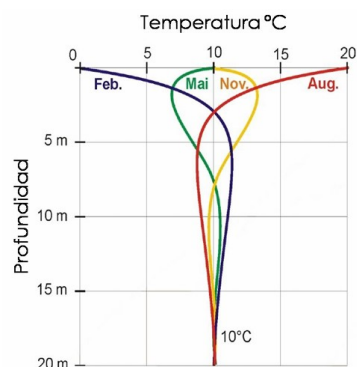


Fig. 1. Temperatura del suelo en función de la profundidad en el hemisferio Norte. [2].

En instalaciones geotérmicas de pequeña escala, como las que se pretenden implementar en entornos urbanos, es común el uso de valores empíricos para estimar la conductividad y la difusividad térmica del suelo. No obstante, este enfoque puede inducir errores significativos, especialmente en suelos con alta variabilidad en parámetros como el contenido de humedad, la mineralogía, la densidad y la estructura del terreno. Por esta razón, la caracterización térmica basada en mediciones in situ resulta esencial para aproximar el comportamiento real del subsuelo y reducir la incertidumbre en el diseño de sistemas geotérmicos de baja profundidad.

III. GEOLOGÍA LOCAL

El municipio de San Salvador se caracteriza por una geología compleja, compuesta principalmente por suelos de origen volcánico, depósitos aluviales y diversas formaciones rocosas. Esta diversidad geológica influye directamente en el comportamiento térmico del suelo, particularmente en su conductividad térmica, la cual puede variar considerablemente en función de la composición, la porosidad y el contenido de humedad [3]. Diversos estudios han señalado que la caracterización local del subsuelo constituye un factor determinante en la evaluación de sistemas geotérmicos someros [11], [12].

La conductividad térmica se define como la propiedad intrínseca del suelo que describe su capacidad para conducir calor, mientras que la capacidad calorífica está asociada a la cantidad de energía térmica que un material puede almacenar al experimentar un cambio de temperatura [4]. En la literatura técnica se reportan valores típicos de estas propiedades para distintos tipos de suelo, los cuales se utilizan comúnmente como referencia preliminar en estudios de factibilidad.

Estudios preliminares sugieren que algunas zonas de San Salvador presentan suelos con valores de conductividad térmica potencialmente favorables para la implementación de sistemas geotérmicos de baja profundidad. Sin embargo, la heterogeneidad del subsuelo hace necesario realizar evaluaciones específicas en cada sitio, ya que el uso exclusivo de valores tabulados puede no representar adecuadamente las condiciones reales del terreno.

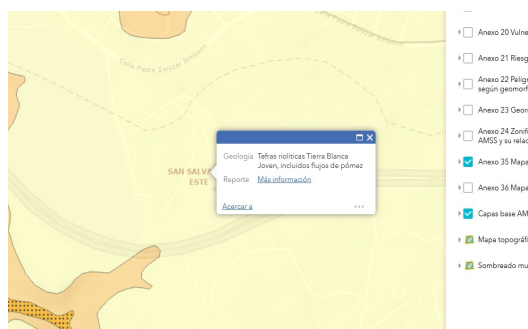


Fig. 2 Características del suelo de la zona. [4].

El sitio de estudio se localiza en el municipio de Soyapango, El Salvador (13.710° N, 89.139° W), en una zona urbana caracterizada por suelos de origen volcánico. Según la

OPAMSS, los suelos en el área de Soyapango son predominantemente de origen volcánico, con presencia de flujos de pómez, lo cual tiende a reducir su capacidad de conducción térmica [5]. Esta condición refuerza la necesidad de analizar experimentalmente el comportamiento térmico del suelo antes de considerar la implementación de sistemas de climatización pasiva basados en el intercambio de calor con el subsuelo.

Estas condiciones climáticas, caracterizadas por temperaturas promedio entre 22.5 y 25.0 °C en la zona de estudio, proporcionan el contexto térmico bajo el cual se evaluó el comportamiento del subsuelo (Fig. 3).

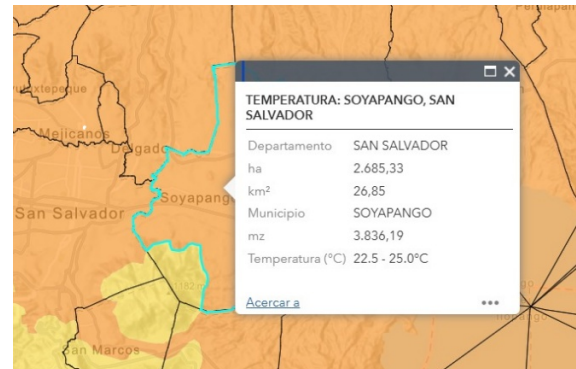


Fig. 3 . Proyección de temperatura de la zona. [6].

IV. CLIMA LOCAL

El Salvador, al igual que otros países de la región centroamericana, presenta un clima tropical caracterizado por temperaturas elevadas y una marcada variabilidad estacional asociada a los patrones de precipitación [7]. Estas condiciones climáticas influyen directamente en el comportamiento térmico superficial del suelo y en la carga térmica a la que se ven sometidos los sistemas de climatización en entornos urbanos.

Las variaciones de temperatura ambiental y los procesos de infiltración de agua asociados a eventos de lluvia pueden afectar el intercambio de calor entre el suelo y el aire en sistemas geotérmicos de baja profundidad [8]. En este sentido, el análisis del perfil de temperatura del suelo durante periodos de alta carga térmica, como la temporada de verano, permite evaluar el comportamiento del subsuelo bajo condiciones representativas del escenario más exigente para este tipo de aplicaciones.

V. METODOLOGÍA

A. Instrumento de medición

Las mediciones de temperatura se realizaron utilizando un termómetro analógico tipo Soil Meter. Este instrumento fue seleccionado por ser el único disponible durante la fase de levantamiento de datos. Si bien presenta limitaciones en comparación con sensores digitales de mayor resolución o sistemas automatizados, permitió desarrollar una

caracterización práctica del comportamiento térmico del suelo bajo condiciones reales de campo.

Una de las principales limitaciones del instrumento es que proporciona lecturas enteras, sin decimales, lo que implica un margen de error estimado de ± 1 °C. Este nivel de resolución resulta suficiente para el análisis de gradientes térmicos verticales y variaciones diarias de temperatura, que constituyen el foco principal del presente estudio.



Fig. 4 Instrumento de medición utilizado para el registro de temperatura del suelo.

Con el fin de estimar el error sistemático del instrumento, se realizó una comparación puntual con un termómetro infrarrojo digital (Visual IR Thermometer) de la marca Fluke, el cual posee mayor resolución y precisión. La comparación se efectuó en superficie, bajo condiciones controladas, sometiendo ambos instrumentos al mismo entorno térmico. El termómetro Fluke registró una temperatura de 33.9 °C, mientras que el Soil Meter indicó 33 °C, lo que corresponde a una diferencia de 0.9 °C. Esta verificación permitió confirmar de manera práctica el margen de error estimado para las mediciones realizadas durante la campaña experimental.



Fig. 5 Comparación de medición con termómetro infrarrojo Fluke.



Fig. 6 Lectura correspondiente del termómetro tipo Soil Meter.

El procedimiento de medición implicó el ingreso físico a un pozo de registro, donde el instrumento era introducido hasta las profundidades requeridas. Las condiciones del sitio, tales como el espacio reducido, la humedad del entorno y el tiempo necesario para que el sensor alcanzara el equilibrio térmico (aproximadamente entre 2 y 3 minutos por punto), limitaron la cantidad de mediciones posibles por jornada. En función de estas restricciones, se estableció una rutina de cuatro mediciones diarias en horarios definidos, buscando un equilibrio entre viabilidad operativa y representatividad térmica de los datos.



Fig. 7 Vista interna del pozo de registro utilizado para las mediciones.

B. Horarios de medición

La campaña de medición se extendió durante una semana completa, registrándose temperaturas en cuatro momentos del día (9:00, 11:00, 13:00 y 15:00 horas) y a distintas profundidades: superficie: 0.1 m, 1 m, 2 m y 3 m. Esta selección de horarios se fundamentó en principios de transferencia de calor, considerando la alta inercia térmica del suelo, la cual provoca que las variaciones de temperatura se atenúen y se desfasen progresivamente con el aumento de la profundidad.

Se priorizó el intervalo comprendido entre las 9:00 y las 15:00 horas por corresponder al periodo de mayor incidencia de radiación solar, lo que permite evaluar el comportamiento térmico del suelo bajo condiciones de mayor carga térmica superficial. Aunque el presente estudio no incluyó mediciones

directas de irradiancia, la selección de estos horarios resulta coherente con la literatura técnica, que establece una relación directa entre la radiación solar incidente y la respuesta térmica del suelo [9]. En este contexto, se asume que la distribución térmica vertical presenta una atenuación y un desfase temporal respecto al perfil diario de radiación.

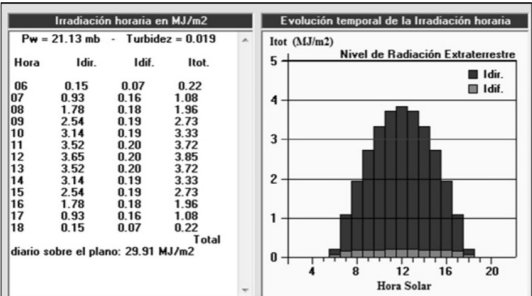


Fig. 8 Comparación entre radiación directa y difusa sobre San Salvador. [9].

C. Tablas y gráficos de medición

En la Tabla II se presentan los valores de temperatura registrados durante la campaña experimental. Los datos evidencian una reducción progresiva de la amplitud térmica a medida que aumenta la profundidad, observándose una tendencia hacia valores cercanos a 26 °C durante las primeras horas de la mañana y al final de la tarde. Si bien no se realizaron mediciones en horario nocturno o de madrugada, el comportamiento observado sugiere una variación limitada de la temperatura en las capas más profundas del suelo.

TABLA I. DATOS DE LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA DEL SUELO

Horas	Profundidad	Temperatura por Días (°C)					
		X	J	V	L	M	X
9:00	0.1 m	28	26	28	28	29	29
	1 m	27	26	27	27	27	28
	2 m	27	26	26	26	27	27
	3 m	26	26	26	26	26	26
11:00	0.1 m	40	37	42	43	39	37
	1 m	31	31	32	32	33	33
	2 m	30	30	31	31	30	30
	3 m	29	29	30	30	29	28
14:00	0.1 m	33	34	31	31	33	34
	1 m	30	28	29	29	30	31
	2 m	29	27	28	28	29	29
	3 m	28	26	27	26	28	27
17:00	0.1 m	28	28	30	28	28	29
	1 m	28	27	29	27	28	28
	2 m	27	26	28	27	27	27
	3 m	26	26	27	26	26	26

A lo largo del día se aprecia un aumento significativo de la temperatura superficial, acompañado de la presencia de un gradiente térmico marcado entre la superficie y las capas más

profundas. Este gradiente alcanza sus valores máximos en el intervalo comprendido entre las 11:00 y las 14:00 horas, coincidiendo con los periodos de mayor insolación. En algunos casos, la temperatura superficial alcanzó valores de hasta 43 °C, mientras que a 3 m de profundidad se registraron diferencias superiores a 10 °C respecto a la superficie.

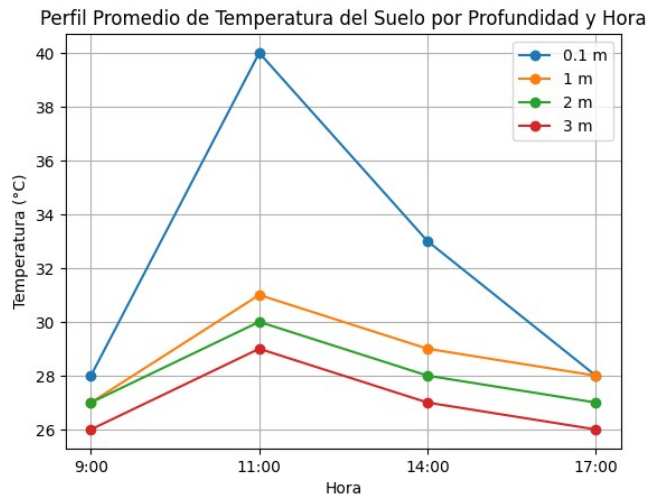


Fig. 9 Tendencia de la temperatura del suelo en función de la profundidad y el horario.

C. Resultados

Los resultados muestran que, si bien la temperatura del subsuelo es inferior a la temperatura superficial durante los periodos de mayor carga térmica, a una profundidad de 3 m aún se observan variaciones apreciables a lo largo de la semana analizada. Este comportamiento indica que, bajo las condiciones estudiadas, la estabilidad térmica del suelo a dicha profundidad no es absoluta, especialmente en suelos de origen volcánico con bajo contenido de humedad.

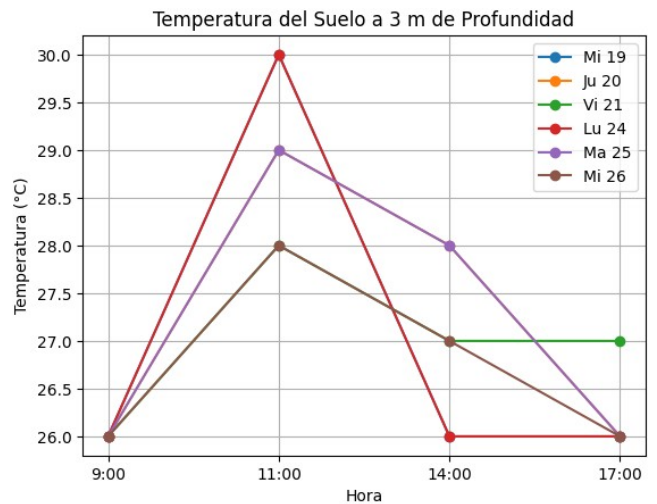


Fig. 10 Variación de la temperatura del suelo a 3 m de profundidad durante la semana de medición

En contraste, la temperatura registrada en las capas superficiales presenta una variabilidad significativamente mayor, reflejando de manera directa las condiciones climáticas y la radiación solar incidente durante el periodo de estudio.

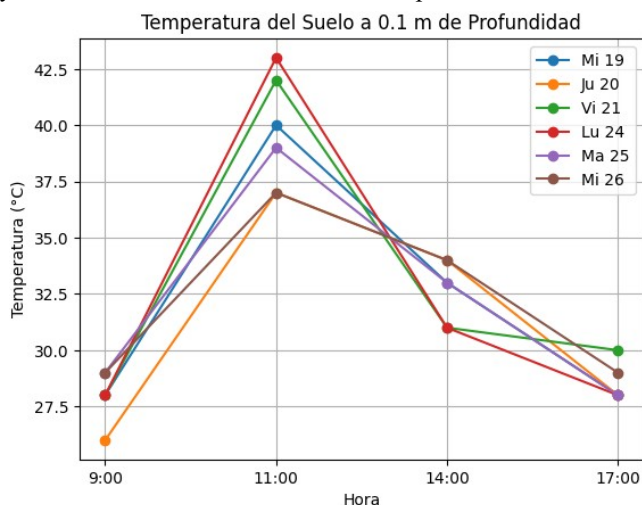


Fig. 11 Variación de la temperatura del suelo a 0.1 m de profundidad

Estos resultados sugieren que, para aplicaciones de climatización pasiva mediante sistemas geotérmicos de baja profundidad en suelos volcánicos urbanos, podría ser necesario considerar mayores profundidades de instalación o estrategias complementarias de diseño para alcanzar una atenuación térmica diaria más estable.

VI. CONCLUSIONES

El análisis experimental del perfil de temperatura del suelo permitió identificar un comportamiento térmico claramente diferenciado entre la superficie y las capas más profundas, evidenciándose una atenuación progresiva de la variación térmica diaria con el aumento de la profundidad. Durante los periodos de mayor carga térmica, la temperatura del subsuelo se mantuvo consistentemente por debajo de la temperatura superficial, lo que confirma la existencia de un gradiente térmico aprovechable para aplicaciones de climatización pasiva.

Los resultados obtenidos muestran que, bajo las condiciones del sitio de estudio, a una profundidad de 3 m la temperatura del suelo presenta una variación diaria reducida en comparación con la superficie, aunque no completamente estable. Esta variabilidad, observada incluso en la capa más profunda analizada, sugiere que en suelos de origen volcánico y con bajo contenido de humedad la profundidad de instalación es un factor crítico para lograr una atenuación térmica suficiente.

El comportamiento térmico registrado durante la temporada de verano, caracterizada por altas temperaturas ambientales, representa un escenario exigente para la evaluación del subsuelo. En este contexto, las mediciones realizadas permiten inferir que, para sistemas geotérmicos de

baja profundidad basados en intercambiadores de calor suelo-aire, podrían ser necesarias mayores profundidades de instalación o estrategias complementarias de diseño con el fin de alcanzar condiciones más favorables de estabilidad térmica.

Finalmente, el estudio evidencia la importancia de realizar mediciones locales in situ del perfil de temperatura del suelo como paso preliminar en el análisis y diseño de sistemas geotérmicos de baja profundidad en entornos urbanos tropicales. Este tipo de caracterización experimental permite reducir la incertidumbre asociada al uso de valores empíricos de la literatura y aporta información relevante para la toma de decisiones técnicas en contextos con alta variabilidad geológica y climática.

VII. DISCUSIÓN

El estudio indica que la atenuación térmica con la profundidad sí se presenta y resulta claramente apreciable a partir de 1 m, observándose una reducción significativa de la variación diaria de la temperatura en comparación con la superficie. Sin embargo, este comportamiento no implica necesariamente que dicha atenuación sea suficiente para garantizar un intercambio de calor efectivo en aplicaciones como los pozos geotérmicos de baja profundidad. Los resultados muestran que, incluso a 3 m de profundidad, la temperatura del suelo aún presenta variaciones apreciables, lo que sugiere que la estabilidad térmica del subsuelo depende de manera importante de las condiciones locales del terreno. En este sentido, se vuelve necesario realizar estudios preliminares específicos en cada sitio para caracterizar el comportamiento térmico real antes de definir parámetros de diseño.

Por otra parte, el instrumento de medición utilizado puede mejorarse con el fin de obtener un conjunto de datos más preciso, dado que las mediciones se realizaron con los recursos disponibles durante la campaña experimental. El uso de sensores con mayor resolución y sistemas de registro continuo permitiría reducir la incertidumbre asociada a las mediciones y ofrecer una caracterización más detallada del perfil térmico del suelo. Este aspecto es relevante, ya que el valor mínimo de temperatura que puede alcanzar el subsuelo establece una limitación directa para la aplicación de sistemas de climatización pasiva basados en intercambiadores suelo-aire. Desde el punto de vista de la conservación de la energía, mejoras en el diseño del sistema, como la selección de materiales, el aumento de la longitud del conducto o la modificación del caudal de aire, tienen un efecto limitado si la temperatura del suelo permanece elevada. Bajo estas condiciones, resulta razonable considerar la evaluación de mayores profundidades o de niveles más bajos del terreno donde se alcance una estabilidad térmica más favorable.

El presente estudio constituye una caracterización experimental preliminar limitada a mediciones diurnas realizadas durante condiciones de verano y en un periodo de una semana. Trabajos futuros deberían incorporar monitoreo estacional, sistemas de adquisición continua y modelos

analíticos de comportamiento térmico con el fin de mejorar la caracterización térmica del subsuelo.

REFERENCIAS

- [1] L. Iannelli, et al., “La tierra como acondicionador natural de ambientes,” en 1er Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía, 2013.
- [2] L. García, et al., “Caracterización de condiciones meteorológicas en El Salvador,” Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), El Salvador.
- [3] J. M. Cuevas y V. González Penella, “Propiedades térmicas de los suelos,” 2008.
- [4] Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), “Mapa geológico y térmico del área de Soyapango.” [En línea]. Disponible: <https://geovisor.opamss.org.sv>
- [5] Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA), “Proyección de temperatura del suelo en el área de Soyapango,” El Salvador.
- [6] E. J. Sorto, “Impacto del cambio climático en la salud de El Salvador,” Crea Ciencia, 2020.
- [7] T. E. Ochsner, R. Horton y Q. Wang, “A new perspective on soil thermal properties,” Soil Science Society of America Journal, vol. 65, pp. 1641–1647, 2001.
- [8] M. Huezo y A. Morán, “Geosol V2.0,” 2012.
- [9] University of California, Berkeley, “Thermal comfort and soil temperature data.” [En línea]. Disponible: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>
- [10] Cymper, “Curva de temperatura estacional del subsuelo.” [En línea]. Disponible: <https://www.cymper.com/blog>
- [11] J. J. Malagón, M. R. Morón, E. G. Páez, and C. A. Martín, “Potencial para la implementación de la energía geotérmica de baja entalpía en Colombia: un caso de estudio,” Revista Brasileira de Energía, 2020.
- [12] R. Merlos, A. Valdizón, and D. Cerritos, “Design and implementation of a low enthalpy geothermal probe for air conditioning systems,” in Proc. IEEE Int. Conf. Machine Learning and Applied Network Technologies (ICMLANT), 2023, pp. 1–6.
- [13] C. Aguirre and R. Ordoñez, “Estado del arte del aprovechamiento de energía geotérmica para climatización de ambientes mediante la técnica de pozo canadiense,” 2019.
- [14] S. Vargas, B. Bravo, V. Rodríguez, and E. Micco, “Practical guide: Use of shallow geothermal energy for air conditioning,” Spain, 2022.