

UN NUEVO ENFOQUE PARA LA BIOCONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE EN AMBIENTES CAFETALEROS, BASADO EN UN SISTEMA BIOCLIMÁTICO GEOTÉRMICO (SIMULACIÓN)

Brigith Carolina Belalcázar Acosta ^{#1}, Fabio Alfonso Andrade Suárez ^{#2} Richard Marcelo Imbachí Chávez ^{#3}
Sergio David Collazos Joja ^{#4}, Viviana Andrea Rosero Mera ^{#5}

^{1,4,5#} *Industrial Engineering Student*, ³ *Spin off Biohogar R&D Director, Dep of Industrial Engineering*, *Fundación Universitaria de Popayán*, ² *Tutor Professor Dept, of Architecture, Fundación Universitaria de Popayán.*

¹brigithacosta1061@gmail.com

²fabio.andrade@docente.fup.edu.co

³richard.imbachi@docente.fup.edu.co

⁴sdavi.773@gmail.com

⁵varoserol@gmail.com

Abstract— El café colombiano es un producto reconocido a nivel mundial por su suavidad, sabor y su alta calidad, se destacan las regiones cafeteras de Colombia como un motor de la economía nacional, en especial el departamento del Cauca como el cuarto productor nacional. El objetivo del proyecto se centró en la viabilidad y el funcionamiento del modelo de un pozo canadiense en un ambiente cafetero, aplicando conceptos de análisis de arquitectura vernácula y biofílica en una vivienda cafetera ubicada en el municipio de Cajibío, Cauca. Se realizó el análisis del estado del arte y la técnica, para conocer el funcionamiento de los pozos canadienses y sus aplicaciones en el mundo, a su vez se retomó la documentación generada en análisis socioeconómico, constructivo y mejoramiento de vivienda por el grupo de taller 9 de Arquitectura de la Fundación universitaria de Popayán en la meseta de Cajibío. Se estableció el lugar de estudio y la caracterización de las viviendas cafeteras en la meseta, en el Parque Tecnológico de Innovación del Café “Tecnicafe” y la hacienda Supracafé. Una vez seleccionada la zona de estudio se inició con el registro de datos físicos y ambientales requeridos mediante la construcción de un dispositivo de medición de variables físicas, insumos requeridos en la simulación del diseño bioclimático a través del software Energy 2D. Se evidenció el comportamiento de la temperatura durante el día y la noche en función del uso de los materiales en estudio, Cábano y PEAD (Polietileno de alta densidad), finalmente se determinó el cábano como material constructivo, para el proceso de aislamiento térmico en aproximadamente 1 hora de simulación, con una variación de temperatura aproximadamente de 10 °c por encima y por debajo de la temperatura exterior, garantizándose, un nivel de confort térmico para las personas que hacen uso de la vivienda en la zona de estudio (Sala), se obtuvo un confort térmico como insumo en la mejora de la calidad de vida de los caficultores.

Keywords— Bioconstrucción, Cambio climático, Energía geotérmica, Confort térmico, Arquitectura vernácula, Arquitectura biofílica, Habitabilidad, Termodinámica, Sistemas geotérmicos, Análisis térmico, Materiales de construcción

I. INTRODUCTION

Colombia es reconocida a nivel mundial por su producción de café, de este producto depende gran parte de la economía del país. La zona andina es una de las regiones con mayor concentración de café gracias al clima que presenta [1] El departamento del Cauca hace parte de la zona andina, por tanto, es uno de los lugares con mayor número de cultivos de este producto emblemático. Este departamento se encuentra dividido en cuatro regiones cafeteras: Centro, norte, sur y la región oriente.[2]. En la región centro cafetera del departamento del Cauca se encuentra el municipio de Cajibío, es conocido por producir café de alta calidad, se cataloga como uno de los mayores productores de café del departamento, para el 2020 produjo 660.000 arrobas de café en 6873 hectáreas cultivadas. [2]

En el año 2018, más de la mitad de los caficultores del país, se registraron en las estadísticas de pobreza multidimensional[7] establecidas en Colombia, la mayoría de los gastos están representados en vivienda, alimentación y salud[7]; induciendo un bajo desarrollo sostenible. Uno de los aspectos a tener en cuenta es el bienestar de las

familias cafeteras de la región, gran parte de ellas no cuentan con una vivienda digna[7], lo que conlleva a que su calidad de vida en términos de habitabilidad no sea la mejor [7]. Considerando lo anterior y los datos obtenidos en procesos de inmersión social[8] por el semillero de investigación SIE2 [9] de la Fundación Universitaria de Popayán [9] con respecto al municipio de Cajibío, se planteó realizar un proyecto de un diseño bioclimático en una construcción denominada “Biohogar” [9] en la zona del Parque Tecnológico de Innovación del Café[10], se aplicó el modelo de un diseño de pozo canadiense[14] en un contexto de arquitectura vernácula[10], este desarrollo valoro el modelo de arquitectura biofísica[15] en pro de mejorar la calidad de vida de los caficultores de esta región.

El modelo de diseño bioclimático estuvo basado en el análisis de transferencia de calor[6] identificando las variables físicas relevantes que determinan un confort térmico determinado por la materialidad[6] de una vivienda cafetera. Como resultado de lo expuesto se generó la siguiente pregunta de investigación: ¿Como la técnica del pozo canadiense puede aportar en la habitabilidad de una bio-construcción del modelo biohogar diseñado para los caficultores de la región?. Para cumplir con el objetivo general planteado (Diseñar el modelo bioclimático en la estructuración de una vivienda, basada en materiales de bioconstrucción de la región en ambientes cafeteros), se tuvieron en cuenta los siguientes objetivos específicos: Caracterizar la tipología de las viviendas cafeteras hacia un diseño bioclimático en la meseta de Cajibío, Cauca. Establecer el diseño y modelo experimental bioclimático de la vivienda seleccionada.

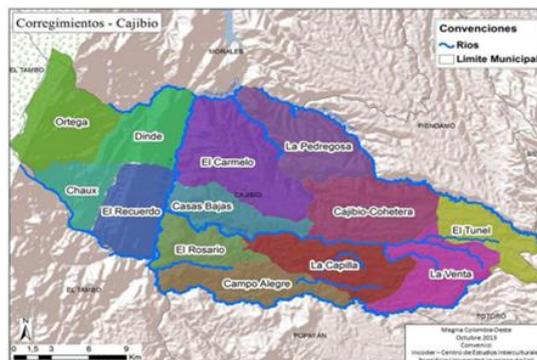
Implementar pruebas de validación a través del software Energy 2D del modelo bioclimático. Como hipótesis de investigación se definió: El diseño bioclimático en una vivienda cafetera basado en el aprovechamiento de la energía geotérmica, contribuye al mejoramiento de su habitabilidad.

II. METODOLOGIA

La metodología que se utilizó para el Proyecto en un primer momento fue la documentación de lo que es un pozo provenzal y de los lugares donde este se ha utilizado, ya que esta información permite reconocer aspectos a tener en cuenta en su elaboración, también se documentó lugar seleccionado, para dar respuesta al primer objetivo específico de la propuesta. En esta parte se realizó la caracterización de las viviendas cafeteras a partir de los datos recogidos por el SIE2 de la FUP y por el grupo de personas que hicieron parte de este proyecto. Otra de las herramientas metodológicas que se utilizaron fue el registro de datos climatológicos del lugar a partir de las variables termodinámicas. Algunas variables climatológicas que se utilizaron fueron: la temperatura, la presión atmosférica, el viento, la humedad, etc. Con la recolección y análisis de estos datos se pasó a desarrollar el segundo objetivo que era diseñar el pozo canadiense, también se escogió los materiales más adecuados para realizarlo. Por último, se utilizó el programa de Energy 3d para realizar la simulación del funcionamiento del pozo. Con respecto a lo anterior, la propuesta se desarrolló en tres fases.

2.1 STAGE I:

La propuesta de bioclimatización se desarrolló en el municipio de Cajibío[3], Cauca, este lugar se encuentra ubicado al nororiente de la capital caucana, su altura promedio es de 1765 m.s.n.m con una temperatura que varía en un rango de 12 a 24 grados centígrados en cuanto a su división política y administrativa, Cajibío está compuesto por 13 corregimientos incluido la cabecera municipal o zona centro, y 126 veredas.(PDM,2015)[3] Este municipio se caracterizan por tener una variedad cultural en su población, el 3,7% de la población se identifica como indígena (perteneciente a las etnias Nasa y Misak), el 15,8% son afrodescendientes y el 80,5% se considera comunidad campesina, se logra destacar que dicha población se dedica al cultivo de café, y de otros productos orgánicos, la mayoría de estas personas han construido sus casas con materiales que le son factibles de adquirir en su entorno teniendo en cuenta su zona geográfica, contexto cultural y estabilidad económica. (DANE)[5].



Esta propuesta se planteó en el corregimiento de la Venta, Cajibío[3] teniendo en cuenta que en este lugar se encuentra ubicado el Parque Tecnológico de Innovación del Café (TECNICAFE). Ya que permitieron realizar la toma de variables termodinámicas para llevar a cabo el proyecto y además, este lugar fue determinante para la caracterización de las viviendas cafeteras la cual realizó el programa de arquitectura, quienes hicieron visitas técnicas en las diferentes zonas del municipio de Cajibío con el fin de evidenciar las necesidades de la población cafetera en temas de infraestructura, se generaron propuestas de viviendas con un impacto positivo en su habitabilidad, el Proyecto de tomo como referencia el parque TECNICAFE. Este lugar es una organización dedicada a la mejora e innovación del café a partir del uso de nuevas tecnologías, la organización busca apoyar a las comunidades cafeteras en diferentes aspectos de los cuales se resalta, la tecnificación del producto mejorando su calidad para exportación.

Durante la recopilación de datos de inspecciones técnicas hechas por el macroproyecto y la vistas realizadas por el equipo del presente proyecto se pudo evidenciar el notable deterioro de las viviendas de los caficultores que habitan este lugar, la situación que presentan estas edificaciones se podría atribuir a la antigüedad de las edificaciones y a la situación económica que tienen las familias, ya que algunos de los caficultores no cuenta con los ingresos necesarios para mejorar su calidad de vida. En términos de habitabilidad estas viviendas no cumplen con las condiciones de confort y calidez que se esperan en una edificación, por otro lado, los métodos de construcción utilizados no han sido los más óptimos.



Fig. -2: Casa de estudio. Pozo canadiense Bihogar, 2021 Fuente: SIE2

En este lugar se identificó que las edificaciones se han ido deteriorando lo que ha conllevado que para la construcción de sus viviendas, se utilicen en “El hogar materiales de vivienda inadecuados en cualquiera de los tres componentes tales como piso, techo o paredes” [4], generando un nivel de inconformidad térmica en el interior de las viviendas, la cual podría deberse a el mal diseño termodinámico, al diseño inapropiado de la vivienda y los bajos recursos económicos para su construcción, originando efectos negativos para el bienestar de las familias caficultoras, tales como: problemas de salud, problemas de habitabilidad de la vivienda y gastos económicos. Lo que se pretendió con la propuesta fue desarrollar el pozo provenzal con materiales reciclables este pozo se realizó en relación al modelo arquitectónico planteado por el SIE2. Para la toma de datos se inició identificando los materiales que componen la vivienda delimitada como zona de estudio; la vivienda tiene paredes en bahareque, tejas de barro, vigas y columnas en madera y sus pisos en baldosa; adicional a ello también se evidenció el deterioro estructural cuyas causas pueden ser por el tiempo transcurrido desde su construcción, fenómenos climáticos y en algunas ocasiones por falta de mantenimiento.

2.2 STAGE II:

Después de identificar la caracterización de las viviendas cafeteras, se pasó a determinar mediante la página web meteorológica “Weather Spark” las variables de temperatura, la probabilidad diaria de precipitación, los niveles de la humedad, la velocidad promedio del viento, dirección del viento y energía solar de onda corta incidente diaria promedio, estas variables son determinantes para efectuar el diseño del pozo provenzal. Según la página meteorológica,

en la zona de Cajibío se pudo determinar la variación de la temperatura para el mes de agosto de 2021, se tuvo una temperatura máxima promedio de 24 °C y mínima de 14 °C con respecto a los demás meses del año en los que la temperatura promedio va de los 14 °C a los 23 °C. La temporada más húmeda dura alrededor de 7 meses, comenzando en octubre y finalizando en mes de mayo, el mes con mayor precipitación de Lluvia en esta región es noviembre. Por otro lado, el nivel de humedad durante la temporada de lluvias es de un 36% y durante la temporada seca es de un 14%. La energía térmica que se presenta en la zona en verano tiene un aumento de 0,7 kWh, pasando de 4,6 kWh a 5,3 kWh y la más alta reportada ha sido de 5,3 kWh, en los meses de agosto. [17]

Se realizó la visita técnica a la zona de ubicación de TECNICAFE para seleccionar el lugar a registrar los datos faltantes, que permitieran llevar a cabo el diseño propuesto en la investigación. Como se menciona en el documento [16], para la toma de datos se tuvo en cuenta una casa cafetera, la cual tenía un pozo profundo de agua (aljibe) (figura 3), facilitando la toma de datos del terreno, más la información relacionada con la humedad del ambiente y la temperatura. Se buscó identificar la profundidad en la que se transfiere un buen porcentaje de calor en el suelo haciendo uso de las paredes del aljibe: Se instalaron tres sensores de temperatura a diferentes profundidades (2m, 4m y 6m). [16]

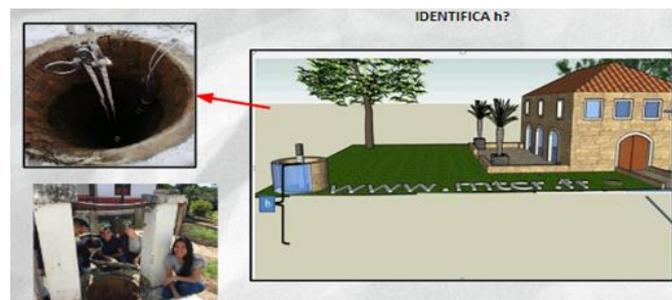


Fig. -3: Toma de datos. Pozo canadiense Bihogar, 2021 Fuente: SIE2

Para el dispositivo de medición de temperatura diseñado, se emplearon los siguientes materiales (figura 4): 40 botellas PET, sensores de temperatura DIGITA DS18820, sensor de humedad HIGROMETRO, cable UTP, portátil PLC, y un arduino mega.



Fig. -4: Materiales utilizados para la toma de datos. Pozo canadiense Biohogar, 2021 Fuente: SIE2

Los sensores registraron los datos mediante una placa de programación Arduino, configurada para obtener la información cada 5 minutos, con el fin de identificar alguna variación que se presentará en la temperatura y la humedad en las diferentes profundidades del terreno. Para reducir el ruido de registro de datos de los sensores se trató de controlar el ambiente a partir de un ducto en botellas PET que se creó para recubrir la instrumentación. Se escogió este material porque es liviano, maleable y es reciclable: La unión de las botellas formaron un conducto con una

longitud de 6 metros, facilitando el empalme y distribución de los sensores, ubicados cada 2 metros. Para llegar a la forma del instrumento de medición se realizó una maqueta de prototipado (figura 5) que permitiera proyectar la forma de ubicación del equipo en las paredes del aljibe.



Fig. -5: Prototipo del recubrimiento hecho para los sensores. Pozo canadiense Biohogar, 2021 Fuente: SIE2

El registro de datos se inició desde las tres 3am hasta las 12 pm del 3 de marzo de 2020 (figura 5) . Se registraron los datos de las temperaturas interna y externa de la vivienda, la velocidad del viento y la humedad del ambiente. El sensor de temperatura N°1 que se encontraba instalado a dos metros de profundidad permitió evidenciar que desde las 3:10 a.m. hasta las 9:10 a.m. Se registró una temperatura estable de 21,5° C y una variabilidad mínima de 0,5° C, desde las 10:10 a.m. hasta las 12:10 p.m tuvo una temperatura de 21° C. El sensor de temperatura N° 2 ubicado a 4 metros de profundidad, tuvo un rango de temperatura constante durante el tiempo muestreo de 3:10 a.m. a 12:10 a.m, con un rango de temperatura inferior al del sensor N° 1, El sensor de temperatura N° 3 ubicado a 6 metros de profundidad obtuvo valores entre los 21° y 25° C y 21°,19° C en todo el tiempo de estudio. Por otro lado, el sensor de humedad relativa ubicado a 6 metros de profundidad registró una humedad constante con una leve variación, las unidades proporcionadas por el sensor tienen un rango entre 0 y 1023 unidades, en donde 0 es muy húmedo y 1023 es poca humedad, comparando los valores arrojados por el sensor, se comprobó que la humedad en el ducto es baja.

	HORA									
PROFUNDIDAD DEL SENSOR	03:10:31	04:10:15	05:10:16	06:10:17	07:10:17	08:10:15	09:10:16	10:10:07	11:10:08	12:10:09
SENSOR 1 2 METROS	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21	21	21
SENSOR 2 4 METROS	20,62	20,62	20,62	20,56	20,69	20,56	20,56	20,5	20,56	20,56
SENSOR 3 6 METROS	21,25	21,12	21,06	21,19	21,19	21,19	21,19	21,06	21,19	21,19
SENSOR HUMEDAD 6 MTS	976	978	978	988	987	979	978	981	980	980
temperatura ambiente	13	13	13	14	16	18	20	22	24	24
ΔT sensor 1	8,5	8,5	8,5	7,5	5,5	3,5	1,5	-1	-3	-3
ΔT sensor 2	7,62	7,62	7,62	6,56	4,69	2,56	0,56	-1,5	-3,44	-3,44
ΔT sensor 3	8,25	8,12	8,06	7,19	5,19	3,19	1,19	-0,94	-2,81	-2,81

Fig. -5: Tabla de los datos suministrados por el sensor. Pozo canadiense Biohogar, 2021 Fuente: SIE2

La temperatura ambiente es constante las 3 primeras horas con un valor de 13° C, desde las horas 6:10 a.m a 11:10 a.m la temperatura va aumentando cada hora en 2° C y entre las 11:10 a.m a 12:10 p.m la temperatura se mantiene constante. Al determinar los deltas de temperatura (figura 5) entre las temperaturas captadas por los sensores y la

temperatura ambiente, se identificaron los siguientes datos: El delta del sensor N° 1 presenta una variación de 8,5° C en las tres primeras horas, se fue reduciendo hasta llegar a la temperatura máxima al mediodía de 24° C. Esta información permitió determinar la profundidad necesaria para realizar el diseño óptimo del pozo canadiense. Con los datos obtenidos se procedió a efectuar una simulación del diseño sistema geotérmico.

2.3 STAGE III:

Se llevó a cabo un modelo de simulación experimental con el fin de evaluar cómo el sistema de ventilación natural afectaba el comportamiento térmico de una vivienda caficultora. Para ello, se utilizó el software ENERGY 2D [18], una herramienta de simulación en la cual se puede analizar la transferencia de calor y fluidos, empleada para la vivienda en estudio. Durante el estudio, se consideraron diversos factores que podrían influir en el comportamiento térmico de la vivienda, tales como la distribución de los espacios, los materiales de construcción y el ciclo día-noche de la zona de análisis. En particular, se identificó la sala de estar (figura 6), como el lugar con mayor afluencia de personas después de la cocina, por lo que se la consideró como el punto focal de la vivienda.

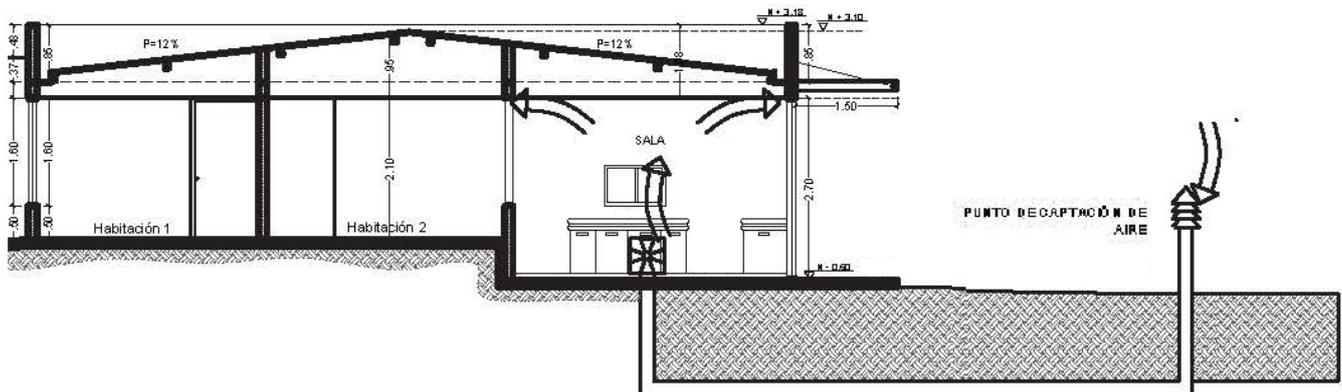


Fig. -6: Fuente Elaboración propia -Vista General De La Vivienda.

La simulación permitió evaluar el efecto del sistema de ventilación natural en la estabilidad térmica de la vivienda, permitiendo así determinar la eficiencia del sistema y su impacto en la comodidad de los habitantes. Se evaluó el efecto de diferentes materiales de construcción en la eficiencia del sistema de ventilación y el confort térmico de la vivienda. Los resultados obtenidos en el modelo de simulación experimental son de gran utilidad para mejorar el diseño bioclimático de las viviendas y en el proceso de optimización del uso de recursos energéticos en la construcción de viviendas. La simulación permitió evidenciar cómo los sistemas de ventilación natural (figura 7), pueden ser utilizados en viviendas ubicadas en regiones con climas cálidos, como lo son las zonas cafeteras, con la finalidad de mejorar la calidad de vida de sus habitantes[19].

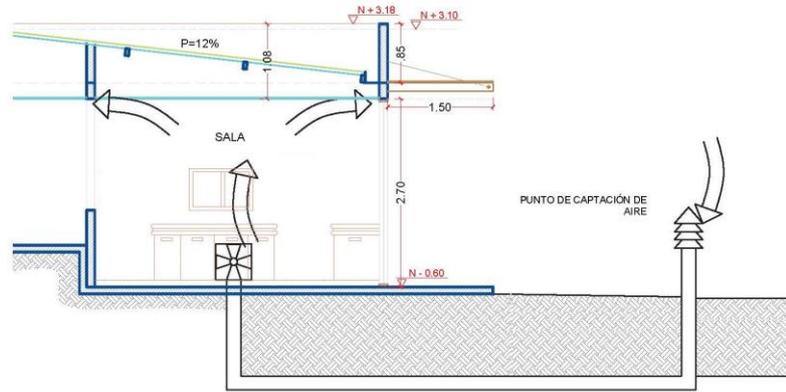


Fig. -7:Fuente Elaboración Propia -Vista General De La Zona De Estudio Sala.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Para entender el comportamiento de la vivienda en diferentes condiciones ambientales [20] a través del software ENERGY 2D (figura 8), se comparó el rendimiento térmico de dos materiales específicos: el cáñamo[21] y el polietileno de alta densidad, ambos con propiedades de aislamiento térmico, empleados comúnmente en la construcción bioclimática de edificios. [22] La simulación, permitió visualizar el comportamiento térmico de la sala de estar y comparar las variables de la temperatura interior de la vivienda con respecto a la temperatura exterior. Se diseñó el modelo de la casa en Energy 2D, definiendo su geometría y características de sus materiales de construcción, como el tipo de aislamiento térmico utilizado, conductividad térmica de las paredes y techos. Se configuró el sistema geotérmico en la simulación, definiendo la transferencia de calor de la tierra y su distribución en la sala de estar, para lograr la calefacción durante la noche y la refrigeración durante el día. Se tuvo en cuenta el tipo de suelo en el que se encontraba la vivienda, el cual se clasificó como arcilloso limoso húmedo.[23], con una conductividad térmica del suelo ($1 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$), calor específico del suelo ($1.200 \text{ J}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$), densidad del suelo ($1.500 \text{ Kg}/\text{m}^3$) y densidad de potencia del suelo: $3.33 \times 10^{-10} \text{ W}/\text{m}^3$. [24]

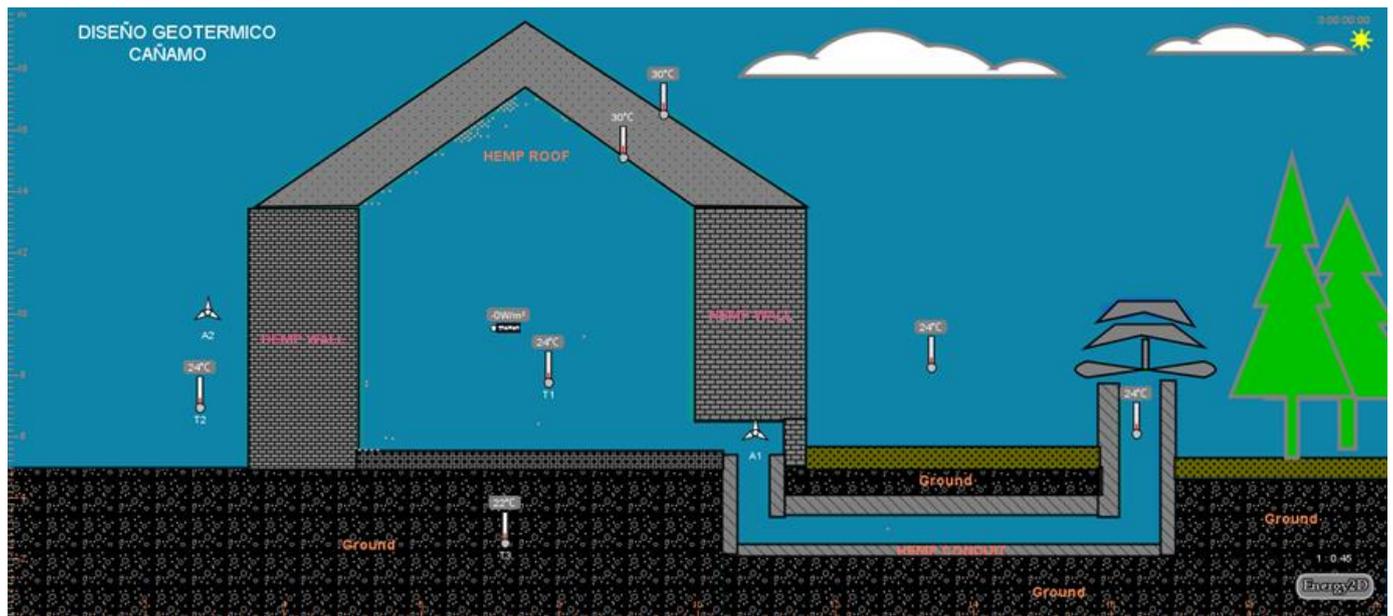


Fig. -8:Fuente Elaboración Propia -Simulación Material De Fibra De Cáñamo día, condiciones iniciales.

Se realizaron las simulaciones para el día (figura 8) y noche (figura 9). Para los materiales empleados en la construcción de la vivienda, se empleó la fibra de cáñamo en muros y en el techo, cuya conductividad térmica es de $0.04 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$, calor específico de $1.500 \text{ J}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$ y densidad de $288 \text{ Kg}/\text{m}^3$. [25] Se compararon dos materiales: El cáñamo y el polietileno de alta densidad (PEAD). La conductividad térmica del PEAD es de $0.47 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$, calor específico $2.100 \text{ J}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$ y densidad de $940 \text{ Kg}/\text{m}^3$. [26]. Entre otras variables consideradas durante la simulación fueron la temperatura ambiente (24°C durante el día y 12°C durante la noche) para la región de Cajibío, departamento del Cauca (Colombia). [27] La velocidad del captador de flujo de aire (0.5 m/s durante el día y la noche) y la temperatura del suelo a una profundidad de 2 metros es de 22°C . Con la evaluación de estas variables se buscó determinar el desempeño térmico de la vivienda y su sistema geotérmico en diferentes condiciones climáticas y ambientales.

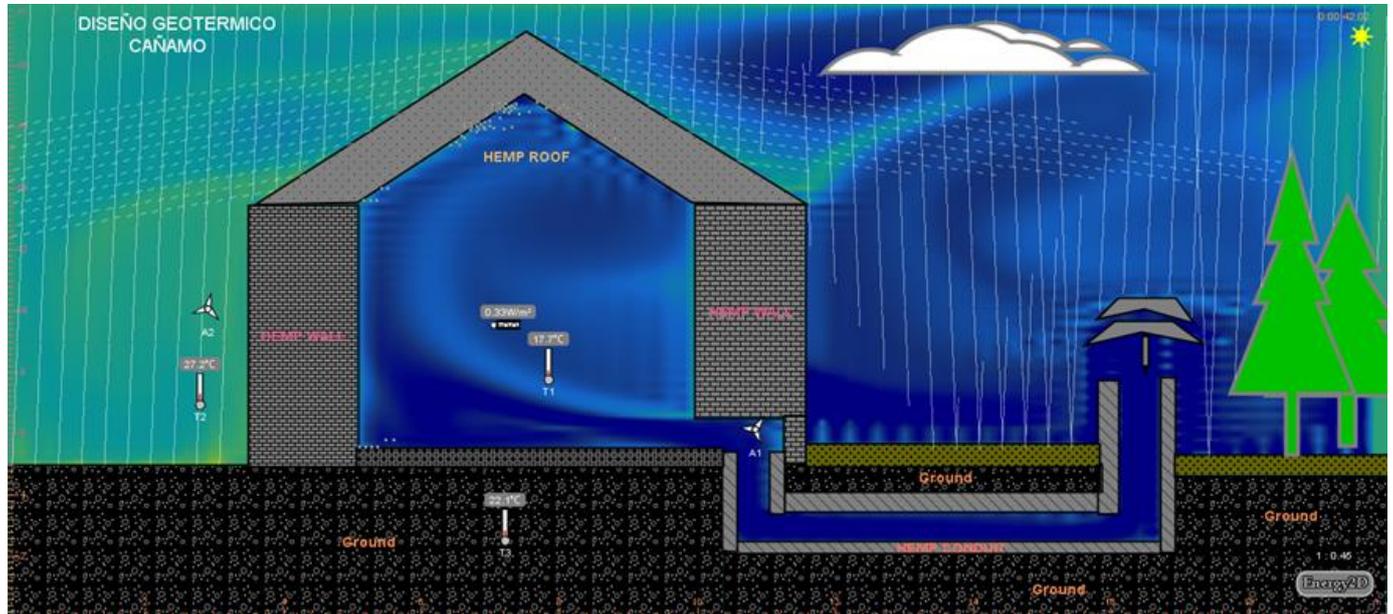


Fig. -9:Fuente. Elaboración propia - Simulación para el día con Material Fibra De Cáñamo, tiempo de simulación: 1 hora.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación: El cáñamo demostró un buen rendimiento térmico, se registró una diferencia de temperatura de 10°C por debajo de la temperatura ambiente en el día, indica una alta capacidad del sistema en hacer el proceso de refrigeración de la vivienda. La inclusión de materiales como el cáñamo, reduce el impacto ambiental en la construcción sostenible. Este rendimiento térmico del sistema bioclimatizado geotérmico puede traducirse en un menor consumo de energía para la calefacción o refrigeración del hogar, se traduce en la reducción de gastos energéticos con una menor huella de carbono. En segundo lugar, se analizó el comportamiento térmico durante la noche (figura 9), a una temperatura ambiente de 12°C , similar a la que se presenta en la región de Cajibío. Se logró observar un aumento de la temperatura en el interior de la vivienda con el flujo de aire que ingresa al presentarse un intercambio de calor geotérmico por convección en el conducto que conecta el exterior de la vivienda con el punto de estudio, obteniendo como resultado un proceso de calefacción con una temperatura superior a 7°C sobre la temperatura ambiente (figura 11).

En la simulación de la figura 10, se ilustran las condiciones iniciales en condiciones nocturnas, con una temperatura inicial de 12°C para toda las zonas de estudio.



Fig. -10: Fuente Elaboración Propia - Simulación Noche Material Fibra De Cádiz, condiciones ambientales iniciales.

En la figura 11, se ilustra la diferencia de temperaturas presentadas en el proceso del intercambiador de calor geotérmico después de 1 hora diseñado con cáñamo, con temperaturas ambientales de 13.1°C en lugares con poca vegetación, cuando aumenta la vegetación la temperatura baja más, la temperatura interior del punto de estudio incrementó su temperatura en más de 7°C con respecto a la zona exterior que carece de vegetación.



Fig. -11: Fuente Elaboración Propia - Simulación Noche Material Fibra De Cádiz. Tiempo de simulación: 1 hora.

De igual forma, se realizaron las configuraciones para el análisis de transferencia de calor para el PEAD día (figura 12 y figura 13) y noche (figura 14 y figura 15). En la figura 12 se fijó una temperatura inicial de 24°C en las zonas de estudio.

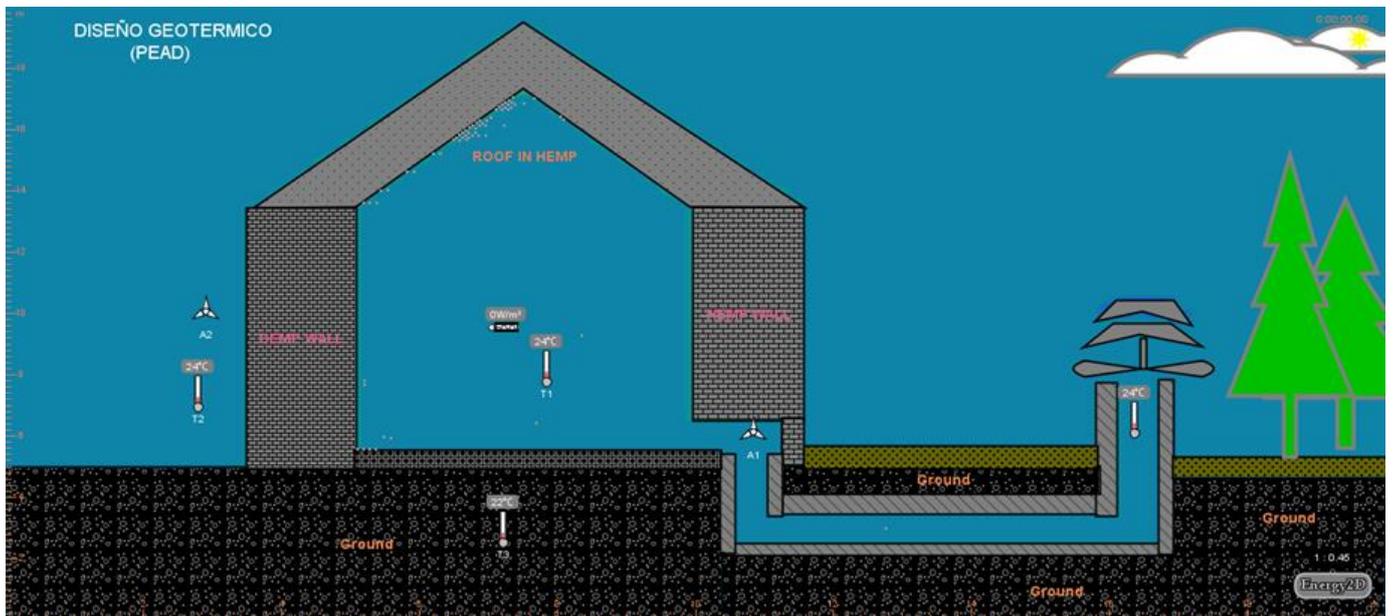


Fig. -12: Fuente Elaboración Propia - Simulación Material PEAD día, condiciones iniciales

En la figura 13, se ilustra el comportamiento de los ambientes bajo el diseño de la tubería en material tipo PEAD en el día, se analiza la transferencia de calor en comparación con los datos del cañamo.

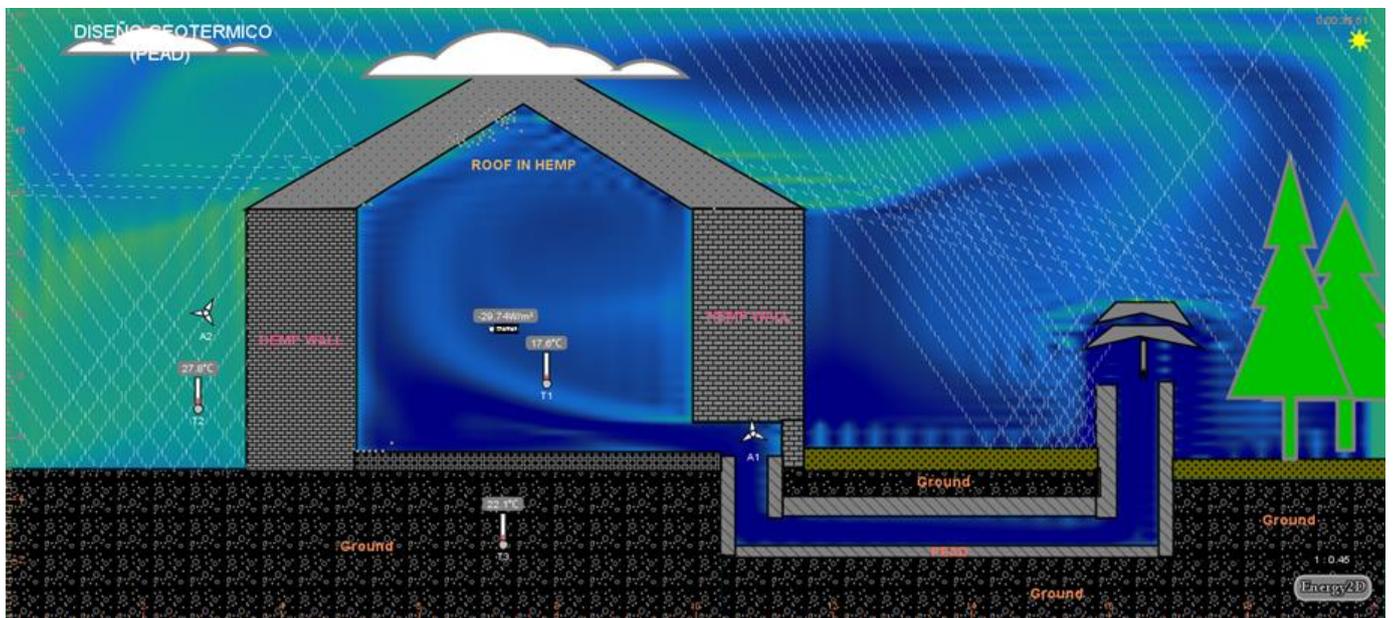


Fig. -13: Fuente Elaboración Propia - Simulación Día Material PEAD

La simulación realizada permitió evaluar el comportamiento térmico de la “sala de estar” utilizando un sistema bioclimatizado geotérmico que incorporó materiales sostenibles como el cañamo y el polietileno de alta densidad (PEAD) en el diseño. Se buscó determinar la capacidad del sistema de reducción de la temperatura en el interior de la vivienda, incidiendo en la disminución del consumo de energía requerida para la refrigeración.

En primer lugar, se evaluó el desempeño del PEAD en el sistema, se observó que este material demostró un buen rendimiento térmico, contribuyendo a la reducción de la temperatura en la sala de estar. En particular, se registró una

diferencia de temperatura de 10°C con la sala en comparación con la temperatura ambiente, indicando una alta capacidad del sistema en un proceso de refrigeración térmicamente de la vivienda. En segundo lugar, se analizó el comportamiento térmico durante la noche (figura 14 y figura 15), a una temperatura ambiente de 12°C . El flujo de aire que ingresó al interior de la vivienda, produjo un aumento de la temperatura en el lugar de estudio durante el intercambio de calor geotérmico, generando un proceso de calefacción con una temperatura 8°C sobre la temperatura ambiente.

En la figura 14, se presentan las condiciones iniciales de la simulación con la combinación entre PEAD y Cábamo en una jornada nocturna.



Fig. -14:Fuente Elaboración Propia -Simulación Noche Material PEAD

En la figura 15, se ilustra el comportamiento bioclimático de las diferentes zonas de estudio después de una hora de intercambio de calor.



Fig. -15: Fuente Elaboración Propia -Simulación Noche Material PEAD

En la figura 16 se presentan las curvas de temperatura asociadas al comportamiento del cáñamo y PEAD durante la noche.

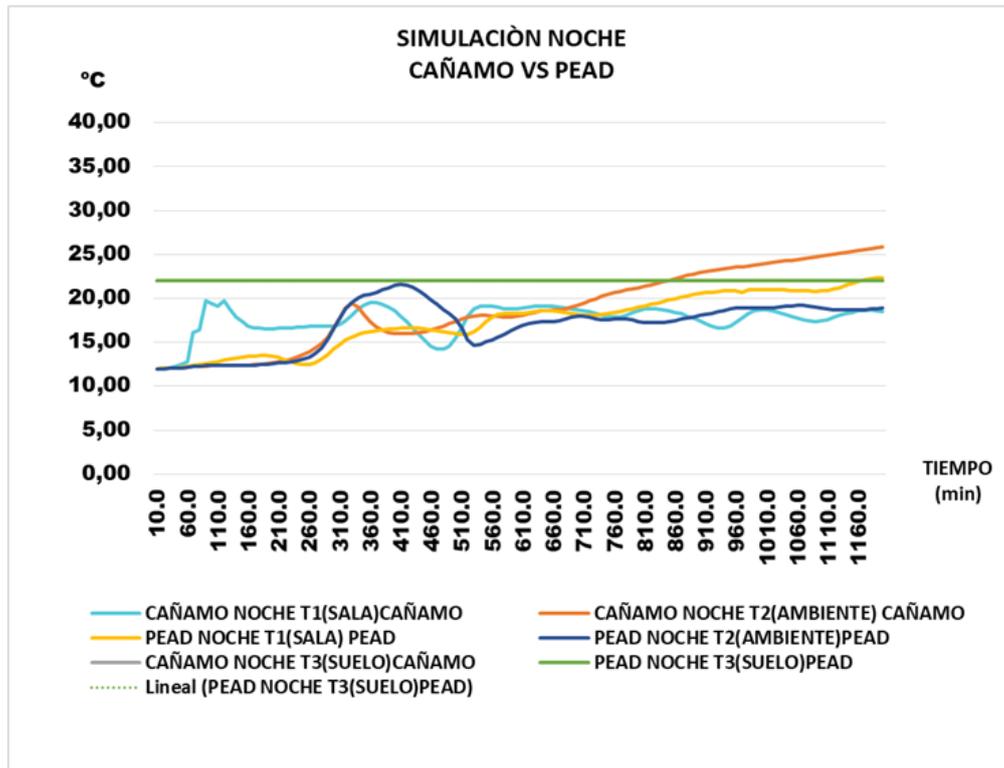


Fig. -16: Fuente Elaboración Propia -Simulación Noche vs PEAD

Las temperaturas del cáñamo y el PEAD en la sala son superiores frente al comportamiento de la temperatura ambiente después de una hora durante la noche.

En la figura 17 se presentan las curvas de temperatura asociadas al comportamiento del cáñamo y PEAD durante el día.

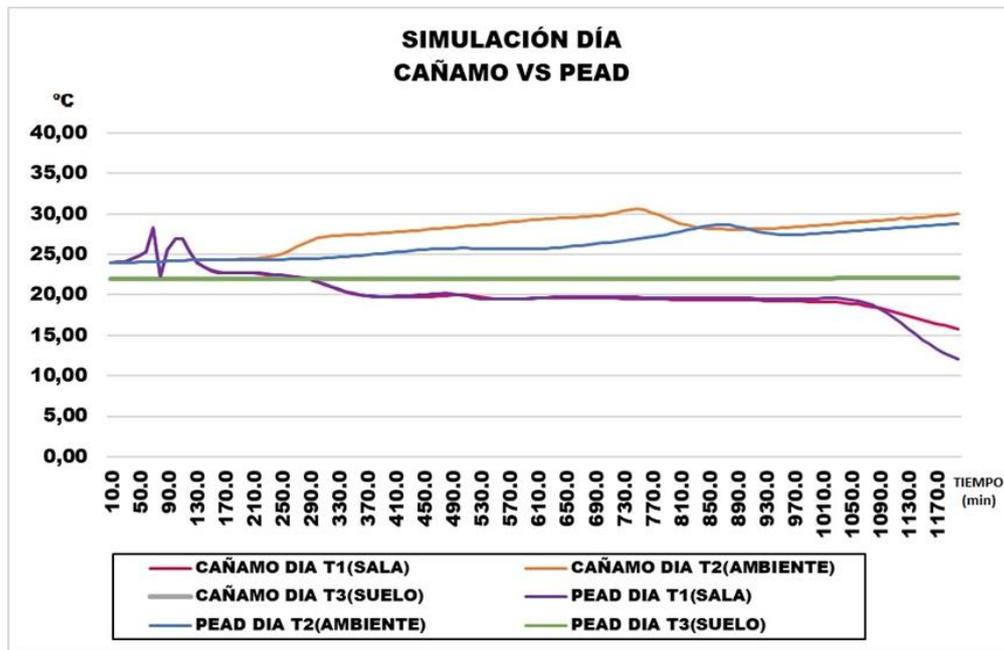


Fig. -17: Fuente Elaboración Propia -Simulación Día Cádiz vs PEAD

Las temperaturas del cáñamo en el interior de la sala de estar son más bajas con respecto a las temperaturas alcanzadas por la temperatura alcanzada en las cubiertas, obteniéndose un sistema de refrigeración bioclimático.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. Después de identificar las características de las viviendas cafeteras, se determinaron las variables climáticas a través de la página web meteorológica "Weather Spark" para diseñar un pozo provenzal. Los datos climáticos se complementaron con la toma de datos en el lugar elegido, que incluyó la instalación de sensores de temperatura y humedad del suelo. Los materiales utilizados para la toma de datos fueron reciclados y prácticos. Los sensores registraron los datos cada 5 minutos durante un período de estudio que abarcó desde las 3 de la mañana hasta las 10 de la mañana del día siguiente en el mes de marzo del 2020. Los resultados indicaron una temperatura estable y una humedad constante con una leve variación en el sitio de estudio.

2. En el diseño del sistema bioclimatizado, se han considerado varios parámetros importantes que garantizan su funcionalidad y eficacia. Se ha demostrado que al implementar el conducto horizontal a una profundidad mínima de 2 metros, el sistema cumple con las condiciones de funcionamiento adecuadas como intercambiador de calor por convección. El captador de aire debe estar ubicado a una altura de 1.5 metros a ras del suelo con una velocidad promedio de 0.3-0.5 m/s.

3. En cuanto a los materiales analizados, cáñamo y PEAD: El cáñamo es el material más adecuado debido a sus características sostenibles y térmicas, este tipo de material proporciona un confort térmico durante el día (refrigeración) y noche (calefacción), garantizando un ambiente cómodo y agradable para los usuarios. Además, se ha demostrado que el cáñamo es un material renovable y respetuoso con el medio ambiente, considerándose como una opción más sostenible en comparación con otros materiales de construcción.

4. Es relevante destacar que el funcionamiento adecuado del sistema bioclimatizado depende en gran medida de que la zona en la que se encuentra instalado, las características de los suelos y ambientales, se requiere que el área a bioclimatizar esté completamente cerrada en cuanto a ventanas y puertas, garantizando un aire cálido dentro de la sala, proporcionando un ambiente más estable y confortable. En resumen, el diseño del sistema bioclimatizado se ha enfocado en garantizar la funcionalidad, la eficacia y el confort térmico, y el uso de materiales sostenibles y renovables para reducir su impacto en el medio ambiente.

IV. CONCLUSIONES

1. Al caracterizar la tipología de las viviendas cafeteras hacia un diseño bioclimático en la meseta de Cajibío, Cauca, se han identificado materiales de construcción tradicionales como el adobe, bahareque y tejas de barro en la arquitectura vernácula. El uso inadecuado de estos materiales en combinación con materiales basados en láminas

metálicas generan limitaciones en eficiencia térmica, influyen negativamente en el confort térmico y en el gasto de energía para la calefacción. Con respecto a las condiciones bioclimáticas y geográficas de la meseta de Cajibío, se destaca la necesidad de implementar medidas de mejora en la materialidad de las construcciones, con la incorporación de aislamiento y sistemas eficientes de ventilación que optimicen el diseño, que les permitan a los caficultores llegar a tener una mayor eficiencia energética relacionada con el confort térmico.

2. La caracterización socioeconómica en la meseta de Cajibío realizada por el grupo taller 9 de Arquitectura de la FUP, reveló que los caficultores tenían una remuneración insuficiente derivada de la producción de café tradicional, obligándolos a alternar el café con otro tipo de cultivos, representando un incremento de la pobreza multidimensional, reduciendo su calidad de vida. Se demostró que es factible emplear materiales reciclables en la construcción de los ductos de los sistemas bioclimáticos geotérmicos tipo “pozo canadiense”, para mejorar las condiciones de vida de los caficultores en confort térmico.

3. El diseño del modelo experimental para la recolección de datos físicos en la vivienda de Cajibío, permitió establecer las características del modelo de uso eficiente y sostenible del potencial geotérmico de la zona. Permitted la escogencia de los materiales a usar en el diseño del modelo del intercambiador de calor geotérmico tipo “pozo canadiense”. Este enfoque facilitó la recopilación de información relevante sobre la viabilidad, la eficiencia energética y los beneficios asociados con la implementación del sistema geotérmico en las viviendas de Cajibío.

4. La implementación de pruebas de validación utilizando el software Energy 2D demostró ser una herramienta efectiva para evaluar y respaldar la confiabilidad del modelo bioclimático. Al comparar los resultados del modelo con mediciones reales y datos de campo, se verificó la capacidad del modelo para predecir el comportamiento bioclimático de la vivienda en Cajibío. Esta validación proporcionó una base sólida para confiar en los resultados del modelo y emplearlo como una herramienta valiosa en la toma de decisiones relacionadas con el diseño y la optimización de estrategias de uso de materiales sostenibles en la vivienda.

5. La validación del modelo proporcionó a los profesionales de ingeniería industrial y arquitectura que intervinieron en este proyecto las estrategias para implementar diseños bioclimáticos geotérmicos en proyectos de vivienda en entornos cafeteros. Esta implementación en el desarrollo del diseño permitió visualizar el impacto positivo en la eficiencia energética, el confort térmico y la adopción de tecnologías sostenibles en las viviendas de Cajibío. La información respalda la importancia y el valor de la validación del modelo simulado, su aplicación en la toma de decisiones relacionadas con el diseño, y la construcción de viviendas sostenibles en ambientes cafeteros.

6. La combinación de materiales sostenibles como el cáñamo y el PEAD en el modelo simulado del sistema bioclimático geotérmico, demostró su utilidad para reducir la temperatura en el interior de la vivienda. Esta técnica de materialidad en el diseño puede ser de gran importancia en la construcción de viviendas sostenibles y de bajo consumo energético en el futuro de la industria de la construcción.

ACKNOWLEDGMENT

En este momento de culminación y reflexión, nos complace expresar nuestra gratitud a aquellos que han sido fundamentales en el desarrollo de este artículo y así poder optar por el título de ingeniería industrial.

En primer lugar, agradecemos a la Fundación Universitaria de Popayán, por brindarnos la oportunidad de formarnos académicamente y desarrollar nuestras habilidades investigativas. Su compromiso con la excelencia académica y su apoyo constante han sido fundamentales para nuestro crecimiento profesional y personal.

En segundo lugar, expresamos nuestro más profundo agradecimiento a nuestro tutor el Ing. Magister Richard Imbachí por su valiosa guía a lo largo de este proceso. Su experiencia, conocimiento y dedicación nos han inspirado a ir más allá de nuestros límites y a enfrentar los desafíos con determinación. Su tiempo, su compromiso, su dedicación junto con sus sugerencias, consejos y retroalimentación constructiva han enriquecido nuestro trabajo y nos han impulsado a buscar la excelencia en cada etapa de la investigación

Asimismo, queremos reconocer y agradecer a TECNICAFÉ, Biohogar R&D, Cannatural y a todos los profesores y familiares que nos brindaron su apoyo incondicional durante este arduo proceso. Sus palabras de aliento, su paciencia y su constante estímulo fueron pilares fundamentales para superar las dificultades y mantenernos enfocados en nuestro objetivo.

REFERENCES

- [1] F. Salazar, "Café de Colombia, análisis de los Principales Productores de café del mundo", Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2021
- [2] G. M. Paz, Informe de , Gestión 2022, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Comité de Cafeteros del Cauca, Informe de gestión, abril 2021
- [3] H. J. Guzmán, "Plan de Desarrollo Municipal Cajibío 2012-2015" Alcaldía municipal de Cajibío, 2012-2015
- [4] G. Zambrano y L. Castro, "Arquitectura Bioclimática" Ecuador. Pol. Con n° 43 Vol 5 (2020)
- [5] Departamento Administrativo Nacional De Estadística - DANE, Medida de pobreza multidimensional municipal de fuente censal, 2020 [Online]. Disponible en: <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=54595086fdd74b6c9effd2fb8a9500dc>
- [6] S. A. Valdez Calva y L. Romero Guzmán. Habitabilidad urbana, una categoría para analizar vivienda social en México en el siglo XXI. Revista Nodo (México), 32(16), enero-junio, pp. 18-25. (2022)
- [7] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). "Boletín Técnico Pobreza multidimensional en Colombia", 2022 [Online]. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-multidimensional>
- [8] M. T. Casals, J. A. Arcas, & A. B. Cuchí. Aproximación a una habitabilidad articulada desde la sostenibilidad. Raíces teóricas y caminos por andar. INVI, Vol. 28(77), 193-226. (2013)
- [9] Fundación Universitaria de Popayán. "Semillero de Investigación del programa de Ingeniería Industrial "SIE2" viene desarrollando proyectos de impacto regional y nacional". Recuperado de : <https://archivo.fup.edu.co/semillero-de-investigacion-del-programa-de-ingenieria-industrial-sie2-viene-desarrollando-proyectos-de-impacto-regional-y-nacional/>
- [10] J. Tillería González, "LA ARQUITECTURA SIN ARQUITECTOS, ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE ARQUITECTURA VERNÁCULA", AUS, n.º 8, pp. 12–15, 2006. Accedido el 27 de mayo de 2023
- [11] R. López y O. López "Ciencias, Tecnología y energías renovables, sus concepciones y contradicciones" México CTS N°45 Vol 15 (2020)
- [12] C. Knie, A. Belmonte, B. Berthomieu & S. Madrid. "Diseño de un edificio autosuficiente y "Low Cost" para autoconstrucción". Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya (2010)
- [13] F. A. Santilli. "Energía Geotérmica de Baja Entalpía: Comprobación de Presencia y Análisis Conceptual de Aprovechamiento". Argentina: Universidad Nacional de Cuyo (2014)
- [14] A. M Cabezas." Eficiencia Energética a través de Utilización de Pozos Canadienses con el Análisis de Datos de un Caso Real —Casa Pomaret". Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya (2012)
- [15] A. S. Campos, "Arquitectura Biofílica. Revitalización de Espacios Residuales Involucrando Relaciones Inter-especie A Través de Una Instalación Interactiva", 2020, BOGOTÁ D.C, Colombia.
- [16] Parque tecnologico de innovación TECNICAFE.2021. RECUPERADO DE : <https://tecnicafe.co/>
- [17] Weather Spark "Clima, tiempo, temperatura, precipitación y humedad de Cajibío Colombia". 2021. recuperado de : <https://weatherspark.com/y/21471/Average-Weather-in-Cajib%C3%ADo-Colombia-Year-Round>
- [18] C. F. Espinosa Cancino y A. Cortés Fuentes, «Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante», Revista INVI, vol. 30, n.º 85, pp. 227-242, nov. 2015, doi: 10.4067/S0718-83582015000300008.
- [19] M. Him Moya et al., «Evaluación del potencial geotérmico inverso y solar para reducir el consumo energético de una instalación hospitalaria en Panamá», Revista Digital Novasenergía, vol. 5, n.º 1, pp. 83-99, jun. 2022, doi: 10.37135/ns.01.09.06.
- [20]. Xie, Charles. «Interactive Heat Transfer Simulations for Everyone». The Physics Teacher 50, n.º 4 (abril de 2012): 237-40. <https://doi.org/10.1119/1.3694080>.
- [21] «Efecto de la aplicación de cáñamo en las propiedades de resistencia y resistividad de una arcilla». http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2422-42002022000300008&lang=es (accedido 20 de junio de 2023).
- [22] Y. J. Sánchez- Hernández, M. Martínez-Montaña, y O. Gutiérrez-Junco, «Estrategia competitiva en el sector Construcción: Uso de fibras de Cáñamo», RVG, vol. 26, n.º 5 Edición Especial, pp. 578-595, ago. 2021, doi: 10.52080/rvgluz.26.e5.37.
- [23] «Fuentes - localización municipio de cajibío, entrada a la v.pdf».
- [24] D. Portillo Arreguín, N. López-Acosta, D. Barba, y M. Sánchez, Determinación de propiedades térmicas de los suelos a partir del método de la aguja. 2018.
- [25] R. Walker y S. Pavía, «Thermal and hygric properties of insulation materials suitable for historic fabrics.»
- [26] «Polietileno | Densidad, resistencia, punto de fusión, conductividad térmica», Material Properties, 17 de junio de 2021. <https://material-properties.org/es/polietileno-densidad-resistencia-punto-de-fusion-conductividad-termica/> (accedido 10 de mayo de 2023).
- [27] «Clima de Cajibío, tiempo mensual, temperatura media (Colombia) - Weather Spark». <https://weatherspark.com/y/21471/Average-Weather-in-Cajib%C3%ADo-Colombia-Year-Round> (accedido 10 de mayo de 2023).