

Optimization process in the design of passive solar heating system

Proceso de optimización en el diseño de sistema de calefacción solar pasivo

J.D. Giraldo¹

J.P. Arango²

¹Universidad La Gran Colombia, Bogotá, Colombia

E-mail: judgiraldo@gmail.com

²Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia

E-mail: juparangopl@unal.edu.co

Abstract

The present investigation will determine the optimal design solution of a passive solar collection system that adheres to existing constructions, in order to improve the conditions of indoor hygrothermal comfort, through a parametric work methodology, with case studies in the climate of the Cundiboyacense highlands in Bogota Colombia.

To find the optimal solution for the study area, dynamic thermal simulations using EnergyPlus were integrated with an automated black-box optimization analysis process using the RBFOpt algorithm, which uses advanced machine learning techniques to find optimal solutions with a small number of function evaluations.

The first conclusions of the investigation show the most important variables for the optimal design of the solar collection systems are mainly the width and height of the solar collection system, but not so much its depth, for which the Trombe wall is ideal for the case study climate. In addition, it is possible to improve the conditions of comfort inside the spaces for night use regardless of their orientation, a favorable factor for the purposes of the investigation, which consider homes and constructions in the work area that have all kinds of orientations.

Index terms— Adaptative Thermal Comfort, Passive Solar Heating, Black-box Optimization, Parametric Energy Simulation.

Resumen

La presente investigación plantea definir la solución óptima de un sistema de captación solar pasiva adherible a las construcciones existentes, con el fin de mejorar las condiciones de confort higrotérmico interior, mediante una metodología de trabajo paramétrico, con estudios de caso en el clima del altiplano cundiboyacense en Bogotá, Colombia.

Para encontrar la solución óptima para el área de estudio, se integraron simulaciones térmicas dinámicas empleando EnergyPlus, con un proceso automatizado de análisis de optimización con metamodelos usando el algoritmo RBFOpt, el cual utiliza técnicas avanzadas de aprendizaje automático “Machine Learning” para encontrar buenas soluciones con un pequeño número de evaluaciones de funciones.

Las primeras conclusiones de la investigación evidencia las variables más importantes para el buen diseño de los sistemas de captación solar, son principalmente el ancho y alto del sistema de captación solar, pero no tanto su profundidad, por lo cual el Muro Trombe es ideal para el clima trabajado. Además, es posible garantizar condiciones de confort al interior de los espacios de uso nocturno sin importar su orientación, un factor favorable para los efectos de la investigación, considerando que las viviendas ya construidas en la zona de trabajo tienen todo tipo de orientaciones.

Palabras clave— Confort Térmico Adaptativo, Calefacción Solar Pasiva, Optimización De Caja Negra, Simulación Térmica Paramétrica.

Recibido: 10-12-2019, Aprobado tras revisión: 20-01-2020

Forma sugerida de citación: Giraldo, J.; Arango, J. (2020). “Proceso de optimización en el diseño de sistema de calefacción solar pasivo”. Revista Técnica “energía”. No. 16, Issue II, Pp. 100-110

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2020 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de calefacción solar pasiva han sido utilizados en diferentes lugares del mundo para afrontar las bajas temperaturas ocurridas durante las épocas frías del año; pero en los climas tropicales, estos sistemas no han sido ampliamente difundidos; las investigaciones se han centrado en climas estacionales [1 - 3], poco se ha investigado sobre su eficiencia en bajas latitudes, por consiguiente, poco se ha implementado en el sector constructivo en estos lugares.

Como estudio de caso, se propone la zona del altiplano Cundiboyacense, la cual cuenta con clima tropical de alta montaña, donde la temperatura media anual se encuentra entre los 10°C y 14°C; en esta región los diseñadores y constructores han focalizado sus intereses fundamentalmente en temas estéticos o económicos, dejando de lado las variables ambientales en el ejercicio de proyección arquitectónica.

Esta manera de afrontar los procesos de diseño ha traído consigo la construcción de un gran número de proyectos con bajas condiciones de habitabilidad térmica interior, fundamentalmente en los espacios de uso nocturno, como habitaciones. Adicionalmente, en el imaginario colectivo de las localidades frías en Colombia no se plantea la posibilidad de comprar equipos que mejoren las condiciones de temperatura interior, la cultura de climatización en estas zonas ha asimilado el frío de tal manera que no se utilizan sistemas activos o pasivos de calefacción, lo cual ha llevado a un déficit de confort a gran parte de los habitantes.

En el sector de estudio, de acuerdo al Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV) 2018 realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [4] y el informe “ACTIVIDAD EDIFICADORA. Segmento residencial y no residencial” de la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL) [5], el porcentaje de obras nuevas es bajo respecto a la vivienda ya construida, factor que determina el planteamiento de un elemento adicional adaptable a los edificios de vivienda existentes, respondiendo a la intención de generar un mayor impacto sobre los habitantes de la zona de trabajo; siguiendo esta idea, se plantea la posibilidad de definir un dispositivo de calefacción solar tipo “prótesis arquitectónica” que permita adherirse a las construcciones existentes y basándose en las premisas de arquitectura solar pasiva, mejorar las condiciones de confort interior de las viviendas que así lo requieran.

Para desarrollar el sistema de calefacción solar se utilizaron modelos paramétricos, los cuales permiten modificar las diferentes variables que pueden afectar la eficiencia del sistema, y mediante la implementación de un proceso de automatizado de “Machine Learning” para la selección del mejor caso posible, usando el plugin Opossum para Grasshopper [6], el cual utiliza

técnicas avanzadas de aprendizaje automático para encontrar buenas soluciones con un pequeño número de evaluaciones de funciones, es decir, simulaciones [7]. Se corrieron un total de 320 simulaciones en dos jornadas de análisis, para determinar cuál es la mejor configuración del sistema de calefacción solar pasivo para un clima tropical de alta montaña.

El presente trabajo pretende dar claridad del proceso utilizado, los resultados y conclusiones obtenidas en el proceso, mediante la siguiente estructura: i) estado del arte de los sistemas de calefacción solar pasiva, ii) metodología propuesta para la solución de diseño del dispositivo planteado, iii) parámetros de cálculo, iv) resultados obtenidos, y, v) conclusiones y discusión.

2. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN SOLAR PASIVA

La arquitectura solar es aquella que, a través del entendimiento de la mecánica solar, aprovecha la energía calórica de los rayos solares como sistemas de calefacción en invierno y los evita en verano para mantener los espacios más frescos, este tipo de arquitectura plantea una mayor aplicabilidad de las propiedades físicas de los materiales para realizar procesos de selección acorde con las consideraciones climáticas y a los requerimientos ambientales del proyecto, ya sea aislación o acumulación térmica.

Para proyectar arquitectura solar, se debe tener un claro entendimiento del sol y su incidencia en la tierra, entender la radiación solar y las diferentes longitudes de onda que inciden en nuestro planeta determina las respuestas formales y materiales para poder aprovechar esta energía.

La radiación solar incidente se clasifica por su longitud de onda, el 49% de la radiación emitida por el Sol, que se acusa en forma de calor, es una radiación de onda más larga que el rojo del espectro visible (mayor de 0.75 micras) [8], como se ve en la Fig. 1. Es esta energía la que debemos entender y poder aprovechar en los diseños arquitectónicos para el planteamiento de sistemas solares de calefacción.

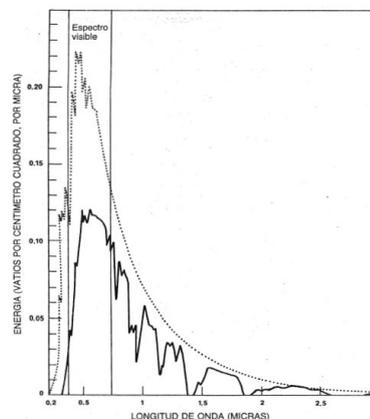


Figura 1: Energía en las diferentes longitudes de onda. El libro de la energía solar pasiva. [8]

Uno de los principios que permite aprovechar la energía proveniente del sol para la calefacción pasiva de los espacios es el efecto invernadero. Este permite, usando un espacio de captación cerrado con superficies translúcidas, el ingreso de rayos solares directos que, al entrar en contacto con la superficie colectora, son convertidos en radiación infrarroja (energía térmica) la cual no puede atravesar la superficie translúcida nuevamente hacia el exterior, concentrando todo el calor al interior del edificio.

Entender este principio ayuda a tomar buenas decisiones de orientación, geometría y materiales requeridos para mantener cierta cantidad de calor al interior del proyecto, brindando mejores condiciones interiores en lugares de clima predominantemente frío, o en la época invernal en climas estacionales; pero puede ser contraproducente en lugares cálidos, donde la no consideración de este fenómeno puede llevar a los edificios a una mayor dependencia de sistemas de climatización mecánica, aumentando los consumos energéticos innecesarios en los proyectos de arquitectura.

En diferentes lugares del mundo se han proyectado obras que, debido al entendimiento del clima por parte del arquitecto, han logrado ser obras ejemplares, las cuales son objeto de estudio en los procesos de formación de arquitectos conscientes de su responsabilidad ambiental. Las primeras propuestas de arquitectura solar datan de los años 30, con el arquitecto George Keck, considerado pionero en este tipo de arquitectura, el cual diseñó la “Casa del mañana” en 1933 y posteriormente la casa Sloan, en 1940, la cual fue la primera en ser llamada casa solar.

Otros ejemplos de aplicación de proyectos con sistemas de calefacción solar pasiva, respondiendo a las necesidades del clima frío, son: Edificio para la Escuela Secundaria de San Jorge, en Wallasey, Inglaterra; Restaurante Maximilian’s de Albuquerque, Nuevo México; Vivienda Schiff, en Wyoming; Casa Terry en Santa Fe, Nuevo México; Vivienda Trombe en Odeillo, Francia; Vivienda Kelbaugh en Princeton, New Jersey, USA; Vivienda de Steve Baer, en Corrales, Nuevo México; Vivienda Paul Davis, en Corrales, Nuevo México [8].

La gran mayoría de proyectos e investigaciones relacionadas con sistemas de calefacción solar se centran en climas estacionales, siendo inexistente la información específica de su funcionamiento bajo condiciones de climas tropicales, en los cuales la latitud determina un recorrido solar específico, donde la orientación del dispositivo de captación solar no se determina de manera tan evidente como en un clima estacional; al norte en hemisferio sur, al sur en hemisferio norte.

El estudio de los diferentes proyectos y artículos encontrados sobre sistemas de solares pasivos como

respuesta a condiciones climáticas particulares [1 - 3 y 9 - 14], orientó la definición de las pautas principales a considerar en el diseño de un sistema solar pasivo, que nos sirven de referencia para estudiar dichos sistemas en el clima tropical de alta montaña.

2.1. Pautas para el diseño de sistema de calefacción solar pasivo

2.1.1 Ubicación del proyecto

El recorrido solar es único en cada localidad, es importante considerar la dirección de incidencia de los rayos solares y la sombra arrojada por edificaciones, geomorfología o vegetación cercana al proyecto, para de esta manera, poder proyectar y dimensionar los sistemas de calefacción solar pasiva.

2.1.2 Disponibilidad del recurso solar

La radiación solar incidente en cada lugar varía en relación con la latitud, altitud y niveles de nubosidad presente. La búsqueda de datos meteorológicos precisos garantiza un mejor cálculo y cuantificación de los sistemas de captación y acumulación de ganancia energética solar. En la Fig. 2, se proporcionan los datos de kcal/m² hora para planos en las 8 orientaciones base, con inclinaciones del horizontal al vertical cada 15°, para los equinoccios [15].

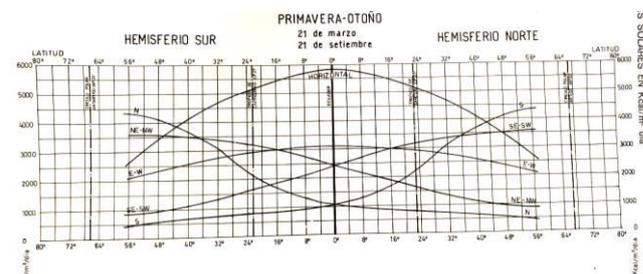


Figura 2: Radiaciones solares en kcal/m² día – Equinoccios. [15]

Las radiaciones presentadas son a nivel del mar, pero es un estimativo claro para entender la variabilidad de la misma en las diferentes orientaciones y hemisferios.

Para el cálculo de localidades a mayor altura sobre el nivel del mar se recomienda, a partir de los 200 msnm, los niveles de radiación aumentan 1% cada 200 m de altura [15], es importante entender que estos datos son referencia, pero pueden variar en relación con los niveles de nubosidad del lugar de trabajo, por lo cual es recomendable buscar datos climáticos precisos y realizar cálculos y simulaciones específicas para cada proyecto.

2.1.3 Orientación

La orientación del edificio y del sistema de captación solar garantiza o no la eficiencia de este, debido al recorrido aparente del sol en nuestra

atmósfera. Para los proyectos ubicados en el hemisferio norte es imprescindible buscar una orientación sur con sus aperturas y sistemas de calefacción solar, dejando la fachada norte lo más hermética posible para reducir las pérdidas térmicas. En el hemisferio sur se debe trabajar bajo la misma lógica, pero invirtiendo las fachadas, fachada norte para ganancia solar y fachada sur reducir pérdidas térmicas. En latitudes cercanas al ecuador no se ha investigado sobre la orientación óptima del sistema de captación solar.

2.1.4 Materialidad

Elemento de captación

El vidrio, que prácticamente deja pasar toda la radiación solar visible que sobre él incide, absorbe en cambio la mayor parte de la infrarroja de larga longitud de onda que intercepta [8], esto hace que el vidrio sea el material idóneo para los elementos de captación solar en climas fríos. Al generarse el efecto invernadero en los espacios arquitectónicos que disponen superficies acristaladas hacia las fachadas con mayor incidencia solar, se garantiza el ingreso de energía solar en horas del día, el porcentaje de transmisión está relacionado al ángulo de incidencia de los rayos solares.

Es fundamental conocer el recorrido solar del lugar de trabajo, para poder conocer el ángulo de incidencia, ya que este determinará la cantidad de energía que ingresa a través de la superficie acristalada. En la Fig. 3, se presenta el factor de transmisión con relación al ángulo de incidencia solar.

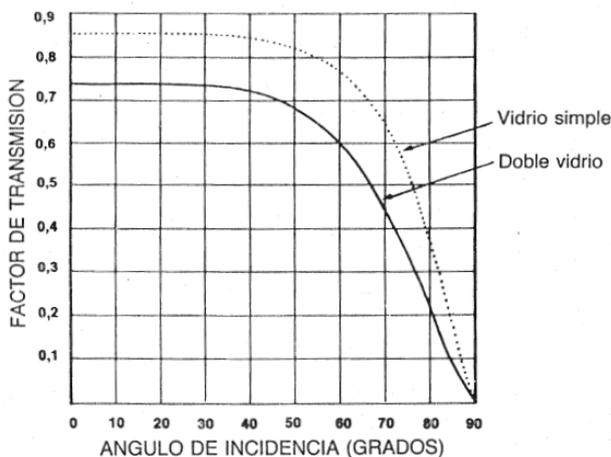


Figura 3: Factor de transmisión con relación al ángulo de incidencia solar. [8]

Además del sistema de captación, es necesario plantear un buen elemento de acumulación térmica para garantizar el buen aprovechamiento de esta energía calorífica en los momentos más fríos del día.

Elemento de acumulación

En un sistema solar pasivo es necesario contar con sistema de acumulación térmica, ya que normalmente el

calor generado por el sol es requerido, en mayor medida, en horas de no sol.

Este desacoplamiento entre disponibilidad y demanda del recurso solar hace necesario estudiar las propiedades térmicas de los materiales en el proyecto arquitectónico y de esta manera poder garantizar confort interior reduciendo al máximo la dependencia de sistemas mecánicos de climatización artificial.

Las propiedades que deben considerarse para la elección del material de acumulación solar para un sistema de calefacción solar pasivo son: el calor específico, la densidad y la conductividad térmica del material.

Aislamiento térmico en envoltente del proyecto

El aislamiento térmico de la envoltente es necesario para garantizar el buen funcionamiento de los sistemas de calefacción solar pasiva; plantear aislamientos térmicos en muros y techo, reduce las pérdidas térmicas en las noches frías, y de esta manera el calor acumulado brindará las condiciones adecuadas para la comodidad de los ocupantes al mantener las temperaturas interiores dentro del rango de confort térmico.

2.1.5 Autonomía de funcionamiento

Los planteamientos de arquitectura pasiva, en muchas ocasiones, requieren de una buena operación por parte del usuario final del proyecto para su buen funcionamiento, esto ha llevado en reiteradas ocasiones a la frase “un edificio pasivo, requiere usuarios activos”, generando una primera barrera para que las personas piensen en optar por sistemas pasivos en sus viviendas.

Es importante que el sistema que se genere como resultado de esta investigación entienda esta problemática y funcione de manera autónoma, sin necesidad de una operación manual por parte de los habitantes de la vivienda; para esto se considera que lo más conveniente pueden ser un sistema de invernadero o Muro Trombe sin ventanillas, para que el sistema funcione únicamente por medio de la transferencia térmica del material de la envoltente, eliminando la necesidad manipulación manual.

3. METODOLOGÍA

Se plantea el uso en conjunto del software de análisis térmico paramétrico con algoritmos de optimización de metamodelos para encontrar el mejor caso del diseño del dispositivo arquitectónico de calefacción solar pasiva, como se muestra en la Fig. 4.

Se implementó como plataforma de simulación y optimización el software CAD 3D "Rhino3D" (Rhino) y su plataforma de programación visual "Grasshopper" [6] con el uso de múltiples plugins disponible para el último. Grasshopper es una plataforma de programación visual intuitiva, donde los

componentes individuales (cada uno que ejecuta un script, función o incluso un programa de simulación completo) se pueden conectar a través de simples relaciones de entrada-salida, como se ve en la Fig. 5.

Para la simulación energética fue empleado el Plugin de código abierto Honeybee [16], el cual permite traducir la geometría paramétrica a formato de

OpenStudio para posteriormente ser simulada con el motor de cálculo EnergyPlus [17]. Para integrar el algoritmo de optimización RBFOpt en la plataforma de Grasshopper, fue empleado el plugin Opossum [18], que permite emplear algoritmos de alta complejidad de forma eficaz y veloz.

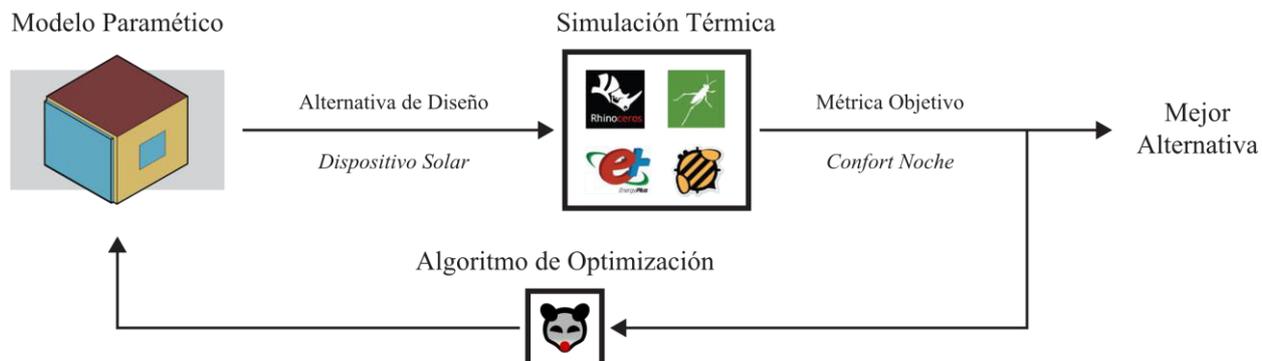


Figura 4: Metodología general de integración de motores térmicos con software de análisis de optimización.

La definición de Grasshopper se muestra en la Fig. 5. Los controles deslizantes en el apartado de Variables controlan la definición de parámetros geométricos y de propiedades térmicas de los materiales del dispositivo de colección solar. Estas variables a su vez están conectadas al componente de optimización (parte superior derecha), a la definición del modelo de geometría y materiales, y al componente de simulación térmica del espacio (EnergyPlus). El componente de optimización establece los controles deslizantes de variables de geometría durante el proceso de optimización. Los valores se transfieren al componente EnergyPlus y al modelo de geometría para construir las geometrías de los diferentes dispositivos de colección solar para simular el desempeño térmico y mejoría de confort en la noche para el espacio analizado. Finalmente, los resultados de EnergyPlus en términos de

porcentaje del tiempo de confort funcionan como una función objetivo para el algoritmo de optimización, cerrando así el ciclo de optimización iterativo.

En la Tabla 1 se muestran las métricas de salida que cuantifican el rendimiento térmico del dispositivo propuesto.

Tabla 1: Datos de salida utilizados en la simulación térmica

Datos de salida	Und
Porcentaje Tiempo dentro del rango de confort *	%
Temperatura operativa mínima *	°C
Temperatura operativa máxima *	°C
Temperatura operativa promedio *	°C

* Se define el rango de análisis para las horas nocturnas entre las 6 pm y 8 am.

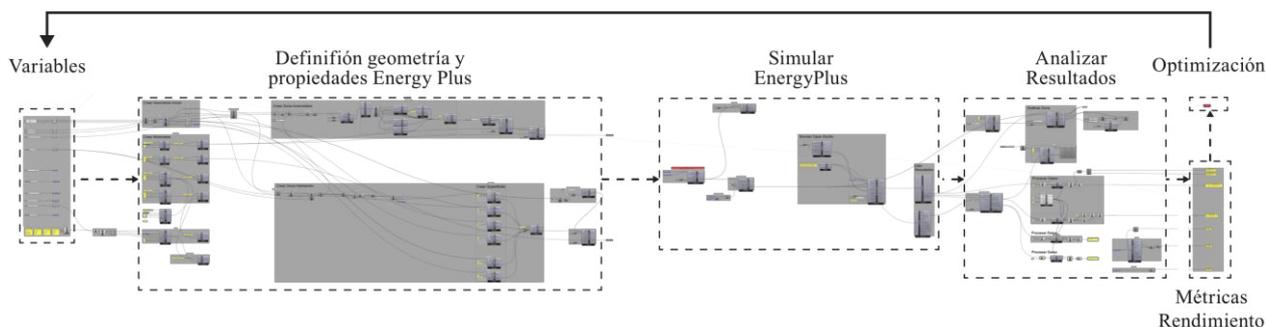


Figura 5: Algoritmo de análisis en la plataforma Rhino / Grasshopper. Líneas entre componentes representan el flujo de los datos.

3.1. Propiedades del modelo computacional

Para el modelo paramétrico se utilizó un modelo base de una habitación típica de la zona de estudio, con una planta de 3m x 3m y con una altura de 2.5 m; en una de sus fachadas se dispone una ventana de 1m x 1m, como se ilustra en la Fig. 6.

Para efectos de la simulación se definen las superficies de piso, y dos de las paredes del recinto trabajado como superficies adiabáticas, entendiendo que estas paredes estarán en contacto con otros espacios de la vivienda, por lo cual no tendrá afectaciones directas de las variaciones climáticas exteriores.

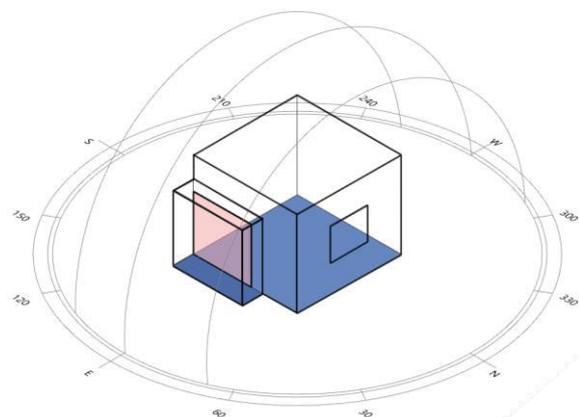


Figura 6: Modelo 3d habitación típica con invernadero adosado

En la Tabla 2 se presentan las propiedades físicas de los materiales que se consideraron constantes en análisis de optimización.

Tabla 2: Características físicas de los componentes de la envolvente de la edificación

Material	Espesor [mm]	Conductividad térmica [W/m·K.]	Densidad [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg °C]
Techo	200	0.600	1000	800
Muros	120	0.320	770	1000
Aislante Techo	var*	0.032	30	837

Material	Espesor [mm]	Valor U [U]	SHGC [k]	Transmisión [vT]
Vidrio Ventana	4	5.8	0.9	0.9
Vidrio Invernadero	4	var*	0.9	0.9

*Materiales que consideran alguna variación en alguna de sus propiedades físicas son indicados con var.

3.2. Algoritmo de optimización

Para generar el mejor sistema de captación solar posible en las condiciones de un clima de alta montaña en la zona ecuatorial se realiza la implementación de un proceso de análisis automatizado de “Machine Learning” aplicado a modelos computacionales de simulación térmica, mediante el uso de algoritmos de optimización, el cual se puede considerar una vertiente

de la inteligencia artificial, como lo planteaba Michi [19] “Sería útil si las computadoras pudieran aprender de la experiencia y así mejorar automáticamente la eficiencia de sus propios programas durante la ejecución”.

Con base en los hallazgos de un amplio análisis del rendimiento de diferentes algoritmos de optimización aplicados a la simulación de diversos modelos energéticos de edificaciones [20], podemos identificar RBFOpt [21] como el mejor algoritmo de optimización para presupuestos de evaluación muy limitados. RBFOpt significa "Optimización de la función de base radial" y se basa en los métodos propuestos en Gutmann [22] y Regis y Shoemaker [23]. Al muestrear la función de costo desconocida (caja negra), el algoritmo construye y refina iterativamente un modelo de aproximación. Al medir la "irregularidad" del modelo, se elige una nueva muestra donde minimizaría esta medida, ya que se supone que es un candidato probable para el óptimo. Además, se muestrean puntos distantes en partes desconocidas del dominio de búsqueda para mejorar la fidelidad del modelo.

Debido al alto costo computacional de la metodología de simulación en este estudio (hasta 5 minutos en un Intel i5-5700 HQ de 4 núcleos 3.30 GHz con 16 GB de RAM para ejecutar una iteración), limitamos el presupuesto de evaluación a un máximo de 40 iteraciones sin encontrar una solución superior, haciendo de RBFOpt la opción ideal para un presupuesto computacional limitado. Los algoritmos de búsqueda heurísticos clásicos, como los algoritmos evolutivos, generalmente requieren un presupuesto de evaluación significativamente mayor para converger en buenas soluciones [20]. RBFOpt está vinculado a Grasshopper a través del complemento Opossum [18], utilizando los mismos parámetros que se describen en Waibel et al [24].

El objetivo (*output*) seleccionado para el proceso de optimización fue la maximización del porcentaje de tiempo dentro del rango de confort adaptativo en horas de la noche.

4. PARÁMETROS DE ESTUDIO

De acuerdo con los análisis realizados en el apartado 2.1, se realiza un planteamiento de las principales variables involucradas en el diseño del sistema de captación solar pasivo.

Las variables definidas para el análisis fueron: i) tamaño del invernadero en sus 3 ejes (x, y, z), entendiendo que es fundamental conocer el comportamiento de diferentes configuraciones formales, en largo, ancho y alto del elemento de captación solar, ii) tamaño del muro acumulador adosado al muro existente, ya que después de captar la energía solar, la debemos acumular en algún material para posteriormente entregarla al espacio de manera

progresiva por transferencia térmica, definir el tamaño de este material nos demostrará si es necesario agregar este muro adicional de acumulación o el sistema funcionaría únicamente con el cerramiento ya existente en las viviendas construidas, iii) orientación del sistema de captación solar, con el fin de determinar la orientación óptima para los sistemas solares pasivos en bajas latitudes, iv) número de personas al interior, ya que la carga energética interna aporta al calentamiento del espacio, v) coeficiente de U del vidrio utilizado en el invernadero, para determinar si es necesario reducir las pérdidas térmicas del invernadero por transferencia térmica en horario nocturno, o podría funcionar con un vidrio simple, reduciendo costos en el sistema propuesto vi) material acumulador utilizado, en el cual se evalúan tres materiales para determinar cuál puede ser el más eficiente en las condiciones de clima ecuatorial de alta montaña, vii) espesor del material acumulador, el cual, junto al tamaño del muro acumulador nos permitirá definir la necesidad de este muro adicional de acumulación térmica, viii) espesor de aislamiento térmico en techo, con el objetivo de determinar la importancia de tener aislamiento térmico en la envolvente del espacio analizado; se plantea aislamiento únicamente en la cubierta por ser el elemento que mayores pérdidas genera en horario nocturno, además considerando la variable presupuestal no se considera aislar térmicamente los muros exteriores, ya que se busca no aumentar significativamente los costos requeridos para el acondicionamiento del espacio.

En la Tabla 3, se presentan los parámetros, unidad y rangos definidos para cada una de las variables.

Tabla 3 Lista de parámetros de estudio

Parámetros de diseño	Und	Rango
Tamaño invernadero en eje x	%	0 a 95
Tamaño invernadero en eje y	%	0 a 95
Tamaño invernadero en eje z	%	0 a 95
Tamaño del muro acumulador en ejes x – z	%	0 a 95
Orientación del dispositivo de captación solar	°	0 a 345
Coficiente U del vidrio del invernadero	W/m ² .K	2.8 a 5.6
Material acumulador utilizado	-	Agua (MA), ladrillo macizo (LM), concreto (MC)
Espesor del material acumulador	mm	100 a 300
Espesor de aislamiento térmico en techo	mm	0 a 50
Número de personas	un	0 a 2

Las variables de tamaño en el invernadero y en el muro acumulador se analizan de manera porcentual con el objetivo de generar un estudio representativo para espacios de diversas dimensiones y, además, para no generar error en la simulación. Esto último debido a que si no se relacionan estas variables al muro en el que se adosa el invernadero podría crearse un invernadero más grande que la pared donde se ubicaría, o un muro acumulador más grande que el invernadero, generando errores en el modelado y simulación.

5. RESULTADOS

Los resultados se presentan en gráficos de columnas paralelas disponibles en la plataforma de visualización de resultados “Envoltentes inteligentes”¹, la cual permite filtrar y analizar los datos del análisis de optimización de forma rápida y sencilla.

En la Fig. 7 los valores en el eje “x”, de color negro, son las variables de entrada para el diseño del dispositivo de captación solar, *inputs*, y de color azul, los datos de salida, *outputs*; en el eje “y” todos los valores individuales de casos simulados. Cada línea representa un escenario simulado, las zonas con mayor densidad de líneas demuestran la tendencia de aprendizaje del software aplicando el algoritmo de optimización.

En la Fig. 7 es claro que el proceso inicial se centró diferentes simulaciones con tamaño de invernadero en el eje “x” (ancho), al aprender que esta variable es de gran importancia en el resultado final de confort, centra las futuras simulaciones en el valor más alto en esta variable; realiza el mismo proceso en las siguientes variables, en el eje “z” (altura) los resultados son similares a lo visto en “x”. En la variable “y” del invernadero (profundidad), al realizar el proceso de simulación el software aprende que se logran mejores resultados con un valor bajo en esta variable, definiendo que las futuras simulaciones se realizarán con valores bajos (sistemas similares al muro trombe). En la variable XZ del colector el algoritmo aprende que lo mejor para garantizar altos niveles de confort térmico interior es manteniendo el mayor tamaño en la superficie acumuladora. En la variable de orientación el algoritmo realiza simulaciones en casi todas las orientaciones, considerando que por la latitud de la zona de estudio la radiación solar es relativamente uniforme en todas las fachadas, factor que comprueba la no obviedad en la orientación de los sistemas de calefacción solar pasivos en bajas latitudes.

¹ <https://monsieurpablo.github.io/EnvoltentesInteligentes/>

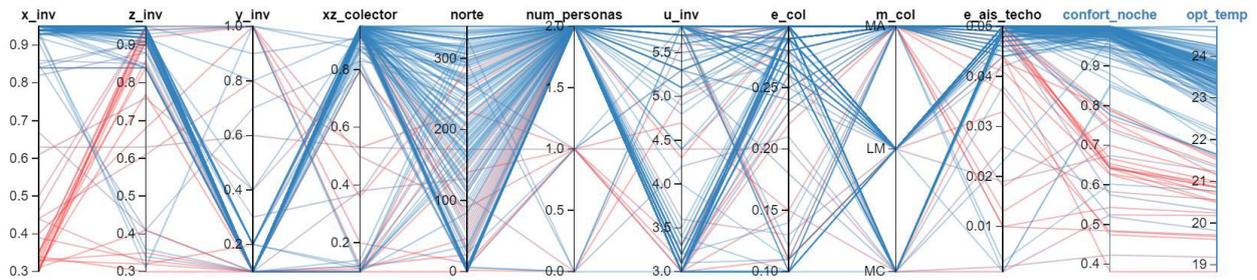


Figura 7: Resultados optimización del sistema solar pasivo

En cuanto a la ocupación del espacio, es claro que a mayor ocupación mayor carga energética, lo que nos lleva a mayores posibilidades de elevar la temperatura interior a niveles de confort, por lo cual el algoritmo centra las simulaciones en la ocupación máxima, 2 personas. Este resultado hace necesario cambiar esta

variable en el algoritmo a un máximo de 1 persona en el espacio, para poder ver la optimización del sistema de captación solar en la condición que más se repite por el territorio, una persona en una habitación. En la Fig. 8 vemos los nuevos resultados al aplicar el cambio de ocupación.

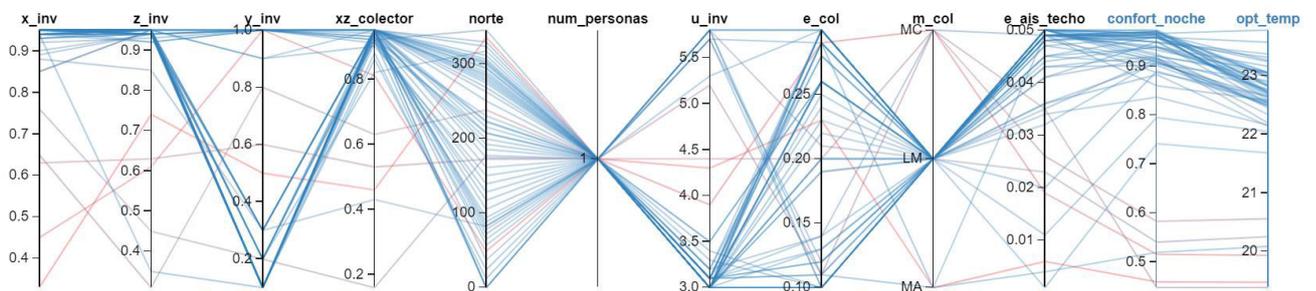


Figura 8: Resultados optimización del sistema solar pasivo - Ocupación máxima 1 persona

En la variable de valor U del vidrio del invernadero el algoritmo realiza simulaciones en diferentes valores, las simulaciones se centran en el valor máximo y mínimo, y no en los valores promedio; se percibe una tendencia mayor hacia los valores bajos, los cuales reducen las pérdidas térmicas, pero al tener datos tan dispersos, evidencian que esta variable no afecta drásticamente el resultado final de confort interior.

lo importante de esta variable para garantizar niveles de confort interior, no basta con un buen dispositivo de calefacción solar, si la cubierta de la habitación no tiene aislamiento térmico.

En el espesor del material acumulador vemos el mismo número de simulaciones en casi todos los valores de la variable, demostrando que este no es un valor fundamental para generar confort en la vivienda construida; esto se puede deber a que el proyecto (vivienda construida) ya cuenta con un muro en la fachada de ladrillo hueco, el cual ayuda en el proceso de acumulación térmica, por lo cual el algoritmo no considera necesario aumentar el espesor del muro acumulador.

El uso de la plataforma de visualización no se limita a la determinación del mejor escenario simulado para el sistema de captación solar en clima ecuatorial frío, sino que, ofrece también la posibilidad de filtrar resultados, lo que permite aprovechar el análisis de optimización realizado para determinar las características del sistema de captación solar en una condición particular; por ejemplo, considerando que en el clima trabajado no hay una tipología clara de vivienda, y que las orientaciones de los espacios son tan variables como las mismas tipologías construidas, es posible filtrar todas las alternativas del sistema con una orientación determinada, y buscar la alternativa con mayor porcentaje de horas de confort, para posteriormente definir las variables requeridas y realizar la intervención al edificio construido.

Las simulaciones mediante el proceso de optimización demuestran que, para un edificio construido en las condiciones de clima ecuatorial frío, se comporta mejor el ladrillo macizo como material de acumulación térmica de los sistemas de captación solar pasiva. (El número 1 en esta variable es concreto, el número 2 ladrillo macizo, y el número 3 muro de agua)

En la Fig. 9 se visualizan los resultados al aplicar el filtro de datos para orientación sur; al aplicar el filtro de orientación en la plataforma de visualización, se muestran todas las variables simuladas en esta orientación, y de esta manera verificar el mejor comportamiento en confort interior logrado y cuáles fueron los parámetros para conseguirlo; y basados en esta información se puede realizar la intervención en la vivienda construida.

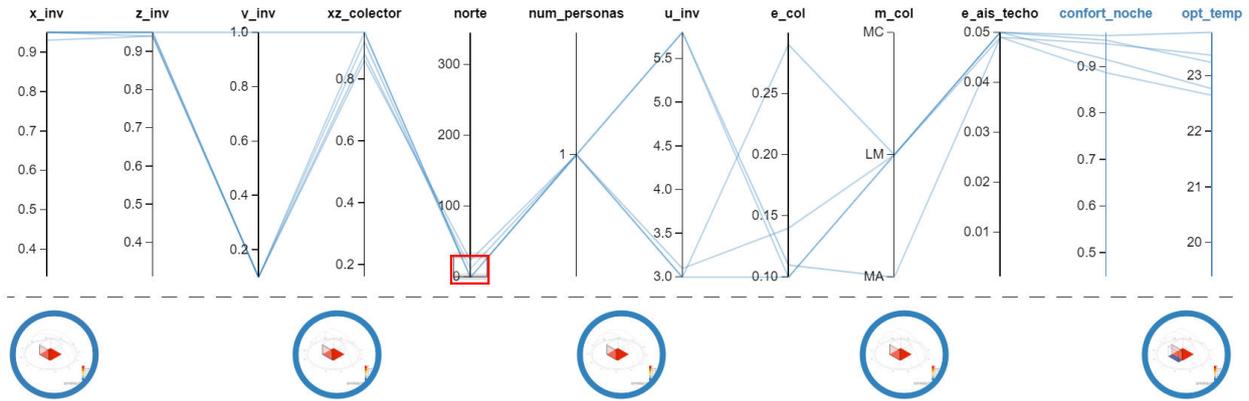
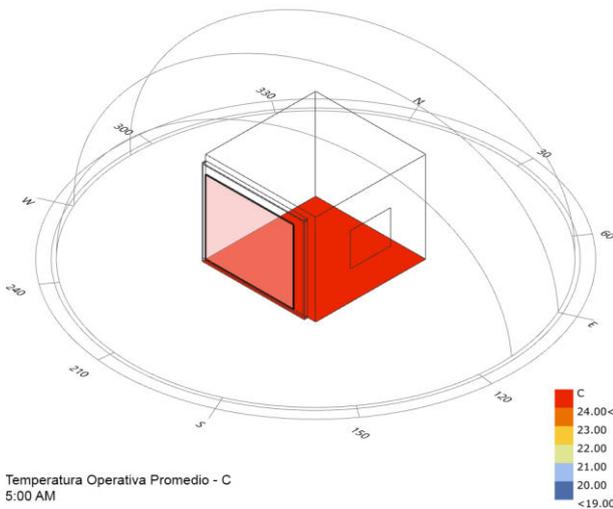


Figura 9: Visualización de resultados de optimización con selección específica de espacios con orientación sur.

Posterior al aplicar el filtro, en la plataforma de visualización vemos las diferentes simulaciones realizadas con esta orientación, abriendo la posibilidad a realizar un análisis específico de cada una de ellas y posteriormente tomar la decisión de intervenir el proyecto trabajado. Podemos seleccionar uno de los casos de interés y ver en detalle los parámetros de simulación y los resultados obtenidos en las diferentes métricas de salida (outputs). Ver Fig. 10.

variables que puede modificarse en el diseño del sistema de calefacción solar, la orientación del dispositivo juega un papel secundario, existiendo otros parámetros de diseño que, en casos particulares, pueden ser más importantes para el buen funcionamiento del sistema; factor opuesto a lo evidenciado en los diferentes sistemas implementados en el mundo en climas estacionales, donde la orientación del sistema de captación solar es primordial, ya que determina el éxito o fracaso del mismo.



Leyenda	
x_inv : 0.93	confort_noche : 0.948718
z_inv : 0.94	opt_temp : 23.364687
y_inv : 0.1	min_temp : 17.270618
xz_colector : 0.86	max_temp : 34.070888
norte : 24	ganancia_colector : 558.807707
num_personas : 1	
u_inv : 3.1	
e_col : 0.14	
m_col : LM	
e_ais_techo : 0.049	

Figura 10: Detalle de parámetros y resultados de un caso particular

6. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La presente investigación permitió evaluar el comportamiento de los sistemas solares pasivos en climas de alta montaña en bajas latitudes, evidenciando que, debido al recorrido solar y a la cantidad de

Adicionalmente la plataforma de visualización se convierte en una “herramienta” de diseño, la cual puede apoyar los procesos de diseño de sistemas de calefacción solar pasiva en climas similares al trabajado, viendo resultados preliminares de diferentes orientaciones que pueden orientar la toma de decisiones en etapas iniciales del diseño arquitectónico.

La metodología paramétrica propuesta permitió simular un número mayor de escenarios a los normalmente trabajados en los procesos de verificación energética de proyectos arquitectónicos. Además, se demostró que la implementación de herramientas de optimización es de gran utilidad en la definición de alternativas de diseño que lleven a edificaciones de un alto desempeño térmico y energético, en procura del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El presente trabajo abre un camino adicional en el análisis de edificios en climas de bajas latitudes, particularmente en Colombia, pueden generarse herramientas paramétricas que apoyen la toma de decisiones en procura del cumplimiento de la normativa ambiental edilicia, Resolución 0549 de 2015, la cual, a pesar de ya llevar 4 años desde su emisión, tiene un porcentaje de su cumplimiento en el territorio nacional limitado.

Aprovechar la velocidad de procesamiento de los computadores puede favorecer la toma de decisiones en etapas tempranas de diseño y de esta manera poder concebir edificios cada vez más sustentables.

Desarrollar herramientas que posibiliten una mejor toma de decisiones a los profesionales que no tienen

amplios conocimientos en temas ambientales, podría ser el camino para masificar la construcción sustentable en el mundo.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo presenta resultados preliminares de la investigación “SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR EN LAS TIPOLOGÍAS DE VIVIENDAS EN CLIMA ECUATORIAL FRÍO”, desarrollado en la Maestría en Arquitectura y Hábitat Sustentable de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, entre 2017 y 2019.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Hernández and G. Lesino, “Diseño y simulación computacional de sistemas pasivos y activos de calentamiento de aire para el nuevo hospital materno infantil de la localidad de Susques, provincia de Jujuy”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, no. 5, pp. 81-88, 2007.
- [2] J. I. Jodra, G. M. Viegas, G. A. San Juan and C. A. Discoli, “Tecnologías modulares de climatización solar pasiva para el hábitat residencial y el de la producción”. En X Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura, La Plata, 2018, pp. 577-587
- [3] M. V. Mercado, A. Esteves and C. Filippín, “Sistema de Climatización Solar Pasivo: su integración en viviendas de bajo costo”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, no. 5, pp. 121-126, 2007.
- [4] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda. [En línea]. Disponible en: https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#/como_vivimos
- [5] Cámara Colombiana de la Construcción (2019). ACTIVIDAD EDIFICADORA. Segmento residencial y no residencial. [En línea]. Disponible en: <https://ww2.camacolcundinamarca.co/documentos/informes/Coyuntura/Septiembre-2019.pdf>
- [6] S. Davidson, «Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino». [En línea]. Disponible en: <https://www.grasshopper3d.com/>. [Accedido: 06-ago-2018].
- [7] W. Thomas and N. Giacomo, “Introduction to architectural design optimization” En *City Networks*. Cham: Springer, 2017. pp. 259-278.
- [8] E. Mazria, *The passive solar energy book*. Emmaus, Pa.: Rodale Press, 1979.
- [9] M. De Gastines, E. Correa, and A. Pattini, “Evaluación del balance energético de ventanas en mendoza. Impacto de su tecnología y orientación”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 19, no. 5, pp. 01-12, 2015.
- [10] A. J. Guzmán, J. L. Pilatti, S. Angulo, J. Piumetti, M. Salinas, F. Pereyra and A. Olarte, “Situación clima/energética en localidades de la prov. de Córdoba, evaluación de vivienda tipo; simulaciones con diferentes envolventes y orientaciones, y propuesta de adecuación térmica, utilizando Muros Trombe u otras formas de energía solar pasiva.” En X Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura, La Plata, 2018, pp. 567-576
- [11] M. V. Mercado, A. Esteves and C. Filippín, “Sistema de calefacción solar radiante Mediciones experimentales de invierno y evaluación con software de simulación térmica SIMEDIF”. En *Encuentro Nacional de Conforto no Ambiente Construido*, Natal, 2007, pp. 334-344.
- [12] M. V. Mercado, A. Esteves, C. Filippín and S. F. Larsen, “SISTEMA DE CALEFACCIÓN RADIANTE SOLAR PASIVO DISEÑO, CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS”, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 23, pp.53 -61, 2009.
- [13] L. Velasco Roldan, “Estrategias de captación solar mediante colectores solares de aire en climas fríos”, *Estudios del Hábitat*, vol. 14, pp. 15-27, 2016.
- [14] E. Zalamea-León and F. Quesada, "Criterios de integración de energía solar activa en arquitectura. Potencial tecnológico y consideraciones proyectuales", *Revista de Arquitectura*, vol. 19, no. 1, pp. 65-79, 2017.
- [15] Puppo, G. Puppo and G. Puppo, *Sol y diseño*. México: Alfaomega, 1999.
- [16] M. M. C. Roudsari Sadeghipour, “Ladybug Tools”, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.ladybug.tools/about.html#team>. [Consultado: 03-ago-2018].
- [17] NREL, *EnergyPlus*.
- [18] Wortmann T. *Opossum: OPTimizatiOn Solver with SURrogate Models*; 2017.
- [19] D. Michie, ““Memo” Functions and Machine Learning”, *Nature*, vol. 218, no. 5138, pp. 306-306, 1968.
- [20] C. Waibel, T. Wortmann, R. Evins, y J. Carmeliet, “Building energy optimization: An extensive benchmark of global search algorithms”, *Energy Build.*, 2019.

- [21] A. Costa y G. Nannicini, “RBFOpt: an open-source library for black-box optimization with costly function evaluations”, *Math. Program. Comput.*, 2018.
- [22] H. M. Gutmann, “A Radial Basis Function Method for Global Optimization”, *J. Glob. Optim.*, 2001.
- [23] R. G. Regis y C. A. Shoemaker, “Improved strategies for radial basis function methods for global optimization”, *J. Glob. Optim.*, 2007.
- [24] T. Wortmann, “Opossum,” in *CAADRIA 2017 - 22nd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Protocols, Flows and Glitches*, 2017.
-



Juan David Giraldo.- Nació en Herveo, Colombia en 1993. Recibió su título de Arquitecto de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales en 2015. Es docente investigador de la Facultad de Arquitectura de la Universidad La Gran Colombia en

Bogotá, Colombia. Sus campos de investigación están relacionados con el diseño ambientalmente correcto, la arquitectura bioclimática y eficiencia energética.



Juan Pablo Arango.- Nació en Medellín, Colombia en 1997. Arquitecto Summa Cum Laude de la Universidad Nacional de Colombia en 2019. Actualmente se encuentra como practicante en Transsolar, Alemania, aplicando sus conocimientos en el ambiente

construido.