XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

# Perfis de insolação. Métrica solar baseada no clima para estudos de sombra em edifícios

*Perfiles de insolación. Métrica solar de base climática para el estudio de las sombras en edificaciones*

*Insolation profiles. Climate-based solar metric for the study of shadows in buildings*

Área temática 4 / Desempenho térmico do ambiente construído

**Salazar Trujillo, Jorge Hernán**
*Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, COLOMBIA*
jhsalaza@unal.edu.co

USP ufsicar IAU USP FAUUSP

## Resumo

Na Colômbia, as variações de altitude e a elevada umidade fazem com que a sombra nem sempre seja conveniente, mas os modelos geométricos para calcular sombras não consideram a frequência e duração dos intervalos de insolação. Desconsiderar a nebulosidade no Trópico Andino pode gerar um superdimensionamento do controle solar em lugares temperados e frios. Elevar o rendimento solar exige medir os intervalos em que se apresentaram condições de céu limpo e avaliar a regularidade com que os dispositivos de sombreamento efetivamente projetaram sombra. O método para estudar os intervalos de insolação direta utiliza imagens extraídas de vídeos para classificar os pixels segundo sua tonalidade e determinar se em cada imagem se detectam ou não sombras. Os resultados permitem classificar os dias segundo sua oferta solar e indicam que a superestimação da radiação solar direta é significativa e que justifica medições prolongadas para otimizar o conforto térmico e a eficiência energética.



Palavras-chave: Sombra. Nebulosidade. Dispositivos de sombra. Insolação. Trópico Andino.



## *Resumen*

*En Colombia las variaciones altitudinales y la elevada humedad hacen que no siempre la sombra sea conveniente, pero los modelos geométricos para calcular sombras no consideran la frecuencia y duración de los intervalos de insolación. Desconsiderar la nubosidad en el Trópico Andino puede generar un sobredimensionamiento del control solar en lugares templados y fríos. Elevar el rendimiento solar reclama medir los intervalos en que se presentaron condiciones de cielo despejado y valorar la regularidad con que los dispositivos de sombreamiento efectivamente proyectaron sombra. El método para estudiar los intervalos de insolación directa utiliza imágenes extraídas de videos para clasificar los píxeles según su tonalidad y determinar si en cada imagen se detectan o no sombras. Los resultados permiten clasificar los días según su oferta solar e indican que la sobreestimación de la radiación solar directa es significativa y que justifica mediciones prolongadas para optimizar el confort térmico y la eficiencia energética.*



*Palabras clave: Sombra. Nubosidad. Dispositivos de sombra. Insolación. Trópico Andino.*



## *Abstract*

*In Colombia, altitude variations and high humidity mean that shade is not always convenient, but geometric models for calculating shadows do not consider the frequency and duration of insolation intervals. Disregarding cloud cover in the Andean Tropics can lead to oversizing solar control in mean and cold places. Improving solar performance requires measuring the intervals in which clear sky conditions occurred and assessing the regularity with which shading devices effectively cast shadows. The method for studying direct insolation intervals uses images extracted from videos to classify pixels according to their tone and determine whether shadows are detected in each image. The results allow days to be classified according to their solar availability and indicate that the overestimation of direct solar radiation is significant and justifies prolonged measurements to optimize thermal comfort and energy efficiency.*



*Keywords: Shade. Cloudiness. Shading devices. Insolation. Andean Tropics.*

## Contexto

En la Zona Ecuatorial las condiciones climáticas son mayoritariamente tórridas y para que edificaciones y proyectos al exterior puedan favorecer el confort y la eficiencia energética conviene recurrir a la sombra. Es infrecuente que las palabras “sombra” y “trópico” se lean separadas y por eso los proyectos arquitectónicos para lugares con este tipo de clima son pródigos en umbrales, oquedades, retranqueos, voladizos, rugosidad o plegamientos, ejemplos de un amplio repertorio de recursos formales que permiten que un volumen se sombree a sí mismo o a los espacios vecinos. Para el caso de Colombia 75% del territorio nacional corresponde a clima tropical cálido húmedo (MVCT, 2015) y la sombra es muy apreciada, pero en el resto del territorio nacional los rigores tropicales se manifiestan modulados por las enormes variaciones altitudinales propias de la cordillera de Los Andes. Allí las condiciones son diferentes; en el Trópico Andino abunda el agua, los ríos son enormes y hay valles profundos que generan importantes obstáculos a las masas de aire húmedo, por lo que la nubosidad es abundante y las variaciones micro climáticas son la norma (GARCÍA, 2023). Justo en esta franja altitudinal de clima moderado se emplazan las más importantes ciudades del país y vive la mayor parte de la población colombiana.

En ciudades capitales como Bogotá localizada a 2.625 metros sobre el nivel del mar (msnm), Tunja (2.782 msnm) o Pasto (2.527 msnm), a la par de innumerables poblados y territorios rurales es habitual que los vidrios de control solar se usen con moderación, que las ventanas sean pequeñas, que los lucernarios sean un recurso arquitectónico común y que los patios cubiertos con materiales translúcidos sean corrientes. A veces son lugares muy fríos y aunque no se llega a requerir cámaras de aire ni aislamientos en fachada, la recomendación clásica para edificaciones en el Trópico: “tanta sombra como sea posible” aquí no siempre aplica. En la franja altitudinal donde las temperaturas van de templadas a frías jamás hace un calor extremo y muchas veces la sombra resulta indeseable pero cuando el cielo está despejado y el disco solar brilla con intensidad la sombra es necesaria para favorecer el bienestar térmico. También son frecuentes las temporadas de lluvia y nubosidad espesa acompañadas de poca insolación. Coloquialmente se dice que “está haciendo mucho frio” y en esas temporadas la insolación resulta muy deseable a pesar de la incomodidad visual que ocasionalmente se pueda experimentar. Es una condición

típica en la Colombia Andina pero muy inusual en el resto del planeta porque la mayor parte de la Zona Ecuatorial es plana, insular o costera. El trópico montañoso escasea.

**Métricas Solares con Base Climática**

El estudio de las relaciones entre el sol y las formas arquitectónicas se denomina asoleamiento y hace parte de la Arquitectura Bioclimática desde el más temprano inicio de la disciplina. Es notable que a pesar de las muchas décadas que nos separan de los años en que los principios de la Arquitectura Solar fueron formulados, los cálculos de sombra se continúen realizando casi que exclusivamente a partir de modelos geométricos. Las máscaras de sombra, los heliodones, los aplicativos para revisar incursión solar y sombra arrojada, todos operan desde lo teórico e irreal de un cielo sin nubes. Hay excepciones, como cuando los análisis se realizan a partir de un año meteorológico típico (TMY), los modelos de distribución de la luz en el cielo (PEREZ, 1993) o las métricas para la iluminación metabólica (KONIS, 2917).

Hay en este tipo de aproximaciones tres objeciones: en primer lugar, en el caso de los años meteorológicos tipo (TMY) se trata de herramientas desarrolladas con la finalidad de hacer estimativos de consumo energético no de confort, por eso en su construcción se le da mayor peso a los parámetros que más influyen sobre el consumo energético de los equipos de climatización artificial que son temperatura del aire y humedad relativa. Radiación directa y presencia de sombra no encabezan esa lista.

La segunda objeción es que en un archivo TMY estándar se tienen apenas 12 datos de radiación directa por día, valores que regularmente terminan siendo apenas 10 porque en un contexto montañoso la primera y última hora del día no aportan radiación directa por causa de la topografía circundante. La tercera es que siempre se emplean valores medios, desconsiderando los intervalos en que las condiciones fueron extremas y por eso las épocas de menor precipitación, poca nubosidad y temperaturas más altas no hacen parte de una descripción climática estándar a pesar de que justo en esas épocas se presenta la mayor demanda de sombra. El razonamiento contrario también aplica: durante un periodo de precipitaciones abundantes, temporadas más frías y escaso brillo solar puede suceder que la sombra sea excesiva. En ambos casos se verifica que tomar decisiones de proyecto a partir de condiciones medias en algunos temas es razonable, pero no en todos.

El asunto central es que en lugares con muchas horas de cielos intermedios el beneficio de los dispositivos de sombra es menor porque cuando las nubes enmascaran el disco solar la sombra arquitectónica es redundante y a veces incluso resulta adversa. En desiertos tropicales extremadamente calurosos tiene sentido aplicar un modelo geométrico de sombras donde la nubosidad no se considera, pero tomar decisiones acerca del control solar necesario para favorecer el confort y la eficiencia energética en lugares donde con frecuencia el disco solar se encuentra oculto tras las nubes puede ser inconveniente porque la discrepancia entre las predicciones de desempeño solar a las que se llega asumiendo un cielo siempre despejado pueden ser muy desfasadas (SALAZAR, 2019).

Sería beneficioso que en lugares donde la sombra es apreciada pero la nubosidad abundante los estudios de insolación y de sombreamiento consideraran la frecuencia con que la bóveda celeste se presenta suficientemente nublada como para que el disco solar sea invisible y por lo tanto, no haya sombra alguna. Ya antes se había señalado que en el Trópico Andino los sistemas de sombreamiento se han estado sobredimensionando (SALAZAR, 2008), pero los niveles de sobre-estimación de la radiación solar directa en los estudios de sombra que producen los equipos técnicos y de diseño bioclimático no se están calculando. La frecuencia, tamaño y posición de las nubes, así como la dirección y velocidad de su desplazamiento son factores que se deberían tener en consideración para el diseño de edificaciones sostenibles. Las discrepancias en los resultados obtenidos en comparación con los que arrojan modelos geométricos en los que el cielo se asume permanentemente despejado son apreciables y para mejorar las técnicas con las que se diseñan las envolventes arquitectónicas se requieren avances metodológicos que ayuden a estimar qué tan grande es este sobredimensionamiento y descontar de los cálculos de sombra aquellos intervalos en que el cielo permanece cubierto.

**Intervalos de Insolación Efectiva**

La necesidad de elementos que proyecten su sombra en un momento en particular depende de la demanda de sombra lo que implica conocer la frecuencia y distribución temporal de los episodios en los que el sol resulta visible. Si en un sitio las condiciones de insolación adversa son infrecuentes o de corta duración podría ser conveniente aminorar la dosis de sombra y por eso estimar la frecuencia con que los dispositivos de control solar operan es imprescindible para decidir si justifica encarecer las fachadas de una edificación. Una mejor comprensión del

verdadero desempeño solar de las envolventes arquitectónicas ayudaría a superar algunos de los obstáculos implícitos en el diseño de edificaciones para el Trópico Andino indagando si los beneficios de los dispositivos de sombra compensan las inversiones requeridas para su ejecución, pero no es viable aportar realismo al proceso porque se requiere información que actualmente no se está midiendo. Si durante la fase de diseño estuvieran disponibles datos relacionados con la presencia o ausencia de sombra sería posible:

a) Considerar la posibilidad de diseñar dispositivos de sombra con ángulos de corte menos restrictivos que permiten esporádicas condiciones de insolación adversa. Esto permitiría reducir la carga muerta y las cargas de viento en fachada, aminorar los requerimientos estructurales y adicionalmente ampliar las visuales hacia el exterior y aumentar el aprovechamiento de la luz natural (WIRZ, 2021).

b) Agregar nubes, lluvias, brumas y niebla a las variables de diseño arquitectónico de edificaciones localizadas en lugares donde los cielos permanentemente despejados son suficientemente infrecuentes. Conviene aclarar que la definición de “infrecuente”, “esporádico” o “breve” implica una importante investigación aún por hacer, pero la tarea transita por la misma ruta por la que este trabajo avanza: primero medir para luego decidir mejor.

c) Aplicar estas técnicas al diseño del espacio público y otros espacios de estancia al exterior de las edificaciones porque ni en los lugares más calurosos conviene sombrear el día completo porque los pisos y el mobiliario se tornan resbalosos y malolientes. La radiación solar directa ayuda a que los materiales estén secos antes de que las personas los comiencen a utilizar, pero sin una métrica solar de base climática es difícil estimar cuánto acceso solar conviene permitir.

d) Enriquecer los criterios con que se diseñan y programan los sistemas de control solar activos porque se sabría con anticipación la distribución típica de los intervalos en que la sombra se podría requerir.

Trabajar con la historia meteorológica de un lugar permitiría diseñar las sombras de una manera más eficiente (IEA, 2000), pero en Colombia se mide la heliofanía diaria (horas de brillo solar por día) empleando heliógrafos y los resultados se publican como promedios anuales y a lo sumo en sus 12 promedios mensuales (IDEAM, 2025). Por su parte las descripciones climáticas estándar

que se emplean en los estudios de sombra tienen la misma limitación: una resolución temporal insuficiente. Pocos datos permiten un pobre acercamiento al fenómeno de la sombra, en especial para contextos donde 30 minutos de exposición solar continua puede resultar excesiva.

## Objetivo

Medir la duración y frecuencia de los intervalos en que se presentan condiciones de cielo despejado en un sitio para valorar la regularidad con que los dispositivos de sombreamiento efectivamente proyectaron sombra sobre aquello que interese sombrear.

## Metodología

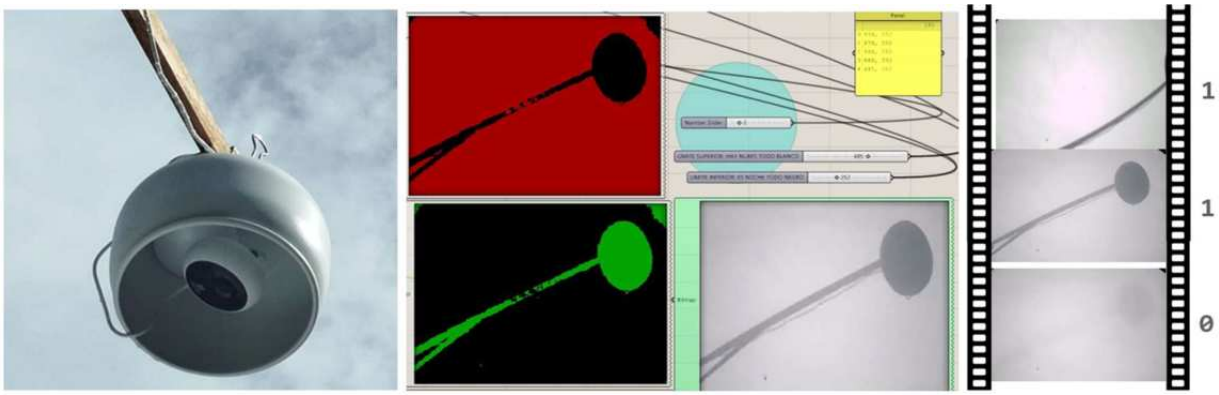
La región donde se emplaza la ciudad de Medellín tiene la red de monitoreo ambiental más completa de Colombia y una de las mejores de Latinoamérica (SIATA, 2025). Allí operan casi 50 estaciones meteorológicas, 6 de las cuales registran desde 2017 la Radiación Global cada minuto utilizando piranómetros. El propósito de esta investigación es explorar la posibilidad de darle uso arquitectónico a estos datos, considerando que para medir Radiación Directa lo que se requieren son pirohelióметros, pero que actualmente ninguna estación meteorológica en Colombia ni tampoco en Medellín cuenta con este equipo. Esta exploración preliminar procuró determinar la ocurrencia de condiciones de cielo despejado en la proximidad de las estaciones meteorológicas existentes a partir de imágenes obtenidas con una cámara de video. El montaje consiste en una lámina metálica pintada color blanco mate, instalada horizontalmente y expuesta a la radiación solar directa. Sobre la lámina se suspendió un recipiente impermeable que proyecta su sombra durante las ocasiones en que el cielo se encontraba despejado. El recipiente alberga en su interior una cámara de video que apunta hacia abajo y que grabó de manera continua las 24 horas del día. Se ensayaron otros colores para la lámina, pero reconocer una sombra en una imagen es más fácil cuando el contraste es máximo, lo que se logra con un fondo blanco.

El resultado de este proceso son múltiples archivos de video en formato mp4, los cuales se procesaron con una herramienta de uso libre (FFMPEG, 2016) que permitió extraer fotogramas en formato .bmp cada 5 minutos. Es un proceso computacionalmente muy demandante que consume mucho espacio de almacenamiento, por lo que resulta importante elegir una cámara que no obligue a trabajar con una nube sino que grabe directamente a memorias tipo SD para

luego trasladar esos videos a un disco duro. Esta primera parte del proceso finalizó con miles de imágenes nombradas secuencialmente, lo que permitió ordenarlas cronológicamente. Cada imagen se analizó para determinar si en ella se observaba o no la presencia de sombra usando componentes para el procesamiento de video (ZAREI, 2023) que operan bajo el ambiente de programación visual de Grasshoppper de la plataforma Rhino3D® (MCNEEL, 2010).

El algoritmo para discernir si hay o no presencia de sombra en una imagen clasifica los pixeles por su tono. La proporción entre el número de pixeles claros y oscuros opera como mecanismo de control para descartar el efecto de eventuales reflejos, la presencia de basura o la sombra de algún insecto. Como todo el montaje es rígido, el área capturada es constante y el total de pixeles siempre igual. Ante condiciones de cielo nublado todos los pixeles tienen casi el mismo tono de gris y si en la imagen se observa alguna sombra, un apreciable número de pixeles tendrá un tono notablemente más oscuro. El principio de clasificación es muy simple y pocos ajustes más una revisión manual de los resultados obtenidos a partir de las imágenes de más difícil clasificación (presencia de reflejos y condiciones de penumbra al inicio de los periodos de insolación) fueron suficientes para calibrar los valores umbral (Figura 1).

**Figura 1: Izquierda: Cámara de vídeo y protector metálico que a la vez proyecta sombra. Centro: Separación de sombra (verde) y fondo (rojo) comparando el tono de los pixeles en Grasshopper. Derecha: tres ejemplos de los miles de fotogramas extraídos, valorados con 1 si hubo sombra o 0 si en ese instante no brillaba el sol.**




Fuente: Salazar (2025, p. 8).

Cuando en una imagen todos los pixeles presentaban un tono suficientemente similar, el resultado de procesar la imagen fue un cero (0) porque en ese instante el cielo se encontraba nublado. Por otro lado si se detectaron sombras entonces el resultado fue un uno (1) porque en ese instante se presentaban condiciones de Radiación Directa. La reiteración del procedimiento produce una lista binaria con la misma resolución temporal empleada durante la extracción de fotogramas. La última etapa del proceso consistió en agrupar los valores consecutivos de unos (1,1,1,1…) usando la secuencia "01" como marcador del inicio de un Intervalo de Insolación y la suma de los unos consecutivos para computar su duración. El resultado fueron las bases de datos que permitieron estudiar los patrones de distribución diaria de los intervalos en que se presentó radiación solar directa en el lugar y temporada en que se instaló la cámara. La primera campaña de mediciones se realizó entre 25/12/2024 y 11/01/2025 y de esta primera campaña se recopilaron 20 días completos. De inmediato se inició la segunda campaña de mediciones, cuyo procesamiento de videos está programado para el primer trimestre de 2025.

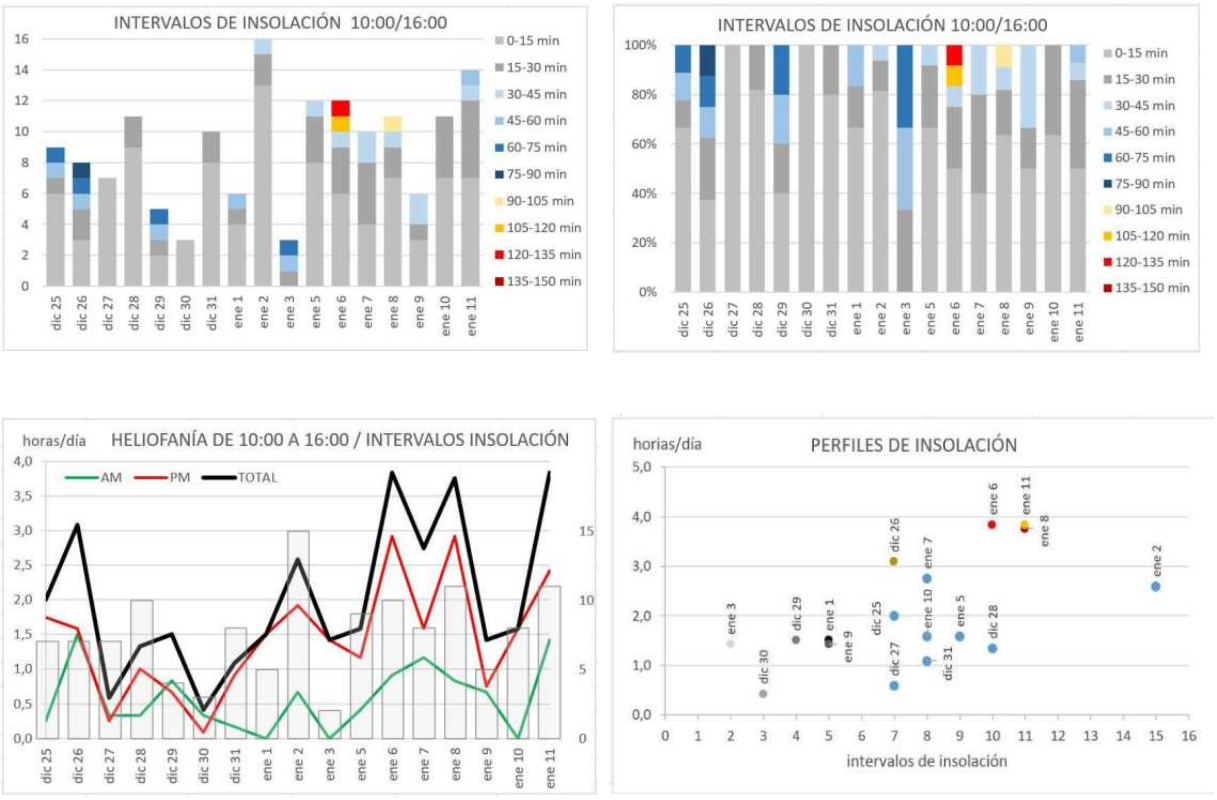
## Resultados y Discusión

Esta primera campaña de mediciones se procesó con base diaria y con el propósito de valorar las condiciones de insolación antes y después del mediodía el conjunto de datos se dividió en dos grupos de 2 y 4 horas de duración, respectivamente. Para esta exploración inicial se calcularon dos métricas: la duración de cada intervalo de insolación y el número de veces en que el cielo estuvo despejado durante el día. La sumatoria de la primera magnitud permite conocer la duración de los intervalos de brillo solar y corresponde a la Heliofanía Diaria. La segunda métrica se denominó "Intervalos de Insolación" y corresponde al número de ocasiones en que estas condiciones se presentaron. Un valor de 1 significa que el intervalo en que brilló el disco solar a lo largo de un día no tuvo ninguna interrupción y que durante ese tiempo no se presentaron nubes pasajeras que obstruyeran el brillo del sol. Es una condición improbable para un lugar húmedo tropical y que en esta primera ventana de observación no se presentó. Más frecuentes fueron valores entre 8 y 10 intervalos de insolación por día, lo que significa que el tiempo en que hubo brillo solar se presentó en forma de 8 a 10 "paquetes" de brillo solar diario.

Esta información es suficiente para calcular una duración promedio de los intervalos de brillo solar pero observando la diversidad de resultados y las notorias variaciones entre las condiciones de nubosidad durante la mañana y las tardes se consideró más útil clasificar los intervalos por

rangos de duración. Se pudo cuantificar lo que la experiencia ya sugería: que para la temporada en que realizaron esas primeras mediciones casi toda la Radiación Solar Directa se presentó durante las tardes. La predominancia de mañanas frías y nubladas son características del sitio en que se realizaron los videos, con la única excepción de un día atípico (diciembre 30 de 2024) que fue particularmente lluvioso y que presentó la menor heliofanía de la serie (Figura 2).

**Figura 2: Arriba: Total de intervalos de insolación que se presentaron cada día entre el 25/12/2024 y 11/01/2026 entre las 10:00 y las 16:00. Abajo izquierda: heliofanía matutina y vespertina en las mismas fechas. Los valores teóricos, líneas horizontales a 2h en la mañana y 4h en las tardes, jamás se presentaron. Abajo derecha: clasificación de los días según la heliofanía diaria y los intervalos de insolación registrados para cada día.**




Fuente: Salazar (2025, p. 10).

Se podría esperar que los días con mayor heliofanía fueran aquellos en los que se presentaron menos intervalos de insolación porque cuando hay muchas nubes transitando por el cielo, al final

del día el tiempo en que brilló el sol tendería a ser menor. Eso suena razonable, pero no siempre sucedió así porque algunos días presentaron nubes pequeñas y que se desplazan con velocidad, mientras que otros días hubo nubes lentas, muy grandes y menos abundantes. Es fácil constatar que igual número de intervalos de insolación pueden dar como resultado valores de heliofanía muy dispares, lo que demuestra la importancia de este tipo de análisis porque permiten llegar a conclusiones que superan el nivel de detalle al que se puede llegar con información meteorológica estándar. También es de resaltar que los modelos teóricos de análisis solar en todos los casos predicen un valor constante de 6 horas/día, valor que nunca se presentó.

En las semanas en las que se realizó esta prueba piloto se presentaron condiciones de cielo suficientemente despejado como para que se verificara la presencia de sombra durante 2 a casi 5 horas diarias, un valor razonable para las condiciones invernales de esos días. Desde el punto de vista de la cantidad de ocasiones en que la Radiación Solar Directa fue interrumpida por la nubes se pudieron observar diferencias significativas entre los días (Figura 2) que permitieron insinuar una clasificación tentativa de los días en función de los Perfiles de Insolación que se presentaron: hay días en que el disco solar brilla más horas que otros, pero adicionalmente el número de intervalos de insolación varía mucho y permite identificar “tipos de día” en función de la insolación registrada. Mediciones más prolongadas y durante temporadas de cielo despejado son necesarias para perfeccionar esta clasificación, lo que aportará elementos adicionales para precisar las métricas solares de base climática que se requiere definir y calcular para estudiar los Perfiles de Insolación de un lugar.

## Conclusiones

No se discute que en lugares muy nublados el beneficio de los dispositivos de sombra es menor que en lugares donde se presentan condiciones de cielo más despejado, pero la pregunta no es fácil de responder porque el umbral a partir del cual justifica sombrear las fachadas de una edificación es una frontera muy poco explorada. ¿Cuál es el beneficio mínimo que debería aportar un dispositivo de sombra para que justifique complejizar la envolvente arquitectónica? La pregunta todavía está esperando respuesta, pero este trabajo ayuda a observar esa frontera desde una menor distancia. Los resultados aquí obtenidos demuestran la conveniencia de realizar mediciones que permitan establecer las condiciones de nubosidad e insolación típicas o más frecuentes para una localidad en particular.

Si se consideran tolerables todas aquellas condiciones de insolación con una duración menor o igual a 5 minutos se verifica que el distanciamiento entre la consideración teórica de un cielo sin nubes es apreciable y que tiene sentido estimar el sobredimensionamiento de los dispositivos de sombra, línea de trabajo que ayudará a perfeccionar las herramientas de diseño solar con base climática. A partir de los resultados preliminares aquí obtenidos efectivamente se puede afirmar que la sobreestimación de los aportes de la radiación solar directa en edificaciones ciertamente existe y que está lejos de ser despreciable.

Algo similar sucede con las investigaciones relacionadas con la iluminación metabólica, las cuales se podrían enriquecer con este tipo de información. Todavía no hay consenso acerca de la dosimetría umbral que activa la secreción de melatonina ni la base de cálculo para estimar el EML (Konis, 2017). El tipo de datos aquí obtenidos podrían ayudar a explorar este umbral mínimo porque a pesar de que no hay suficiente evidencia medica acerca del umbral para condiciones de iluminación difusa, si hay evidencia de que ante condiciones de radiación solar directa y brillo solar intenso el estímulo umbral se supera y el reloj circadiano se logra ajustar.

Las métricas solares de base climática apenas se comienzan a definir y su aplicación en el diseño arquitectónico todavía está pendiente, pero se pudo concluir que mediciones sistemáticas y mucho más prolongadas ciertamente son necesarias y justificables. Conviene refinar el montaje necesario para la captura de videos e iniciar las diligencias que permitan emprender futuras campañas de medición en la proximidad de alguno de los piranómetros de la red de monitoreo ambiental de la ciudad de Medellín. Recopilar simultáneamente información acerca de la insolación y la Radiación Global de un sitio aportará elementos para estudiar la frecuencia, duración y distribución diaria y anual de los Intervalos de Insolación.

## Referencias

MVCT. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Decreto 1285 de 12 de junio de 2015. **Lineamientos de construcción sostenible para edificaciones.** Bogotá, 2015. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=62885. Acceso en: 21 abr. 2025.

GARCÍA, A. et al. From Comfort to Life Habits. Qualitative Approaches to Comfort Research on Domestic Space in the Colombian Andean Tropics. In: **Removing Barriers to Environmental Comfort in the Global South**. London, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-24208-3_31.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation. **Solar Energy,** London, v. 50, n. 3, p. 235-245, 1993. DOI: https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I.

KONIS, K. A novel circadian daylight metric for building design and evaluation. **Building and Environment**, London, v. 113, p. 22-38, 2017.

SALAZAR, J. Early Design Method to Improve Shading Device Efficiency: The Solar Coupling Index. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, Nueva York, v. 13, n. 6, p. 390-400, 2019. DOI: 10.17265/1934-7359/2019.06.005.

SALAZAR, J. **Diseño de Sombras.** Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2008.

WIRZ, A.; SKENE, D.; MÜNCH, M. The relevance of daylight for humans. **Biochemical Pharmacology**, v. 191, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.114304.

IEA. **Daylight in Buildings: a source book on daylighting systems and components.** International Energy Agency Report Task 21, USA, 2000.

IDEAM INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA. Disponible en: www.ideam.gov.co/. Acceso en: 6 feb. 2025.

SIATA - SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Disponible en: www.siata.gov.co/. Acceso en: 20 abr. 2025.

FFMPEG DEVELOPERS. **FFmpeg tool**. Version be1d324. 2016. Disponible en: http://ffmpeg.org/. Acceso en: 20 dic. 2024.

ZAREI, F. et al. JAVID 1.3.1. **Rhinoceros 3D Plugin**. 2023. Disponible en: https://www.food4rhino.com/en/app/javid. Acceso en: 10 ene. 2025.

MCNEEL, R. et al. **Rhinoceros 3D.** Version 6.0. Seattle: Robert McNeel & Associates, 2010.