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

Fundamentos para a definição de métricas solares baseadas no clima

Fundamentos para definir métricas solares con base climática

Fundamentals for defining climate-based solar metrics

Área temática 5. Eficiência energética

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

Resumo

Ao projetar dispositivos de controle solar e estimar seus benefícios, registros de radiação solar de longo prazo raramente estão disponíveis e, portanto, modelos teóricos, que desconsideram a cobertura de nuvens, ou registros climáticos padrão que suavizam as diferenças climáticas de ano para ano são frequentemente usados. Eles apenas fornecem resultados com resolução horária. O objetivo era calcular o sombreamento com maior realismo e, para isso, foram utilizadas a plataforma Grasshopper e os registros globais de radiação, que no caso de Medellín, na Colômbia, são coletados minuto a minuto desde 2017. Utilizando esses dados plurianuais, um modelo teórico foi calibrado como função de referência e as discrepâncias entre os arquivos EPW disponíveis para a cidade e cinco estações meteorológicas foram quantificadas. A viabilidade de calcular métricas solares a partir de registros meteorológicos foi demonstrada e a incerteza por trás dos modelos teóricos de radiação foi reduzida.

Palavras-chave: Radiação. Trópico. Métrica Solar. Sombra.

Resumen

Al diseñar dispositivos de control solar y estimar su beneficio rara vez se cuenta con registros de radiación solar de larga duración y por eso regularmente se usan modelos teóricos, que desconsideran la nubosidad, o archivos climáticos estándar que aplanan las diferencias climáticas de año en año y sólo dan resultados con resolución horaria. El objetivo fue calcular sombreamiento con mayor realismo y para ello se utilizó la plataforma Grasshopper y los registros de Radiación Global que para el caso de Medellín, Colombia, se recolectan desde 2017 cada minuto. Con estos datos multianuales se calibró un modelo teórico que sirve como función de Referencia y se cuantificaron los desfases entre los archivos EPW disponibles para la ciudad y cinco estaciones meteorológicas. Se concluyó demostrando la viabilidad de calcular métricas solares a partir de registros meteorológicos y se aminoró la incertidumbre detrás de los modelos teóricos de radiación.

Palabras clave: Radiación. Trópico. Métrica Solar. Sombra.

Abstract

When designing solar control devices and estimating their benefit, long-term solar radiation records are rarely available. Therefore, theoretical models are often used which disregard cloud cover, or standard climate files that flatten year-to-year climate differences and only provide results with hourly resolution. The objective was to calculate shading with greater realism, and to do so, the Grasshopper platform and Global Radiation records were used, which in the case of Medellín, Colombia, have been collected every minute since 2017. With these multi-year data, a theoretical model that serves as a Reference function was calibrated, and the lags between the EPW files available for the city and five meteorological stations were quantified. The conclusion was that it was possible to calculate solar metrics from meteorological records and the uncertainty behind the theoretical radiation models was reduced.

Keywords: Radiation. Tropic. Solar Metric. Shadow.

Introducción

La diversidad climática del Trópico Andino es notable, consecuencia de una complejidad geográfica insuficientemente entendida que la normativa local aún no reconoce. Como resultado no hay consideraciones micro-climáticas ni en los instrumentos de ordenación territorial ni en las normas de construcción (CARRIZOSA, 2014). El desarrollo de metodologías para estudiar esta diversidad climática con el propósito de traducirlas a un modo de hacer arquitectura para la región es tarea pendiente (GUZMÁN, 2018), aunque los resultados de trabajos recientes ya han demostrado la pertinencia de generar respuestas bioclimáticas diferenciales para lugares ubicados a pocos kilómetros de distancia (GARCÍA et al., 2023). La disponibilidad de radiación solar no es la excepción y por eso valorar la insolación de un proyecto para la Zona Ecuatorial es imprescindible para procurar la calidad ambiental de las edificaciones. Cálculos de sombra y ganancia solar son tarea cotidiana en los talleres de diseño y en toda oficina de asesoramiento ambiental porque en el trópico el tamaño de los equipos de climatización artificial y su consumo energético dependen mucho de la efectividad de la solución solar (SALAZAR, 2019). Por esta razón la optimización de una envolvente arquitectónica para condiciones tropicales casi siempre recurre al análisis de alternativas de control solar en procura de una optimización geométrica que permita la apropiada sintonización entre forma, condiciones climáticas locales, la demanda de sombra y las posibilidades económicas de quien encarga el proyecto.

Hace décadas las predicciones de desempeño solar en edificaciones se hacían a partir de modelos teóricos de Radiación Global que asumían máxima transparencia atmosférica y que indujeron a sobredimensionar los sistemas de control solar. Diseñar fachadas para un cielo completamente despejado es inadecuado en lugares donde la humedad abunda y la nubosidad es frecuente, lo que hoy reclama aprovechar los registros de Radiación Global para calcular indicadores del desempeño solar de las edificaciones a partir de registros climáticos históricos y que aquí se denominan Métricas Solares de Base Climática. Las herramientas de cálculo se han robustecido y ya el proceso se apoya en algoritmos computacionales y aproximaciones paramétricas que permiten considerar las características climáticas locales. Automatizar las simulaciones de eficiencia energética y desempeño solar de numerosas alternativas formales es una tendencia consolidada, pero en el contexto colombiano poco se cuestiona la información con la que operan estas plataformas. Al diseñar dispositivos de sombra se decide a partir de archivos climáticos de

fácil acceso y muy populares en el medio profesional, pero ninguno de los muchos archivos EPW disponibles para la ciudad de Medellín es “oficial” ni ha sido debidamente validado desde el punto de vista de la Radiación Global. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales es la agencia climática oficial de Colombia, institución que publica boletines mensuales y reportes anuales que incluyen datos históricos de radiación global, heliofanía y radiación máxima (IDEAM, 2020). De esta fuente se pueden obtener como máximo valores con resolución mensual que no son suficientes para realizar simulaciones energéticas o de sombreamiento y por este motivo los proyectos arquitectónicos en Colombia se sustentan en análisis solares y energéticos realizados siempre a partir de archivos EPW porque es la mejor información disponible.

En temas climáticos y ambientales Medellín es un caso especial en el contexto colombiano porque una localización geográficamente adversa es el origen de una enorme fragilidad ambiental que explica la razón por la cual Medellín es la ciudad colombiana que cuenta con la más robusta red de vigilancia ambiental del país. El “Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá” (SIATA, 2025) es una de las más completas plataformas de análisis y seguimiento ambiental de Suramérica y publica en tiempo real datos para cada minuto de muchísimos parámetros ambientales, Radiación Global incluida. Si en algún lugar de Colombia se puede contrastar la representatividad de los datos de Radiación Global de los archivos EPW es en Medellín.

Objetivo

Fundamentar un sistema de valoración de la demanda de sombra en la ciudad de Medellín con una resolución superior a un dato por hora y que permita explorar la posibilidad de usar esta información como punto de partida para calcular métricas solares y valorar el desempeño de dispositivos para el control solar a partir de la historia climática registrada en superficie.

Metodología

Para integrar las diferentes bases de datos presentes para el Valle de Aburrá se comenzó descargando la información correspondiente a la radiación solar disponible en la plataforma SIATA. Medellín es una ciudad conurbada que engloba en su territorio varios municipios aledaños, todos ellos ubicados en el fondo de un profundo valle interandino. La red cuenta con cinco estaciones meteorológicas, en todas ellas se mide Radiación Global (Figura 1).

Figura 1: Localización de las estaciones SIATA: 6001 Torre SIATA, Laureles. 6002 Consejo de Itagüí. 6003 IE Joaquín Vallejo. 6004 AMVA Centro de Medellín. 6005 Parque de las Aguas.



Fuente: Salazar (2025, p.5)

Los datos de Radiación Global disponibles están comprendidos entre el año 2017 (cuando se comenzaron a registrar datos de radiación en el sistema) hasta la fecha. Los registros se publican mensualmente, pero en este estudio preliminar se decidió trabajar únicamente con años completos. Para el primer año la plataforma contaba con piranómetros únicamente en las estaciones 6001, 6002 y 6003. Para el año siguiente, 2018, se comenzó a registrar la radiación solar en cinco puntos de la ciudad, pero las estaciones 6002, 6004 y 6005 ofrecen para este año información incompleta. A partir de 2019 el proceso de medición se regularizó. Durante el procesamiento y depuración de los datos se pudieron identificar varios errores, mayoritariamente registros repetidos que se manifiestan en la base de datos como años “más largos”. El criterio de depuración consistió en identificar los días repetidos y suprimirlos para que todos los conjuntos de datos tuvieran 365 días, incluyendo el año bisiesto, lo que permitió simplificar los algoritmos de procesamiento de la información. El árbol de datos resultante contiene los registros para cada minuto desde 2017 hasta 2022 entre el 1 de enero a las 00:00:00 horas y el 31 de diciembre a las 23:59:00 horas. Una vez concluida la descarga de todo el set de datos de radiación solar esta se

organizó por carpetas según la estación meteorológica y el año. Cada set anual contiene 525.600 filas, datos de 365 días cada minuto en formato CSV. El proceso de revisión y visualización se inició en Microsoft Excel®, pero el tamaño del conjunto de datos excede las capacidades del programa y fue preciso elegir otra plataforma de trabajo. Inicialmente se estuvo considerando emplear la plataforma estadística R, pero antes de ello se hizo una exploración que resultó exitosa y que constituye uno de los más importantes hallazgos de esta investigación.

El horizonte del proyecto es hacer cálculos de insolación y sombra a partir de modelos tridimensionales. La plataforma R no fue diseñada para ello y prontamente habría que mudar de nuevo los datos. Como los cálculos de sombra y rendimiento solar se planean hacer en la plataforma de Rhino 3D aprovechando el entorno de programación visual Grasshopper, sería ideal que toda la información estuviera desde el principio en este entorno. Por este motivo se quiso explorar si Grasshopper es suficientemente potente para procesar con eficiencia los grupos de datos provenientes de los registros históricos de radiación. La exploración fue exitosa y se pudo concluir que las herramientas de procesamiento de listas de Grasshopper son suficientemente robustas para realizar con asombrosa velocidad todas las tareas relacionadas con el procesamiento de la información climática. Por esta razón todo el trabajo de procesamiento de datos fue hecho en Rhino 3D, a pesar de que en su pantalla de visualización nunca se visualizó nada.

No es habitual usar Grasshopper para realizar este tipo de tareas y no se pudo encontrar en los foros de ayuda ejemplo alguno acerca de cómo procesar grandes conjuntos de datos ni cómo realizar procesamientos estadísticos en esta plataforma. No obstante, el ambiente de programación gráfica posee una curva de aprendizaje favorable y recomendamos a otros investigadores hacer el ensayo. En nuestro caso una sola definición fue suficiente para cargar recursivamente cada archivo CSV, ordenarlo y estructurarlo en forma de árbol de datos para clasificar y filtrar los registros de radiación. Al final los resultados se exportaron a archivos auxiliares en formato XLS, pero Excel® únicamente se utilizó para elaborar las imágenes. Las estaciones meteorológicas de SIATA codifican con alertas -9999.0 y -8888.0 los registros faltantes, son valores muy efectivos para llamar la atención y de fácil identificación cuando se están manipulando grandes conjuntos de datos, pero los procesos de visualización gráfica se dificultan cuando el conjunto de datos incluye valores negativos tan grandes. Como era muy laborioso

visualizar cualquier resultado provisional se reemplazaron estas alertas por un valor negativo más cercano a cero. Este proceso de "parchado" permitió que las herramientas de visualización de Grasshopper resultan funcionales para vigilar el proceso porque las alertas se visualizaban como "moderados" valores negativos en diagramas completamente legibles.

La última parte del procesamiento consistió en un paso simple, pero decisivo: ordenar ascendentemente cada serie. Procesar casi 11 millones de registros de Radiación Global y realizar comparaciones entre diferentes localidades o años es muy laborioso si se intenta usar toda la información disponible. Por ejemplo, se pueden superponer las curvas de radiación para un mismo día de referencia, pero el Valle de Aburrá es muy grande y en un mismo instante pudo estar lloviendo en una parte de la ciudad mientras que en otro sector brillaba el sol. Las tendencias y diferencias relativas que se desean analizar permanecen enmascaradas en miles de líneas zigzagueantes. Valores medios, percentiles y métricas estadísticas similares permiten resumir la información disponible, pero obligan a descartar datos. Hay métricas estadísticas muy utilizadas para este tipo de comparaciones, pero regularmente transforman un enorme conjunto de datos en unas cuantas cifras. Similar a los archivos climáticos estándar: la historia climática se hace manejable gracias a que se seleccionan meses "medios" y las condiciones infrecuentes se descartan. Diseñar dispositivos de control solar para condiciones infrecuentes repercute sensiblemente en el costo final de las fachadas, el problema es que una aproximación por datos medios es muy inapropiada porque dará como resultado una protección solar insuficiente, posiblemente durante la mitad del tiempo.

¿Cómo diseñar para una condición no máxima, severa y suficientemente frecuente? El horizonte de esta investigación es abordar las Métricas de Base Climática y usar los registros históricos para calcular la frecuencia con que un dispositivo de sombra estaría expuesto al sol. Si la potencia computacional así lo permitiera sería ideal no resumir los datos. Ordenar ascendentemente las listas completas para luego superponerlas resultó siendo mucho más simple y efectivo y por esta razón los registros se exportaron dos veces: en el orden cronológico para realizar las futuras simulaciones de ganancia solar, los cálculos de sombra arrojada y el cómputo de las métricas solares de base climática. En un canal paralelo los datos se exportan ordenados ascendentemente, material utilizado para producir las imágenes que aquí se presentan.

Se hicieron comparaciones entre 5 archivos EPW (HUDSON, 2019), (CRAWLEY, 2019) y (METEONORM, 2020). Se requirió un submuestreo de la información histórica para construir series horarias de 8760 datos para hacer las comparaciones y adicionalmente se construyó y calibró una función teórica de referencia mediante un modelo ampliamente aceptado (STULL, 2017) usando los registros del año 2019, el año con mayor ocurrencia de cielo despejado.

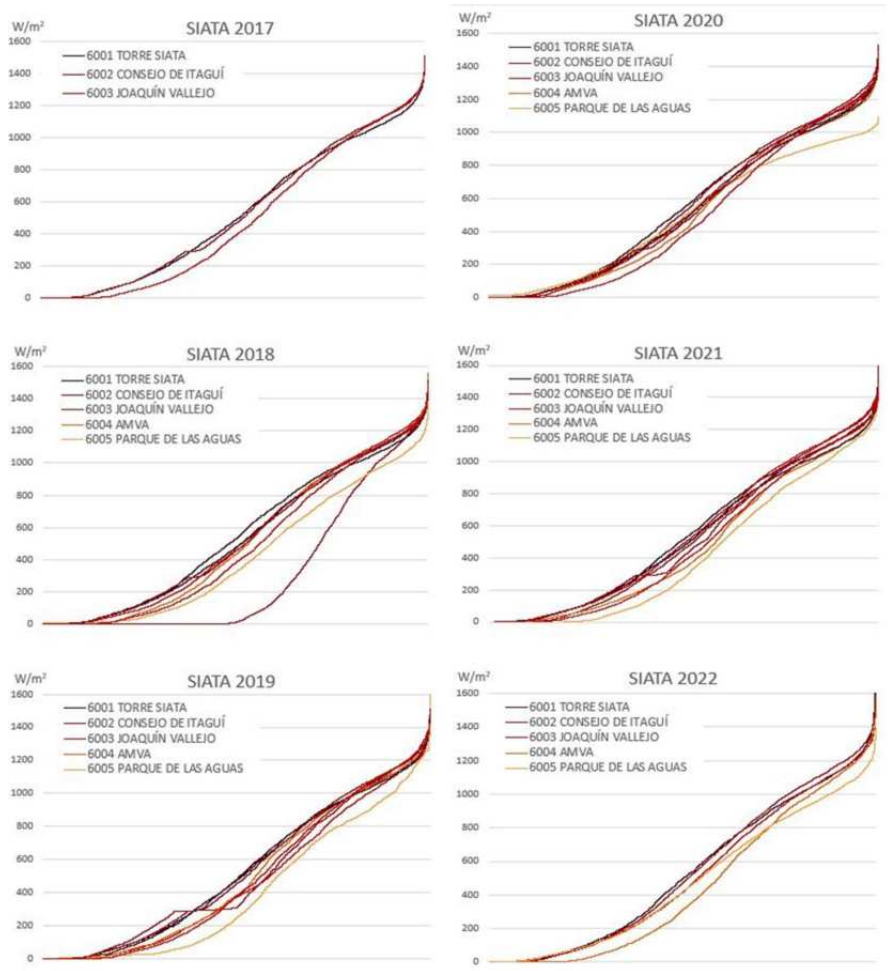
La depuración de series climáticas suele ser la etapa más dispendiosa de este tipo de trabajos y nada de eso se hizo aquí. Procesar todos los datos sin hacer reemplazos ni separar las alertas de medición está lejos de lo habitual, pero resultó siendo una técnica simple que permitió simplificar notablemente el procesamiento de los datos. Es de advertir que en lugares con una significativa variabilidad estacional anual esta práctica se desaconseja o por lo menos, se sugiere realizar un análisis previo y verificar su conveniencia.

Resultados y discusión

El primer resultado son las comparaciones de la Radiación Global que incidió en diferentes zonas del Valle de Aburrá. Durante este periodo se presentó un año notablemente seco y soleado con un verano históricamente singular para las condiciones típicas de la ciudad, el año 2019. Complementariamente en el año 2021 fue un año con una condición invernal muy severa e históricamente singular. En los últimos cuatro años la ciudad ha roto varios récords históricos de temperatura, precipitación, radiación y calidad del aire. Las series del año 2017 y que ya habían sido identificadas como defectuosas por la abundancia de registros faltantes se pueden distinguir con facilidad, mientras que las escasas alertas en las series de años posteriores se acumulan a la izquierda, pasan desapercibidos porque proporcionalmente corresponden a una fracción muy pequeña de los datos. No alteran la gráfica ni afectan las comparaciones (Figura 2).

La serie teórica de referencia también se ordenó ascendentemente. Se hacen notorias las diferencias relativas entre años en los que el fenómeno del niño se presentó con una mayor o menor severidad y se ratifica lo anunciado: en los archivos climáticos estándar disponible para Medellín las condiciones de radiación se subestiman notoriamente. El distanciamiento entre las líneas cálidas y la línea punteada es el efecto de la nubosidad y la turbidez atmosférica, distancia que aumenta mientras más nublado y lluvioso hayan sido los días (Figura 3).

Figura 2: Radiación Global ordenado ascendentemente para todos los años y todas las estaciones de las que actualmente se dispone registros en la plataforma de SIATA.

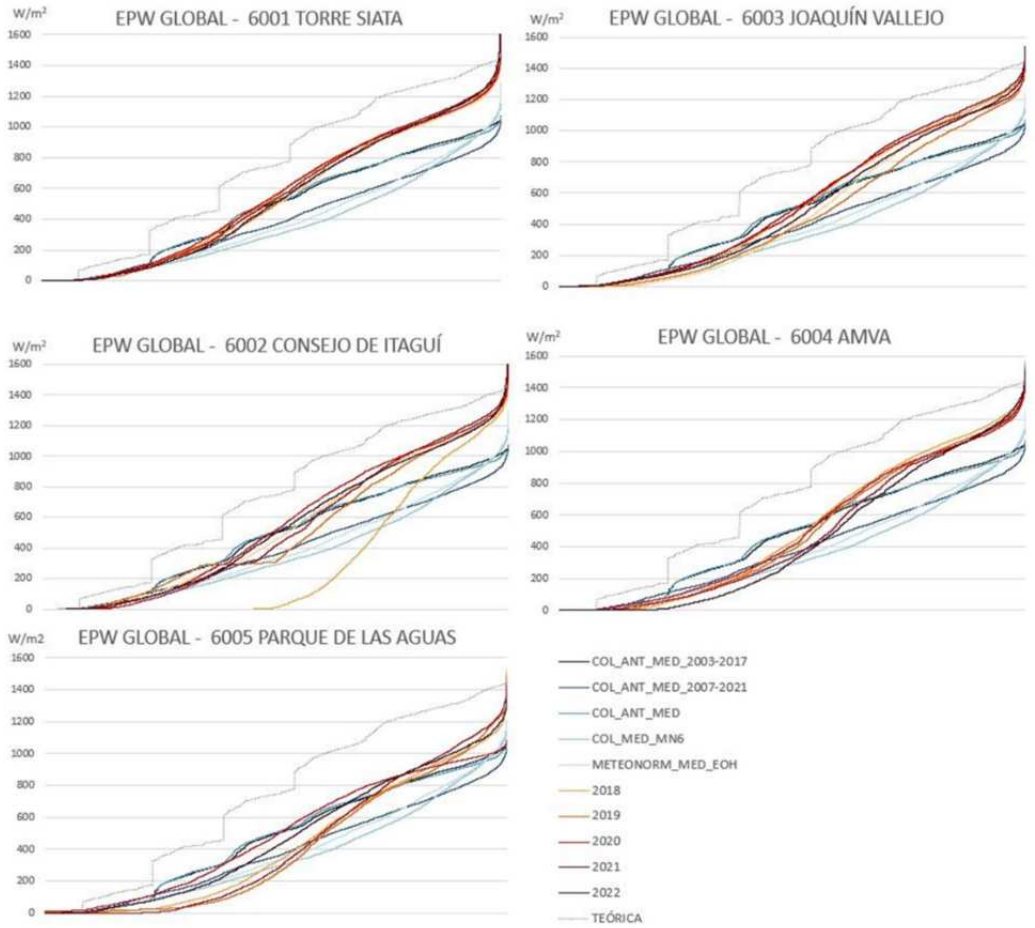


Fuente: Salazar (2025, p.9)

El árbol de datos con los registros de Radiación Global para todos los años y en todas las estaciones meteorológicas del Valle de Aburrá está siendo utilizada en los cálculos de insolación cruzando cálculos de áreas visibles al sol con las diferentes series de radiación, año por año. Un modelo numérico que permita descomponer los registros de Radiación Global en sus componentes directo y difuso es la etapa en curso de este proyecto de investigación. El tercer resultado es la comparación entre la función teórica y los registros históricos del año/estación

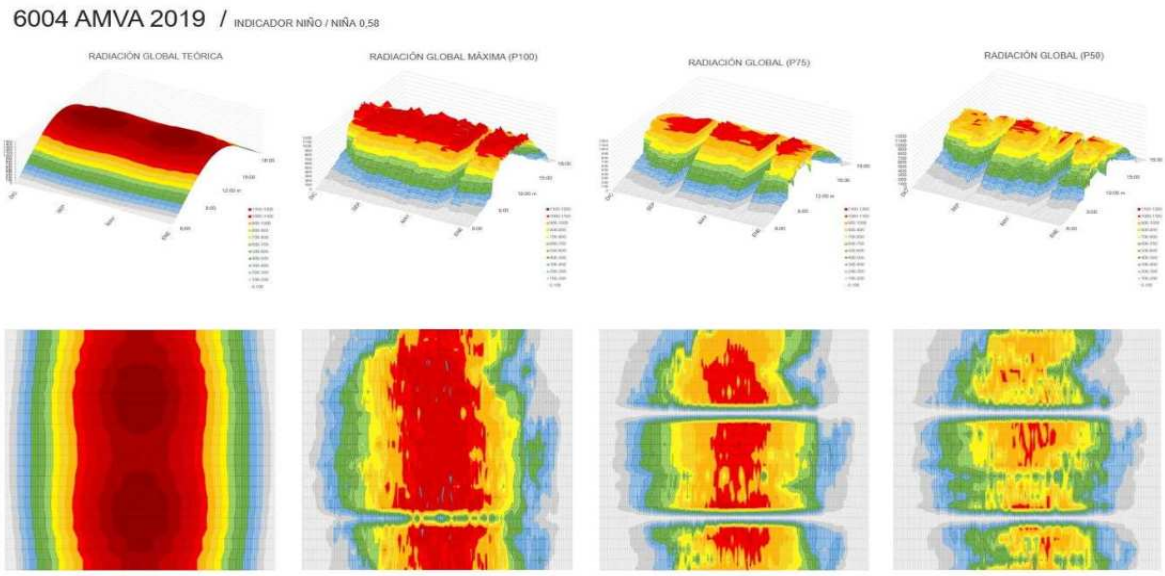
más soleados para comenzar a explorar la frecuencia con que se presentan condiciones de cielo despejado. Calcular la distribución del distanciamiento entre los límites teóricos de radiación y los valores máximos registrados permitió explorar la distribución temporal de la nubosidad con datos de superficie. Los picos de radiación ya habían sido empleados para definir los tres coeficientes de nubosidad que el proceso de calibración del modelo teórico de Stull reclamaba hacer, pero adicionalmente se hizo un procesamiento por percentiles que permite conocer los umbrales de radiación y las frecuencias con que se presentan (Figura 4).

Figura 3: Radiación Global (submuestreo de un dato/hora) ordenado ascendentemente para todos los años y todas las estaciones y Radiación Global de 5 archivos EPW disponibles para Medellín.



Fuente: Salazar (2025, p.10)

Figura 4: Distribución temporal de los registros de radiación del año 2019 y valores de la función teórica de referencia calibrada para la ciudad de Medellín.



Fuente: Salazar (2025, p.11)

Los resultados permiten observar parte del inventario de datos de radiación global medidos en superficie y disponibles a la fecha. Se observa con claridad las ondulaciones características de un clima bimodal, pero también las asimetrías en los valores de radiación y otro tipo de anomalías, además de la nubosidad, que no se pueden reproducir mediante una función teórica. Se pudo ratificar, por ejemplo, el hecho de que en el Valle de Aburrá casi siempre las mañanas son más nubladas que las tardes y este simple hecho es suficiente para argumentar porqué las fachadas orientales de edificios ubicados en Medellín obtendrían de su sistema de protección solar un menor beneficio que edificios semejantes con las fachadas orientadas al occidente. Este son el tipo de refinamientos que estos registros de radiación local permiten hacer.

Finalmente, al observar las comparaciones de los archivos EPW con los valores de Radiación Global medidos en superficie resulta evidente la enorme diferencia entre las curvas y se alcanza a notar que hay dos “estilos” de elaboración de los archivos que dan como resultado patrones de

distribución muy diferentes. También se observa que los valores pico están muy por debajo de la realidad. Optar por una línea media o un registro único para cada fecha y hora simplificaría la diversidad climática que nos caracteriza. Optar por una sola descripción de la radiación de un sitio implica desfases que se hacen evidentes cuando se hacen las comparaciones entre las bases de datos. En este momento se está explorando la viabilidad computacional de usar todo este compilado de información e implementar un método para calcular el desempeño solar usando toda la historia meteorológica recopilada hasta la fecha.

Conclusión

El punto de partida para diseñar dispositivos de control solar fueron primero la geometría descriptiva y luego los modelos teóricos de radiación. A partir de allí se diseñaron fachadas y dispositivos de control solar asumiendo siempre la total ausencia de nubosidad. Fue una aproximación precavida y ciertamente muy efectiva porque la sombra proyectada realmente hacía falta. Pero las soluciones solares diseñadas por esta ruta inducían sobre-inversiones porque los cielos totalmente despejados ciertamente ocurren, pero no todo el tiempo. Hoy ya es viable usar los registros de Radiación Global para considerar la constante variabilidad de la transparencia atmosférica y aminorar la inconveniencia que implica trabajar con los modelos teóricos. La superposición de la función teórica de Radiación Global con los registros históricos medidos en varios lugares y años demuestran la viabilidad de comenzar a explorar esta nueva ruta.

Un intervalo de 6 años es corto para poner en discusión los valores de Radiación Global de los archivos EPW disponibles para Medellín, pero en estos años se presentaron episodios del fenómeno niño/niña muy severos y sería razonable que los datos incluidos en los archivos EPW se ubicaran en medio de ellos. Los resultados demuestran que no es así y ratifican la impresión generalizada de que los EPW subestiman el recurso solar de Medellín. Será necesario complementar este trabajo en años venideros para incluir los registros históricos a medida que se disponga de ellos para fundamentar una base de trabajo mucho más sólida que los archivos climáticos con los que actualmente se realizan simulaciones energéticas y ambientales. La base de datos de Radiación Global para la ciudad de Medellín tiene el formato y estructura adecuada para comenzar a realizar los primeros análisis de desempeño solar con base climática. Este mismo conjunto de datos hizo posible la calibración de un modelo teórico que opera como función de Referencia para la ciudad de Medellín y que en la siguiente etapa del proyecto estará permitiendo

explotar los beneficios de hacer cálculos de sombra a partir de datos reales en vez de trabajar con años hipotéticos, máximos históricos o archivos meteorológicos estándar.

Referencias

CARRIZOSA UMAÑA, J. **Colombia Compleja**. Bogotá: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2014.

CRAWLEY, D. **Climate.OneBuilding.Org**. 2019. Disponible en: http://climate.onebuilding.org. Acceso en: 17 ene. 2025.

GUZMÁN ECHAVARRÍA, G.; HOYOS ORTIZ, C. D. Implications of Urban Form and Topography in Thermal Conditions at Local and Micro Scale in a Tropical Urban Area Located in a Valley - NASA/ADS. **American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts.** p. GC41G-1541, 2018. Acceso en: 17 ene. 2025.

GUZMÁN ECHAVARRÍA, G. **Análisis de la influencia del diseño urbano en la meteorología del Valle de Aburrá**. 2018. Tesis (Maestría) - Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2018.

GARCÍA-CARDONA, A. et al. From comfort to life habits. Qualitative approaches to comfort research on domestic space in the Colombian Andean tropics. **Removing Barriers in Environmental Comfort in The Global South**. Springer, 2023.

HUDSON, R. et al. **Clima-Colombia**. 2019. http://clima-colombia.org/. Acceso en: 17 ene. 2025.

IDEAM. **Base de Datos Hidrometeorológicos**. 2020. Disponible en: http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/. Acceso en: 17 ene. 2025.

METEONORM. 2020. Disponible en: https://meteonorm.com/. Acceso en: 17 ene. 2025.

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.

SIATA. **Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá.** siata.gov.co. Acceso en: 17 ene. 2025.

STULL, R. Practical Meteorology: **An Algebra-based Survey of Atmospheric Science**. Version 1.02b. Vancouver: University of British Columbia, 2017.