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

Estimación de CO_2 atmosférico equivalente por la modificación del albedo en ciudades Latinoamericanas

Estimativa do equivalente de CO_2 atmosférico por modificação do albedo em cidades latino-americanas

Estimation of atmospheric CO_2 equivalency by albedo modification in Latin American cities

Clima y Planeamento Urbano / *Clima y Planificação Urbana / Climate and Urban Planning*

Alchapar, Noelia
Dra. Instituto de Ambiente Hábitat y Energía, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina, nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar

Cotrim Pezzuto, Claudia

Dra. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Campinas, Brasil, claudiapezzuto@puc-campinas.edu.br

Jaime, Dario

Lic. Instituto de Ambiente Hábitat y Energía, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina, djaime@mendoza-conicet.gob.ar

Yubero, Fátima

Dra. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, fyubero@qui.una.py

Toledo Moreira Mota, Lia

Dra. de Facultad de Ingeniería Eléctrica y Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Campinas, Brasil, lia.mota@puc-campinas.edu.br

Martin, Ezekiel
Dr. Universidad de Nevada, Reno, E.E.U.U, emartin@macoma.us

Akbari, Hashem
Dr. Prof. en Departamento de Ingeniería de Edificación, Civil y Ambiental, Universidad Concordia, Quebec, Canadá, hakbari@encs.concordia.ca

Resumen

El objetivo de la investigación es cuantificar el potencial de CO_2 atmosférico equivalente asociado a la modificación del albedo de las superficies urbanas (techos y suelos) de ciudades latinoamericanas, basándose en la metodología propuesta por Akbari en 2023. El estudio se centró en el análisis de cuatro ciudades latinoamericanas: Mendoza y Posadas, en Argentina; Campinas, en Brasil; y Asunción, en Paraguay. Se espera generar un marco de referencia para evaluar los beneficios ambientales de las tecnologías con nano-revestimientos para techos fríos y compensar las emisiones de dióxido de carbono generadas en las ciudades. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo en Python que sistematiza las ecuaciones de la metodología de Akbari. Los resultados muestran que, al incrementar en un 1 % el albedo de las superficies de las ciudades estudiadas, la compensación de CO_2 oscila entre 2.7 y 3.6 kg por m^2, siendo mayor en regiones con mayor insolación y menor porcentaje de nubosidad.

Palabras clave: Reflectancia Solar. Superficies urbanas. Sistematización en Python. Beneficios ambientales. Calentamiento global.

Resumo

O objetivo da pesquisa é quantificar o potencial de CO_2 atmosférico equivalente associado à modificação do albedo das superfícies urbanas (telhados e pisos) de cidades latino-americanas, com base na metodologia proposta por Akbari em 2023. O estudo teve como foco a análise de quatro cidades latino-americanas: Mendoza e Posadas, na Argentina; Campinas, no Brasil; e Assunção, no Paraguai. Espera-se que gere um quadro de referência para avaliar os benefícios ambientais das tecnologias de nanorrevestimento para telhados frios e compensar as emissões de dióxido de carbono geradas nas cidades. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo em Python que sistematiza as equações da metodologia de Akbari. Os resultados mostram que, ao aumentar em 1% o albedo das superfícies das cidades estudadas, a compensação de CO_2 varía entre 2.7 e 3.6 kg por m^2, sendo maior em regiões com maior insolação e menor percentual de nebulosidade.

Palavras-chave: Refletância solar. Superfícies urbanas. Sistematização em Python. Benefícios ambientais. Aquecimento global.

Abstract

The objective of the research is to quantify the atmospheric CO_2 equivalent potential associated with the modification of the albedo of urban surfaces (roofs and floors) in Latin American cities, based on the methodology proposed by Akbari in 2023. The study was focused on the analysis of four Latin American cities: Mendoza and Posadas in Argentina, Campinas in Brazil and Asunción in Paraguay. The aim is to provide a framework for assessing the environmental benefits of nano-coating technologies for cool roofs and offsetting carbon dioxide emissions generated in cities. To this end, an algorithm has been developed in Python that systematizes the equations of the Akbari methodology. The results show that by increasing the albedo of the surfaces of the cities studied by 1%, the CO_2 offset ranges between 2.7 and 3.6 kg per m^2, being higher in regions with higher insolation and lower cloud cover.

Keywords: Solar Reflectance. Urban surfaces. Python systematization. Environmental Benefits. Global warming.

Introducción

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) confirmó que 2024 fue el año más cálido registrado sobre la base de seis registros de datos internacionales. La temperatura media mundial de la superficie superó el umbral de 1.5 °C del Acuerdo de París en relación con la media preindustrial de 1850-1900. Estos datos resaltan la urgencia de tomar medidas para mitigar el cambio climático y sus impactos (WMO, 2025). Estudios recientes han demostrado la compleja relación entre el cambio climático global, la tierra y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La tierra, además de ser un importante sumidero de carbono, puede actuar como fuente de emisiones de GEI (Bhatti *et al.*, 2024).

El aumento de las emisiones de GEI, como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH4) y el óxido nitroso (N2O), ha provocado un desequilibrio en el balance energético de la Tierra (Bhatti *et al.*, 2024). Esta alteración ha provocado cambios generalizados en los patrones climáticos, un aumento de las temperaturas globales y consecuencias ambientales sin precedentes (Hansen *et al.*, 2011; Von-Schuckmann *et al.*, 2023). Aunque la variabilidad climática natural desempeña un papel importante en el calentamiento urbano, los estudios indican que las actividades antrópicas, son las principales responsables de calentar el planeta (OMM, 2019). Según Gregory et al., (2004), el Forzamiento Radiativo (RF) se define como el desequilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja emitida por la Tierra. Un forzamiento radiativo positivo tiende a calentar el planeta, mientras que uno negativo lo enfría (Yamasoe *et al.*, 2014).

En 2023, el Índice Anual de GEI fue de 1.51, lo que representa un aumento del 51 % en la fuerza radiativa (calentamiento neto) desde 1990. El mayor contribuyente al calentamiento fue el CO_2, seguido del gas metano (EPA, 2025). La emisión de CO_2 es causada por diversas actividades humana, entre las de mayor relevancia, la quema de combustibles fósiles en sectores como la industria, el transporte y la generación de energía. En Brasil, en 2023, se emitió 2.2 ton. de CO_2 por persona, mientras que en Argentina 4.3 ton. (GCP, 2023).

Implicaciones del albedo en el balance energético terrestre

El albedo es un concepto fundamental en climatología y desempeña un papel crucial en el equilibrio energético de la Tierra. Los nano-revestimientos con tecnología de materiales fríos presentan elevada reflectancia solar (albedo) y alta emisividad térmica. Esta combinación optimiza la reflexión de la radiación solar incidente y la disipación eficiente del calor absorbido por emisión infrarroja, resultando en temperaturas superficiales significativamente menores que los materiales convencionales bajo exposición solar (Akbari, 2009 *et al.*, y Menon, *et al.*,

2010). Estudios llevados adelante por Akbari, Menon e Rosenfeld (2009) informaron que el uso de techos y pavimentos con tecnología fría en áreas urbanas puede aumentar en promedio el albedo de las zonas urbanas en un 10%. Los resultados muestran que el aumento del albedo de las superficies urbanas puede inducir a un forzamiento radiativo (RF) negativo de 4.4×10^{-2} Wm^{-2} equivalente a compensar 44 Gt. de CO_2 emitido.

La hipótesis de este estudio se centra en la correlación entre la reducción de la concentración atmosférica de CO_2 y el aumento del albedo terrestre, los cuales provocan un forzamiento radiativo (RF) negativo que resulta en una desaceleración del ritmo del calentamiento global.

Akbari e Matthews, (2012), Akbari, Menon e Rosenfeld, (2009), Levinson, Akbari e Reilly, (2007) han llevado adelante diversas investigaciones para calcular la equivalencia global entre el aumento de la reflectancia solar de las superficies urbanas y la reducción de emisiones de CO_2, equiparando el RF de las emisiones incrementales de CO_2 y el aumento del albedo de la superficie. Sus investigaciones han puesto de manifiesto que la reducción de las emisiones de CO_2 en aproximadamente 2.5 kg tiene un impacto comparable en la mitigación del calentamiento global al aumento del 1% en el nivel de albedo de una superficie de $1m^2$. Además, se ha observado que el incremento del 1% en el nivel de albedo de $1m^2$ de superficie genera un efecto equivalente en la temperatura atmosférica a largo plazo al de la reducción de las emisiones de CO_2 en 7kg. Estos hallazgos evidencian la validez de la estrategia de implementar de manera extendida superficies urbanas con alta reflectividad solar, también denominadas “materiales fríos”.

Objetivo

El objetivo de la investigación es cuantificar el potencial de CO_2 atmosférico equivalente asociado a la modificación del albedo de las superficies urbanas (techos y pisos) de ciudades sudamericanas basado en la metodología propuesta por Akbari (2023). Se espera generar un marco de referencia para evaluar los beneficios ambientales de las tecnologías con nano-revestimientos para techos fríos y compensar las emisiones de dióxido de carbono generadas en las ciudades.

Metodología

El estudio se basa en la metodología desarrollada por Akbari (2023) para calcular el CO_2 equivalente debido al incremento de albedo de las superficies urbanas. Los autores han sistematizado esta metodología a través del diseño de un modelo en lenguaje abierto en Python. Para ello, se realizó un análisis detallado de los datos regionales de Irradiancia

Horizontal Global (GHI), tanto en la parte superior de la atmósfera (TOA) como en la superficie terrestre, considerando la transmitancia solar atmosférica (f) en cada localización.

Área de estudio

La presente investigación se desarrolló en cuatro ciudades latinoamericanas que forman parte de un Proyecto de investigación regional sobre transición energética: ciudad de Mendoza y Misiones en Argentina; la ciudad de Asunción en Paraguay; y la ciudad de Campinas en Brasil (Tabla 1 y 2). Para el estudio se emplearon los archivos climáticos descargados desde el sitio repositorio de datos climáticos de simulación de edificios (https://climate.onebuilding.org/), período 2007-2021 (Lawrie; Drury, 2022).

Tabla 1: Información geográfica de las áreas de estudio.

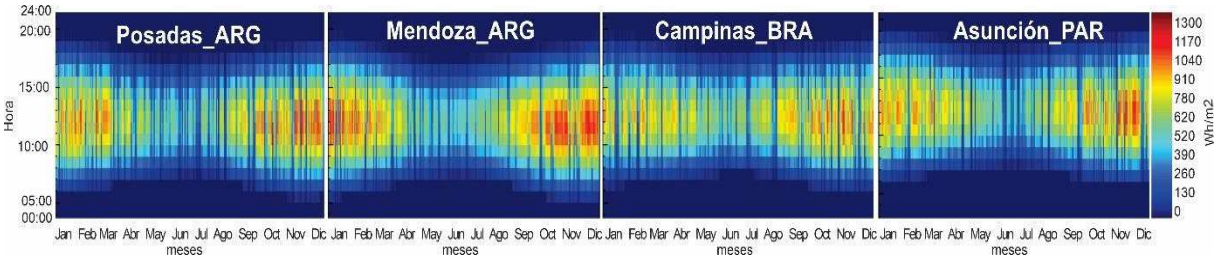
Localización	Posadas ARG	Mendoza ARG	Campinas BRA	Asunción PAR
WMO	871780	874180	837210	862180
Latitud (°)	-27.73	-32.84	-23.01	-25.24
Longitud (°)	-54.47	-68.8	-47.13	57.65
Elevación (m)	270	704	661	43

Tabla 2: Características climáticas de las ciudades. TA (temperatura de aire), RH (humedad relativa).

	Posadas - ARG		Mendoza - ARG		Campinas - BRA		Asunción - PAR	
	TA; °C	RH; %	TA; °C	RH; %	TA; °C	RH; %	TA; °C	RH; %
Mean	22.4	71.7	16.8	52.2	21.5	70.2	23.5	71.7
Min	4.0	19.0	-5.0	11.0	4.3	14.0	4.0	18.0
Max	38.0		39.0		36.0		39.0	
Avg Daily Min	17.6	50.9	10.6	34.0	17.0	44.3	18.5	50.3
Avg Daily Max	27.9	89.4	23.3	72.4	27.4	90.6	29.2	91.4

Fuente: Elaborado por los autores

Figura 1: Distribución de Irradiancia Global Horizontal (Wh/m²) en las ciudades de estudio



Fuente: Elaborado por los autores

La Figura 1 muestra la distribución de la GHI en las cuatro ciudades analizadas. El promedio anual de las ciudades argentinas es de 205.63 W/m² en Posadas y de 230.63 W/m² en Mendoza. En Campinas, Brasil es de 210.27 W/m² y en Asunción, Paraguay de 209.98 W/m².

Estimación el CO_2 equivalente

La metodología de referencia Akbari (2023), establece los siguientes pasos para estimar el CO_2 equivalente o compasado, debido a la modificación del albedo para una ubicación determinada: *(i)* Cálculo de la irradiancia solar extraterrestre (ITOA); *(ii)* Estimación de la transmitancia solar atmosférica (f); *(iii)* Desarrollo de una equivalencia regional entre el cambio del albedo de la superficie y la reducción de las emisiones de CO_2.

Cálculo de la irradiancia solar extraterrestre (ITOA)

La ITOA e la cantidad de radiación solar, en W/m^2, que incide sobre la parte superior de la atmósfera terrestre. Se considera que es relativamente constante, aunque varía ligeramente debido a la distancia cambiante entre la Tierra y el Sol a lo largo del año. Para estimar la ITOA media se emplea la ecuación definida por Duffie e Beckman, 2013. Ecuación 1:

$$ITOA_{,i} = G_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360n}{365}\right)(\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta) \qquad (1)$$

Donde, *ITOA:* Irradiancia Solar Total en una superficie inclinada; *i:* Irradiancia para un periodo de tiempo específico -hora-; G_{sc}*:* Constante Solar de la Irradiancia solar extraterrestre en incidencia normal (valor estándar 1367 W/m²); *n:* día del año; *φ:* latitud del lugar; *δ:* declinación solar; *ω:* ángulo horario.

Transmitancia Solar Atmosférica (f)

En función de la ITOA y de la irradiancia solar media en la ciudad de estudio se calcula la transmitancia atmosférica (*f*). El estudio de la atenuación atmosférica es fundamental para entender cómo interactúa la radiación solar con la atmósfera y la superficie terrestre. El método de referencia asume que la atenuación atmosférica entrante y reflejada y la dispersión atmosférica son las mismas. Ecuación 2:

$$f_{aveg} = I_{aveg}/I_{TOA} \quad (2)$$

Donde, I aveg: Irradiancia solar media en la ciudad de estudio; ITOA: Irradiancia solar extraterrestre.

La transmitancia solar atmosférica (f) es alrededor de 0.5 alrededor del Ecuador y aumenta a un rango promedio de 0.65 y 0.75 alrededor de la latitud ±30°. La atenuación atmosférica es determinante para evaluar el impacto de cambios en la composición atmosférica, como el aumento de los gases de efecto invernadero, y para estimar el potencial de estrategias de mitigación del cambio climático, como la modificación del albedo de las superficies. La atenuación atmosférica es mayor en los polos. Esto se debe a la curvatura de la Tierra y al ángulo de incidencia de la radiación solar debe atravesar una mayor cantidad de atmósfera para llegar a la superficie en comparación con el ecuador.

CO_2 atmosférico equivalente debido a aumento del albedo superficial

En esta sección se compara el forzamiento radiativo (RF) causado por la modificación del albedo con el RF de las emisiones de CO_2, con el fin de obtener una equivalencia regional entre el cambio del albedo de las superficies ($dA_{Surface}$) y la reducción de las emisiones de CO_2 ($dC_{emitted}$). Cabe señalar que la metodología de referencia establece una serie de simplificaciones: se considera un balance de energía neto de forzamiento radiativo en la parte superior de la atmósfera (RF=0) y se asume que el cambio en la concentración atmosférica de CO_2 es una fracción del CO_2 emitido (g=0.5). Ecuación 3:

$$(dC_{emitted} / dA_{surface}) = (-1.21 \times 10\text{-}2) / (g * f_{avg} * I_{avg}) \quad (3)$$

Donde: $dC_{emitted}$: cambio en la concentración atmosférica de CO_2; $dA_{surface}$: cambio en el albedo para un m^2 de superficie; g: factor corrección del CO_2 emitido=0.5; f_{avg}: Transmitancia Solar Atmosférica promedio; I_{avg}: Irradiancia solar promedio en la superficie terrestre.

Resultados

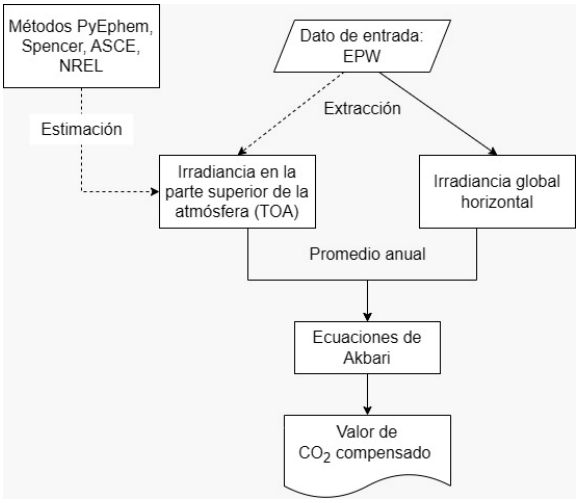
Sistematización en Python

Se desarrolló un algoritmo en lenguaje de programación Python con el objetivo de sistematizar la metodología de cálculo de Akbari (2023). Este script permite procesar de manera automatizada archivos climáticos en formato **epw* de una o múltiples ciudades, facilitando la evaluación simultánea de los recursos solares y la compensación de CO_2 en cada ubicación. La Figura 2 ilustra el diagrama de flujo del proceso de análisis. En primer lugar, se ingresan los archivos climáticos en formato **epw* correspondientes a las ciudades de estudio. Los datos de entrada requeridos son la irradiancia solar extraterrestre (ITOA) y en la irradiancia en superficie terrestre (Iaverg). El algoritmo ofrece también la flexibilidad de extraer la irradiancia ITOA directamente de los archivos climáticos o estimarla mediante modelos reconocidos como NREL (NREL, 2000; Reno, Hansen e Stein, 2012) y Spencer (1971). Estos modelos emplean algoritmos y parámetros específicos para determinar la cantidad de radiación solar que llega a la superficie, considerando las propiedades ópticas de la atmósfera y los efectos de la nubosidad.

Cálculo de la irradiancia solar extraterrestre (ITOA)

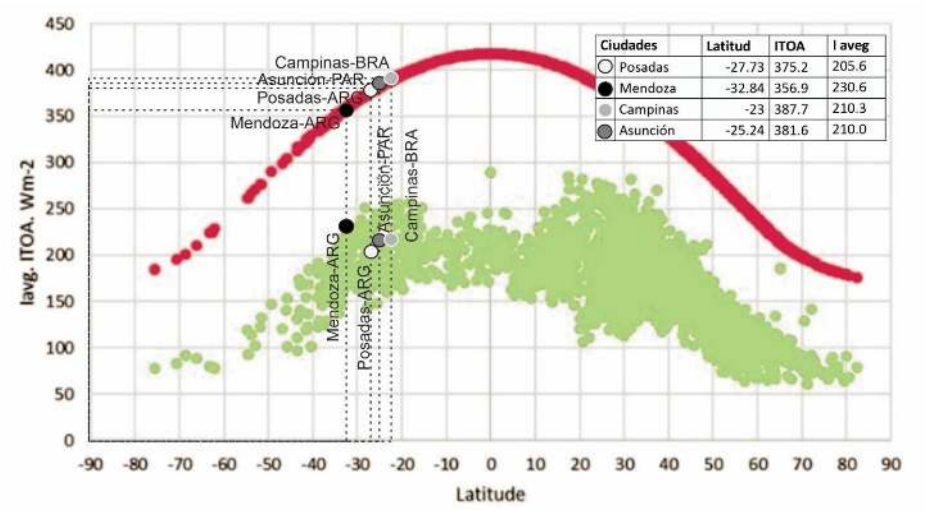
La irradiancia solar en la superficie terrestre media (Iaveg) se extrae de los archivos climáticos *epw de cada ciudad de estudio. En la Figura 3 se describe la curva de distribución de la Irradiancia solar extraterrestre (ITOA) y de superficie terrestre (Iaveg) para todas las latitudes de acuerdo a la ecuación 1. En la curva se señala las irradiancias de las ciudades de estudio. Cabe señalar que la ITOA promedio en la Tierra es de 341.8 Wm^{-2} (Akbari, 2023).

Figura 2: Esquema del algoritmo



Fuente: Elaborado por los autores

Figura 3: Irradiancia horizontal global de la parte superior de la atmósfera (ITOA) y la de la superficie (Iaveg), Wm-2 de las ciudades de estudio.

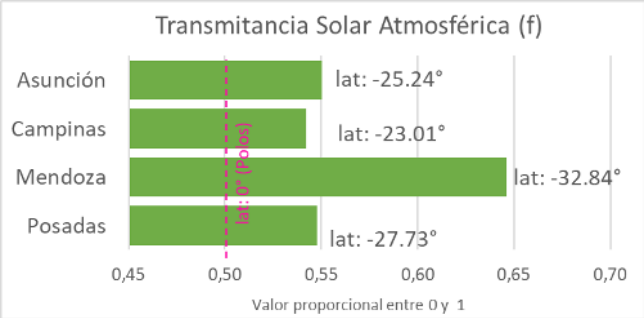


Fuente: En base al gráfico de dispersión elaborado por Akbari, (2023) fueron señaladas las ITOA y I_{averg} en las ciudades de estudio.

Transmitancia Solar Atmosférica (f)

La Figura 4 describe el grado de transmitancia atmosférica según ecuación 2 para las ciudades de estudio. Los resultados evidencian que Mendoza presenta una transmitancia atmosférica mayor al 15% en comparación con otras ciudades analizadas debido a su ubicación geográfica en una latitud elevada. Esta característica, asociada a las condiciones de cielos despejados y alta heliofanía que prevalecen en la región durante la mayor parte del año, contribuye a una mayor disponibilidad de radiación solar incidente en la superficie (Figura 4).

Figura 4: Transmitancia solar atmosférica en las ciudades de estudio.

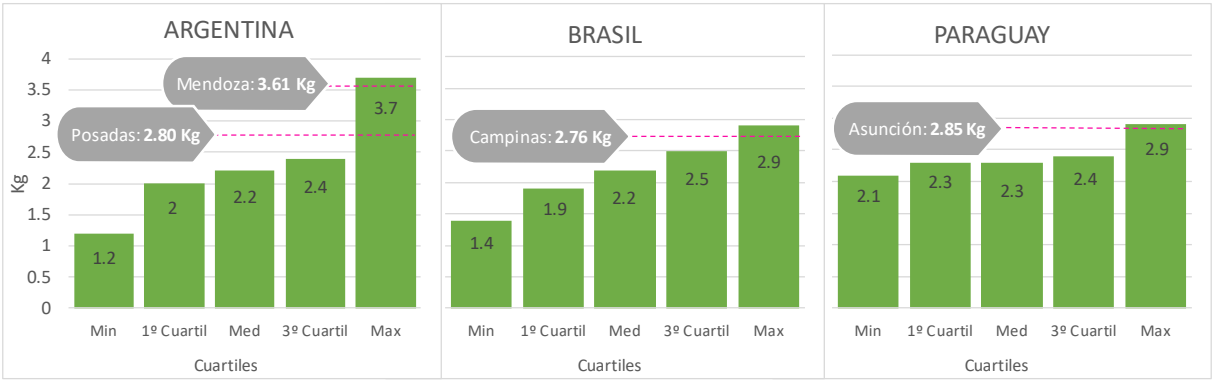


Fuente: Elaborado por los autores.

CO_2 atmosférico equivalente debido a aumento del albedo superficial

Se cuantifica la compensación de CO_2 equivalente asociada a cada incremento del 1% en el nivel de albedo (ecuación 3).

Figura 5: CO_2 equivalente (Kg/m^2) en las ciudades de estudio.

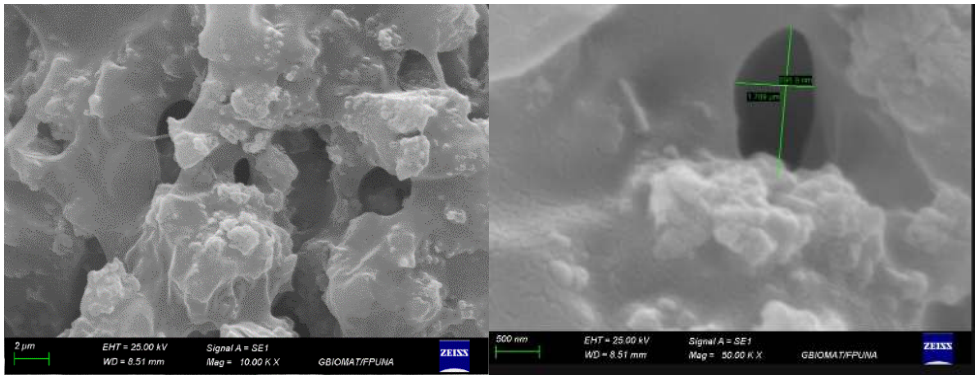


En la Figura 5, se observa que el CO_2 equivalente promedio para Posadas, Campinas y Asunción es de 2.8 kg por m². Sin embargo, en Mendoza se distingue por un valor de compensación mayor, alcanzando los 3.71 kg/m². Esta diferencia se explica por una mayor transmitancia solar atmosférica presente en Mendoza (entre 5º y 9º superior). Cabe mencionar que la compensación de CO_2 es mayor donde la transmitancia atmosférica es alta, áreas caracterizadas por latitudes entre 20° a 30° y -30° a -20° y escasa nubosidad (Akbari, 2023). Investigaciones previas de Akbari, 2009 establecieron que la media mundial de CO_2 equivalente se sitúa en 1.8 kg por cada incremento de albedo de 0.01 en un m² de superficie. En relación con esta referencia, los resultados obtenidos evidencian que las cuatro ciudades analizadas superan la media mundial. En particular, la ciudad de Mendoza se destaca por su considerable potencial de compensación, factor atribuible a su bajo nivel de nubosidad y su elevada intensidad de radiación anual, 10% superior que el resto de las ciudades (Figura 1).

Microestructura de un material de techo con alto albedo

A modo de ejemplo, se presenta un análisis de la superficial de un material de techo comercial con alto albedo, certificado como "material frío". La Figura 6, describe mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) la microestructura capturada con una magnificación de 10 y 50 KX, donde se observan poros de distribución regular con un tamaño promedio de 900 nm. Esta morfología superficial resulta clave para mejorar la reflexión de la radiación solar.

Figura 6: MEB de nano-revestimientos para techo (MACOMA)



Fuente: Elaborado por los autores

En línea con la opinión de la comunidad científica (Garimella et al., 2022; Chavarry Vallejos, 2023) y organismos internacionales (IPCC, 2023, la modificación del albedo debe considerarse como una herramienta complementaria a la reducción de emisiones en origen, y no como su reemplazo. Solo a través de cambios estructurales y una disminución sustancial de las emisiones se alcanzará una mitigación y adaptación efectiva al calentamiento global. Esto demanda una acción concertada de gobiernos, empresas y la sociedad civil para implementar políticas y prácticas que reduzcan las emisiones en todos los sectores.

Conclusiones

Este estudio ha indagado en potencial de la modificación del albedo de las superficies urbanas como una herramienta para la mitigación del cambio climático. El desarrollo de un algoritmo en Python, basado en la metodología Akbari, (2023), ha facilitado el análisis de datos climáticos *epw a gran escala, permitiendo evaluar el impacto del incremento del albedo en múltiples ubicaciones de Latinoamérica. Los resultados obtenidos revelan que un aumento del 1% en el albedo de las superficies urbanas se traduce en una compensación de CO_2 que oscila entre 2.7 y 3.6 kg por m², siendo más efectiva en la región con mayor insolación y menor nubosidad, es decir la ciudad de Mendoza. Esto sugiere que la posición geográfica -latitud- y las características climáticas locales, como la transmitancia solar atmosférica, juegan un papel crucial en la eficiencia de las estrategias de mitigación basadas en el albedo. Es esencial

subrayar la necesidad de establecer marcos de regulación que garanticen un uso responsable y equitativo de estas tecnologías.

Agradecimientos

Por su contribución en esta investigación, los autores agradecen a la Universidad de Concordia (Canadá) y a la Universidad de Nevada (EEUU). Financiamiento: Proyecto TE_2023_1_ 1012613. Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET-Argentina), DD499(11-09-2024), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo N. Processo 2024/01299-4 (Brasil), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – CONACTY ENER01_02 (Paraguay). Processo FAPESP n. 2023/09875-1.

Referências

Akbari, H. **A simplified method to calculate atmospheric CO2 equivalency for changing surface albedo** (RMIT University, Ed.)6th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands (IC2UHI). **Anais**...Australia: 2023

Akbari, H.; Matthews, H. D. **Global cooling updates: Reflective roofs and pavements.** Energy and Buildings. **Anais**...dez. 2012

Akbari, H.; Menon, S.; Rosenfeld, A. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO2. **Climatic Change**, v. 94, n. 3–4, p. 275–286, jun. 2009.

Akbari, H.; Matthews H.; Seto, D. The long-term effect of increasing the albedo of urban areas, **Environ. Res. Lett.** v.7, n.024004, p.10, 2012.

BhattI, U. A. *et al.* Global production patterns: Understanding the relationship between greenhouse gas emissions, agriculture greening and climate variability. **Environmental Research**, v. 245, 15 mar. 2024.

CHRYSOULAKIS, N.; GRIMMOND, C. S. B. Understanding and reducing the anthropogenic heat emission. **Urban Climate Mitigation Techniques**, p. 27–40, 2016.

Duffie, J. A.; Beckman, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4 ed. ed. New Jersey: y John Wiley & Sons, Inc, 2013.

EPA. **Technical Documentation: Climate Forcing**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/dv/site,>.

GCP. **CO2 Territorial per capita emissions in 2023Global Carbon Project**, 2023. Disponível em: <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>. Acesso em: 17 fev. 2025

Gregory, J. M. *et al.* A new method for diagnosing radiative forcing and climate sensitivity. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, 16 fev. 2004.

Garimella, S., *et al.* J. Meeting India's climate goals through policy reform and international collaboration. **Environmental Science & Policy**, n. 126, p. 39-46, 2022

Chavarry Vallejos, C.; Zavala Loria J.; Rojo Gutierrez, M. Decarbonization technologies for the reduction of CO_2 emissions in multifamily buildings. **Universidad Ciencia y Tecnología;**27(119):52-62, 2023

Hansen, J. *et al.* Earth's energy imbalance and implications. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 24, p. 13421–13449, 2011.

Report IPCC. **Summary for Policymakers of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2023.

Lawrie, L.; Drury, B. C. **Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)**, 2022. Disponible en: <https://climate.onebuilding.org>

Levinson, R.; Akbari, H.; Reilly, J. C. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. **Building and Environment**, v. 42, n. 7, p. 2591–2605, jul. 2007.

Menon S., Akbari H., Mahanama S., Sednev I., Levinson R. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO2 offsets, **Environmental Research Letters** 5. 2010.

NREL. **NREL's Solar Position and Intensity the National Renewable Energy Laboratory**, 2000.

OMM. **Informe Anual de 2018. La OMM del siglo XXI. OMM-N. 1229**. Genève 2, Suiza: Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2019.

Reno, M. J.; Hansen, C. W.; Stein, J. S. Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis. **Sandia Report**, v. Unlimeted Release, n. SAND2012-2389, 2012.

Spencer, J. W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun. **Search**, n. 2, p. 162–172, 1971.

Von-Schuckmann, K. *et al.* Heat stored in the Earth system 1960-2020: where does the energy go? **Earth System Science Data**, v. 15, n. 4, p. 1675–1709, 17 abr. 2023.

WMO. **WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. World Meteorological Organization**, 2025. Disponível en: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 15 fev. 2025

Yamasoe, M. A. *et al.* **Forçantes radioativas naturais e antrópicas. Primeiro Relatório de Avaliação Nacional. Capitulo 7.**, 2014.