

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE PROTECCIONES SOLARES EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CLIMAS ÁRIDOS TEMPLADOS FRÍOS, MENDOZA, ARGENTINA

Recibido 27/09/2024
Aceptado 13/12/2024

INFLUENCE OF SOLAR SHADING DESIGN PARAMETERS ON ENERGY EFFICIENCY IN COLD ARID TEMPERATE CLIMATES, MENDOZA, ARGENTINA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DESIGN DAS PROTEÇÕES SOLARES NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CLIMAS ÁRIDOS FRIOS E TEMPERADOS, MENDOZA, ARGENTINA

Alicia Betman

Arquitecta
Becaria Doctoral del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-6765-8323>
abetman@mendoza-conicet.gob.ar (Autor de Correspondencia)

Julieta Balter

Doctora en Arquitectura
Investigador Asistente del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-7785-8465>
jbalter@mendoza-conicet.gob.ar

Stella Maris Donato

Doctora en Ciencias Matemáticas
Profesional Asistente del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0009-0003-2435-1358>
sdonato@mendoza-conicet.gob.ar

Carolina Ganem

Doctora en Arquitectura
Investigadora Independiente del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-1431-1219>
cganem@mendoza-conicet.gob.ar



RESUMEN

El sector de la construcción tiene un impacto significativo en el consumo energético global y en las emisiones de carbono. A pesar de los avances tecnológicos y de materiales, el rendimiento energético de los edificios depende principalmente de las decisiones de diseño arquitectónico. Este estudio evalúa cómo las configuraciones de sistemas de protección solar afectan los consumos energéticos de calefacción, refrigeración e iluminación en un box de estudio ubicado en un clima árido templado frío. Los resultados muestran que la proporción ventana-pared (WWR) y la orientación absoluta son factores determinantes en el consumo energético. Se observó un incremento del 16% en el consumo de refrigeración y del 13% en iluminación con el aumento progresivo del WWR. Además, la demanda de calefacción aumentó en torno al 18% según la orientación. Estos hallazgos destacan la importancia de ajustar las variables de diseño para optimizar la eficiencia energética de los edificios.

Palabras clave

protecciones solares, simulación paramétrica, eficiencia energética, clima árido templado frío

ABSTRACT

The construction sector has a significant impact on global energy consumption and carbon emissions. Despite technological and material advances, the energy performance of buildings primarily depends on architectural design decisions. This study evaluates how solar protection system configurations affect energy consumption for heating, cooling, and lighting in a study box in an arid, temperate, cold climate. The results show that the window-to-wall ratio (WWR) and absolute orientation are key factors in energy consumption. A 16% increase in cooling consumption and a 13% increase in lighting were observed with the progressive increase of the WWR. Additionally, depending on the orientation, heating demand increased by approximately 18%. These findings highlight the importance of adjusting design variables to optimize the energy efficiency of buildings.

Keywords

solar shading, parametric simulation, energy efficiency, cold temperate arid climate

RESUMO

O setor de construção exerce um impacto significativo no consumo global de energia e nas emissões de carbono. Apesar dos avanços em tecnologia e materiais, o desempenho energético dos edifícios depende principalmente das decisões de projeto arquitetônico. Este estudo avalia como as configurações de sistemas de proteção solar afetam os consumos de energia de aquecimento, resfriamento e iluminação em um box de estudo localizado em um clima árido temperado frio. Os resultados mostram que a proporção janela-parede (WWR) e a orientação absoluta são fatores determinantes no consumo energético. Um aumento de 16% no consumo de resfriamento e de 13% em iluminação foi observado com o aumento progressivo da WWR. Além disso, a demanda de aquecimento aumentou em cerca de 18%, dependendo da orientação. Essas descobertas destacam a importância de ajustar as variáveis de projeto para otimizar a eficiência energética dos edifícios.

Palavras-chave:

proteção solar, simulação paramétrica, eficiência energética, clima árido temperado e frio

INTRODUCCIÓN

El ámbito de la edificación es uno de los mayores responsables del consumo energético y las emisiones de carbono, lo que agrava la crisis ambiental global. Este impacto se intensifica debido al crecimiento poblacional proyectado, que alcanzará un 68% para el año 2050, según la International Energy Agency [IEA] (2021). Este aumento genera una mayor demanda de recursos energéticos, que ejercen presión sobre las infraestructuras existentes (IPCC, 2023). Las edificaciones con envolventes térmicamente ineficientes incrementan el consumo energético necesario para alcanzar condiciones de confort térmico, lo que contribuye al aumento de emisiones globales y a la dependencia de recursos no renovables. Un aspecto crítico es el desempeño térmico de las aberturas, que influyen en las ganancias y pérdidas de calor. Las ventanas, además de cumplir funciones estéticas y permitir ventilación e iluminación, son sistemas constructivos clave para el control de la radiación solar. La entrada de radiación solar puede reducir el consumo energético asociado con calefacción en climas fríos y mejorar el confort térmico y visual de los ocupantes (Ghosh y Neogi, 2018). No obstante, un diseño inadecuado puede generar deslumbramiento, aumento de la demanda de refrigeración o mayor dependencia de iluminación artificial. Esto destaca la importancia de diseñar ventanas y sistemas de protección solar optimizados, adaptados a las condiciones climáticas de cada región (Kaasalainen et al., 2020; Kiritmat et al., 2016). En este contexto, las protecciones solares y las tecnologías avanzadas de control de radiación son fundamentales para gestionar eficientemente el flujo de energía solar.

Dentro de la arquitectura sostenible, las estrategias pasivas para el diseño de envolventes son clave para mejorar el rendimiento energético de las construcciones. Estas estrategias, que consideran parámetros como ventanas y protecciones solares, buscan identificar configuraciones óptimas mediante simulaciones energéticas y estudios observacionales (Bustamante & Encinas 2012). Las herramientas de simulación permiten evaluar sistemáticamente el impacto de distintos parámetros en el comportamiento térmico de las edificaciones, lo que proporciona información crítica para decisiones desde las etapas iniciales del diseño arquitectónico. El análisis de correlación, una metodología estadística sólida, es útil para comprender cómo los parámetros de diseño influyen en el consumo energético de los edificios. A diferencia del análisis de sensibilidad, que evalúa la respuesta ante cambios, la correlación permite cuantificar la intensidad y dirección de las relaciones entre variables sin implicar causalidad (Zou et al., 2003). Este enfoque facilita la identificación de patrones entre variables como el porcentaje de área acristalada (WWR) y la orientación de las ventanas, que proporcionan información valiosa para estrategias de diseño bioclimático (Alanís-Navarro et al., 2017). Estas metodologías son herramientas

fundamentales al evaluar cómo interactúan los factores en la eficiencia energética.

Aunque diversos estudios han explorado el diseño de ventanas y protecciones solares mediante simulaciones computacionales, el uso del análisis de correlación para identificar relaciones complejas entre parámetros de diseño y consumo energético sigue siendo limitado. Investigaciones como las de Koç y Maçka Kalfa (2021), Dabbagh y Krarti. (2022), Khidmat et al. (2021), Mangkuto, et al. (2021) y Nazari et al. (2023) han aportado perspectivas valiosas, pero no profundizan en la identificación de relaciones entre múltiples variables. Betman et al. (2023) realizaron un análisis sobre cómo ciertos parámetros geométricos afectan las demandas energéticas y obtuvieron primeras aproximaciones alentadoras. En este artículo se abordarán metodologías adicionales que exploran un enfoque específico de correlación profundizando el trabajo en esta área de vacancia, enfocándose principalmente en la ciudad de Mendoza, ubicada en el centro oeste de la República Argentina

El análisis de correlación puede contribuir significativamente a optimizar parámetros de diseño como el WWR y las protecciones solares. Permite un entendimiento profundo de cómo estos elementos impactan los requerimientos energéticos, al facilitar el desarrollo de estrategias adaptadas a las condiciones climáticas locales. Además, fortalece la capacidad de las edificaciones para enfrentar los desafíos ambientales, como el cambio climático y la escasez de recursos renovables.

El Área Metropolitana de Mendoza (32° 40' Latitud Sur, 68° 51' Longitud Oeste) y categorizada como BWk (templado árido frío) según la clasificación de Köppen, presenta una temperatura media anual de 17°C. Sus veranos son calurosos y secos, con temperaturas de hasta 39°C, y los inviernos fríos, con mínimas de -6°C. Las variaciones térmicas diarias, que oscilan entre 10°C y 20°C, y una radiación solar anual elevada resaltan la necesidad de un análisis climático detallado para diseñar edificaciones que respondan a las particularidades climáticas y sociales de la región.

Las proyecciones climáticas futuras sugieren un aumento de las temperaturas medias, especialmente en verano, lo que resalta la urgencia de implementar medidas de mitigación y adaptación, como estrategias de sombreado pasivo y tecnologías de enfriamiento para reducir la dependencia de sistemas mecánicos (Dirección Nacional de Escenarios y Planeamiento Energético, 2019; Servicio Meteorológico Nacional, 2023; IPCC, 2023).

A partir de lo expuesto, este trabajo explora la relación entre los parámetros de diseño edilicio y los factores que influyen en el comportamiento energético en climas áridos templados fríos, como el de Mendoza. A través

de un análisis de correlación, que busca identificar y cuantificar cómo los parámetros de diseño de ventanas y protecciones solares impactan en los requerimientos de energía para refrigeración, calefacción e iluminación, con el objetivo de optimizar su rendimiento.

METODOLOGÍA

DEFINICIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN Y PARÁMETROS DE ESTUDIO

Se propone el trabajo con un espacio interior cuyas dimensiones corresponden a las unidades de vivienda del plan de desarrollo para Mendoza del Instituto Provincial de la Vivienda, tipología ampliamente reproducida en los últimos 10 años. La misma consiste en un dúplex, desarrollado en dos plantas. El ambiente seleccionado para este estudio corresponde al dormitorio. En consecuencia, el box queda conformado en un área de 3.00 m por 3.00 m con una altura de 2.70 m.

En la Tabla 1 se especifican las características termo-físicas de los materiales típicos utilizados en la construcción en la región. Durante el modelado energético dinámico en el software EnergyPlus, el patrón de construcción se asocia con estos materiales y se conecta a una única zona térmica. La misma está delimitada por uno de los muros en contacto con el exterior que incluye una ventana. El resto de la envolvente térmica horizontal y vertical se considera adiabática. Este planteo permite el análisis de espacios interiores en edificios de altura. En la Tabla 1 se caracterizan los materiales de los muros, piso y techo. La

ventana es de abrir y tiene un marco de aluminio. El vidrio es simple de 3mm. $U = 5,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

En este estudio, se trabaja con dispositivos de control solar en forma de parasoles compuestos por lamas verticales y horizontales. Los parámetros evaluados se definen a continuación:

- Relación ventana-pared (WWR, por sus siglas en inglés, Window-to-Wall Ratio): Representa el porcentaje de área acristalada respecto al área total de la fachada. Para este análisis, se consideró un rango de WWR entre el 30% y el 90%, con intervalos del 10%. No se incluyeron valores menores al 30%, ya que limitarían la evaluación del impacto de las variables relacionadas con la iluminación.
- Orientación: Se analizaron orientaciones que reciben radiación solar directa, incluyendo tres ángulos principales: 0° para el norte, 90° para el este, y -90° para el oeste. También se consideraron dos posiciones intermedias: $+45^\circ$ (noreste) y -45° (noroeste).
- Disposición de las lamas: El sistema de protección solar incluye lamas modulares separadas equidistantemente. Se plantearon dos configuraciones: lamas dispuestas de forma horizontal (valor 0 en el software) y vertical (valor 1 en el software).
- Ángulo de inclinación de las lamas: Se evaluaron tres configuraciones: posición horizontal (0°), inclinación intermedia (15°) e inclinación pronunciada (30°). El valor de 0° actúa como barrera básica contra la radiación solar. La inclinación de 15° ofrece un equilibrio entre eficiencia solar y estética. Finalmente, la inclinación de 30° proporciona mayor sombreado, mejorándose la protección solar sin afectar la funcionalidad ni el diseño visual.

Tabla 1. Características termo-físicas del modelo de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

Construcción	Capas	Rugosidad	MATERIALES MÁSICOS				MATERIALES NO MÁSICOS	
			Espesor (m)	Conductividad ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	Densidad (Kg/m^3)	Calor Específico ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$)	Resistencia térmica ($\text{m}^2\text{-K/W}$)	
Muro exterior	Revoque	Rugoso	0.025	1.16	1800	1000		
	Ladrillo	Medio Rugoso	0.2	0.81	1600	835		
	Revoque	Rugoso	0.025	1.16	1800	1000		
	Yeso	Suave	0.02	0.4	800	840		
Piso	Contrapiso	Rugoso	0.12	0.78	1600	780		
	Carpeta	Rugoso	0.12	0.78	1600	780		
Cubierta	Membrana						0.55	
	Carpeta	Rugoso	0.12	0.78	1600	780		
	Lana mineral	Medio Rugoso	0.05	0.031	50	750		
	Machimbre	Medio Rugoso	0.25	0.11	600	1380		

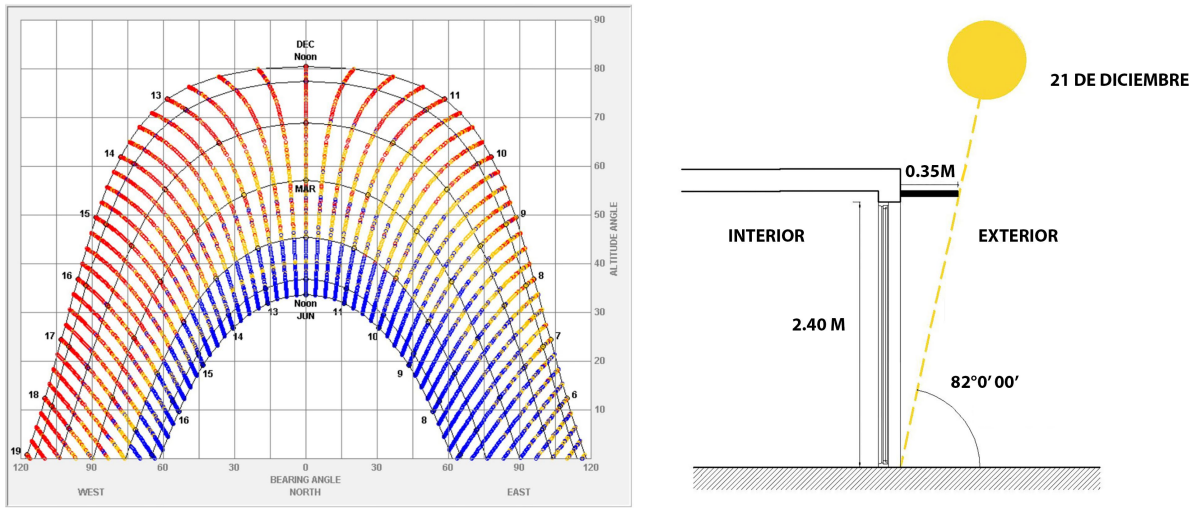


Figura 1. (a) Ángulos solares para la localidad de Mendoza a través del software Climate Consultant, (b) Cálculo del ángulo solar. Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 2. Condiciones variables del modelo. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 2. Condiciones fijas del modelo estudiado. Fuente: Elaboración de los Autores.

Condición fija	Parámetro	Descripción	Valores	Comentarios
	Termostato Invierno	Temperatura establecida según Estándar ASHRAE 55	21°C	Ropa típica de invierno (0.9 clo) en actividad sedentaria
	Termostato Verano	Temperatura establecida según Estándar ASHRAE 55	26°C	Ropa típica de verano (0.5 clo) en actividad sedentaria
	Demanda de Iluminación	Setpoint de iluminación en un punto central a 0.80 m del piso	500 lx	Esquema de uso diurno (8:00 - 23:00 h) con 4 W/m ² ; sin considerar ganancias internas
	Tasa de Infiltración	Renovación del aire por hora	1 renovación por hora	Constante

- Profundidad de las lamas: Se utilizó el gráfico de sombreado del software Climate Consultant (Figura 1). Se seleccionó el ángulo solar correspondiente a las 12:00 hora solar del 21 de diciembre año, para conocer la máxima altura solar y, por ende, el mínimo requerimiento de profundidad de la protección. Para la localidad de Mendoza el valor de este ángulo corresponde a 82°. En consecuencia, se realizó el cálculo correspondiente, teniendo en consideración la situación más desfavorable, representada por una abertura con un WWR del 90 %. El resultado arrojó una profundidad inicial de 0.35 m, la que se incrementó en rangos de 0.10 m, que alcanzó un máximo de 0.55 m, siguiendo criterios tanto estéticos como funcionales.
- Espaciado entre lamas: Los valores de espaciado fueron proporcionales a los de la profundidad, para mantener criterios estéticos y funcionales.
- Distancia de la protección solar respecto al acristalamiento: Se evaluaron tres escenarios: (1) el dispositivo junto al vidrio (distancia 0.00 m), (2) una distancia intermedia de 0.10 m, y (3) una distancia máxima de 0.20 m.

En la Figura 2 se presenta un esquema gráfico de las variables de entrada empleadas en el análisis paramétrico, lo que permitió evaluar las distintas configuraciones de diseño.

Para la creación del modelo, se empleó el software de diseño paramétrico Grasshopper en conjunto con el visualizador Rhinoceros 3D, se utilizó una licencia educativa de tres meses. En cuanto al análisis energético, se integraron los complementos Ladybug y Honeybee, los que permiten la importación de datos climáticos a partir de archivos Energy Plus Weather Data (EPW) y posibilitan la ejecución de cálculos mediante motores reconocidos

como EnergyPlus, Daysim y Radiance. Adicionalmente, se utilizó la interfaz gráfica de OpenStudio, que conecta el modelo tridimensional con la biblioteca de herramientas de simulación, que asigna las propiedades necesarias al modelo 3D para llevar a cabo las simulaciones. Al Configurar los termostatos y los setpoints, se buscó determinar las demandas energéticas correspondientes a refrigeración, calefacción e iluminación. Todas expresadas en (kWh/m²/año).

La Tabla 2 presenta las condiciones fijas utilizada para la simulación energética del modelo. Estas condiciones incluyen los termostatos de invierno y verano, así como consideraciones sobre la demanda de iluminación y la tasa de infiltración de aire.

ESTUDIO DE CORRELACIÓN

Este estudio busca identificar y cuantificar las relaciones entre diferentes variables de entrada y sus impactos en las salidas del sistema. Para automatizar la iteración del análisis -es decir, la repetición del proceso, y registrar todos los valores de las posibles combinaciones, se utilizó el complemento TTTtoolbox. Este complemento permitió evaluar todas las combinaciones posibles, con un total de 5670, y analizar la incidencia de cada variable mediante un análisis de correlación. Este análisis se realizó con el software R y posteriormente se procesó en Microsoft Excel.

El análisis de correlación se llevó a cabo para los ejes de parasoles horizontales y verticales. Se evaluó la adecuación de la medida de correlación seleccionada mediante la comprobación de la distribución de las variables cuantitativas en cada eje, para verificar si se ajustaban a una distribución normal multivariada.

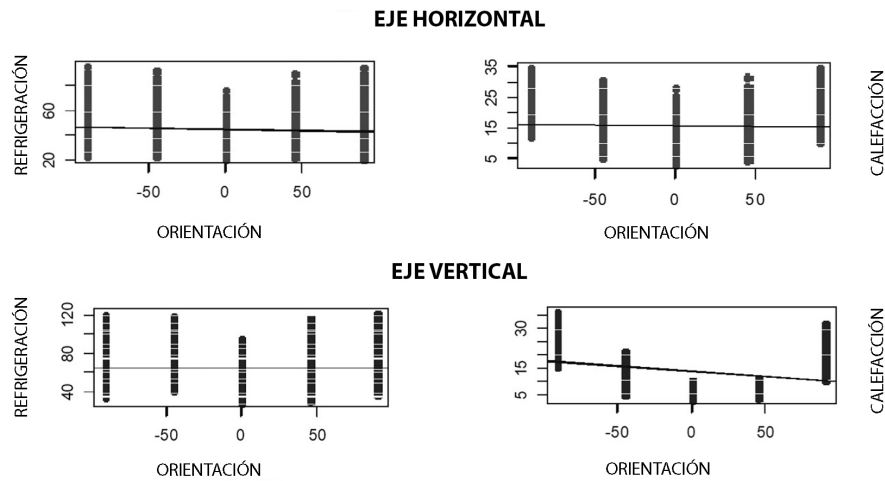


Figura 3. Valores de correlación del parámetro orientación. Fuente: Elaboración de los Autores.

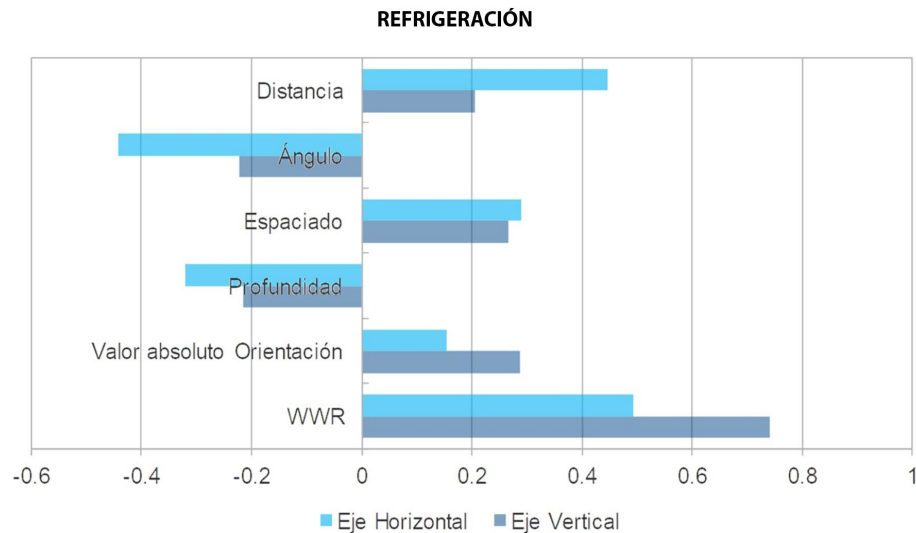


Figura 4. Estudio de correlación de refrigeración. Fuente: Elaboración de los Autores

Para evaluar la compatibilidad con esta distribución, se realizaron las pruebas de Mardia (1970), Henze-Zirkler (1990) y Doornik-Hansen (2008). Los resultados de estas pruebas indican que las variables estudiadas no siguen una distribución normal conjunta, sugiriendo que las suposiciones necesarias para aplicar pruebas paramétricas basadas en la normalidad no se cumplen. Esta falta de normalidad cuestiona la validez de pruebas como la t de Student o el análisis de varianza (ANOVA), que requieren datos normalmente distribuidos. Por lo tanto, se optó por utilizar el coeficiente de correlación de Spearman (1961). para evaluar las relaciones entre las variables de interés (refrigeración, calefacción e iluminación) y los parámetros definidos en el estudio (WWR, orientación, profundidad, espaciado, ángulo y distancia). Este coeficiente no depende de supuestos sobre la distribución de los datos y es adecuado para datos no normalmente distribuidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, es importante destacar que, durante el proceso de análisis de los parámetros de estudio se observó una situación particular con la orientación. Se evidenció un patrón significativo en los requerimientos en calefacción y refrigeración: tanto los valores extremadamente altos como los extremadamente bajos de la orientación (es decir, en las orientaciones Este y Oeste) resultan en un incremento en los requerimientos energéticos del edificio. Este fenómeno se manifiesta, a través de correlaciones débiles que resalta la importancia de considerar el valor absoluto de la orientación al estudiar su impacto en la demanda energética. Esto se puede observar en la Figura 3.

Al enfocarse en el valor absoluto de la orientación, se observa un aumento notable en la magnitud de los

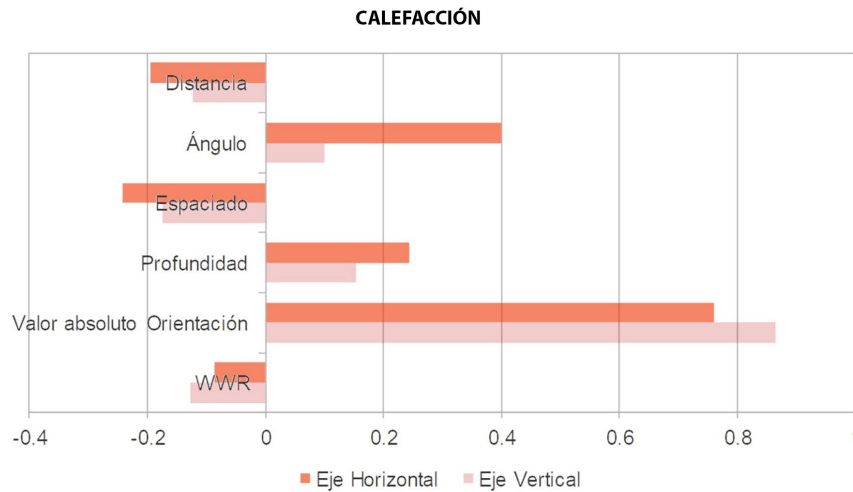


Figura 5. Estudio de correlación de calefacción. Fuente: Elaboración de los Autores

coeficientes estimados, acompañado por un cambio de signo. Esto implica que tanto la refrigeración como la calefacción, -y esta última aún de forma más marcada-, tienden a aumentar a medida que la orientación se mueve hacia los valores extremos, es decir cuando se mueve hacia la derecha (acercándose al 90) en el rango positivo [0,90] y cuando se mueve a la izquierda (acercándose al -90) en el rango negativo. Estos hallazgos, subrayan la influencia significativa de la orientación en los requerimientos energéticos del edificio. Por ejemplo, los edificios orientados hacia el este (con orientaciones en el rango de [0, 90]) o hacia el oeste (con orientaciones en el rango de [-90, 0]) presentan mayores necesidades de calefacción y refrigeración en comparación con aquellos orientados hacia el norte (orientación cercana a 0).

A continuación, se presentan los resultados del estudio de correlación que se muestran en la Figura 4, Figura 5 y Figura 6 los gráficos correspondientes a las variables de refrigeración, calefacción e iluminación.

En primer lugar, se observa que en las iteraciones realizadas la disposición de los parasoles, ya sea horizontal o vertical, no afecta la relación entre los parámetros en estudio y las necesidades energéticas. Por ejemplo, en refrigeración, una mayor proporción de área de ventana respecto a la pared (WWR) incrementa las demandas energéticas, independientemente de si los parasoles son verticales u horizontales. A medida que aumenta la profundidad de los dispositivos, las demandas disminuyen. Estas relaciones se reflejan en las correlaciones observadas, ya sean positivas o negativas. Sin embargo, cada disposición de parasoles genera variaciones en las demandas, como se muestra en la extensión de la barra correspondiente. También se observa que las variables de calefacción, e iluminación, coinciden en la influencia de los parámetros sobre las demandas energéticas, mientras que, para refrigeración, la influencia es inversa. Por ejemplo, un aumento en la distancia de los parasoles se traduce en mayores requerimientos

energéticos para calefacción e iluminación, mientras que, para refrigeración, los requerimientos disminuyen. Esto se debe a que una mayor distancia permite una mayor entrada de radiación solar, reduciendo la necesidad de iluminación artificial y calefacción.

Otro aspecto relevante del análisis es que el parámetro WWR emerge como el más influyente en las demandas de refrigeración e iluminación. Un incremento en el tamaño de las ventanas conlleva a mayores requerimientos de refrigeración debido al mayor ingreso de la radiación solar, al mismo tiempo que disminuye la demanda de iluminación por la mayor entrada de luz natural. Este fenómeno sugiere que las ventanas de grandes dimensiones pueden incrementar significativamente la carga de refrigeración durante los meses más cálidos, mientras que reducen la necesidad de iluminación artificial durante el día.

Además, es importante destacar que la relación entre la orientación absoluta y la calefacción presenta una correlación alta, lo que indica una conexión fuerte y directa entre estos factores. En contraste, la relación entre la orientación absoluta y la refrigeración muestra una correlación moderada con tendencia a baja, sugiriendo una conexión menos pronunciada. Asimismo, la relación entre la orientación absoluta y la iluminación presenta una correlación baja, que indica una conexión más débil entre estos factores.

En cuanto al diseño de los parasoles, se destacan varias correlaciones significativas respecto a la variable de refrigeración tanto en la disposición horizontal como en la vertical. En la disposición horizontal, la refrigeración muestra correlaciones negativas significativas con el ángulo de inclinación de los parasoles y la profundidad. Estas correlaciones sugieren que aumentos en estos parámetros de diseño de los parasoles se relacionan con reducciones en los requerimientos de refrigeración debido al mayor sombreado que producen. Por ejemplo,

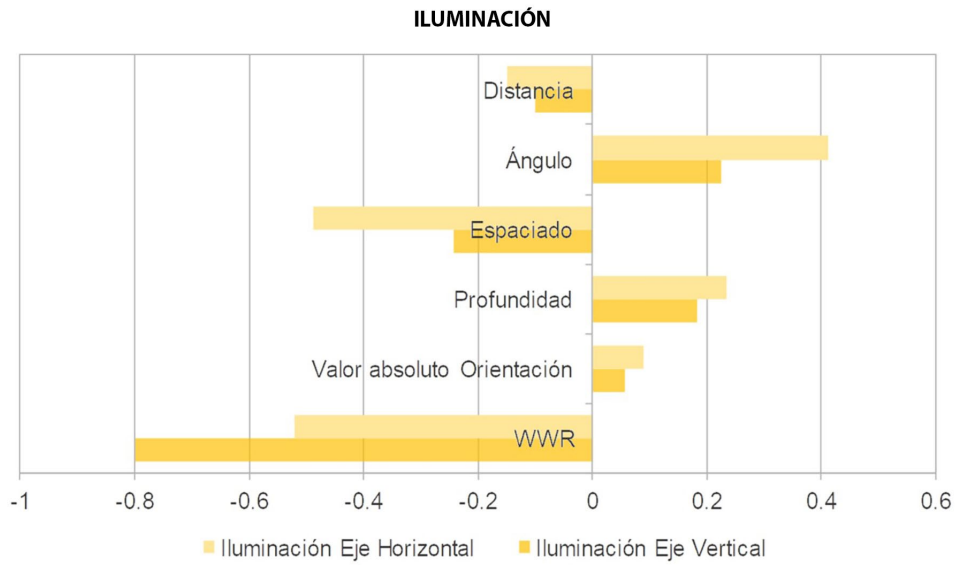


Figura 6. Estudio de correlación de iluminación. Fuente: Elaboración de los Autores

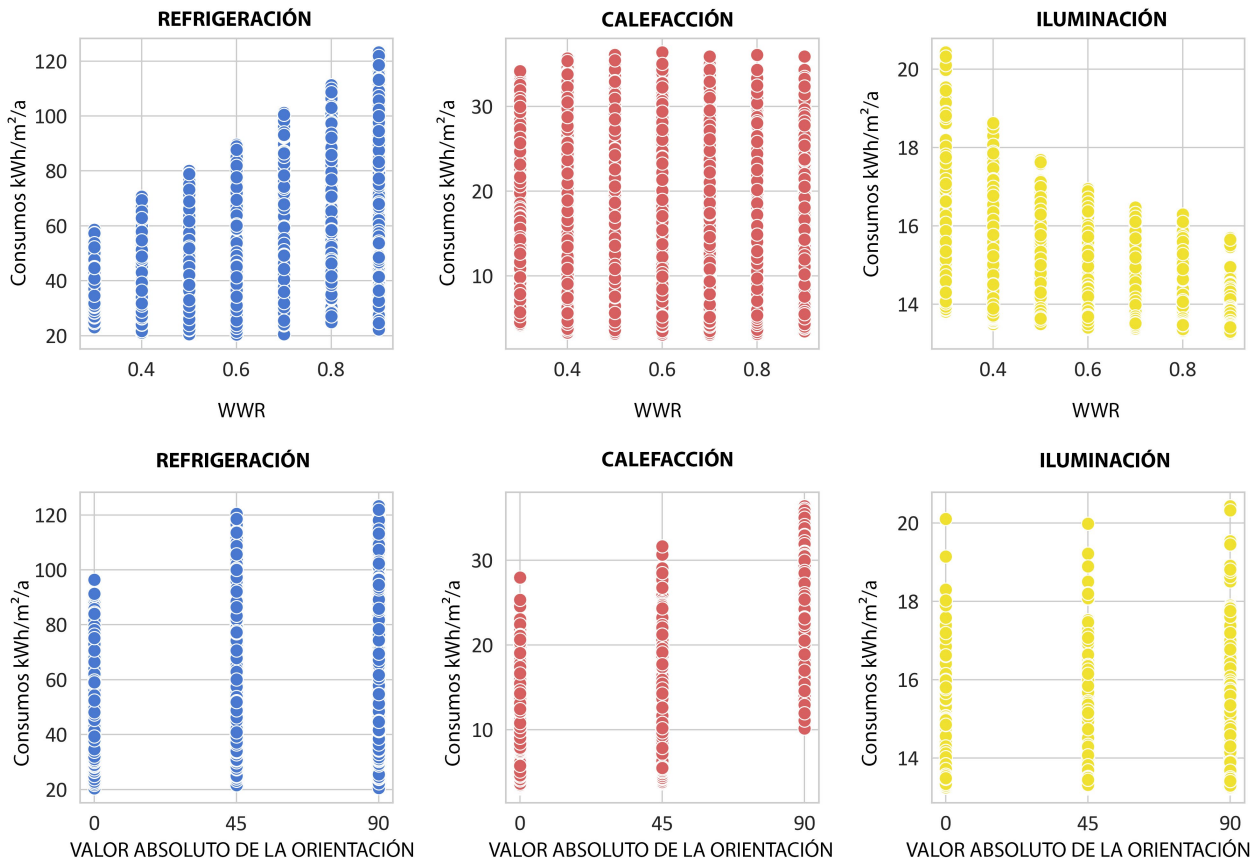


Figura 7. Valores de consumos energéticos de los parámetros más influyentes. Fuente: Elaboración de los Autores.

cuando aumentan la profundidad y el ángulo de las lamas de los parasoles, el área de sombra es mayor, y, en consecuencia, la demanda de refrigeración tiende a ser menor.

Por otro lado, se encuentran correlaciones positivas significativas entre la variable de refrigeración y los parámetros WWR, espaciado y distancia de los parasoles, lo que indica que incrementos en estos parámetros están asociados con aumentos en los requerimientos de refrigeración debido a la disminución de la superficie de protección solar. Por ejemplo, cuando aumenta el área de la ventana (WWR), el espaciado entre las lamas del parasol y la distancia entre éste y la abertura, el área de sombra tiende a reducirse, lo que incrementa la demanda de refrigeración porque la radiación solar no está siendo bloqueada eficientemente.

Finalmente, las variables de calefacción e iluminación muestran correlaciones distintas con varios factores. Se destacan correlaciones negativas significativas con la relación ventana-pared (WWR), orientación, espaciado y distancia, lo que indica que un incremento en estas variables conlleva una mayor entrada de radiación solar, que resulta en una disminución en las demandas de calefacción e iluminación. En contraste, se observan correlaciones positivas significativas con la profundidad y el ángulo, que indican que aumentos en estas variables se asocian con incrementos en calefacción e iluminación debido al aumento del área de sombreado.

El análisis presentado destaca la influencia significativa del WWR (relación ventana-pared) y la orientación absoluta como variables determinantes en los requerimientos energéticos de los edificios, particularmente en lo que respecta a las demandas de refrigeración, calefacción e iluminación. Los gráficos de la Figura 7 evidencian que un acrecentamiento en el WWR provoca un aumento considerable en el consumo energético de refrigeración ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$) debido a un incremento en las ganancias solares, mientras que simultáneamente reduce la demanda de iluminación artificial debido a la mayor penetración de luz natural. Esta intensidad en el WWR se relaciona con un incremento del 16% en refrigeración y del 13% en iluminación. En lo que respecta a la calefacción, se observa una ampliación aproximada del 18% asociado a la orientación. Los gráficos inferiores de la figura muestran que las orientaciones extremas ($\pm 90^\circ$) están relacionadas con mayores demandas energéticas, mientras que las orientaciones cercanas a 0° (norte) presentan menores requerimientos energéticos.

CONCLUSIONES

En el contexto de la problemática ambiental global, comprender las correlaciones entre los diferentes requerimientos energéticos en las edificaciones de la ciudad de Mendoza, Argentina es esencial. Este estudio

revela que los patrones de consumo para calefacción e iluminación están estrechamente relacionados, mientras que la refrigeración muestra una relación inversa. Esta dinámica sugiere que los ajustes en un área pueden tener un impacto significativo en las demás, al afectar la eficiencia energética y el consumo total. Si bien el análisis se basa específicamente en el clima de Mendoza, la metodología es replicable en otras regiones para evaluar factores en distintos contextos climáticos. Estos hallazgos constituyen los primeros pasos hacia diseños más optimizados, permitiendo avanzar en estrategias que equilibren de manera eficiente las demandas energéticas en edificaciones.

Durante las iteraciones realizadas, se observa que la disposición de los parasoles, ya sean horizontales o verticales, no altera la relación entre los parámetros de diseño y las necesidades energéticas, aunque la fuerza de esta relación varía para cada eje, como lo indican los valores del coeficiente. En cuanto a la orientación, los requerimientos energéticos aumentan a medida que se desvía de la dirección ideal. Específicamente, los edificios orientados hacia el este o el oeste requieren más energía en comparación con aquellos orientados hacia el norte. Este ajuste afecta directamente a los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación, siendo particularmente relevante el caso de la calefacción. Se observa un incremento aproximado del 18% de aumento del intervalo asociado a la orientación. Que evidencia que, las orientaciones extremas ($\pm 90^\circ$) están relacionadas con mayores demandas energéticas, mientras que las orientaciones cercanas a 0° (norte) presentan menores requerimientos energéticos.

El análisis de los parámetros de diseño revela que la relación ventana-pared (WWR) juega un papel crucial en las demandas de refrigeración e iluminación. Se encuentra una correlación positiva entre el WWR y las demandas de refrigeración, lo que indica que un aumento en el tamaño de las ventanas amplía la necesidad de refrigeración debido a una mayor entrada de radiación solar. Sin embargo, esta mayor radiación reduce la necesidad de iluminación artificial, ya que se aprovecha mejor la luz natural, que evidencia una correlación negativa con las demandas de iluminación. Estos hallazgos constatan el incremento del 16% en refrigeración y del 13% en iluminación en los intervalos de consumos.

Las correlaciones negativas entre la demanda de refrigeración y parámetros como el ángulo y la profundidad de las protecciones solares sugieren que un aumento en estos factores reduce la necesidad de refrigeración al proporcionar mayor sombra. En contraste, las correlaciones positivas encontradas entre la refrigeración y factores como el WWR, el espaciado y la distancia de los parasoles, así como la orientación de éstos, indican que un incremento en estos parámetros está asociado con mayores necesidades de refrigeración. Esto se debe a que una menor protección solar permite

una mayor entrada de radiación solar, lo que acrecienta la demanda de refrigeración.

Por otro lado, se encontraron correlaciones negativas significativas entre la calefacción e iluminación y el WWR, así como el espaciado y la distancia de los parasoles. Estos resultados indican que un aumento en estas variables favorece una mayor entrada de radiación solar, reduciendo las demandas de calefacción e iluminación. En contraste, las correlaciones positivas con la orientación absoluta, la profundidad y el ángulo de los parasoles sugieren que un aumento en estos parámetros está asociado con mayores demandas debido al incremento del área de sombreado.

En cuanto a las limitaciones del trabajo, se observa que, si bien el estudio examina varios factores del diseño de las protecciones solares, su enfoque es principalmente geométrico, lo que limita la consideración de las características materiales, como las del vidrio y las protecciones solares en sí mismas. Esta restricción abre la posibilidad de futuros estudios que profundicen en estos aspectos materiales.

En resumen, este análisis en climas templados con alta exposición solar ofrece una base sólida para proyectar edificaciones más sostenibles, reduciendo el consumo energético y los costos operativos. Además, proporciona información valiosa para la toma de decisiones durante las etapas iniciales del proceso de diseño.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, B.A. y B.J.; Curación de datos, D.S.; Análisis formal, B.A. y B.J.; Investigación, B.A. y B.J.; Metodología, B.A. y D.S.; Software, B.A. y D.S.; Supervisión, B.J. y G.C.; Validación, D.S.; Visualización, B.A.; Escritura – borrador original, B.A.; Escritura – revisión y edición, B.A., B.J. y G.C.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a las siguientes fuentes de financiamiento: ANPCYT FONCYT PICT 2019-02752 (2021-2024) "Desarrollo de un protocolo normalizado de auditoría térmica y energética puntual aplicable para climas cálidos como herramienta confiable, no invasiva, de alta replicabilidad y bajo costo, que contribuya a la certificación energética de viviendas"; CONICET PIP 11220200101711CO (2021-2023) "Hábitat sustentable y resiliencia al Cambio Climático" y PUE INAHE 2017-0096 (2018-2025) "I+D+i en Eficiencia Energética y Ambiental del Hábitat Humano".

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alanís-Navarro, J. A., Casarrubias-Bahena, D., Alanís-Cantú, R., y Lavín-Delgado, J. E. (2017). Correlación y regresión lineal de variables climatológicas para el diseño de ecotecnologías y arquitectura bioclimática. *Revista de Arquitectura y Diseño*, 1(2), 1–12. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Arquitectura_y_Diseño/vol1num2/Revista_de_Arquitectura_y_Dise%C3%B1o_V1_N2_1.pdf
- Betman, A., Balter, J., Hongn, M., y Ganem, C. (2023). Estudio paramétrico de sistemas de parasoles para reducción del consumo energético en climas con alta heliofanía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27, 45–55. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/4592>
- Bustamante, W., y Encinas, F. (2012). Parámetros de diseño y desempeño energético en edificios de clima mediterráneo. *ARQ (Santiago)*, 82, 116–119. <https://doi.org/10.4067/S0717-69962012000300020>
- Dabbagh, M., y Krarti, M. (2022). Experimental evaluation of the performance for switchable insulated shading systems. *Energy and Buildings*, 256, 111753. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111753>
- Dirección Nacional de Escenarios y Planeamiento Energético. (2019). Escenarios Energéticos 2030. Buenos Aires: Secretaría de Energía, Ministerio de Hacienda. http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/planeamiento/2019-11-14_SsPESGE_Documento_Escenarios_Energeticos_2030_ed2019_pub.pdf
- Doornik, J. A., y Hansen, H. (2008). An omnibus test for univariate and multivariate normality. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 70(s1), 927–939. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2008.00537.x>
- Ghosh, A., y Neogi, S. (2018). Effect of fenestration geometrical factors on building energy consumption and performance evaluation of a new external solar shading device in warm and humid climatic condition. *Solar Energy*, 169, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.025>
- Henze, N., y Zirkler, B. (1990). A class of invariant consistent tests for multivariate normality. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 19(10), 3595–3617. <https://doi.org/10.1080/03610929008830400>
- International Energy Agency [IEA]. (2021). Building Envelopes. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/building-envelopes>
- IPCC. (2023). Statement on the 'Climate Change 2023: Synthesis Report', 20 March 2023. https://reliefweb.int/report/world/statement-climate-change-2023-synthesis-report-20-march-2023?gad_source=1
- Kaasalainen, T., Mäkinen, A., Lehtinen, T., Moisio, M., y Vinha, J. (2020). Architectural window design and energy efficiency: Impacts on heating, cooling and lighting needs in Finnish climates. *Journal of Building Engineering*, 27, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.100996>

Khidmat, R. P., Fukuda, H., Kustiani, y Wibowo, A. P. (2021). Designing louvers toward optimum daylight performance in Indonesia: a parametric study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 907(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/907/1/012012>

Kirimtat, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., y Sariyildiz, S. (2016). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 23–49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>

Koç, S. G., y Maçka Kalfa, S. (2021). The effects of shading devices on office building energy performance in Mediterranean climate regions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102653. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102653>

Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., Apriliyanthi, S. R., Lubis, I. H., Atthallah, Hensen, J. L. M., y Paramita, B. (2021). Design Optimisation of Fixed and Adaptive Shading Devices on Four Façade Orientations of a High-Rise Office Building in the Tropics. *Buildings*, 12(1), 25. <https://doi.org/10.3390/buildings12010025>

Mardia, K. V. (1970). Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications. *Biometrika*, 57(3), 519–530. <https://doi.org/10.2307/2334770>

Nazari, S., Keshavarz Mirza Mohammadi, P., y Sareh, P. (2023). A multi-objective optimization approach to designing window and shading systems considering building energy consumption and occupant comfort. *Engineering Reports*, 5(10), 1–39. <https://doi.org/10.1002/eng2.12726>

Servicio Meteorológico Nacional. (2023). Estado del clima en Argentina 2022. <https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/2378#:~:text=El%202022%20fue%20levemente%20m%C3%A1s,oto%C3%B1o%20e%20inicio%20del%20invierno.>

Spearman, C. (1961). The proof and measurement of association between two things. In J. J. Jenkins & D. G. Paterson (Eds.), *Studies in individual differences: The search for intelligence* (pp. 45–58). Appleton-Century-Crofts.

Zou, K. H., Tuncali, K., y Silverman, S. G. (2003). Correlation and simple linear regrSFlores-Larsension. *Radiology*, 227(3), 617–628. <https://doi.org/10.1148/radiol.2273011499>