

DESARROLLO DE MODELO PREDICTIVO REGIONAL DE LA DISPONIBILIDAD DE LUZ NATURAL EN ESPACIOS INTERIORES. ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS

Ayelén Villalba¹, Juan Manuel Monteoliva¹, Stella Maris Donato¹, Andrea Pattini¹

¹Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Centro Científico y Tecnológico Mendoza, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Tel. 261-5244310 – Fax 0261-5244401 e-mail: avillalba@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN: Conocer con precisión la cantidad y distribución de la luz natural que ingresa a un edificio es de fundamental importancia. Sin embargo, determinar el comportamiento de la luz natural en el interior de un espacio no es una tarea sencilla. En este contexto y con el objetivo de robustecer un modelo predictivo desarrollado previamente para el cálculo de disponibilidad de luz natural en espacios interiores, se realizaron simulaciones de iluminación natural dinámica ampliando la matriz de variables que considera el modelo original respecto al tipo de cielo, la orientación, el área vidriada y la transmitancia visible del vidrio. Como primer paso en el análisis de los datos generados, este trabajo ofrece un análisis descriptivo-exploratorio de los valores de iluminancia producidos por simulación para verificar la pertinencia de la matriz de variables y los niveles preestablecidos, previo al desarrollo del nuevo modelo. Los principales resultados indican que las variables área vidriada y transmitancia visible del vidrio claramente tienen un impacto en las métricas dinámicas empleadas para conducir el análisis de desempeño de la luz natural en un espacio interior. Se concluye que este tipo de análisis exploratorio previo permite una precisa selección de variables y niveles de las mismas.

Palabras clave: iluminación natural, modelo predictivo, transmitancia visible, área vidriada, orientación de fachada.

INTRODUCCIÓN

Conocer con precisión la cantidad y distribución de la luz que ingresa a un edificio es de fundamental importancia (Reinhart, 2020). Una evaluación del rendimiento de la luz natural en la etapa inicial de proyecto es esencial para el diseño y la optimización de la morfología de un edificio, debido a su impacto en el consumo de energía y las condiciones lumínicas de los ambientes interiores (He et al., 2021). Existen diversos métodos para analizar estrategias de diseño de edificios y pueden dividirse en tres categorías: (i) modelado a escala, (ii) cálculos manuales y (iii) simulaciones por computadora (Ngarambe et al., 2022). De todos ellos, este último es el método más usado en la actualidad por los profesionales del medio. Sin embargo, la simulación por computadora presenta desafíos en el contexto profesional de la región: (i) adquisición de equipos con altas prestaciones de procesamiento y almacenamiento (requerimientos técnicos), (ii) adquisición de programas privativos de licencias anuales renovables, (iii) conocimiento de lenguaje de programación (código o seudo-código) para la implementación de métodos y flujo de trabajo, (iv) prolongados tiempos de ejecución y cálculo, principalmente en técnicas avanzadas de precisión como trazado de rayos o raytracing. Esto conduce a que arquitectos, ingenieros y diseñadores de sistemas de iluminación –natural y artificial-, no sean alentados a buscar soluciones energéticamente eficientes que potencien el uso de la luz natural para iluminar espacios interiores durante las horas diurnas (Monteoliva et al., 2014).

En este escenario, surge la necesidad de desarrollar metodologías para el cálculo de indicadores que preferentemente no requieran de entornos de simulación para su cálculo, y a la vez sean representativos del comportamiento dinámico de la luz natural. A nivel mundial, se está haciendo un

gran esfuerzo por transferir los resultados de los estudios, respecto a calidad de iluminación y confort de los usuarios, a normativas o recomendaciones, indicadores y herramientas simplificadas. Esto tiene por objetivo permitir la efectiva implementación de estrategias y tecnologías que reduzcan los consumos de energía y mejoren las condiciones de confort, por parte de los proyectistas. Puntualmente, respecto a la iluminación natural, se ha focalizado en el desarrollo de métricas dinámicas de luz natural (Mardaljevic et al., 2017; IES, 2012) y modelos que permitan calcular de manera simplificada los índices que caracterizan el comportamiento dinámico de la iluminación natural (Li et al., 2024; Monteoliva et al., 2016).

Ante esta problemática, en estudios previos a este trabajo, integrantes del grupo de Iluminación Natural Sustentable del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE - CONICET) propusieron un modelo simplificado para el cálculo predictivo de la iluminancia por luz natural útil ($UDI_{100-2000lx}$), para locales perimetrales individuales bajo condiciones de cielo claro para la ciudad de Mendoza, Argentina (Monteoliva et al., 2016), a partir del conocimiento del área y la orientación de la ventana. Actualmente, este modelo está incorporado a la aplicación móvil AppUDI v.1.0 (Aceña et al., 2016).

Con el objetivo de robustecer el modelo predictivo desarrollado previamente, se realizaron nuevas simulaciones de iluminación natural dinámica ampliando la matriz de variables que considera el modelo respecto al tipo de cielo, la orientación, el área vidriada y la transmitancia visible del vidrio (τ_v), lo que resultó en un total de 207036 condiciones lumínicas analizadas mediante simulación por computadora. Como primer paso en el análisis de los datos generados, este trabajo ofrece un análisis descriptivo-exploratorio de los valores de iluminancia producidos por simulación dinámica de luz natural para verificar la pertinencia de la matriz de variables y los niveles preestablecidos, previo al desarrollo del nuevo modelo.

METODOLOGÍA

La metodología se divide en cuatro bloques principales: (i) selección de variables de análisis, (ii) métricas dinámicas de iluminación natural, (iii) simulaciones de luz natural y (iv) análisis matemático.

Selección de variables de análisis

En la Tabla 1 se expone la matriz de análisis obtenida a partir de las variables y los niveles de las mismas consideradas para el desarrollo del modelo (inputs): *orientación de la fachada*, *área vidriada* y *transmitancia visible del vidrio* (τ_v). Asimismo, este análisis se desarrolló para nueve ciudades distintas de la Argentina, a partir del uso de bases climáticas, sensibilizando el modelo a distintas *condiciones de cielo*. Además, se exponen en la Tabla 1 las métricas dinámicas utilizadas para evaluar esas condiciones lumínicas que surgen de la combinatoria de las variables de análisis (outputs).

Tabla 1: Matriz de análisis.

inputs				Condición de cielo	Métrica dinámica		
Ventana (centro 0,0)		τ_v					
Tamaño	Orientación (°)						
Alto (m)	Ancho (m)	0.5 m a 3 m cada 0.05m	0.5 m a 4 m cada 0.05m	0° a 350° cada 10°	0.1 a 0.9 cada 0.1	Mendoza, Bahía Blanca, Comodoro Rivadavia, Córdoba, Buenos Aires, Salta, Bariloche, Resistencia, Neuquén	DA, sDA, UDI y sUDI

-*Condición de cielo.* Con la finalidad de considerar un amplio rango de disponibilidad de irradiancia solar horizontal global media de la región se seleccionaron nueve ciudades argentinas distribuidas en el territorio nacional. Este criterio se basa en que la disponibilidad de radiación es la variable climática que influye principalmente en la disponibilidad de iluminancia. En la Figura 1 se expone el mapa de Argentina con la distribución de irradiancia solar horizontal global media y las ciudades seleccionadas. Para la simulación se emplearon archivos climáticos EPW correspondientes a cada una de ellas:

Mendoza (Mza), Bahía Blanca (BB), Comodoro Rivadavia (CR), Córdoba (Cba), Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), Salta (S), Bariloche (B), Resistencia (R) y Neuquén (N).

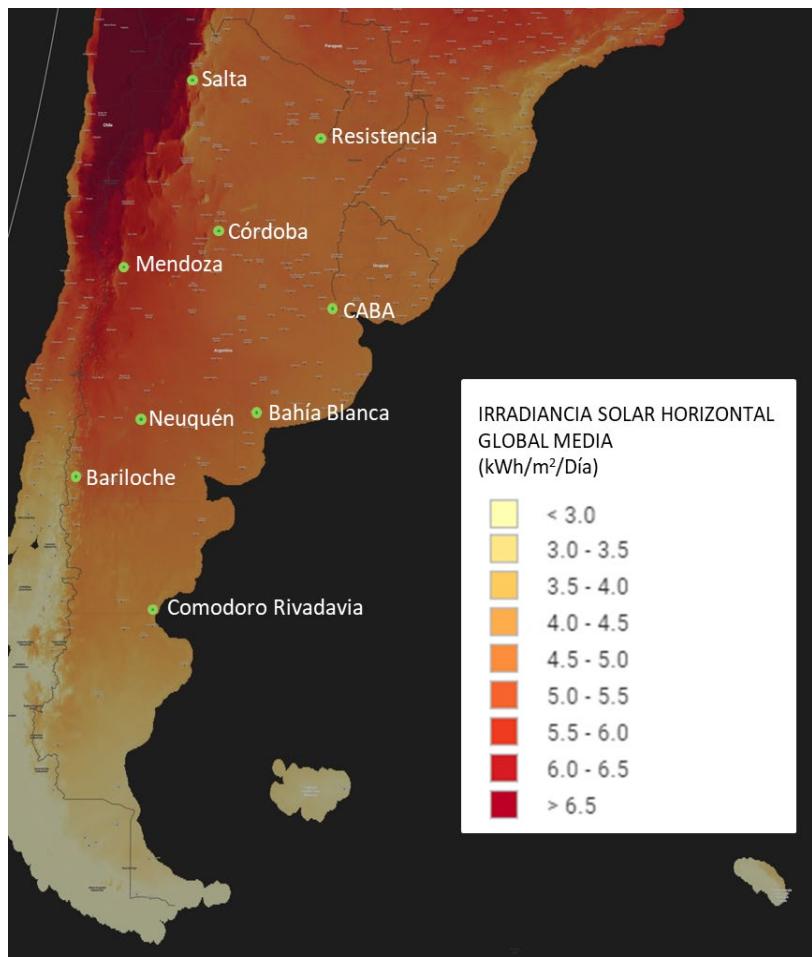


Figura 1: Mapa de irradiancia solar horizontal global media (fuente NREL, 2024) con las ciudades seleccionadas.

Es importante destacar en este punto que la zonificación bioambiental Argentina propuesta en la Norma: IRAM 11603:2012 “Clasificación bioambiental de la República Argentina” (IRAM, 2012) plantea una agrupación del territorio argentino en seis zonas de acuerdo a variables térmicas, lo cual permite avanzar sobre análisis del balance térmico de los edificios. Sin embargo, esta clasificación no es óptima para el estudio del desempeño lumínico de los edificios (Fonseca et al., 2017). Es por este motivo que se decidió trabajar con la irradiancia solar horizontal global media como criterio de selección de las localidades, para incluir distintos tipos de cielo del territorio nacional.

-*Orientación de la fachada.* Esta variable se definió de acuerdo al azimut de la ventana cada 10°, entre 0° y 350°. Siendo la orientación norte 180° y la sur 0°. Cabe destacar que el modelo desarrollado previamente presentaba esta variable con un paso de 30°.

-*Área vidriada.* Esta variable se definió de acuerdo al alto y ancho de la ventana. La abertura está centrada respecto del muro y tiene un crecimiento escalar cada 0.05 m en ancho y alto, comenzando en 0.5 m x 0.5 m (0.25 m²). Lo que resulta siempre en una abertura cuadrada. Esta decisión se basa en los resultados obtenidos previamente (Monteoliva et al., 2016), donde se observó que no hay diferencias significativas entre las diversas disposiciones de la ventana (horizontal, vertical y escalar). Al alcanzar los 3 m x 3 m (9 m²) la abertura continúa aumentando sólo en ancho (ejemplo: 3 m de alto x 3.05 m de ancho), por tener la fachada del modelo geométrico 4 m de ancho por 3 m de alto (12 m²).

-*Transmitancia visible del vidrio.* Esta variable se definió cada 10% de τ_v , comenzando en 10% ($\tau_v = 0.1$) y finalizando en 90% ($\tau_v = 0.9$). El modelo anterior se había ejecutado con un sólo valor de τ_v

(89%), correspondiente al vidrio claro simple, sin embargo, en la actualidad la disponibilidad de distintos tipos de vidrios, films y sistemas de avenanamientos (doble vidriado e incluso triple vidriado) requiere incorporar más niveles a la variable para sensibilizar el modelo.

La ampliación de esta variable se basa en estudios previos desarrollados por los autores (Villalba et al., 2017) donde se analizan los valores de τ_v más frecuentes de los productos de acristalamientos. A partir de este estudio se pudo determinar cuáles son los valores más frecuentes de τ_v para los productos de cerramientos transparentes disponibles. Los resultados obtenidos muestran para los valores de τ_v de 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8 una frecuencia porcentual que varía del 10.2% al 13.6%. Esta frecuencia se incrementa para la transmitancia 0.9 alcanzando un 16.2% del total, y disminuye por debajo del 10% para las transmitancias 0.1, 0.2 y 0.3. Si bien individualmente las transmitancias por debajo del 0.4 representan menos del 10% de las superficies transparentes, la sumatoria de las tres (0.1, 0.2 y 0.3) alcanzan el 20% de los tratamientos de vidriado. Además, es importante considerar que en muchos casos estas superficies transparentes se emplean de manera combinada (doble y triple vidriado) por lo que valores de τ_v inferiores al 30% son muy frecuentes. Por este motivo se toma la decisión de trabajar con el rango de τ_v del 0.1 al 0.9, con un incremento de 0.1.

-*Métricas dinámicas de iluminación natural.* Respecto a la caracterización del comportamiento ambiental de la iluminación natural, un aspecto fundamental, es el paradigma dinámico de la iluminación natural (Reinhart et al., 2006; Mardaljevic, 2017), particularmente significativo en las regiones con cielo claro. Este enfoque permite obtener resultados anuales del comportamiento lumínico de un espacio -métricas dinámicas-, en contraposición con el paradigma estático basado en datos puntuales -iluminancias en un determinado momento del año-.

Para el análisis de la luz natural se consideraron dos métricas y sus versiones espaciales. La selección de estas métricas permite, por un lado, detectar la disponibilidad de iluminación natural y, por otro lado, identificar el porcentaje de ocurrencia de valores de iluminancia dentro de un rango aceptable. Las mismas se detallan a continuación:

-*Autonomía de la luz natural* (DA del inglés *Daylight Autonomy*) es el porcentaje de las horas ocupadas del año en las que el requisito mínimo de iluminancia en el sensor se satisface únicamente con luz natural (Reinhart et al., 2006). Esta métrica incorpora la distribución espacial mediante la *Autonomía espacial de luz natural* (sDA200/50% del inglés *Spatial Daylight Autonomy*), que determina la suficiencia de iluminación natural para un área determinada, informando el porcentaje de superficie que supera un nivel de iluminación especificado (200 lx) más del 50% de la cantidad determinada de horas anuales (IES, 2012).

-*Iluminancia por luz natural útil* (UDI del inglés *Useful Daylight Illuminance*) es la ocurrencia anual de iluminancias, en todo el plano de trabajo, que se encuentran dentro de un rango considerado "útil" por los ocupantes (Mardaljevic et al., 2017). El rango de iluminancia aceptable seleccionado en este trabajo es el fijado por Nabil et al. (2006): entre los 200 - 2000 lx. Esta métrica incorpora la distribución espacial mediante la *Iluminancia espacial por luz natural útil* (sUDI, del inglés *Spatial Useful Daylight Illuminance*), que determina la suficiencia de iluminación natural para un área determinada, informando el porcentaje de superficie que se encuentra en el rango de iluminación especificado durante más del 50% de la cantidad determinada de horas anuales ($sUDI_{200-2000,50\%}$).

Simulaciones de iluminación natural

-*Modelo virtual.* El espacio modelado corresponde a una oficina típica (6x4 m; h= 3 m) con ventana unilateral centrada respecto del muro (0,0). La caracterización óptica de las superficies del espacio interior, se realizó de acuerdo a los valores típicos de reflectancia difusa: pared 60%, techo 80%, piso 30% (CIBSE, 2015). El software *Radiance* (Ward y Shakespeare, 1998) fue el motor de cálculo de las simulaciones de iluminación natural. Esta herramienta ha sido empleada y validada ampliamente en las últimas décadas por la comunidad científica (Mardaljevic, 1999; McNeil y Lee, 2013).

-*Parámetros de simulación.* Los parámetros de simulación empleados corresponden a una escena simple con elementos transparentes y opacos; y sin elementos complejos de iluminación natural (Mardaljevic, 1999): (ab) 5; (ad) 1000; (as) 100; (aa) 0.1; (ar) 300; (dt) 0; (ds) 0

-*Archivo de ocupación del espacio.* Se generó en un archivo de ocupación del espacio de acuerdo al horario de uso más frecuente de las oficinas ubicadas en edificios no residenciales: lunes a viernes de 8:00 a 18:00.

Análisis matemático

La principal herramienta utilizada para el análisis de los datos es la exploración gráfica de las relaciones entre las métricas de disponibilidad de luz natural y las variables consideradas, a través de diagramas de dispersión. Estos diagramas nos permiten visualizar relaciones entre las variables estudiadas y responder fácilmente preguntas sobre el impacto de las variables consideradas en el estudio en las métricas dinámicas de iluminación natural.

RESULTADOS

Por un lado, el análisis de los gráficos de distribución de frecuencia (Figura 2), que consideran las variables condición de cielo, área vidriada y τ_v del vidrio, nos permiten afirmar que las variables área vidriada y τ_v del vidrio tienen impacto en las métricas dinámicas de iluminación natural analizadas (DA, sDA, UDI y sUDI), lo cual significa que influyen en la disponibilidad de luz natural en el interior del espacio. Por otro lado, a priori detectamos que la variable condición de cielo afecta el desempeño de las métricas dinámicas de iluminación natural en los escenarios analizados de manera más atenuada. Es decir que no modifica la morfología de las curvas, sin embargo, produce un leve desplazamiento ascendente o descendente de los valores que toman las métricas, que responde a la mayor o menor disponibilidad de radiación solar de la ciudad analizada. Debido a la cantidad de tipos de cielos analizados, la similitud en los resultados de este primer análisis y la extensión de la publicación, se decide graficar a modo de ejemplo solo 3 ciudades que podemos clasificar como extremas e intermedias (Figura 2). A continuación, se analizarán los resultados obtenidos en las métricas dinámicas respecto a las variables área vidriada y τ_v del vidrio bajo diferentes condiciones de cielo (ciudades).

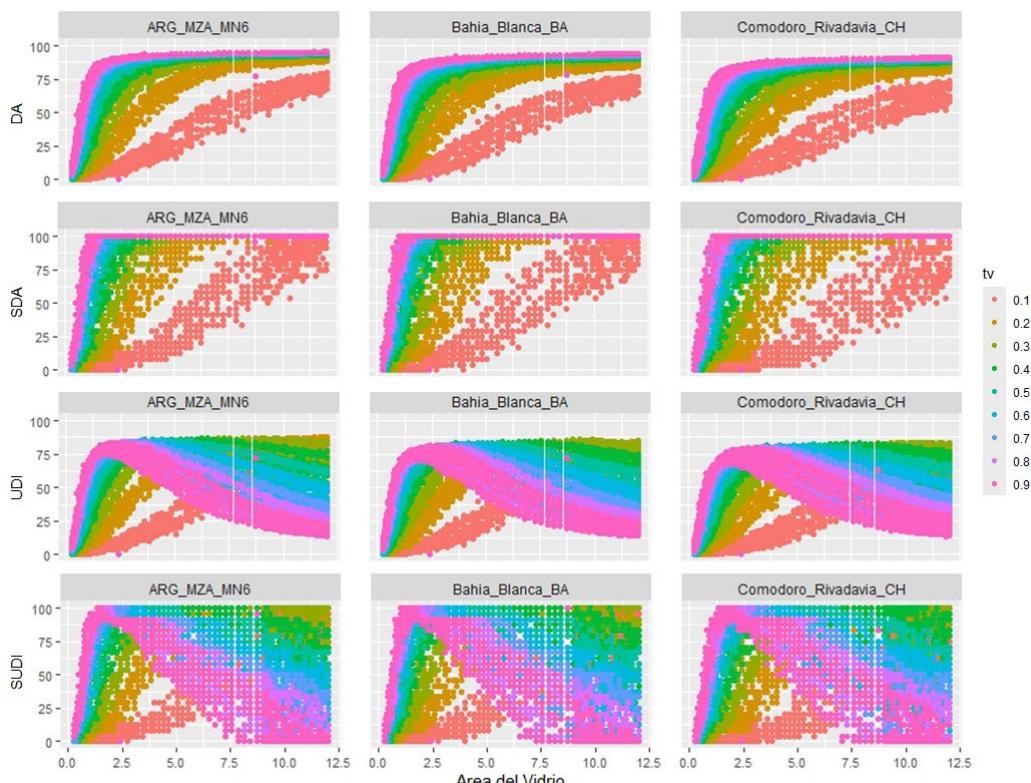


Figura 2: Diagrama de dispersión de las métricas dinámicas en función del área vidriada, según ciudad (tipo de cielo) y transmitancia.

Específicamente, respecto al DA₂₀₀ (Figura 2) en todas las ciudades -condiciones de cielo- observamos una relación tendiente a logarítmica para las τ_v entre 0.2 a 0.9 sin embargo, esta distribución toma una

apariencia lineal para las τ_v de 0.1. Este comportamiento mostraría que para las τ_v superiores o iguales a 0.2, cuando el área vidriada es superior a 7.5 m^2 , el DA₂₀₀ se estabiliza y supera en todos los casos el 75%. Mientras que para τ_v del orden del 0.1 no se alcanza esta saturación.

La sDA_{200,50%} (Figura 2) presenta relaciones menos compactas y que alcanzan valores de saturación ($sDA_{200,50\%} = 100\%$) cuando el área vidriada es de aproximadamente 6.5 m^2 para $\tau_v \geq 0.2$. A diferencia del DA₂₀₀, para valores de τ_v de vidrio de 0.1 hay algunas condiciones en las que la métrica satura. Resulta importante recordar que mientras que el DA₂₀₀ representa el porcentaje de las horas en que se supera un nivel de iluminación especificado, el sDA_{200,50%} indica el porcentaje de superficie que supera un nivel de iluminación especificado durante una cantidad determinada de horas anuales (en este caso el 50% de las 3650 horas analizadas).

Respecto al UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ (Figura 2) observamos nuevamente relaciones escalonadas que no modifican la forma de la curva de manera contundente de acuerdo al tipo de cielo. Como se expuso previamente el UDI es una métrica que identifica valores dentro de un rango (200 a 2000 lx), siendo su objetivo detectar condiciones donde la disponibilidad de luz es suficiente pero no excesiva, reduciendo potenciales condiciones de deslumbramiento. Esto explica el comportamiento que observamos en el diagrama de dispersión, donde las relaciones alcanzan valores máximos en distintos puntos, de acuerdo a la dinámica conjunta del área de vidriado y la τ_v de vidrio, y luego comienzan a descender (Figura 5). Esto se debe a que para esas combinaciones de área de vidriado y τ_v de vidrio los valores de iluminancia comienzan a ser excesivos (por encima de los 2000 lx) y, por lo tanto, el periodo de tiempo en el que el espacio se encuentra dentro del rango útil ((200 a 2000 lx) comienza a reducirse. Siendo los descensos anticipados y más acentuados para los valores de τ_v de vidrio más elevados.

En el sUDI_{200-2000,50%} (Figura 2), nuevamente, observamos que, al avanzar sobre el análisis espacial de la métrica, las relaciones se presentan menos compactas pero el comportamiento es similar al UDI₂₀₀₋₂₀₀₀. Sin embargo, es interesante considerar que para esta métrica los valores más elevados de τ_v de vidrio analizados (0.8 y 0.9) presentan condiciones con valores iguales o próximos al 0%, para áreas de vidrio $> 7.5 \text{ m}^2$. Esto implica que para valores altos de τ_v de vidrio y áreas de vidrio superiores a 7.5 m^2 el porcentaje de superficie que se encuentra entre los 200 y 2000 lx durante el 50% de las horas analizadas es igual a cero. Esto se debe claramente al exceso de radiación solar visible.

Con el objetivo de profundizar en el análisis del impacto de la variable *condición de cielo* en las condiciones de iluminación natural (DA₂₀₀, sDA_{200,50%}, UDI₃₀₀₋₂₀₀₀, sUDI_{300-2000,50%}) se realizó la prueba de rangos de Kruskal-Wallis. Para todas las métricas analizadas se obtuvieron *p*-valores muy pequeños, inferiores a 0.00001. En consecuencia, se infiere que hay diferencia significativa en la distribución de las variables de DA₂₀₀, sDA_{200,50%}, UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ y sUDI_{200-2000,50%} en al menos dos de los niveles de la variable condición de cielo. Para identificar en cuáles niveles de la variable condición de cielo tienen diferencias significativas, se realizan comparaciones de a pares a través de la prueba de rangos de Wilcoxon, ajustando el nivel de significación con el método de Bonferroni. Por la extensión del presente trabajo se muestran a modo de ejemplo el caso del UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ y del sUDI_{200-2000,50%}. Los rectángulos coloreados en la Tabla 2 y en la Tabla 3 identifican los niveles en los que no hay diferencias significativas, tomando como nivel de significación $\alpha = 0.05$.

Tabla 2: Niveles de la variable condición de cielo (ciudad) en los que la distribución de la variable UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05

	Mendoza	Bahía Blanca	Comodoro	Córdoba	CABA	Salta	Bariloche	Resistencia
Bahía Blanca								
Comodoro								
Córdoba								
CABA								
Salta								
Bariloche								
Resistencia								
Neuquén								

Tabla 3: Niveles de la variable condición de cielo (ciudad) en los que la distribución de la variable $sUDI_{200-2000,50\%}$ no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05

	Mendoza	Bahía Blanca	Comodoro	Córdoba	CABA	Salta	Bariloche	Resistencia
Bahía Blanca								
Comodoro								
Córdoba								
CABA								
Salta								
Bariloche								
Resistencia								
Neuquén								

En general observamos que algunas condiciones de cielo se agrupan, sobre todo en las métricas espaciales ($sDA_{200,50\%}$ y $sUDI_{200-2000,50\%}$). Sin embargo, no es algo que sea extensivo en todas las métricas consideradas. Por lo que concluimos que es necesario incorporar al modelo la variable condición de cielo con todos los niveles analizados (ciudades).

En relación a la variable *orientación de la fachada* observamos a priori que su impacto en la disponibilidad de la luz natural en el interior del espacio analizado no es tan evidente como el observado para las variables área de vidrio y τ_v (Figura 3, 4, 5 y 6). Sin embargo, resulta interesante considerar que los valores de DA_{200} y $DA_{200,50\%}$ para las orientaciones próximas al norte (entre 150° y 210°) (Figuras 3 y 4), cuando la $\tau_v < 0.3$, se despegan de los demás valores, ubicándose en la parte superior de la misma. Lo que implica que para valores bajos de τ_v la disponibilidad de radiación es más sensible a la orientación de la abertura. En ambas métricas detectamos, además, que los valores se agrupan de manera más compacta a medida que aumenta la τ_v . Esto se debe en el caso del DA_{200} a que a medida que crece la τ_v , cada vez más escenarios alcanzan el valor mínimo de 200 lx exigidos. Mientras que en el caso del $sDA_{200,50\%}$ a mayores τ_v es más elevado el porcentaje de superficie que supera los 200 lx el 50% del tiempo analizado.

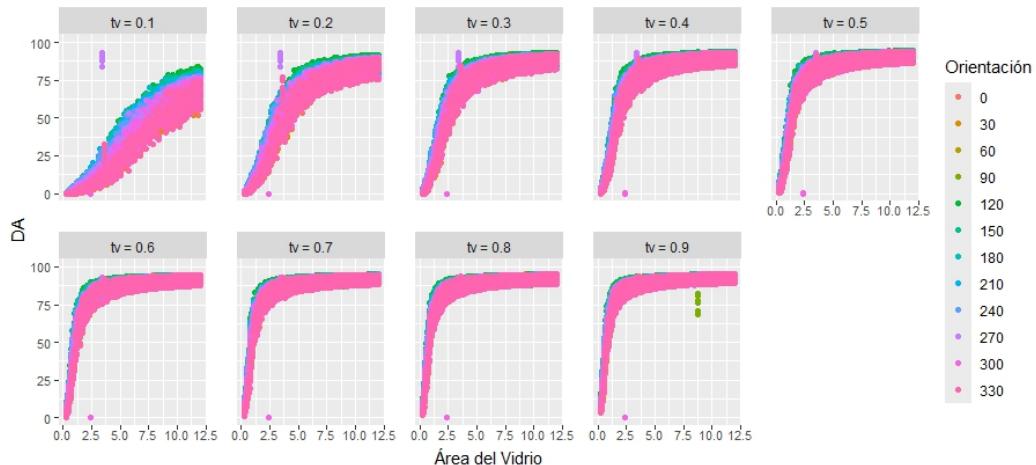


Figura 3: Diagrama de dispersión de la métrica DA_{200} en función del área vidriada, según transmitancia y orientación de la fachada

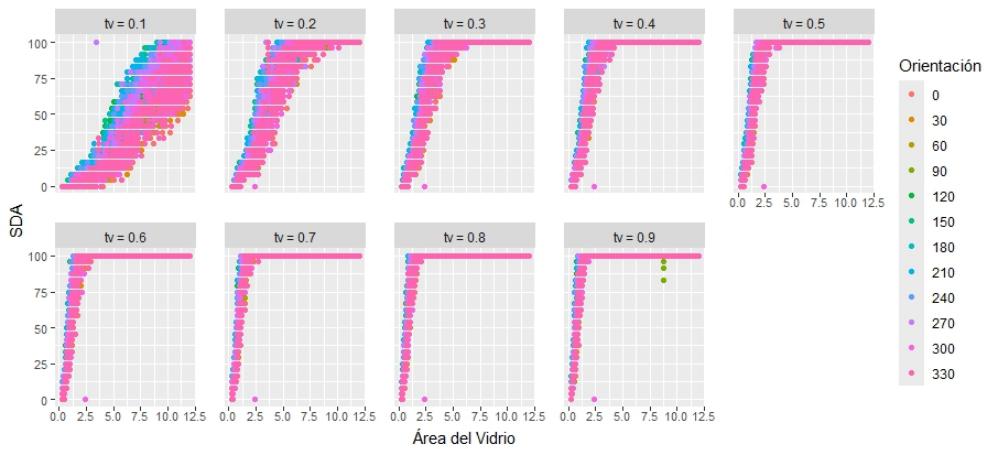


Figura 4: Diagrama de dispersión de la métrica $sDA_{200,50\%}$ en función del área vidriada, según transmitancia y orientación de la fachada.

Respecto al $UDI_{200-2000}$ y al $sUDI_{200-2000,50\%}$ (Figura 5 y 6), observamos que son las mismas orientaciones que en el DA_{200} y $DA_{200,50\%}$ las que diferencian su comportamiento, de manera moderada. Sin embargo, para estas métricas la τ_v se comporta de manera similar al DA_{200} o $DA_{200,50\%}$ cuando es de 0.1, donde los escenarios más próximos al norte presentan valores más elevados. Esta condición se invierte progresivamente a medida que crecen los valores de τ_v para áreas de vidriado superiores. Esto claramente se debe a la característica de estas métricas que presentan un umbral superior de iluminancia (2000 lx).

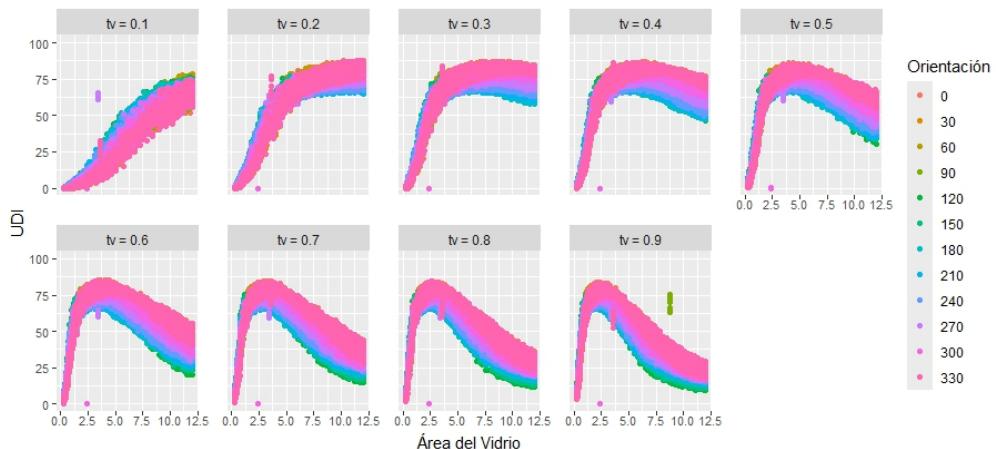


Figura 5: Diagrama de dispersión de la métrica $UDI_{200-2000}$ en función del área vidriada, según transmitancia y orientación de la fachada.

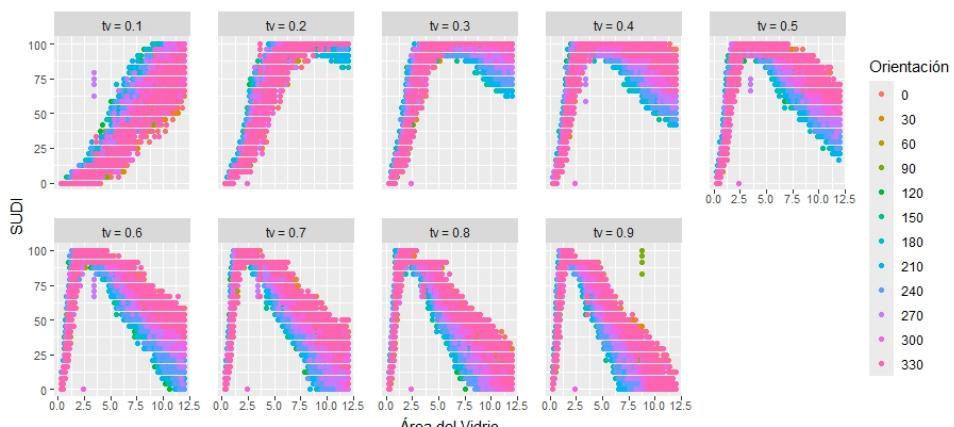


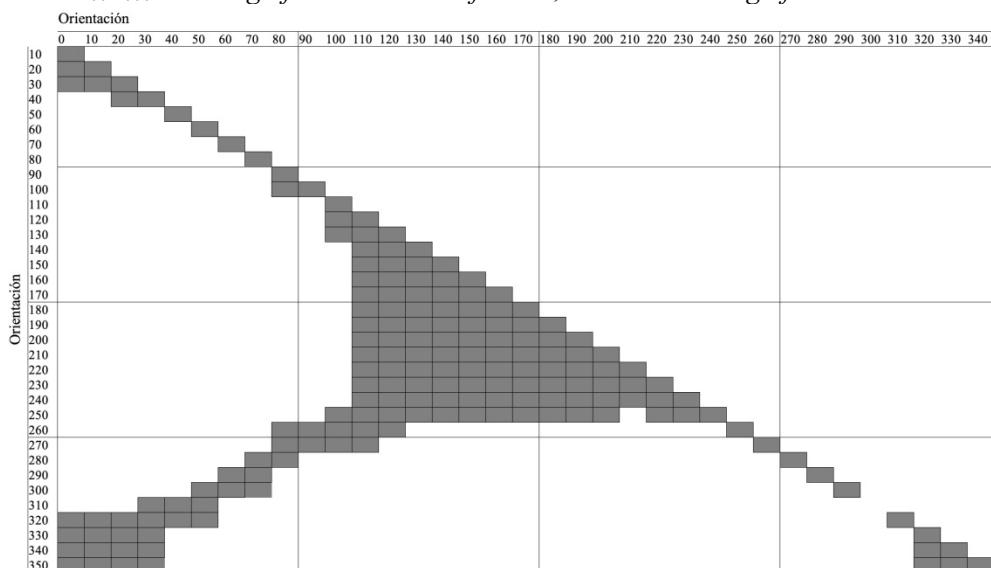
Figura 6: Diagrama de dispersión de la métrica $sUDI_{200-2000,50\%}$ en función del área vidriada, según transmitancia y orientación de la fachada

Con el objetivo de profundizar el análisis del impacto de la variable *orientación* en las métricas dinámicas de iluminación natural se realizó nuevamente la prueba de rangos de Kruskal-Wallis. Para todas las métricas analizadas se obtuvieron *p*-valores inferiores a 0.00001. En consecuencia, se concluye que hay diferencia significativa en la distribución de las variables DA₂₀₀, DA_{200,50%}, UDI₂₀₀₋₂₀₀₀, UDI_{200-2000,50%} en al menos dos de los niveles de la variable orientación. Para identificar las diferencias significativas en los niveles de la variable orientación, se realiza una nueva prueba de rangos de Wilcoxon. El nivel de significación fijado es de $\alpha = 0.05$. A título ilustrativo se exponen el caso del UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ (Tabla 4), siendo los resultados muy similares para las cuatro métricas analizadas. A modo de ejemplo, se realiza la interpretación de algunos pares de niveles:

-La distribución de la variable UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ en el nivel de Orientación 0 no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05, a la distribución en los niveles de orientación 10, 20, 30, 320, 330, 340 y 350.

-La distribución de la variable UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ en el nivel de Orientación 10 no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05, además de lo enunciado antes, a la distribución en los niveles de orientación 20, 30, 320, 330, 340 y 350.

Tabla 4: Niveles de la variable orientación de la fachada en los que la distribución de la variable UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05.



El resultado general de este análisis detallado nos permite visualizar la posibilidad de agrupar esta variable de acuerdo a la distancia al norte (180°), ya que se observa un comportamiento similar de la métrica UDI₂₀₀₋₂₀₀₀ en los niveles de la variable orientación que se encuentran a distancias similares al nivel 180°.

Este mismo análisis se condujo para cada una de las métricas consideradas en el estudio con la finalidad de determinar cuántas condiciones de cielo y orientaciones diferentes es necesario contemplar para la ejecución del modelo. Resulta importante tener en cuenta que estas pruebas consideran los valores de las métricas solamente respecto de una variable, orientación o condición de cielo.

CONCLUSIONES

Este trabajo desarrolla un análisis descriptivo-exploratorio preliminar de los datos de iluminancia – mediados por métricas dinámicas de iluminación natural- para el desarrollo de un nuevo modelo predictivo regional de la disponibilidad de luz natural en locales perimetrales individuales (oficina típica). Considera una matriz de análisis de cuatro variables como datos de entrada o *input* (orientación de la fachada; área vidriada; transmitancia visible del vidrio; tipo de cielo) y cuatro métricas dinámicas como datos de salida u *output* (DA₂₀₀, DA_{200,50%}, UDI₂₀₀₋₂₀₀₀, UDI_{200-2000,50%}).

La principal conclusión a la que se llega con la presente investigación es que las variables área vidriada y transmitancia visible del vidrio claramente tienen un impacto en las métricas dinámicas empleadas para conducir el análisis de desempeño de la luz natural en un espacio interior. Asimismo, concluimos que para la variable condición de cielo tenemos que considerar todos los casos analizados, debido a que incrementa o disminuye el valor que toman las métricas estudiadas. Finalmente, respecto a la orientación surge la posibilidad de reagrupar de acuerdo a la distancia al norte, lo que reduciría la cantidad de valores que toma esta variable en el modelo.

Concluimos, además, que es importante considerar para la construcción del modelo predictivo métricas que evalúen distintos parámetros. Como se observa en este trabajo las métricas analizadas son sensibles de manera diferenciada a las variables estudiadas. Por ejemplo, las métricas que implican espacialidad (sDA y sUDI) son menos sensibles a la disponibilidad de radiación solar. Al profundizar en la respuesta de las distintas métricas dinámicas, se observa con claridad que será necesario desarrollar un modelo sensible a cada una de ellas, que refleje con precisión las diferencias de comportamiento detectadas.

Si bien este trabajo es de carácter exploratorio preliminar, ofrece resultados favorables a considerar en la construcción del nuevo modelo predictivo. Este análisis nos permite avanzar sobre la selección de técnica estadísticas adecuadas para la construcción del modelo y en una precisa selección de variables y niveles de las mismas.

Finalmente, se detectan potenciales áreas para el desarrollo de futuros trabajos, entre las que se destaca avanzar sobre una zonificación de iluminación natural para Argentina. Un insumo fundamental para este estudio es el Atlas de energía solar de la República Argentina (Grossi Gallegos y Righini, 2007) donde se dispone de datos de irradiación solar global y de heliofanía efectiva de la República Argentina, indispensables para la construcción de la mencionada zonificación. Asimismo, y como principal trabajo a futuro se prevé, una vez construido el modelo, el desarrollo de una nueva aplicación móvil similar a la desarrollada en la primera versión del mismo (Aceña et al., 2016).

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

-ANPCYT: PICT 2019-04356 Desarrollo de indicadores y métricas de Iluminación natural integrativa en climas soleados para el diseño de ambientes visuales productivos, confortables y saludables; - CONICET: PIBAA 28720210100031CO. Luz natural en aulas. Uso de sistemas de inmersión de realidad virtual para la evaluación de las condiciones de luz natural y el desempeño atencional de niños.

REFERENCIAS

- Aceña A., Montoliva JM., Villalba A. (2016). "AppUDI v1.0." Número de registro: 5290835. Ministerio de Justicia y Derechos Humanos, Dirección Nacional de Derecho de Autor.
- CIBSE. (2015). AM11: Building Performance Modelling. London.
- Fonseca RW., Fernandes FFDA. y Ruttkay Pereira E. (2017). Zoneamento bioclimático referente à iluminação natural para o território brasileiro. En: XIV ENCAC-Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, X ELACAC-Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Anais. Balneário Camboriú, pp.1889-1898.
- Grossi Gallegos H. y Righini, R. (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina.
- He Q., Li Z., Gao W., Chen H., Wu X., Cheng X. y Lin B. (2021). Predictive models for daylight performance of general floorplans based on CNN and GAN: A proof-of-concept study. *Building and Environment*, 206, 108346.
- IES. (2012). Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). IES LM-83-12. 2012.
- IRAM. (2012). Norma: IRAM 11603:2012 Clasificación Bioambiental de La República Argentina.

- Li X., Yuan Y., Liu G., Han Z. y Stouffs R. (2024). A predictive model for daylight performance based on multimodal generative adversarial networks at the early design stage. *Energy and Buildings*, 305, 113876.
- Mardaljevic J. (1999). Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients. Tesis Doctoral. De Montfort University Leicester, UK.
- Mardaljevic J. (2017). [en línea] Climate-Based Daylight Modelling. Dirección URL: <<http://climate-based-daylighting.com/doku.php?id=academic:climate-based-daylight-modelling>> [consulta: 8 de agosto de 2024]
- McNeil A. y Lee E. (2013). A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. *Journal of Building Performance Simulation*, 6, 1, 24-37.
- Monteoliva J., Villalba A. y Pattini A. (2014). Uso de dispositivo de control solar en aulas: impacto en la simulación dinámica de la iluminación natural. *Ambiente Construido*, 14, 3, 43-58.
- Monteoliva JM., Villalba A., Aceña A. y Pattini A. (2016). Cálculo de iluminancia por luz natural útil (UDI) en espacios individuales perimetrales de cielos claros. *Revista Hábitat Sustentable*, 6:50-9.
- Nabil A. y Mardaljevic J. (2006). Useful Daylight Illuminances: A Replacement for Daylight Factors." *Energy and Buildings* 38, 7, 905–913.
- Ngarambe J., Adilkhanova I., Uwiragiye B. y Yun G. Y. (2022). A review on the current usage of machine learning tools for daylighting design and control. *Building and Environment*, 223, 109507.
- NREL. [en línea] NSRDB: National Solar Radiation Database. Dirección URL: <https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer> [consulta: 8 de agosto de 2024]
- Reinhart C. (2020). Daylighting Handbook I, 1^a edición. Building Technology Press, Cambridge, MA.
- Reinhart C., Mardaljevic J. y Rogers Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America* 3(1): 7–31.
- Villalba A., Monteoliva JM., Aceña A. y Pattini A. (2017). Determinación de los valores de transmitancia visible de una abertura necesarios para sensibilizar un modelo matemático para el cálculo de la iluminación natural interior. En: XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e X Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: habitat humano - em busca de conforto ambiental, eficiência energética e sustentabilidade no século XXI. Balneário Camboriú, pp. 1929-1937.
- Ward G. y Shakespeare R. (1998). Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization. Computer Graphics and Geometric Modeling Series. Createspace, Carolina del Sur.

DEVELOPMENT OF A REGIONAL PREDICTIVE MODEL OF DAYLIGHT AVAILABILITY IN INDOOR SPACES. PRELIMINARY DATA ANALYSIS.

ABSTRACT Accurately knowing the quantity and distribution of daylight entering a building is of fundamental importance. However, determining the behavior of daylight inside a space is not a simple task. In this context, and with the aim of strengthening a previously developed predictive model for calculating the availability of natural light in interior spaces, dynamic natural lighting simulations were carried out, expanding the matrix of variables considered in the original model with respect to sky type, orientation, glazed area, and visible transmittance of the glass. As a first step in the analysis of the generated data, this work offers a descriptive-exploratory analysis of the illuminance values produced by simulation to verify the relevance of the variable matrix and the preset levels, prior to the development of the new model. The main results indicate that the variables glazed area and visible transmittance of the glass clearly have an impact on the dynamic metrics used to drive the analysis of natural light performance in an interior space. It is concluded that this type of preliminary exploratory analysis allows for a precise selection of variables and their levels.

Keywords: daylighting, predictive model, visible transmittance, glazed area, façade orientation.