

ESTRATEGIAS DE DISEÑO DE ILUMINACIÓN NATURAL *para optimizar* VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO

*Daylighting design strategies to optimize social dwellings
located in a warm subhumid climate*

DORIS ABIGAIL CHI-POOL*, PALOMA TOM-LINARES**

Fecha de recibido:
28 Marzo 2024
Fecha de aceptado:
17 Junio 2024

*Universidad de las
Américas Puebla,
México
doris.chi@udlap.mx

**Universidad de las
Américas Puebla,
México
paloma.tomls@udlap.
mx

RESUMEN. El presente artículo evalúa la disponibilidad de la luz natural en prototipos de vivienda unifamiliar en clima cálido subhúmedo. La investigación incluyó el diseño arquitectónico de una vivienda de interés social a la cual se le implementaron adecuaciones de diseño para mejorar la provisión de luz natural. Mediante simulación computacional con software especializado, ClimateStudio via Grashopper, se exploraron soluciones de diseño como la ampliación de la altura del dintel de las ventanas en la fachada este y la implementación de estantes intermedios de luz natural, claraboyas, terrazas y voladizos. Los resultados anuales promedio demostraron un aumento del 15% en la Autonomía Espacial de Luz Natural y una reducción del 4% en la métrica Exposición Anual de Luz Solar, lo que permitió obtener 3 créditos en la certificación LEED V.4.1. Asimismo, se consiguió incrementar en 10% las iluminancias aceptables y reducir en un 11% las iluminancias no útiles asociadas al uso de la iluminación eléctrica. Se concluye que las estrategias de diseño de iluminación natural fueron efectivas para el caso de estudio analizado y se prevé ampliar el estudio para incluir otras orientaciones y climas de México. El flujo de trabajo para la simulación de iluminación natural es la principal aportación de este trabajo, ya que es un tema nuevo en México, que es importante de difundir con profesionales e investigadores para abrir nuevas líneas de estudio y optimizar el rendimiento lumínico de las viviendas de interés social.

Palabras clave: certificaciones de edificios verdes, estrategias de diseño, iluminación natural, simulación computacional, viviendas.

ABSTRACT. This article analyzed the daylight availability in a single-family dwelling prototype located in a warm subhumid climate. The research included the architectural design of the dwelling to further apply design strategies to improve the daylight provision. Through computer simulation with specialized software, ClimateStudio via Grashopper, different design solutions were explored such as increasing the height of the window lintel on the east façade and implementing intermediate light shelves, skylights, terraces and overhangs. Average annual results demonstrated a 15% increase in Daylight Spatial Autonomy and a 4% reduction in the Annual Daylight Exposure, leading to obtaining 3 credits in LEED V.4.1 certification. Likewise, acceptable illuminances were increased by 10% and non-useful illuminances associated with the use of electric lighting were reduced by 11%. It was concluded the effectiveness of the daylighting design strategies for the analyzed case study. Future research will focus on studying other orientations and climates of Mexico. The workflow to perform daylight simulations is the main contribution of this work, since it is a new topic in Mexico that is important to disseminate with professionals and researchers to open new research lines and to optimize the daylighting performance of low-income housing.

Key words: green building certifications, design strategies, daylight, computational simulations, dwellings.



a luz natural tiene múltiples beneficios en el ámbito de las edificaciones. Su uso como principal fuente de iluminación interior contribuye en la reducción del consumo de energía en iluminación artificial y en los sistemas de acondicionamiento (Zhen *et al.*, 2019). Esto significa que también puede contribuir significativamente en la reducción de las emisiones de carbono y a contrarrestar el calentamiento global (Alrubaih, 2013; Wong, 2017). La luz natural representa otras ventajas por sobre la luz artificial. Estudios demuestran que la iluminación eléctrica está asociada con el aumento de estrés en los usuarios y con desórdenes en los ritmos circadianos (Richard G. Stevens, 2013). En contraste, la luz natural contribuye a mantener una buena salud y el confort visual, a reducir la tristeza psicológica asociada al Trastorno Afectivo Estacional (Sapia, 2013), y a prevenir enfermedades asociadas a la falta de vitamina D (ej. psoriasis, osteoporosis, hipoparatiroidismo) y a la disrupción de los ritmos circadianos (ej. diabetes, obesidad, cáncer) (Siemann *et al.*, 2021).

La variación en intensidad, dirección y composición espectral que caracteriza a la luz natural tiene implicaciones biológicas y psicológicas positivas, i.e., producción de la vitamina D y hormonas como la serotonina (Mueller, 2013). Por otro lado, la provisión de luz natural representa la posibilidad de conexión con el ambiente exterior mediante visuales a través de vanos como ventanas y claraboyas. Estas vistas al exterior y la luz natural que ingresa a los espacios han demostrado ser cruciales en el confort de los usuarios (Matusiak, 2016). En edificios como las viviendas y los espacios de

trabajo, la exposición a la naturaleza mediante visuales al exterior es positiva y contribuye al bienestar emocional y al sentido de satisfacción y felicidad de las personas (Drobne, 2022; Kong *et al.*, 2022).

En México, la iluminación eléctrica representa el 40% de la energía consumida en la vivienda, según datos de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). En las viviendas particulares habitadas del país hay 226.4 millones de lámparas, de los cuales 84% son fluorescentes o LED, mientras que el 16.4% sigue siendo incandescente; en localidades rurales, la proporción de lámparas incandescentes crece al 30% (ENCEVI, 2018). Las recomendaciones de la CONUEE para el ahorro de energía en las viviendas se enfocan en la implementación de controles de intensidad de la iluminación eléctrica y automatización mediante tablets para el monitoreo y control de lámparas y electrodomésticos. Respecto al uso de la iluminación natural, las recomendaciones incluyen usar cortinas y persianas de manera efectiva para permitir el paso de la luz natural cuando sea necesario, instalar y mantener limpias las ventanas, domos y tragaluces, realizar actividades diarias durante el día y apagar la luz eléctrica cuando la luz natural sea suficiente (SENER & CONUEE, 2023).

Las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal estipulan que el área de las ventanas para iluminación no será inferior al 17.5% del área del local en todas las edificaciones. Sin embargo, esta norma es general y no se especifica por orientación; tampoco establece valores de iluminancia mínimos y máximos a alcanzar con luz natural. La NOM-025-STPS-2008 establece requerimientos de iluminación artificial mínimos (100-300lux) en áreas de trabajo, según la tarea visual a realizar. La NOM-008-ENER-2001 se refiere a la Eficiencia Energética en Edificaciones y se enfoca en reducir el consumo energético en edificios no residenciales.

Como se observa, los manuales y recomendaciones mexicanos no establecen parámetros cuantitativos sobre la provisión de la iluminación natural en las viviendas, es decir, las normas del país sólo hacen referencia a la iluminación

natural, pero no regulan valores absolutos, ej. mínimos y máximos de iluminancias de luz natural interior; por ello, usualmente se tiende a recurrir a estándares internacionales. Por tanto, es necesario desarrollar directrices de diseño arquitectónico de viviendas que permitan potenciar el uso de la luz natural sobre la artificial. Asimismo, es necesario desarrollar métodos y flujos de trabajo que permitan cuantificar los valores absolutos de iluminación natural que se proveen al interior de los espacios habitables.

Hoy existen herramientas computacionales que posibilitan el estudio de las condiciones variables del sol y cielo a lo largo del año. Mediante el uso de archivos climáticos, es posible caracterizar el clima luminoso de un sitio o latitud específica con base en los valores de iluminancia y radiancia recopilados y sintetizados estadísticamente para representar un año típico meteorológico. Los programas de simulación computacional, junto con los archivos climáticos, permiten calcular las denominadas métricas dinámicas que consisten en un valor único intuitivo que representa la cantidad de luz natural, según las condiciones prevaecientes durante un periodo de tiempo en un espacio determinado (Reinhart *et al.*, 2006). Las simulaciones computacionales consideran no sólo el clima anual, sino también la geometría del edificio, las propiedades de los materiales y las condiciones del contexto (Mardaljevic, 2015).

En espacios residenciales, las métricas dinámicas han probado ser de utilidad para describir la disponibilidad de la luz natural. Mardaljevic (2000) realizó estudios en edificios residenciales con varias configuraciones de ventanas y obstrucciones internas, en 8 orientaciones y 6 zonas climáticas, mediante simulación computacional con el software Radiance; al final, propuso un rango de iluminación natural útil autónoma de 500 a 2 500 lux por su contribución a la disminución del encendido de las luces eléctricas. Pellegrino & Lo Verso (2010) analizaron las orientaciones norte y sur, la profundidad del espacio, el tamaño de la ventana y las obstrucciones externas mediante simulaciones con Daysim y Radiance para considerar la variabilidad climática. Los resultados de su estudio apuntaron que la máxima demanda de energía coincide con la mínima

disponibilidad de luz natural y observaron que el consumo eléctrico en iluminación disminuye conforme el tamaño de ventana aumenta y la profundidad del espacio disminuye.

Sui *et al.* (2023) analizaron el rendimiento lumínico de claraboyas en edificios residenciales mediante simulación computacional con el software ClimateStudio. Los autores evaluaron la cantidad de luz natural utilizando métricas dinámicas como la Iluminancia de Luz Natural Útil (UDI, Useful Daylight Illuminance) y la Autonomía de la Luz Natural Espacial (sDA, spatial Daylight Autonomy); asimismo, analizaron la Uniformidad de la Luz Natural (Uo, Uniformity of Daylight) y el Deslumbramiento por Luz Natural (DGP, Daylight Glare Probability). Concluyeron su investigación con guías de diseño para arquitectos que permitan contemplar los efectos de la luz natural en la renovación de edificios residenciales, con el objetivo de mejorar el confort visual y reducir los consumos de energía en iluminación eléctrica.

Wang *et al.* (2020) caracterizaron la calidad de la luz natural en 400 departamentos residenciales, representativos de la vivienda pública típica en Hong Kong, mediante simulaciones con Radiance y archivos climáticos. Presentaron sus resultados mediante la métrica dinámica sDA, arrojando un promedio del 66% y un máximo de iluminancias de luz natural de 5624 lux. Los autores lograron correlacionar estos resultados de simulación con las respuestas de cuestionarios realizados a 340 residentes de las viviendas, donde identificaron que la iluminación natural en los departamentos es un factor con gran impacto en el nivel de satisfacción de los habitantes. Inclusive, identificaron que cantidades excesivas de luz natural no se correlacionaron con una menor satisfacción debido a un posible deslumbramiento.

Objetivos

La revisión de la literatura muestra la importancia de realizar estudios que permitan cuantificar y describir la disponibilidad de la luz natural, contemplando su variabilidad climática y estacional. En México, no se identificaron estudios similares previos, por lo que este artículo es pionero en investigar el rendimiento de la iluminación natural en clima cálido subhúmedo,

específicamente en prototipos de la vivienda típica en el país: “Poco más de la mitad de las viviendas particulares habitadas en México tiene hasta 160 m² de terreno, mientras que cerca de la mitad de las viviendas (41.3%) tiene entre 56 y 100 m² de construcción, 15.6% entre 100 y 150 m² de construcción” (INEGI *et al.*, 2020). Esta investigación incluye el desarrollo de una propuesta arquitectónica de vivienda unifamiliar de interés social. El objetivo es la optimización del diseño arquitectónico para una adecuada provisión de luz natural interior. Mediante simulación computacional, se exploran diferentes configuraciones de ventanas, claraboyas y estantes intermedios de luz natural para mejorar el rendimiento lumínico de la vivienda. El diseño arquitectónico que contempla estrategias bioclimáticas *a priori*, antes de construirse, puede significar un menor consumo de energía y una menor o nula inversión en una posterior rehabilitación energética. Asimismo, las estrategias de iluminación natural pueden traducirse en confort lumínico, calidad del aire interior y reducción de la huella de carbono.

METODOLOGÍA

El caso de estudio se describe en esta sección, junto con la metodología para la evaluación del rendimiento lumínico de la vivienda.

Caso de estudio

La propuesta de vivienda unifamiliar se ubicó en la ciudad de Mérida, Yucatán, latitud 20.937° N, con clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (CONAVI, 2022). En la figura 1 se observa que los picos de radiación solar suceden durante los meses de primavera y verano, alcanzando hasta 942.50 Wh/m² en abril; asimismo, revela que predominan el cielo parcialmente nublado y nublado durante todo el año (Betti *et al.*, 2023). La figura 2 muestra el terreno por intervenir, el cual se ubica en el sureste de la ciudad, zona caracterizada por la construcción masiva de viviendas de interés social. La lotificación del terreno incluyó 29 lotes de ~100m² cada uno. El prototipo de la vivienda se desarrolló en un lote de 102.15 m², con 163.05 m² de construcción. El diseño arquitectónico se desarrolló sobre el eje este-oeste, por lo que las fachadas principales se orientaron hacia estos dos puntos cardinales y las fachadas laterales norte y sur resultaron colindantes con otros lotes. La figura 3 muestra la distribución del programa arquitectónico de la vivienda prototipo, para la cual se consideró una altura interior de 3 m.

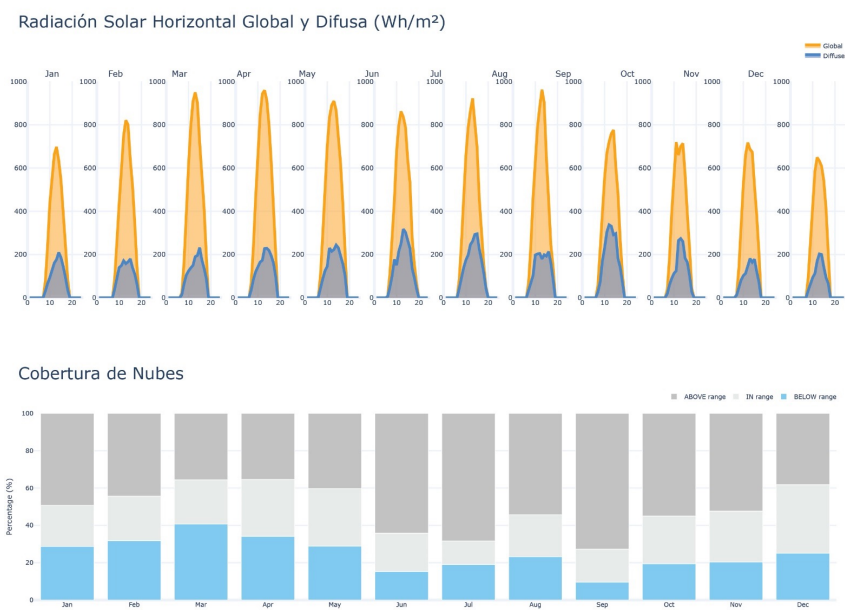


FIGURA 1. DATOS DE RADIACIÓN SOLAR Y NUBES EN MÉRIDA, YUCATÁN.

FUENTE: BETTI (*ET AL.*, 2023).

Lotificación

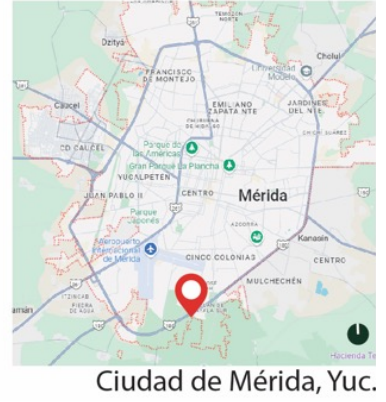
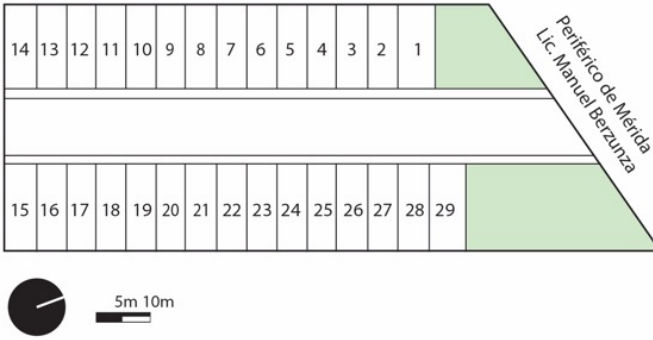


FIGURA 2. LOTIFICACIÓN Y CONTEXTO PARA EL DESARROLLO DE LA VIVIENDA.

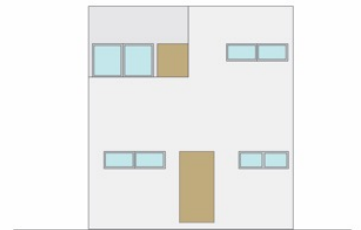
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.



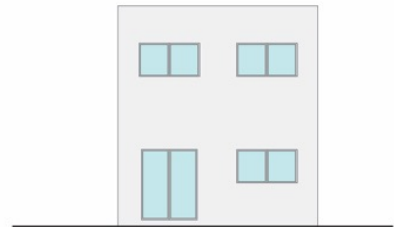
Planta baja



Planta alta



Fachada Oeste



Fachada Este

FIGURA 3. PLANOS ARQUITECTÓNICOS DEL CASO BASE: PROTOTIPO 1.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Simulación computacional

El cálculo lumínico se realizó con ClimateStudio (CS) vía Grasshopper. CS permite el análisis medioambiental del rendimiento lumínico y energético de los edificios, basado en los motores de cálculo Radiance y EnergyPlus, respectivamente. Asimismo, se utilizó el archivo climático EPW de Mérida, con información recopilada entre 1979 y 2021. A continuación, se describen los pasos para la simulación lumínica (figura 4).

1. Trasladar la geometría 3D de Rhinoceros a CS-Grasshopper, para la caracterización de los materiales, según sus propiedades ópticas y su función en la envolvente, por ejemplo: muros, losas, cancelería, etc. (tabla 1).

a. Los muros se modelan como volúmenes con grosor en Rhinoceros (esto es importante

para poder caracterizar adecuadamente las reflexiones y obstrucciones de la luz). A continuación, se importan en CS mediante el componente SL (SceneLayer) para la asignación del material según su reflectancia.

b. Los sistemas de acristalamiento se modelan como superficies planas y con dirección hacia el exterior en Rhinoceros. A continuación, se importan en CS mediante el componente W (Window) para la asignación del material en función de su transmitancia lumínica.

c. Los planos de cálculo deben ser modelados como superficies planas con dirección hacia arriba en Rhinoceros. Seguidamente, se trasladan a CS con el componente SG

(SensorGrid), para especificar la separación entre sensores y la altura respecto al piso (tabla 2). Asimismo, se determinan los objetivos de iluminancia útil, suplementaria, excesiva y porcentajes de tiempo objetivos a calcular en cada plano de cálculo (ver apartado *Evaluación lumínica*).

d. Todos los anteriores se conectan al componente DM (Daylight Model).

2. El componente DM se conecta al componente R (Run CS Daylight) de Simulación Anual donde se elige el archivo climático EPW de la ciudad de estudio, se ajusta el norte si se requiere y se eligen los parámetros de Radiance (-ab 6 -lw 0.01 en este estudio). Finalmente, se corre la simulación lumínica que genera un archivo *.csr de resultados.
3. Para la lectura y generación de gráficos de los resultados, se tienen dos opciones: 1) activar su visualización desde Grasshopper mediante el componente ‘PreviewGrid’, o 2) importar el archivo *.csr en la interfaz de CS Rhinoceros para utilizar gráficos y tablas prediseñadas (e.j. LEED, EN17037, personalizado, etc.).

TABLA 1. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN LUMÍNICA

Material	Reflectancia (%)	Transmitancia (%)	Especularidad (%)
Terreno	39.25	0	0.07
Losas	70	0	0.00
Muros	50	0	0.00
Muros Colindancia	50	0	0.00
Piso	70.32	0	2.92
Cancelería	43.33	0	2.96
Puertas	45.36	0	1.28
Closets	78.95	0	2.40
Piso Exterior	28.85	0	0.65
Pasto	13.16	0	0.00
Acristalamiento		77.4	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

TABLA 2. PLANOS DE CÁLCULO UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN LUMÍNICA

Espacio	Distancia entre sensores	No. de sensores	Altura del plano
Cocina	0.45	40	0.95
Sala/Comedor	0.50	60	0.80
Medio Baño	0.50	2	1.70
Circulación PB	0.45	40	1.70
Cuarto de Servicio	0.55	6	1.70
Sala de TV	0.45	50	1.20
Circulación PA	0.50	45	1.70
Baño Completo	0.50	8	1.70
Habitación 1	0.50	20	1.20
Habitación 2	0.50	20	1.20

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

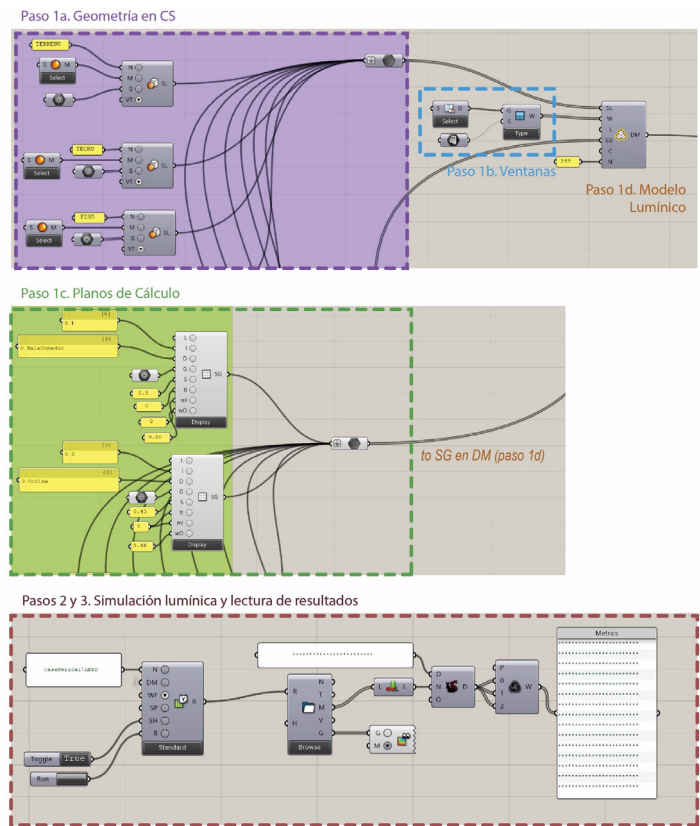


FIGURA 4. FLUJO DE TRABAJO PARA LA SIMULACIÓN LUMÍNICA EN GS GRASSHOPPER.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Evaluación lumínica

La tabla 3 sintetiza las métricas utilizadas para la evaluación lumínica. En resumen, se considera la certificación LEED V4.1 en su apartado de iluminación natural, opción 1, que solicita demostrar, mediante simulación computacional anual, que la Autonomía Espacial de Luz Natural (sDA, spatial Daylight Autonomy) es del 40%, 55% o 75% en espacios regularmente ocupados para acreditar 1, 2 o 3 puntos, respectivamente. Por otro lado, LEED también solicita no exceder el límite de Exposición Anual de Luz Solar (ASE,

Annual Sunlight Exposure) para la obtención de los créditos de iluminación natural.

Adicionalmente, se contempla el cálculo de la métrica Iluminancia Útil de Luz Natural (UDI, Useful Daylight Illuminance), que tiene la ventaja de evaluar cuatro diferentes rangos: no útil, suplementaria, autónoma y excesiva. Cada rango UDI está determinado por el nivel de iluminancias que se consiguen durante un porcentaje de horas de ocupación, lo que permite realizar una evaluación más específica del rendimiento de la luz natural interior.

TABLA 3. MÉTRICAS DE ILUMINACIÓN NATURAL UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VIVIENDA

Nomenclatura	Rango	Definición
sDA	>300 lux, 50%h	Porcentaje del área de cálculo que consigue iluminancias de al menos 300 lux durante el 50% de las horas ocupadas.
ASE	1000 lux, 250h	Porcentaje del área de cálculo con exceso de iluminación directa, es decir, que recibe luz solar directa >1000 lux durante más de 250 de las horas ocupadas.
UDI-f	0-100 lux	UDI no útil (<i>failing</i>): Porcentaje de horas ocupadas con menos de 100 lux, por lo que se requiere el uso de la iluminación eléctrica.
UDI-s	100-300 lux	UDI suplementario (<i>supplementary</i>): Porcentaje de horas ocupadas con iluminancias entre 100 y 300 lux, por lo que se requiere complementar la luz natural con iluminación eléctrica.
UDI-a	300-3000 lux	UDI autónomo (<i>acceptable</i>): Porcentaje de horas ocupadas con luz natural suficiente y útil para realizar tareas visuales, es decir, con iluminancias entre 300 y 3000 lux.
UDI-e	>3000 lux	UDI excesivo (<i>excessive</i>): Porcentaje de horas ocupadas con exceso de iluminación natural, es decir, con iluminancias mayores a 3000 lux; este rango ha sido asociado con problemas de deslumbramiento y discomfort térmico.
Avg lux		Promedio anual de iluminancias

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN REINHART (ET AL., 2006).

Adecuaciones en el diseño arquitectónico

Con la finalidad de incrementar los niveles de iluminación natural en algunos espacios y reducir el exceso de iluminación en otros (ver resultados del caso base en el apartado *Iluminación natural*), se implementaron estrategias de diseño de iluminación natural. La tabla 4 y la figura 5 resumen las adecuaciones realizadas.

Estas estrategias de diseño de iluminación natural no son comúnmente implementadas en las viviendas de interés social, por lo que su evaluación será de utilidad para entender su impacto en las condiciones de iluminación natural interior.

TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE LAS ADECUACIONES REALIZADAS AL CASO BASE

Adecuación*	Dimensiones	Material CS	Características ópticas
1 Estantes de luz ¹	Dos piezas de 1.80 m x 1.05 m x 0.03 m. Ubicadas 90 cm debajo del dintel ² en vanos en planta baja y remetidas 30 cm al interior, en fachada este. Para esto, se incrementó la altura de dintel de 2.10 m (prototipo 1) a 3 m (prototipo 2).	Estantes de luz	Reflectancia 82.84% Especlaridad 1.65%
2 Voladizos ³	Dos piezas de 1.80 m x 1.05 m x 0.03 m. Ubicadas en ventanas en planta alta y remetidos 30 cm al interior, en fachada este.	Louvers exteriores	Reflectancia 82.84% Especlaridad 1.65%
3 Claraboyas ⁴	Dos piezas de 0.50 m x 0.50 m. Ubicadas sobre el área de escaleras.	Doble Acristalamiento: - HalioGrey034 10.5 mm - Argon EN673 12.7 mm - SunGuardNeutral7865 UltraClear 6 mm	Transmitancia 30.0%
4 Terraza	2.78 m x 2.00 m x 0.20 m Ubicada en la fachada oeste.	Losa LM83	Reflectancia 70.00% Especlaridad 0.00%

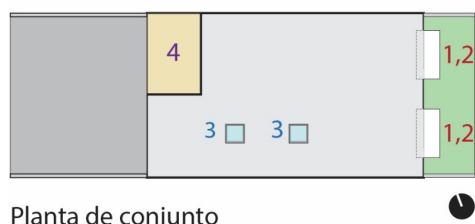
NOTA: REFERENCIAR A FIGURA 5.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

1 Bandeja horizontal intermedia que divide el área acristalada. Su función es eliminar la luz solar directa en superficies de trabajo situadas cerca del área acristalada y reflejar la luz solar directa hacia el plafón interior donde se redistribuye alcanzando mayor profundidad de penetración (hasta 2.5 veces la altura del dintel de la ventana) y mejor uniformidad.

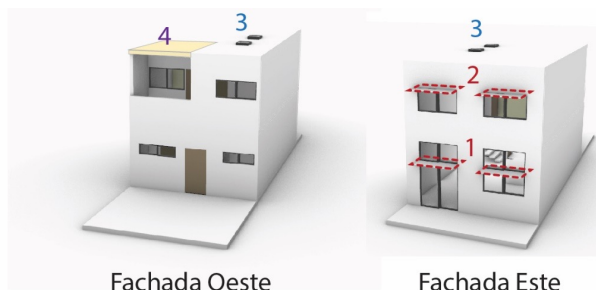
2 Pieza horizontal superior o viga colocada sobre puertas, ventanas y otros vanos; su función es soportar las cargas secundarias sobre ella.

3 Elemento estructural rígido que se extiende hacia afuera de la fachada, sostenida únicamente por un extremo. Su función es proteger las superficies acristaladas de la luz solar directa.

4 Abertura acristalada en la losa o techo, utilizada para iluminar un espacio. También se conoce como tragaluz o lucernario.



Planta de conjunto



Fachada Oeste

Fachada Este

FIGURA 5. ADECUACIONES REALIZADAS AL CASO BASE: PROTOTIPO 2.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

RESULTADOS

Iluminación natural en el caso base

Las figuras 6 y 8 resumen los resultados obtenidos en la simulación lumínica del caso base o prototipo 1. En resumen, se obtuvieron 2 créditos en la certificación LEED. Sin embargo, un porcentaje significativo del interior no consiguió niveles de iluminación adecuados: la métrica sDA mostró que zonas como la cocina, escaleras y circulación consiguieron iluminancias autónomas (>300 lux) en menos del 50% de sus respectivas áreas; en consecuencia, estos espacios consiguieron iluminancias bajas de luz natural (<300 lux o suplementaria y < 100lux o no útil) en la mayor parte del plano de cálculo, lo que se traduce en un mayor uso de la iluminación eléctrica. Por otro lado, espacios como la sala-comedor, sala tv y recámaras consiguieron niveles excesivos de iluminación: ASE mayores al 10% e iluminancias excesivas o >3000 lux en más del 5% del espacio, lo cual ha sido asociado a problemas de deslumbramiento y discomfort térmico.

Iluminación natural con las adecuaciones

Las figuras 7 y 8 resumen los principales resultados obtenidos en la simulación del prototipo 2, es decir, de la vivienda con la aplicación de estrategias de diseño de iluminación natural. En resumen, el prototipo 2 obtuvo 3 créditos, el máximo en el rubro de iluminación natural en la certificación LEED. Respecto a la métrica sDA, se observó un incremento del 15% en la sala comedor, 30% en la cocina, 38% en la sala tv y 45% en la circulación en planta alta. Respecto al UDI-a (iluminancias aceptables de 300-3000 lux) se obtuvieron incrementos del 16% en la sala-comedor, 24% en la cocina, 21% en la circulación en planta baja, 7% en la sala tv y 32% en la circulación en planta alta. Aunado a esto, las métricas UDI-s + UDI-f, asociadas al uso de la iluminación eléctrica, consiguieron disminuciones del 18% en sala-comedor, 24% en cocina, 21% en circulación en planta baja, 5% en sala tv y 33% en circulación en planta alta, por lo que se prevé una disminución del uso de energía de la vivienda. Asimismo, la métrica UDI-e, asociada al discomfort térmico y visual, disminuyó 3% en recámaras y 1% en sala tv. Estas mejoras en la reducción del exceso de iluminación se correlacionaron con la disminución en la métrica ASE del 15% en sala-comedor, 4% en sala tv y 7% en recámaras.

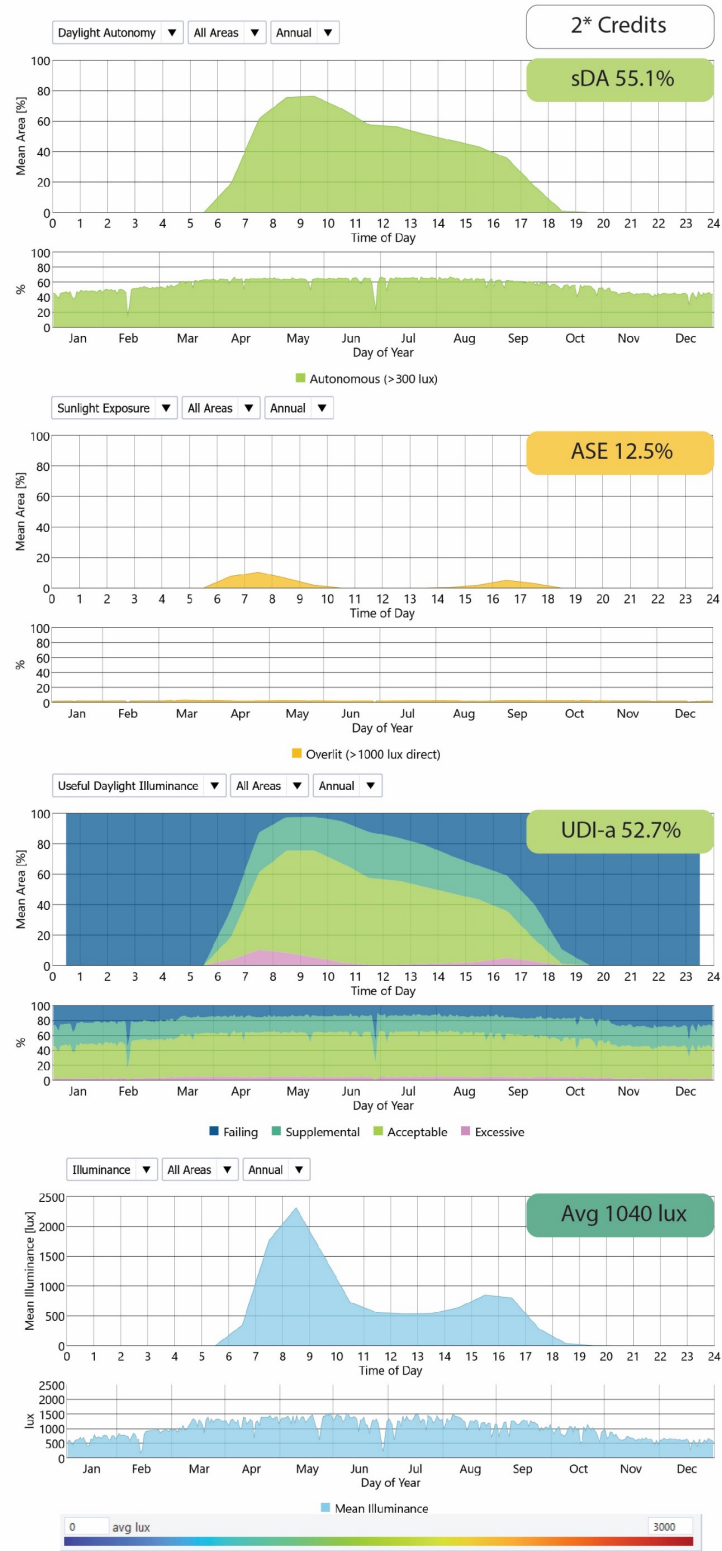
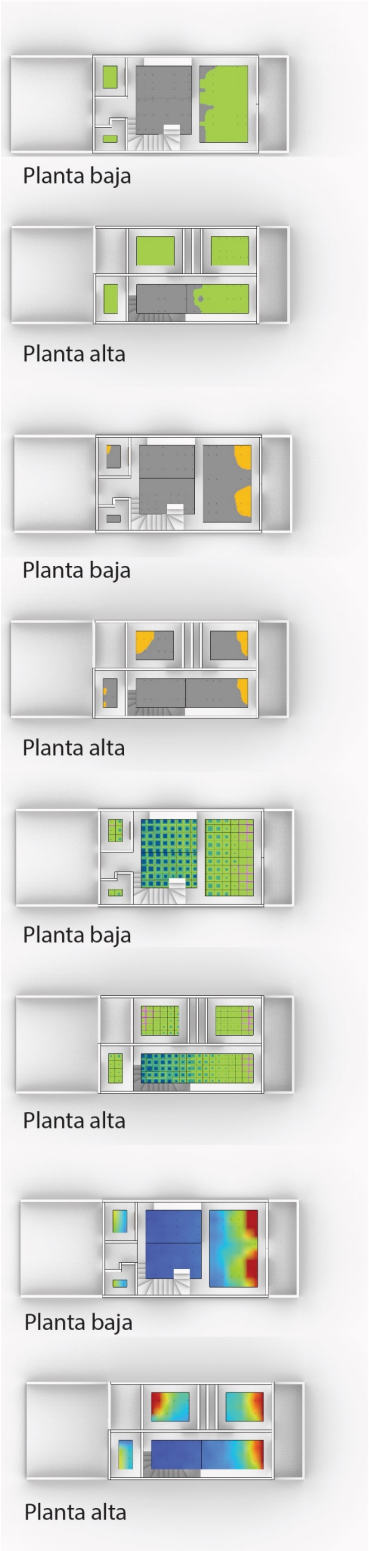
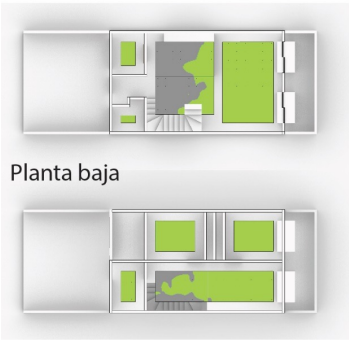
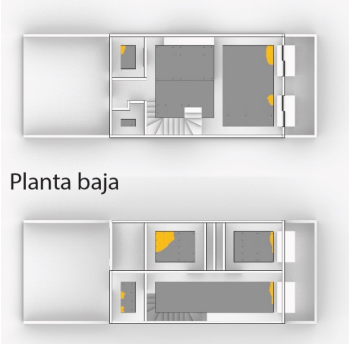
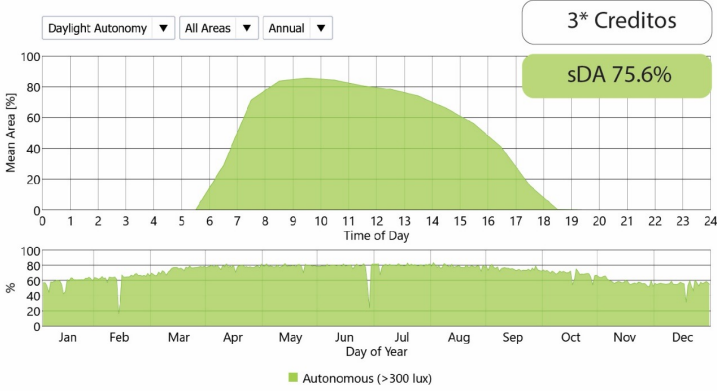


FIGURA 6. RESULTADOS ANUALES DE LA SIMULACIÓN LUMÍNICA: PROTOTIPO 1 (CASO BASE).
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE EL SOFTWARE CLIMATESTUDIO.



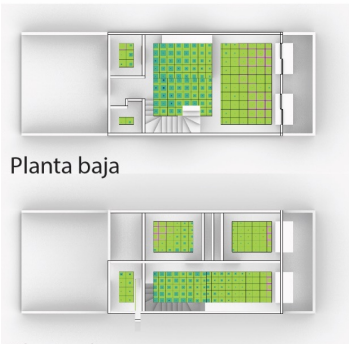
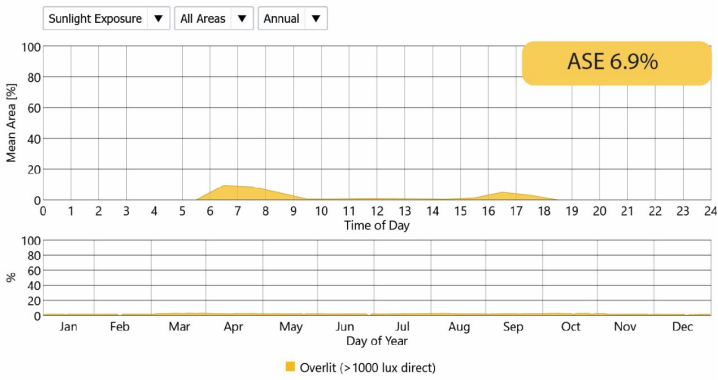
Planta baja

Planta alta



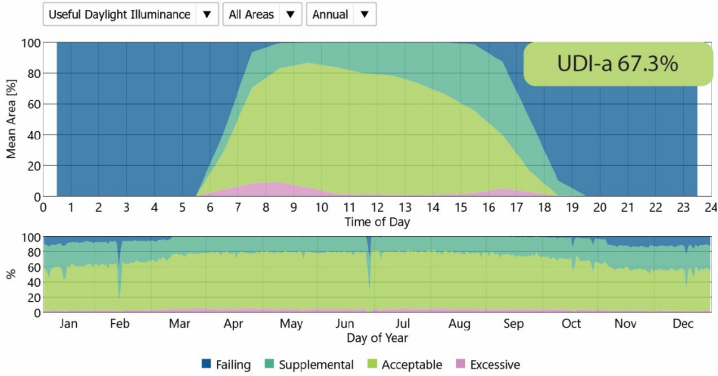
Planta baja

Planta alta



Planta baja

Planta alta



Planta baja

Planta alta

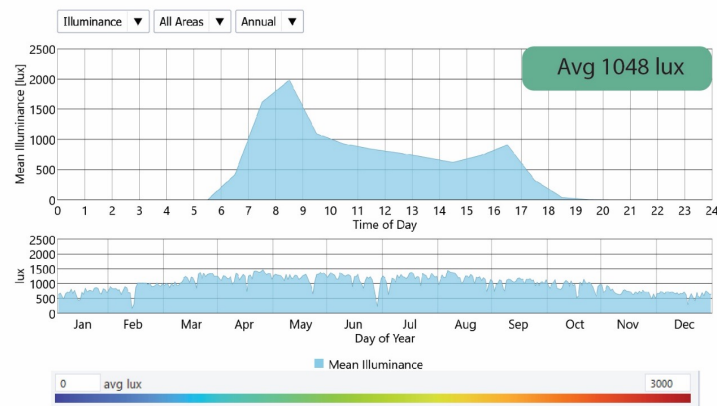
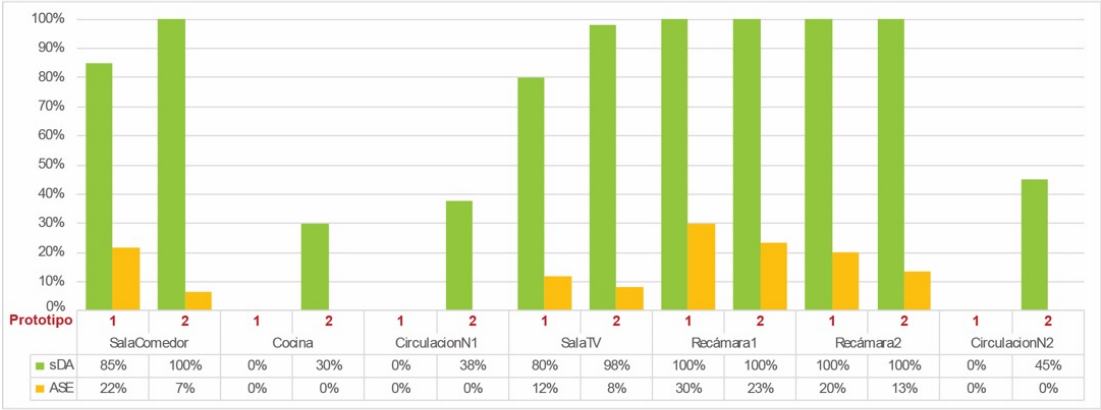


FIGURA 7. RESULTADOS ANUALES DE LA SIMULACIÓN LUMÍNICA: PROTOTIPO 2 (ESTRATEGIAS DE DISEÑO DE ILUMINACIÓN NATURAL).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE EL SOFTWARE CLIMATESTUDIO.

a) Métricas sDA 300lx,50%h y ASE 1000lx, 250h.



b) Métricas UDI y promedio anual de iluminancias

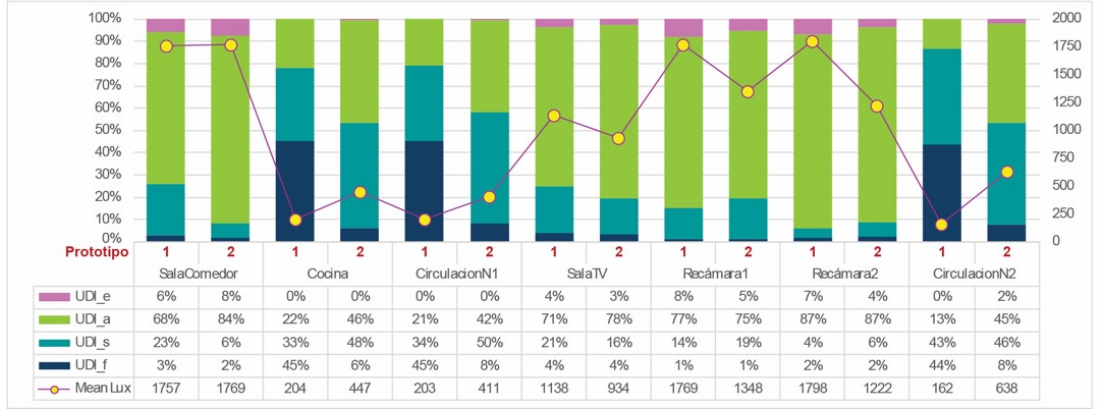
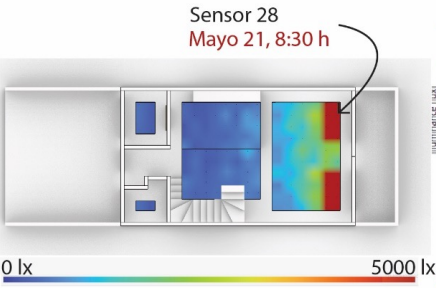


FIGURA 8. COMPARATIVO DE RESULTADOS: PROTOTIPO 1 (CASO BASE) VS. PROTOTIPO 2 (ESTRATEGIAS DE DISEÑO DE ILUMINACIÓN NATURAL).
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

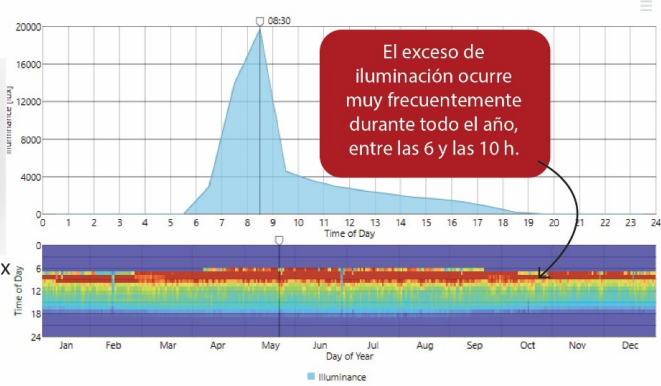
Los resultados anteriores presentaron el rendimiento lumínico anual; sin embargo, es importante evaluar la disponibilidad de la luz natural en días específicos del año. Para esto, se eligió el día 21 de mayo, una fecha de verano crítica en cuanto a la temperatura reportada en el archivo climático (39.5 °C). Asimismo, se eligió un horario matutino, 8:30 h, ya que la fachada crítica a evaluar es la este. La figura 9 presenta los resultados comparativos entre el caso base y el prototipo 2. En resumen, las adecuaciones de diseño consiguieron mejoras en la distribución luminosa, es decir, redujeron el área con exceso de iluminación natural, no sólo

en cuanto a los lux cuantificados sino también en cuanto a la frecuencia de ocurrencia de las iluminancias excesivas. Por tanto, se concluye que las adecuaciones de diseño resultaron exitosas y se infiere que, de complementarse con otros sistemas de protección solar como cortinas o venecianas interiores, podría incrementarse el porcentaje de iluminación autónoma en el interior de la vivienda.

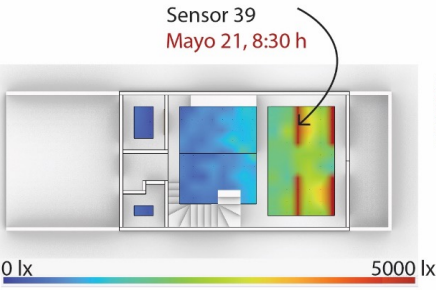
a) PROTOTIPO 1



Iluminancia anual en el sensor 28, el 21 de mayo



b) PROTOTIPO 2



Iluminancia anual en el sensor 39, el 21 de mayo

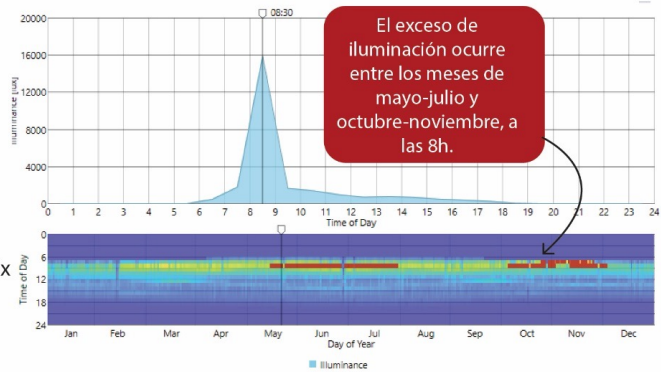


FIGURA 9. COMPARATIVO DE ILUMINANCIAS DE LUZ NATURAL EL 21 DE MAYO, A LAS 8:30 H, EN SENSORES CRÍTICOS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE EL SOFTWARE CLIMATESTUDIO.

CONCLUSIONES

Este artículo evaluó la disponibilidad de la luz natural en prototipos de vivienda unifamiliar en clima cálido subhúmedo. La investigación incluyó el diseño arquitectónico de una vivienda de interés social en la cual se implementaron estrategias de diseño de iluminación natural para evaluar cómo influyen en la provisión de luz natural, es decir, cuantificar cómo su implementación puede reducir la luz solar directa y la iluminación excesiva, ambas asociadas al exceso de ganancias de calor y deslumbramiento. Esto, a su vez, repercute en cómo la implementación de las estrategias incrementa la iluminación útil en el interior de la vivienda, lo cual puede traer importantes beneficios en la salud de las personas.

Mediante simulación computacional con software especializado, ClimateStudio vía Grasshopper, se exploraron soluciones de diseño como la ampliación de la altura del dintel de

las ventanas en la fachada este (orientación elegida por ser crítica en cuanto a la inclinación solar en horario matutino y a la frecuencia de lotes de interés social con fachadas principales orientadas hacia el este-oeste). En estas ventanas, se implementaron además estantes de luz natural que permitieron aumentar la profundidad de penetración de la luz natural en espacios como la cocina y la circulación en planta baja que, por la estrechez de los lotes (6 m), se diseñaron con muros de colindancia, por lo que el aprovechamiento de la iluminación natural mediante ventanas fue viable. Asimismo, se abrieron claraboyas en la planta alta, sobre áreas de circulación, para lograr una iluminación natural aceptable (en lugar de una luz insuficiente o suplementaria que ha sido asociada con el uso de la luz eléctrica). Por otro lado, el exceso de iluminación en de-

terminadas zonas también se logró disminuir por la implementación de los estantes de luz y de voladizos que bloquearon efectivamente la luz solar directa, principalmente durante la temporada más cálida del año (verano).

Los ejemplos de estrategias de iluminación natural presentados en el artículo no son comunes de implementar en la construcción de las viviendas de interés social. Esto se puede atribuir a su desconocimiento y a la falta de regulación en las normativas mexicanas que, al momento, no especifican valores absolutos mínimos y máximos de iluminación natural en los espacios interiores. El diseño arquitectónico que contempla estrategias de iluminación natural puede traducirse, no sólo en confort lumínico, sino también en ahorro en el consumo de energía en iluminación y refrigeración, calidad del aire interior y reducción de la huella de carbono. Por tanto, se considera que la difusión de las estrategias de iluminación natural es necesaria hoy en el país con la finalidad de mejorar la eficiencia lumínico-térmica de las viviendas. Hasta donde los autores saben, no se han realizado estudios similares centrados en aplicaciones de iluminación natural en México, por lo que la metodología de simulación computacional aquí presentada se considera pionera y relevante para ser difundida con profesionales e investigadores del ámbito.

Asimismo, los resultados aquí presentados abren futuras líneas de investigación para evaluar el rendimiento térmico-energético que estas adecuaciones podrían conseguir en el consumo de energía en iluminación y refrigeración en climas cálidos subhúmedos. Lo anterior, no sólo en fachadas críticas como el este, sino también ampliando la evaluación lumínica y térmico-energética para incluir viviendas de interés social, cuyas fachadas con vanos están frecuentemente orientadas hacia el oeste, sureste y suroeste. En una siguiente etapa, esta investigación prevé incluir otros climas del país, de modo que se puedan establecer estrategias regionales de diseño arquitectónico con enfoque bioclimático.

FUENTES DE CONSULTA

Alrubaih, M.S., Zain, M. F. M., Alghoul, M. A., Ibrahim, N. L. N., Shameri, M. A., Elayeb, O. (2013), "Research and development on aspects of daylighting fundamentals", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 494-505.

Betti, G., Tartarini, F., Nguyen, C. & Schiavon, S. (2023), "CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design", *Building Simulation*, vol. 17, pp. 493-508. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5>.

Consejo Nacional de Vivienda (CONAVI) (2022), Estrategias de diseño arquitectónico con enfoque bioclimático. CONAVI-SEDATU. Disponible en [https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/diseño/Estrategias de Diseño Arquitectónico.pdf?fbclid=IwAR2N8IkFobofhoCLq2pdZGoeB4XcQc2zBbBr7T6hVuty4YeUrov4Nmegg](https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/diseño/Estrategias%20de%20Diseño%20Arquitectónico.pdf?fbclid=IwAR2N8IkFobofhoCLq2pdZGoeB4XcQc2zBbBr7T6hVuty4YeUrov4Nmegg), consultado el 11 de marzo de 2024.

Drobne, S., Zhašnik-Senegačnik, M., Kristl, Z., Koprivec K. L., Fikfak, A. (2022), "Analysis of the window views of the nearby Façades", *Sustainability*, vol.14, núm.1, pp. 1-16.

ENCEVI (Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares) (2018), *Comunicado de Prensa Núm. 541/18: Encuesta Nacional sobre Consumos de Energéticos en Viviendas Particulares*.

INGI, Infonavit, SHF (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores y la Sociedad Hipotecaria Federal) (2020), *Comunicado de Prensa Núm. 493/21. Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI), 2020. Principales Resultados*.

Kong, Z., Liu, Q., Li, X., Hou, K. & Xing, Q. (2022), "Indoor lighting effects on subjective impressions and mood states: A critical review", *Building and Environment*, 224, 109591. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109591>.

Mardaljevic, J. (2000), "Simulation of annual daylighting profiles for internal illumination", *Lighting Research and Technology*, vol. 32, issue 3, pp. 111-118. <https://doi.org/10.1177/096032710003200302>.

Mardaljevic, J. (2015), "Climate-Based Daylight Modelling and its discontents", *CIBSE Technical Symposium*, pp. 1-12.

Matusiak, B. S., Klöckner, C. A. (2016), "How we evaluate the view out through the window", *Architectural Science Review*, 59(3), pp. 203-211.

Mueller, H. F. O. (2013), Daylighting. In *Sustainability, energy and architecture* (Elsevier, vol. 9, pp. 227-255).

Pellegrino, A. & Lo Verso, V. (2010), The energy demand for electric lighting as a consequence of different architectural building features and lighting plant characteristics. *Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency" x035*, 695-703.

Reinhart, C., Mardaljevic, J. & Rogers, Z. (2006), "Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design", *Leukos*, vol. 3, núm. 1, pp. 7-31. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001>.

Richard G. Stevens, George C. Brainard, David E. Blask, Steven W. Lockley & Mario E. Motta (2013), "Breast Cancer and Circadian Disruption from Electric Lighting in the Modern World", *American Cancer Society*, vol. 64, núm. 3, pp. 207-2018.

Sapia, C. (2013), "Daylighting in buildings: Developments of sunlight addressing by optical fiber", *Solar Energy*, vol. 89, pp. 113-121.

SENER (Secretaría de Energía) & CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) (2023), *Consejos para Ahorrar Energía en el Hogar*. CONUEE. Disponible en [chrome-extension://efaidnbmninhpcajpgclefindmkaj/https://www.conuee.gob.mx/transparencia/nuevaestrategia/docs/GUIA_EE_HOGAR_DIGITAL_COM.pdf](https://www.conuee.gob.mx/transparencia/nuevaestrategia/docs/GUIA_EE_HOGAR_DIGITAL_COM.pdf), consultado el 11 de marzo de 2024.

Siemann, J. K., Grueter, B. A. & McMahon, D. G. (2021), "Rhythms, Reward, and Blues: Consequences of Circadian Photoperiod on Affective and Reward Circuit Function", *Neuroscience*, 457, pp. 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.12.010>.

Sui, G., Liu, J., Leng, J. & Yu, F. (2023), "Daylighting performance assessment of traditional skywell dwellings: A case study in Fujian, China", *Journal of Building Engineering*, vol. 68, <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106028>.

Wang, J., Wei, M. & Ruan, X. (2020), "Characterization of the acceptable daylight quality in typical residential buildings in Hong Kong", *Building and Environment*, vol. 182, 107094. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107094>.

Wong, I. L. (2017), "A review of daylighting design and implementation in buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 959-968. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.061>.

Zhen, M., Du, Y., Hong, F. & Bian, G. (2019), "Simulation analysis of natural lighting of residential buildings in Xi'an, China", *Science of The Total Environment*, vol. 690, pp. 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.353>.