

Evaluación del impacto de medidas de aprovechamiento de luz natural a nivel urbano: aplicación en el tejido de Sevilla

Estudio del impacto lumínico de la rehabilitación de huecos de fachada en función del tipo de tejido urbano en la herramienta UMI (Urban Modelling Interface)



Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de Arquitectura

Autor: **Miguel Ángel Sánchez González**

Tutor: Miguel Ángel Campano Laborda

Grupo B 2019-202



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a instituciones como la Universidad de Sevilla y la Escuela Superior de Arquitectura de Sevilla, dentro de la cual cabe destacar la ayuda recibida por parte del Departamento de Construcciones arquitectónicas I. Especialmente agradecido al grupo de investigación TEP130, perteneciente al PAIDI (Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación). Me gustaría destacar la ayuda prestada de forma incondicional de las siguientes personas, sin las cuales este trabajo no habría sido posible:

- Al equipo docente perteneciente al grupo B de trabajo de fin de grado de la ETSA formado por Juan José Sendra Salas, José Carlos Gutiérrez Blanco y Emilio J. Mascort Albea, por su ayuda y correcciones a lo largo de las 15 semanas de elaboración de este trabajo.

- Miguel Ángel Campano Laborda:

Profesor e investigador de la Universidad de Sevilla y el TEP130, por su tutorización en este trabajo en el que se ha implicado como si fuese suyo propio y el cuál desde el primer momento me ha conseguido inculcar la pasión por la investigación y por este campo de trabajo, del cual no conocía mucho, pero que tras realizar este trabajo me apasiona y me incita conocer e investigar más sobre él. También agradecerle el aumentarme las ganas de conocer el campo de las instalaciones después de compartir con él este trabajo y la asignatura de Acondicionamiento e Instalaciones III.

- Ignacio Javier Acosta García:

Profesor e investigador de la Universidad de Sevilla y del TEP 130, por su ayuda con las novedosas herramientas utilizadas en este trabajo, de las cuales he aprendido gracias a su ayuda y sus conocimientos. También agradecerle la pasión con la que enseña en la ETSA las asignaturas que imparte, en las cuales tuve la suerte de conocerlo y que me iniciaron la pasión para introducirme en el mundo de las instalaciones de edificios.

- Alejandro Ruiz Fernández de Angulo y Oscar Luque Cabezuelo:

Compañeros de la escuela a los que tuve la suerte de conocer durante el cuarto curso, les agradezco, sus respectivos trabajos fin de grado realizados en el curso 2018-2019, los cuales han servido como base y apoyo para acometer la tarea de realizar este trabajo. También les estoy agradecido por su ayuda en cualquier cuestión que se me planteaba realizando el trabajo sin más beneficio que el de ayudar

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se centra en el estudio a nivel urbano del impacto de medidas de rehabilitación aplicadas en huecos de fachada de edificios de tipología de bloque en H y bloque lineal en la ciudad de Sevilla, con el objetivo de evaluar el impacto de variables como los porcentajes de hueco-fachada y la orientación para alcanzar un correcto aprovechamiento de luz natural. Para ello, se ha utilizado el indicador *Continuous Daylight Autonomy (cDA)*, métrica dinámica de iluminación natural. Además, este trabajo evalúa el impacto energético que supondría el uso de reguladores de luz en edificios de estas características. Otro interés que genera este trabajo es el uso de herramientas novedosas como UMI (Urban Modelling Interface) del prestigioso MIT (Massachusetts Institute of Technology).

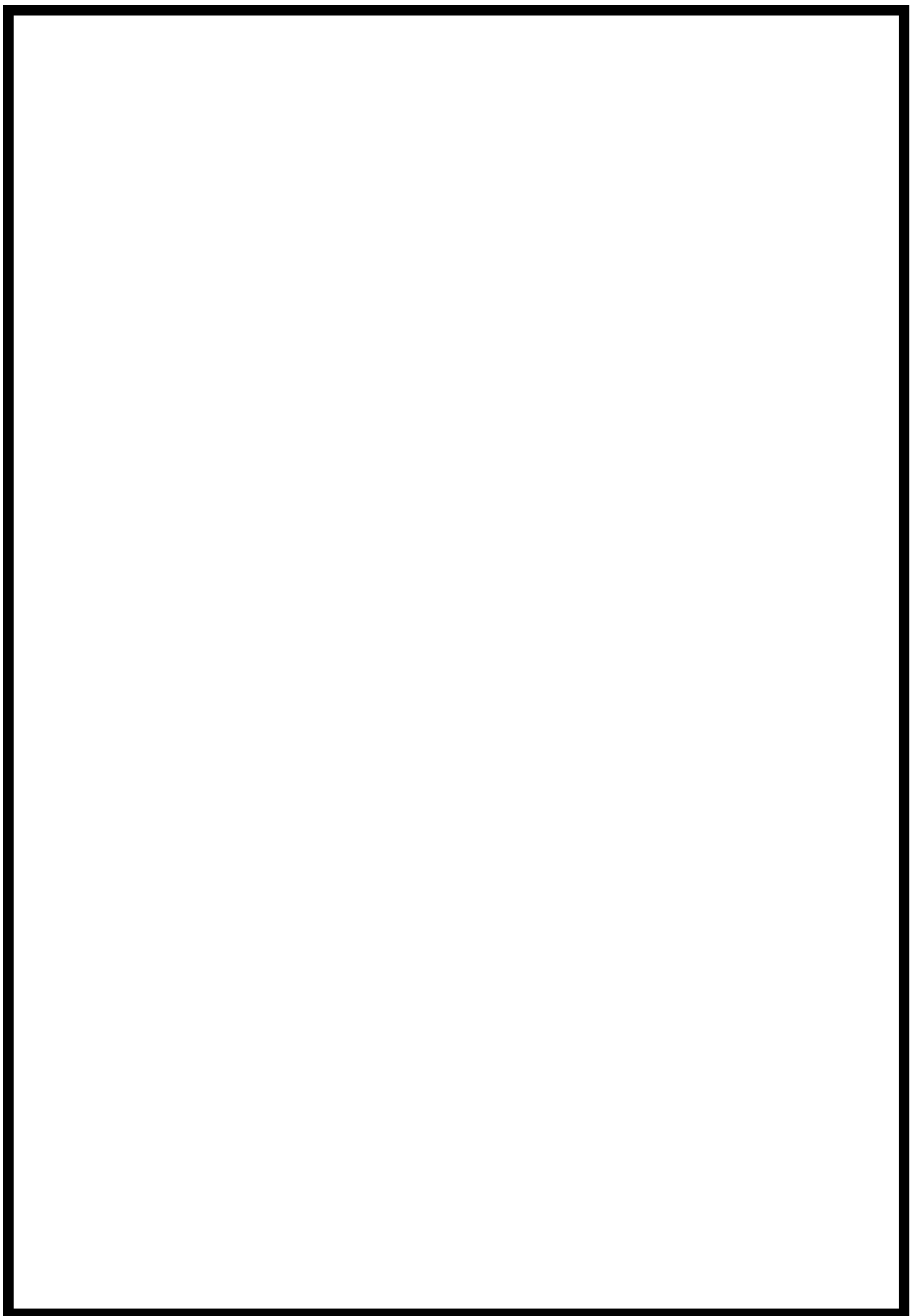
ÍNDICE

BLOQUE A: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTADO DE LA CUESTIÓN	7
1. Introducción.	9
2. Objetivos.	10
2.1 Objetivos generales.	10
2.2 Objetivos específicos.	11
3. Estado de la cuestión.	11
3.1 Conceptos previos.	12
3.1.1 Energéticos.	12
3.1.2 Ritmo Circadiano.	17
3.2 Aprovechamiento de luz natural.	17
3.2.1 Eficiencia energética.	18
3.2.2 Ahorro económico.	19
3.2.3 Problemas de salud asociados.	20
3.3 Antecedentes.	21
3.4 Métodos informáticos de cálculo lumínico.	24
3.4.1 Radiosidad.	24
3.4.2 Ray tracing.	25
3.4.3 Daylight coefficient method.	25
3.5 Marco normativo.	27
BLOQUE B: METODOLOGÍA	28
4. Descripción de la metodología de trabajo.	30
4.1 Definición del caso de estudio.	30
4.1.1 Justificación.	30
4.1.2 Bloque tipo H.	30
4.1.3 Bloque lineal.	31
4.2 Definición de las métricas utilizadas.	32
4.3 Definición de las herramientas de cálculo.	33

4.4 Validación de la herramienta de cálculo.	35
4.5 Modelado del caso de estudio.	37
4.6 Definición de las variables de cálculo.	38
4.7 Combinatoria de variables de cálculo.	39
4.8 Definición de las herramientas de análisis de resultados.	41
BLOQUE C: RESULTADOS Y CONCLUSIONES	43
5. Comparación y análisis de resultados.	45
5.1 Resultados de cálculo.	45
5.1.1 Bloque tipo H.	45
5.1.2 Bloque lineal.	48
5.2 Análisis de resultados.	50
5.2.1 Bloque tipo H.	50
5.2.2 Bloque lineal.	56
5.2.3 Análisis del consumo energético.	58
6. Conclusiones.	61
7. Futuras líneas de investigación.	63
APÉNDICES.	64
A. Glosario.	66
B. Referencias.	68
C. Bibliografía.	71

BLOQUE A

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTADO DE LA CUESTIÓN



1. INTRODUCCIÓN.

La luz natural tiene una especial relevancia en la regulación de la vida cotidiana de las personas (Ignacio Acosta et al., 2019); previo al uso de la luz eléctrica, esta era el factor determinante para la organización de las actividades humanas, las cuales se desarrollaban durante el día, mientras que el descanso se producía por la noche. A partir de la normalización del uso de la luz eléctrica, la cual permite un mayor aprovechamiento del tiempo diario para realizar tareas que antes solo eran posibles durante el ciclo diurno, se ha comprobado que la exposición de las personas a luz eléctrica genera problemas de salud asociados a la disrupción de los ritmos circadianos, debido a la influencia directa que tiene la luz natural en su regulación. Además, el uso de los sistemas de iluminación eléctrica tiene un consumo energético asociado y, por ende, económico, cuyo impacto es relevante tanto a nivel de eficiencia energética y emisiones de CO₂ como de economía familiar.

Por todo ello, el uso optimizado de la luz natural y, por ende, un menor uso de luz eléctrica, conlleva un conjunto de consecuencias positivas asociadas, como una mayor eficiencia energética, aparejada a un mayor ahorro económico y menor emisión de CO₂, así como a la reducción de problemas de salud derivados de la falta de luz natural y disrupción del ciclo circadiano.



Fig. 01 - Triple componente del aprovechamiento de luz natural; Fuente: propia

Por otro lado, el panorama actual de la arquitectura a nivel europeo, con iniciativas como el Horizonte 2020 presentes, está encaminado a solucionar el problema energético mediante la adaptación de los edificios existentes a las condiciones mínimas requeridas en la actualidad, ya que el porcentaje de edificios de nueva planta construidos con criterios de sostenibilidad y eficiencia energética acordes a normativa es muy bajo con respecto del de edificios existentes, que por la falta de estándares normativos en su época de construcción, no se ajustan al modelo sustentable de edificio que se requiere en la actualidad. Al estudiar esta problemática y centrándola en la ciudad de Sevilla, es notable la gran cantidad de edificios residenciales, construidos en muchos casos como respuesta a necesidades de emergencia habitacional y no

atendiendo a criterios de eficiencia energética, que tienen la necesidad de adaptarse a los tiempos que corren.

Una de las formas de aumentar la eficiencia energética de los edificios en cuanto a luz natural se refiere es trabajando con los huecos de fachada, ya que el aprovechamiento óptimo de la luz del día a lo largo del año es proporcional a la superficie de hueco (Ignacio Acosta et al., 2016). Otro factor determinante en el estudio de la luz de día está asociado a las características de los materiales interiores de los espacios de la edificación, ya que influyen en la distribución de la luz natural.

Dada la importancia de un correcto aprovechamiento de la luz natural y viendo el sector residencial como un campo de oportunidades para favorecer a la disminución de la triple problemática medioambiental, económica y de salubridad asociadas, este trabajo pretende generar una metodología para optimizar el diseño a nivel urbano de huecos de ventana en vivienda según la entrada de luz natural, utilizando para ello criterios de eficiencia energética y salubridad, siendo aplicada a modo de ejemplo metodológico en dos de las tipologías residenciales predominantes en los años 50 en Sevilla, generadas como respuesta a las necesidades de emergencia habitacional del momento..

2. OBJETIVOS.

El objetivo de este trabajo es generar una metodología de análisis urbano que evalúe el impacto en el aprovechamiento de la luz natural de las distintas proporciones de huecos de fachada, así como en el consumo asociado por el uso de la iluminación eléctrica. Además, la correcta exposición a la luz natural implicará la disminución de enfermedades asociadas a la disrupción de los ciclos circadianos, factor que no será utilizado en el trabajo como parte del estudio pero que, por su amplia demostración en otros trabajos, tendrá un beneficio implícito en los resultados.

2.1 Objetivos generales.

Este trabajo tiene los siguientes objetivos generales:

- OG.1** Desarrollar una metodología de análisis a nivel urbano para el aprovechamiento óptimo de la luz natural a través de indicadores lumínicos dinámicos de eficiencia energética y salubridad.

- OG.2** Analizar una muestra representativa de edificios residenciales de tipología de bloque tipo H y de bloque lineal en Sevilla: estudio del porcentaje óptimo de hueco respecto de la fachada según orientación y entorno.

2.2 Objetivos específicos.

Para alcanzar los objetivos generales antes mencionados, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- OE.1** Validación de la herramienta informática de cálculo y de los indicadores dinámicos de iluminación natural mediante comparación con estudios científicos previos y modelos reales (celdas de ensayo del TEP130).
- OE.2** Aplicación de la metodología descrita en algunas de las tipologías predominantes en el tejido urbano de Sevilla mediante el desarrollo de un modelo de simulación computacional, evaluando el efecto de su entorno urbano inmediato.
- OE.3** Definición de un conjunto de variables con las que, a partir de las condiciones climáticas de Sevilla y las diferentes orientaciones de la fachada, se estudiarían cuáles serían las dimensiones de ventana óptimas a nivel energético, económico y de salud y bienestar.
- OE.4** Desarrollo de una batería de hipótesis, a modo de ejemplo metodológico, planteando diferentes opciones de rehabilitación energética y rediseño sobre los huecos, evaluando el impacto energético en los mismos.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN.

Como introducción en campo de conocimiento dentro del cual se integra el presente trabajo, es preciso describir el marco conceptual específico con el que se va a trabajar. Posteriormente se ha analizado la situación en la que se encuentra a nivel científico, social y político el aprovechamiento de la luz natural en la edificación en la actualidad, procediéndose a contextualizar el estudio entre los trabajos ya realizados en el ámbito de la iluminación natural en Arquitectura, a fin de tomarlos como puntos de partida.

En este sentido, el presente estudio se ha centrado en trabajos más específicos derivados del estudio de la luz de día como, por ejemplo, los relativos al diseño de huecos, al trabajo con métricas dinámicas de iluminación natural o al análisis de impacto de los consumos energéticos asociados.

Como parte de esta aproximación, también se realiza una introducción a los métodos informáticos de cálculo lumínico para un mejor entendimiento de los motores de cálculo utilizados en el estudio.

Por último, se procede a situar el presente trabajo dentro del marco normativo existente.

3.1 Conceptos previos.

Como parte del trabajo de documentación previo, se procede a definir los siguientes conceptos, clasificados en tres grupos por su temática.

3.1.1 Energéticos.

Demanda energética: “Consumo de energía, calculado o medido, que se estima necesario para satisfacer la demanda energética del edificio en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación, que incluirá, entre otras cosas, la energía consumida en calefacción, la refrigeración, la ventilación, la producción de agua caliente sanitaria y la iluminación.” (Real Decreto 235/2013).

La demanda energética es el factor clave para la eficiencia energética, ya que cuando menor sea la demanda, mayor será la eficiencia. El método para disminuir la demanda de un edificio es el correcto diseño tanto de sus instalaciones como de sus elementos de protección pasiva, entre los cuales se encuentra el correcto dimensionado de los huecos.

Iluminancia: “Cociente del flujo luminoso $d\phi$ incidente sobre un elemento de la superficie que contiene el punto, por el área dS de ese elemento, siendo la unidad de medida el lux.” (DB-HE-Ahorro Energía. Anejo A) (Fig. 02). Se define con la ecuación (3.1), donde E_Q es la iluminancia en lux (lx):

$$E_Q = \frac{d\phi}{dS} \quad (3.1)$$

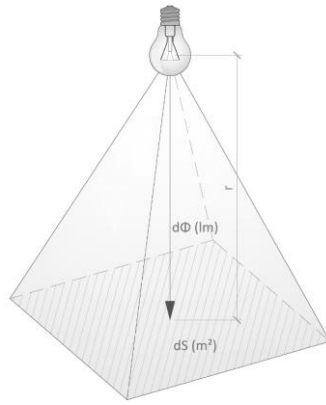


Fig. 02 – Iluminancia; Fuente: Ponencia REEB, I. Acosta

Daylight Factor (DF): “Cociente entre la iluminancia sobre un punto interior P, situado sobre la superficie de trabajo E_i y la iluminancia externa horizontal sin obstrucción E_e ” (Calcagni & Paroncini, n.d.). Se define mediante la ecuación (3.2), en la que DF es el *Daylight Factor* en %:

$$DF = \frac{E_i}{E_e} \times 100 \quad (3.2)$$

El factor de luz de día se calcula teniendo en cuenta la condición de cielo más desfavorable a nivel de flujo luminoso emitido, cielo uniformemente nublado (Fig. 03); por este motivo es una métrica estática que ha sido muy utilizada, dada su facilidad de cálculo, pero que sin embargo no se ajusta correctamente a toda la variante de casos en los que se puede encontrar un mismo punto de estudio a lo largo de un periodo de tiempo de un año.

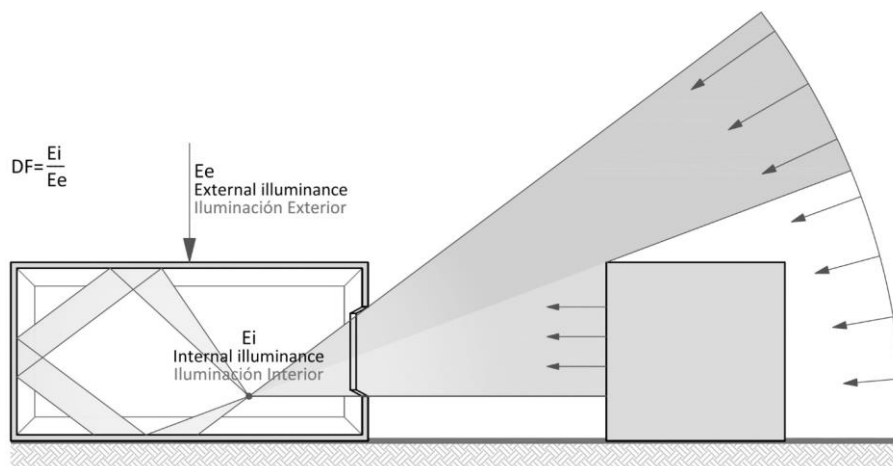


Fig. 03 – Factor de luz de día; Fuente: Ponencia REEB, I. Acosta

Daylight Autonomy (DA): “Porcentaje de tiempo en un año en el que se alcanza en un punto dado en un recinto un umbral mínimo de iluminancia solo con luz natural, por lo que cuanto mayor sea el DA, menor será el consumo de energía en iluminación eléctrica.” (Ignacio Acosta et al., 2018a) . Esta métrica puede definirse con la ecuación (3.3), donde DA es el *Daylight Autonomy* en valor unitario:

$$DA = \frac{\sum_i wf_i t_i}{\sum_i t_i} \in [0,1] \quad wf_i = \begin{cases} 1 & \text{if } E_D \geq E_L \\ 0 & \text{if } E_D < E_L \end{cases} \quad (3.3)$$

Dónde: **DA** es el *Daylight Autonomy*.

E_D se corresponde con el nivel de iluminancia del punto estudiado en un instante dado, en lux.

E_L se corresponde con el umbral de Iluminancia dado, en lux.

t_i es el instante dado dentro del horario de ocupación anual.

wf_i es el factor de ponderación de un instante dado t_i (weighting factor).

A diferencia del *Daylight Factor* (DF), el *Daylight Autonomy* (DA) es una métrica dinámica, ya que se calcula dependiendo de las condiciones climáticas y por lo tanto es bastante más precisa que la estática, aunque su cálculo es más complejo. La cualidad más interesante de esta métrica es que su inversa corresponde al tanto por ciento de tiempo en un año en el que es necesario el uso de luz eléctrica. Esto es útil, ya que si conocemos el tiempo que necesitamos aporte de luz eléctrica podemos conocer de forma simple el consumo energético en el que se está traduciendo el diseño de aprovechamiento de luz natural de un edificio.

Continuous Daylight Autonomy (cDA): “Representa el porcentaje del año en el que se alcanza un umbral mínimo de iluminancia en un punto interior dado solo con luz natural, considerando un crédito linealmente parcial a valores por debajo del umbral definido” (Ignacio Acosta et al., 2018a). Se define

mediante la ecuación (3.4), en la cual cDA es el *Continuous Daylight Autonomy* en valor unitario:

$$cDA = \frac{\sum_i wf_i t_i}{\sum_i t_i} \in [0,1] \quad wf_i = \begin{cases} 1 & \text{if } E_D \geq E_L \\ E_D/E_L & \text{if } E_D < E_L \end{cases} \quad (3.4)$$

Dónde: **cDA** es el *Continuous Daylight Autonomy*.

E_D se corresponde con el nivel de iluminancia del punto estudiado en un instante dado, en lux.

E_L se corresponde con el umbral de Iluminancia dado, en lux.

t_i es el instante dado dentro del horario de ocupación anual.

wf_i es el factor de ponderación de un instante dado t_i (weighting factor).

La principal novedad del cDA con respecto al DA es que complementa al DA al incluir tanto las horas en el que se llega al umbral como el porcentaje de iluminancia que se alcanza en las que no se llega; de esta manera se puede contabilizar aporte exacto de luz eléctrica si esta está regulada, por lo que esta métrica es de mucha utilidad para poder analizar el ahorro energético de un sistema de regulación del flujo de luz eléctrica utilizada (Fig. 04). Esta será la métrica lumínica empleada en este trabajo.

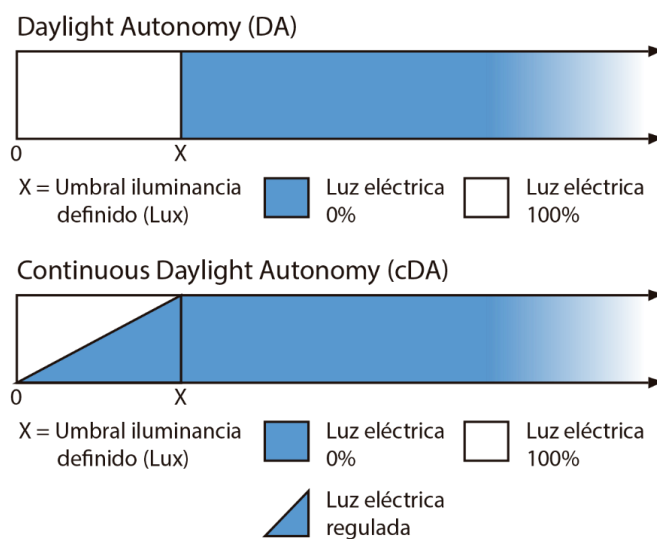


Fig. 04 – Diagramas de DA y cDA; Fuente: propia

Spatial Daylight Autonomy: “Determina el tanto por ciento de una superficie dada que supera los 300 lx de iluminancia durante el 50% del tiempo de ocupación (Fig.05). Es una métrica útil para determinar de un único valor el comportamiento de un espacio.” (Ponencia REEB, I. Acosta)

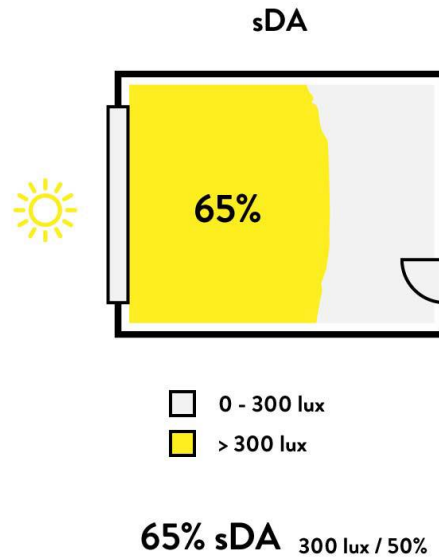


Fig. 05 – Diagrama de sDA; Fuente: Ponencia REEB, I. Acosta

3.1.2 Ritmo Circadiano.

Los ritmos circadianos (Fig. 06) son oscilaciones de las variables biológicas en intervalos regulares de 24 horas (R. P. Leslie et al., 2012). Dependen principalmente de la melatonina, aunque hay otras hormonas relevantes, como el cortisol. La melatonina es una hormona secretada naturalmente durante la noche y que es suprimida durante el inicio de la mañana. Dicha supresión de melatonina es conocida como estímulo circadiano (CS) y representa cuánta melatonina deja de ser secretada por nuestro cerebro. El estímulo circadiano controla nuestro estado de alerta, nuestra presión arterial, nuestro sueño y nuestro apetito (Froy, 2011). Una disrupción en el ritmo circadiano puede producir un riesgo alto de depresión (Akpinar et al., 2008), cáncer (Bullough et al., 2006), ataque al corazón (Kriszbacher et al., 2010), obesidad (Touitou et al., 2017), disrupción del sueño (Melamud et al., 2012) y muchas otras enfermedades.

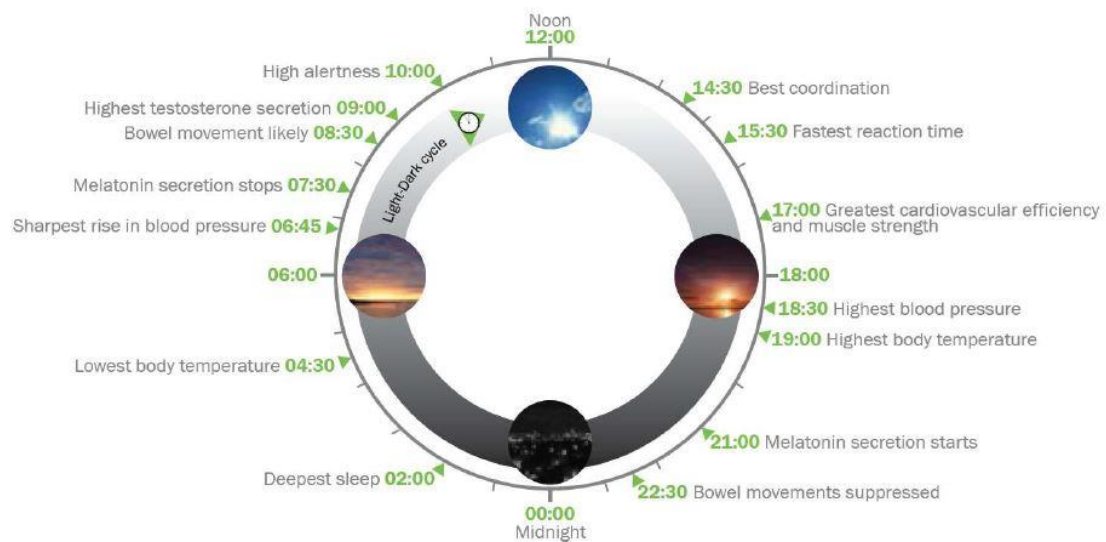


Fig. 06 – Factores propiciados por los ritmos circadianos en un día; Fuente: Dynalight Project, 2018

3.2 Aprovechamiento de luz natural.

Existen numerosos estudios (R. Leslie et al., 2005), (Ignacio Acosta et al., 2016), (Ignacio Acosta et al., 2018b), (Campano et al., 2019), (Kriszbacher et al., 2010), (I. Acosta et al., 2017), (Ricciardi & Buratti, 2018) que demuestran que un uso optimizado de la luz de día tiene muchos beneficios a nivel energético, económico y de salud.

3.2.1 Eficiencia energética.

En la actualidad, es prioritaria la necesidad de reducir el impacto derivado de las emisiones de CO₂, que supone uno de los elementos de mayor influencia en el calentamiento global. En este contexto, y tras una serie de directivas previas, aparecen iniciativas como la propuesta (Campano et al., 2019) de la Unión Europea (UE) del Horizonte 2020. Este programa de investigación e innovación ha destinado, entre los años 2014 y 2020, ochenta mil millones de euros a garantizar la competitividad global de Europa, impulsando el crecimiento económico y la creación de empleo dentro de un marco de desarrollo ecoeficiente. Y bajo este objetivo económico, esta iniciativa muestra que la UE tiene muy presente que para poner a Europa al nivel competitivo que se pretende, es necesario tener en cuenta y dar solución los problemas climáticos y medioambientales.

Gran parte del impacto ambiental generado se centra en la producción de energía, dado que esta es responsable del 75% de la emisión de gases de efecto invernadero. Teniendo en cuenta esto, Horizonte 2020 propone como objetivos energéticos una reducción del 20% de estas emisiones en el año 2020 y una de entre 80-95% para el año 2050. La UE propone alcanzar estos objetivos mediante una mayor influencia de las energías renovables en la producción energética. (Programa específico H2020).

Con este panorama, el ámbito de la Arquitectura y concretamente de las instalaciones pueden tener una alta influencia en el logro de estas propuestas. Enfocado al marco español y a este trabajo, cabe destacar que los edificios residenciales suponen un 17% de la energía total consuma en España (Fig. 07a) y un 31% de toda la energía eléctrica (Fig. 07b), según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2018). Esto genera un enorme campo de oportunidades de reducción de consumo energético, teniendo en cuenta la cantidad de edificios residenciales que, por su año de construcción, no cumplen con los requisitos de ecoeficiencia actuales. La rehabilitación energética de estos edificios puede suponer uno de los factores claves para lograr el objetivo propuesto para 2050.

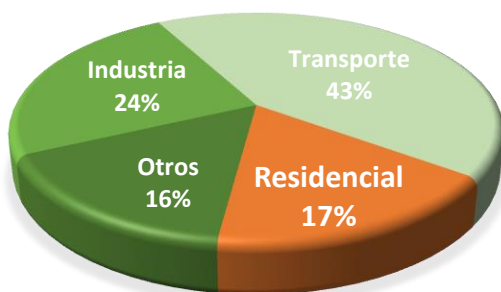


Fig. 07a – Distribución energética de España; Fuente: IDAE

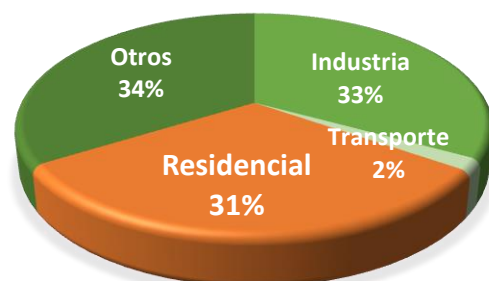


Fig. 07b – Distribución energía eléctrica en España; Fuente: IDAE

3.2.2 Ahorro económico.

A nivel económico, la Arquitectura está orientándose en apostar por edificios de alta eficiencia energética, y es que, aunque en muchos casos ello requiera una alta inversión inicial, un edificio eficiente sometido a un proceso de auditoría energética en su fase de diseño es más rentable económicamente a medio y largo plazo que los edificios convencionales. Muestra de ello es que grandes compañías multinacionales como la empresa consultora *Deloitte* apuesten porque sus nuevas sedes busquen el máximo nivel de eficiencia, siendo esto sinónimo tanto de compromiso medioambiental como de prestigio empresarial. Un ejemplo de esto es el edificio *The Edge*, sede de la marca en Ámsterdam (Fig. 08).



Fig. 08 – Edificio The Edge de le empresa Deloitte; Fuente: www.blogs.deia.eu

Sumado al ahorro energético antes mencionado que puede suponer el correcto aprovechamiento de la luz natural mediante un correcto diseño, aparece también implícito un ahorro económico asociado a la disminución del uso de la luz eléctrica, ya que esta se traduce de forma inmediata en ahorro económico directamente proporcional a dicho consumo energético. En este sentido, el ahorro económico es un concepto más cercano a la población, puesto que afectara de forma directa a la vida y la economía de las familias frente a la problemática medioambiental, más global y ajena.

3.2.3 Problemas de salud asociados.

El tercer campo de estudio donde tiene influencia el aprovechamiento de la luz de día es el de la salud. Existen diversos estudios que demuestran que la luz natural es el factor principal para un correcto funcionamiento del ritmo circadiano, el cual se basa en un ciclo de 24 horas que ordena los comportamientos físicos y psicológicos del cuerpo humano y en el cual se produce la pérdida de melatonina por parte del cerebro, conocida como estímulo circadiano (CS).

Estudios previos que han tratado el tema del diseño de huecos como beneficio para un correcto funcionamiento del estímulo circadiano (CS), los siguientes:

(Ignacio Acosta et al., 2019): En este estudio se analiza el impacto en el ritmo circadiano de variables arquitectónicas como la geometría de los huecos y de la reflectancia de los paramentos interiores, teniendo en cuenta los tamaños de hueco más comunes en la arquitectura. Para ello, se utiliza de forma novedosa la métrica de la autonomía del estímulo circadiano (CSA) para estudiar las diferentes dimensiones de hueco y orientación.

(Ignacio Acosta et al., 2016): Este estudio analiza la influencia de los huecos de ventana, de la reflectancia de materiales interiores y de la latitud en el estímulo circadiano en habitaciones de hospital. En él se determina el porcentaje de días al año en los que se recibe un nivel mínimo de estímulo circadiano en función de diferentes dimensiones de huecos de fachada, reflectancia de superficies interiores y latitudes.

(Ignacio Acosta et al., 2015): Este estudio presenta una metodología que permite optimizar el tamaño de huecos de ventana en oficinas, así como evaluar el impacto de la reflectancia de los paramentos interiores y del plano de trabajo, utilizando como ejemplo metodológico un caso de estudio ubicado en Madrid. Concluye que, a pesar de la dimensión de huecos, las reflectancias interiores son un factor fundamental que debe ser tenido en cuenta en el diseño arquitectónico.

(Ignacio Acosta et al., 2018b): Este estudio determina los resultados de autonomía de luz de día, es decir, el porcentaje de días al año en los que el estímulo circadiano supera un mínimo establecido, en un conjunto de diseños habituales de aulas docentes para una

serie de proporciones de hueco, reflectancia y orientación. Determina finalmente la alta influencia de las reflectancias en el estímulo circadiano desarrollado por los ocupantes.

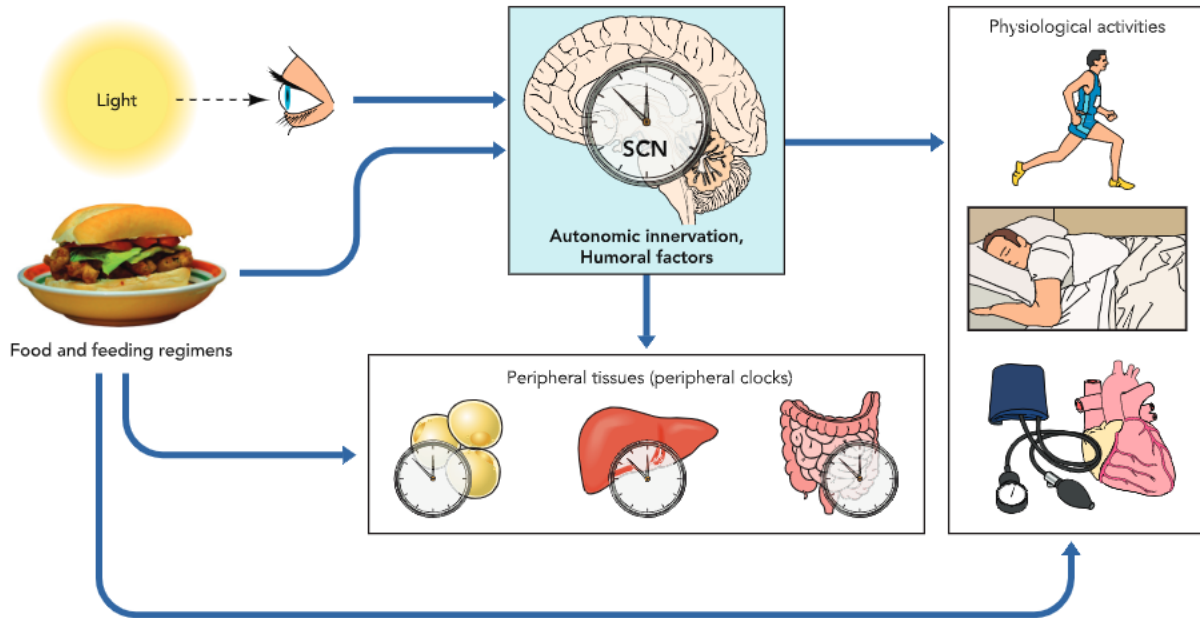


Fig. 09 – Problemas asociados a los ritmos circadianos; Fuente: (Froy, 2011)

3.3 Antecedentes.

Este trabajo se nutre principalmente de la actividad investigadora desarrollada por el grupo TEP130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía del PAIDI (Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación), adscrito al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, continuando en paralelo con los avances desarrollados por una serie de Trabajos de Fin de Grado (TFG) elaborados en el seno de dicho grupo.

(Proyecto I+D+i Dynalight, 2018-2020). Su objetivo principal es optimizar el diseño eficiente de un sistema de iluminación biodinámica para promover un adecuado ritmo circadiano en centros de trabajo de actividad continuada, evaluando de forma simultánea los sistemas de control inteligentes para el aprovechamiento de luz natural. El centro de trabajo objeto de estudio es la Unidad de Cuidados Intensivos de Traumatología del Hospital

Universitario Virgen del Rocío de Sevilla, modificándose el sistema de iluminación proyectado para contar con un sistema de iluminación con control inteligente que combine luz natural y eléctrica, de modo que se obtengan 500 lx en el plano de trabajo, al tiempo se añade un sistema de iluminación biodinámica.

(Reinhart et al., n.d.): En este trabajo se cuantifica el *Daylight Autonomy* en espacios residenciales teniendo como variables de estudio la reflectancia de las superficies interiores, la geometría de las ventanas, la orientación y las condiciones climáticas. En él se concluye que el DA es proporcional a la superficie de hueco y a la reflectancia de los materiales en la parte interna de la sala, mientras que su influencia en la parte más próxima a fachada no es significativa. Otra conclusión es que las ventanas colocadas en la parte superior de la fachada proporcionan una mayor iluminación en el fondo de la habitación que las centradas en la misma.

(Rodrigo & Amado, n.d.): Este estudio determina que las ventanas cuadradas proporcionan Daylight Factors ligeramente más altos que las ventanas horizontales y notablemente más altos que las ventanas verticales, considerando la misma superficie de hueco. También se calcula el ahorro energético que supone cada modelo de ventana.

(Rodrigo & Amado, n.d.): Esta investigación concluye que, para espacios de más de 3,00 metros de profundidad, los controles inteligentes de iluminación proporcionan importantes ahorros energéticos y periodos de amortización bajos en las condiciones climáticas más desfavorables. También demuestra que los sistemas dimerizadores permiten ventanas más pequeñas que otras soluciones de control.

(Luque, 2019): TFG de Fundamentos en Arquitectura que pretende facilitar el cálculo de la iluminación en los espacios interiores, estableciendo un vínculo más preciso entre una de las principales métricas estáticas, el Factor de Luz Día (Daylight Factor, DF) y otra de las principales métricas dinámicas, la Autonomía de Luz Día (Daylight Autonomy, DA) vinculándolas a través del Minimum

Daylight Autonomy (DAm) desarrollado por Acosta et al. [2019], permitiendo, sin necesidad de realizar una simulación computacional compleja o incluso con mediciones in situ puntuales, conocer los valores dinámicos de una forma precisa y en un tiempo menor.

(Ruiz, 2019): TFG de Fundamentos en Arquitectura que se basa en el estudio y desarrollo de una nueva métrica dinámica de iluminación natural, denominada Partial Daylight Autonomy (DAp), partiendo de otra métrica existente y ampliamente utilizada, el Daylight Autonomy (DA), de forma que permita un estudio lumínico más preciso de cualquier estancia cuyo uso sea estacional, como podrían ser las aulas de un instituto. De esta manera, es posible optimizar el tamaño de los huecos de ventana en fachada para lograr un nivel de iluminación eficiente y fiel a la necesidad real, eliminando la divergencia que genera el DA al considerar en cálculo aquellos meses en los que no hay ocupación definida.

Asimismo, este trabajo avanza en el conocimiento generado por dicho grupo de investigación, al aplicar de forma novedosa una herramienta informática de cálculo energético y lumínico de escala urbana a las metodologías y estudios previos. Para ello, se basa en:

(Mardaljevic, 2000): En este documento se presenta la herramienta de diseño de modelos urbanos basada en Rhinoceros llamada UMI, que permite realizar evaluaciones operativas de energía e iluminación natural. Se aplica sobre un caso de estudio mixto en Boston.

3.4 Métodos informáticos de cálculo lumínico.

Puesto que este trabajo se basa en cálculos lumínicos realizados mediante herramientas informáticas, es preciso describir los tres principales métodos computacionales de cálculo lumínico utilizados por las herramientas más habituales en este contexto científico.

3.4.1 Radiosidad.

“Asumiendo que todos los materiales empleados son de tipo difuso, este método está basado en el uso de elementos finitos que servirán de base para el cálculo de la distribución final de la luz mediante la resolución de un conjunto de ecuaciones lineales. El método básico calcula la iluminación global de forma totalmente independiente del punto de vista del observador, pero es costoso en cuanto a tiempo de computación y requerimientos de memoria” (Reinhart et al., n.d.)

Este método tiene en cuenta que cada rayo de luz que impacta sobre una superficie será reflejado en todas direcciones sin importar el punto de incidencia (superficie lambertiana o difusa ideal). Trabaja con la acumulación de rayos incidentes reflejados.

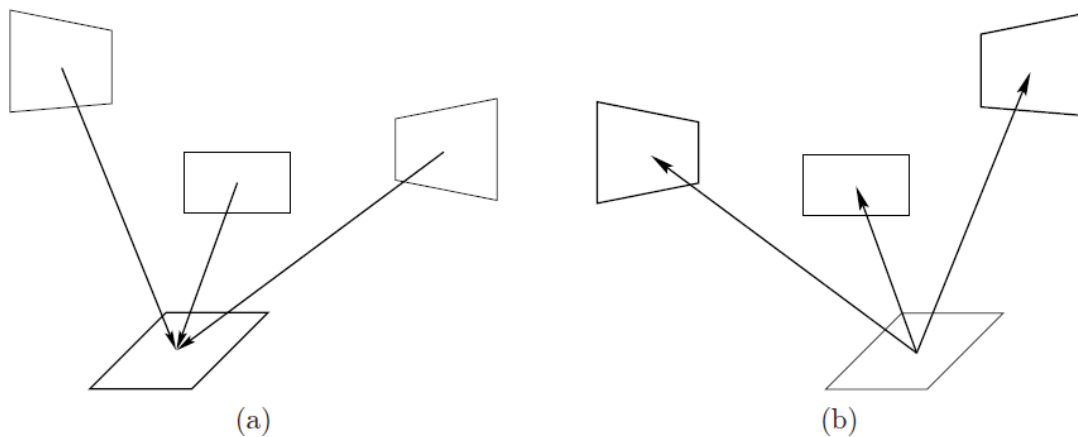


Fig. 10 – Diagramas de acumulación y disparo de energía de un elemento; Fuente: Tesis doctoral J. Sanjurjo (2011)(Reinhart et al., n.d.)

3.4.2 Ray tracing.

El *Ray tracing*, en cambio, “es un método de muestreo basado en el lanzamiento de rayos a través de la escena desde el punto de vista del observador, mediante los cuales se estima la iluminación. El método básico de ray tracing sólo puede usarse para el cálculo de reflexiones, refracciones e iluminación directa.” (Campano et al., 2018)

Este método trabaja con rayos lanzados desde el punto de vista del observador que son reflejados con el mismo ángulo de entrada. Este hecho provoca que el cálculo sea distinto para cada punto de vista y que, aunque sea más fácil calcularlo, sea menos completo que el método de radiosidad.

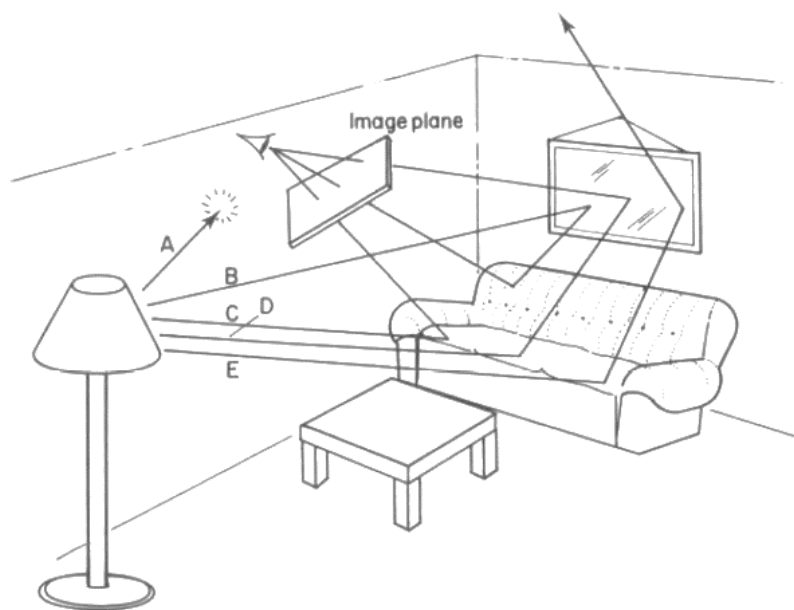


Fig. 11 – Ejemplo de Ray-tracing; Fuente: An introduction to Ray tracing (A.S. Glassner, 1989)

3.4.3 Daylight coefficient method.

Método que se define como el cociente entre la iluminancia total producida por un trozo de cielo en un punto de la estancia ($\Delta E_{\gamma\alpha}$), entre la luminancia de ese trozo de cielo ($L_{\gamma\alpha}$) por el ángulo de incidencia de ese trozo de cielo ($\Delta S_{\gamma\alpha}$), para una altura (γ) y un acimut (α) dados (Mardaljevic, n.d.) (Campano et al., 2018). Se define con la siguiente ecuación (3.5):

$$D_{\gamma\alpha} = \frac{\Delta E_{\gamma\alpha}}{L_{\gamma\alpha} \Delta S_{\gamma\alpha}} \quad (3.5)$$

Donde: $D_{\gamma\alpha}$ es el *Daylight Coefficient* en función de una altitud γ y un acimut α .

$L_{\gamma\alpha}$ es la luminancia del trozo de cielo.

$\Delta S_{\gamma\alpha}$ es el ángulo de incidencia del trozo de cielo.

$\Delta E_{\gamma\alpha}$ es la iluminancia total producida por el trozo de cielo en un punto interior.

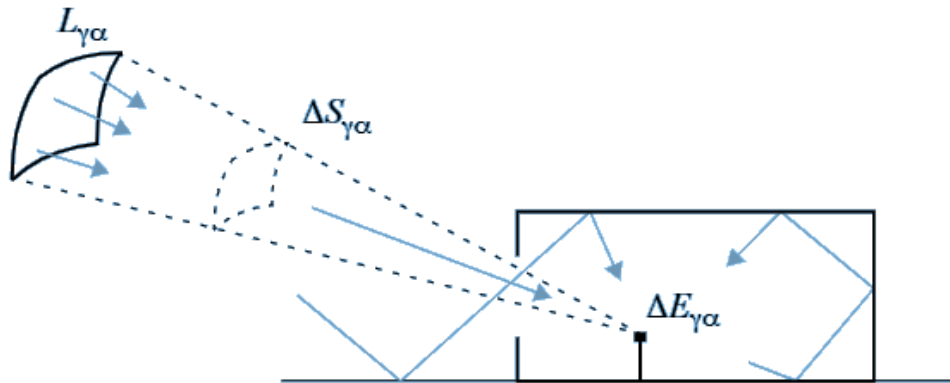


Fig. 12 – Descripción gráfica del *Daylight Coefficients Method*; Fuente: (Mardaljevic, 2000)

Teniendo en cuenta que el *Daylight Coefficient* (DC) varía en función de las características de la estancia y que la iluminancia producida en el punto interior será directamente dependiente de la luminancia del trozo de cielo, se calcula mediante la siguiente ecuación (3.6):

$$E_{xyz} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} D_{\gamma\alpha} L_{\gamma\alpha} \cos \gamma d\gamma d\alpha \quad (3.6)$$

Donde: E_{xyz} es la iluminancia total producida por el trozo de cielo en un punto interior.

$D_{\gamma\alpha}$ es el *Daylight Coefficient* en función de una altitud γ y un acimut α .

$L_{\gamma\alpha}$ es la luminancia del trozo de cielo.

Este método es el usado el motor Radiance simplificado que utiliza la herramienta UMI (Campano et al., 2018), la cual es la empleada en este trabajo para los cálculos lumínicos.

3.5 Marco normativo.

Aunque el conjunto de normativas que regulan la eficiencia energética de la Arquitectura es extenso, estas tienen en el mejor de los casos únicamente algunas menciones difusas a la iluminación mediante el aprovechamiento de luz natural. Es el caso de Código Técnico de la Edificación (CTE), que en su documento básico DB-HE sobre el Ahorro de energía, dedica su tercera sección (DB-HE3) a fijar las condiciones que deben tener las instalaciones de iluminación, en el que se marca el valor de la eficiencia energética de la iluminación (VEEI) límite de los sistemas de iluminación eléctrica según el uso de edificio, pero regula de forma somera el empleo de la luz natural, introduciendo la obligación de colocar sistemas de aprovechamiento que regulen el aporte de las luminarias en zonas cercanas a fachada o lucernarios.

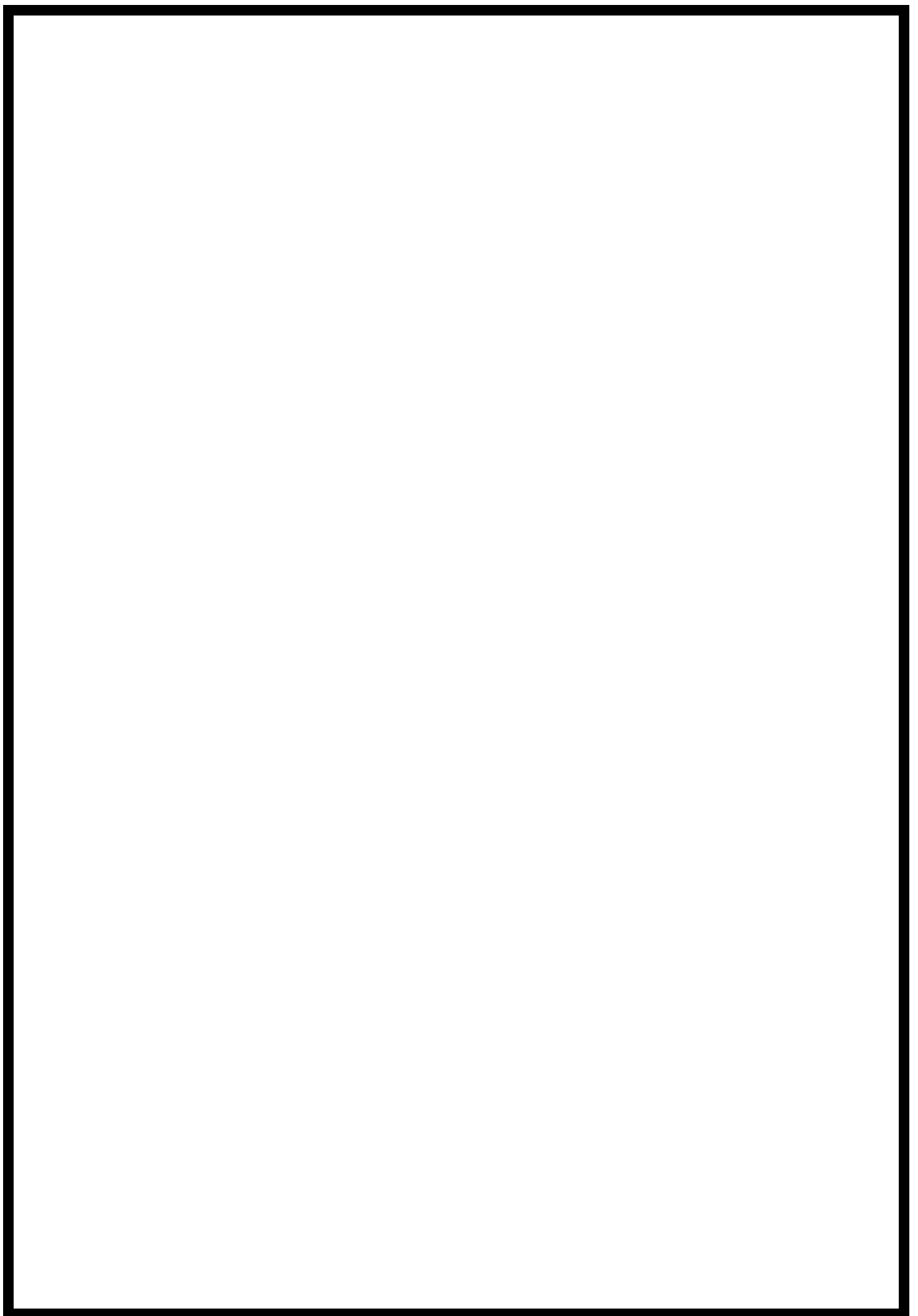
Otro de los principales documentos legales de aplicación en España que trata el tema de la luz natural es el Real Decreto 486/1997, en el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. En su anexo IV, dedicado a la iluminación en los puestos de trabajo, se establecen los valores mínimos de iluminación de los lugares de trabajo. A su vez también dicta de forma laxa que “Siempre que sea posible, los lugares de trabajo tendrán una iluminación natural, que deberá complementarse con una iluminación artificial cuando la primera, por sí sola, no garantice las condiciones de visibilidad adecuadas” (RD 486/1997).

También cabe destacar la existencia de la guía técnica para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios (IDAE 2005), en el cual se entra con más profundidad en el correcto diseño arquitectónico para un mejor aprovechamiento de la luz de día, aunque no tenga carácter obligatorio.

A pesar de la normativa mencionada, en España todavía no se ha introducido en el marco regulatorio conceptos tan determinantes como el uso de las métricas dinámicas de iluminación, como el *Daylight Autonomy*, que actúan como herramientas indispensables para conseguir la optimización de la luz natural en el diseño arquitectónico.

BLOQUE B

METODOLOGÍA



4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO.

La metodología del presente trabajo se basa en la generación de modelos computacionales de escala urbana mediante herramientas informáticas de cálculo dinámico, a partir de los cuales establecer un conjunto de hipótesis de variables a las que aplicar métricas dinámicas de iluminación natural para su análisis y establecimiento de conclusiones.

4.1 Definición del caso de estudio.

4.1.1 Justificación.

Para alcanzar la consecución de los objetivos generales fijados se han escogido como casos de estudio dos bloques de viviendas plurifamiliares de dos de las tipologías predominantes en la ciudad de Sevilla desarrolladas entre los años 50 y 60 del pasado siglo. En este sentido, cabe destacar que existe un número elevado de edificios residenciales que, por su periodo de construcción y el contexto de emergencia habitacional en el que fueron desarrollados, han quedado obsoletos a nivel de estándares energéticos y de salubridad ambiental. Por ello, se han escogido como casos de estudio un bloque de tipología H y otro de tipología de bloque lineal, puesto que son tipologías ampliamente extendidas de las cuales se pueden sacar conclusiones que podrían contribuir a una mejora notable de las condiciones de aprovechamiento de luz natural de la ciudad, ya que por las condiciones que se dieron en Sevilla a mediados del siglo XX generaron una proliferación de este tipo de bloques que ahora requieren una necesaria rehabilitación energética que los adecue a las necesidades actuales.

4.1.2 Bloque tipo H.

El primer objeto de estudio es el bloque tipo H situado en la C/ Gaviota del barrio sevillano de Los Pájaros. El edificio cuenta con planta baja más cuatro y sus huecos tienen unas dimensiones de 1,00 x 1,10 m. El estudio se centra en un sector del edificio, que consta de un bloque vertical de unidades de vivienda cuya fachada principal tiene orientación sur y huecos en sus tres fachadas (sur, este y norte). Cada planta de estudio corresponde a una vivienda que tiene 49,70 m² (Fig. 13).



Fig. 13 – Objeto de estudio bloque plurifamiliar tipo H; Fuente: propia

4.1.3 Bloque lineal.

El segundo objeto de estudio será otro edificio situado en la misma calle que el bloque tipo H usado como primer objeto de estudio; concretamente, enfrente al mismo. En este caso, se escoge un bloque lineal de viviendas que tiene planta baja más tres, con fachadas a este y oeste (principal) y cuyos huecos tienen unas dimensiones de 0,90 x 1,20 m. Al igual que en el tipo H, el estudio de este bloque lineal se centra en un fragmento vertical de unidades de viviendas, en este caso, el central. Cada planta de estudio tiene 97,40 m² (Fig. 14).

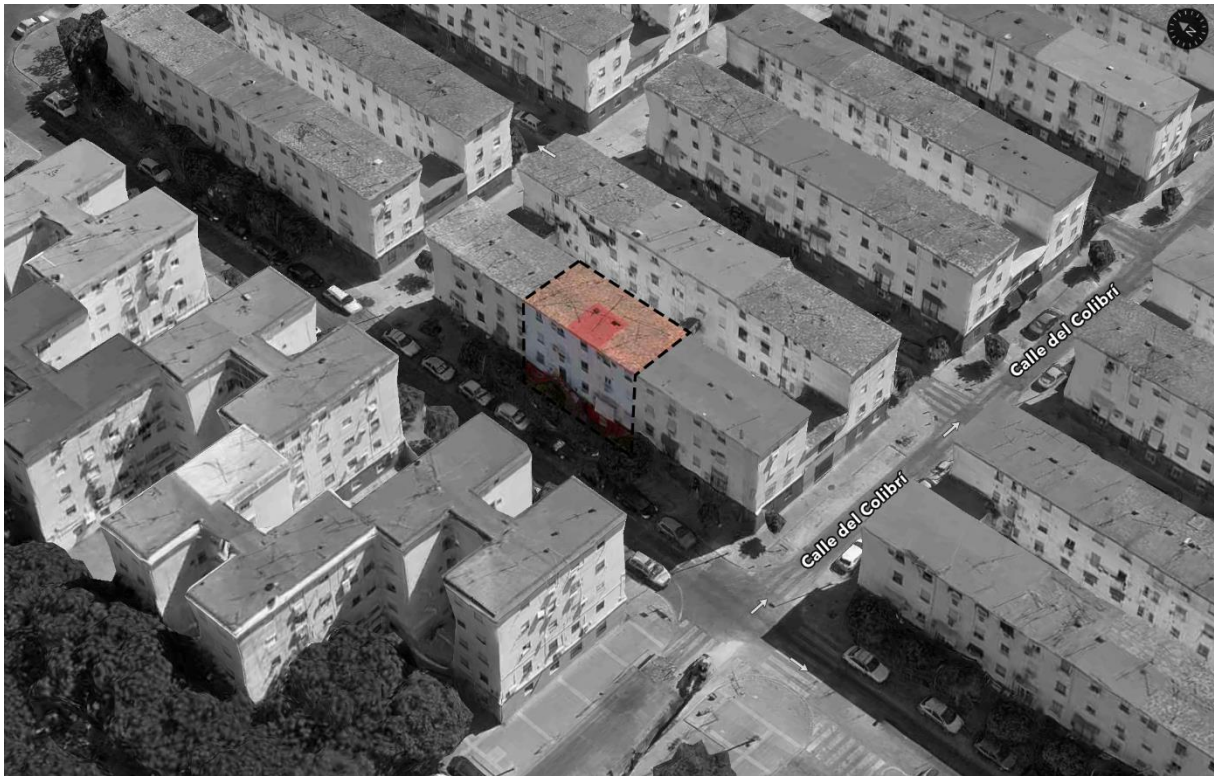


Fig. 14 – Objeto de estudio bloque plurifamiliar tipo lineal; Fuente: propia

4.2 Definición de las métricas utilizadas.

En el estudio se emplean dos tipos de métricas, lumínicas dinámicas y energéticas. La primera y principal métrica utilizada es el *Continuous Daylight Autonomy* (cDA), que equivale al porcentaje de tiempo al año en el que no se necesita o se regula el uso de luz eléctrica en un punto o conjunto de puntos del interior de un recinto. El cDA tiene una doble componente, ya que nos permite evaluar el aprovechamiento de luz natural por su definición y contabilizar el consumo de luz eléctrica regulada mediante un sistema de aprovechamiento con su inversa.

En el estudio se trabajará con el cDA para unas iluminancias de 100 lx y 300 lx, correspondientes a los niveles mínimos y máximos recomendados para viviendas, dado que no existe normativa al respecto en residencial vivienda. La segunda métrica lumínica empleada es el *Spatial Daylight Autonomy* (sDA), que nos permite saber el porcentaje del área de estudio que alcanza un nivel de iluminancia dado en un mínimo del 50% del tiempo de uso. Por definición, el sDA se mide para un umbral de iluminancia de 300 lx.

Por último, se usará como indicador energético el consumo energético por metro cuadrado al año (kWh/m²·año) asociado a la iluminación, para poder valorar la influencia energética de las variables bajo estudio.

4.3 Definición de las herramientas de cálculo.

En este trabajo se han utilizado las siguientes herramientas de cálculo:

- UMI (Urban Modelling Interface): Es una herramienta de evaluación de eficiencia energética, movilidad y aprovechamiento de luz de día en el diseño a nivel urbano. Lanzada en el 2013, por el prestigioso Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), supone una solución innovadora tanto para el diseño de nuevos barrios como para la rehabilitación energética de los existentes. UMI trabaja con los motores de simulación EnergyPlus y Radiance (Daysim), siendo la versión 2.0 la utilizada en los cálculos (Campano et al., 2018).

Para el trabajo se empleará UMI para realizar los cálculos de aprovechamiento lumínico de luz de día, ya que este permite obtener los valores de las métricas dinámicas cDA y sDA de los edificios modelados (Fig. 15).

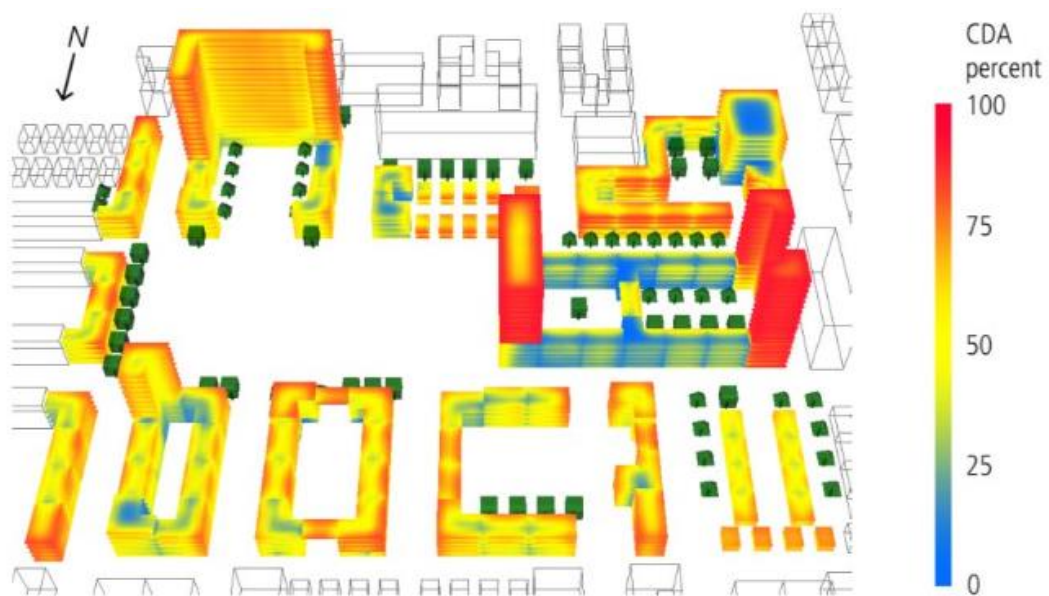


Fig. 15 – Resultados de UMI para proyecto en Boston; Fuente: (Reinhart et al., n.d.)

- Rhinoceros: Esta herramienta de modelado 3D (Fig. 16) ha sido utilizada para realizar los modelos virtuales tanto del caso de estudio como de la batería de hipótesis realiza para obtener resultados. Se ha escogido esta herramienta debido a que UMI trabaja como plug-in asociado dentro del mismo. Este modelado se ha realizado con la versión 6.13 de la herramienta.



Fig. 16 – Logo corporativo Rhinoceros; Fuente: www.rhino3d.com

- Microsoft Excel: Debido a las limitaciones de la herramienta UMI en cuanto a análisis de resultados, se ha desarrollado una hoja de cálculo Excel en la que, mediante el uso de macros programados en lenguaje VBA (Visual Basic for Applications), se extraen todos los resultados por punto de cDA y sDA generados en un archivo temporal de cálculo por UMI (Fig. 17), de forma que se puedan mostrar adicionalmente los valores medios por edificio o por planta, así como sus desviaciones estándar, entre otros (Fig. 18). Esta herramienta se ha desarrollado con la ayuda del grupo de investigación TEP130 personificado en la figura del tutor de este trabajo, el profesor Miguel Ángel Campano Laborda.

DATA FROM MAIN *.UDX FILE (TXT FORMAT)

DELETE RESULTS

EXTRACT RESULTS

PROJECT NAME

LUXTARGET

LUXMAX

BlindThreshold

BlindShadingCoefficient

EnvelopeMeshing

FDIST

Fig. 17 – Entrada de datos del Excel de post-procesado de resultados; Fuente: propia

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	MODEL NAME												FLOOR 1							
2	HL_7_(40_60_40_0)												BUILDING 1							
3	ILLUMINANCE THRESHOLD												DYNAMIC METRICS							
4	FROM UMI												THRESHOLD OF 300LX							
5	CUSTOM												THRESHOLD OF 100LX							
6	300 lx												100 lx							
7	MEAN VALUES OF DYNAMIC DAYLIGHT METRICS												THRESHOLD OF 300LX							
8													THRESHOLD OF 100LX							
9													***** ***** ***** ***** DA: 1.00							
10													(e 0.13) (e 0.00) (e 0.43) (e 0.00) (e 0.00)							
11													min: 0.39 min: 0.00 min: 0.00 min: 1.00 min: 1.00							
12													MAX: 0.86 MAX: 0.00 MAX: 1.00 MAX: 1.00 MAX: 1.00							
13													X Y Z							
14													***** ***** 0.85 m 0.78 0.00 1.00 1.00 1.00							
15													***** ***** 0.85 m 0.71 0.00 1.00 1.00 1.00							
16													***** ***** 0.85 m 0.83 0.00 1.00 1.00 1.00							
17													***** ***** 0.85 m 0.75 0.00 1.00 1.00 1.00							
18													***** ***** 0.85 m 0.79 0.00 1.00 1.00 1.00							
19													***** ***** 0.85 m 0.71 0.00 1.00 1.00 1.00							
20													***** ***** 0.85 m 0.85 0.00 1.00 1.00 1.00							
21													***** ***** 0.85 m 0.86 0.00 1.00 1.00 1.00							
22													***** ***** 0.85 m 0.86 0.00 1.00 1.00 1.00							
23													***** ***** 0.85 m 0.84 0.00 1.00 1.00 1.00							
24													***** ***** 0.85 m 0.83 0.00 1.00 1.00 1.00							
25													***** ***** 0.85 m 0.86 0.00 1.00 1.00 1.00							
26													***** ***** 0.85 m 0.48 0.00 0.00 1.00 1.00							
27													***** ***** 0.85 m 0.53 0.00 0.00 1.00 1.00							
28													***** ***** 0.85 m 0.39 0.00 0.00 1.00 1.00							
29													***** ***** 0.85 m 0.64 0.00 0.00 1.00 1.00							
30													***** ***** 0.85 m 0.84 0.00 1.00 1.00 1.00							
31													***** ***** 0.85 m 0.80 0.00 1.00 1.00 1.00							
32													***** ***** 0.85 m 0.81 0.00 1.00 1.00 1.00							
33													***** ***** 0.85 m 0.71 0.00 1.00 1.00 1.00							
34													***** ***** 0.85 m 0.83 0.00 1.00 1.00 1.00							
35													***** ***** 0.85 m 0.66 0.00 0.00 1.00 1.00							
36	MINIMUM AND MAXIMUM VALUES OF DYNAMIC DAYLIGHT METRICS																			
37																				
38																				
39																				
40																				
41																				
42																				
43																				
44																				
45																				
46																				
47																				
48																				
49																				
50																				
51																				
52																				
53																				
54																				
55																				
56																				
57																				
58																				
59																				
60																				
61																				
62																				
63																				
64																				
65																				
66																				
67																				
68																				
69																				
70																				
71																				
72																				
73																				
74																				
75																				
76																				
77																				
78																				
79																				
80																				
81																				
82																				
83																				
84																				
85																				
86																				
87																				
88																				
89																				
90																				
91																				
92																				
93																				
94																				
95																				
96																				
97																				
98																				
99																				
100																				

Fig. 18 – Ejemplo de resultados obtenidos tras en post-procesado; Fuente: propia

4.4 Validación de la herramienta de cálculo.

Debido a la corta trayectoria de la herramienta UMI, que deriva en que aún no se han podido realizar suficientes trabajos científicos para comprobar su precisión y fiabilidad, se ha realizado un proceso de validación mediante comparación de resultados entre UMI, DIVA y la celda de ensayo (Fig. 19) del grupo de investigación TEP130 (Campano et al., 2018).

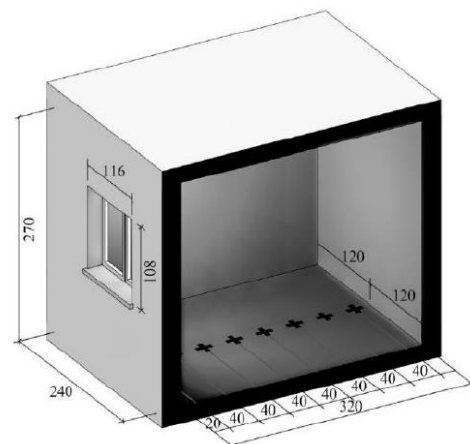


Fig. 19 – Celda de ensayo del TEP130; Fuente: (León-Rodríguez et al., 2017)

Debido a las limitaciones de UMI respecto a la situación del hueco de ventana en el modelo, dado que trabaja con porcentajes dados de hueco-fachada y no con dimensiones y ubicaciones de huecos propiamente dichas, así como a la imposibilidad actual de variar las características de los materiales respecto a las determinadas por defecto, se ha realizado el

modelo de la celda en DIVA adaptado a las características de UMI. Para ello, se ha partido de las condiciones de contorno originales de la celda, modelándose en la herramienta DIVA con las reflectancias estándares de UMI (Tabla 01) y los porcentajes más aproximados permitidos por UMI, dado que la herramienta DIVA ya fue validada mediante comparación con los resultados medidos in situ durante un año en la celda de ensayo (Ignacio Acosta et al., 2016) en los Trabajos de Fin de Grado en Fundamentos en Arquitectura de O. Luque y A. Ruiz en 2019 (Fig. 20).

	Techo	Suelo	Pared	Vidrio
Reflectancia	0.40	0.40	0.30	0.07
Absortancia	0.60	0.60	0.70	0.10
Transmitancia	0.00	0.00	0.00	0.83

Tabla 01 – Características de los materiales utilizados para la validación; Fuente: propia

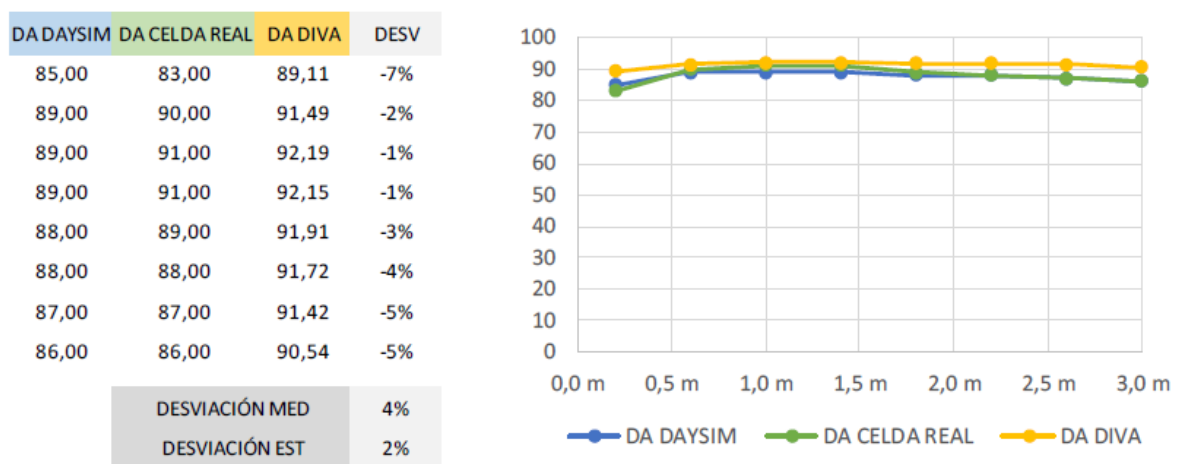


Fig. 20 – Validación de DIVA comparando con la celda del TEP130; Fuente: (Luque, 2019)

Una vez calculado el modelo modificado de la celda de ensayo tanto en DIVA como en UMI, se han comparado los resultados de ambos para un umbral de iluminancia de 300 lx en el punto central de la misma, observándose un error relativo del 8,74%, dándose por validada la herramienta debido a que dicho valor es inferior al 10% (Fig. 21).

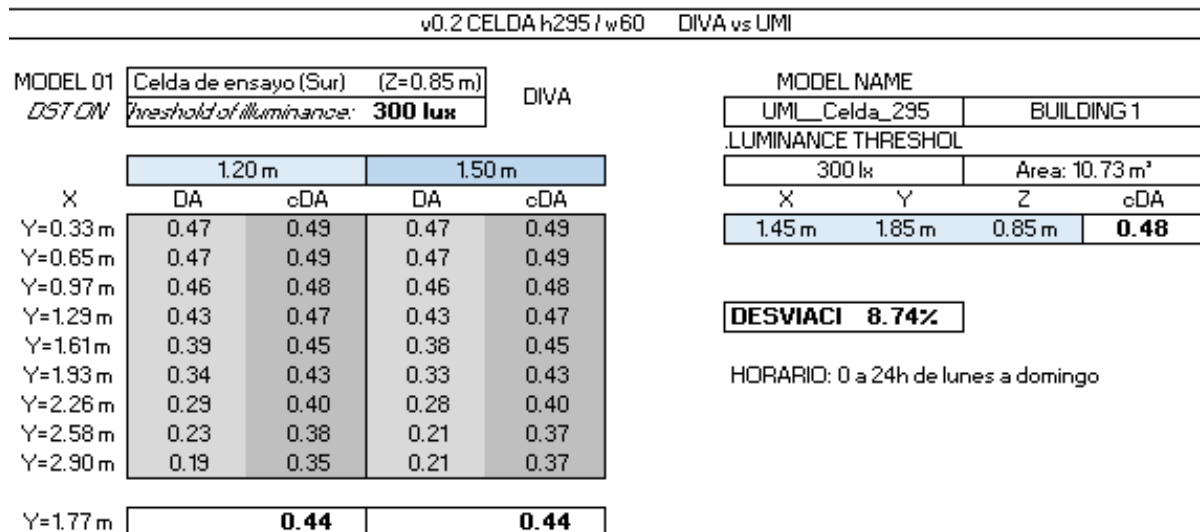


Fig. 21 – Validación de resultados entre UMI y DIVA para la celda de ensayo; Fuente: propia

4.5 Modelado del caso de estudio.

Una vez definidas las herramientas de modelado y cálculo, y tras haberse validado esta última mediante comparación, se han realizado los modelos del estado real de ambos casos de estudio (bloque tipo H y bloque lineal) para posteriormente calcular sus valores de cDA, para umbrales de iluminancia de 300 lx y 100 lx, y el sDA para 300 lx [50%], ambos indicadores calculados tanto por planta como para los valores medios del bloque completo.

El modelado se ha realizado conforme a las características de introducción de datos y las limitaciones impuestas por UMI, generándose tanto los objetos de estudio como el entorno inmediato (Fig. 22), ya que uno de los objetivos del trabajo es realizar el análisis lumínico teniendo en cuenta el efecto que puede tener la sombra arrojada por el entorno en los valores de aprovechamiento de luz natural.

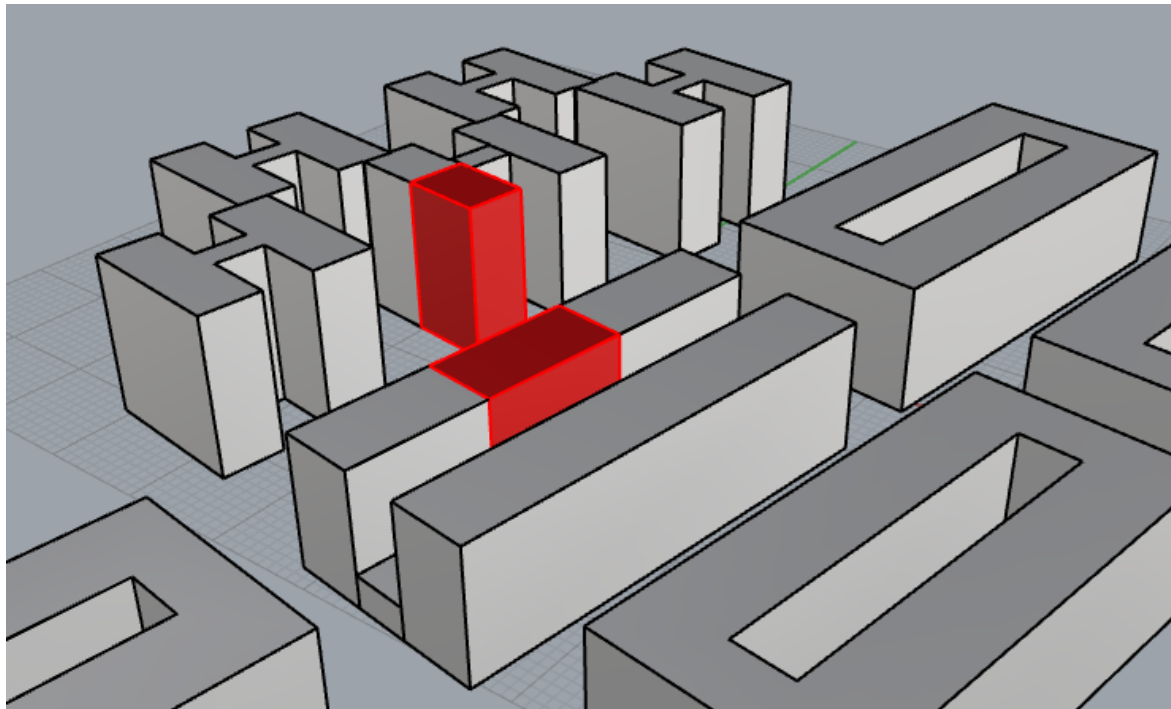


Fig. 22 – Modelo 3D del caso de estudio y su entorno; Fuente: propia

4.6 Definición de las variables de cálculo.

Las variables con las que se ha trabajado son las siguientes:

- % de hueco en fachada: Tomando como punto de partida los porcentajes de hueco respecto de fachada que tienen actualmente los objetos de estudio, los cuales han sido redondeados al 10% debido a limitaciones de la herramienta (Tablas 02 y 03), se han tomado como valores para el análisis los porcentajes de hueco del 20%, del 40% y del 60%.

Bloque Tipo H			
Fachada	Superficie	Nº Huecos	% hueco
Norte	101.55 m ²	5	5 %
Sur	123.45 m ²	10	9 %
Este	90.45 m ²	10	12 %
Oeste	0.00 m ²	0	0 %

Tabla 02 – Porcentaje de hueco en fachadas del bloque tipo H; Fuente: propia

Bloque Lineal Centrado			
Fachada	Superficie	Nº Huecos	% hueco
Norte	0.00 m ²	0	0 %
Sur	0.00 m ²	0	0 %
Este	163.80 m ²	15	10 %
Oeste	163.80 m ²	15	10 %

Tabla 03 – Porcentaje de hueco en fachadas del bloque tipo lineal; Fuente: propia

- Orientación: para tener en cuenta como varían los resultados dependiendo de la orientación del bloque, se ha tomado la fachada sur del caso de estudio como fachada principal y se han realizado modelos en los que la fachada principal está al Este (Fig. 23), Norte y Oeste.

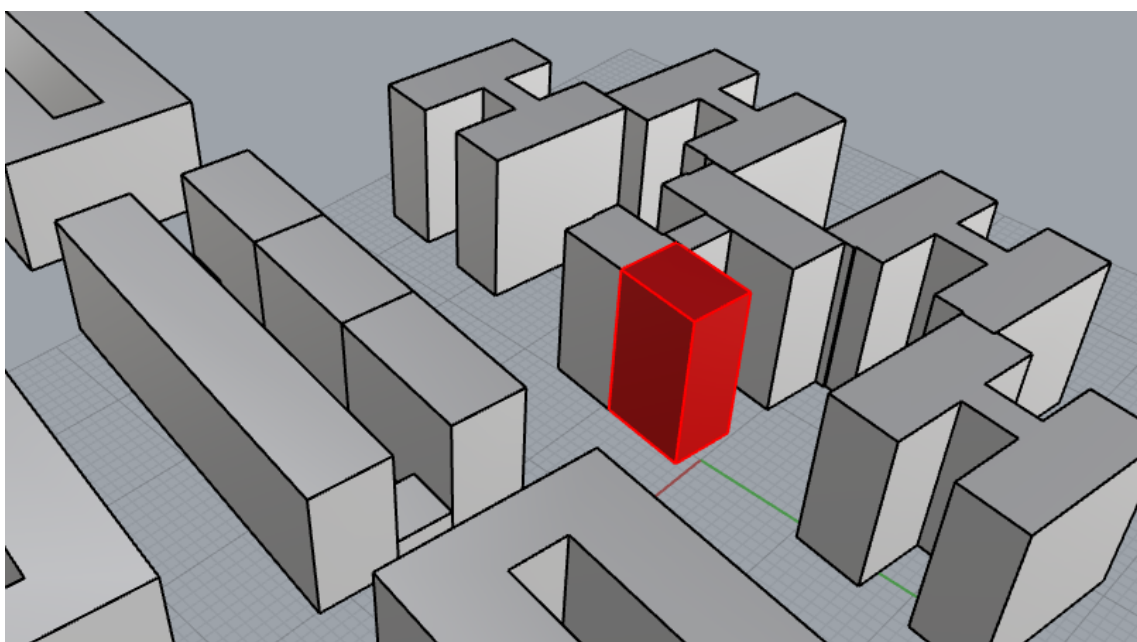


Fig. 23 – Modelo del bloque H con orientación este; Fuente: propia

4.7 Combinatoria de variables de cálculo.

Una vez definidas las variables de cálculo, se ha realizado una batería de hipótesis tanto para el bloque tipo H (Tabla 04) como para el bloque lineal (Tabla 05), que posteriormente serán utilizadas para obtener los valores de cada una de las hipótesis a fin de poder realizar el análisis que determine qué impacto tienen las variables sobre el caso de estudio.

HIPÓTESIS	% HUECO				ORIENTACIÓN
	Norte	Sur	Este	Oeste	
H_0	10	10	10	0	Sur
H_1	20	20	20	0	Sur
H_2	40	40	40	0	Sur
H_3	60	60	60	0	Sur
H_4	20	40	20	0	Sur
H_5	20	60	20	0	Sur
H_6	40	20	40	0	Sur
H_7	40	60	40	0	Sur
H_8	60	20	60	0	Sur
H_9	60	40	60	0	Sur
H_10	40	0	0	0	Sur
H_11	0	40	0	0	Sur
H_12	0	0	40	0	Sur
H_0_E	10	0	10	10	Este
H_0_N	10	10	0	10	Norte
H_0_O	0	10	10	10	Oeste
H_1_E	20	0	20	20	Este
H_1_N	20	20	0	20	Norte
H_1_O	0	20	20	20	Oeste
H_2_E	40	0	40	40	Este
H_2_N	40	40	0	40	Norte
H_2_O	0	40	40	40	Oeste

Tabla 04 – Combinatoria de hipótesis del bloque H; Fuente: propia

HIPÓTESIS	% HUECO				ORIENTACIÓN
	Norte	Sur	Este	Oeste	
L_0	0	0	10	10	Oeste
L_1	0	0	20	20	Oeste
L_2	0	0	40	40	Oeste
L_3	0	0	60	60	Oeste
L_4	0	0	20	40	Oeste
L_5	0	0	20	60	Oeste
L_6	0	0	40	20	Oeste
L_7	0	0	60	20	Oeste
L_8	0	0	40	0	Oeste
L_9	0	0	0	40	Oeste

Tabla 05 – Combinatoria de hipótesis del bloque lineal; Fuente: propia

4.8 Definición de las herramientas de análisis de resultados.

Una vez se han definido las herramientas de cálculo y se ha validado UMI como herramienta de cálculo lumínico para obtener valores de los indicadores *Continuous Daylight Autonomy (cDA)* y *Spatial Daylight Autonomy (sDA)*, se procede a obtener resultados de las diferentes hipótesis generadas mediante la variación de las variables definidas anteriormente, a fin de obtener resultados concluyentes sobre el impacto lumínico y energético que el diseño de huecos de ventana, asociado al aprovechamiento de luz natural, tiene en los objetos estudiados.

Una vez sean obtenidos los resultados, se plantean las siguientes herramientas de análisis:

- Análisis de gráficas lineales: se emplearán este tipo de gráficas para analizar los valores de cDA por planta de cada objeto de estudio, para un umbral dado de 300 lx, con el fin de obtener conclusiones sobre cómo afecta la altura de plantas debido a las sombras arrojadas que el entorno supone. Además, se cruzarán del mismo modo entre sí, explicado anteriormente los resultados de todas las hipótesis de cada bloque.
- Análisis de gráficas de barras: se analizarán por comparación los valores de cDA medio por bloque de cada una de las hipótesis en las que varía el porcentaje de hueco por fachada, para un umbral dado de 300 lx, con el objetivo de obtener conclusiones sobre el porcentaje de hueco óptimo para un correcto aprovechamiento de luz natural en los objetos de estudio.

También mediante gráfica de barras se analizará el consumo energético generado por cada hipótesis comparando el efecto que tendría un sistema de regulación lumínico, que se basaría en el valor expresado por el cDA del porcentaje de luz del día aprovechada, con el consumo máximo anual y medio que cada hipótesis tendría sin regulación.

- Desviación estándar: representa la dispersión de los valores obtenidos para todos los puntos calculados respecto al valor medio y que será incluida en la gráfica de barras sobre la media del bloque completo, representado como barra vertical. Se define con la siguiente ecuación (4.1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.1)$$

Dónde: \bar{x} es la media aritmética.

N es el número de datos de la muestra.

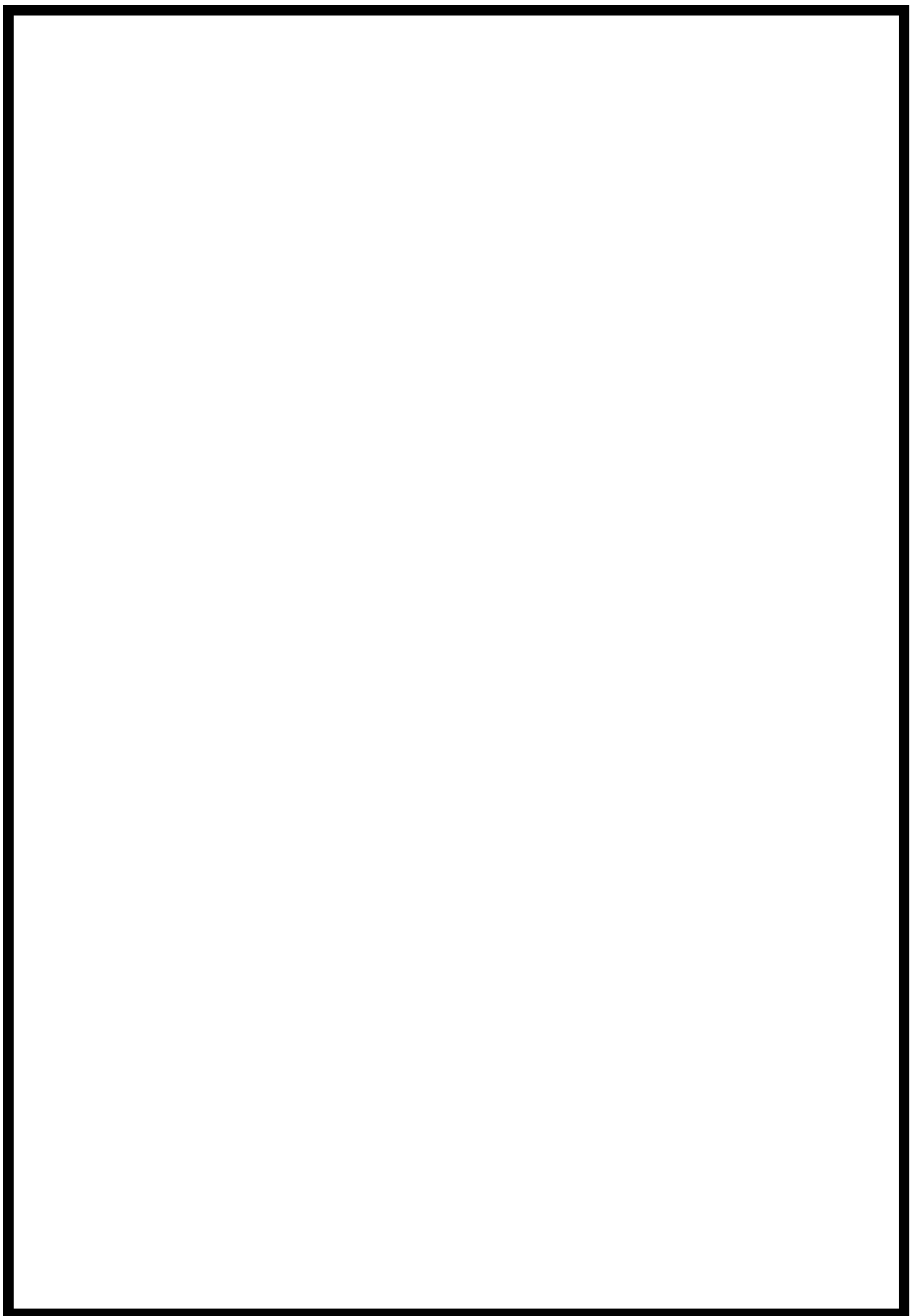
I es el número que tiene asignado un dato cualquiera de la muestra en el orden establecido en la misma.

X_i es el valor de un dato cualquiera dentro de la muestra.

σ es la desviación estándar.

BLOQUE C

RESULTADOS Y CONCLUSIONES



5. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 Resultados de cálculo.

5.1.1 Bloque tipo H.

Se exponen en este punto los resultados de obtenidos (Tabla 06) para el bloque de tipología H, comenzando por la hipótesis H₀, la cual corresponde al objeto de estudio en sus condiciones de porcentaje de hueco y orientación de la fachada principal (sur).

HIPÓTESIS H₀

Orientación: Sur

Porcentaje de hueco: Norte = 10% Sur = 10% Este = 10% Oeste = 0%

VALORES PRINCIPALES DE LAS MÉTRICAS DINÁMICAS

	cDA [300 lx]	sDA [300 lx]	cDA [100 lx]
PLANTA 1	0.37 (σ 0.18)	0.00 (σ 0.00)	0.81 (σ 0.27)
PLANTA 2	0.39 (σ 0.18)	0.00 (σ 0.00)	0.84 (σ 0.24)
PLANTA 3	0.44 (σ 0.19)	0.00 (σ 0.00)	0.88 (σ 0.20)
PLANTA 4	0.49 (σ 0.19)	0.05 (σ 0.21)	0.92 (σ 0.17)
PLANTA 5	0.54 (σ 0.19)	0.09 (σ 0.29)	0.95 (σ 0.14)
EDIFICIO	0.45 (σ 0.19)	0.03 (σ 0.16)	0.88 (σ 0.21)

VALORES MINIMOS Y MÁXIMOS DE LAS MÉTRICAS DINÁMICAS

	cDA [300 lx]	sDA [300 lx]	cDA [100 lx]
PLANTA 1	0.07/0.62	0.00/0.00	0.22/1.00
PLANTA 2	0.10/0.66	0.00/0.00	0.29/1.00
PLANTA 3	0.12/0.69	0.00/0.00	0.36/1.00
PLANTA 4	0.14/0.73	0.00/1.00	0.42/1.00
PLANTA 5	0.18/0.77	0.00/1.00	0.56/1.00
EDIFICIO	0.07/0.77	0.00/1.00	0.22/1.00

Tabla 06 – Resultados de la hipótesis H₀; Fuente: propia

A continuación, se presentan los resultados de cDA obtenidos en cada planta para cada hipótesis (Tabla 07). También los valores máximos, mínimos y medios del bloque en cada hipótesis y la desviación estándar de los valores (Tabla 08).

PLANTA	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)
	(10-10-10-0)	(20-20-20-0)	(40-40-40-0)	(60-60-60-0)	(20-40-20-0)	(20-60-20-0)	(40-20-40-0)
1	0.37	0.55	0.71	0.77	0.64	0.69	0.64
2	0.39	0.58	0.73	0.79	0.67	0.72	0.67
3	0.44	0.64	0.77	0.82	0.72	0.76	0.72
4	0.49	0.68	0.80	0.85	0.75	0.79	0.76
5	0.54	0.73	0.83	0.87	0.79	0.82	0.80

H_7	H_8	H_9	H_10	H_11	H_12
(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)
(40-60-40-0)	(60-20-60-0)	(60-40-60-0)	(40-0-0-0)	(0-40-0-0)	(0-0-40-0)
0.74	0.69	0.74	0.18	0.46	0.37
0.77	0.72	0.77	0.22	0.48	0.37
0.80	0.76	0.80	0.27	0.52	0.39
0.83	0.80	0.83	0.34	0.54	0.41
0.85	0.83	0.86	0.41	0.58	0.42

Tabla 07 – Resultados cDA por planta de la combinatoria de hipótesis bloque H; Fuente: propia

MEDIA DESV. EST. MINIMO MAXIMO	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)
	(10-10-10-0)	(20-20-20-0)	(40-40-40-0)	(60-60-60-0)	(20-40-20-0)	(20-60-20-0)	(40-20-40-0)
	0.45	0.64	0.77	0.82	0.71	0.76	0.72
	0.19	0.18	0.12	0.09	0.15	0.12	0.16
	0.07	0.15	0.30	0.45	0.24	0.33	0.21
	0.77	0.84	0.89	0.91	0.87	0.89	0.88

H_7	H_8	H_9	H_10	H_11	H_12
(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)
(40-60-40-0)	(60-20-60-0)	(60-40-60-0)	(40-0-0-0)	(0-40-0-0)	(0-0-40-0)
0.80	0.76	0.80	0.28	0.52	0.39
0.10	0.14	0.11	0.25	0.24	0.29
0.39	0.26	0.36	0.02	0.15	0.06
0.90	0.90	0.90	0.84	0.86	0.86

Tabla 08 – Valores mínimos y máximos, media y desviación estándar para las hipótesis de bloque H; Fuente: propia

Por último, se exponen los resultados que serán utilizados para analizar la variable de la orientación (Tabla 09) de la fachada principal, que corresponde a la sur del modelo original del bloque tipo H. Se extraen resultados de cDA para 300 lx y 100 lx, así como el sDA para 300 lx, todo ello con la desviación estándar para observar la dispersión de los puntos calculados, para finalmente establecer el consumo energético previsto de cada hipótesis suponiendo un sistema de regulación de luz eléctrica.

	H_0_S	(10-10-10-0% huecos)	Sur (original)	cDA (300lx)	σ (desv. Est.)	sDA (300lx/50)	cDA (100lx)	Consumo (300 lx) (kWh/m ² .año)
HIPOTESIS H_0 (caso base)	H_0_E	(10-0-10-10% huecos)	Este	0.45	0.19	0.03	0.88	16.06
	H_0_N	(10-10-0-10% huecos)	Norte	0.40	0.19	0.00	0.84	17.52
	H_0_O	(0-10-10-10% huecos)	Oeste	0.28	0.13	0.00	0.74	21.02
				0.33	0.15	0.00	0.81	19.56
HIPOTESIS H_1	H_1_S	(20-20-20-0% huecos)	Sur (original)	0.64	0.18	0.45	0.97	10.51
	H_1_E	(20-0-20-20% huecos)	Este	0.61	0.21	0.39	0.95	11.39
	H_1_N	(20-20-0-20% huecos)	Norte	0.48	0.17	0.06	0.94	15.18
	H_1_O	(0-20-20-20% huecos)	Oeste	0.52	0.17	0.09	0.95	14.02
HIPOTESIS H_2	H_2_S	(40-40-40-0% huecos)	Sur (original)	0.77	0.12	0.76	1.00	6.72
	H_2_E	(40-0-40-40% huecos)	Este	0.76	0.15	0.72	1.00	7.01
	H_2_N	(40-40-0-40% huecos)	Norte	0.68	0.16	0.47	0.99	9.34
	H_2_O	(0-40-40-40% huecos)	Oeste	0.70	0.14	0.56	0.99	8.76

Tabla 09 – Resultados para el análisis de la orientación como variable; Fuente: propia

5.1.2 Bloque lineal.

Al igual que con el bloque tipo H, se presentan para el bloque lineal los resultados obtenidos (Tabla 10) para las métricas dinámicas cDA (300 lx y 100 lx) y sDA, además de la desviación estándar y los valores mínimos, máximos y medio de toda la batería de hipótesis (Tablas 11 y 12).

VALORES PRINCIPALES DE LAS MÉTRICAS DINÁMICAS

	cDA [300 lx]	sDA [300 lx]	cDA [100 lx]
PLANTA 1	0.22 (σ 0.11)	0.00 (σ 0.00)	0.62 (σ 0.26)
PLANTA 2	0.26 (σ 0.11)	0.00 (σ 0.00)	0.71 (σ 0.22)
PLANTA 3	0.33 (σ 0.10)	0.00 (σ 0.00)	0.86 (σ 0.17)
PLANTA 4	0.44 (σ 0.11)	0.00 (σ 0.00)	0.97 (σ 0.09)
EDIFICIO	0.31 (σ 0.13)	0.00 (σ 0.00)	0.79 (σ 0.23)

VALORES MINIMOS Y MÁXIMOS DE LAS MÉTRICAS DINÁMICAS

	cDA [300 lx]	sDA [300 lx]	cDA [100 lx]
PLANTA 1	0.11/0.42	0.00/0.00	0.33/1.00
PLANTA 2	0.14/0.46	0.00/0.00	0.41/1.00
PLANTA 3	0.17/0.48	0.00/0.00	0.52/1.00
PLANTA 4	0.23/0.58	0.00/0.00	0.70/1.00
EDIFICIO	0.11/0.58	0.00/0.00	0.33/1.00

Tabla 10 – Resultados de la hipótesis L_0; Fuente: propia

	L_0	L_1	L_2	L_3	L_4
	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)
	(0-0-10-10)	(0-0-20-20)	(0-0-40-40)	(0-0-60-60)	(0-0-20-40)
PLANTA 1	0.22	0.40	0.60	0.70	0.55
2	0.26	0.45	0.65	0.74	0.60
3	0.33	0.55	0.74	0.80	0.68
4	0.44	0.68	0.82	0.85	0.77
	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)
	(0-0-20-60)	(0-0-40-20)	(0-0-60-20)	(0-0-40-0)	(0-0-0-40)
	0.63	0.46	0.51	0.17	0.46
	0.67	0.53	0.58	0.22	0.48
	0.74	0.65	0.70	0.35	0.50
	0.81	0.77	0.80	0.50	0.53

Tabla 11 - Resultados cDA por planta de la combinatoria de hipótesis bloque lineal; Fuente: propia

	L_0	L_1	L_2	L_3	L_4
	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)
	(0-0-10-10)	(0-0-20-20)	(0-0-40-40)	(0-0-60-60)	(0-0-20-40)
MEDIA	0.31	0.52	0.70	0.77	0.65
DESV. EST.	0.13	0.17	0.13	0.09	0.16
MINIMO	0.11	0.22	0.39	0.53	0.29
MAXIMO	0.58	0.78	0.85	0.88	0.85

	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)	(cDA)
	(0-0-20-60)	(0-0-40-20)	(0-0-60-20)	(0-0-40-0)	(0-0-0-40)
	0.71	0.60	0.65	0.31	0.49
	0.14	0.15	0.14	0.22	0.25
	0.35	0.28	0.32	0.04	0.13
	0.88	0.83	0.87	0.81	0.84

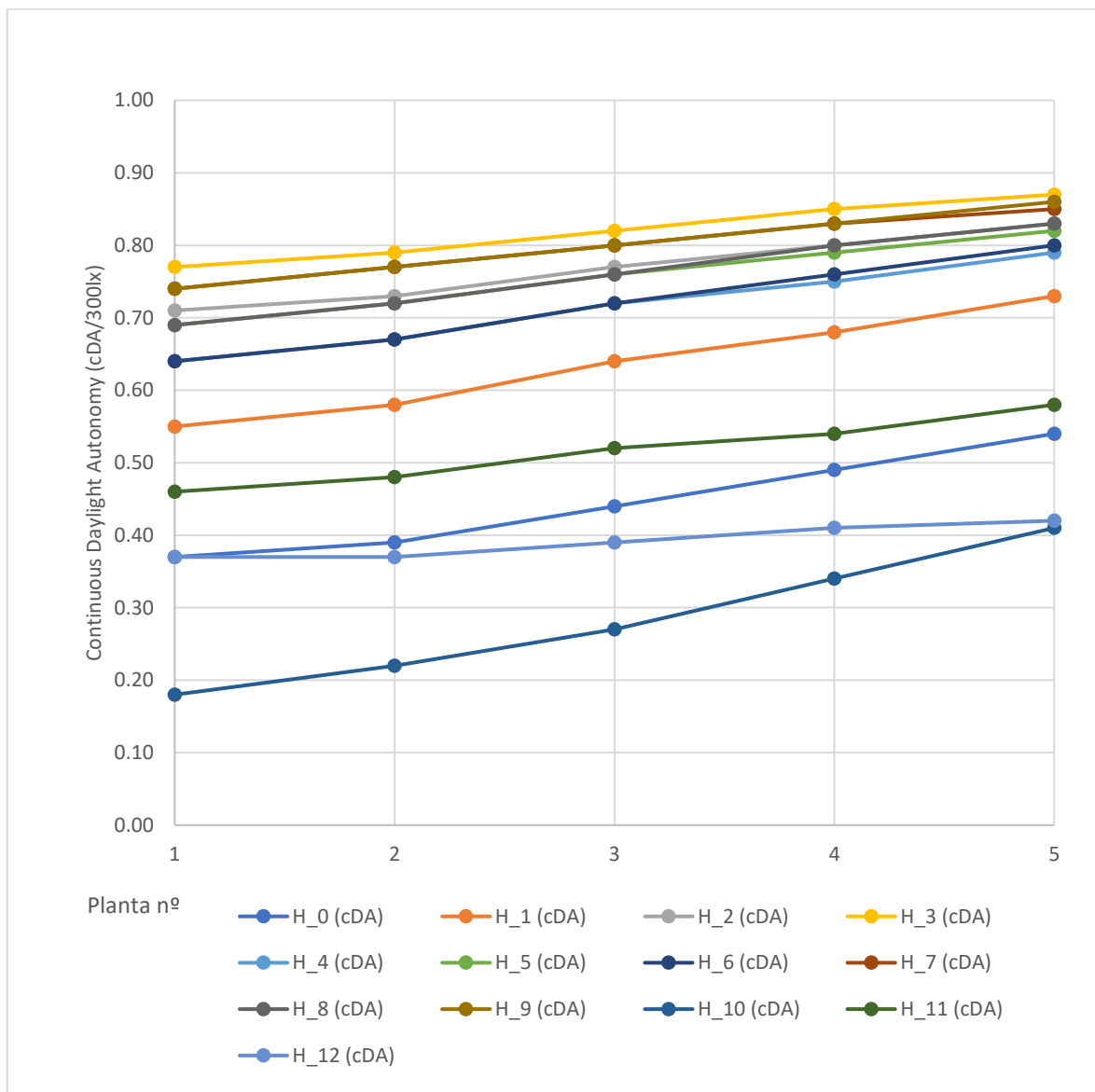
Tabla 12 – Valores mínimos y máximos, media y desviación estándar para las hipótesis de bloque lineal; Fuente: propia

5.2 Análisis de resultados.

Con los resultados obtenidos, se procede a analizarlos para extraer conclusiones que completen los objetivos del trabajo.

5.2.1 Bloque tipo H.

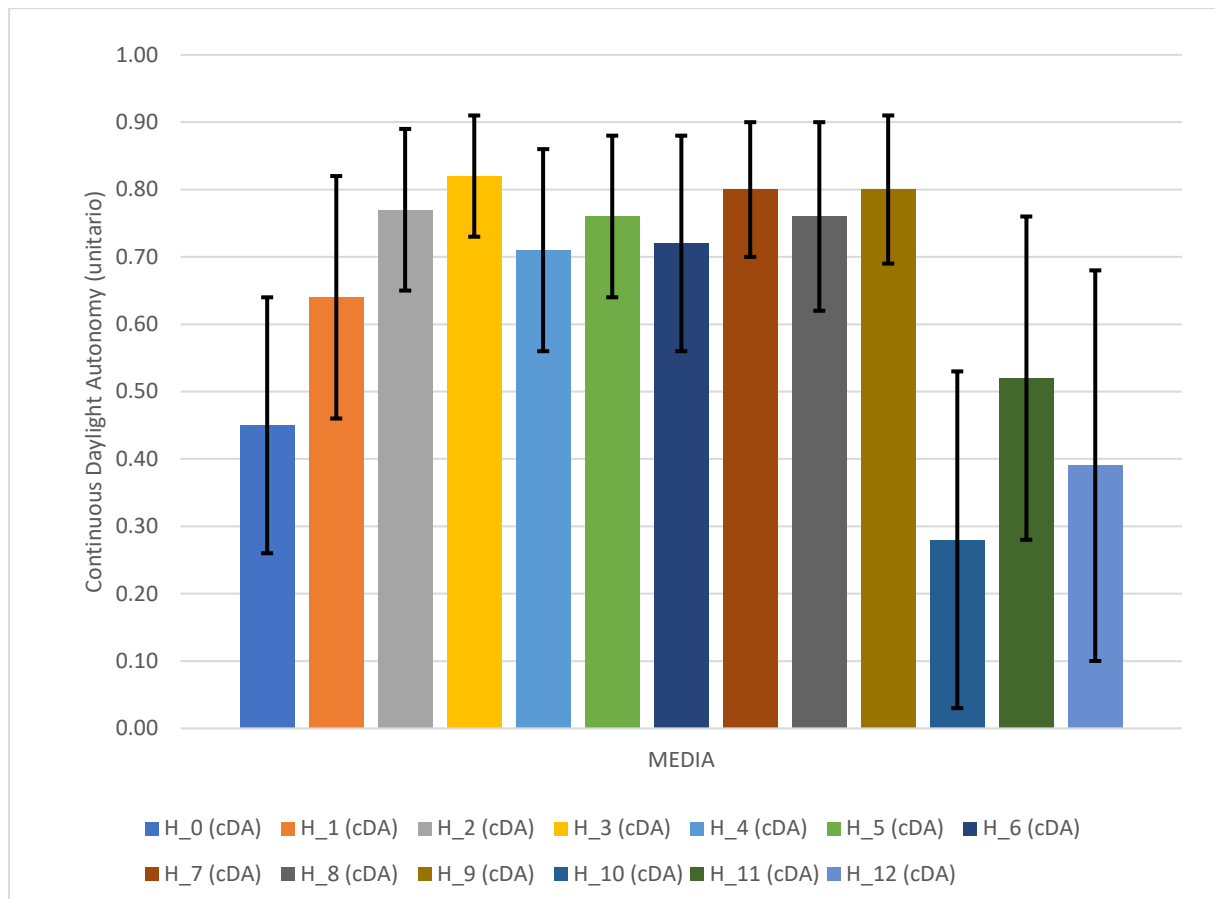
Con el fin de analizar la influencia de la altura en el aprovechamiento de luz natural se han cruzado los resultados de cDA [300 lx] por planta de todas las hipótesis del bloque tipo H (Gráfica 01).



Gráfica 01 – Valores por planta de cDA para las hipótesis del bloque H; Fuente Propia

Como se puede observar en esta figura, los valores son más altos en las plantas superiores, puesto que es en estas plantas a las que menos afectan las sombras arrojadas por el entorno sobre el objeto estudiado, con una oscilación de entre el 10 y el 20%.

El segundo análisis que se ha realizado sobre el bloque tipo H es la comparación de los valores medios de las hipótesis estudiadas observando la desviación estándar de los puntos (Gráfica 02).

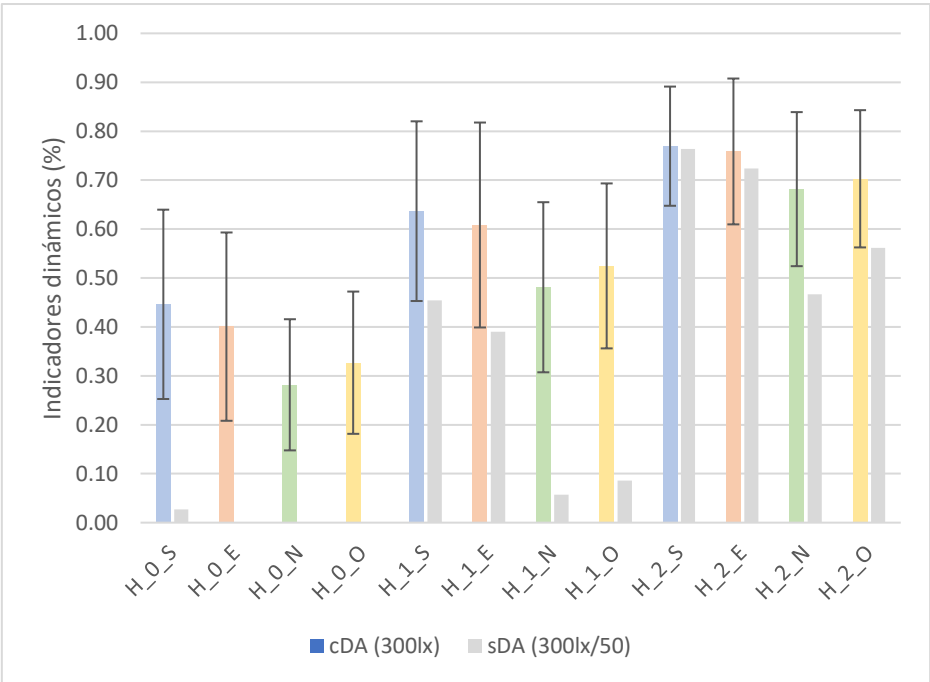


Gráfica 02 – Media por bloque de cDA da todas las hipótesis del bloque H; Fuente: propia

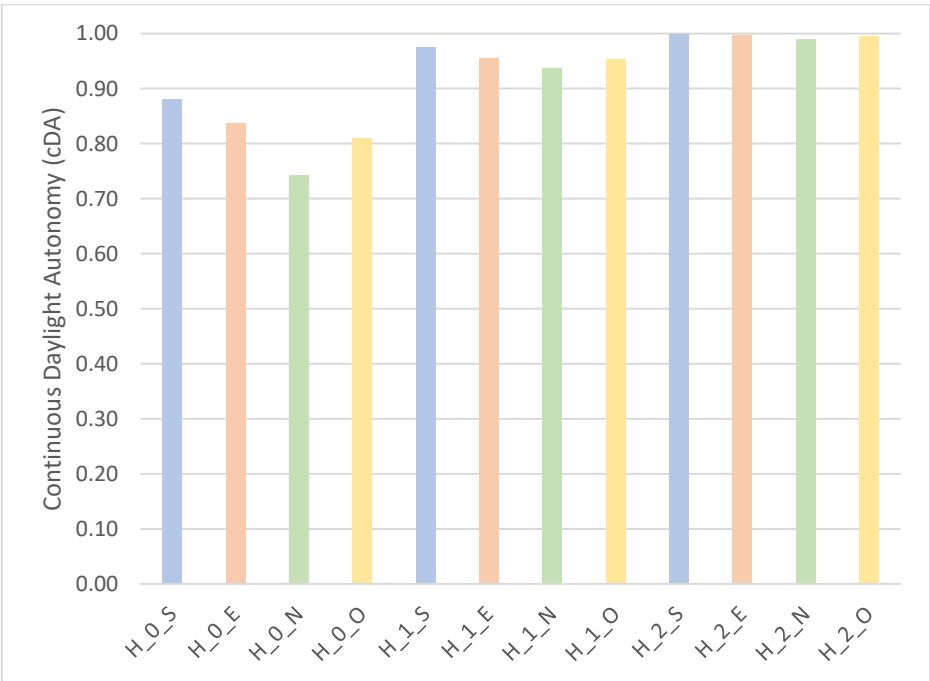
En esta gráfica se observa la diferencia entre los valores de las hipótesis con menos porcentaje de hueco en fachada, las cuales tiene un menor valor de aprovechamiento de luz natural (cDA inferior a 0,30), y las hipótesis con mayor porcentaje de hueco, que presentan valores más altos de cDA (en torno a 0,80).

También se puede apreciar que las hipótesis con huecos en todas sus fachadas tienen unos valores más altos que los que solo tienen hueco en una de sus fachadas.

Por último, para este objeto de estudio se ha realizado un análisis de la influencia en la orientación estudiando los diferentes resultados obtenidos para las métricas utilizadas combinando las variables de porcentaje de hueco en fachada y orientación (Gráficas 03 y 04).



Gráfica 03 – Resultados cDA y sDA (300 lx) de la batería hipótesis de análisis de orientación bloque H; Fuente: propia



Gráfica 04 - Resultados cDA (100 lx) de la batería hipótesis de análisis de orientación bloque H; Fuente: propia

A fin de que se perciba con mayor nitidez la diferencia entre los resultados dependiendo de la orientación del modelo (Tabla 13), se han agrupado por separado las hipótesis de cada orientación (Gráficas 05, 06, 07 y 08).

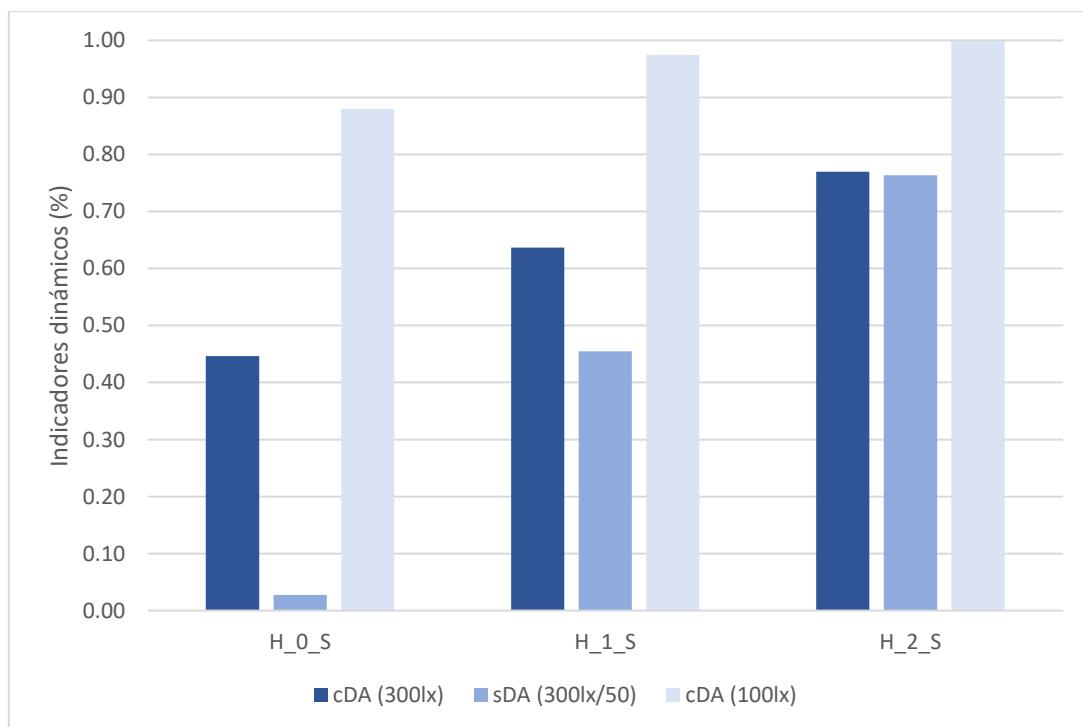
Sur (original)	cDA (300lx)	σ (desv. Est.)	sDA (300lx/50)	cDA (100lx)
H_0_S	0.45	0.19	0.03	0.88
H_1_S	0.64	0.18	0.45	0.97
H_2_S	0.77	0.12	0.76	1.00

Este	cDA (300lx)	σ (desv. Est.)	sDA (300lx/50)	cDA (100lx)
H_0_E	0.40	0.19	0.00	0.84
H_1_E	0.61	0.21	0.39	0.95
H_2_E	0.76	0.15	0.72	1.00

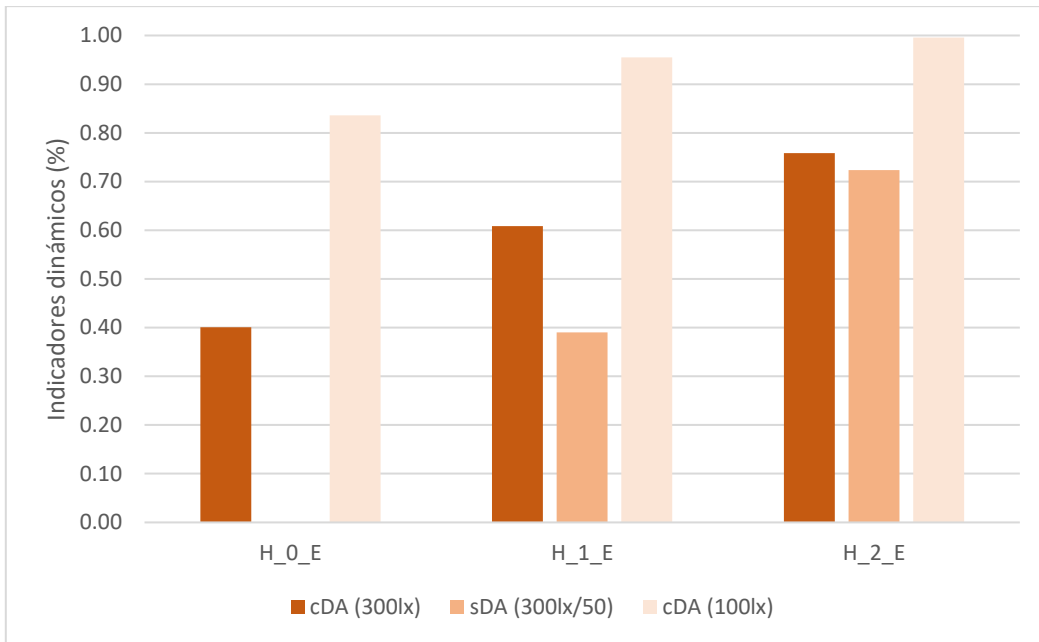
Norte	cDA (300lx)	σ (desv. Est.)	sDA (300lx/50)	sDA (300lx/50)
H_0_N	0.28	0.13	0.00	0.74
H_1_N	0.48	0.17	0.06	0.94
H_2_N	0.68	0.16	0.47	0.99

Oeste	cDA (300lx)	σ (desv. Est.)	sDA (300lx/50)	cDA (100lx)
H_0_O	0.33	0.15	0.00	0.81
H_1_O	0.52	0.17	0.09	0.95
H_2_O	0.70	0.14	0.56	0.99

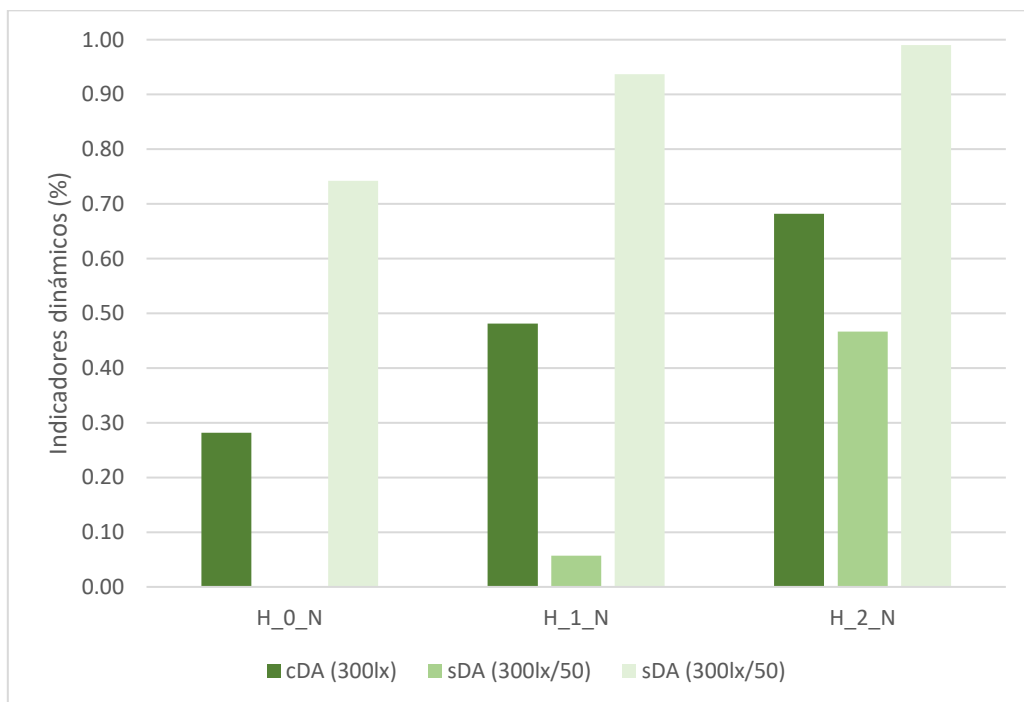
Tabla 13 – Resultados de la batería de hipótesis para el análisis de orientación; Fuente: propia



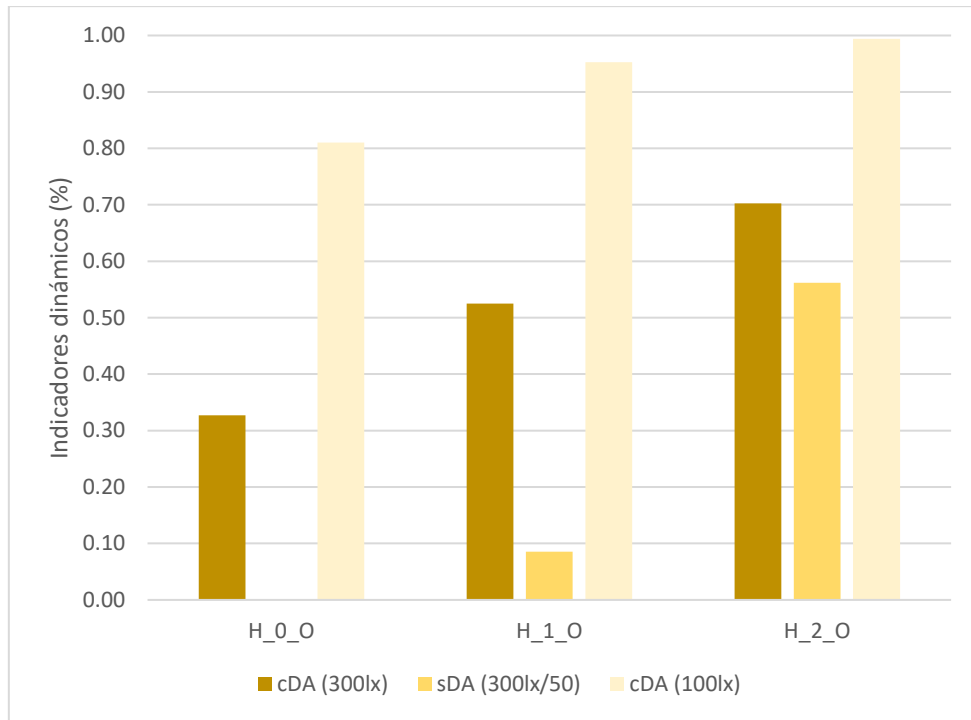
Gráfica 05 – Resultados para hipótesis de orientación sur (original); Fuente: propia



Gráfica 06 – Resultados para hipótesis de orientación este; Fuente: propia



Gráfica 07 – Resultados para hipótesis de orientación norte; Fuente: propia

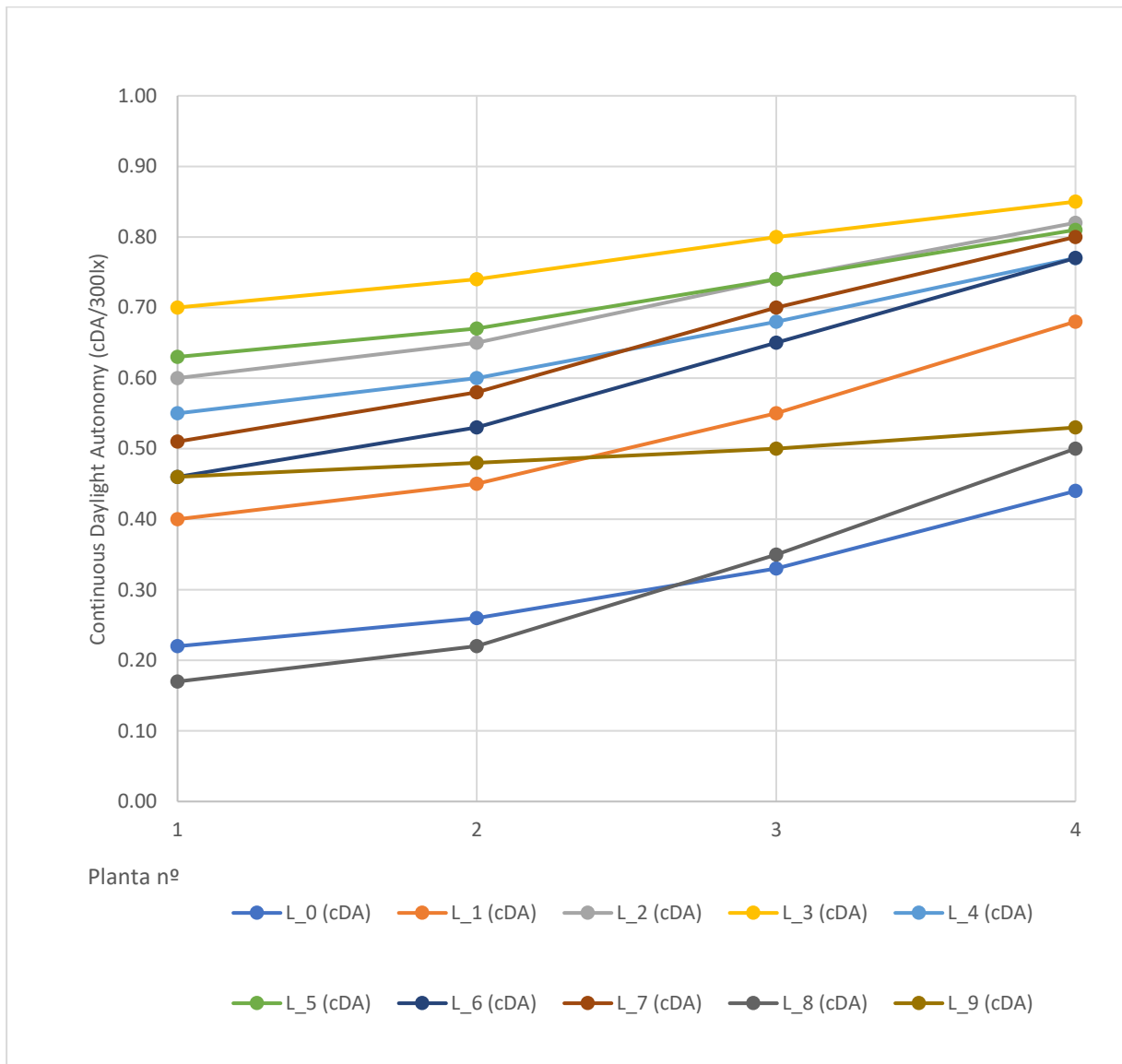


Gráfica 08 – Resultados para hipótesis de orientación oeste; Fuente: propia

Del análisis de la orientación como variable del estudio se observa en las gráficas que las orientaciones sur y este son las que obtienen mejores resultados al abrirlas huecos, dado que logran unos valores adecuados de cDA y sDA (cDA a 300 lx entre 0,45 y 0,75 y sDA de hasta 0,75). También se observa que para estas orientaciones es menor el porcentaje de hueco requerido para un aprovechamiento de luz de día correcto, mientras que en las orientaciones norte y oeste se alcanzarían únicamente con altos porcentajes de huecos.

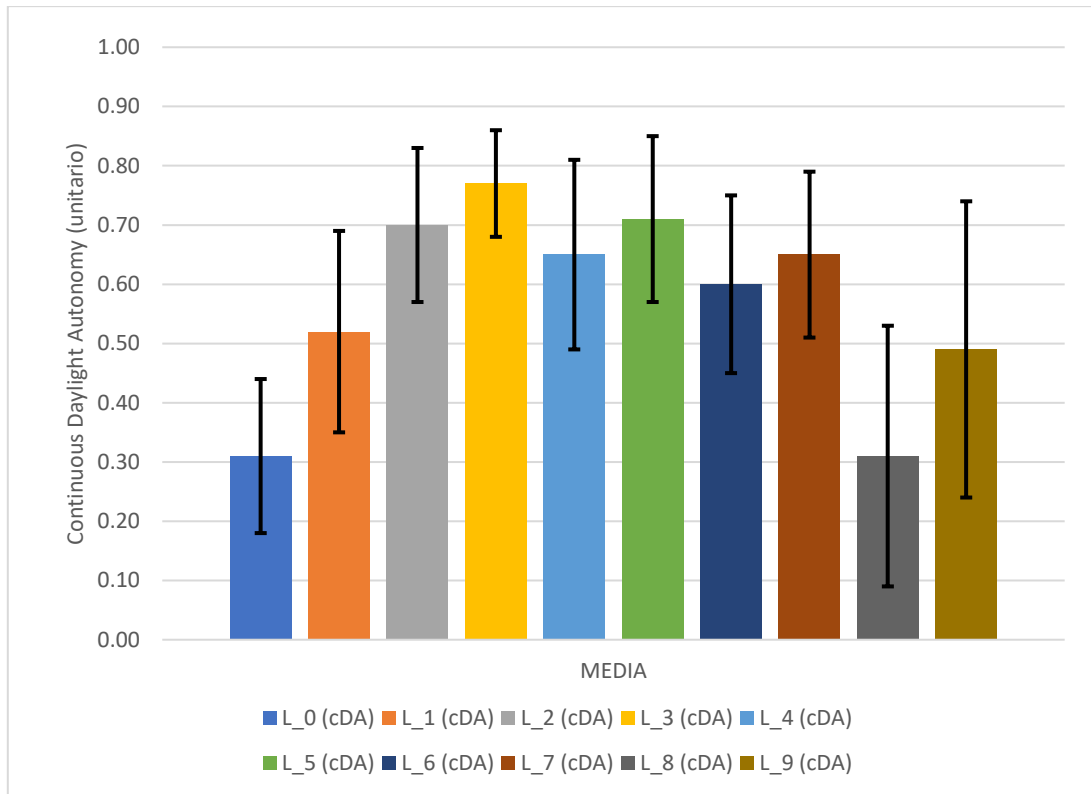
5.2.2 Bloque lineal.

Para el bloque lineal se han realizado los mismos análisis que para el bloque tipo H, excepto el análisis de orientación, que se ha dejado como una de las posibles vías de investigación.



Gráfica 09 – Valores por planta de cDA para las hipótesis del bloque lineal; Fuente Propia

En la gráfica 10 se observa que se obtienen mejores resultados de cDA cuando los huecos se orientan al oeste frente al este, dada las obstrucciones solares existentes (valores de cDA hasta 0,70 frente a 0,65), siendo menor la influencia de la altura de planta por dicha sombra remota (gráfica 09).



Gráfica 10 – Media por bloque de cDA da todas las hipótesis del bloque lineal; Fuente: propia

Así, se constata que tanto el bloque tipo H como el bloque lineal estudiados, y que tienen porcentajes de hueco en sus fachadas de entre un 5-10% (se ha tomado 10% para realizar los cálculos), presentan los valores más bajos de cDA de toda la batería de hipótesis generada con huecos en todas las fachadas y que tienen valores más cercanos a hipótesis con huecos en una única fachada. Son los modelos que rondan entre el 0,50 y 060 de cDA los que optimizan la relación hueco-fachada a nivel de entrada de luz natural (hipótesis H1 y H11 en el bloque tipo GH y L_1, L4, L6 y L7 en el bloque lineal), con huecos en torno al 20%.

Además, se observa de forma complementaria que las hipótesis con huecos en todas sus fachadas presentan valores de aprovechamiento de luz natural más altos que en aquellas donde solo una de sus fachadas dispone de huecos

5.2.3 Análisis del consumo energético.

Para concluir este estudio se ha realizado un análisis de impacto en el consumo energético (Gráficas 11 y 12), valorando así el correcto aprovechamiento de luz natural mediante el uso de un sistema de regulación lumínico, que tendría en cuenta los valores de cDA obtenidos después un correcto diseño de huecos de fachada. Se han tomado como referencia los valores máximo y medio de consumo energético en iluminación eléctrica si no existiese sistema de regulación, considerando para ello como valor de consumo para vivienda 5 W/m², redondeando los 4,4 W/m² (valor máximo del día) que indica el CTE-DB-HE en su documento sobre Ahorro de energía, apéndice D (Tabla 14).

Tabla b-Anejo D. Perfil de uso de espacios en uso residencial privado

Carga interna W/m ²		Horario (semana tipo)					
		0:00	7:00	15:00	18:00	19:00	23:00
		6:59	14:59	17:59	18:59	22:59	23:59
Ocupación (sensible)	L	2,15	0,54	1,08	1,08	1,08	2,15
	S y F	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Ocupación (latente)	L	1,36	0,34	0,68	0,68	0,68	1,36
	S y F	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Iluminación	L, S y F	0,44	1,32	1,32	2,20	4,40	2,20
Equipos	L, S y F	0,44	1,32	1,32	2,20	4,40	2,20

L: día laboral, S: sábado, F: domingo y festivo.

Tabla 14 – Perfiles de uso de espacios en uso residencial privado; Fuente: CTE-DB-HE Anejo D

H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)
16.06	10.51	6.72	5.26	8.47	7.01	8.18
29.20	29.20	29.20	29.20	29.20	29.20	29.20
14.60	14.60	14.60	14.60	14.60	14.60	14.60

Consumo con sistema de regulación
Consumo máximo sin regulación
Consumo promedio sin regulación

H_7	H_8	H_9	H_10	H_11	H_12
(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)
5.84	7.01	5.84	21.02	14.02	17.81
29.20	29.20	29.20	29.20	29.20	29.20
14.60	14.60	14.60	14.60	14.60	14.60

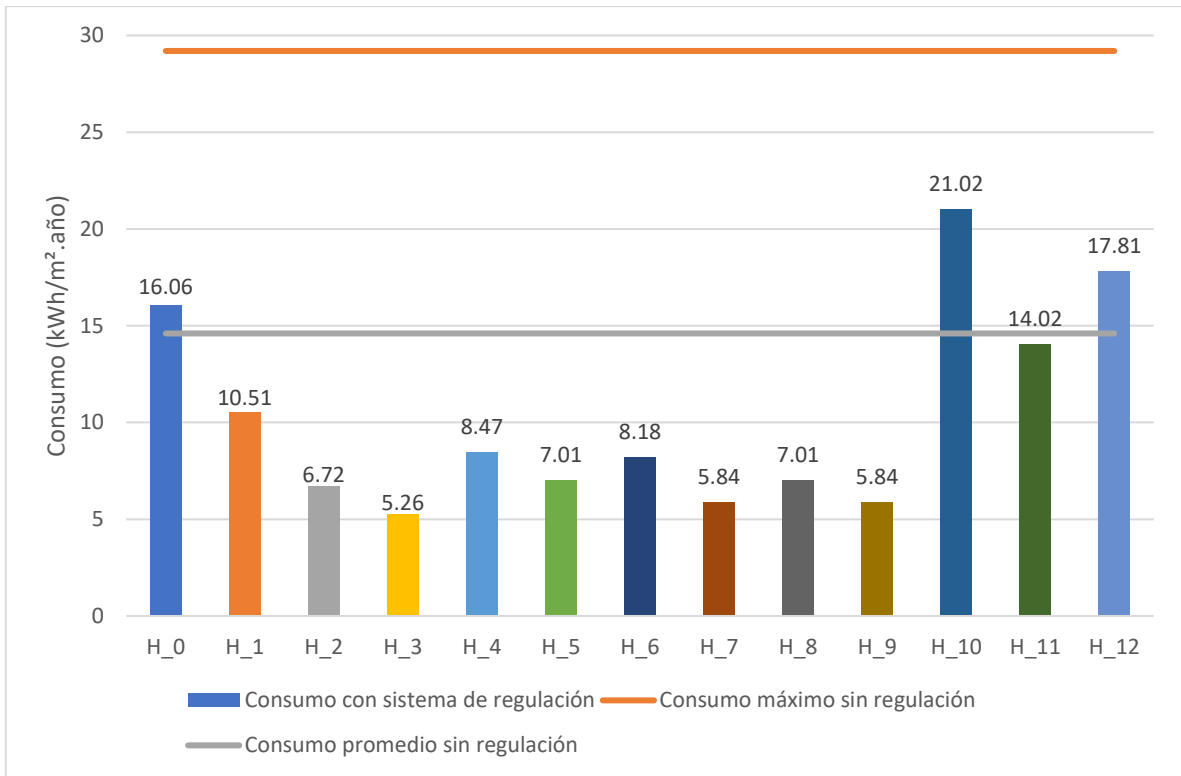
Tabla 15 – Consumo con sistema de regulación de todas las hipótesis del bloque H; Fuente: propia

L_0	L_1	L_2	L_3	L_4
(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)
20.15	14.02	8.76	6.72	10.22
29.20	29.20	29.20	29.20	29.20
14.60	14.60	14.60	14.60	14.60

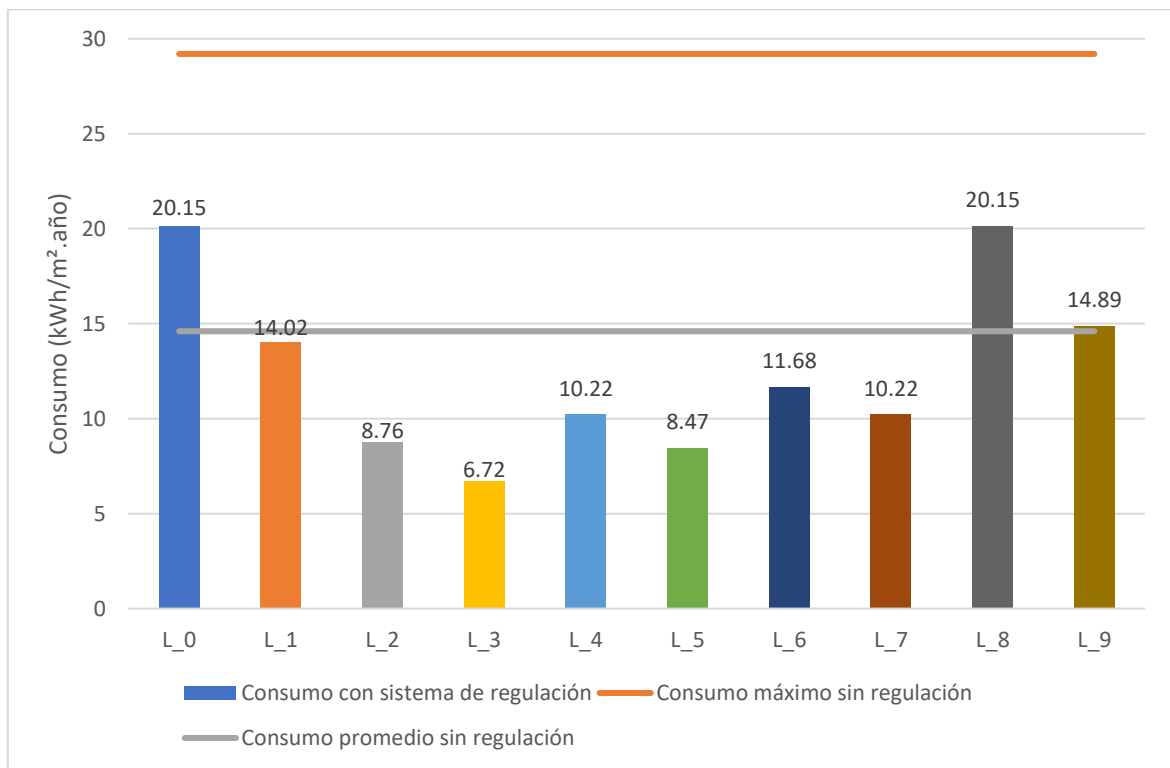
Consumo con sistema de regulación
Consumo máximo sin regulación
Consumo promedio sin regulación

L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)	(kWh/m ² .año)
8.47	11.68	10.22	20.15	14.89
29.20	29.20	29.20	29.20	29.20
14.60	14.60	14.60	14.60	14.60

Tabla 16 – Consumo con sistema de regulación de todas las hipótesis del bloque lineal; Fuente: propia



Gráfica 11 – Análisis del consumo de las hipótesis del bloque H en función del uso de sistema de regulación; Fuente: propia



Gráfica 12 – Análisis de consumo de hipótesis del bloque lineal en función del uso de sistema de regulación; Fuente: propia

De este análisis se deduce que un correcto dimensionado de huecos que permita unos valores correctos de cDA, así como el uso de sistemas de regulación de luz eléctrica en estas viviendas, permite reducir el consumo de energía de forma considerable. Aunque en este trabajo no se entra en su repercusión económica, dada la necesidad de concreción por su finalidad y extensión, esta reducción supondría un ahorro económico directamente proporcional a los kWh de ahorro multiplicado por el precio de la luz eléctrica, el cual se sitúa en 0,2477 euros por kWh para viviendas en 2020.

6. CONCLUSIONES.

C1_ Los objetos de estudio presentan unas malas condiciones de aprovechamiento de luz natural.

Tras el análisis de los resultados obtenidos se ha comprobado que tanto el bloque tipo H como el bloque lineal estudiados en el trabajo, y que tienen porcentajes de hueco en sus fachadas de entre un 5-10% (se ha tomado 10% para realizar los cálculos), presentan los valores más bajos de cDA de toda la batería de hipótesis generada con huecos en todas las fachadas y que tienen valores más cercanos a hipótesis con huecos en una única fachada. Son los modelos que rondan entre el 0,50 y 060 de cDA los que optimizan la relación hueco-fachada a nivel de entrada de luz natural (hipótesis H1 y H11 en el bloque tipo GH y L_1, L4, L6 y L7 en el bloque lineal), con huecos en torno al 20%. Esto, sumado a la cantidad de edificios de características similares que existen en la ciudad, supone la posibilidad de una amplia mejora de aprovechamiento de luz natural y sus beneficios asociados, explicados convenientemente en este trabajo.

C2_ El cDA es directamente proporcional al porcentaje de hueco en fachada.

Se ha comprobado, como ya se hizo en estudios previos (Mardaljrvc, n.d.), que los valores obtenidos para la métrica dinámica *Continuous Daylight Autonomy (cDA)* son proporcionales al porcentaje de hueco que el edificio tenga en su fachada. Esta conclusión parte del análisis de los resultados de ambos objetos de estudio. Se observa de forma complementaria que las hipótesis con huecos en todas sus fachadas presentan valores de aprovechamiento de luz natural más altos que en aquellas donde solo una de sus fachadas dispone de huecos.

C3_ Los valores de cDA son mayores cuanto a más altura esté la vivienda.

Como se puede observar en el estudio de valores de *Continuous Daylight Autonomy (cDA)* por planta en ambos bloques, y partiendo del hecho de que tienen alturas similares y el mismo entorno urbano, se obtienen valores más altos de cDA conforme a más altura esté la planta estudiada. Esto se debe a las sombras arrojadas por el entorno directo a los edificios

estudiados, las cuales disminuyen en las plantas superiores. Se observa también que el aumento de cDA se produce de forma lineal conforme va subiendo de planta.

C4_ La orientación sur es la mejor para abrir huecos.

Del análisis de influencia de la orientación en el bloque tipo H, valorando asimismo el entorno con sombras remotas, se concluye que la orientación sur presenta los mejores valores de aprovechamiento de luz de día y que por lo tanto es la más favorable para la apertura de huecos de cara a este objetivo. Siguiendo a la orientación sur, pero con peores resultados estaría la orientación este, que no dista mucho de valores aceptables, siempre que el porcentaje de hueco sea suficiente. La orientación oeste tiene peores valores que las dos anteriores y la norte se concluye como la más desfavorable.

C5_ Se requieren porcentajes de hueco mínimos del 40% para un sDA correcto.

Se ha comprobado en el análisis de resultados que para obtener valores de *Spatial Daylight Autonomy (sDA)* que superen el 0.40 es necesario porcentajes de hueco en fachada superiores a 40%, exceptuando a las hipótesis con orientación sur, las cuales alcanzan estos valores con 20% de hueco. Esto supone una incorrecta distribución de la luz de día en el interior de las viviendas del bloque, puesto que, en la mayoría del tiempo, no se está alcanzando el umbral de iluminancia requerido en más del 50% de la vivienda.

C6_ Un correcto diseño de huecos y el uso de un sistema de regulación lumínico suponen un mayor ahorro energético.

Del análisis del consumo, asociado a iluminación, de cada hipótesis se determina que los modelos actuales de diseño de hueco que presentan los objetos de estudio son insuficientes y que aun instalando un sistema de regulación el consumo energético de los bloques de viviendas estudiados superaría el consumo medio sin sistema de regulación. Sin embargo, se concluye que estas tipologías, con un correcto diseño de huecos de cara al aprovechamiento de luz natural y con el uso de sistemas de regulación, tendrían un consumo energético asociado a iluminación bastante menor al actual y que, por lo tanto, este tipo de edificios de vivienda se presenta como un campo de oportunidades de cara a hacer nuestras ciudades más eficientes a nivel energético, mediante la rehabilitación de huecos y control del uso de luz eléctrica. Por ejemplo, la hipótesis H_2 con un porcentaje del 40% de hueco en sus fachadas, tendría un consumo en iluminación eléctrica 2,3 veces inferior a la H_0, la cual corresponde al modelo real del bloque.

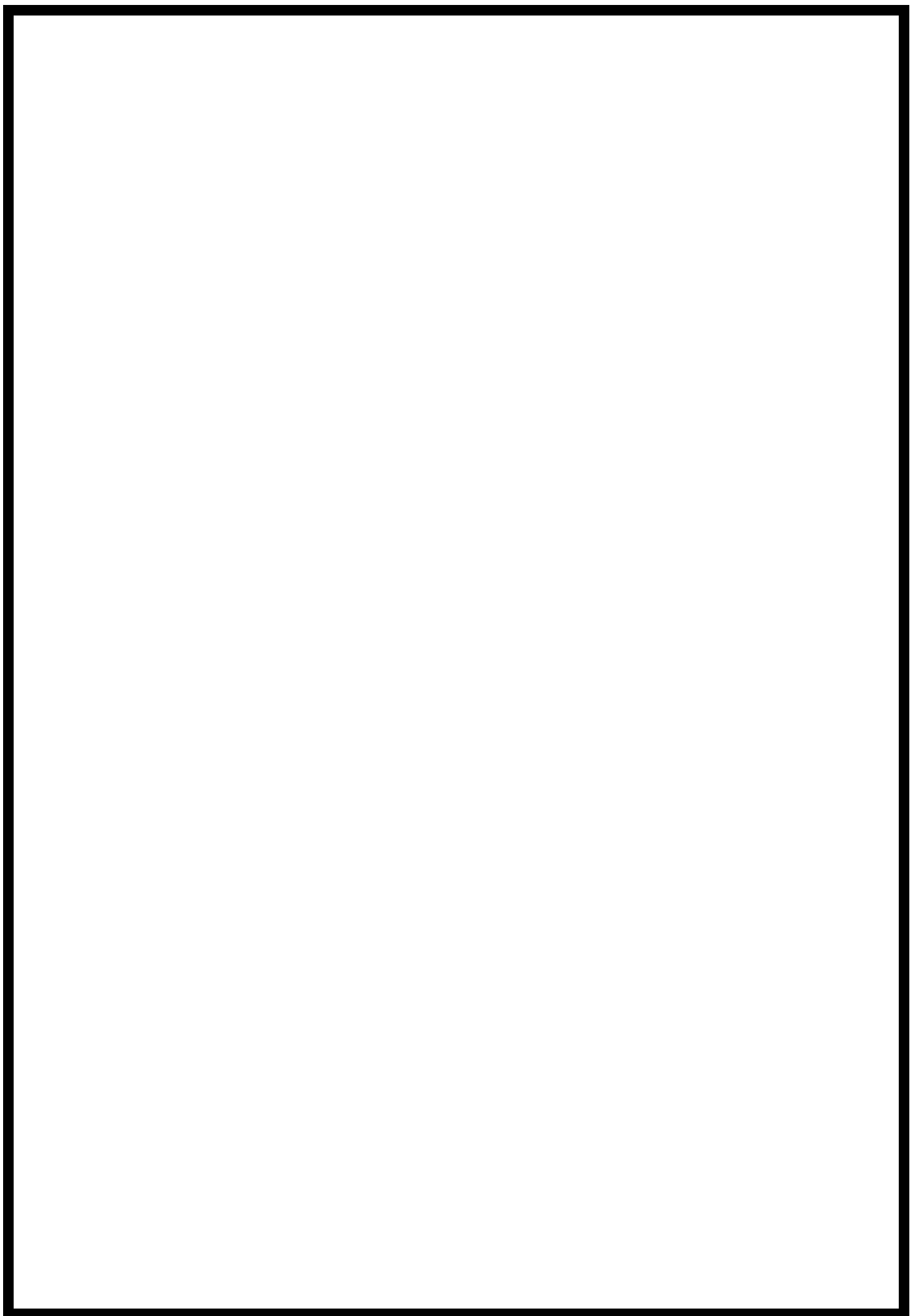
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Unos de los motivos por el que se ha realizado este trabajo es por la amplia variedad de líneas investigación que presenta, puesto que es un campo de investigación novedoso y sus muchas sus posibles aplicaciones. Por ello, se exponen las siguientes posibles líneas de investigación:

- Ampliación de variables y combinatorias para optimizar el porcentaje de hueco más eficiente.
- Estudio de nuevas variables, incluyendo la reflexión interior dependiendo del color de los materiales.
- Adición de otras tipologías, tanto de la propia ciudad de Sevilla, como de otras localizaciones.
- Análisis de huecos según el diseño del viario urbano, teniendo en cuenta elementos como la altura de edificios circundantes, anchos de calles o vegetación urbana.
- Ampliación de indicadores de análisis: Inclusión de parámetros de ciclo circadiano para potencia la salubridad y bienestar de los ocupantes. Empleo del CSA (*Circadian Stimulus Autonomy*) como indicador.
- Comparativa de parámetros lumínicos con parámetros de consumo energético como, por ejemplo, la climatización.
- Estudio del aprovechamiento de luz natural mediante indicadores dinámicos de barrios completos a fin de determinar cual tendría mayor capacidad de mejora.

APÉNDICES

GLOSARIO, REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA



A. GLOSARIO.

- Flujo luminoso: potencia emitida, transmitida o recibida en forma de luz. Su unidad de medida es el lumen (Lm).
- Iluminancia: Cociente del flujo luminoso incidente sobre un elemento de la superficie que contiene el punto, por el área de ese elemento, siendo la unidad de medida el lux.
- Ciclo circadiano: oscilaciones de las variables biológicas, físicas o metales, en intervalos regulares de 24 horas asociado a los ciclos de iluminación natural que sufren la mayoría de los seres vivos.
- Eficiencia energética: relación entre las necesidades de un edificio y la demanda energética que alcanzar estas necesidades supone.
- Demanda energética: Consumo de energía, calculado o medido, que se estima necesario para satisfacer la demanda energética del edificio en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación.
- Métricas dinámicas: indicadores que describen, con mayor precisión que las métricas estáticas, el aprovechamiento de luz de natural en espacios interiores.
- Daylight Autonomy (DA): tiempo del año en el que se alcanza la iluminancia requerida para desarrollar una actividad concreta solo con luz natural.
- Continuous Daylight Autonomy (cDA): tiempo en el año en el que se alcanza un umbral de iluminancia determinado para desarrollar una actividad concreta con luz natural y luz eléctrica regulada.
- Spatial Daylight Autonomy (sDA): porcentaje de tiempo en el año en el que se alcanza un nivel de iluminancia determinado en, como mínimo, un 50% de la estancia.
- Melatonina: hormona secretada naturalmente durante la noche y que es suprimida durante el inicio de la mañana.
- Estímulo circadiano (CS): Supresión de melatonina por parte del cerebro que se produce debido a la exposición a la luz natural.
- Cortisol: hormona que activa los músculos del cuerpo y construye al metabolismo, mediante la liberación de glucosa a la sangre.
- Circadian Stimulus Autonomy (CSA): Porcentaje de tiempo en el año en que se alcanza, con luz natural, el umbral de iluminancia determinado para un correcto estímulo circadiano.
- Radiosidad: Método de cálculo lumínico basado en la consideración de rayos de luz incidiendo sobre un punto concreto de una superficie lambertiana y siendo rebotados en todas direcciones.

- Superficie lambertiana: superficie que refleja, en todas direcciones y de la misma forma, una onda incidente en ella.
- Ray-tracing: método de cálculo lumínico que genera una imagen estática, basándose en el lanzamiento de rayos desde el punto de vista del observador.
- Daylight Coefficients: método de cálculo lumínico desarrollado por (Mardaljevic, n.d.) y que se basa en una simplificación del método de radiosidad. Utiliza el motor de cálculo Radiance.
- Radiance: motor de cálculo lumínico utilizado por UMI y basado en el *Daylight Coefficients Method*.
- Reflectancia: porcentaje de luz directa que refleja una superficie.
- Absortancia: porcentaje de la radiación solar total, que incide sobre una superficie, que es absorbido por la misma.
- Transmitancia: porcentaje de luz directa que traspasa un material sobre el que incide por unidad de tiempo.
- Desviación estándar: representa la dispersión de una serie de datos o resultados con respecto al valor medio.

B. REFERENCIAS.

FIGURAS

Fig. 01_ Triple componente del aprovechamiento de luz natural; Fuente: propia

Fig. 02_ Iluminancia; Fuente: Ponencia REEB, I. Acosta

Fig. 03_ Factor de luz de día; Fuente: Ponencia REEB, I. Acosta

Fig. 04_ Diagramas de DA y cDA; Fuente: propia

Fig. 05_ Diagrama de sDA; Fuente: Ponencia REEB, I. Acosta

Fig. 06_ Factores propiciados por los ritmos circadianos en un día; Fuente: Dynalight Project, 2018

Fig. 07a_ Distribución energética de España; Fuente: IDEA

Fig. 07b_ Distribución energía eléctrica en España; Fuente: IDAE

Fig. 08_ Edificio The Edge de la empresa Deloitte; Fuente: www.blogs.deia.eus

Fig. 09_ Problemas asociados a los ritmos circadianos; Fuente: (Froy, 2011)

Fig. 10_ Diagramas de acumulación y disparo de energía de un elemento; Fuente: Tesis doctoral J. Sanjurjo (2011)(Reinhart et al., n.d.)

Fig. 11_ Ejemplo de Ray-tracing; Fuente: An introduction to Ray tracing (A.S. Glassner, 1989)

Fig. 12_ Descripción gráfica del *Daylight Coefficients Method*; Fuente: (Mardaljevic, 2000)

Fig. 13_ Objeto de estudio bloque plurifamiliar tipo H; Fuente: propia

Fig. 14_ Objeto de estudio bloque plurifamiliar tipo lineal; Fuente: propia

Fig. 15_ Resultados de UMI para proyecto en Boston; Fuente: (Reinhart et al., n.d.)

Fig. 16_ Logo corporativo Rhinoceros; Fuente: www.rhino3d.com

Fig. 17_ Entrada de datos del Excel de post-procesado de resultados; Fuente: propia

Fig. 18_ Ejemplo de resultados obtenidos tras en post-procesado; Fuente: propia

Fig. 19_ Celda de ensayo del TEP130; Fuente: (León-Rodríguez et al., 2017)

Fig. 20_ Validación de DIVA comparando con la celda del TEP130; Fuente: (Luque, 2019)

Fig. 21_ Validación de resultados entre UMI y DIVA para la celda de ensayo; Fuente: propia

Fig. 22_ Modelo 3D del caso de estudio y su entorno; Fuente: propia

Fig. 23_ Modelo del bloque H con orientación este; Fuente: propia

TABLAS

Tabla 01_ Características de los materiales utilizados para la validación; Fuente: propia

Tabla 02_ Porcentaje de hueco en fachadas del bloque tipo H; Fuente: propia

Tabla 03_ Porcentaje de hueco en fachadas del bloque tipo lineal; Fuente: propia

Tabla 04_ Combinatoria de hipótesis del bloque H; Fuente: propia

Tabla 05_ Combinatoria de hipótesis del bloque lineal; Fuente: propia

Tabla 06_ Resultados de la hipótesis H_0; Fuente: propia

Tabla 07_ Resultados cDA por planta de la combinatoria de hipótesis bloque H; Fuente: propia

Tabla 08_ Valores mínimos y máximos, media y desviación estándar para las hipótesis de bloque H; Fuente: propia

Tabla 09_ Resultados para el análisis de la orientación como variable; Fuente: propia

Tabla 10_ Resultados de la hipótesis L_0; Fuente: propia

Tabla 11_ Resultados cDA por planta de la combinatoria de hipótesis bloque lineal; Fuente: propia

Tabla 12_ Valores mínimos y máximos, media y desviación estándar para las hipótesis de bloque lineal; Fuente: propia

Tabla 13_ Resultados de la batería de hipótesis para el análisis de orientación; Fuente: propia

Tabla 14_ Perfiles de uso de espacios en uso residencial privado; Fuente: CTE-DB-HE Anejo D

Tabla 15_ Consumo con sistema de regulación de todas las hipótesis del bloque H; Fuente: propia

Tabla 16_ Consumo con sistema de regulación de todas las hipótesis del bloque lineal; Fuente: propia

GRÁFICAS

Gráfica 01_ Valores por planta de cDA para las hipótesis del bloque H; Fuente Propia

Gráfica 02_ Media por bloque de cDA de todas las hipótesis del bloque H; Fuente: propia

Gráfica 03_ Resultados cDA y sDA (300 lx) de la batería hipótesis de análisis de orientación bloque H; Fuente: propia

Gráfica 04_ Resultados cDA (100 lx) de la batería hipótesis de análisis de orientación bloque H; Fuente: propia

Gráfica 05_ Resultados para hipótesis de orientación sur (original); Fuente: propia

Gráfica 06_ Resultados para hipótesis de orientación este; Fuente: propia

Gráfica 07_ Resultados para hipótesis de orientación norte; Fuente: propia

Gráfica 08_ Resultados para hipótesis de orientación oeste; Fuente: propia

Gráfica 09_ Valores por planta de cDA para las hipótesis del bloque lineal; Fuente Propia

Gráfica 10_ Media por bloque de cDA de todas las hipótesis del bloque lineal; Fuente: propia

Gráfica 11_ Análisis del consumo de las hipótesis del bloque H en función del uso de sistema de regulación; Fuente: propia

Gráfica 12_ Análisis de consumo de hipótesis del bloque lineal en función del uso de sistema de regulación; Fuente: propia

ECUACIONES

Ecuación 3.1_ Iluminancia; Fuente: DB-HE-Ahorro Energía. Anejo A

Ecuación 3.2_ *Daylight Factor (DF)*; Fuente: (Calcagni & Paroncini, n.d.)

Ecuación 3.3_ *Daylight Autonomy (DA)*; Fuente: (Ignacio Acosta et al., 2018a)

Ecuación 3.4_ *Continuous Daylight Autonomy (cDA)*; Fuente: (Ignacio Acosta et al., 2018a)

Ecuación 3.5_ *Daylight Coefficients Method* (definición); Fuente: (Mardaljevic, n.d.)

Ecuación 3.6_ *Daylight Coefficients Method* (cálculo); Fuente: (Mardaljevic, n.d.)

Ecuación 4.1_ Desviación estándar; Fuente: (Ruiz, 2019)

C. BIBLIOGRAFÍA.

ARTÍCULOS

- Acosta, I., Molina, J. F., & Campano, M. A. (2017).** Analysis of Circadian Stimulus and Visual Comfort Provided by Window Design in Architecture. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(3), 198–204. <https://doi.org/10.7763/ijet.2017.v9.970>
- Acosta, Ignacio, Campano, M. A., Dominguez-Amarillo, S., & Muñoz, C. (2018a).** Dynamic daylight metrics for electricity savings in offices: Window size and climate smart lighting management. *Energies*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/en11113143>
- Acosta, Ignacio, Campano, M. A., Dominguez-Amarillo, S., & Muñoz, C. (2018b).** Dynamic daylight metrics for electricity savings in offices: Window size and climate smart lighting management. *Energies*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/en11113143>
- Acosta, Ignacio, Campano, M. Á., Leslie, R., & Radetsky, L. (2019).** Daylighting design for healthy environments: Analysis of educational spaces for optimal circadian stimulus. *Solar Energy*, 193, 584–596. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.004>
- Acosta, Ignacio, Campano, M. Á., & Molina, J. F. (2016).** Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces. *Applied Energy*, 168, 493–506. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.005>
- Acosta, Ignacio, Munoz, C., Campano, M. A., & Navarro, J. (2015).** Analysis of daylight factors and energy saving allowed by windows under overcast sky conditions. *Renewable Energy*, 77(1), 194–207. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.017>
- Akpınar, Z., Tokgöz, S., Gökbel, H., Okudan, N., Uğuz, F., & Yılmaz, G. (2008).** The association of nocturnal serum melatonin levels with major depression in patients with acute multiple sclerosis. *Psychiatry Research*, 161(2), 253–257. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2007.11.022>
- Bullough, J. D., Rea, M. S., & Figueiro, M. G. (2006).** Of mice and women: Light as a circadian stimulus in breast cancer research. In *Cancer Causes and Control* (Vol. 17, Issue 4, pp. 375–383). <https://doi.org/10.1007/s10552-005-0574-1>
- Calcagni, B., & Paroncini, M. (n.d.).** Daylight factor prediction in atria building designs. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.01.009>
- Campano, M. A., Acosta, I., León, A. L., & Calama, C. (2018).** Validation Study for Daylight Dynamic Metrics by Using Test Cells in Mediterranean Area. *International Journal of*

Engineering and Technology, 10(6), 487–491.
<https://doi.org/10.7763/ijet.2018.v10.1107>

Campano, M. A., Aguilar, M. T., Fernández-Agüera, J., & Domínguez, S. (2019). Optimization of the Window Design in Offices for a Proper Circadian Stimulus: Case Study in Madrid. *International Journal of Engineering and Technology*, 127–131.
<https://doi.org/10.7763/ijet.2019.v11.1134>

Froy, O. (2011). Circadian Rhythms, Aging, and Life Span in Mammals. *Physiology*, 26(4), 225–235. <https://doi.org/10.1152/physiol.00012.2011>

Kriszbacher, I., Bódis, J., Boncz, I., Koppan, Á., & Koppan, M. (2010). The time of sunrise and the number of hours with daylight may influence the diurnal rhythm of acute heart attack mortality. *International Journal of Cardiology*, 140(1), 118–120.
<https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2008.11.019>

León-Rodríguez, A. L., Suárez, R., Bustamante, P., Campano, M. A., & Moreno-Rangel, D. (2017). Design and performance of test cells as an energy evaluation model of facades in a mediterranean building area. *Energies*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/en10111816>

Leslie, R. P., Radetsky, L. C., & Smith, A. M. (2012). Conceptual design metrics for daylighting. *Lighting Research and Technology*, 44(3), 277–290.
<https://doi.org/10.1177/1477153511423076>

Leslie, R., Raghavan, R., Howlett, O., & Eaton, C. (2005). The potential of simplified concepts for daylight harvesting. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 21–38.
<https://doi.org/10.1191/1365782805li127oa>

Melamud, L., Golan, D., Luboshitzky, R., Lavi, I., & Miller, A. (2012). Melatonin dysregulation, sleep disturbances and fatigue in multiple sclerosis. *Journal of the Neurological Sciences*, 314(1–2), 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2011.11.003>

Mardaljevic, J. M. (n.d.). *Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients*. Retrieved April 28, 2020, from <http://www.lboro.ac.uk/departments/civil-building/staff/mardaljevicjohnPersonaldaylightingwebsite:http://climate-based-daylighting.com>

Mardaljevic, J. M. (2000). *Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients*. Loughborough University. <http://www.lboro.ac.uk/departments/civil-building/staff/mardaljevicjohnPersonaldaylightingwebsite:http://climate-based-daylighting.com>

Reinhart, C. F., Dogan, T., Jakubiec, A., Rakha, T., & Sang, A. (n.d.). *UMI-AN URBAN SIMULATION ENVIRONMENT FOR BUILDING ENERGY USE, DAYLIGHTING AND WALKABILITY 2 3.*

Ricciardi, P., & Buratti, C. (2018). Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. *Building and Environment*, 127, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>

Rodrigo, J., & Amado, S. (n.d.). *Técnicas de altas prestaciones para métodos de iluminación global.*

Touitou, Y., Reinberg, A., & Touitou, D. (2017). Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of circadian disruption. In *Life Sciences* (Vol. 173, pp. 94–106). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2017.02.008>

TRABAJOS FIN DE GRADO (TFG)

(Ruiz, 2019). Autonomía de Luz del Día Parcial: Adaptación de métrica dinámica de iluminación natural para recintos con uso estacional. Aplicación a aulas de centros docentes no universitarios. <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/89591>

(Luque, 2019). Optimización del vínculo entre las métricas estáticas y dinámicas en el cálculo de la iluminación natural: Minimum Daylight Autonomy. <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/89611>

TESIS DOCTORALES

(Campano, 2015). Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía. <http://hdl.handle.net/11441/30632>

BIBLIOGRAFÍA WEB

<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>

<https://www.certificadosenergeticos.com/>

<https://www.rhino3d.com/es/>

<http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html>

https://umidocs.readthedocs.io/en/latest/docs/examples/_tutorials.html

<https://www.idae.es/>

