

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

¿REALIDAD O SIMULACIÓN?  
ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO Y LA  
CALIDAD DE LA LUZ NATURAL EN UN ESPACIO INTERIOR

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Arquitectura para optar al grado y título de Maestría Profesional en  
Arquitectura Tropical

ANDREA SANCHO SALAS

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2022

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS**

Quisiera darle gracias a Dios que ha estado conmigo en todos los momentos de mi vida, por darme fuerza y ayudarme a no rendirme, gracias por permitirme un logro más.

A Luis mi esposo, gracias por tenerme paciencia y siempre darme un punto de vista menos arquitectónico. Gracias por ser mi mayor ejemplo de fortaleza y perseverancia, gracias por tu compañía, tu amor y apoyo siempre; Y, sobre todo, gracias por no dejar de creer en mí cuando a veces yo lo hice.

A mis papás, gracias por darme la oportunidad de estudiar. Gracias por enseñarme la importancia de crecer profesionalmente. Gracias por acompañarme en las buenas y en las no tan buenas. Por su amor y apoyo incondicional.

A mi hermana, gracias por ser mi compañera de vida, por ser tanto un modelo de fuerza y resiliencia como de sensibilidad y paz. A vos y a Pablo, gracias por acompañarme en mi camino académico y por darme uno de los regalos más hermosos de mi vida, que con sus risas y felicidad me llenan de motivación y ganas de seguir viviendo.

A Ana María, gracias por acompañarme en este camino, por nunca presionarme y por ayudarme a encontrar la paz cuando a veces creí haberla perdido.

A Zuhra, gracias por presionarme sutilmente, por las explicaciones pacientes sobre la necesidad de finalizar este proceso y por el apoyo a lo largo de mi carrera profesional.

A Emily, gracias por transmitirme paz cuando más lo necesite, por acompañarme en un camino largo, por los consejos y la paciencia. Sin vos no estaría aquí.

A Sebas, gracias por la ayuda a encaminar mi tema y por todas las enseñanzas y aprendizajes en esta investigación.

A mis lectores, muchas gracias por su anuencia a acompañarme en este proceso.

Quisiera dedicarle este trabajo a Gabriel, porque durante sus 3 años de vida me ha dado muchísima felicidad y me ha enseñado a disfrutar de las cosas simples. Me gustaría que supieras que no importa que tan largo sea el camino, siempre existe un final. Como decía mi abuelo, no hay plazo que no se venza Gabrielito, adelante.

“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Arquitectura de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Arquitectura Tropical”.

---

Mag. Dania Chavarría Núñez  
**Representante de la Decana  
Sistema de Estudios de Posgrado**

---

Dra. Emily Vargas Soto  
**Profesora Guía**

---

Mag. Adrián Aguilar González  
**Lector**

---

M.Sc. Sebastián Orozco Muñoz  
**Lector**

---

M.Sc. Rodolfo Mejías Cubero  
**Representante de la Dirección  
Programa de Posgrado en Arquitectura**

---

Andrea Sancho Salas  
**Sustentante**

## TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.....	II
HOJA DE APROBACIÓN.....	III
TABLA DE CONTENIDOS .....	IV
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
LISTA DE TABLAS .....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
<b>CAPÍTULO 1. MARCO INTRODUCTORIO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	2
1.1.1 Herramientas de simulación de iluminación mediante representación predictiva .....	3
1.1.2 Componentes de las herramientas de simulación .....	7
1.1.3 Comparación de medición y simulación de luz natural en espacios construidos .....	8
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	12
1.3 OBJETIVO GENERAL .....	12
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....</b>	<b>13</b>
2.1 EL SOL COMO FUENTE DE LUZ .....	13
2.2 MÉTODOS Y MÉTRICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA LUZ NATURAL EN EL ESPACIO CONSTRUIDO .....	18
<b>CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>22</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO .....	22
3.2 MEDICIÓN DE CAMPO .....	24
3.2.1 Definición de retícula para medición.....	25
3.2.2 Toma de datos de medición puntual.....	28
3.2.3 Toma de datos de medición prolongada.....	30
3.2.4 Matriz para análisis de datos y construcción de curvas de comportamiento lumínico .....	32
3.3 SIMULACIÓN DIGITAL DE LA LUZ NATURAL EN EL ESPACIO DE ESTUDIO.....	34
3.3.1 Generación de archivo climático.....	34
3.3.2 Preparación del modelo tridimensional.....	35
3.3.3 Definición de condiciones de simulación .....	38

3.4	GRÁFICAS Y MÉTRICAS DE DESEMPEÑO .....	40
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y VALIDACIÓN.....</b>		<b>43</b>
4.1	RESULTADOS DE ILUMINANCIA MEDIDA Y SIMULADA DURANTE LA MAÑANA .....	45
4.2	RESULTADOS DE ILUMINANCIA MEDIDA Y SIMULADA DURANTE EL MEDIO DÍA .....	46
4.3	RESULTADOS ILUMINANCIA MEDIDA Y SIMULADA DURANTE LA TARDE .....	47
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....</b>		<b>52</b>

## **RESUMEN**

Esta investigación, titulada: ¿Realidad o Simulación?: Estudio comparativo de métodos para determinar el comportamiento y la calidad de la luz natural en un espacio interior, se sitúa en el ámbito de la simulación energética de niveles de iluminación natural existentes en un espacio interior, su evaluación y validación con valores reales. El objetivo principal es determinar la precisión de los cálculos generados por cada herramienta en relación con los niveles de iluminancia reales medidos un espacio interno: el área de trabajo del Laboratorio de Arquitectura Tropical, ubicado en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Costa Rica.

Se identifica la capacidad de predicción de cada motor de cálculo en la simulación de escenarios reales, así como la precisión y las limitantes que se reconozcan en cada método, con el fin de determinar en qué ocasiones utilizar cada uno, según la necesidad del estudiante o profesional. Para conseguirlo, se ha realizado una investigación bibliográfica que ha consistido en determinar cuáles herramientas existen actualmente, como han sido utilizadas, que estudios comparativos previos existen, qué información técnica es importante sobre ellas, entre otros. Además, se realiza un estudio de normas y procedimientos nacionales e internacionales para medir la calidad de la luz natural.

La relevancia y pertinencia de este trabajo académico radica en sus aportes para propiciar la incorporación de herramientas para simular iluminación tanto natural como artificial en el proceso de diseño de estudiantes y profesionales de arquitectura en Costa Rica. Esto con posibilidad de identificar problemáticas de confort lumínico y visual en su proceso de diseño, mejorar situaciones de baja calidad lumínica en ambientes construidos y contribuir al ahorro energético. A su vez, en el campo de la investigación, se aporta evidencia empírica para la validación de herramientas de simulación lumínica, con el propósito de evaluar su confiabilidad y su capacidad de predicción de escenarios reales.

*Palabras clave:*

*Luz natural, análisis lumínico, simulación, evaluación, validación*

## **ABSTRACT**

This research, entitled: Reality or Simulation: A comparative study of methods to determine the behavior and quality of natural light in an interior space, is situated in the field of energy simulation of existing natural lighting levels in an interior space, its evaluation and validation with real values. The main objective is to determine the accuracy of the calculations generated by each tool in relation to the real illuminance levels measured in an indoor space: the work area of the Tropical Architecture Laboratory, located in the School of Architecture at the University of Costa Rica.

The aim is to identify the predictive capacity of each calculation engine in the simulation of real scenarios, as well as the accuracy and limitations recognized in each method, in order to determine when to use each one, according to the needs of the student or professional. To achieve this, a bibliographic research has been carried out to determine which tools currently exist, how they have been used, what previous comparative studies exist, what technical information is important about them, among others. In addition, a study of national and international standards and procedures for measuring the quality of natural light was carried out.

The relevance and pertinence of this academic work lies in its contributions to promote the incorporation of tools to simulate both natural and artificial lighting in the design process of architecture students and professionals in Costa Rica. This will make it possible to identify lighting and visual discomfort problems in the design process, improve situations of low lighting quality in built environments and contribute to energy savings. At the same time, in the field of research, empirical evidence is provided for the validation of lighting simulation tools, with the purpose of evaluating their reliability and their capacity to predict real scenarios.

*Keywords:*

*daylight, light analysis, simulation, evaluation, validation*

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla I ÍNDICE K PARA DETERMINAR LA CANTIDAD MÍNIMA DE PUNTOS DE MEDICIÓN. Norma Técnica brasileña NBR15215-4. Fuente CISBE (1984) .....	25
Tabla II EJEMPLO DE MATRIZ PARA UNIFICAR LOS VALORES DE ILUMINANCIA DE TODOS LOS PUNTOS. Fuente autora.....	32
Tabla III ASIGNACIÓN DE MATERIALIDAD DE SUPERFICIES E INTERACCIONES CON LA LUZ. Fuente: Autora	36
Tabla IV INDICADORES PARA MEDIR EL NIVEL Y CALIDAD DE LA ILUMINANCIA. Fuente: Autora .....	42

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 NIVELES DE ILUMINANCIA EN EL ÁREA DE TRABAJO DEL LABORATORIO DE ARQUITECTURA TROPICAL UCR, imagen de prueba. Fuente: Autora .....	4
Figura 2 MÉTRICAS DE LUZ NATURAL BASADAS EN INFORMACIÓN HORARIA CLIMÁTICA. Generadas por el programa DAYSIM, en la interfaz de DIVA para RHINO. Fuente: Jakubiec, A. Reinhart, C. Massachusetts Institute of Technology, Programa de Tecnología en Edificación. ....	6
Figura 3 EJEMPLO DE LOS 16 MODELOS DE CIELO ESTANDARIZADOS POR LA COMISIÓN INTERNACIONAL DE ILUMINACIÓN (CIE). Fuente: (Marsh, 2018) .....	8
Figura 4 REPRESENTACIÓN DEL ATRIO EN EL TERCER PISO BAJO UNA CONDICIÓN DE CIELO SOLEADO MEDIANTE RADIANCE. Día de simulación 8 de junio. Fuente: (Galasiu & Atif, 2002) .....	10
Figura 5 RADIACIÓN SOLAR: A) Paso y absorción por la atmósfera terrestre; b) Curvas espectrales de la intensidad solar antes y después de atravesar la atmósfera; Fuente: (Lira-oliver, 2016).....	14
Figura 6 DIAGRAMA DE TIPOS DE RADIACIÓN: (a) directa, (b) difusa, (c) reflejada y (d) radiación solar global en un plano horizontal.....	15
Figura 7 MAPAS DE BRILLO SOLAR PROMEDIO EN COSTA RICA PARA (A) MARZO Y (B) JUNIO. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional .....	16
Figura 8 EJEMPLOS DE CONDICIONES REALES DE CIELO Y EL MODELADO DE SU DISTRIBUCIÓN DE ILUMINACIÓN NATURAL. Fuente: (Marsh, 2018).....	17
Figura 9 RADIACIÓN DIRECTA Y DIFUSA PARA DIFERENTES TIPOS DE CIELO. Fuente: Marilyne Andersen, citada por Christoph Reinhart (C. Reinhart, 2012). Formato y traducción modificadas por autora. ....	18
Figura 10 SIMULACIONES DE NIVELES DE ILUMINANCIA (a) y luminancia (b), mediante el software Velux Daylight Visualizer. Fuente: Autor.....	19
Figura 11 EJEMPLO DE CÁLCULO DE FACTOR DE LUZ DIURNA MEDIANTE SOFTWARE DIVA. Fuente: Autor. ....	20
Figura 12 PLANO DE DISTRIBUCIÓN E IMAGEN DEL ÁREA DE TRABAJO ADMINISTRATIVO DEL LABORATORIO DE ARQUITECTURA TROPICAL UCR. Fuente Autora .....	23
Figura 13 DIAGRAMA METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN. Fuente: Autora.....	24
Figura 14 DETERMINACIÓN DE LA HM Y EL ÍNDICE DE LOCAL K EN EL SITIO DE ESTUDIO. Fuente: Autora... ..	25
Figura 15 DEFINICIÓN DE MALLA DE 9 PUNTOS DE MEDICIÓN, según Norma Técnica NBR15215-4. Fuente: autora.....	26
Figura 16 MALLA DE 24 PUNTOS UTILIZADA PARA LA MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN EL LAT. Fuente: autora .....	27
Figura 17 TRAZO DE RETÍCULA DE MEDICIÓN EN EL LAT. Fuente: Autora .....	27
Figura 18 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN EN SITIO. (a) Luxómetro marca Extech model HD400. (b) Toma de medidas puntuales en LAT, con apoyo del estudiante José Daniel Chaves. Fuente: Autora .....	28
Figura 19 FICHA DE REGISTRO DE MEDICIONES PUNTUALES. Fuente: autora .....	29

Figura 20 REGISTRADOR DE DATOS UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN. Marca Hoboware. Fuente: autora .....	30
Figura 21 TRAZO DE GRILLA DE MEDICIÓN EN SITIO DE ANÁLISIS. Fuente: autora .....	31
Figura 22 EJEMPLO DE TABLA Y GRÁFICO DINÁMICO EN EXCEL, con valores de comportamiento lumínico en eje longitudinal del sitio. Fuente: autora .....	32
Figura 23 EJEMPLO DE TABLA Y GRÁFICO DINÁMICO GENERADO EN EXCEL, CON CÁLCULO DE AUTONOMÍA LUMÍNICA. Fuente: Autora .....	33
Figura 24 EJEMPLO DE TABLA Y GRÁFICO DINÁMICO EN EXCEL, CON CÁLCULO DE ILUMINANCIA NATURAL ÚTIL (UDI). Fuente: Autora .....	34
Figura 25 HORIZONTE LOCAL EN ARCHIVO CLIMÁTICO. Uso de la herramienta Horicatcher para precisar el horizontal local en el archivo climático generado en Meteororm. Fuente: autora con supervisión del Arq. Sebastián Orozco .....	35
Figura 26 IMÁGENES DEL MODELO EN SKETCH UP, CON MATERIALIDAD. Fuente: Autora .....	36
Figura 27 PROTOTIPO DIGITAL PARA DIVA, DIVIDIDO POR CAPAS SEGÚN MATERIALIDAD. Fuente: Autora ..	37
Figura 28 MALLA DE 156 PUNTOS GENERADA EN EL PROGRAMA DIVA PARA LAS SIMULACIONES EN EL LAT. Fuente: autora .....	38
Figura 29 SIMULACIÓN DE NIVELES DE ILUMINANCIA EN EL SOFTWARE VELUX DAYLIGHT VISUALIZER. (a) Iluminancia en diciembre 9am, cielo despejado. (b) Iluminancia en diciembre 9am, cielo nublado. Escala de 300 a 2000 lx. Fuente: Autora.....	39
Figura 30 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DE ILUMINANCIA EN DIVA. (a) Simulación según el modelo Pérez, con valor de radiación global horizontal. (b) Iluminancia en diciembre a las 12 m.d., cielo despejado. Escala de 100 a 2000 lx. Fuente: Autora.....	40
Figura 31 RESULTADOS DE MEDICIONES IN SITU 9:00 AM. Ejemplo de 3 días distintos y su tendencia (a) 5 de noviembre (b) 6 de noviembre (c) 12 de noviembre. El amarillo responde a la mayor iluminancia y el gris a la menor. Fuente: Autora .....	41
Figura 32 RESULTADOS PROMEDIO DE MEDICIONES PUNTUALES DE ILUMINANCIA. (a) Promedio de mediciones realizadas a las 9 a.m. (b) Promedio de mediciones realizadas a las 3 p.m. Fuente: autora .....	43
Figura 33 RESULTADOS PROMEDIO DE MEDICIONES PUNTUALES CON ESCALA DE COLORES FALSOS. Fuente: autora.....	44
Figura 34 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ILUMINANCIA 9 A.M.: a) Mediciones prolongadas, b) Simulación Velux y c) Simulación Diva.....	45
Figura 35 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ILUMINANCIA 12 M.D.: a) Mediciones prolongadas, b) Simulación Velux y c) Simulación Diva.....	46
Figura 36 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ILUMINANCIA 3 P.M.: a) Mediciones prolongadas, b) Simulación Velux y c) Simulación Diva.....	47
Figura 37 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ILUMINANCIA 3 P.M.: a) Mediciones prolongadas, b) Simulación Velux y c) Simulación Diva.....	49

Figura 38 . RESULTADOS DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR PUNTO A PUNTO 12 M.D. a) Simulación con Velux (S1). b) Simulación con Diva (S2). .....	50
Figura 39 RESULTADOS DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR PUNTO A PUNTO 12 M.D. a) Simulación con Velux (S1). b) Simulación con Diva (S2).....	51



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

SEP Sistema de  
Estudios de Posgrado

**Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.**

Yo, Andrea Sancho Salas, con cédula de identidad 1 1303 0235, en mi condición de autor del TFG titulado ¿REALIDAD O SIMULACIÓN? ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO Y LA CALIDAD DE LA LUZ NATURAL EN UN ESPACIO INTERIOR

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI  NO \*

\*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: \_\_\_\_\_ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

**FIRMA ESTUDIANTE**

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

## **CAPÍTULO 1. MARCO INTRODUCTORIO**

*“Vivimos en una era donde los datos son abundantes; sin embargo, muy pocos son utilizados de manera efectiva para informar las etapas tempranas de diseño de edificaciones, aun cuando los cambios acertados pueden reducir el consumo energético futuro de manera significativa a un bajo costo (...) Este campo, llamado simulación energética de diseño, utiliza los datos para medir el desempeño de edificios, incorporando cálculos de confort, radiación solar, luz natural, movimiento del aire, entre otros” (Anderson, 2014)*

En el mundo actual existen un sinnúmero de herramientas que procuran simular la realidad a la que nos enfrentamos o nos enfrentaremos en un futuro cercano o incluso lejano. Los seres humanos siempre han tenido la necesidad de predecir lo que pasará para poder conservar su existencia el mayor tiempo posible, sobre todo, en el marco de un futuro en donde el cambio climático es una realidad. Sin embargo, es necesario detenerse y cuestionar si las herramientas que brinda el mercado son lo suficientemente precisas para simular nuestra realidad.

En el campo de la arquitectura, la profesión necesita reinvertir en conocimiento sobre el desempeño de los edificios. Ha existido una separación entre diseño y desempeño que debe ser erradicada, mediante estrategias que permitan aumentar el conocimiento sobre la simulación energética y el modelado energético. No obstante, para utilizar las herramientas de simulación, es necesario conocer sus limitantes y entender su capacidad de predicción de escenarios reales.

Por esta razón, el presente trabajo busca validar la precisión de los cálculos generados mediante dos herramientas de simulación de iluminación natural, realizando un análisis comparativo con los datos obtenidos a través de mediciones reales en un área del Laboratorio de Arquitectura Tropical de la Universidad de Costa Rica. Además, pretende identificar los factores que deben ser considerados para generar cálculos lumínicos acertados, si la fuente de luz principal es el sol. La importancia de entender el funcionamiento de la luz natural en el interior de los espacios, tanto en las etapas tempranas de diseño como en el espacio construido, no solo permite asegurar el confort lumínico para los usuarios, sino que puede traducirse en un ahorro energético considerable, si se identifica cómo es el desempeño de la geometría estudiada para mejorar y aprovechar la iluminación natural útil.

## 1.1 Antecedentes y estado del arte

El uso de la simulación de iluminación computarizada en el diseño de edificios existe desde hace más de tres décadas. Sin embargo, no existe una visión completa y comprensiva de literatura respecto a su precisión y sus resultados. Constantemente se realizan comparaciones entre los modelos computarizados y los datos obtenidos en el escenario real, con el fin de verificar la exactitud y las funciones. No obstante, estas evaluaciones se vuelven obsoletas ya que los programas computacionales son modificados frecuentemente y caen en desuso. A pesar de esta situación, la revisión de la literatura ha servido como un mapeo de los avances de diferentes aspectos técnicos en el campo de la simulación. Entender la evolución de este campo es esencial para el profesional en arquitectura, ya que cada vez más las técnicas de verificación manuales son sustituidas por los medios digitales. Entre más estudios de validación existan, se tendrá más evidencia sobre la precisión o no de las herramientas que hay en el mercado.

*“En 1994, casi el 77% de los participantes en una encuesta utilizaba tanto medios computarizados como modelos físicos para su práctica profesional. Para el 2004, los participantes que no utilizaban ningún programa de predicción de luz natural cayó a un 21%. Este porcentaje puede reducirse todavía más, ya que los estudiantes de arquitectura e ingeniería se vuelven cada vez más familiarizados con el modelado digital durante su educación. El uso de simulaciones de iluminación también va a aumentar como resultado de códigos de construcción más complejos y certificaciones que requerirán modos más sofisticados de demostrar el cumplimiento” (C. Reinhart & Fitz, 2006)*

Los primeros programas que permitieron calcular el diseño de iluminación artificial en espacios rectangulares sencillos existieron desde 1970. Algunos intentos se realizaron en esa misma década, para integrar cálculos de luz natural y artificial. Los resultados iniciales fueron meramente numéricos. Sin embargo, los avances más significativos en los gráficos computarizados se dieron a partir de los años 80. Investigadores desarrollaron mejores métodos de cálculo y representación de la iluminación sobre volúmenes más complejos. Se basaron en el trazo de los rayos de luz y las propiedades de los materiales y los resultados ya fueron tanto numéricos como por medio de imágenes. De esta manera inician las simulaciones basadas en factores físicos, también conocidas como representaciones predictivas, que consisten en la predicción de la realidad según condiciones dadas y siguiendo características y fenómenos físicos específicos. (Ochoa et al., 2012) Esta investigación se enfoca en los programas que generan este tipo de simulaciones.

### 1.1.1 Herramientas de simulación de iluminación mediante representación predictiva

Dentro de los programas de simulación energética, existen herramientas dedicadas a la iluminación en específico, mientras que otras tienen módulos para realizar cálculos integrados (es decir, analizan varios parámetros a la vez: luz, viento, temperatura, etc.) en edificios completos. En el caso de esta investigación, se tomarán en cuenta solamente los motores de cálculo diseñados específicamente para simulación de iluminación.

#### 1.1.1.1. *Radiance*

El programa Radiance fue desarrollado por Greg Ward Larson en el “*Lawrence Berkley National Laboratory (LBNL)*” en Berkley, California. El lanzamiento de la primera versión fue en 1985, sin embargo, ha sufrido importantes modificaciones y actualizaciones a través de los años. Este programa implementa el método *raytracing*, que es una técnica de renderizado que permite generar imágenes mediante el trazo de los rayos de luz y simulando el efecto de su encuentro con objetos virtuales. De esta manera, permite representar la distribución de la luz difusa y su propagación en el ambiente construido. (Michler, 2018)

Después de una revisión de literatura, incluyendo la lista de herramientas de simulación del Departamento de Energía de Estados Unidos, Radiance es el motor de cálculo más utilizado por la comunidad de investigación en simulación lumínica, con un sistema robusto que permite computarizar los efectos de la luz natural, así como generar imágenes con una calidad foto realista y precisa. Consecuentemente, el formato de imagen que genera no es sujeto de valores aleatorios de brillo, sino la luminancia real sobre las superficies visibles. Además, puede computar valores de iluminancia en puntos específicos dentro de un espacio, que luego pueden ser utilizados para determinar factores de luz día, así como niveles de iluminancia sobre los planos de trabajo.

Para poder generar todos los cálculos, el programa requiere de insumos de información sobre el espacio construido y su entorno: geometría, materialidad, hora, fecha y condición de cielo. Sin embargo, el mismo no tiene una interfaz propia. Por esta razón, cuenta con diferentes plataformas que brindan las herramientas de interfaz necesarias para poder dar los insumos y realizar los cálculos: Ecotect, Rhinoceros (DIVA), Sketchup (Open Studio), entre otros.

Al compararlo con otros programas, puede no ser tan atractivo ya que requiere de experiencia considerable para poder ser utilizado. Sin embargo, permite realizar cálculos con geometrías más complejas, materiales más detallados y continúa siendo el favorecido por los investigadores en iluminación (C. Reinhart & Fitz, 2006). Radiance es un software de licencia libre y ha sido distribuido mediante un acuerdo de código abierto, lo que ha permitido la contribución de investigadores y de la comunidad de modelado energético. Además, es uno de los pocos modelos validados de manera extensiva, presentando resultados consistentes en términos de precisión dentro de los límites aceptados, según los parámetros de prueba (Ochoa et al., 2012).

### 1.1.1.2. VELUX Daylight Visualizer

VELUX Daylight Visualizer es una herramienta que se encuentra disponible desde el 2010. Fue desarrollada por Luxion para el grupo VELUX. La misma permite realizar simulaciones basadas en parámetros físicos y la incidencia de la luz natural a través de las aberturas en los edificios. El visualizador incluye un módulo de modelado de edificios sencillos y la posibilidad de agregar ventanas de la base de datos integrada de productos VELUX (sistemas de ventanería para techos y fachadas). También es posible realizar simulaciones de desempeño lumínico en modelos importados desde otros programas (VELUX, n.d.-b). La información inicial que se requiere introducir para generar los resultados es la orientación correcta del modelo, su ubicación, los materiales utilizados y sus respectivos porcentajes de reflexión y/o transmisión, la fecha y hora del estudio y la definición de la vista a estudiar.

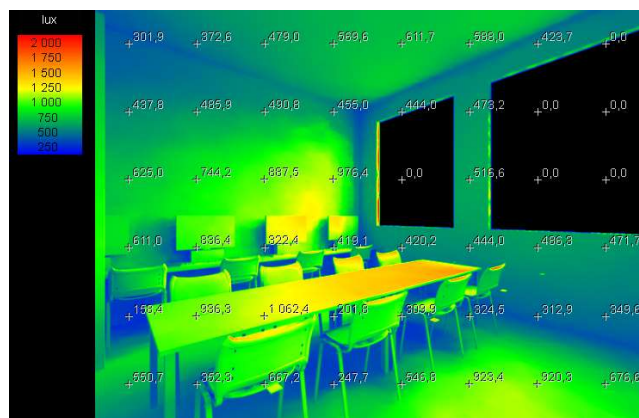


Figura 1 NIVELES DE ILUMINANCIA EN EL ÁREA DE TRABAJO DEL LABORATORIO DE ARQUITECTURA TROPICAL UCR, imagen de prueba. Fuente: Autora

La herramienta está diseñada para realizar análisis únicamente de luz natural. Fue concebida para su uso durante las etapas tempranas de diseño conceptual arquitectónico, con el fin de predecir y documentar los niveles de iluminación natural y la apariencia del espacio interior previo a la realización del diseño final de la edificación. A diferencia de los programas para visualización tridimensional común, Daylight Visualizer permite cuantificar los niveles y la calidad de la iluminación, de manera que el diseñador pueda tomar una decisión informada (Roy, 2016).

Dentro de los cálculos que permite realizar el programa, están los niveles de luminancia en candelas por metro cuadrado, niveles de iluminancia en luxes y el factor de luz día (DF); esto para todos los 16 tipos de cielo definidos por el Estándar General de Cielo CIE (Siglas en inglés de la Comisión Internacional en Iluminación). Los resultados se visualizan por medio de imágenes renderizadas con datos numéricos, imágenes de colores falsos y también líneas de contorno. El uso de la herramienta es bastante intuitivo y de rápido aprendizaje, además de ser de uso libre.

#### *1.1.1.3. DIALux evo*

DIALux es un programa utilizado para calcular sistemas de iluminación artificial interior, exterior y su desempeño energético. Sus capacidades de cálculo están reguladas por estándares alemanes y de la CIE. Es reconocido de manera internacional por un alto porcentaje de empresas que manufacturan luminarias, ya que son éstas quienes proveen los archivos fotométricos que se encuentran en la base de datos para importar y realizar los cálculos. Este programa, de acceso libre, es utilizado por más de 700 000 mil diseñadores de iluminación alrededor del mundo (DIAL GmbH, 2019). Es constantemente actualizado, siendo la última versión disponible hasta la fecha DIALux EVO 10.1.

Con respecto a la información inicial que se provee, la geometría está limitada a ciertas figuras. Es posible importar modelos de otros programas, únicamente si fueron generados en una plataforma BIM. Caso contrario, solamente permite generar modelos dentro del programa. En cuanto a los resultados que genera, son tanto en imágenes de colores falsos y con valores de iluminancia en los planos horizontales o verticales determinados, planos con curvas isolux e imágenes foto realistas para mostrar la calidad de la iluminación. A pesar de ser de licencia libre, no es una herramienta de código abierto.

#### 1.1.1.4. DAYSIM

DAYSIM es un programa de lenguaje de programación, basado en el motor de cálculo de Radiance, que cuantifica cantidades anuales de luz natural en edificios y sus alrededores. Su principal fortaleza, que lo diferencia de muchos otros programas, es que permite realizar simulaciones dinámicas mediante archivos climáticos en formato .epw (Energy plus weather file). Este tipo de archivos facilita hacer estudios más complejos como el diseño de fachadas dinámicas, sistemas de iluminación artificial, sistemas de control de iluminación, ubicación de sensores, entre otros, ya que tiene a disposición la información horaria climática de un sitio en particular. (Jakubiec & Reinhart, 2012). Entre las métricas que se pueden generar en este tipo de herramientas esta la autonomía de luz día (DA), Iluminancia útil por luz diurna (UDI), deslumbramiento anual, entre otros. Así como en Radiance, DAYSIM no cuenta con una interfaz propia; no obstante, puede utilizar la interfaz de otros programas como SketchUp, Ecotect y Rhinoceros (DIVA for Rhino).

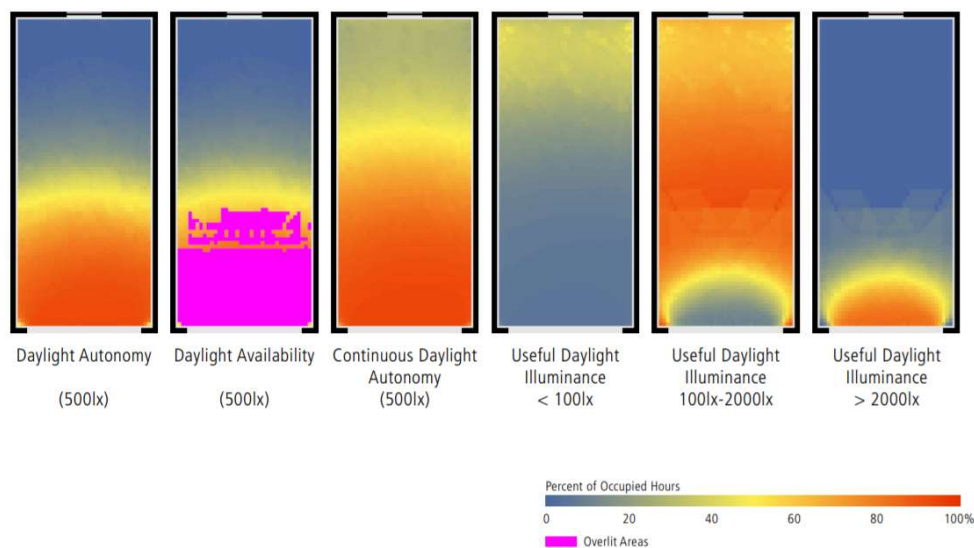


Figura 2 MÉTRICAS DE LUZ NATURAL BASADAS EN INFORMACIÓN HORARIA CLIMÁTICA. Generadas por el programa DAYSIM, en la interfaz de DIVA para RHINO. Fuente: Jakubiec, A. Reinhart, C. Massachusetts Institute of Technology, Programa de Tecnología en Edificación.

#### 1.1.1.5. DIVA

El programa DIVA, comúnmente conocido como *DIVA for Rhino*, es un *plug-in* para el modelado altamente optimizado de energía y luz natural dentro de la interface de Rhinoceros. Sus siglas corresponden a cuatro palabras en inglés: Design (Diseñar), Iterate (Iterar), Validate (Validar), Adapt (Adaptar), refiriéndose a la metodología de diseño basado en el desempeño, donde se toma un parámetro físico como la iluminación y mediante iteraciones se analiza su desempeño, con el fin de realizar las adaptaciones necesarias.

Inicialmente fue desarrollado por la Escuela de Diseño de la Universidad de Harvard, y actualmente es distribuido y diseñado por la empresa Solemma LLC, del investigador Christoph Reinhart. *DIVA for Rhino* permite a los usuarios realizar evaluaciones de desempeño tanto de edificios individuales como paisajes urbanos, incluyendo mapas de radiación, imágenes fotorrealistas, métricas de luz natural basadas en archivos climáticos, análisis anual e individual de deslumbramiento, cumplimiento de parámetros LEED para obtener créditos por luz natural, análisis térmico por zonas y cálculo de cargas. Las simulaciones de DIVA están basadas en cálculos realizados mediante EnergyPlus, Radiance y DAYSIM, y tiene una versión educacional gratuita por lo que está al acceso de estudiantes e investigadores. En el año 2020 DIVA paso a formar parte de un nuevo paquete de software llamado CLIMATE STUDIO, también de la empresa Solemma LLC.

#### 1.1.2 Componentes de las herramientas de simulación

Aún y cuando existe diversidad en las herramientas de simulación de luz natural, la gran mayoría de los simuladores avanzados están conformados por el mismo esquema de componentes internos. Según la investigación realizada por Bhavani y Khan (Bhavani & Khan, 2011), se identifican los siguientes componentes:

**Modelo de cielo:** Los cálculos de iluminación natural dependen de la distribución de luminancia en el cielo. De esta manera, para las simulaciones de luz día fue necesario definir distribuciones de cielo bajo un parámetro amplio de escenarios desde cielo nublado, cielo despejado, condiciones de nubosidad, etc. Este concepto fue propuesto por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), para su aplicación y uso a nivel mundial. Existen 16 patrones de cielo estandarizados por la Comisión.

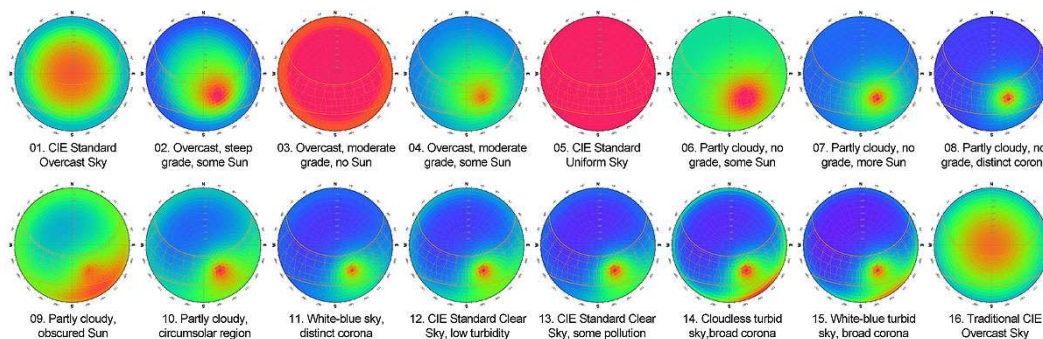


Figura 3 EJEMPLO DE LOS 16 MODELOS DE CIELO ESTANDARIZADOS POR LA COMISIÓN INTERNACIONAL DE ILUMINACIÓN (CIE). Fuente: (Marsh, 2018)

Modelo de aposento: Consiste en toda la información referente a la geometría, particiones, columnas, muebles, emplazamiento, ubicación, aberturas y propiedades físicas de estos componentes como su reflectancia y transmitancia (según materiales y colores). Usualmente se utiliza el diseño asistido por computador (CAD) para el modelado, ya sea en el mismo programa o importado desde otro.

Modelo de iluminación global: Hay dos procesos mediante los cuales el motor realiza los cálculos de visualización según la luz natural: radiosidad (en inglés *radiosity*) y trazo de rayos (*raytracing*). El primero es utilizado para las interacciones con superficies difusas mientras que el segundo para las superficies especulares. La mayoría de los algoritmos que contienen las herramientas actuales de simulación utilizan ambos conceptos de manera efectiva y complementaria.

### 1.1.3 Comparación de medición y simulación de luz natural en espacios construidos

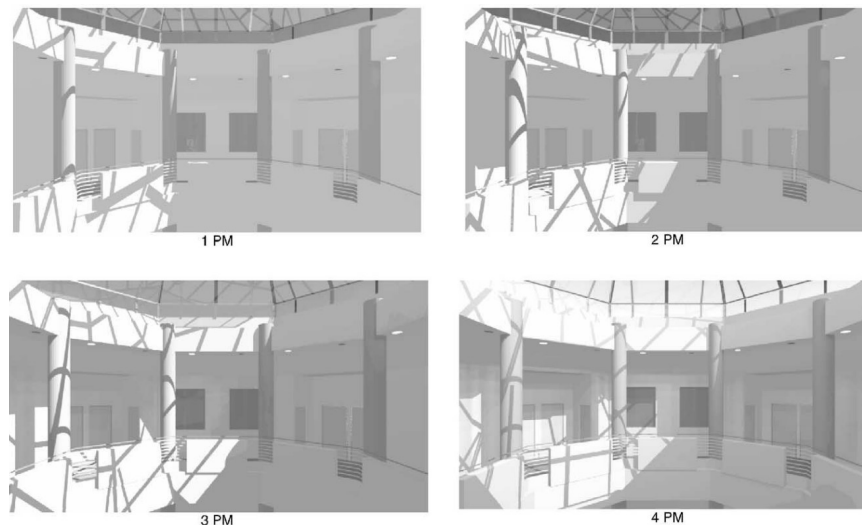
Para utilizar programas como herramientas de diseño y evaluación, es importante conocer sus limitantes y su capacidad de predicción en la simulación de escenarios reales. A pesar de que siempre indican su margen de error dentro de las especificaciones, son necesarios los estudios de validación para poder determinar la exactitud y precisión de los programas y sus restricciones al predecir parámetros, en este caso, de iluminación.

Después de realizar la revisión bibliográfica, se determina que existen dos tipos de estudio de validación: el primer tipo relaciona dos o más herramientas de simulación de iluminación con el fin de determinar si existen

diferencias significativas entre los resultados numéricos que generan. El segundo tipo de estudio es aquel en el cual se realiza una comparación entre niveles de iluminancia medidos en un espacio existente (bajo condiciones físicas y ambientales específicas) y un modelo de simulación de iluminación, en el cual se recrean las mismas condiciones. Debido a que el segundo método toma en cuenta el comportamiento real de la luz natural en el espacio, se considera de mayor interés para la investigación, este tipo de validación.

Anca D. Galasiu y Morad R. Atif analizan la aplicabilidad de la simulación de iluminación natural en edificios existentes. Utilizan una comparación entre la iluminancia horizontal medida en puntos seleccionados dentro de un atrio ubicado en Ottawa y la respectiva simulación del mismo espacio (Galasiu & Atif, 2002). Su objetivo principal fue verificar la precisión del programa Adeline en la predicción de la iluminancia horizontal del interior según la luz natural. Adeline contiene una red de módulos o subprogramas dentro de los cuales están: *Scribe*, utilizado para describir la geometría del espacio por medio de un modelo tridimensional, *Plink*, para asignar las propiedades materiales como reflectancia, color y transmitancia visible a superficies y objetos, *Superlite*, que calcula valores horarios de iluminancia y factor de luz día en cualquier plano del espacio, basado en intercambio de flujo de radiación entre superficies (radiosidad) y *Radiance*, motor de cálculo anteriormente mencionado, que permite crear representaciones tridimensionales y fotorrealistas del espacio iluminado, mediante la técnica del trazo de rayos.

Para poder definir los puntos de medición de iluminancia en el atrio, fue necesario determinar todas las características físicas y el uso del espacio, así como sus horarios de ocupación, ya que todos estos factores pueden afectar los resultados tanto en la medición in situ como en la construcción del escenario virtual para la simulación. En este caso, el espacio de estudio fue escogido por ser un punto importante de ingreso de luz natural dentro del edificio. El espacio tiene una triple altura, con un sistema de ventanería de tres tipos. Es un área de paso, donde los usuarios usualmente caminan y ocasionalmente leen.



*Figura 4 REPRESENTACIÓN DEL ATRIO EN EL TERCER PISO BAJO UNA CONDICIÓN DE CIELO SOLEADO MEDIANTE RADIANCE. Día de simulación 8 de junio. Fuente: (Galasiu & Atif, 2002)*

El autor hace énfasis en la importancia de conocer las especificaciones del fabricante con respecto a la transmitancia visible y la reflexión que tienen los materiales. También se menciona que el programa Radiance tiene un banco de datos de reflectividad de materiales para poder utilizarlos en el modelo a analizar y lograr que sean lo más cercanos a la condición real. En este caso, una vez que se realiza el modelado del sitio de análisis, se identifican las características materiales de todo lo que está en el espacio: paredes, pisos, cielos, ventanas, marcos de ventanería, alfombras, textiles, muebles, objetos (por ejemplo, computadoras, libros), entre otros.

Otro punto a considerar es la época en que se realizan las mediciones. En este caso de estudio, el monitoreo se hizo en los meses de junio y diciembre, para abarcar condiciones de verano e invierno, en donde existen diferentes posiciones del sol y por ende variabilidad en el número de horas de luz e iluminancia exterior. Los parámetros que se midieron fueron la iluminancia horizontal interior en cada piso, en dos puntos de medición por cada orientación (norte, sur, este, oeste), la iluminancia global horizontal exterior y la radiación solar exterior. Los datos del comportamiento exterior permiten determinar la condición de cielo existente, si existe o no nubosidad, lo que puede resultar en una simulación de iluminación interior más precisa.

Una vez realizadas las mediciones en sitio, el programa Radiance permite utilizar como datos de entrada los valores medidos de radiación solar directa y la condición de cielo que existió el día particular. Esto en el

caso de simulaciones estáticas, que responden a un día y hora específico. También es posible realizar simulaciones dinámicas, que nos llevan a métricas de comportamiento anual como la autonomía luminica.

Las simulaciones realizadas en el estudio del atrio fueron estáticas, por horas y días específicos, según los días de medición. Se generaron datos horarios de iluminancia para cada piso del espacio, por dos días de cielo despejado (8 de junio y 8 de diciembre) y uno de cielo nublado (15 de diciembre). Posteriormente, se realizaron tablas y gráficos comparativos de los valores de iluminancia por cada piso del espacio. En general, los valores de luz natural y su distribución en el espacio fueron razonablemente bien simulados en el perímetro del atrio. Sin embargo, existen puntos en donde la iluminancia fue sobreestimada.

Más allá de los valores puntuales, los autores analizan el patrón de distribución de iluminación y los rangos de iluminación tanto en los valores de la medición en sitio como en la predicción digital. La comparación entre ambas demuestra que, para cualquier condición de cielo particular, el modelo de computadora tiene el potencial de predecir con precisión el comportamiento de la luz natural en un espacio, si existe disponibilidad de los datos de entrada relevantes, como la geometría exacta, la construcción detallada de las propiedades de los materiales y la descripción de la condición de cielo.

Como la mayoría de programas de simulación en edificación, este estudio determinó nuevamente la importancia de tener información detallada sobre el edificio y las condiciones de su entorno (climáticas y no climáticas), ya que la misma es el insumo principal para los datos de entrada de cualquier simulación. Asimismo, para el uso del módulo de Radiance en el software Adeline, es importante conocer las opciones de control y los parámetros de simulación, ya que son aspectos que optimizan la precisión de las simulaciones de una manera significativa.

## 1.2 Pregunta de investigación

¿Hay correspondencia entre la iluminancia medida en un espacio y su simulación digital mediante los programas *DIVA-for-Rhino* y *VELUX Daylight Visualizer*? Estudio de caso del Laboratorio de Arquitectura Tropical de la Universidad de Costa Rica.

## 1.3 Objetivo general

Analizar y comparar los niveles de iluminancia horizontal medidos en sitio y los valores obtenidos mediante los programas de simulación lumínica *DIVA-for-Rhino* y *VELUX Daylight Visualizer*, con el fin de verificar la precisión y capacidad de éstos en la predicción de escenarios de luz natural útil.

## 1.4 Objetivos específicos

Realizar mediciones en sitio de la iluminancia horizontal en el interior del Laboratorio de Arquitectura Tropical de la Universidad de Costa Rica.

Simular la iluminancia horizontal en el interior del Laboratorio de Arquitectura Tropical de la Universidad de Costa Rica mediante dos programas de simulación lumínica.

Verificar la precisión de las simulaciones de iluminancia horizontal mediante su comparación y análisis con respecto a las mediciones en sitio.

Determinar el grado de utilidad de los escenarios de luz natural medidos y simulados mediante los indicadores: iluminancia media ( $E_m$ ), luz natural útil (UDI) y autonomía lumínica (DA).

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

Es fundamental exponer algunos de los conceptos para la comprensión de programas de simulación lumínica en relación con la medición de datos reales. En primer término, es necesario posicionarse en el marco del **diseño basado en simulación y desempeño energético**, que es un proceso en el que la simulación es el medio principal para evaluar y verificar el diseño. En este caso, se considera **simulación** como el proceso de crear y analizar un prototipo digital de un modelo físico para poder predecir su desempeño en el ambiente real. Este procedimiento es acompañado de procesos de validación apropiados y ejecutados durante el desarrollo, lo que permite como resultado un diseño superior en menos tiempo y menos costoso. (Shephard et al., n.d.).

La **simulación energética** es utilizada para ayudar a que diseñadores entiendan bajo qué condiciones y en que partes puede fallar o mejorar el desempeño energético de un objeto o un espacio, dependiendo de lo que se esté analizando. Inició como un método para dar dimensión a los sistemas de enfriamiento o calefacción de las edificaciones y en un principio era dirigido a los ingenieros mecánicos (Anderson, 2014). Sin embargo, en el marco de la crisis energética y el cambio climático, entender el desempeño y consumo energético, incluso en etapas tempranas de diseño, es indispensable. Se ha incorporado la evaluación del desempeño como una parte necesaria del diseño, para poder aprovechar al máximo recursos existentes, en este caso la luz natural. Esta investigación se enfoca en los **simuladores de luz diurna**, que permiten analizar las condiciones de luz y sombra sobre un modelo específico, utilizando como fuente de luz primordial el sol.

### **2.1 El sol como fuente de luz**

El sol es una fuente de luz compleja. Su altitud y ángulo de incidencia cambia constantemente a través del día y del año. La **luz solar** es la totalidad de radiación que es visible en la superficie terrestre durante las horas que dura el día (Mardaljevic, 2014). En otras palabras, es la parte de la radiación electromagnética que podemos ver. Dentro de la radiación electromagnética que se recibe del Sol, no sólo llega la luz (radiación visible), sino también la radiación ultravioleta y la radiación infrarroja, las cuales no podemos ver. Sin embargo, casi la mitad de la radiación solar que se recibe, se encuentra entre los 400 y 700 nanómetros, constituyendo la luz visible.

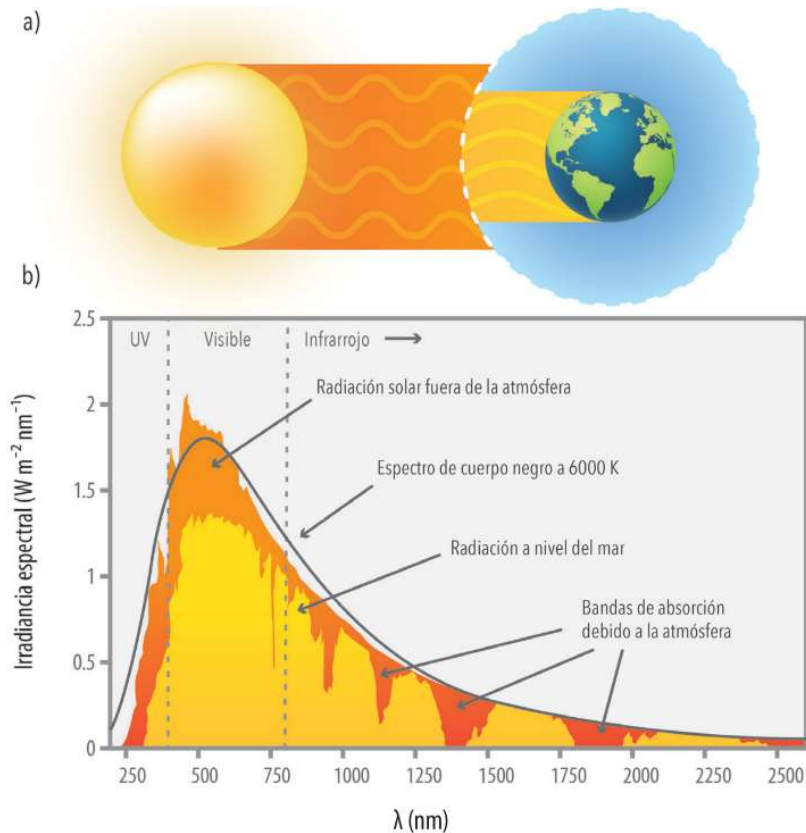


Figura 5 RADIACIÓN SOLAR: A) Paso y absorción por la atmósfera terrestre; b) Curvas espectrales de la intensidad solar antes y después de atravesar la atmósfera; Fuente: (Lira-oliver, 2016)

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, también es absorbida por gran cantidad de sus constituyentes como moléculas de aire y de polvo. Las partes del espectro de luz visible que tiene longitud de onda corta (tonos azules) atraviesan más fácilmente que la sección de la luz con longitud de onda más larga (tonos rojos). Es por esto que el color del cielo también varía según la hora del día.

Existen diferentes tipos de radiación dependiendo de cómo interactúa la luz solar sobre la superficie. La **radiación solar directa**, es aquella que incide directamente del Sol, sin haber experimentado ningún cambio de dirección. Esta radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos que la interceptan. Por el contrario, la **radiación solar difusa** es la que ha sido reflejada por las nubes y se dispersa a causa de partículas en la atmósfera. Esto da como resultado, que la luz natural sea una combinación de luz directa proveniente del sol y luz difusa que se refleja de la atmósfera, agua, vapor y nubes (Anderson, 2014).

En Costa Rica no se hacen observaciones rutinarias de radiación directa ni radiación difusa. Únicamente se cuenta con piranómetros en las estaciones meteorológicas, que brindan información diaria sobre **la radiación solar global en un plano horizontal** (Wright, 2008), que es aquella que incide sobre una superficie horizontal, resultado de sumar las componentes directa, difusa y reflejada.

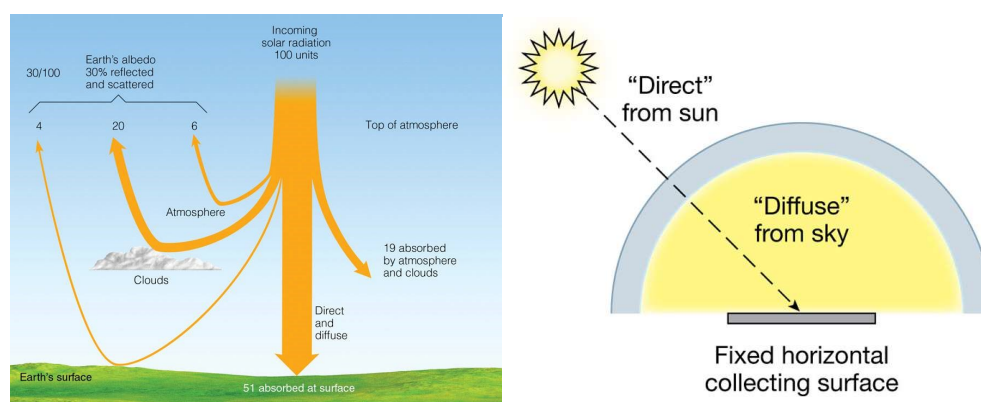


Figura 6 DIAGRAMA DE TIPOS DE RADIACIÓN: (a) directa, (b) difusa, (c) reflejada y (d) radiación solar global en un plano horizontal

La cantidad de luz solar depende de la **cobertura nubosa**. De hecho, las nubes pueden reflejar o absorber hasta 90 por ciento de la energía incidente sobre ellas, por lo que son un factor determinante de la radiación que llega al suelo (Castro, 1986). Existen localidades que presentan 4000 horas de luz por año, como el Sahara, mientras que otros reciben menos de 2000 horas por año, como en Escocia e Islandia. En la mayor parte de la región tropical, la zona entre los Trópicos de Cáncer y Capricornio, la cantidad de luz solar varía según avanza el día, con una nubosidad inconstante, que puede iniciar desde muy temprano en la mañana e incluso permanecer hasta el atardecer (Encyclopaedia Britannica, n.d.).

La radiación solar directa recibida por una superficie depende de si el Sol ha estado descubierto o no. De esta manera, se puede tener una idea de cuánta radiación ha llegado al suelo si se conoce la cantidad de tiempo diario durante el cual el Sol estuvo en esa condición. A la medición del tiempo en el cual un lugar ha recibido radiación directa se denomina **brillo solar** (Heinrich et al., 2013). En Costa Rica, el Instituto Meteorológico Nacional, en conjunto con el Ministerio de Ambiente y Energía, desarrollaron mapas de isolíneas que muestran la cantidad de horas de brillo solar para todo el territorio nacional, tanto anualmente como para los meses representativos de las épocas seca y lluviosa. Estos mapas pueden ser utilizados

como información de apoyo para definir la condición predominante de cielo existente en una zona particular del país, según su ubicación y la época en que se realice el análisis.

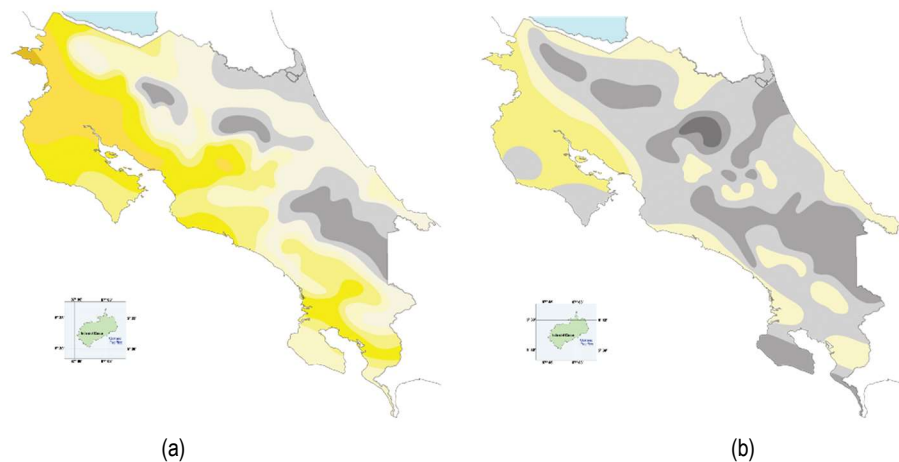


Figura 7 MAPAS DE BRILLO SOLAR PROMEDIO EN COSTA RICA PARA (A) MARZO Y (B) JUNIO. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

El comportamiento de la luz en días soleados puede generar incidencia directa en una fachada de un edificio mientras la otra se encuentre en penumbra, y en días nublados producir una iluminación difusa. Por esta razón, al diseñar y simular con luz solar es indispensable determinar las características predominantes del cielo, también llamadas **modelo de cielo o condición de cielo**. Un modelo de cielo es una ecuación matemática que describe la variación de los niveles de luminancia a través de un domo ficticio (Mardaljevic, 2014). La Comisión Internacional de Iluminación (CIE, por su acrónimo en francés) define las características y configuración de coeficientes para 15 tipos de cielo, representando una variabilidad de condiciones, desde totalmente nublado hasta completamente despejado, según los diferentes niveles de luz natural directa. Los tres modelos que son utilizados por la mayoría de las plataformas para simular son:

- Cielo uniforme: es la condición más simple de cielo, en el cual se asume que los niveles de luz diurna son iguales desde todos los puntos del cielo ficticio.
- Cielo despejado: se utiliza cuando la cobertura de nubes es menor al 30%.
- Cielo nublado: se utiliza cuando la cobertura de nubes es superior al 70%. Para facilidad en los cálculos, la mayoría de los cielos nublados no consideran la posición del sol. Para el cálculo del factor de luz diurna se utiliza este tipo de cielo.

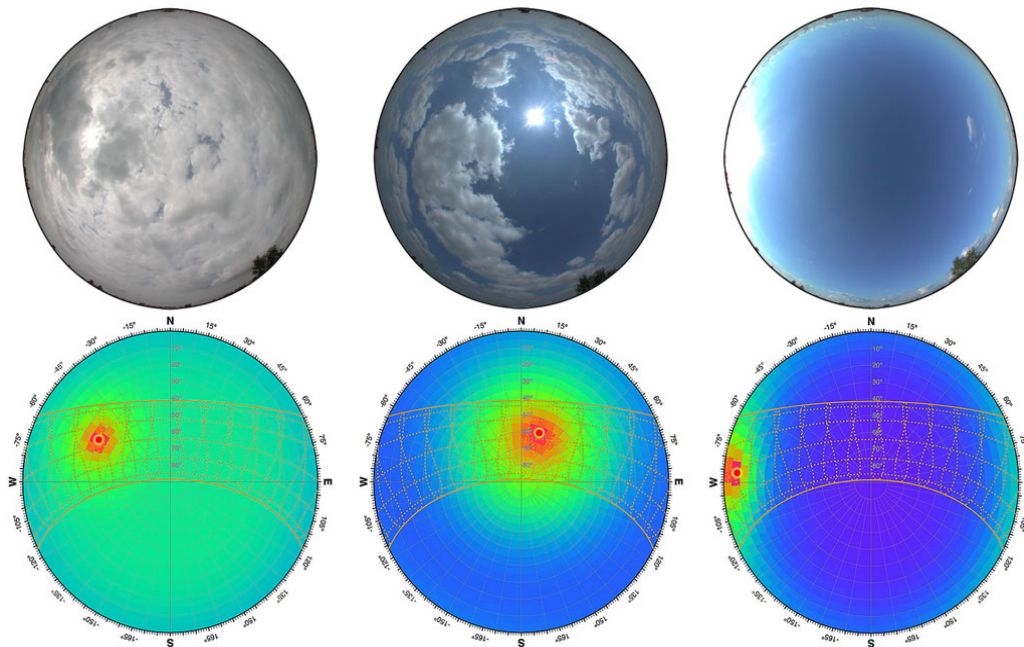


Figura 8 EJEMPLOS DE CONDICIONES REALES DE CIELO Y EL MODELADO DE SU DISTRIBUCIÓN DE ILUMINACIÓN NATURAL. Fuente: (Marsh, 2018)

La metodología de cálculo del Estándar General de Cielo de la CIE está basada en un modelo matemático de la distribución de luminancia en el cielo llamado Perez, (*Perez All-Weather sky model*). Este modelo se ha convertido en el estándar para cálculos y simulación de luz natural, ya que utiliza información real recolectada desde estaciones climáticas alrededor del mundo. Los datos para una fecha y ubicación en específico no son necesariamente los datos que se utilizan, sino que el modelo busca la información que mejor represente las condiciones de la fecha y localidad que se estudia (Ashdown, 2009). Existen tres posibles parámetros de entrada (*input data*) que el modelo Perez utiliza:

- P: épsilon delta que representan la claridad ( $\epsilon$ ) y el brillo del cielo ( $\Delta$ )
- W: los valores medidos de irradiancia horizontal directa y difusa ( $W/m^2$ ), que son mayormente utilizados ya que muchas estaciones meteorológicas registran estos datos.
- L: iluminancia directa y difusa (luxes) que puede ser medida o calculada si se cuenta con valores de irradiancia.

El software DIVA permite realizar simulaciones con los dos tipos de información: es posible utilizar el modelo de cielo determinado por el programa según los estándares de la CIE y la información del archivo de clima y también se puede realizar con el **método Perez**, introduciendo el valor de irradiancia del día en que se realizó la medición, o el valor que mejor represente la condición de cielo. Para poder definir qué condición representa mejor el cielo, existe una tabla desarrollada por Marilyne Andersen, citada por Christoph Reinhart en su curso online denominado “*Daylighting*”, donde se establece un valor de radiación global aproximado y el porcentaje de componente difuso para cada tipo de cielo (C. Reinhart, 2012). Se considera una herramienta de apoyo para determinar el tipo de cielo al simular.








							
TIPO DE CIELO	Despejado	Blanco lechoso	Parcialmente nublado	Blanco	Gris claro	Gris oscuro	Oscuro
SOL	Brillante	Despejado	Parcialmente cubierto	Cubierto	Todavía visible	Apenas visible	Invisible
RADIACIÓN GLOBAL W/m <sup>2</sup>	800 a 900	600 a 800	300 a 700	250 a 400	200 a 300	100 a 200	20 a 100
COMPONENTE DIFUSO	10 a 20 %	20 a 40 %	20 a 50 %	40 a 80 %	50 a 100 %	75 a 100 %	100 %

Figura 9 RADIACIÓN DIRECTA Y DIFUSA PARA DIFERENTES TIPOS DE CIELO. Fuente: Marilyne Andersen, citada por Christoph Reinhart (C. Reinhart, 2012). Formato y traducción modificadas por autora.

Un diseño de iluminación que funcione en condiciones extremas de cielo despejado y cielo nublado, funcionará casi en cualquier condición. Mediante simulaciones lumínicas se puede comprobar el desempeño en ambas condiciones y lograr soluciones más precisas.

## 2.2 Métodos y métricas para el análisis de la luz natural en el espacio construido

Para evaluar el desempeño lumínico de un espacio, es indispensable conocer las unidades de medida de la cantidad y calidad de luz, ya sea natural o artificial. El **flujo luminoso** es la cantidad de energía que una fuente de luz emite por segundo y se mide en lúmenes (lm). Esta energía se disipa en todas las direcciones. Sin embargo, para poder indicar niveles de iluminación como tal dentro de un espacio, se establecen dos conceptos importantes: iluminancia y luminancia.

El concepto de **iluminancia (E)**, se refiere a la cantidad de luz medida sobre un plano de trabajo en un espacio iluminado. La Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norteamérica, IESNA (Illumination Engineering Society of North America, por sus siglas en inglés), define iluminancia como la densidad de flujo luminoso sobre una superficie localizada en un punto y orientada en una dirección en particular, expresada en lúmenes por unidad de área (D. DiLaura et al., 2018). La **superficie o plano de trabajo** es el área horizontal o vertical en el que la mayor parte de las tareas del espacio se realizan. La unidad de medida de la iluminancia según el Sistema Internacional de unidades es lux (lx). Actualmente, esta medida es la más utilizada en los indicadores de desempeño y disponibilidad de luz natural en el interior de un espacio.

Por otra parte, la **luminancia (L)**, se refiere a la cantidad de luz que se refleja desde las superficies hacia un punto de vista específico. La IESNA define luminancia como la medida del poder de emisión de luz que tiene una superficie, en una dirección en particular por unidad de área aparente. Se expresa como la densidad de intensidad luminosa por unidad de área (D. DiLaura et al., 2018). La luminancia es una medida importante en el diseño de iluminación ya que se relaciona directamente con los estímulos de la vista y permite evaluar el confort visual y el deslumbramiento en el interior. La unidad de medida de la luminancia es candela por metro cuadrado (cd/m<sup>2</sup>).

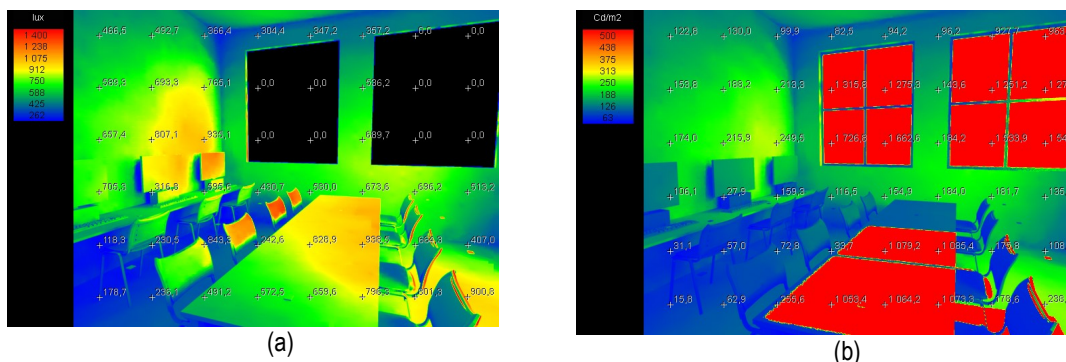


Figura 10 SIMULACIONES DE NIVELES DE ILUMINANCIA (a) y luminancia (b), mediante el software Velux Daylight Visualizer.  
Fuente: Autor

Es importante notar que algunas métricas están consideradas en un punto en el tiempo, es decir son estáticas. Históricamente, las métricas estáticas han sido las más comunes para el análisis de la luz en las edificaciones, ejemplo de este tipo de métricas es el **Factor de Luz Diurna (DF, Daylight Factor en inglés)**. El DF es una métrica de la disponibilidad de luz diurna expresada como un porcentaje de la cantidad de luz disponible en el interior de un aposento (sobre el plano de trabajo) en comparación con la luz disponible en el exterior, sin obstáculos, bajo condiciones de cielo nublado (Hopkins, 1963). En el cálculo se excluye el

efecto de la radiación directa en los niveles de iluminancia interior y exterior al considerar condiciones de cielo nublado. Entre más alto es el DF, es mayor la presencia de luz natural en el espacio. Los aposentos con un DF promedio de 2% o más son naturalmente iluminados, aunque es posible que todavía necesiten luz artificial para desempeñar tareas visuales. Un espacio en donde se considera que la luz eléctrica no será utilizada durante el día, es aquel en el cual el DF promedio es 5% o más (VELUX, n.d.-a).

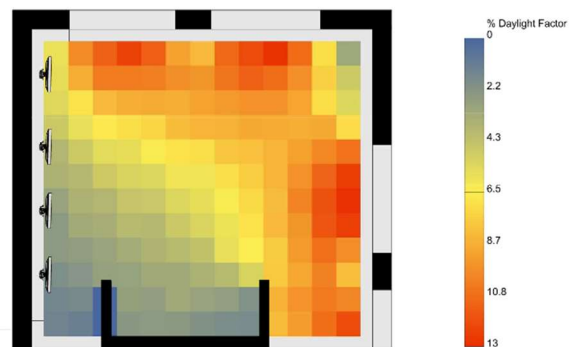


Figura 11 EJEMPLO DE CÁLCULO DE FACTOR DE LUZ DIURNA MEDIANTE SOFTWARE DIVA. Fuente: Autor

Las métricas que consideran la variabilidad en el tiempo son determinantes para la comprensión del comportamiento lumínico. Las **métricas dinámicas**, también llamadas métricas basadas en datos climáticos, son aquellas que como su nombre lo sugiere, se derivan de perfiles de iluminancia anual, es decir, series de tiempo de iluminancias interiores producto del ingreso de luz natural, generadas por un archivo climático del sitio. Esta gran cantidad de datos deben ser convertidos en una métrica intuitiva, para poder ser utilizados en el diseño (C. F. Reinhart & Wienold, 2011). El primer paso en este proceso de conversión es definir en qué momentos del año debe realizarse el análisis, según los patrones de ocupación del espacio. El siguiente paso es decidir cuáles niveles de luz natural son adecuados. Las dos métricas dinámicas más utilizadas son la autonomía de luz natural y la iluminación natural útil.

La **autonomía de luz natural** (*DA*, *Daylight Autonomy* en inglés) fue la primera de una serie de métricas dinámicas anuales, comúnmente conocidas como métricas de disponibilidad de luz natural. Christoph Reinhart la define como una métrica que corresponde al porcentaje del tiempo en el que la iluminancia por luz natural alcanza el nivel deseado en un punto del espacio (C. F. Reinhart & Walkenhorst, 2001). En otras palabras, es el porcentaje de horas del día en el año que un punto en el espacio está sobre un nivel de iluminación específico. El cálculo considera la información climática específica de la localización geográfica

donde se ubica el espacio analizado. El usuario del programa de simulación puede definir una iluminancia meta con la que es calculado la DA. La IESNA establece el valor de 300 luxes y un límite DA de 50%. Esto significa que el 50% del tiempo los niveles de luz natural deben estar sobre 300 luxes.

La **iluminación natural útil** (UDI, *Useful Daylight Illuminances* en inglés) es una métrica dinámica que corresponde al porcentaje del tiempo en ocupación de un espacio en el cual el promedio de las iluminancias meta en un punto es alcanzado por medio de luz natural (VELUX, n.d.-a). A diferencia de la DA, la métrica UDI se basa en rangos de iluminancia: de 0 a 100 luxes, de 100 a 300 (500) luxes, de 300 (500) a 2000 luxes y más de 2000 luxes. Se considera que las iluminancias entre 300 y 2000 luxes son las deseables, y lo que se encuentre fuera de ese rango es inútil. Las investigaciones indican este valor como el límite máximo, ya que más luz puede causar deslumbramiento o sobrecalentamiento del espacio. Se establece que el porcentaje recomendable es de un 80% de las horas de ocupación, con una UDI en el rango de 300-2000 luxes.

El uso de las métricas dinámicas permite evaluar las variaciones en el clima de un lugar. Además, en las certificaciones de eficiencia energética como por ejemplo LEED, utilizan las métricas mencionadas para determinar la efectividad del diseño con luz natural y cuanto beneficia al ahorro energético. Algunas de las herramientas de simulación que actualmente permiten obtener valores de DA y UDI son *Diva-for Rhino*, *Open Studio*, *Radiance*, *Daysim*, *LightStanza* y *Climate Studio*.

### **CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO**

El presente es un estudio que busca determinar si existe correspondencia entre la iluminación medida y simulada en un espacio interior con el fin de verificar la precisión y capacidad de éstos en la predicción de escenarios de luz natural útil. Para ello, se estableció una metodología de trabajo dividida en tres etapas principales:

1. Mediciones de campo: levantamiento físico y fotométrico del sitio de estudio.
2. Simulación digital de luz natural en el espacio de estudio. La evaluación se realiza con dos herramientas: *VELUX Daylight Visualizer* y *DIVA for Rhino*.
3. Resultados y Validación de los programas de simulación: comparación y análisis de los resultados obtenidos mediante las métricas de luz natural definidas en las etapas anteriores.

Sin embargo, antes de la medición de campo y las simulaciones, fue necesario definir el espacio por analizar. A continuación, se hace una descripción del caso de estudio escogido y posteriormente se detallarán las actividades y procedimientos que se llevaron a cabo en cada etapa.

#### **3.1 Descripción del caso de estudio**

El estudio se realizó en el área utilizada durante el año 2019 para el trabajo administrativo y de investigación del Laboratorio de Arquitectura Tropical (LAT) en la Universidad de Costa Rica. El mismo se encuentra ubicado en San Pedro de Montes de Oca, a una latitud de 9°56'N y una longitud de 84° 3'O. El espacio posee una forma muy regular, es casi un cuadrado, de 5.03 metros de ancho por 5.42 metros de largo, con acceso de luz natural en dos de sus fachadas mediante superficies vidriadas: Noreste y Sureste. Es un recinto ubicado en el tercer nivel del edificio, con una altura de piso a cielo de 3.60 metros. Habitualmente es utilizado durante todo el día, desde las 8 de la mañana hasta las 5 de la tarde, tanto por los asistentes que trabajan en el laboratorio, como estudiantes y docentes que utilizan las instalaciones. Durante los fines de semana permanece cerrado.

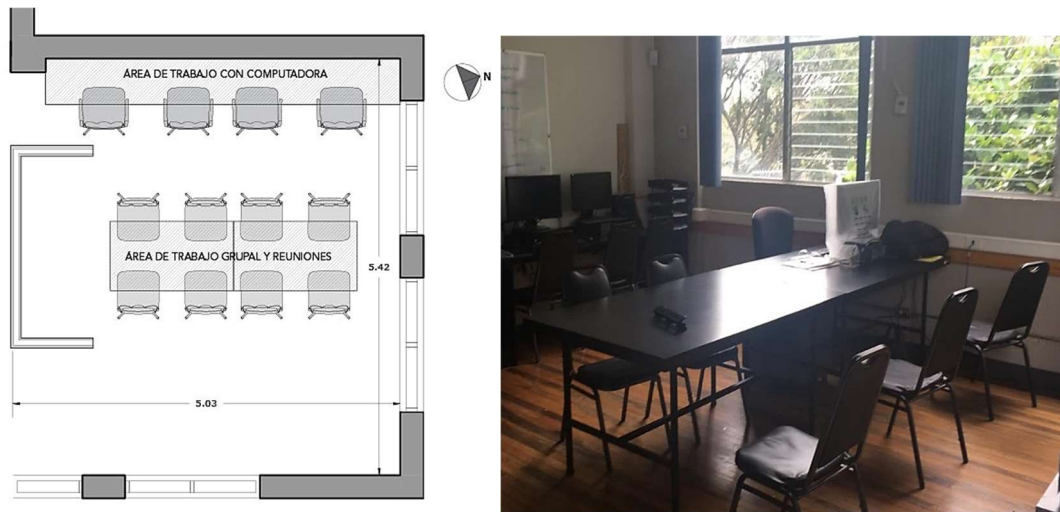


Figura 12 PLANO DE DISTRIBUCIÓN E IMAGEN DEL ÁREA DE TRABAJO ADMINISTRATIVO DEL LABORATORIO DE ARQUITECTURA TROPICAL UCR. Fuente Autora

Se tomaron en cuenta una serie de parámetros favorecedores para el estudio dentro del espacio del LAT, de los cuales se enumeran los siguientes:

- Es posible realizar mediciones durante los momentos en que no hay personas haciendo uso del espacio, para no afectar los sensores (fines de semana).
- Su forma regular permite analizar otros elementos que afectan la distribución de la luz, más allá de la morfología del espacio.
- El mobiliario existente es de un material poco reflectivo y de color negro, lo que permite tener menor afcción de los objetos en los sensores de iluminación.
- Existe una estación meteorológica cercana en el campus, con datos de radiación global horizontal, que pueden utilizarse para determinar la condición de cielo durante los días de medición.
- Tiene acceso de la luz natural y la posibilidad de desinstalar las persianas existentes para realizar las mediciones.

El levantamiento de las características físicas (materialidad, color) fue la información base para iniciar con las etapas de medición y simulación (*input data*). Se adjunta un diagrama que resume el proceso metodológico (ver figura 13).

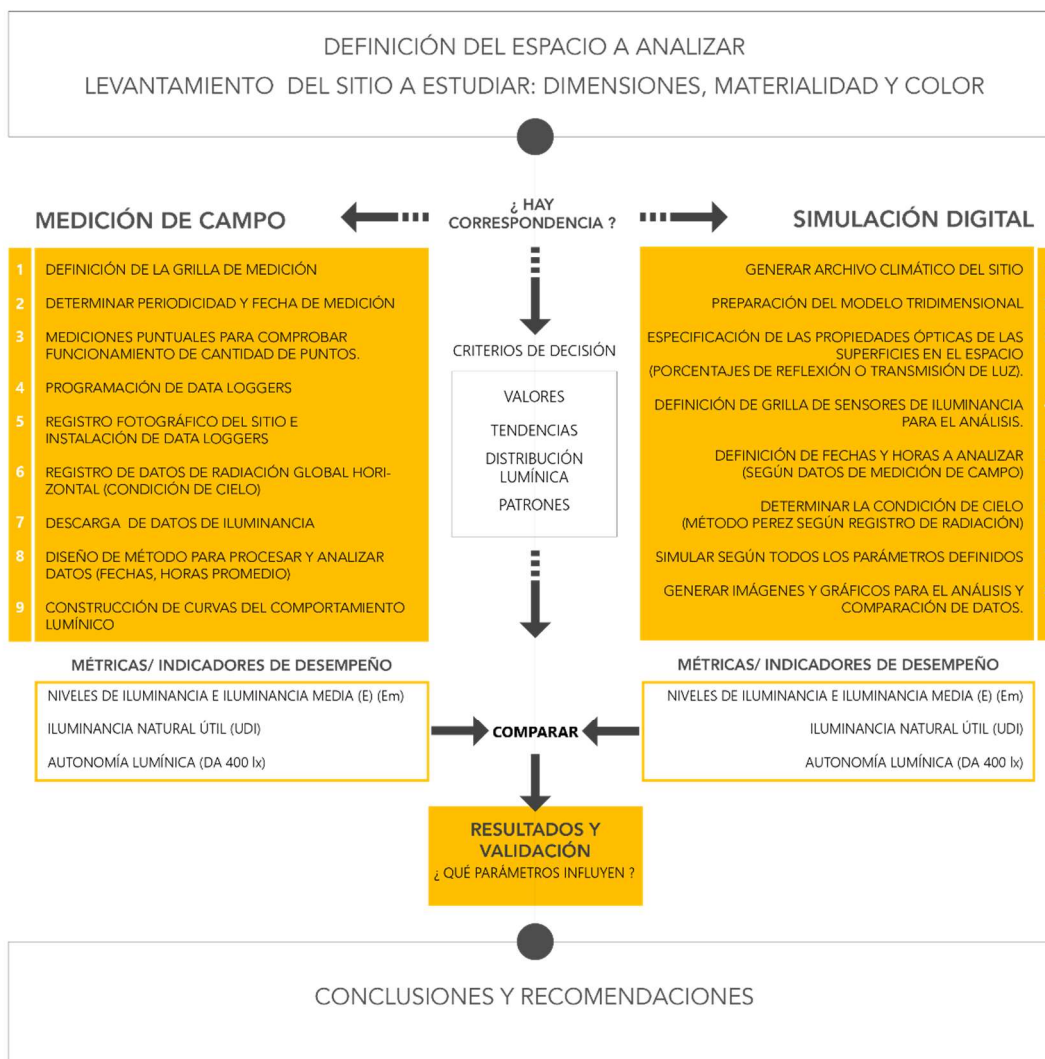


Figura 13 DIAGRAMA METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN. Fuente: Autora

### 3.2 Medición de Campo

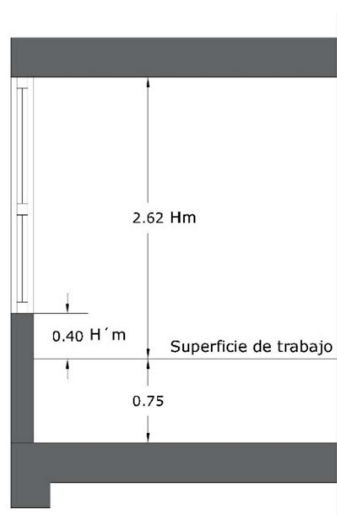
La primera etapa corresponde a la medición de los niveles de iluminancia en el ambiente real. Para ello, se define la densidad de puntos necesarios según las dimensiones del espacio y tomando en consideración que el parámetro a medir es la luz natural, ya que el rango de variabilidad de la iluminancia es más alto y va a depender de la época del año, la hora del día y la orientación de las aberturas del espacio.

### 3.2.1 Definición de retícula para medición

La cantidad de puntos fue determinada según el método de medición establecido en la Norma Técnica brasileña NBR15215-4, denominada "Iluminación natural - Parte 4: Verificación experimental de las condiciones de iluminación interna de edificaciones" (ABNT & NBR 15.215-4, 2005). En la misma, se establece que para determinar el número de puntos necesarios para la verificación del nivel de iluminación natural con un error inferior al 10%, se debe determinar el índice del local (K) mediante la ecuación:  $K = \frac{C \cdot L}{Hm \cdot (C+L)}$ , donde L es el ancho del espacio, C es la longitud y Hm es la distancia vertical, entre la superficie de trabajo y la parte superior de la ventana. Todas las distancias deben indicarse en metros. Una vez que se determina el índice K, se utiliza la tabla 2 de la norma para determinar la cantidad mínima de puntos.

K	Número de puntos
$K < 1$	9
$1 \leq K < 2$	16
$2 \leq K < 3$	25
$K \geq 3$	36

Tabla 1 ÍNDICE K PARA DETERMINAR LA CANTIDAD MÍNIMA DE PUNTOS DE MEDICIÓN. Norma Técnica brasileña NBR15215-4. Fuente CISBE (1984)



$$K = \frac{5.42 \cdot 5.05}{2.62 \cdot (5.42 + 5.05)}$$

$$K = 0.99$$

**Cantidad de puntos: 9**

Figura 14 DETERMINACIÓN DE LA HM Y EL ÍNDICE DE LOCAL K EN EL SITIO DE ESTUDIO. Fuente: Autora

Este índice caracteriza un número mínimo de puntos a ser medidos. No obstante, estos pueden ser aumentados para que se consiga simetría en las mediciones y siempre que se desee una mejor

caracterización de la iluminación del ambiente. Se debe planificar la malla evitando puntos muy próximos a las paredes. Para esto, la norma recomienda un alejamiento mínimo de 0.5 metros. El ambiente interno debe ser dividido en áreas iguales, con formato próximo o igual a un cuadrado. La iluminancia  $E$  es medida en el centro de cada área, como se muestra en la figura 15 (puntos rojos).

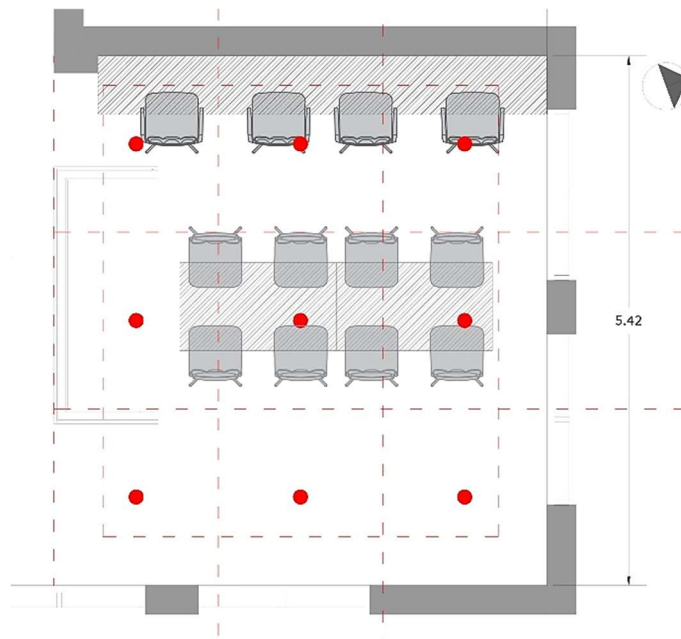


Figura 15 DEFINICIÓN DE MALLA DE 9 PUNTOS DE MEDICIÓN, según Norma Técnica NBR15215-4. Fuente: autora

Después de trazar la malla de medición de 9 puntos, se consideró que la cantidad es insuficiente para la evaluación de este espacio por la disposición del mobiliario y de las ventanas existentes, entonces se aumenta el número de puntos para caracterizar adecuadamente el plano de trabajo. Se genera una segunda propuesta de malla, conformada por un total de 24 puntos de medición, los cuales abarcan el área de trabajo con computadora y el área de reuniones. Se sigue respetando la separación de las paredes y la división del espacio interno en áreas iguales donde se colocaron los puntos para medir las iluminancias. Sobre la mesa de reuniones, se generaron 3 puntos auxiliares, para obtener una curva de comportamiento lumínico más precisa en el centro del espacio. La distancia aproximada entre los puntos es de 1 m de forma horizontal. En cuanto al plano vertical, todos los puntos se ubican a una altura de 0.8 m sobre el nivel de piso terminado.

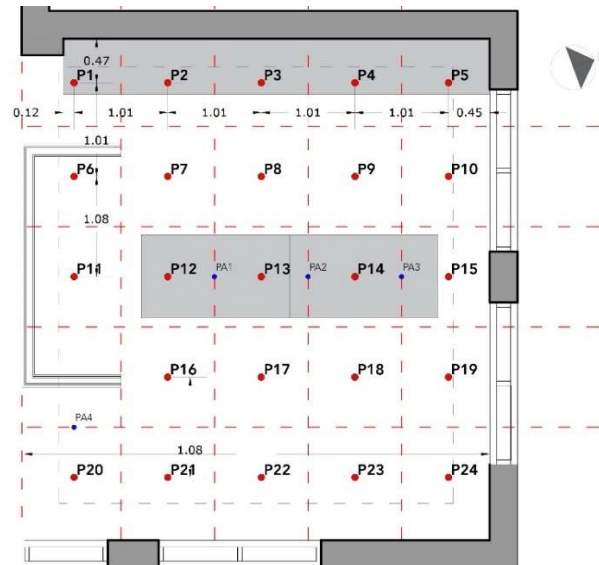


Figura 16 MALLA DE 24 PUNTOS UTILIZADA PARA LA MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN EL LAT. Fuente: autora

Una vez definida la distribución de puntos, se trazó en el laboratorio por medio de marcadores adhesivos, respetando la distancia entre cada punto. En los lugares donde se ubican las mesas de trabajo, éstas se utilizaron como base para sostener los equipos; sin embargo, una gran cantidad de puntos están en espacio abierto, por lo que se diseñó una base para soportar los instrumentos y que éstos mantuvieran su posición horizontal y se colocaron sobre pedestales, todos a la misma altura. También se determinó la fecha de medición de las tomas puntuales.

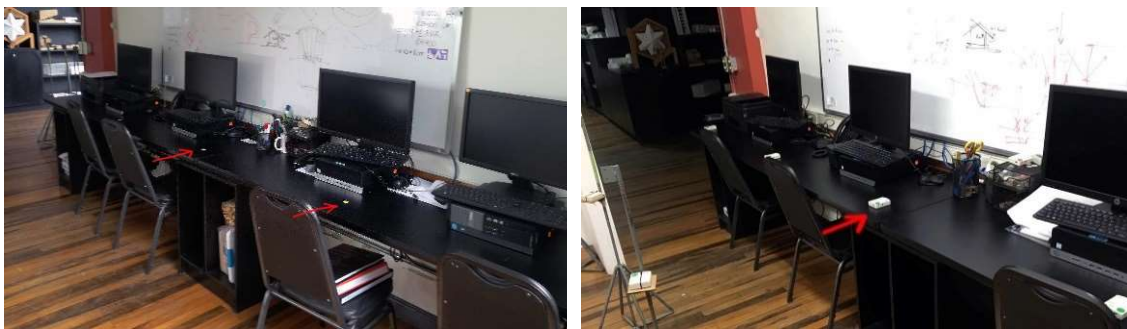


Figura 17 TRAZO DE RETÍCULA DE MEDICIÓN EN EL LAT. Fuente: Autora

### 3.2.2 Toma de datos de medición puntual

La toma de datos puntuales se realizó por medio de un luxómetro, instrumento de precisión para la medición de iluminancia que consiste en una célula fotoeléctrica que capta la luz y la convierte en impulsos eléctricos, los cuales son representados en la interfase en lux. En este caso, se utilizó un luxómetro digital marca Extech, modelo HD 400, el cual permite un rango de medición hasta los 400 Klux con una precisión del 5%, según la ficha técnica del fabricante (ver figura 18). El luxómetro se debe encender al menos 5 minutos antes de la primera lectura, evitando exposición a fuentes de luz intensas. Se coloca la célula sobre el plano en el cual se quiere medir la iluminancia y en función de la retícula trazada, se realizan las medidas determinadas.

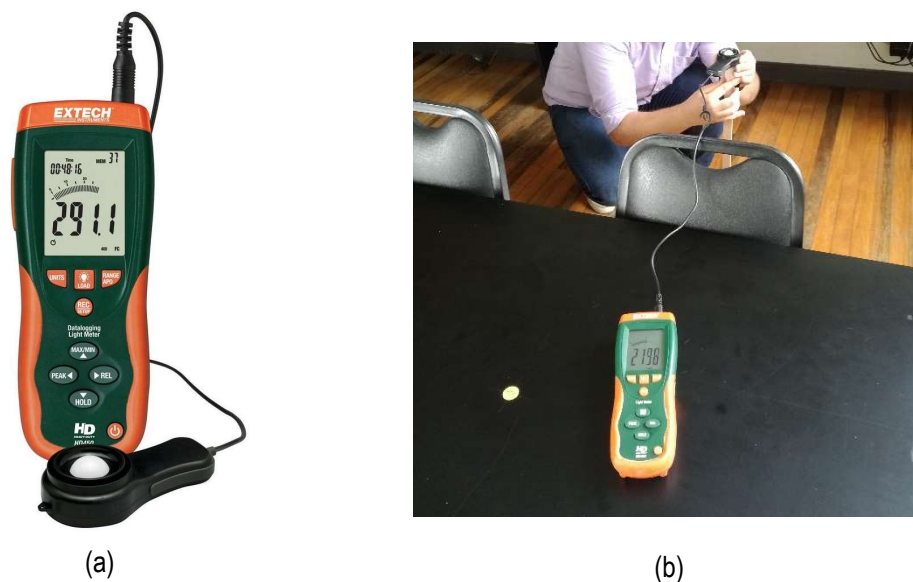



Figura 18 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN EN SITIO. (a) Luxómetro marca Extech model HD400. (b) Toma de medidas puntuales en LAT, con apoyo del estudiante José Daniel Chaves. Fuente: Autora

Estas medidas se realizaron previamente a instalar los *dataloggers*, ya que era importante comprobar que la densidad de puntos fuera la correcta. Se diseñó una ficha de medición en Excel para el registro de los datos puntuales (ver figura 19), en donde se indica el día de medición, la hora de inicio y final, una descripción de la condición de cielo junto con una imagen del mismo y los valores de iluminancia punto a punto. También se calcula la iluminancia media ( $E_m$ ), el factor de luz día (DF) y la autonomía de luz natural (DA) para cada uno de los días. Se definió una escala de color para identificar el nivel de iluminancia en cada punto dentro del espacio e identificar si existen patrones de comportamiento específicos para la época

y hora analizadas. Se registran valores para dos horas, 9 de la mañana y 3 de la tarde. Las mediciones puntuales se realizaron durante una semana laboral (del lunes 5 al viernes 9 de noviembre 2018).

Sitio de medición:	Laboratorio de Arquitectura Tropical UCR
Fecha:	5 de noviembre del 2018
Hora inicio:	8:58 a.m.
Hora finalización:	9:18 a.m.
Condición de cielo al inicio:	Parcialmente nublado
Condición de cielo al final:	Nublado



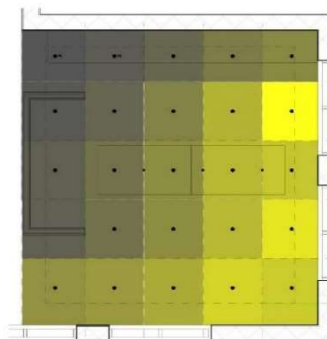
Condición de cielo ventana 1



Condición de cielo ventana 2

#### REGISTRO DE MEDICIONES

P1	P2	P3	P4	P5
240	390	603	1017	1249
P6	P7	P8	P9	P10
310	560	1140	2120	3560
P11	P12	P13	P14	P15
442	802	1345	2188	2447
	P16	P17	P18	P19
	1030	1424	2283	3078
P20	P21	P22	P23	P24
1424	1592	1905	2720	2560



#### PUNTOS AUXILIARES

P1'	P2'	P3'
1085	1730	2715

#### PROMEDIOS Y FACTORES

Eo:	9015	lux
Ei:	1517,9	lux

Factor de luz día	0,17
Autonomía 400 lux	92%

#### NIVELES DE ILUMINANCIA LINEA CENTRAL

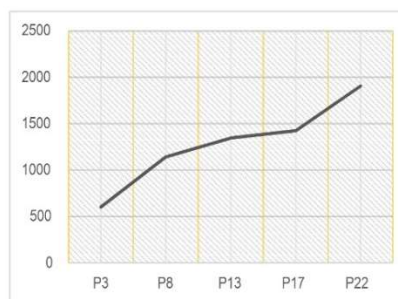


Figura 19 FICHA DE REGISTRO DE MEDICIONES PUNTUALES. Fuente: autora

Durante esta etapa inicial, se comprobó que la densidad de la grilla permite identificar tendencias del comportamiento lumínico en el espacio según la ubicación de las aberturas y los planos de trabajo. También se determinó que la frecuencia del registro de datos debía aumentar, ya que la iluminación cambia en un tiempo corto debido al movimiento solar. Por último, se definió el comportamiento de la línea central que se ubica sobre las mesas de reunión, la cual se utilizará para determinar si se mantiene una tendencia de aumento de iluminancia desde el punto 3 al punto 22, la cual sí se mantuvo durante los 5 días de medición, en la mañana y en la tarde.

### 3.2.3 Toma de datos de medición prolongada

Una vez que los criterios de medición fueron validados, se procede a colocar los registradores de datos de forma tal que la fotocelda coincida exactamente con el punto de medición y que ningún elemento interfiera o genere sombra sobre la misma. La posición donde se coloca el sensor en relación con la fuente de luz principal es esencial para obtener los resultados correctos. El equipo utilizado para medir los niveles de iluminación natural fue el registrador de datos marca Hoboware, modelo U12, el cual registra datos de temperatura, humedad relativa e iluminancia en lux (ver figura 20).



*Figura 20 REGISTRADOR DE DATOS UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN. Marca Hoboware. Fuente: autora*

Debido a la variabilidad en la iluminancia por luz natural, los valores deben ser verificados a diferentes horas del día y si es posible en diferentes épocas del año. En esta investigación, se utilizó solamente una época del año por la naturaleza del estudio y también por la disposición del espacio, ya que cuando estuvieron instalados los pedestales no era posible utilizarlo. El período representativo más cercano a las mediciones

realizadas es el solsticio de invierno. Para futuros estudios, se recomienda realizarlo en épocas críticas: solsticios y equinoccios.

La programación de los *dataloggers* se realiza por medio del programa *Hoboware*, donde se establece que el equipo guarde la información de iluminancia cada 10 minutos para obtener curvas de 6 valores por cada hora. Se programan 27 registradores en total y se define que todos inicien mediciones a la misma hora (5:00 am del 24 de noviembre), ya que se tienen registros de horas completas, lo cual facilita la construcción de la matriz de mediciones y los promedios de comportamiento por hora. Una vez programados, se colocan en la grilla trazada previamente en el sitio. Para la fecha de instalación, ya el espacio no es visitado por estudiantes ni docentes, por lo que se asegura que las mediciones sean únicamente de luz natural y que no haya personas caminando que puedan obstruir las medidas que toman los registradores. La luz artificial permanece apagada durante todo el proceso.

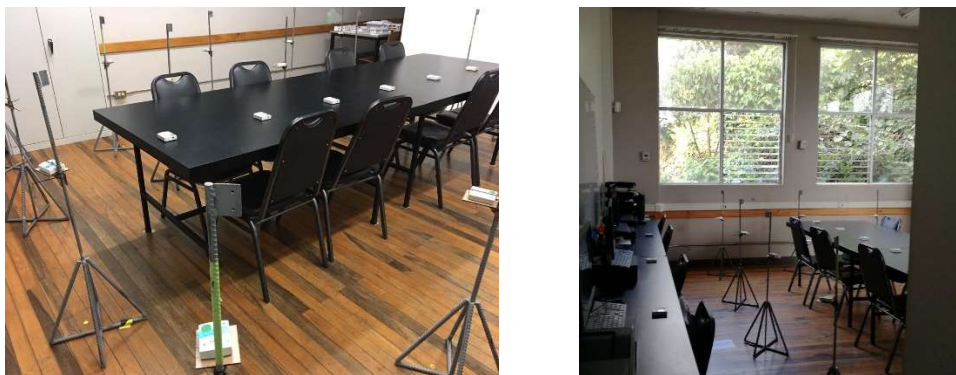


Figura 21 TRAZO DE GRILLA DE MEDICIÓN EN SITIO DE ANÁLISIS. Fuente: autora

Durante los días de medición, se obtuvieron los registros horarios de radiación global horizontal de la estación meteorológica del CIGEFI, datos que nos permiten conocer la condición de cielo para cada hora de medición. Se registraron datos durante 8 días, para un total de 580 registros por punto y 15660 valores en total. Una vez terminado el registro, se desinstalan los aparatos y se descargan los datos de iluminancia. El orden al hacer la descarga es muy importante, ya que es necesario saber a cuál punto corresponde cada registrador, para posteriormente diseñar un método para analizar los resultados y las curvas de comportamiento lumínico.

### 3.2.4 Matriz para análisis de datos y construcción de curvas de comportamiento lumínico

El objetivo final de las mediciones es encontrar un sistema para comparar los niveles de iluminancia medidos con los que se simula en computadora. Por esta razón, se busca un método que permita generar promedios horarios de iluminancia por punto (E), así como calcular la iluminancia media (Em) y la autonomía lumínica con un parámetro de 400lx como mínimo (DA 400lx), según la vocación de uso del espacio.

Se genera una primera matriz con los valores de los 24 puntos de medición y los 3 puntos auxiliares en una sola hoja de cálculo y posteriormente se aplica una tabla dinámica para generar los promedios horarios y las curvas de iluminancia por día.

FECHA	HORA+MIN	DÍA	HORA	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P01'	...	P22	P23	P24
24/11	5:10 AM	1	5	E	E	E	E	E	E	E	E	→	E	E	E
24/11	5:20 AM	1	5	E	E	E	E	E	E	E	E	→	E	E	E
24/11	5:30 AM	1	5	E	E	E	E	E	E	E	E	→	E	E	E
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Tabla II EJEMPLO DE MATRIZ PARA UNIFICAR LOS VALORES DE ILUMINANCIA DE TODOS LOS PUNTOS. Fuente autora

En un primer análisis, se estudian las curvas de distribución lumínica en el espacio, determinando puntos de mayor iluminancia y menor iluminancia durante las horas del día. Las tendencias identificadas y los patrones de distribución, son los criterios que permitirán comparar resultados y determinar si la simulación digital tiene correspondencia con el comportamiento real. Por ejemplo, en la figura 22 se puede observar que la iluminancia aumenta significativamente a las 10 de la mañana sobre uno de los ejes horizontales de la grilla definida.

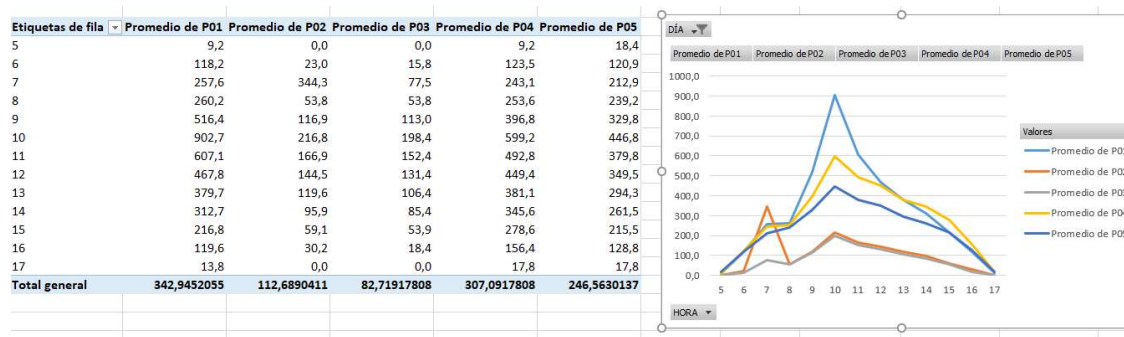


Figura 22 EJEMPLO DE TABLA Y GRÁFICO DINÁMICO EN EXCEL, con valores de comportamiento lumínico en eje longitudinal del sitio. Fuente: autora

En un segundo análisis, se agrega una columna para calcular el valor DA a 400 lx, y se da un color verde si más del 75% del día se obtienen valores superiores y rojo si no se obtienen. Además, se vincula a un gráfico con 5 ejes verticales y horizontales que corresponden a la grilla de medición definida en sitio, para poder ubicar visualmente el patrón de comportamiento lumínico en cada punto, como se genera en los programas de simulación de iluminación (ver figura 23).

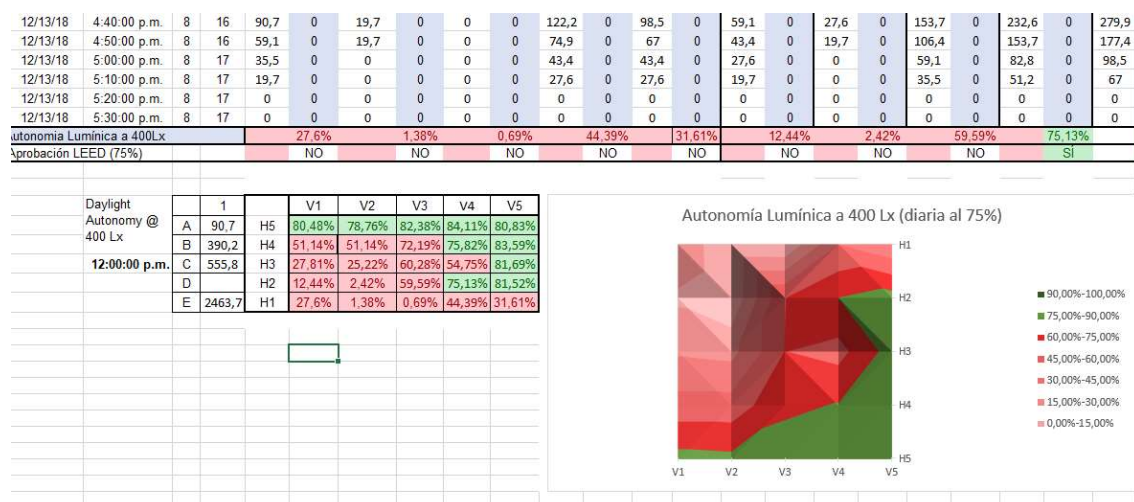


Figura 23 EJEMPLO DE TABLA Y GRÁFICO DINÁMICO GENERADO EN EXCEL, CON CÁLCULO DE AUTONOMÍA LUMÍNICA. Fuente: Autora

En un tercer y último análisis, se trata de aproximar un gráfico de curvas isolux con los datos de la tabla, para determinar un último índice que es el UDI (300-2000 lx), para identificar cuáles zonas del sitio de estudio tienen iluminación natural útil. La escala de colores falsos utilizada para realizar el gráfico busca asemejar la escala de color que generan normalmente los programas de simulación de iluminación (azul para las zonas más oscuras y rojo para las más iluminadas, ver figura 24).

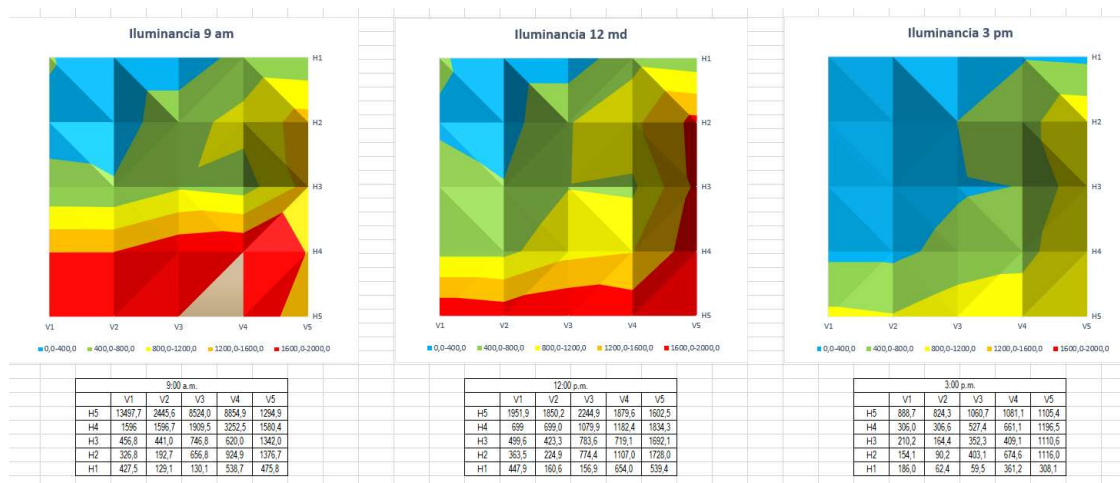


Figura 24 EJEMPLO DE TABLA Y GRÁFICO DINÁMICO EN EXCEL, CON CÁLCULO DE ILUMINANCIA NATURAL ÚTIL (UDI). Fuente: Autora

Una vez diseñado el método de sistematización gráfica de la información, se procede a realizar la simulación digital del escenario medido.

### 3.3 Simulación digital de la luz natural en el espacio de estudio

#### 3.3.1 Generación de archivo climático

La evaluación se realizó con dos herramientas de simulación lumínica que, como se menciona en el capítulo 2, tienen características distintas entre sí: *VELUX Daylight Visualizer* y *DIVA for Rhino*. El tipo de simulación que realiza VELUX es estática, lo que significa que para generar resultados requiere la posición del sol en el sitio de estudio según una época específica (azimut y altura solar según la latitud, el día y la hora del análisis). Por el contrario, DIVA realiza simulaciones estáticas y dinámicas, lo que implica la creación de un archivo climático que contenga datos promedio de múltiples parámetros: temperatura, humedad, radiación, viento, entre otros.

El archivo climático se generó mediante el programa *Meteonorm* versión 7.1, en donde se utilizó una imagen tomada en una de las ventanas del laboratorio, para determinar con mayor precisión el horizonte local y la situación de sombreado que existe en el lugar (producto de los árboles y edificios circundantes). De esta forma, la exposición a la luz solar en el análisis debe ser más precisa.

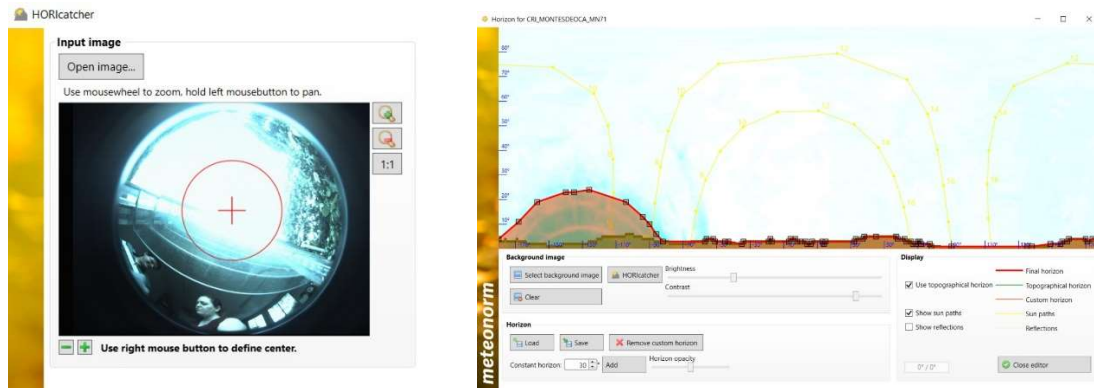


Figura 25 HORIZONTE LOCAL EN ARCHIVO CLIMÁTICO. Uso de la herramienta Horicatcher para precisar el horizontal local en el archivo climático generado en Meteonorm. Fuente: autora con supervisión del Arq. Sebastián Orozco.

Otro punto importante a mencionar es que se solicitaron los datos de temperatura y radiación de una estación meteorológica cercana al sitio para identificar la condición de cielo de los días analizados. La información fue extraída de la estación meteorológica CIGEFI-ALE-Campbell, ubicada en CIGEFI, Ciudad de la Investigación, período 01 de noviembre 00:00 hasta 12 de diciembre 12:00 del 2018.

### 3.3.2 Preparación del modelo tridimensional

Una vez definidas las condiciones de contorno de la simulación, se debe prepara un modelo tridimensional del sitio a estudiar, con toda la información para determinar el desempeño lumínico: las formas de las superficies de cerramiento, la ubicación del mobiliario, la materialidad y los colores de todos los planos, con su respectivo valor LRV (reflectancia de la luz) y la orientación de la edificación. Este será el prototipo digital del espacio. En el caso del laboratorio, se realizaron dos modelos, uno para cada programa ya que requieren características de modelado distintas.

#### 3.3.2.1. Prototipo digital para VELUX

El modelo se generó en el programa sketch up, identificando cada material con un color y capa distinta, para poder asignar el valor de reflectancia específico. En los modelos para simulación de iluminación, lo más importante es establecer las superficies que interactúen con la luz y sus propiedades, así como la correcta orientación del espacio a analizar, ya que ambas cosas pueden cambiar drásticamente los resultados.

Otro punto importante a mencionar, es que en *VELUX* no es posible detallar la cantidad de puntos a analizar ni tampoco ubicarlos de forma específica, por lo que se modelaron pequeños puntos para determinar los valores específicos en cada uno. Es importante indicar que se les asignó el color negro, que no da reflectancia de ningún tipo para que no influyera en los resultados.

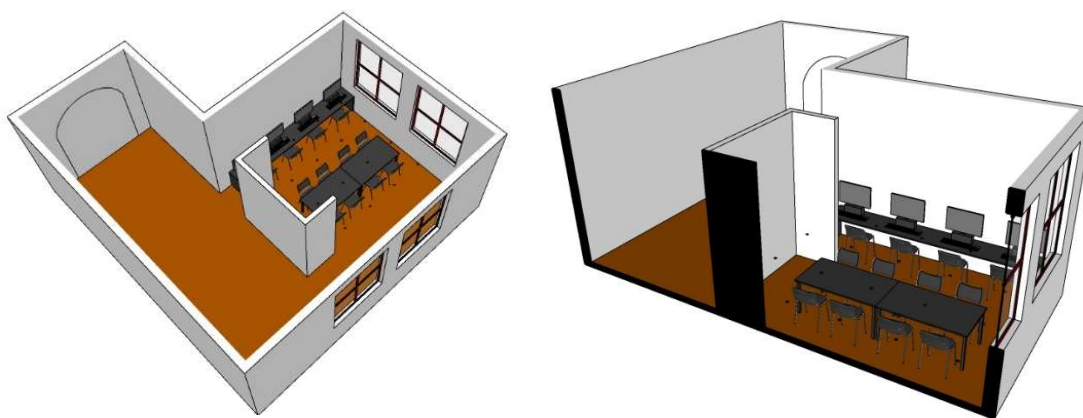


Figura 26 IMÁGENES DEL MODELO EN SKETCH UP, CON MATERIALIDAD. Fuente: Autora

Una vez terminado el modelo, se importa a *VELUX* y se le dan las características de materialidad según una base de datos de reflectancia, rugosidad, transmitancia y brillo. Las características asignadas a cada superficie se pueden ver en la tabla adjunta.





	<b>PINTURA BLANCA MATE (PAREDES)</b>	Reflectancia: 0,84 Rugosidad: 0,03 Brillo: 0,00
	<b>ALUMINIO (MARCOS DE VENTANA)</b>	Reflectancia: 0,94 Rugosidad: 0,10
	<b>MADERA (PISO)</b>	Reflectancia: 0,84 Rugosidad: 0,03 Brillo: 0,15
	<b>MELAMINA NEGRA MATE (MOBILIARIO)</b>	Reflectancia: 0,05 Rugosidad: 0,03 Brillo: 0,00
	<b>VIDRIO (ACRISTALAMIENTO DE VENTANA)</b>	Transmitancia térmica: 0,88

Tabla III ASIGNACIÓN DE MATERIALIDAD DE SUPERFICIES E INTERACCIONES CON LA LUZ. Fuente: Autora

### 3.3.2.2. Prototipo digital para DIVA

La plataforma *DIVA* funciona con geometría generada en el software *Rhinceros 3D*. El modelo se separó en capas según la materialidad de los objetos y superficies. Esta separación es muy importante, ya que las propiedades ópticas se asignan a cada capa. En este caso, el programa cuenta con una base de datos muy amplia que se relaciona al motor de cálculo *Radiance*, para lograr resultados precisos según la interacción con la luz o con la temperatura. Es por esta razón, que se debe escoger el material en una base de datos distinta según el caso, si es un análisis térmico o de iluminación natural (*Daylighting Materials*).

En el menú de opciones, automáticamente aparecen las capas modeladas en *Rhinceros* y cada material por escoger, indica en su nombre el porcentaje de reflectancia, a excepción de las superficies translúcidas, que indican su transmisividad.



Figura 27 PROTOTIPO DIGITAL PARA DIVA, DIVIDIDO POR CAPAS SEGÚN MATERIALIDAD. Fuente: Autora

A diferencia de *VELUX*, *DIVA* permite al usuario generar análisis de iluminancia basados en una grilla de cálculo, que admite tener puntos controlados para mantener la calidad de los resultados. En este caso, se definió una densidad que tuviera correlación con la malla definida para las mediciones in situ, no obstante, con un mayor número de datos, ya que el programa lo permite y da mayor precisión. El total de puntos definidos fueron 156 (ver figura 28).

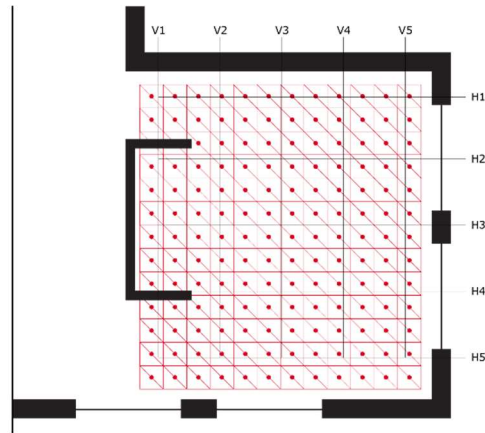


Figura 28 MALLA DE 156 PUNTOS GENERADA EN EL PROGRAMA DIVA PARA LAS SIMULACIONES EN EL LAT. Fuente: autora

### 3.3.3 Definición de condiciones de simulación

Las condiciones de contorno en una simulación energética tienen un papel esencial ya que determinan en gran medida los resultados. Estas condiciones van a restringir el comportamiento del entorno inmediato y por ende los cálculos que se generen. Una vez que se obtienen resultados iniciales, se va calibrando según el desempeño observado. Para los dos programas utilizados se definen los siguientes parámetros: latitud, longitud, orientación, fecha y hora a simular, condición de cielo.

#### 3.3.3.1. Condiciones de simulación en VELUX Daylight Visualizer

Antes de iniciar con las simulaciones, es necesario tener el prototipo digital completo, con la orientación correcta (indicación acertada del norte) y todos los materiales y colores asignados, con sus propiedades ópticas. En el caso del Laboratorio, se ubicó el modelo en la altura correcta (nivel 3). Sin embargo, en el exterior no se agregó ningún elemento que obstruyera el ingreso de la luz natural.

Las simulaciones se efectuaron durante el mes de noviembre para poder realizar la comparativa con las mediciones prolongadas. Se escogieron tres horas distintas para analizar el comportamiento durante la mañana y la tarde (9 a.m., 12 p.m., 3 p.m.), en especial porque la orientación de las aberturas tiene un componente este y se espera mucha variabilidad lumínica durante el día.

Con respecto a la condición de cielo, se hicieron pruebas de desempeño con 3 condiciones de cielo: cielo despejado, cielo parcialmente nublado, cielo nublado. Se realizan cálculos de iluminancia y luminancia, manteniendo una misma escala de color para todas las simulaciones, ya que esto permite comparar correctamente. Se almacenan imágenes de distintos resultados para poder determinar en el proceso de validación, cuál es la condición de cielo que más se asemeja a la que existió en los días de las mediciones. Costa Rica es un país con una nubosidad muy variable, por lo que, en un mismo día, se pueden tener distintas condiciones de cielo.

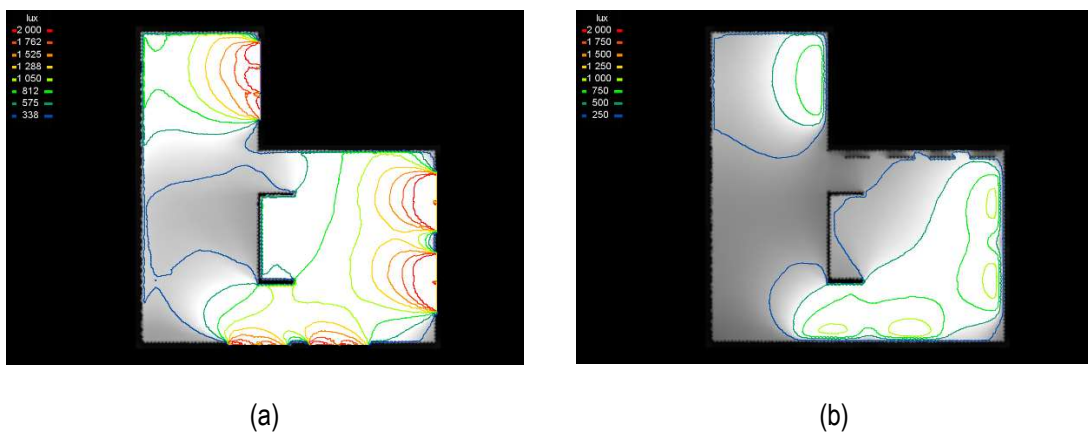


Figura 29 SIMULACIÓN DE NIVELES DE ILUMINANCIA EN EL SOFTWARE VELUX DAYLIGHT VISUALIZER. (a) Iluminancia en diciembre 9am, cielo despejado. (b) Iluminancia en diciembre 9am, cielo nublado. Escala de 300 a 2000 lx. Fuente: Autora

### 3.3.3.2. Condiciones de simulación en Diva for Rhino

Para verificar el correcto funcionamiento del prototipo digital, se recomienda revisar que todos los grosores de pared, particiones, cielos, mobiliario y marco de ventanas son correctos. Con respecto a las superficies translúcidas (que transmiten luz al interior), es importante asegurar que solo tengan una capa y no estén repetidas y que se modelen como planos insertados en la pared y no sobrepuestos. Por último, tomar en consideración cualquier obstrucción adyacente a la escena por analizar (edificios, árboles, etc.).

En el caso de los programas que permiten la simulación dinámica, es importante contar con datos climáticos confiables y determinar las métricas de rendimiento lumínico a utilizar para comparar los resultados. En este caso, se utilizó el archivo climático generado anteriormente y se calculó iluminancia estática (E) y autonomía lumínica (DA). Los cálculos estáticos se realizaron en las mismas fechas y horas establecidas.

Antes de iniciar el cálculo, todas las capas deben estar activas, incluyendo la del cielo raso; de lo contrario, el programa pensará que la luz ingresa por la parte superior. La resolución de puntos de medición en el plano de trabajo se definió en 50 cm x 50 cm como mínimo y se colocan a 0.85 m sobre el nivel de piso. Es necesario verificar que la orientación de los sensores de medición esté correcta. Por último, se debe seleccionar la condición de cielo, calculada con el método Pérez, en donde el usuario debe introducir un dato horario de radiación ( $W/m^2$ ) para determinar el porcentaje de nubosidad. Para ello, se tomó la información de la estación meteorológica del CIGEFI, la más cercana al sitio de análisis.

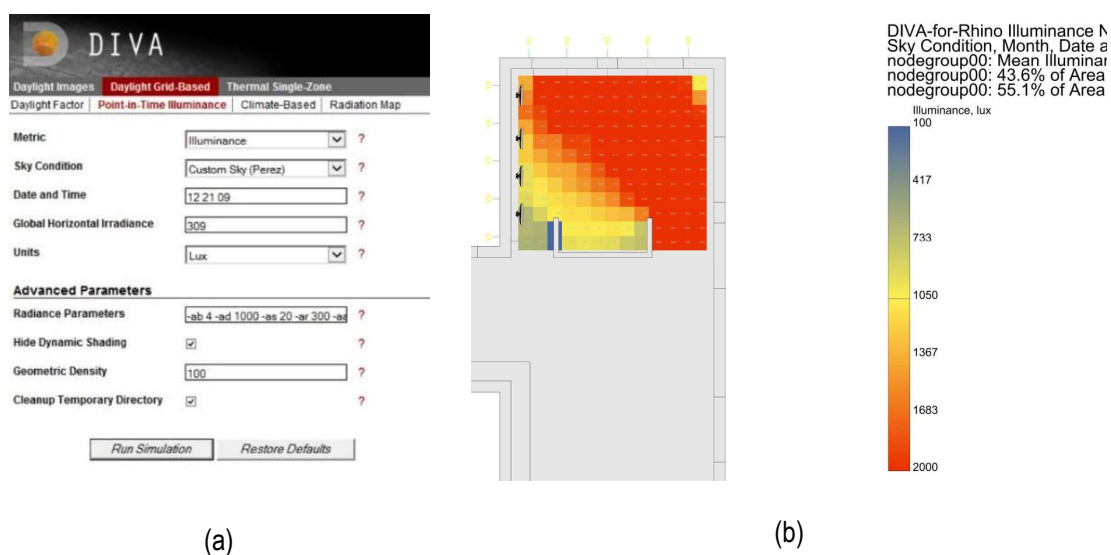


Figura 30 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DE ILUMINANCIA EN DIVA. (a) Simulación según el modelo Pérez, con valor de radiación global horizontal. (b) Iluminancia en diciembre a las 12 m.d., cielo despejado. Escala de 100 a 2000 lx. Fuente: Autora

Para esta investigación, fue sustancial implementar el método Pérez, disponible exclusivamente en la segunda herramienta de simulación, ya que incide en los resultados obtenidos. Las condiciones de cielo cambian mucho en Costa Rica, aspecto a considerar al hacer estudios en esta región. Los resultados pueden variar según el tipo de cielo y por ende se requieren análisis múltiples: cielo totalmente nublado, parcialmente nublado o despejado.

### 3.4 Gráficas y métricas de desempeño

Para poder determinar la correspondencia entre los distintos métodos de simulación y las mediciones in situ, se delimitaron métricas de desempeño lumínico que permitieran comparar resultados y así poder validar los gráficos obtenidos y la calidad de la iluminación natural en el espacio. La definición de la retícula de medición

fue un parámetro importante para poder comparar los resultados, ya que en cada punto se mide el valor de iluminancia. No obstante, el método no busca que el valor sea igual, sino analizar las tendencias y patrones de comportamiento en la distribución lumínica, tomando como premisa las mismas condiciones espaciales, tipo de cielo, hora y día del año en cada análisis.

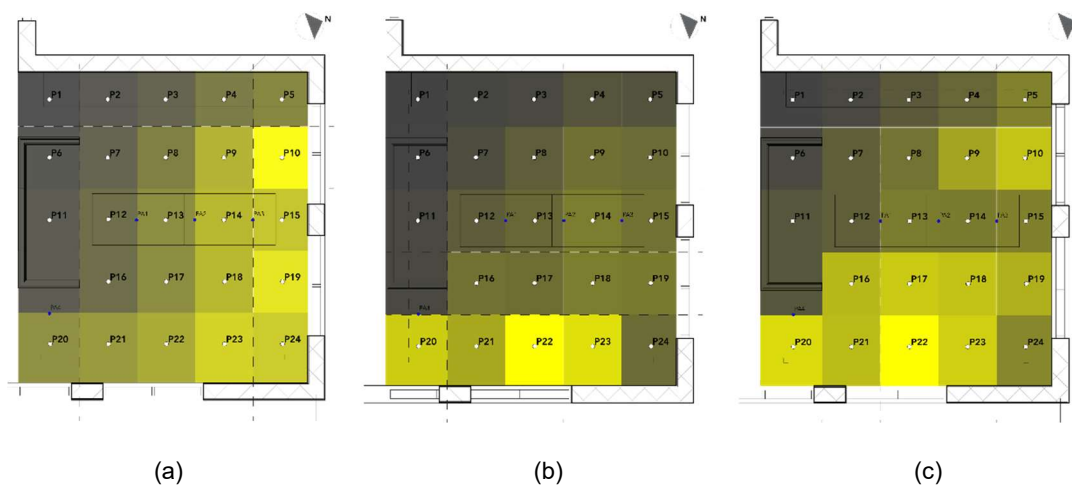


Figura 31 RESULTADOS DE MEDICIONES IN SITU 9:00 AM. Ejemplo de 3 días distintos y su tendencia (a) 5 de noviembre (b) 6 de noviembre (c) 12 de noviembre. El amarillo responde a la mayor iluminancia y el gris a la menor. Fuente: Autora

Las mediciones puntuales y prolongadas permitieron tener una idea general de cómo deben lucir los resultados observados: Iluminancia media en distintos momentos del día, segmentos con niveles máximos y mínimos. Mediante la matriz de análisis desarrollada, se logran establecer curvas de comportamiento lumínico según el rango definido para cada indicador.

Finalmente, para comparar los resultados obtenidos mediante las mediciones prolongadas y las simulaciones, se aplican las métricas de desempeño lumínico explicadas en el marco teórico: iluminancia media ( $E_m$ ), Iluminancia natural útil (UDI) y autonomía lumínica (DA). Para la evaluación de estos indicadores, se utilizaron los rangos que se presentan en la Tabla IV.

<b>Indicadores</b>	<b>Siglas</b>	<b>Rangos</b>
Iluminancia promedio	Em	El manual de la IESNA (D. L. DiLaura et al., 2011) establece valores de iluminancia media según el uso del espacio. En este caso se requieren los siguientes valores:  Pizarras                    300 – 400 lux Lectura y escritura    500 lux Zona de impresión      300 lux  Rango definido entre 300-500 lx
Iluminancia natural útil	UDI	Se basa en rangos de iluminancia, donde los valores entre 300 y 2000 lux son deseables, fuera de este rango es inútil.
Autonomía lumínica	DA	La IESNA recomienda DA <sub>300</sub> 50%, es decir que los espacios deben permanecer al menos el 50% del tiempo por encima de los 300 lux.

*Tabla IV INDICADORES PARA MEDIR EL NIVEL Y CALIDAD DE LA ILUMINANCIA. Fuente: Autora*

Si los valores medidos y simulados en el espacio interior se encuentran entre estos tres rangos, significa que se logra un nivel de iluminación natural efectiva y útil, beneficiando el confort lumínico, visual y el ahorro energético.

## Capítulo 4 Resultados y Validación

El registro de valores puntuales se realizó durante 5 días en el mes de noviembre. Se tuvieron las tres condiciones de cielo: despejado, parcialmente nublado y nublado. Los resultados obtenidos muestran que la frecuencia de registro prolongado debe ser mayor a dos horas por día, para comprender mejor la variabilidad de la luz natural en el plano. Se comprueba que la densidad de puntos funciona correctamente para identificar patrones y tendencias de comportamiento lumínico.

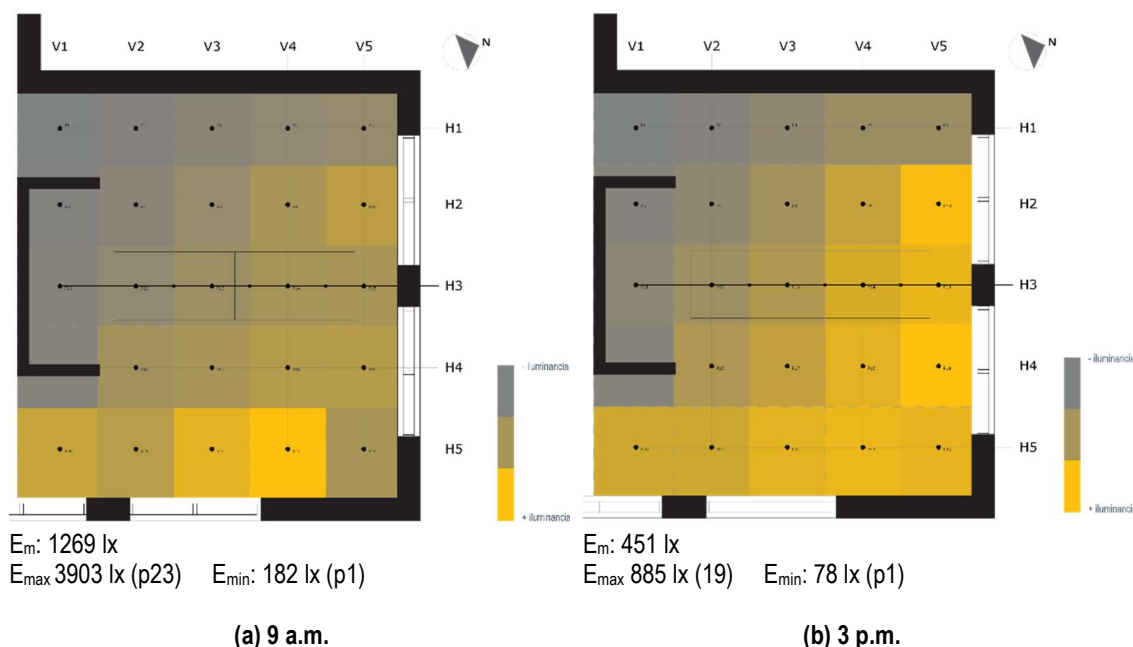


Figura 32 RESULTADOS PROMEDIO DE MEDICIONES PUNTUALES DE ILUMINANCIA. (a) Promedio de mediciones realizadas a las 9 a.m. (b) Promedio de mediciones realizadas a las 3 p.m. Fuente: autora

Se observa un aumento de la iluminancia conforme nos acercamos a las ventanas, siendo el p1 el de menor iluminancia y la esquina opuesta (p19, p23) la de mayor iluminancia. Esto se relaciona con el efecto de la luz que proviene del sureste en horas de la mañana. La iluminancia media es 2,8 veces mayor a las 9 a.m.

Para poder identificar los sectores que presentan iluminación natural útil (UDI), se define una escala de colores falsos y se aplica a los valores promedio de las mediciones puntuales. De esta forma, se logra identificar cuáles sectores del espacio tienen exceso de iluminación y cuáles no cumplen con el mínimo recomendado. En este caso, el patrón de comportamiento es muy distinto a las 9 am y a las 3 pm; esto, producto de la orientación de las aperturas (ver figura 33).

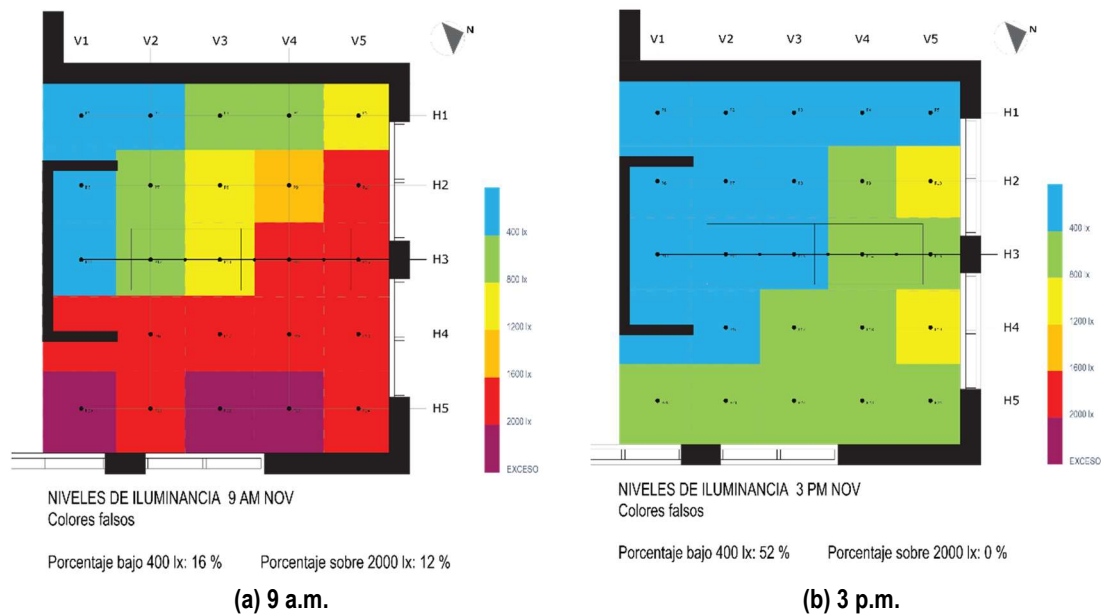


Figura 33 RESULTADOS PROMEDIO DE MEDICIONES PUNTUALES CON ESCALA DE COLORES FALSOS. Fuente: autora

Durante la mañana, existe un exceso de iluminación que ingresa por la fachada sureste y puede causar deslumbramiento, puesto que los valores superan los 2000 lx en tres puntos. Por el contrario, en la tarde se identifica que un 52% del espacio tiene valores de iluminancia por debajo del mínimo requerido (400 lx), lo que limita su autonomía lumínica (DA) y, por ende, se depende de luz artificial para desarrollar las actividades.

Con el fin de identificar la correspondencia entre los niveles de iluminancia medidos de forma prolongada y los simulados, se presentarán los resultados comparativamente, siempre analizando sobre los mismos puntos, tres valores simultáneamente. Esto permite identificar de mejor manera las tendencias y patrones de comportamiento en los distintos sitios de la retícula.

Se utilizaron valores de iluminancia media por hora ( $E_m$ ), es decir, el promedio de todos los datos obtenidos durante un rango de 60 minutos cada día. En el caso de este estudio, se utilizaron tres momentos del día: a las 9 a.m., a las 12 m.d. y a las 3 p.m. Como se mencionó anteriormente, el objetivo no es que los valores sean los mismos, sino que, evaluar si se mantienen en un mismo rango de comportamiento e identificar por qué razón lo hacen o no. A su vez, determinar la utilidad de la luz natural en el espacio analizado y su autonomía, según cada caso.

### 4.1 Resultados de Iluminancia medida y simulada durante la mañana

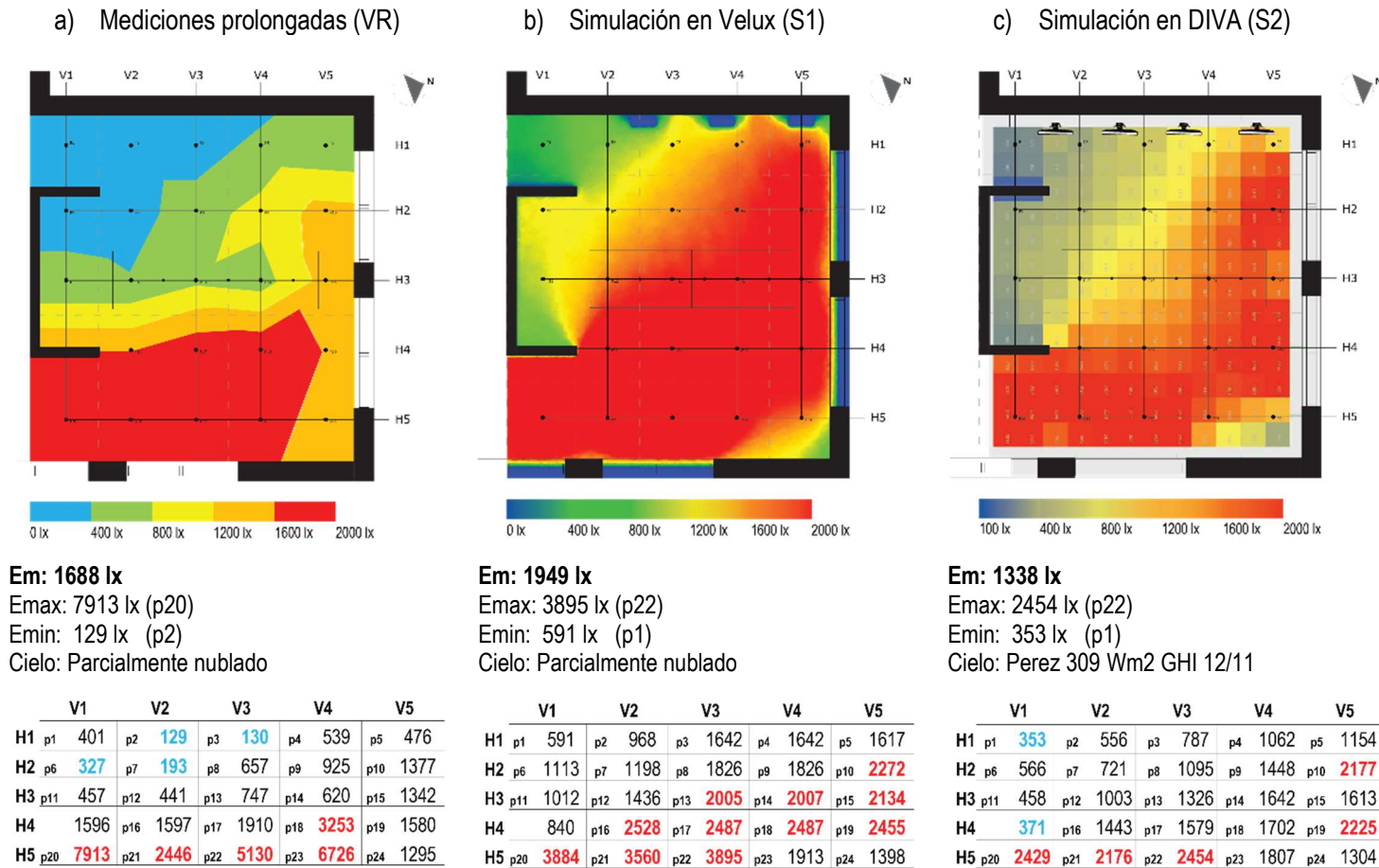


Figura 34 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ILUMINANCIA 9 A.M.: a) Mediciones prolongadas, b) Simulación Velux y c) Simulación Diva

## 4.2 Resultados de iluminancia medida y simulada durante el medio día

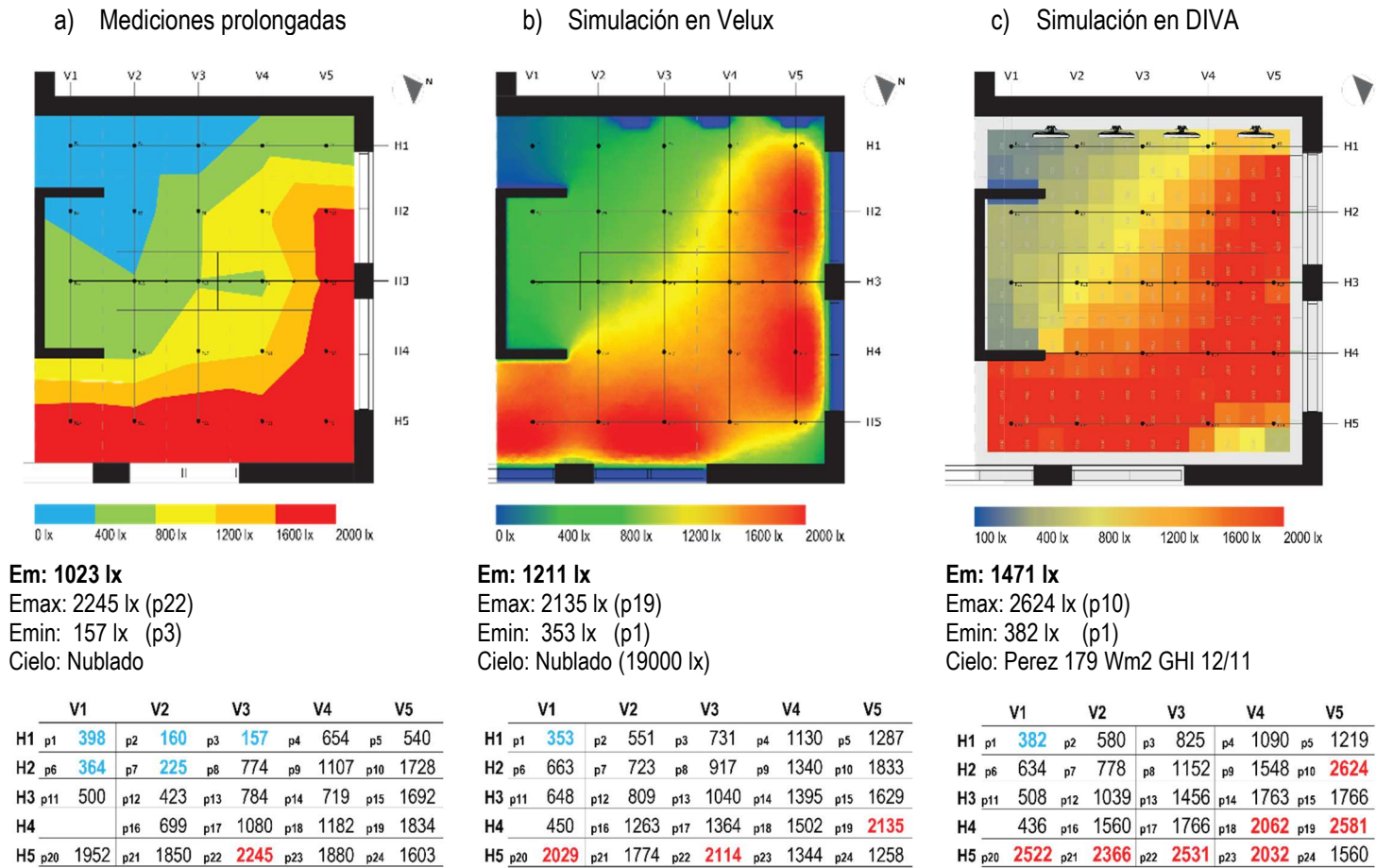


Figura 35 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ILUMINANCIA 12 M.D.: a) Mediciones prolongadas, b) Simulación Velux y c) Simulación Diva

### 4.3 Resultados Iluminancia medida y simulada durante la tarde

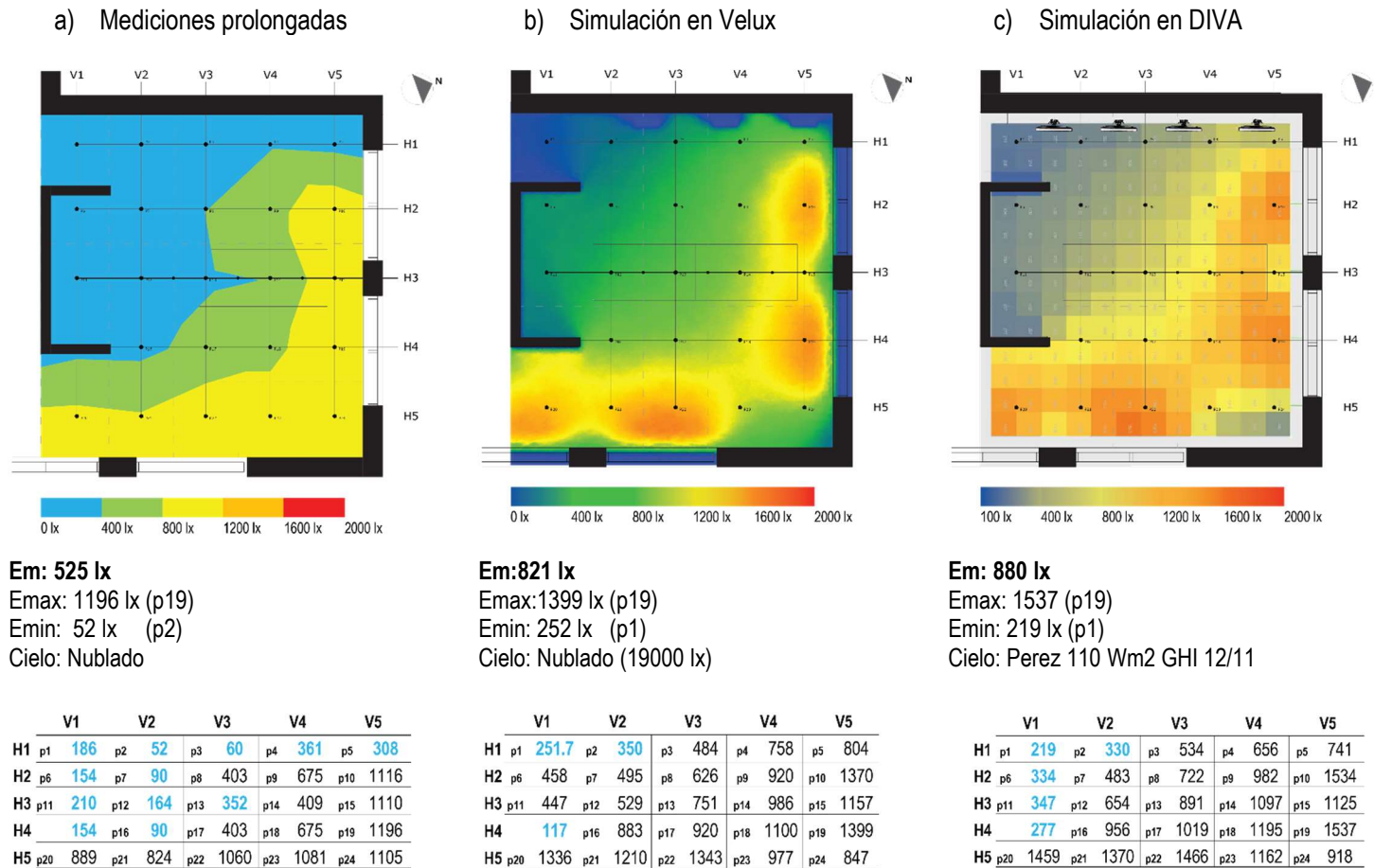


Figura 36 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ILUMINANCIA 3 P.M.: a) Mediciones prolongadas, b) Simulación Velux y c) Simulación Diva

En Costa Rica, durante el mes de noviembre, la iluminación natural tiene una mayor incidencia sobre las superficies orientadas hacia el sur, producto de la posición del sol con respecto a nuestra latitud. A las 9 a.m., el azimut es de  $131^\circ$ , lo que implica que los rayos solares impactan de forma directa por el lado sureste. En el caso del espacio analizado, es importante considerar este factor para interpretar los resultados, ya que una de las fachadas con ventanas está orientada hacia el sureste.

En el panel a) de la figura 34, se observa que existe un alto contraste lumínico en dos sectores del laboratorio: un área lejos de las ventanas, que registra valores inferiores a los 400 lx (16% del área total), mientras que el otro sector, contiguo a la ventana sureste, presenta valores de más de 5000 lx (20% del área total). De esta forma, el porcentaje de iluminancia natural útil (UDI) en el espacio es el 60% a las 9 a.m. Asimismo, la  $E_m$  del laboratorio es 1688 lx, valor que también se encuentra dentro del rango aceptado. No obstante, los momentos que sobrepasa los 2000 lx, puede generar deslumbramiento como efecto del alto contraste y falta de uniformidad. Estos resultados son bajo una condición de cielo parcialmente nublado, que podrían empeorar en el caso de un cielo despejado.

Los resultados observados en los paneles b) y c) de la figura 34, demuestran que existe correlación con los valores reales, tendiendo a generar un área de exceso de iluminancia cerca del eje H5 (fachada sureste), pero también sobre el eje V5 (fachada noreste), algo que no se observa en las mediciones. Sin embargo, el patrón de comportamiento lumínico se identifica en los tres casos. En los resultados simulados en VELUX (S1), el 66% del área presenta iluminancia natural útil, mientras que en DIVA (S2) es el 68%. En ambas simulaciones, los puntos de iluminancia mínima y máxima son los mismos: p1 y p22 (punto adyacente a la ventana sureste). El valor de  $E_m$  en S1 es más cercano a la media real que la  $E_m$  en S2. No obstante, los resultados de S1 muestran que el 44% del área tiene exceso de luz, mientras que en S2 es un 20% del área, igual que en la realidad.

Con el fin de determinar cuál de las dos simulaciones tiene resultados más cercanos a la medición real, se generó una desviación media sobre todos los puntos de medición. A las 9 a.m., el resultado más cercano a la media real, fue el simulado con DIVA (Ver figura 37), con un valor de  $\sigma = 972$ , mientras que el simulado con VELUX fue de  $\sigma = 1207$ . En este sentido, es importante señalar el uso del método Pérez para determinar el tipo de cielo en la S2, ya que utiliza un valor real de radiación. Cuando se trate de un caso con más

incidencia de luz directa en el espacio, ya sea por la orientación o por la poca nubosidad, puede ser un factor determinante para escoger con qué programa simular.

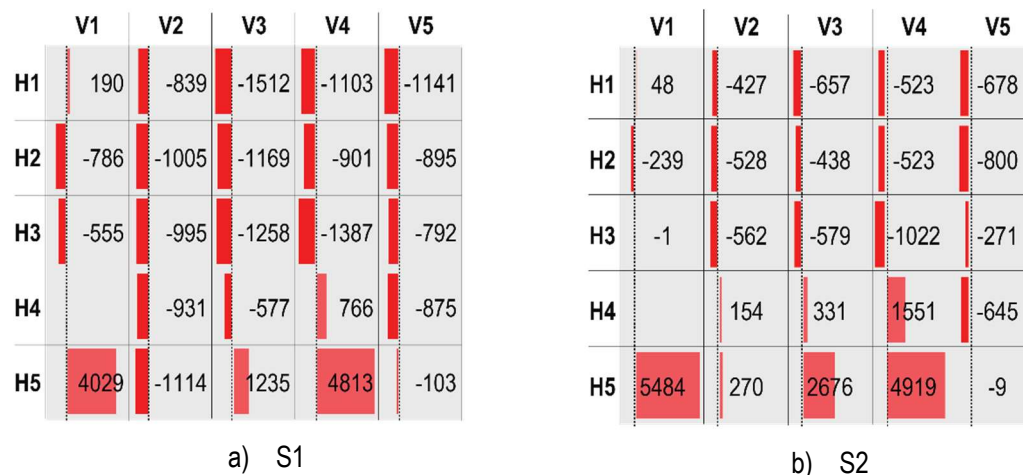


Figura 37 GRÁFICO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ILUMINANCIA 9 A.M.: a) Mediciones prolongadas, b) Simulación Velux y c) Simulación Diva

El escenario de las 12 m.d. varía con respecto a la condición lumínica previa. En el mes de noviembre, el azimut es de  $-162^\circ$  durante esta hora, lo que indica que la incidencia de luz natural sigue teniendo un componente sur, pero disminuye considerablemente la inclinación hacia el este. Es posible observar el efecto de este cambio en los resultados que presenta la figura 35. El panel a) muestra los valores medidos, en donde el único punto con un valor de  $E_m$  que sobrepasa levemente los 2000 lx es el p22 (adyacente a la ventana SE). De esta forma, no existen áreas con un exceso de luz natural, aunque se observa un aumento en 4 puntos porcentuales (p.p.) en el sector que no cumple con el mínimo de iluminación recomendada. El porcentaje de iluminancia natural útil (UDI) es de 76%, lo que indica que esta es una hora ideal para utilizar el espacio con luz natural únicamente.

El panel b) y c) muestran un patrón de distribución lumínica bastante similar al real, en donde los valores más altos de iluminancia se encuentran en los extremos noreste y sureste del espacio. El punto 1 sigue siendo una parte de poca luz natural como consecuencia de la sombra que generan las paredes livianas. La  $E_m$  medida ronda los 1023 lx, mientras que la proyectada en la S1 es de 1211 lx y de 1471 lx en la S2. Ambas simulaciones ubican la media en el mismo rango de iluminancia (1200-1600 lx), un poco más alta que la  $E_m$  real, localizada en el rango inferior. La simulación en DIVA genera valores de iluminancia más altos, presentando un 28% de la luz natural fuera del rango útil. En los tres escenarios, la condición de cielo es nublada.

A las 12 m.d., el resultado más cercano a la media real fue el simulado con VELUX (Ver figura 38), con un valor de  $\sigma = 320$ , mientras que el simulado por DIVA fue de  $\sigma = 496$ . En ambos casos, la predicción del escenario lumínico es más cercana al resultado real que en las simulaciones de las 9 a.m. Además, el método para determinar el tipo de cielo no fue tan concluyente en este caso.

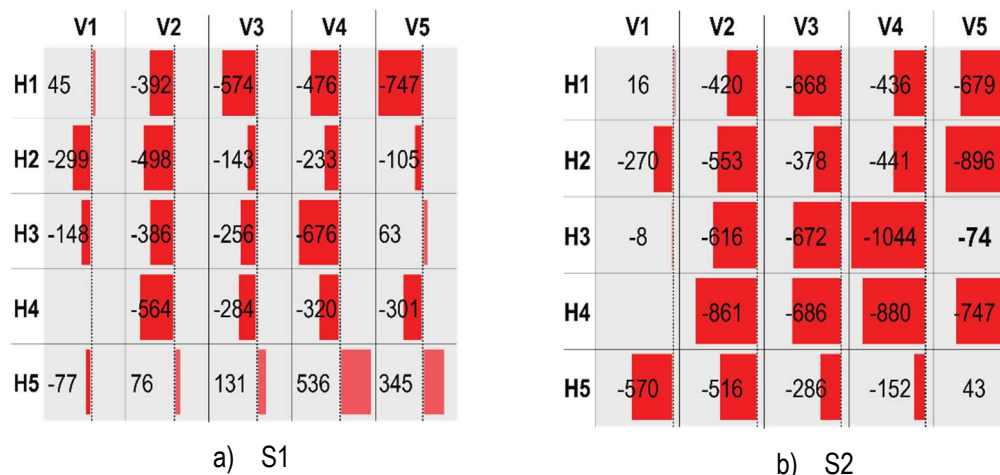


Figura 38. RESULTADOS DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR PUNTO A PUNTO 12 M.D. a) Simulación con Velux (S1). b) Simulación con Diva (S2).

El último escenario evaluado corresponde al comportamiento lumínico de las 3 p.m., donde el azimut es de  $-119^\circ$  y la altura solar de  $28^\circ$ , describiendo una posición solar cercana al horizonte y con una incidencia predominante del suroeste. En este caso, se espera que el impacto de iluminación directa sea menor, ya que no existen aberturas en el costado oeste. Los resultados del panel a) en la figura 35, indican que un 48% del área corresponde a una iluminancia menor al mínimo recomendado. Los valores máximos se encuentran en los puntos adyacentes a las fachadas con aberturas; sin embargo, no superan los 1196 lx. Este panorama indica que es inevitable el uso de luz artificial para cumplir con estándares de calidad visual.

Con respecto a los resultados de los paneles b) y c), se presenta un patrón lumínico claro, en donde ambos valores de  $E_m$  se encuentran en el mismo rango (800 -1200 lx), un nivel más alto que el real: 525 lx. No obstante, tanto el escenario medido como el simulado, identifican el punto 19 como el que presenta la  $E_{m\max}$  y los puntos p1 y p2 con la  $E_{m\min}$ . La S2 presenta un 20% de iluminancia bajo el nivel mínimo, mientras que la S1 solamente un 12%. En este ámbito, la simulación de DIVA identifica un escenario más cercano del indicador UDI, aunque ambas simulaciones distan bastante del escenario real (48%). La condición de cielo es la misma para los tres escenarios.

Al calcular la desviación media del comportamiento promedio, la simulación del programa VELUX fue la más precisa, con un valor de  $\sigma = 340$ , mientras que los resultados de DIVA tuvieron una desviación de  $\sigma = 381$ . Sin embargo, el escenario de iluminancia medida y simulada durante la tarde, es dónde se obtuvieron resultados de simulación más parecidos. La diferencia de ambos escenarios con respecto al promedio es prácticamente la misma (Ver figura 39).

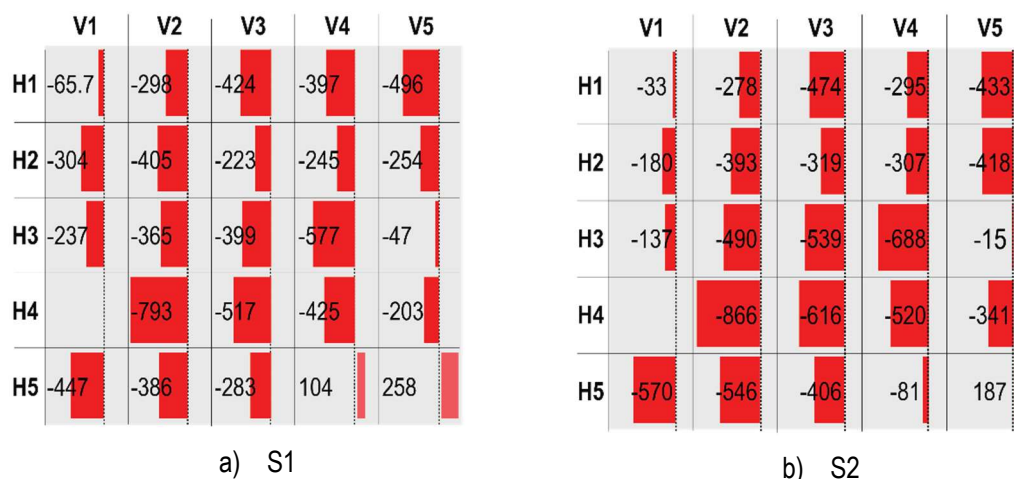


Figura 39 RESULTADOS DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR PUNTO A PUNTO 3 P.M. a) Simulación con Velux (S1). b) Simulación con DIVA (S2).

Después de analizar los resultados obtenidos durante tres horas distintas, se comprueba que el comportamiento lumínico simulado que más se aleja de la realidad es el de las 9 a.m. Por las tendencias y los valores observados, es posible determinar que cuando ingresa la luz natural directa durante un período determinado, se alteran las mediciones y suben los valores de iluminancia en ciertos puntos críticos (cercanos a la fachada por donde ingresa la luz natural). Aun cuando se eliminaron valores extremos en los datos de mediciones en sitio (aquellos que se alejan en 3 o más desviaciones estándar de la media), es posible que sea necesario eliminar una mayor cantidad de valores extremos para lograr mayor correspondencia con la simulación.

## **Capítulo 5 Conclusiones**

El uso de la luz natural, como fuente principal de iluminación dinámica, requiere ser planificada durante las etapas tempranas de diseño, ya que se debe contemplar y comprender su variabilidad a través del tiempo y cómo esto puede llegar a afectar las decisiones de diseño. Cuando se planifica un sistema de luz artificial en conjunto con la luz natural, es posible mejorar la productividad y bienestar de sus ocupantes, además de reducir el consumo energético. Un análisis mal ejecutado, puede llevar a la existencia de luz solar directa, contrastes y deslumbramientos, los cuales, son posibles causantes de la falta de confort lumínico, así como un aumento en el uso de iluminación artificial y consumo energético.

Existe una necesidad de aprender e implementar nuevas metodologías que permitan evaluar los comportamientos lumínicos y su máximo aprovechamiento dentro del espacio arquitectónico. Las simulaciones del espacio construido y su desempeño, permiten identificar escenarios indeseables y proponer soluciones antes de construir, de forma más rápida e incluso con variaciones múltiples. Sin embargo, siempre es importante validar los resultados de un simulador, para conocer sus beneficios y sus limitaciones, así como su margen de error al predecir un escenario.

En el desarrollo del trabajo se han analizado comparativamente dos modelos de simulación lumínica de un mismo espacio interior contra los valores de iluminancia reales medidos en el sitio de estudio, con el fin de validar su precisión y capacidad de predicción de escenarios de luz natural útil. Durante este proceso, se determinó que es preciso realizar mediciones preliminares que, al trazar la distancia entre puntos de medición, permiten determinar cuál es el patrón de comportamiento lumínico en la superficie principal, y qué factores tienen influencia sobre la misma: aberturas, posición solar, obstáculos, materiales, entre otros. En este caso, la orientación de las ventanas es determinante en el resultado de las curvas de distribución lumínica. Además, fue posible identificar errores en el proceso de modelado y simulación.

Los resultados mostraron que, el modelo de computadora tiene el potencial de predecir con precisión el comportamiento de la luz natural en un espacio, siempre y cuando se tenga disponibilidad de datos de entrada relevantes como la geometría exacta, la construcción detallada con las propiedades de los materiales y la descripción del cielo existente el día de análisis, ya sea por datos de radiación o por imágenes del cielo. Sin embargo, existe una tendencia a aumentar el margen de error cuando se analiza el

comportamiento durante la mañana. En este caso, el ingreso de luz natural por la fachada sureste, altera las mediciones de los sensores en los *dataloggers*, generando valores de iluminancia muy lejanos al promedio. Para contrarrestar esta situación, se eliminaron los valores extremos de la muestra, utilizando el 99% de los datos. No obstante, se considera que se deben eliminar una mayor cantidad de valores extremos, ya que la incidencia de la luz sigue afectando. Los valores de iluminancia obtenidos mediante ambos softwares, tienen una mayor desviación en el horario de las 9 a.m. por esta razón. En este caso, el programa que se acerca más al comportamiento real es DIVA. Además, la información que ofrece es más completa: indica el porcentaje de área sobre el valor máximo y mínimo de iluminancia, así como la condición de cielo utilizada y la iluminancia media. A su vez, en el ámbito académico permite obtener resultados dinámicos por medio del archivo de clima, como el porcentaje de autonomía lumínica durante todo el año.

Al analizar los resultados obtenidos durante las simulaciones de las 12 m.d. y 3 p.m., el programa VELUX es el que tiene un comportamiento más cercano a la realidad. A pesar de que el programa no genera una grilla de resultados y para obtener los valores en cada punto se debe realizar de forma manual, sí es posible identificar tendencias muy similares a las reales. Asimismo, los valores de iluminancia máxima, mínima y media se mantienen dentro del mismo rango de comportamiento que el observado, todo bajo condiciones de cielo parcialmente nublado. Se tiene la hipótesis de que, si se realizan análisis con el cielo despejado, la desviación del promedio puede aumentar, ya que existe mayor probabilidad de recibir incidencia de luz directa. En el ámbito profesional y comercial, VELUX permite generar fácilmente visualizaciones en perspectiva con valores luminotécnicos, situación que en DIVA es mucho más compleja.

Tanto las mediciones prolongadas como las simulaciones, permiten identificar regiones en el espacio en donde la luz natural no es suficiente, por lo que es necesario el uso de la luz artificial y también de elementos que generen sombra y redirijan la luz de forma indirecta, en este último caso, sobre todo durante las mañanas. La luz natural presente en el espacio durante el mes de noviembre, no es de calidad, ya que en algunos casos está por debajo de los 400 lx y en otros casos sobrepasa los 2000 lx. El comportamiento lumínico que se acerca más a una iluminancia útil es el del medio día.

Los resultados de simulación permiten tomar decisiones informadas de diseño, ya que los valores de iluminancia obtenidos se mantienen en los rangos observados en las mediciones de sitio. De esta forma, se concluye que es posible diseñar con patrones, tendencias y comportamientos de luz natural obtenidos

mediante ambas herramientas de simulación. Además, el método permite determinar la calidad de la luz natural y si es necesario implementar un sistema complementario de luz artificial, energéticamente eficiente. Este procedimiento utiliza técnicas de validación apropiadas, lo que permite generar un diseño superior en menor tiempo, menor costo y con mayor eficiencia. En el marco de la crisis energética y el cambio climático, entender el desempeño y consumo energético desde las etapas tempranas de diseño, es indispensable.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABNT, & NBR 15.215-4. (2005). *Iluminação natural - Verificação Experimental das Condições de Iluminação Interna de Edificações: Método de Medição*. 13.
- Anderson, K. (2014). *Design Energy Simulation for Architects*. Taylor and Francis Group.
- Ashdown, I. (2009). *Perez All-Weather Sky Model Analysis*. 50(3), 1–10.
- Bhavani, R. G., & Khan, M. A. (2011). Advanced Lighting Simulation Tools for Daylighting Purpose: Powerful Features and Related Issues. *Trends in Applied Sciences Research*, 6(4), 345–363. <https://doi.org/10.3923/tasr.2011.345.363>
- Castro, V. 1986. Estudio climático de la radiación solar global en Costa Rica. *Revista Geofísica*, 25, 105 - 124.
- DIAL GmbH. (2019). *DIALux Desktop - DIAL*. <https://www.dial.de/en/dialux-desktop/>
- DiLaura, D., Houser, K., Mistrick, R., & Steffy, G. (2018). IESNA: The Lighting Handbook. In *Illuminating ...* [http://www.ebookstandard.com/download/pdf/IES\\_HB-10-11\\_pre.pdf](http://www.ebookstandard.com/download/pdf/IES_HB-10-11_pre.pdf)
- DiLaura, D. L., Houser, K. W., Mistrick, R. G., & Steffy, G. R. (2011). The lighting handbook - Reference and Application. In *The lighting handbook reference and application*. New York (NY): Illuminating Engineering Society of North America. 1328 p.
- Encyclopaedia Britannica. (n.d.). *Sunlight | Definition, Wavelengths; Facts | Britannica.com*. Retrieved May 14, 2019, from <https://www.britannica.com/science/sunlight-solar-radiation>
- Galasiu, A. D., & Atif, M. R. (2002). Applicability of daylighting computer modeling in real case studies: comparison between measured and simulated daylight availability and lighting consumption. *Building and Environment*, 37(4), 363–377. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00042-7)
- Heinrich, K., Pacheco, R., Solera, M., & Alfaro, M. (2013). Series de Brillo Solar en Costa Rica. In *Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas*.
- Hopkins, R. G. (1963) *Architectural Physics: Lighting*, London: Her Majesty's Stationery Office.
- Jakubiec, J. A., & Reinhart, C. F. (2012). *Overview and Introduction to DAYSIM and Current Research Developments*. [https://www.radiance-online.org/community/workshops/2012-copenhagen/Day1/Jakubiec/jakubiec,reinhart\\_radiance-workshop-presentation\\_daysim.pdf](https://www.radiance-online.org/community/workshops/2012-copenhagen/Day1/Jakubiec/jakubiec,reinhart_radiance-workshop-presentation_daysim.pdf)
- Lira-oliver, A. (2016). *Radiación solar invisible y arquitectura Invisible Solar Radiation and Architecture*. 116–124.
- Mardaljevic, J. (2014). Daylighting. In *Encyclopedia of Color Science and Technology* (pp. 1–16). Springer

- Science + Business Media. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8\\_258-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_258-1)
- Marsh, A. (2018). *CIE Sky Generator*. <http://www.andrewmarsh.com/software/cie-sky-web/>
- Michler, G. (2018). *The Radiance Software*. Lighting Design Glossary. <https://www.schorsch.com/en/kbase/glossary/radiance-software.html>
- Ochoa, C. E., Aries, M. B. C., & Hensen, J. L. M. (2012). State of the art in lighting simulation for building science: A literature review. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(4), 209–233. <https://doi.org/10.1080/19401493.2011.558211>
- Reinhart, C. (2012). *4.430 Daylighting*. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare. License: Creative Commons BY-NC-SA. [https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4\\_430S12\\_lec02.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-430-daylighting-spring-2012/lecture-notes/MIT4_430S12_lec02.pdf)
- Reinhart, C. F., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33(7), 683–697. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00058-5)
- Reinhart, C. F., & Wienold, J. (2011). The daylighting dashboard - A simulation-based design analysis for daylight spaces. *Building and Environment*, 46(2), 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>
- Reinhart, C., & Fitz, A. (2006). *Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design*. 38, 824–835. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.012>
- Roy, N. (2016). *Daylight Visualizer*. <https://www.velux.com/article/2016/daylight-visualizer>
- Shephard, M. S., Beall, M. W., O'bara, R. M., & Webster, B. E. (n.d.). *Toward Simulation-Based Design*. Retrieved May 8, 2019, from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.92.1889&rep=rep1&type=pdf>
- VELUX. (n.d.-a). *Daylight calculations and measurements - Daylight, Energy and Indoor Climate Book*. Retrieved May 29, 2019, from <https://www.velux.com/deic/daylight/daylight-calculations-and-measurements>
- VELUX. (n.d.-b). *Simulation tools - The Daylight Site | Daylighting research, architecture, practice and education The Daylight Site*. Retrieved March 22, 2019, from <http://thedaylightsite.com/library-3/links/simulation-tools-2/>
- Wright, J. (2008). Cálculo Y Mapeo De La Radiación Solar Directa Y Difusa En Costa Rica. *Uniciencia*, 55–69.