

**Informe Final sobre Investigación de
Análisis comparativo de dos técnicas para el
transporte vertical de la luz natural**

**Documento N° 1
Desarrollo técnico sobre los resultados de la
investigación**

Investigación realizada por:

Mg. Gerardo Ramírez González¹, Ma. Sebastián Orozco Muñoz²

¹Máster Ingeniero civil, profesor a tiempo indefinido y director de la Escuela de Arquitectura y Urbanismo.
Investigador principal

²Máster Arquitecto, profesor a tiempo indefinido de la Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Investigador
secundario

Diciembre, 2015

Tabla de contenido

1-Registro de la Investigación.....	3
2-Autores y direcciones.....	3
3-Resumen.....	3
4-Palabras clave.....	3
5-Introducción.....	4
6-Marco Teórico.....	7
7-Metodología.....	10
8-Resultados.....	12
9-Discusión y conclusiones.....	30
10-Recomendaciones.....	31
11-Agradecimientos.....	32
12-Referencias.....	33
13-Apéndices.....	34

1-Registro de la Investigación

El código del proyecto de Investigación fue el 5402-1412-0601 y el nombre con que fue inscrito fue “Análisis comparativo de dos técnicas para el transporte vertical de la luz natural”.

2-Autores y direcciones

Los autores de la investigación son docentes de la Escuela de Arquitectura y Urbanismo del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en la Sede del Centro Académico de San José, ubicado en Barrio Amón, distrito Carmen, San José. Responden a los nombres de Ing. Gerardo Ramírez González, investigador principal responsable y el Arq. Sebastián Orozco Muñoz, investigador secundario.

3-Resumen

Esta investigación tiene el objetivo primordial de comparar y establecer las relaciones de efectividad entre dos técnicas de diseño para el transporte vertical de la luz natural en el interior de las edificaciones. En primer lugar se diseñó, construyó, y utilizó un equipo experimental de concentrador demótico con distribución a través de fibra óptica hacia un espacio interior sin ninguna iluminación natural tradicional, para monitorizar su efectividad por medio de un luxómetro digital y un recopilador de datos (Datalogger) de entrada múltiple. En segundo lugar se monitorizó el rendimiento lumínico de un lucernario tradicional durante un periodo de seis meses. Y finalmente se realizó un estudio por medio de la Simulación Generada por Computadora (SGC), para establecer la relación entre las proporciones tridimensionales de los ductos de luz, y la tasa de degradación de la iluminancia obtenida en el interior del espacio arquitectónico. En términos de resultados, el sistema de iluminación natural por fibra óptica (SINFO) no alcanza el la efectividad lumínica del lucernario, sin embargo presenta un rendimiento más uniforme y constante. La idea central es la de utilizar un criterio de comparación validado, tal como el factor de aprovechamiento de luz diurna (Daylight Factor) y otras métricas complementarias, para establecer una relación básica de efectividad entre ambas técnicas, y finalmente se establecen una serie de recomendaciones de diseño en torno a la utilización de cada una de las técnicas.

4-Palabras clave

Arquitectura de Bajo Consumo Energético. Iluminación natural. Simulación Generada por Computadora (SGC). Fotometría. Factor de Iluminación Natural (DF%). Autonomía de Luz Diurna (DA), Fibra Óptica.

5-Introducción

El presente es un proyecto de investigación aplicada, que gira en torno a la temática de la sostenibilidad ambiental dentro de la industria de la construcción. Este amplio campo ha sido determinado por múltiples organizaciones y gobiernos, como un área clave en aras de la necesaria reconversión ecológica de las actuales ciudades, y la minimización del impacto ambiental producido por los asentamientos humanos.

En el contexto latitudinal de los trópicos, donde se encuentra Costa Rica, el consumo energético de los edificios atiende en gran medida a la necesidad de iluminar artificialmente un alto porcentaje de espacios internos en periodos de horas diurnas, durante las cuales se desaprovecha el enorme potencial energético de la iluminación natural. Además de este, existe también el rubro del consumo energético por concepto de climatización artificial del espacio interno, asociado a un mal manejo de cargas térmicas tanto internas como externas, sin embargo, en el contexto mencionado, este no suele ser el problema prioritario (gracias a las condiciones climáticas predominantemente favorables), y por tanto será abordado en una investigación subsecuente, actualmente en fase de conceptualización.

El problema del desaprovechamiento de la luz natural, se combina con la actual tendencia nacional de verticalización de las tipologías constructivas tanto comerciales como residenciales. Si bien, esta es una tendencia acertada, y necesaria para aumentar la compacidad de los asentamientos urbanos, el mal manejo y el pobre planteamiento de la iluminación natural dentro de una estratificación vertical de múltiples niveles, trae como resultado un consumo energético, innecesariamente exacerbado. Este suele ser el resultado de una formación profesional en las áreas de la Arquitectura y la Ingeniería, relativamente carentes de conceptos bioclimáticos claros así como de las herramientas necesarias para desarrollarlos. En este punto es donde surge esta investigación, como un esfuerzo por profundizar en el alcance de la temática mencionada, al tiempo que complementa la formación de futuros profesionales desde sus etapas más tempranas. La idea fundamental es la de conformar un equipo mixto entre profesores y estudiantes (entre 4 o 5 integrantes máximo), para desarrollar un ejercicio híbrido de experimentación tangible, con equipos físicos, en combinación con la experimentación intangible realizada por medio de modelos de simulación computacional.

La intención final del proyecto cubre la producción de gráficos para el planteamiento y diseño (conceptualización, dimensionamiento, comprobación) de la iluminación natural en el contexto costarricense; así como la aplicación

académica dentro del proceso de formación profesional de los futuros profesionales de la Escuela de Arquitectura y Urbanismo del TEC.

Esta investigación tiene el objetivo primordial de comparar y establecer las relaciones de efectividad entre dos técnicas de diseño para el transporte vertical de la luz natural en el interior de las edificaciones. La consolidación de esta información sobre una matriz o tabla cuantitativa, permitirá aportar al diseñador arquitectónico de una guía ágil para el dimensionamiento de estos sistemas, y para la comprensión conceptual del comportamiento de la luz natural, particularmente útil durante la formación académica de los futuros profesionales en arquitectura.

En primer lugar, se plantea la realización de un estudio por medio de la Simulación Generada por Computadora (SGC), para establecer la relación entre las proporciones tridimensionales (ancho, largo, y profundidad) de los patios de luz, y la tasa de degradación de la iluminancia obtenida en el interior del espacio arquitectónico. En segundo lugar se propone la utilización de un equipo experimental de concentrador parabólico especular con distribución a través de fibra óptica hacia un espacio interior sin ninguna iluminación natural tradicional, para monitorizar su efectividad por medio de un luxómetro digital y un recopilador de datos (Datalogger) de entrada múltiple.

La idea central es la de utilizar criterios de comparación validados, tales como el Factor de luz natural (Daylight Factor), y el Factor de Autonomía Lumínica Diurna (DaylightAutonomy Factor), para establecer una relación básica de efectividad entre ambas técnicas, y determinar una breve guía de buenas prácticas en torno a la utilización de cada una. El principal desafío técnico de esta investigación consiste en la traducción de la información obtenida por medio de distintos métodos de medición (SGC, y experimental) hacia un criterio preciso y unificado, que permita establecer una comparación cuantitativa y posteriores relaciones entre las técnicas.

La fase experimental del estudio requerirá de la adquisición de múltiples equipos de concentración, distribución, y medición, dado que en la actualidad no existe ningún motor de cálculo capaz de simular el comportamiento de la luz natural al ser transportada a través de la fibra óptica. Por su parte, la fase de simulación computacional se llevará a cabo mediante los motores de cálculo de libre distribución RADIANCE (Laboratorio Nacional de la universidad de Lawrence Berkeley LBNL), DAYSIM, (HU. NRCC. FISES) y DIALux (DIAL GmbHInc.) dado que son las herramienta fotométricas validadas de mayor desarrollo en el medio a nivel mundial.

Esta es una investigación de carácter innovador en múltiples facetas, desde el uso de los colectores parabólicos y la fibra óptica, hasta la utilización de modelos virtuales y la SGC. Sin embargo la principal innovación de la investigación es la búsqueda de un criterio analítico y cuantitativo de comparación que permita contrastar bajo una misma escala, los resultados de ambas metodologías y crear una matriz capaz de relacionarlos. En este sentido, los resultados de la investigación pueden llegar a trascender el ámbito académico y formativo en el interior del TEC, para llegar a convertirse en una referencia técnica y un insumo clave para el ejercicio profesional, e inclusive para ámbitos superiores, como lo es la redacción de los futuros códigos nacionales de gestión energética en la edificación.

De conformidad con lo anterior el objetivo general y los específicos son como se especifican a continuación:

Objetivo General:

Establecer, mediante el análisis comparativo, las relaciones básicas de dimensionamiento vs efectividad, entre dos técnicas de transporte vertical de la iluminación natural: Los patios de luz; y Los Sistemas de Iluminación Natural a través de Fibra Óptica (SINFOs)

Objetivos Específicos:

- 1) Diseñar e instalar un sistema de monitorización y almacenamiento de datos, para medir la efectividad de las distintas alternativas a analizar dentro del edificio SJ-3 del Centro Académico de San José.
- 2) Evaluar el rendimiento lumínico real del actual sistema de patio de luz presente en el edificio a lo largo de 1 periodo semestral.
- 3) Extrapolar los resultados obtenidos en el objetivo anterior sobre un modelo de simulación computacional, para predecir el rendimiento del sistema bajo diferentes variaciones de dimensionamiento, y así obtener una relación matemática clara y precisa entre las variables.
- 4) Diseñar/adquirir un SINFO, e instalarlo en el auditorio del primer nivel del edificio SJ-3, con conexión directa a la cubierta del mismo.

- 5) Evaluar el rendimiento lumínico real del SINFO mencionado en el objetivo anterior lo largo de 1 periodo semestral.
- 6) Comparar el rendimiento obtenido del SINFO, con la extrapolación simulada, mencionada en el objetivo 3, sobre una matriz de análisis cuantitativo, generando los gráficos para el dimensionamiento.

6-Marco Teórico

La temática de la optimización de la iluminación natural aplicada al diseño arquitectónico, contempla un amplio catálogo de estudios y publicaciones a lo largo de casi 40 años de investigación, sin embargo a efectos del presente proyecto, se ofrecen a continuación una serie de artículos y textos referentes a los conceptos de iluminación por medio de Fibra Óptica (FOL: FiberOpticLighting), y la simulación computacional (Daylight CGS) exclusivamente.

El centro de investigación con mayor trayectoria y relevancia en la temática de la iluminación natural es el *LightingResearch Center (LRC)*, del RensselaerPolytechnicInstitute, NY, en los Estados Unidos. Este ha publicado múltiples artículos que cubren parcialmente la temática de técnicas alternativas para la “cosecha” de la iluminación natural, sin embargo aún no ha producido un texto completo acerca de la utilización de un sistema integral para su inclusión en el diseño arquitectónico. Los artículos más relevantes publicados hasta ahora son:

- *To Capture the Sun and Sky (Daylighting)*. Maarten Mulder.Rensselaer Polytechnic Institute. 1998
- *Specular Reflectors*. Robert G. Davis.Rensselaer Polytechnic Institute. 1992
- *Field Test DELTA: Integrated Skylight Luminaire*. Jennifer Brons. Rensselaer Polytechnic Institute. 2003

Con un mayor grado de especificidad, el Journal of Industrial Technology, publicó en el 2002, un artículo bajo el título de “*Iluminación solar pasiva mediante el uso de fibra óptica*”. El cual se centra en la exploración descriptiva de este componente, originalmente desarrollado para la transmisión de datos, en el campo de la iluminación arquitectónica pasiva:

- *Passive Solar Lighting Using Fiber Optics*. William Grisé& Charles Patrick. National Association of Industrial Technology. 2003

Por su parte, el Instituto Nacional de Óptica Aplicada de Italia, realizó una importante contribución sobre la temática en el año 2008, al publicar el artículo

titulado: *Iluminación interior con colectores de luz solar*. En este caso, la investigación se aplicó de manera paralela sobre un caso específico de requerimiento lumínico al desarrollar un sistema completo denominado *Girasol* (Sunflower), e instalarlo en un prestigioso museo de la ciudad de Roma:

- ***Indoor illumination by solar light collectors*. P. Sansoni, F. Francini, D. Fontani, L. Mercatelli, D. Jafrancesco. CNR-INOA Istituto Nazionale di Ottica Applicata. Firenze, Italia. 2008**

Aparte del anterior, y de manera más reciente, la Escuela de Ciencias Eléctricas y Electrónicas de la Universidad Tecnológica de Shandong, en China, publicó en junio del 2010 un artículo titulado: "*Investigación sobre un sistema de iluminación por fibra óptica para energía solar*", como parte de la conferencia internacional de automatización mecánica e ingeniería de control:

- ***Research of fiber optic lighting system of solar energy*. Xia Zhang. Mechanic Automation and Control Engineering (MACE). School of Electric & Electronics Engineering, Shandong University of Technology. Zibo, China. 2010**

Finalmente, la organización NoUVIR, a cargo de la familia Miller, en los Estados Unidos, ha desarrollado una pequeña pero interesante serie de publicaciones acerca del uso de sistemas de Sistemas de iluminación por fibra óptica (SIFO), para su uso específico en museos y demás locaciones con contenido fotosensible. Sus trabajos se centran en el filtro de los componentes Ultravioleta e Infrarrojo del espectro solar radiante, como medida de eliminación del daño fotoquímico sobre objetos históricos y obras artísticas:

- ***Reflected energy matching as a conservation tool*. R.E. Miller & Jack V. Miller. NoUVIR LIGHTING. 2011**
- ***Evaluating Fading Characteristics of Light Sources*. R.E. Miller & Jack V. Miller. NoUVIR LIGHTING. 2011**

Por su parte, la temática de la simulación computacional aplicada a la iluminación arquitectónica es relativamente reciente, y cuenta con menos fuentes de publicaciones investigativas, sin embargo, existen importantes documentos que exploran científicamente su precisión, utilidad y valor práctico.

Estos artículos técnicos giran mayoritariamente en torno a la validación de los distintos programas informáticos de simulación que se mencionaron en el resumen ejecutivo, por lo tanto se agrupan de la misma manera

LBNL Radiance (Lawrence Berkley National Laboratory):

- *The RADIANCE simulation software in the architecture teaching context.* R. Compagnon. The Martin Centre for Architectural and Urban Studies University of Cambridge Department of Architecture. 1997
- *Real and Synthetic Image Comparison and Validation.* H. Rushmeier, G. Ward, C. Piatko, P. Sanders & B. Rust. National Institute for Standards and Technology. 1995
- *The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System.* Ward, Gregory J. SIGGRAPH conference. 1994

DAYSIM (Harvard University/ National Research Council Canada/ Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems)

- *Experimental Validation of Autodesk® 3ds Max® Design 2009 and Daysim3.0.* Reinhart C F, Breton P-F. Leukos 6:1 2009.
- *A Standard Daylight Coefficient Model for Dynamic Daylighting Simulations.* Bourgeois D, Reinhart CF, Ward G, Building Research & Information 36:1. 2008.
- *The Daylighting Dashboard - A Simulation-Based Design Analysis for Daylit Spaces.* Reinhart C F, J Wienold. Submitted to Building and Environment. 2010.

DIALux (DIAL GmbH)

- *Influence of light distribution in a room on the degree of acceptance of a workplace in a modern office.* Trägergesellschaft DIAL e.V. 2002
- *Adaptive lighting systems with hybrid lamps - subproject: Light colours - Physiological and psychological effects.* BMBF, grant ID 13N8305. 2006

En vista de todo lo anterior, es conveniente recordar, que la principal innovación y contribución de este proyecto consiste en la búsqueda de una metodología analítica híbrida entre los modelos de estudio, físicos y virtuales. Con respecto de esta contribución, se ofrecen los siguientes artículos, como los más representativos de esta tendencia a nivel internacional:

- *A simulation assessment of the height of light shelves to enhance daylighting quality in tropical office buildings under overcast sky conditions in Dhaka, Bangladesh.* J. AshikurRahman, A. ZebunNasreen, A. Price & M. Mourshed. Dept. of Architecture, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka, Bangladesh. 2009
- *Optimized Modular Window as a sustainable and industrialized solution for indoor daylighting.* P. Oteiza, S. Orozco, M. Pérez, C. Bedoya, J. Neila. Department of Physics, School of Architecture, Universidad Politécnica de Madrid, Spain. 2011

7-Metodología

El planteamiento metodológico de la investigación está dividido en dos categorías según el enfoque y tipo de aplicación analítica. Por una parte, se realizó un procedimiento físico, tangible y medible con instrumentos fotosensibles así como registradores de datos (Datalogger), por otro lado, se llevó a cabo un procedimiento virtual, intangible, por medio de motores de simulación computacional (calculation engines) e interfaces gráficas para usuarios (GUI).

Procedimiento físico: La experimentación física se llevó a cabo dentro de un entorno construido existente y modificado levemente a efectos de la instalación de un sistema de iluminación natural por fibra óptica, y el sistema de monitorización. Se planteó el desarrollo del proyecto, en el edificio de la Escuela de Arquitectura y Urbanismo SJ-2 del Centro Académico San José.

El esquema de actividades específicas realizado en esta etapa del proyecto se presenta a continuación:

- **Montaje de sistema de monitorización**
 - Preparación de los espacios
 - Montaje de sistema de datalogger y sensores
- **Evaluación del rendimiento lumínico del lucernario**
 - Registros de irradiación exterior
 - Registros de iluminancia interior
- **Construcción y montaje del SINFO**
 - Diseño del SINFO
 - Construcción del SINFO
 - Instalación y Operación del SINFO
- **Evaluación del rendimiento lumínico del SINFO**
 - Promedios diarios de iluminancia
 - Valores pico diarios de iluminancia
 - Variación estacional de la iluminancia

Inicialmente se realizó una medición fotométrica de rendimiento lumínico en torno al lucernario existente en la parte posterior del edificio, y su relación de efectividad en el aula/taller del segundo nivel. Esta medición fue realizada con un equipo de registro de datos de entrada múltiple, conectado a una serie de 4 sensores independientes. Además se recolectaron y tabularon los datos

semanalmente a lo largo de 1 periodo semestral completo, lo que permitió apreciar las variaciones en el rendimiento lumínico a lo largo de las distintas posiciones de la trayectoria solar entre solsticios. Todos los datos se cotejaron contra los valores de iluminancia exterior, para poder calcular el factor de aprovechamiento (DF%), y poder utilizarlo como métrica analítica.

Posteriormente, se procedió con la instalación de un SINFO que incluye un concentrador domótico de lentes Fresnel, de movilidad automática, gracias a la tecnología patentada del Dr. Jose Luis León de la Escuela de Ingeniería y Ciencia de los Materiales, a nivel de cubierta, y un sistema de distribución interna mediante cableado de fibra óptica, hasta una serie de luminarias refractivas instaladas en el interior del laboratorio de arquitectura bioclimática del edificio SJ-2. Al igual que en el caso anterior, se realizó una medición fotométrica en el interior de este espacio por medio de una configuración idéntica a la mencionada anteriormente, y durante el mismo periodo de tiempo.

Procedimiento computacional: Esta segunda fase contempló el montaje de múltiples modelos virtuales, con el establecimiento de proporciones tridimensionales modulares, que se variaron a partir de las dimensiones originales del lucernario existente en el edificio. En un principio se corrieron múltiples simulaciones sobre un modelo virtual idéntico al espacio real, las cuales sirvieron para la calibración de la herramienta a través de su comparación con datos registrados por el sistema de monitorización. Con esto, se establecieron las métricas de rendimiento más relevantes en función de la iluminación y el sobrecalentamiento, con el objetivo de predecir la tasa de degradación y la pérdida/ganancia de efectividad en la iluminancia interna con relación al tamaño y la profundidad del lucernario en cuestión.

El esquema de actividades específicas realizado en esta etapa del proyecto se presenta a continuación:

- **Análisis comparativo**
 - Curvas de rendimiento mensual
 - Comparación del factor de aprovechamiento
- **Simulación predictiva de rendimiento de lucernarios**
 - La variable de la proporción de la huella
 - La variable de la profundidad
 - La variable de la orientación
- **Proyecciones de rendimiento**
 - Orientación Norte-Sur

- Orientación Este-Oeste
- Orientación Diagonal

Para poder ilustrar este proceso, y llevarlo de una manera comprensible hasta una guía de dimensionamiento destinada al público no especializado, se considera imprescindible la producción de diagramas de: Factor de Luz Diurna (Daylight Factor), Factor de Autonomía de Iluminación Natural (Daylight Autonomy Factor), e Índice de Luz Útil (Useful Daylight Index); Con estos, se facilita considerablemente la comparación de resultados y la determinación de una correlación gráfica para la degradación de la luz.

8-Resultados

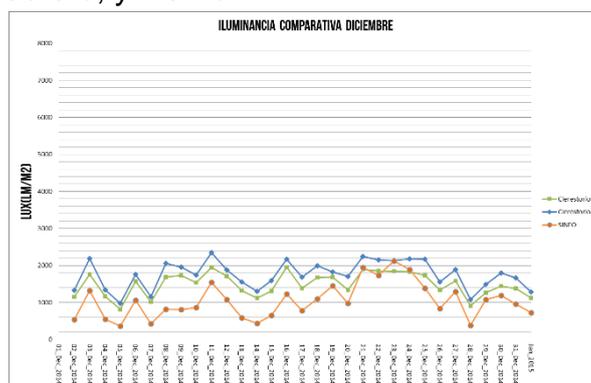
Curvas de rendimiento mensual

Inicialmente, se presentan de forma mensual y separada, las series correspondientes a la medida de iluminancia diaria promedio. La idea es poder apreciar con un alto nivel de resolución, la efectividad de cada opción, y al mismo tiempo determinar si la relación entre sus prestaciones es constante, o como lo hacen presumir los resultados parciales, cambia estacionalmente.

Las series se han agrupado según su correspondencia con la época seca o lluviosa.

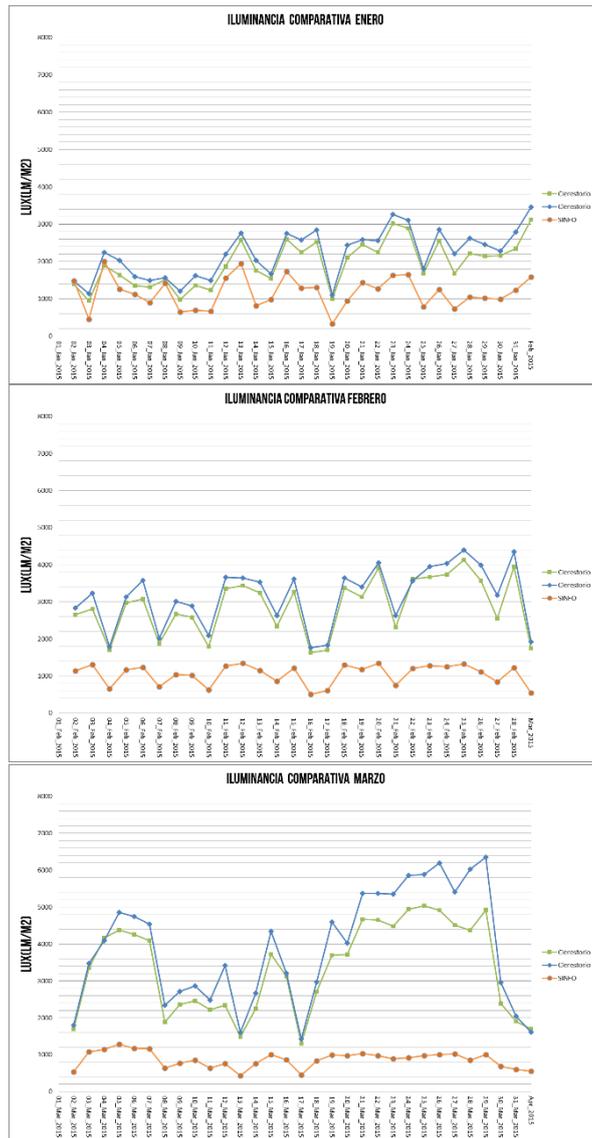
6.1.1 Estación Seca

A continuación se muestran los gráficos comparativos para los meses de diciembre, enero, febrero, y marzo.



ESCUELA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

San José, Costa Rica



Figuras de la 81 a la 84: Comparación mensual entre los valores promedio de iluminancia diaria durante los meses de la estación seca

Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC)

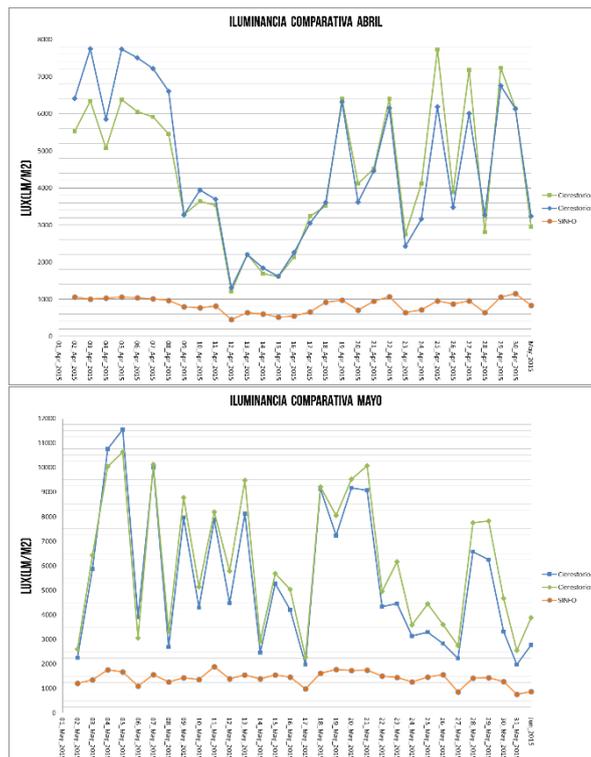
Resulta de particular interés, la cercanía en las líneas de rendimiento durante los meses de diciembre, y enero. En este periodo las diferencias netas entre el lucernario y el SINFO se encuentran en el orden de los 250-500Lx, con tres días específicos durante los cuales, el rendimiento promedio de ambas técnicas es equivalente. Posteriormente, a partir del mes de febrero, las diferencias entre las series empiezan a expandirse a una tasa de 1000-2000Lx por mes.

Este crecimiento en la diferencia de rendimiento presenta dos características, por una parte es irregular, al igual que la disponibilidad del recurso solar externo, con días específicos donde la amplitud de la diferencia es de tan solo 400Lx. Por otro lado, se da en un periodo climático sin variación significativa de la cobertura nubosa, con lo cual, se puede afirmar que el factor

responsable por el crecimiento de la diferencia de rendimiento, es de tipo geométrico, y se relaciona directamente con una incidencia solar cenital.

6.1.2 Estación lluviosa

Durante el periodo siguiente, se aprecia un cambio radical en la distribución de los datos, con un incremento sumamente amplio, e irregular en la diferencia del rendimiento lumínico. Los gráficos correspondientes a los meses de abril y mayo, se muestran a continuación.



Figuras de la 85 a la 86: Comparación mensual entre los valores promedio de iluminancia diaria durante los meses de la estación lluviosa

Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC)

En estos meses, el rendimiento del lucernario sufre oscilaciones muy fuertes, con picos cercanos a los 10.000 Lx, y valles en el orden de los 2500Lx. Esta tendencia de cambios rápidos refleja una particular susceptibilidad a los cambios bruscos de cobertura nubosa del cielo, típicos de esta época del año. A pesar de ello, los valores reportados por los sensores en el lucernario, se encuentran siempre por sobre los valores del SINFO, los cuales, no obstante a esa inferioridad, son mucho más regulares y consistentes. En este sentido resulta aparente que un lucernario de orientación paralela al recorrido solar diario (dirección Este-Oeste) requiere de algún planteamiento de protección externo para la homogenización de los valores de iluminancia interna, y la prevención del excesivo ingreso de radiación solar.

Comparación de Factor de Aprovechamiento (DF%)

Con base en las series anteriores, se procedió a calcular el factor de aprovechamiento de luz diurna, DF%. Los gráficos se presentan de en periodos semestral y trimestrales. Al igual que en el caso anterior, las líneas en azul y verde representan el rendimiento del lucernario; mientras que la línea naranja representa el rendimiento del SINFO.

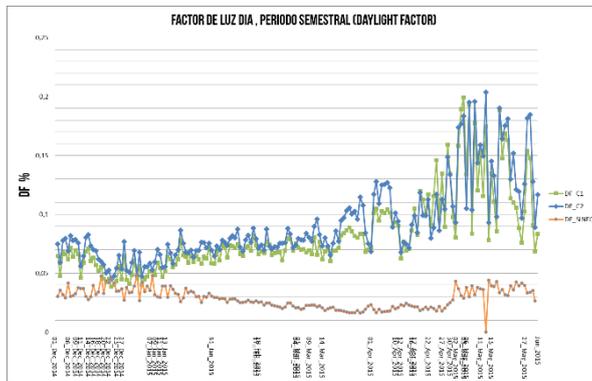


Figura 87: Comparación del factor de luz día (DF%) promedio, durante el periodo semestral
Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC)

Una visualización semestral contribuye a la comprensión del crecimiento en la diferencia de rendimiento, a medida que se avanza del solsticio de invierno hacia el solsticio de verano. Además de esto se aprecia un cambio brusco en la uniformidad de la distribución de los datos hacia el final del semestre, desde mediados de abril hasta finales de mayo.

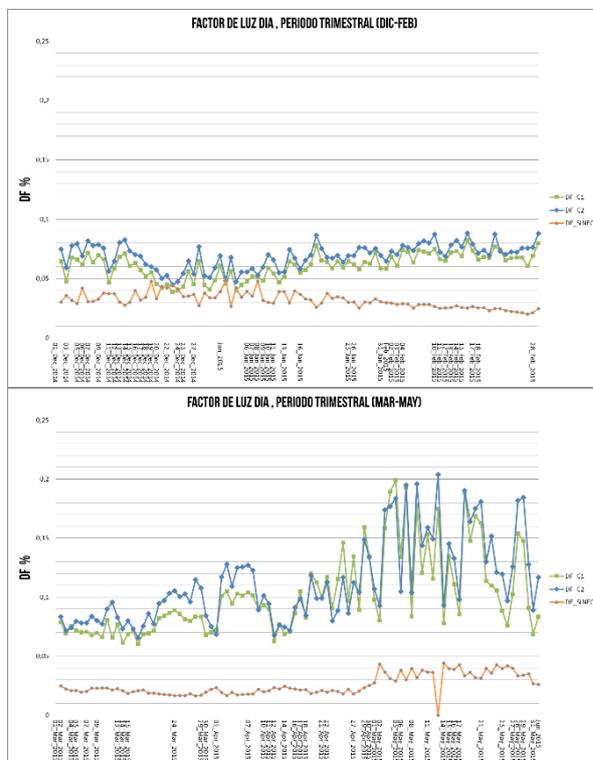


Figura 88 y 89: Comparación del factor de luz día durante dos periodos trimestrales
Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC)

Con una mayor resolución, es evidente que durante el primer trimestre de estudio, existe una correlación cercana entre la iluminancia del lucernario y del SINFO, con coincidencia temporal de picos y valles de cada serie.

Sobre este comportamiento, distinto en intensidad, pero paralelo en tendencia, se detalla, que durante la segunda quincena del mes de diciembre y la primera quincena del mes de enero específicamente, se obtiene la menor diferencia semestral del DF% entre ambas técnicas. La magnitud de la separación entre los valores durante este sub-periodo es de 4% como máximo.

Durante el segundo trimestre, es notable una mayor diferencia entre las series, con valores mínimos de aproximadamente 6%, y valores máximos de hasta 16%. Adicionalmente, a medida que entra en efecto la temporada lluviosa a finales del mes de abril, se incrementa la intensidad y la irregularidad de la diferencia entre las series.

En términos de lectura e interpretación este comportamiento apunta a una combinación de efectos simultáneos. En primer lugar, una irregularidad propia del aumento de la cobertura nubosa principalmente en horas de la tarde. Esta situación climática tiene una implicación directa, disminuyendo la uniformidad de los niveles de iluminancia interna tanto para el SINFO como el lucernario, pero en mayor medida para el segundo.

En segundo lugar, se encuentra el efecto de una incidencia solar más directa sobre el espacio interno, gracias a una posición casi cenital sobre la bóveda celeste. Esta situación es la principal responsable por los elevados picos de rendimiento en el lucernario durante los días despejados. Sin embargo, incluye consigo un enorme potencial de discomfort por deslumbramiento y/o acumulación excesiva de carga térmica.

SIMULACIÓN PREDICTIVA DE RENDIMIENTO DE LUCERNARIOS VIA *RADIANCE + DAYSIM*

Una vez establecida la comparación experimental de rendimiento entre las dos técnicas de transporte vertical de la luz, surgen dos conclusiones parciales del proceso.

Por una parte resulta claro, que la intensidad de iluminancia resultante en el espacio interno, es mucho mayor en el caso del lucernario, principalmente por el mejor aprovechamiento de la radiación difusa. Esto evidencia que la técnica del SINFO, requeriría de un mucho mayor volumen de producción, a través de más lentes, y más fibras, para equiparar el rendimiento del lucernario.

Tal situación es la responsable del crecimiento del SINFO comercial de la empresa norteamericana Sunlight Direct, planteado como el equipo original para esta investigación.¹⁹



Figura 90: Imagen del SINFO modelo T6 de la empresa norteamericana Sunlight Direct
Fuente: Stan Rothwell, Sunlight Direct Inc.

En segunda instancia, se hace necesario, el uso de una herramienta que permita predecir el comportamiento de la luz dentro del lucernario, en función de eventuales modificaciones sobre sus tres dimensionamientos básicos: Área de huella, profundidad, y orientación.

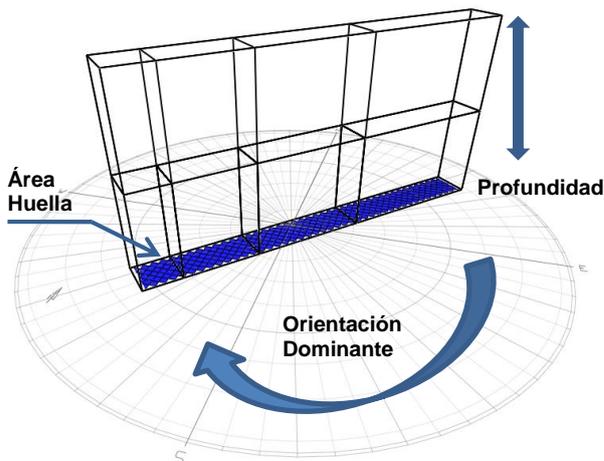


Figura 91: Ilustración de las tres principales variables en el dimensionamiento de un lucernario
Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC).

El primer paso para el montaje de un modelo predictivo es la calibración de la herramienta de simulación, a través de una exploración iterativa entre los ajustes de variables de configuración, y los promedios experimentales obtenidos mediante el sistema de monitorización.

Como se ha mencionado previamente, la herramienta de simulación principal elegida, es el trazador inverso (backward raytracer) Radiance 4.0, desarrollado por Greg Ward en el Laboratorio Nacional de Lawrence Berkeley (LBNL) California, bajo el patrocinio del departamento de energía de los Estados Unidos (US.DOE); y el Instituto para la Eficiencia Energética de California (CIEE).¹⁶

Esta es una suite de programas para el análisis y la visualización de la iluminación en ambientes construidos.¹⁶ Es una herramienta validada científicamente por una serie de estudios e investigaciones previas, y hoy en día constituye el motor de cálculo más utilizado a nivel mundial para la predicción, y el diseño de espacios y tecnología de iluminación.¹⁶

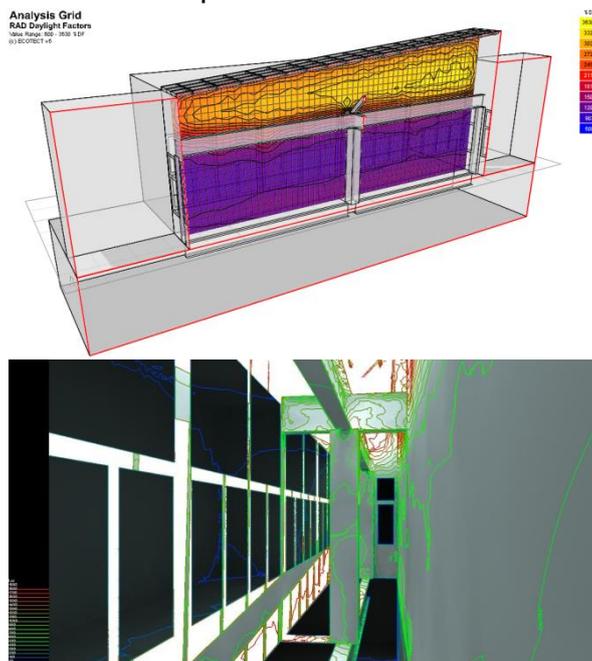
En términos de procedimiento, la interfaz gráfica de modelado y lectura de resultados fue el programa Autodesk Ecotect Analysis, y el modelo de calibración fue el correspondiente al lucernario, como se muestra a continuación:

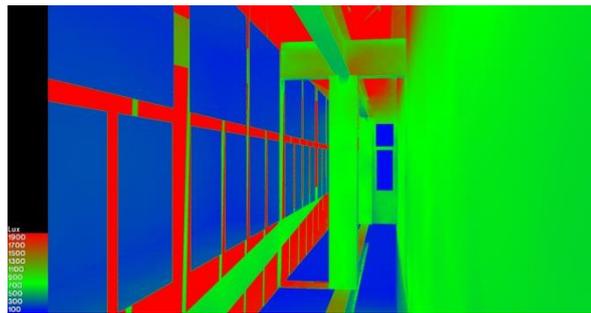


Figura 92: Visualización del modelo 3D analítico en Radiance 4.0
Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC).

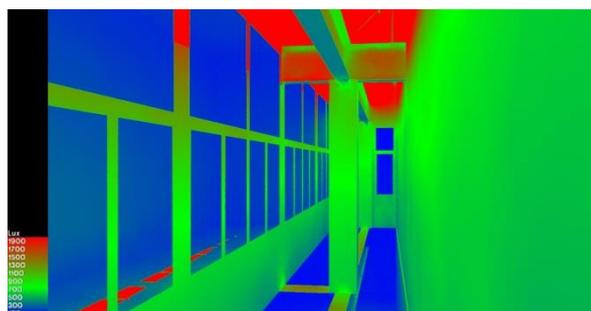
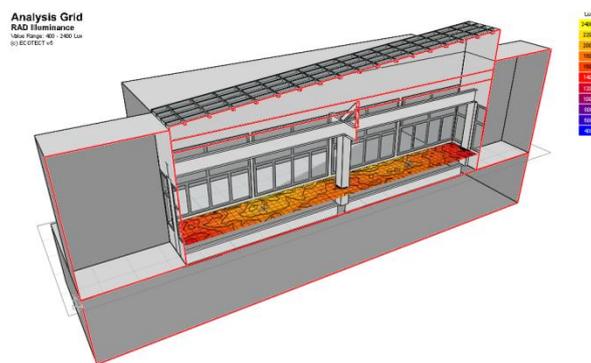
Con base en este modelo, se corrieron múltiples simulaciones de luz incidente (iluminancia), en fechas claves para posteriormente cotejar los resultados obtenidos con los registros reales del sistema de monitorización. Los resultados se estudiaron tanto en visualizaciones bidimensionales (sobre grilla de análisis) como tridimensionales (render de color falso, y líneas de contorno).

Algunas ilustraciones de este proceso se muestran a continuación:





Figuras de la 93 a la 95: Secuencia de imágenes de SGC, durante el equinoccio de primavera.
Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC).



Figuras de la 96 a la 98: Secuencia de imágenes de SGC, durante el solsticio de invierno.
Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC).

Posterior a la calibración del motor de cálculo, se procedió a implementar una herramienta posterior de análisis, que permite tomar los resultados escalares del paso anterior, y combinarlos con la información climática real del sitio, para producir métricas de rendimiento discutidas previamente en las secciones 3.1.3 y 3.1.4.

La herramienta seleccionada para este propósito fue *DAYSIM 3.1*, software de simulación validado, basado en clima (climate-based), desarrollado bajo la

coordinación del Dr. Christoph Reinhart, en colaboración con el Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (ISE), la Universidad de Harvard, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), y el Consejo Nacional de Investigación de Canadá (NRC).¹⁶

DAYSIM es capaz de incorporar variables de comportamiento de usuario, demanda eléctrica por área, y registros climáticos, para producir estimaciones de desempeño energético de un sistema lumínico y determinar el cumplimiento de ciertos criterios del sistema de certificación norteamericano *LEED*.¹⁷

9/25/2015 DAYSIM Simulation Output

DaySim Simulation Report

In short...

- **Daylight Factor (DF) Analysis:** 91% of all illuminance sensors have a daylight factor of 2% or higher. If the sensors are evenly distributed across 'all spaces occupied for critical visual tasks', the investigated lighting zone should qualify for the LEED-NC 2.1 daylighting credit 8.1 (see www.usgbc.org/LEED/).
- **Daylight Autonomy (DA) Analysis:** The daylight autonomies for all core workplane sensors lie between 48% and 96%.
- **Useful Daylight Index (UDI) Analysis:** The Useful Daylight Indices for the Lighting Zone are UDI₁₀₀₋₂₀₀₀ 8%, UDI₁₀₀₋₂₀₀₀ 39%, UDI₂₀₀₀₊ 54%.
- **Continuous Daylight Autonomy (DA_{cont}) and DA_{max} Analysis:** 92% of all illuminance sensors have a DA_{cont} above 80% . 92% of all illuminance sensors have a DA_{max} above 5% .
- **Electric Lighting Use:** The predicted annual electric lighting energy use in the investigated lighting zone is: 2.5 kWh/unit area.

Simulation Assumptions

Site Description: The investigated building is located in SAN (0.93 N/ 84.08 E).

User Description: The zone is occupied Monday through Friday from 7:00 to 17:00. The occupant leaves the office three times during the day (30 minutes in the morning, 1 hour at midday, and 30 minutes in the afternoon). The total annual hours of occupancy at the work place are 2067.0. The electric lighting is activated 2614.6 hours per year. The occupant performs a task that requires a minimum illuminance level of 400 lux. The predicted annual electric lighting energy use of 2.5 kWh/unit area **Lighting and Blind Control:** The electric lighting system has an installed lighting power density of 1.50 W/unit area and is manually controlled with an on/off switch. The office has no dynamic shading device system installed.

Scene Visualization: The figure below shows a visualization of the building model.



Detailed Simulation Results

The table below shows the daylight factor and various climate-based daylighting metrics for all sensor points individually. Definitions of these metrics can be found [here](#). To guide the reader's eye, the following color code is used:

- Coordinates of core workplane sensors are shown in **blue**.
- Daylight factor levels over 2% are shown in **green**.
- Annual light exposure levels of medium and high sensitivity (CIE Categories III and IV) are shown in **dark green and light green**.

x	y	z	DF [%]	DA [%]	DA _{cont} [%]	DA _{max} [%]	UDI ₁₀₀ [%]	UDI ₁₀₀₋₂₀₀₀ [%]	UDI ₂₀₀₀₊ [%]	OSDP [%]	annual light exposure [luxh]
3.489	0.216	0.890	1.6	53	77	5	6	87	7	91	5896968
3.270	0.444	0.890	1.7	51	78	4	6	87	6	94	4559839
3.489	0.444	0.890	1.8	57	81	5	5	87	7	98	6122845
3.087	0.444	0.890	1.8	52	79	4	7	87	6	94	4505950
3.272	0.672	0.890	1.9	50	77	4	7	87	6	93	4466973
3.270	0.672	0.890	1.9	54	79	4	6	86	6	96	4629148
3.489	0.912	0.890	1.7	53	79	4	6	87	7	96	4658793
3.087	0.912	0.890	1.9	49	77	4	7	87	6	92	4462911
3.086	0.912	0.890	1.8	54	80	4	5	88	6	97	4656040

file:///D:/dropbox/Proyectos/Investigacion/TCR/ANALISIS/DAYSIM/Modulo/Analisis/Niveles/res/Horizontal/2N_d1.htm 1/6

Figura 99: Ilustración de la página de resultados del motor de simulación Daysim 3.1
Fuente: Equipo de investigación (EAU-TEC).

Además de producir las métricas *DF%* y *DA400*, previamente descritas, DAYSIM es también capaz de predecir el potencial riesgo de sobrecalentamiento a través de la métrica *Useful Daylight Illuminances 2000*, en adelante *UDI2000*.¹⁷

El indicador del UDI, fue inicialmente propuesto por Mardaljevic y Nabil en 2005.¹⁸ En esencia se trata de una medición dinámica basada en el aprovechamiento sobre un plano horizontal de trabajo. Tal como su nombre lo indica, es una métrica que intenta determinar la cantidad de iluminancia verdaderamente útil para el usuario, mediante el establecimiento de umbrales mínimo y máximo.¹⁸ En este caso, es de especial interés el umbral máximo, definido con la intención de detectar periodos de tiempo en que la sobreoferta de recurso lumínico, por encima de los 2000Lx, implica un riesgo de discomfort visual por deslumbramiento, o térmico por sobrecalentamiento.¹⁸

Así las cosas, los porcentajes de *UDI2000* señalan la cantidad de tiempo anual durante el cual, un acceso excesivo de radiación solar directa amenaza con inhibir el aprovechamiento del recurso lumínico.

La variable de la proporción de la huella

El área de la huella horizontal del lucernario, es el factor más decisivo de diseño, en función del aprovechamiento de luz natural en el espacio interno. Para esta investigación se ha decidido estudiar cuatro posibilidades de dimensionamiento horizontal, partiendo de un módulo básico de 1,20m, que crece proporcionalmente en sentido rectangular. Las proporciones estudiadas en el proceso de simulación fueron: 1:1, 1:2, 1:3, y 1:4; con dimensiones específicas de 1,20x1,20m; 1,20x2,40m; 1,20x3,60m; y 1,20x4,80m respectivamente.

Si bien, el tamaño de 1,20m es inferior al ancho mínimo para patios de luz (1,50m), definido en el Reglamento de construcciones de CR.19 Se he definido así, por corresponder con la eventual modulación de los principales sistemas constructivos basados en mampostería. En CR, estos sistemas se basan en unidades modulares de 30, 40, 80, 0 90 cm, de los cuales, los primeros 3 se acoplan a la dimensión de 1,20m sin ningún desperdicio de material.

La representación gráfica de lo anterior se muestra a continuación:

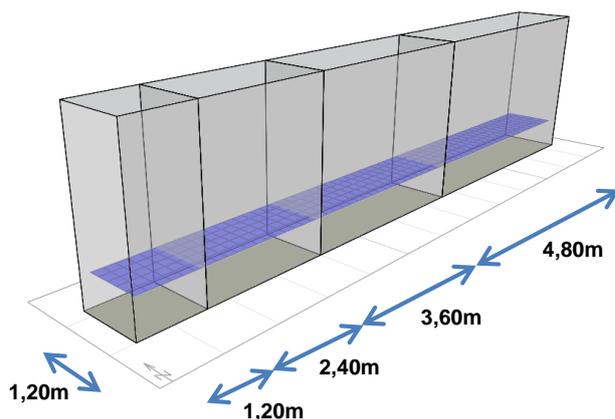


Figura 100: Ilustración del parámetro de dimensión de la huella
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)

La variable de la profundidad

En segundo lugar, pero aún de gran importancia sobre los resultados, se encuentra la distancia vertical entre el nivel de superficie de cubierta, y el nivel de piso terminado del área a evaluar. Este se considera, en lugar del plano de trabajo, por cuanto el elemento del piso también aporta iluminancia difusa rebotada, en dirección inversa a las fuentes de iluminancia directa. Además constituye una referencia más clara e intuitiva para el diseñador arquitectónico. En este sentido, es claro que una mayor distancia entre la cubierta y el piso del lucernario disminuye la intensidad de la iluminancia sobre el plano de trabajo, sin embargo la tasa de correlación entre la pérdida de intensidad lumínica, y el descenso en el riesgo por sobrecalentamiento está aún por determinarse.

Sobre esta variable, se trabajaron tres incrementos idénticos de 3 metros cada uno, dado que esta medida suele utilizarse ampliamente en la separación de losas de entrepiso de edificios de baja altura. En síntesis, se consideran de

esta manera edificios entre 1 y 3 niveles, que suelen ser los más comúnmente encontrados en el ambiente construido nacional.

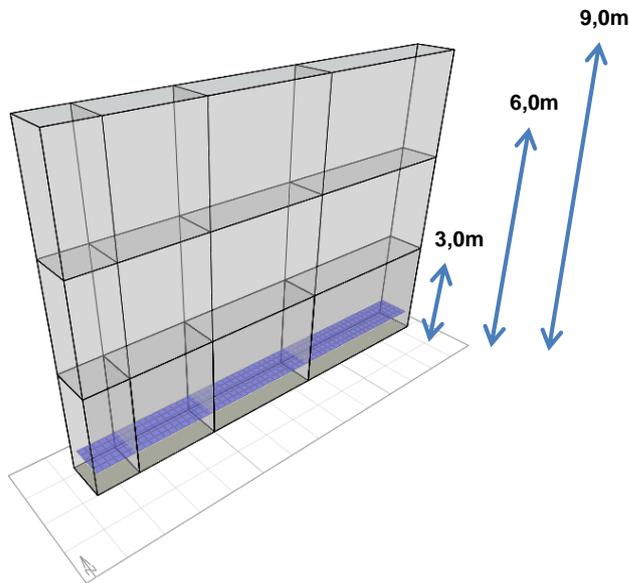


Figura 101: Ilustración del parámetro de la profundidad
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)

La variable de la orientación

Finalmente, el factor de orientación se consideró como un agente de afectación en cuanto a la duración de la radiación solar directa dentro del espacio del lucernario, sin embargo, los resultados de simulación demostraron consistentemente que esta variable es la de menor impacto sobre las métricas de rendimiento. Las tres posibilidades estudiadas son: Orientación predominante Norte-Sur, Este-Oeste, y Diagonal a 45 grados. Asimismo cuando se establece predominante, se implica que posibles variaciones de $\pm 10^\circ$ sobre los ejes establecidos, no tienen un impacto significativo sobre el rendimiento de la iluminancia.

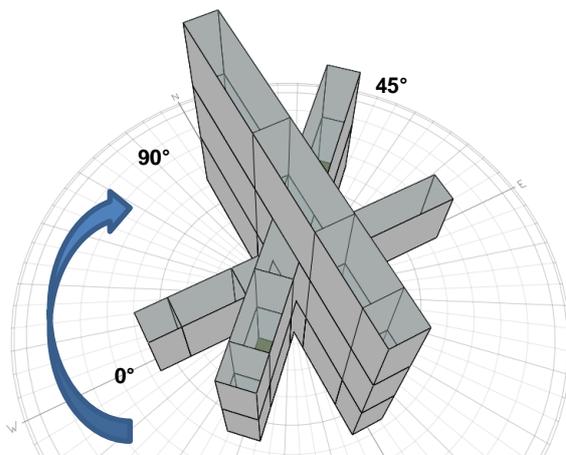


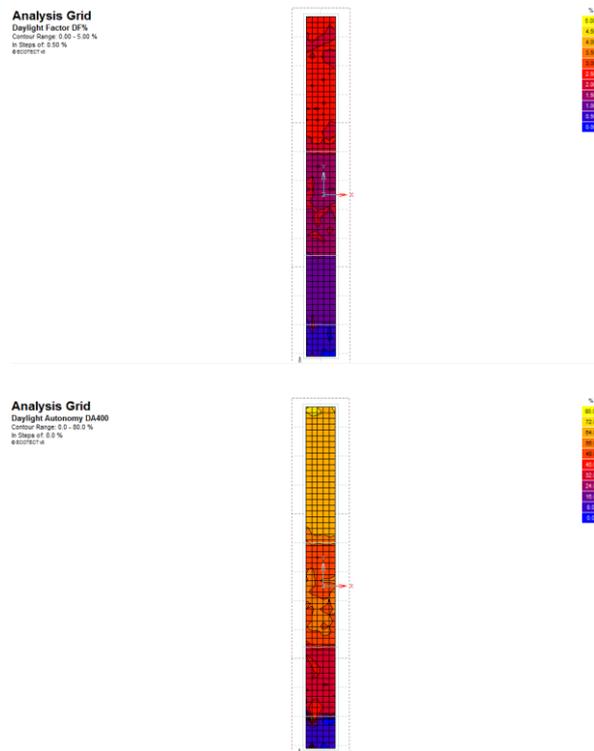
Figura 102: Ilustración del parámetro de orientación
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)

Proyecciones de Rendimiento

A continuación se muestran una serie de imágenes con los resultados de simulación de DAYSIM, incorporando la visualización gráfica de las tres métricas en cuestión, así como los seis gráficos de síntesis, con la proyección de rendimiento según las variables descritas anteriormente. En sí, todas las variables han sido consideradas en pares, tanto para la evaluación del rendimiento absoluto (DF%) con relación al riesgo de sobrecalentamiento (UDI2000); así como para la evaluación del rendimiento autónomo (DA400) también, contra el potencial sobrecalentamiento.

Finalmente estos cruces de variables son, agrupados según la orientación predominante del lucernario en planta, sea esta Norte-Sur, Este-Oeste, o Diagonal a 45°.

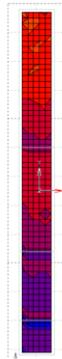
La primera secuencia de resultados, correspondiente a la orientación Norte-Sur, se muestra a continuación.



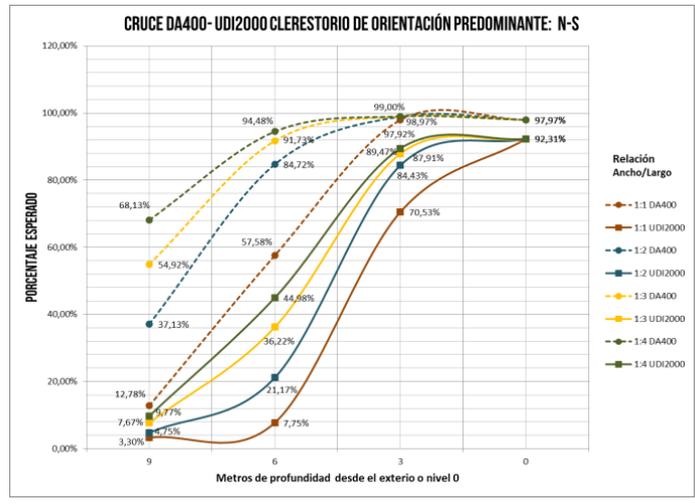
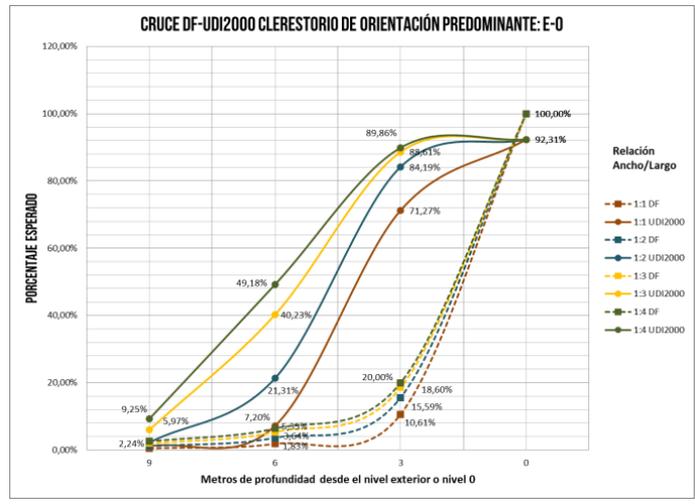
ESCUELA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

San José, Costa Rica

Analysis Grid
Useful Daylight Illuminance UDI2000
Causal Series: 0.8 - 20.8 %
In Steps of 2.0 %
w/contour

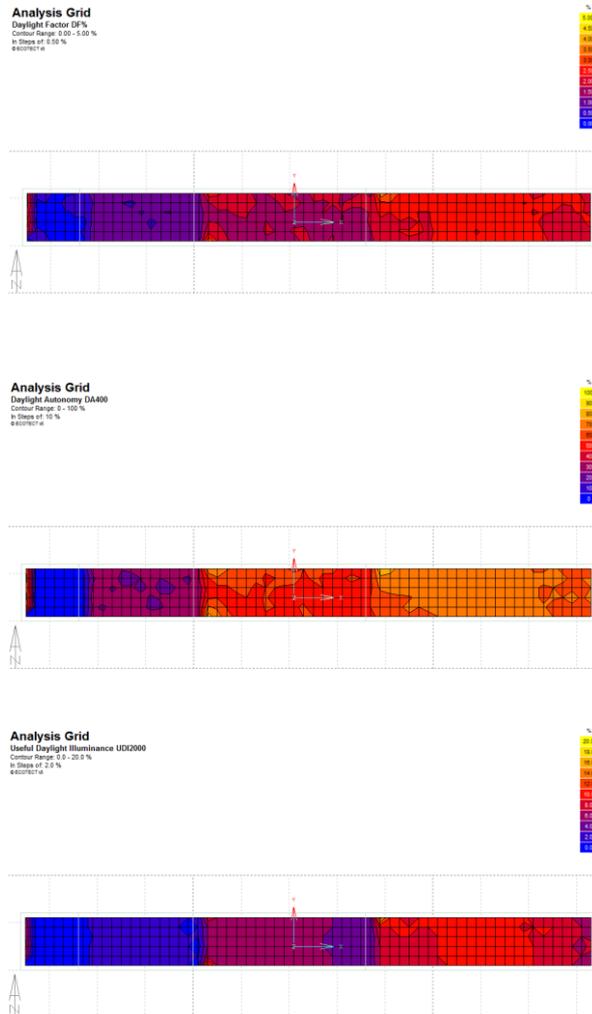


Figuras de la 103 a la 105: Resultados de simulación correspondientes a la orientación Norte-Sur
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)



Figuras 106 y 107: Gráficos de proyección de rendimiento, con integración de los 3 parámetros. Orientación Norte-Sur
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)

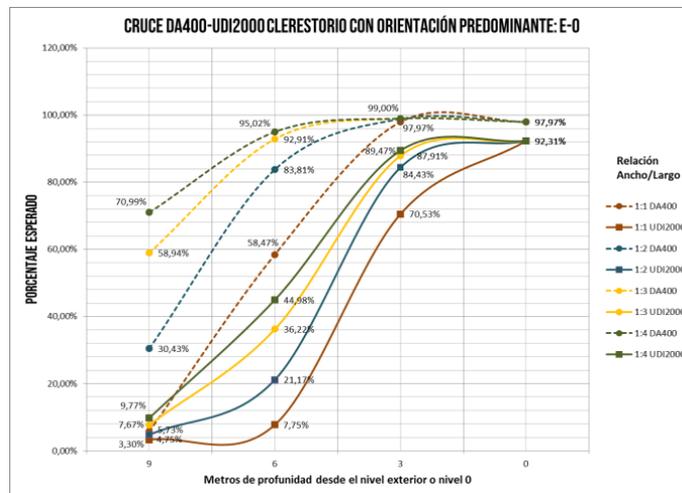
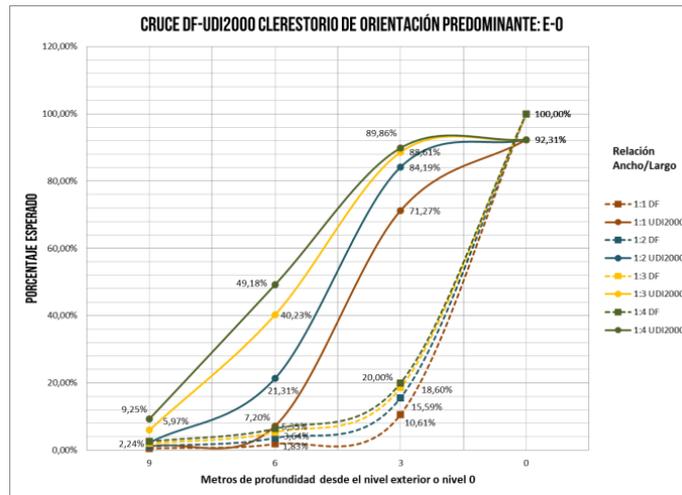
La segunda secuencia de resultados, correspondiente a la orientación Este-Oeste, se muestra a continuación. Cabe aclarar que cada métrica utiliza una escala con valor máximo independiente, 5% para el DF%, 100% para el DA400, y 20% para el UDI2000.



Figuras de la 108 a la 110: Resultados de simulación correspondientes a la orientación Este-Oeste
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

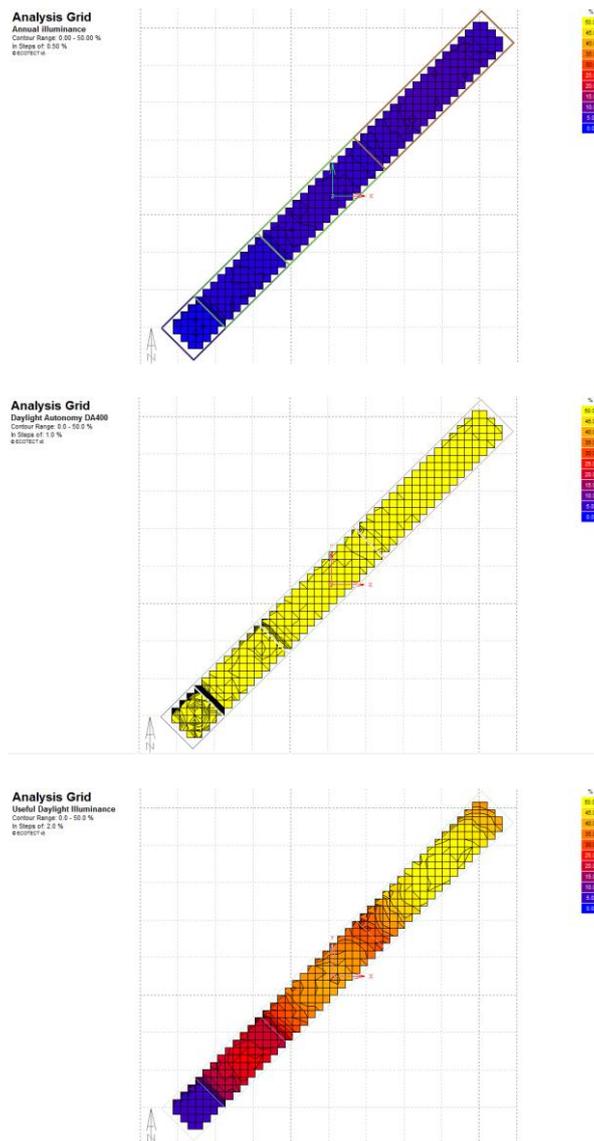
San José, Costa Rica



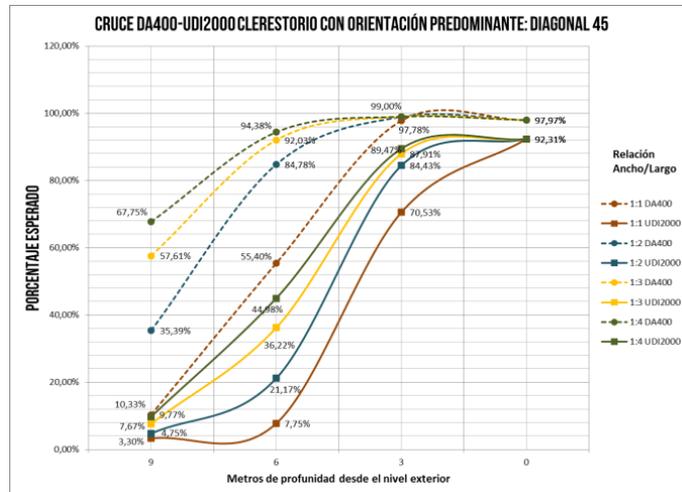
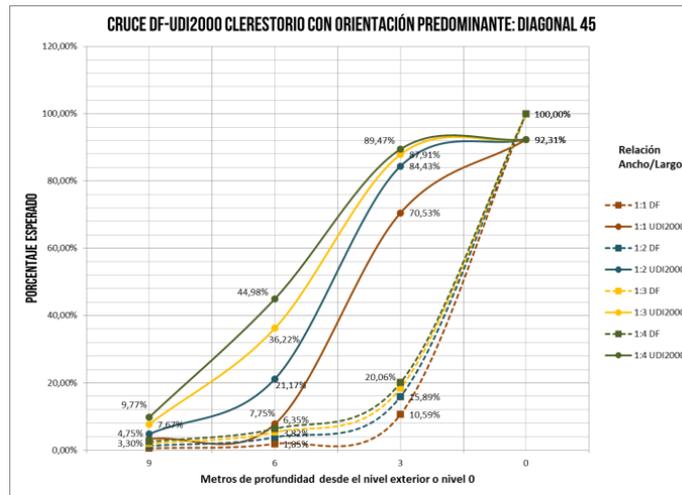
Figuras 111 y 112: Gráficos de proyección de rendimiento, con integración de los 3 parámetros. Orientación Este-Oeste
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)

Finalmente, la tercera secuencia de resultados, correspondiente a la orientación diagonal, se muestra a continuación. Tras una serie de simulaciones preliminares, se determinó que los resultados de invertir la dirección diagonal del sentido SurOeste-NorEste, a un sentido SurEste-NorOeste, son prácticamente nulos. Es decir, que los resultados son prácticamente iguales a nivel de magnitud.

En este caso se ha utilizado, con el propósito de evidenciar las diferencias absolutas entre resultados, una escala con valor máximo de 50% para las tres métricas.



Figuras de la 113 a la 115: Resultados de simulación correspondientes a la orientación Diagonal
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)



Figuras 116 y 117: Gráficos de proyección de rendimiento, con integración de los 3 parámetros. Orientación Diagonal
Fuente: Equipo de Investigación (EAU-TEC)

7.4.1 Interpretación general de los gráficos

Todos los gráficos presentados muestran la relación entre los porcentajes esperados para cada parámetro, y el aumento progresivo en la distancia desde la cubierta hasta el NPT en estudio. Los porcentajes se encuentran sobre la escala vertical, y la profundidad sobre la escala horizontal.

Las distintas series representan las variaciones en la proporción de la huella de cada módulo, desde el cuadrado de 1:1, hasta el rectángulo 1:4. Bajo esta lógica, cada gráfico presenta un total de ocho series con las cuatro posibilidades de huella para dos métricas específicas.

El estudio de la correlación entre estos “pares” de métricas permite visualizar el aprovechamiento del lucernario con una visión preventiva contra el sobrecalentamiento. En todos los casos, se utiliza la línea a guiones para la métrica de rendimiento, y la línea sólida para la métrica de riesgo. Los colores son coincidentes para representar la misma proporción de la huella.

7.4.2 Rendimiento del DF% vs el UDI2000

El primer par de métricas estudiadas, corresponde al factor de aprovechamiento de luz-diurna (DF%) en relación con el riesgo de sobrecalentamiento (UDI2000).

En este sentido, todas las variaciones de orientación son consistentes al mostrar unos valores de DF% inferiores al 20% en todas las profundidades. De igual manera, el rendimiento de la proporción 1:1 es sumamente bajo con valores inferiores al 11% en todas las profundidades. Por su parte el rendimiento lumínico de las proporciones 1:3 y 1:4 es prácticamente idéntico, con diferencias absolutas del orden de 1-2%; pero con una disminución significativa del UDI2000 entre un 5-10%. Finalmente el rendimiento de la huella con proporción 1:2 es relativamente superior al 1:1, alrededor de 3-5%, al tiempo que mantiene valores de UDI2000 bastante más bajos que la huella 1:3, específicamente entre un 15-20%.

En síntesis, la proporción de huella 1:2 muestra la relación más ventajosa entre rendimiento lumínico y riesgo de sobrecalentamiento. Especialmente en profundidades de 3 a 6 metros (1-2 niveles). En segundo lugar se encuentra la huella 1:3 con un rendimiento lumínico elevado y un riesgo de sobrecalentamiento manejable, particularmente en profundidades de 6-9 metros (2-3 niveles). En el caso de la proporción 1:1 se descarta por un rendimiento lumínico sumamente bajo (menor al 2%), a excepción de una profundidad de 3 metros (1 nivel). Finalmente, las huellas de proporción 1:4 o superiores implican un riesgo de sobrecalentamiento sumamente alto, a excepción de profundidades cercanas a los 9 metros (3 niveles) donde, por su alto rendimiento lumínico, parecen ser la mejor opción de diseño.

7.4.3 Rendimiento del DA400 vs el UDI2000

Los resultados anteriormente descritos, son fácilmente mal interpretables, especialmente por los porcentajes del DF% siempre por debajo del 20%.

Por esta razón la métrica del DA400 (Autonomía lumínica a 400Lx) brinda una mejor idea de la autosuficiencia lumínica real de cada espacio. En estos gráficos las líneas de las distintas series se encuentran más cerca, con el uso de líneas a guiones para el DA400 y línea sólida para el UDI2000.

En este caso, las proporciones de 1:3 y 1:4 tienen rendimientos de DA400 sumamente altos, logrando valores superiores al 50% aún en profundidad de 9 metros (3 niveles) sin embargo mantienen altas posibilidades de sobrecalentamiento en profundidades de 3 y 6 metros. La huella de proporción 1:2 sigue logrando la mejor relación con un mayor balance entre rendimiento y riesgo. Sus valores de DA400 son de 98%, 97%, 85%, y 40% para profundidades correspondientes de 3, 6, y 9m. Al mismo tiempo, sus valores de UDI2000 son de 84%, 21% y 5% respectivamente, lo cual demuestra que es una dimensión de diseño de alto rendimiento a excepción de la profundidad de 3 metros.

De manera interesante, la huella con proporción 1:1 demuestra tener un buen rendimiento lumínico en profundidades de entre 3 - 4,5 metros, situación que abre el abanico de posibilidades para el diseñador arquitectónico.

9-Discusión y conclusiones

A manera de recopilación se agrupan una serie de conclusiones, acorde a la etapa de la investigación en que fueron distinguidas.

Sobre el aprovechamiento de la radiación solar con fines de iluminación arquitectónica:

- La radiación solar global incidente sobre la superficie terrestre tiene aportes tanto de componente directo como difuso, cuyo aprovechamiento debe de hacerse diferenciadamente por parte del diseñador arquitectónico.
- El componente de radiación solar difusa es fácilmente aprovechado por lucernarios de poca profundidad.
- El diseño de lucernarios a más de 6 metros de profundidad (en edificios de 4 a más niveles) requiere del aprovechamiento controlado de la radiación solar directa.
- La radiación solar difusa, no es aprovechable a través de los lentes Fresnel, los cuales requieren de haces con incidencia directa, para concentrar el cono de luz hacia la fibra óptica

Sobre el diseño de un SINFO para su uso en países dentro de la franja tropical:

- El rango geométrico de movimiento que un concentrador solar debe cubrir dentro de la franja tropical es sumamente amplio, con ángulos horizontales máximos de 47° y verticales máximos de 170°.4
- La cobertura nubosa altamente variable de la franja tropical hace que la disponibilidad de radiación solar directa sea altamente variable con fluctuaciones rápidas. Esto compromete la uniformidad de rendimiento de los lentes Fresnel y de todo el SINFO.
- Los componentes del sistema de movimiento, especialmente la gata mecánica responsable del eje horizontal, debe protegerse más en contra de los agentes externos, tales como polvo, basura, y ceniza volcánica.
- El gran rango de movimiento al que se exige al concentrador, limita el grosor máximo de la fibra a utilizar, lo cual disminuye el rendimiento general del sistema. El uso de más fibras de 3mm demanda un sistema de motores más potente, y por consiguiente una mayor demanda energética, lo cual contradice el objetivo general del sistema.

Sobre el diseño de un lucernario para su uso en países dentro de la franja tropical:

- Los patios de luz tradicionalmente utilizados en estas latitudes suelen adaptarse con cubiertas traslúcidas para eliminar el ingreso de precipitación y aprovechar utilitariamente el área bajo ellos, por lo cual es conveniente desde un punto de vista de diseño arquitectónico, considerar el uso de lucernarios cubiertos, desde la etapa inicial.
- Las tres principales variables de diseño para un lucernario, son en orden de importancia, la profundidad (distancia entre cubierta y NPT), la proporción de la huella, y su orientación con respecto del azimut solar.
- Los resultados de las herramientas de simulación computacional *Radiance* y *Daysim*, a pesar de estar validadas experimentalmente¹², requieren de un riguroso proceso de calibración para predecir de manera precisa, el rendimiento lumínico en condiciones reales. Por esta razón, su uso es de mucho mayor provecho bajo una lógica de comparación de opciones de diseño, en lugar de una aproximación 100% precisa del resultado lumínico final.
- En términos de dimensionamiento, el lucernario con proporción de huella 1:1 parece ser el más adecuado para edificios de un nivel de profundidad (3m aproximadamente), independientemente de su orientación. La huella de proporción 1:2 es ideal para lucernarios de 3 a 7,5 metros de profundidad, con un balance óptimo entre rendimiento lumínico y bajo riesgo de sobrecalentamiento. Al igual que en el caso anterior, su rendimiento es relativamente independiente de la orientación, gracias a un buen aprovechamiento de los rebotes de luz indirecta.
Las huellas 1:3 y 1:4 presentan características muy similares, con predilección por la 1:3 en lucernarios de hasta 9 metros de profundidad, por lograr un menor riesgo de sobrecalentamiento sin sacrificio sensible de rendimiento lumínico.
En lucernarios con más de 9 metros de profundidad pueden utilizarse huellas de proporción 1:4 o superior, con la especial excepción de la orientación Este-Oeste para la cual, el riesgo de sobrecalentamiento se mantiene alto a pesar del crecimiento de la profundidad.
- El factor que hace la diferencia sustancial entre el rendimiento del SINFO y el lucernario, es la capacidad para el aprovechamiento de la radiación solar difusa, con una menor carga térmica y una mayor eficacia lumínica (lm/W), que la radiación solar directa.

10- Recomendaciones

Entre las recomendaciones para futuras líneas de investigación se tienen:

- Los hallazgos de esta investigación sirven como base, a futuros proyectos que quieran ampliar la gama de escenarios de dimensionamiento y dispositivos de protección externa, específicamente para el trabajo con lucernarios de gran tamaño.
- La conformación de un equipo de investigación multidisciplinario y bien coordinado son factores clave, para el abordaje de proyectos ambiciosos de alta complejidad.

- El uso de herramientas de simulación computacional de alta precisión presentan una curva de aprendizaje considerable, y de alta necesidad iterativa. En este sentido unos de los objetivos clave de proyectos basados en esta tecnología, debe ser el de traducir los resultados de la misma, en guías de diseño fácilmente legibles y comprensibles por los profesionales del gremio.
- El objetivo de la eficiencia energética no puede perderse de vista a medida que se exploran nuevas posibilidades para el aprovechamiento de los recursos naturales. De otra manera, los requerimientos energéticos de las tecnologías propuestas pueden equiparar o hasta superar el ahorro potencial.

11-Agradecimientos

Un agradecimiento de mi persona en mi calidad de Director y de compañero en esta coyuntura de desarrollar un proceso de investigación, para ayudar a consolidar un anhelo de un joven arquitecto, recién incorporado al cuerpo docente de la Escuela de Arquitectura y Urbanismo, en un aspecto obligado en todo proceso procesal arquitectónico como lo es el diseño eco sustentable, me refiero al Ma. Arq. Sebastián Orozco Muñoz, quién con su recientes estudios de posgrado, permitió desarrollar este tema, soportar el peso administrativo consuetudinario a este tipo de trabajos, que consideramos pionero y que a no dudarlo podrá dar base a otros procesos de investigación. Un agradecimiento especial a los estudiantes de la Escuela de Arquitectura y Urbanismo: Claudio Jiménez, Vicente Navarro, Isaac García, Bibiana Jiménez y Susan Segovia. A los miembros de la Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial, a su profesor Mario González, a los estudiantes Melvin Jiménez y Andrés Montero, a la Escuela de Ingeniería en Materiales, a su profesor José Luis León, a la Escuela de Ingeniería Electrónica, específicamente la Carrera de Mecatrónica, a su profesora Arys Carrasquilla, a sus estudiantes William Jiménez, Pablo César Rodríguez y Kevin Rodríguez. Recurso humano que conformó un equipo ante una disyuntiva crucial en nuestro trabajo, en que por razones de tiempo, cambió el panorama en cuanto a costos del equipo SINFO a comprar, de manera exorbitante, obligándonos a diseñar uno propio, construirlo y montar el sistema de una forma exitosa con el equipo de las escuela ya indicadas, lo cual le dio un viraje a la investigación de alcances insospechados, por las posibilidades que las otras escuela le dan a dicho equipo.

Cabe también hacer extensivo el agradecimiento a la Institución que nos permitió llevar a cabo este proceso de investigación, por medio de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y a su Dirección de Proyectos. A la compañera Sivia Campos, quién siempre nos dio su apoyo y consejo en nuestros primeros pasos de necesidades de compra de materiales y equipos.

12-Referencias

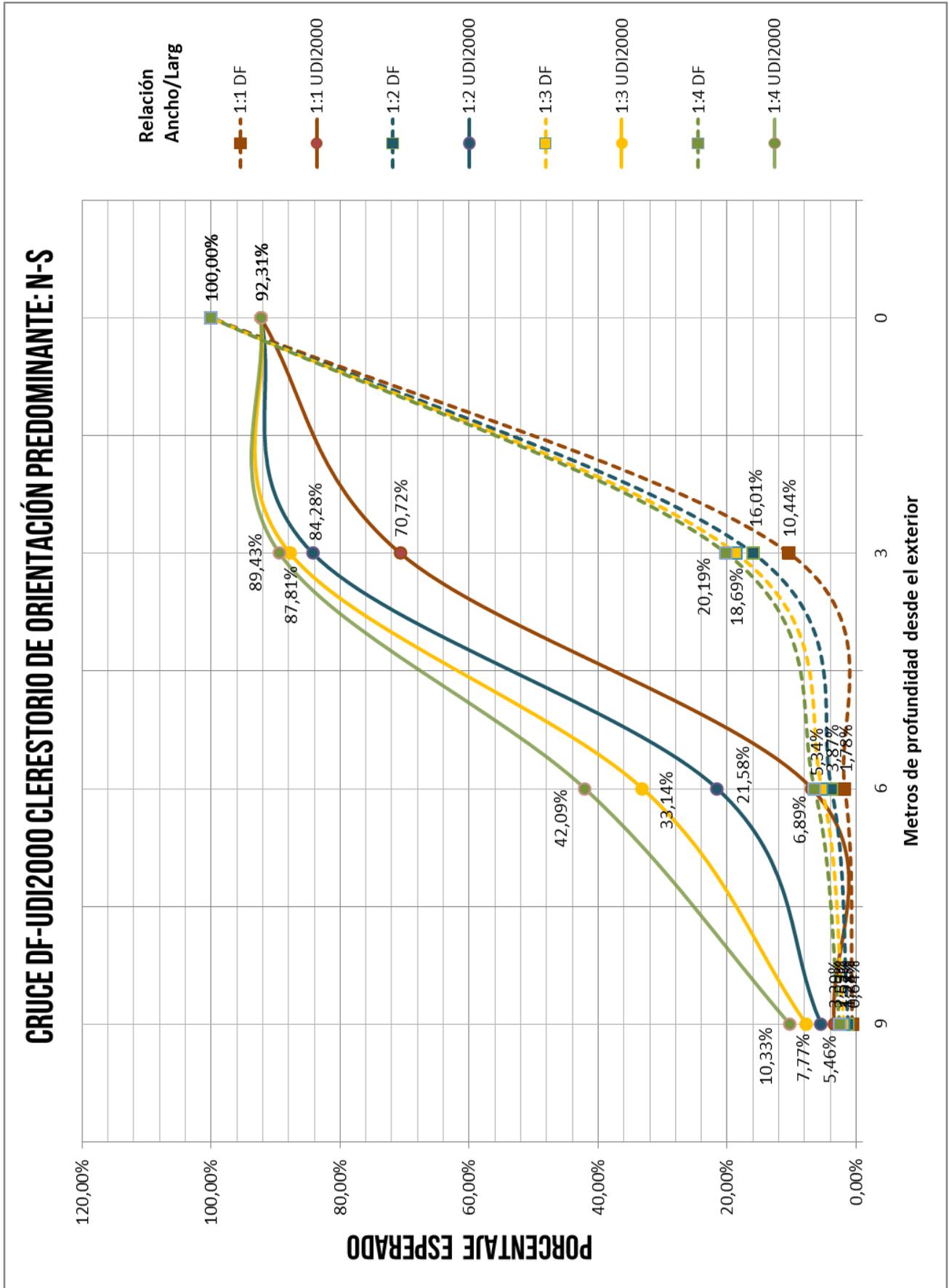
- 1) Advanced Daylighting Group. (1999). *Technical solid core information*. Unpublished manuscript.
- 2) André, E., & Schade, J. (2002). *Daylighting by optical fiber* (Master of Science).
- 3) Apian-Bennewitz, P. (2015). Radiance knowledge database. Retrieved from <http://www.radiance-online.org/>
- 4) Boyce, P., & Raynham, P. (2009). In Boreham S., & Hadley P. (Eds.), *The SLL lighting handbook* (001st ed.). Inglaterra: The Society of Light and Lighting. doi:<http://www.oneeffect.com/public/Lighting-Standards/sll%20handbook%20INTERNATIONAL.pdf>
- 5) Chaiwiwatworakul, P., & Chirarattananon, S. (2013). Luminous efficacies of global and diffuse horizontal irradiances in a tropical region. *Renewable Energy*, 53, 148-158. doi:10.1016/j.renene.2012.10.059
- 6) Colzman-Freyberger, C. (2002). *Citation from LTU-EX-02260-SE*. Lorrach, Germany: BSR Solar Technologies GmbH.
- 7) Lam, J. C., & Li, D. H. W. (1996). Luminous efficacy of daylight under different sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 37(12), 1703-1711. doi:10.1016/0196-8904(96)00021-0
- 8) Lam, J. C., & Li, D. H. W. (1996). Luminous efficacy of daylight under different sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 37(12), 1703-1711. doi:10.1016/0196-8904(96)00021-0
- 9) Marsh, A. J. (2007). RADIANCE and daylight factors. *Natural Frequency*, 1(004) doi:<http://naturalfrequency.com/articles/radiancedf>
- 10) Miller, J. V., & Miller, R. E. (2006). In Miller M. (Ed.), *Museum lighting, pure and simple* (1st ed.). Seaford, Delaware: NoUVIR Research. doi:<http://www.nouvir.com/pdfs/MuseumLighting.pdf>
- 11) Miller, M. (2013). In Orozco S. (Ed.), *Correo electrónico personal* (S. Orozco Trans.). Massachusetts, USA: NoUVIR Lighting.
- 12) Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: A new paradigm to access daylight in buildings. [Iluminancia Natural Útil: Un nuevo paradigma para el acceso de luz natural en edificios] *Lighting Research & Technology*, 1(37), 41-59.

- 13) Palmer, J. M., & Grant, B. G. *Art of radiometry* SPIE. Retrieved from <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAR000006/art-of-radiometry/art-of-radiometry>
- 14) Reinhart, C. F. (2010). *Tutorial on the use of daysim simulations for sustainable design* (001st ed.). Cambridge, MA 02138, USA: Graduate School of Design, Harvard University.
- 15) Reinhart, C. F. (2011). Simulation-based daylight performance predictions. In J. Hensen, & R. Lamberts (Eds.), *Building performance simulation for design and operation* [Predicciones de rendimiento de iluminación natural, basadas en simulación] (S. Orozco Trans.). (1st ed.,). Boston, USA: Taylor & Francis.
- 16) Rothwell, S. (2013). In Arq. Sebastián Orozco (Ed.), *Quick update - preparing proposal for the T6 solarlightingsystem [FWD: Re: Quote]* (Arq. Sebastián Orozco Trans.). (- ed.). Escondido, CA 92009 USA: Senior Systems Engineer.
- 17) Ryer, A. D. (1997). In Technical Publications Dept. (Ed.), *Light measurement handbook* (2nd ed.). Newburyport, MA 01950-4092: International Light Inc. doi:<http://www.dfisica.ubi.pt/~hgil/fotometria/HandBook/Light-Measurement.1.pdf>
- 18) Schott, A. (2002). *Technical specifications - schott fiber optics*. Unpublished manuscript.
- 19) United States Green Building Council, USGBC. (2014). In Fedrizzi R. (Ed.), *LEED V4 user guide* (4th ed.). Washington, DC 20037: doi:<https://kapost-files-prod.s3.amazonaws.com/published/54886ef033efbe406e00012a/ebook-leed-v4-user-guide.pdf>

13-Apéndices

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

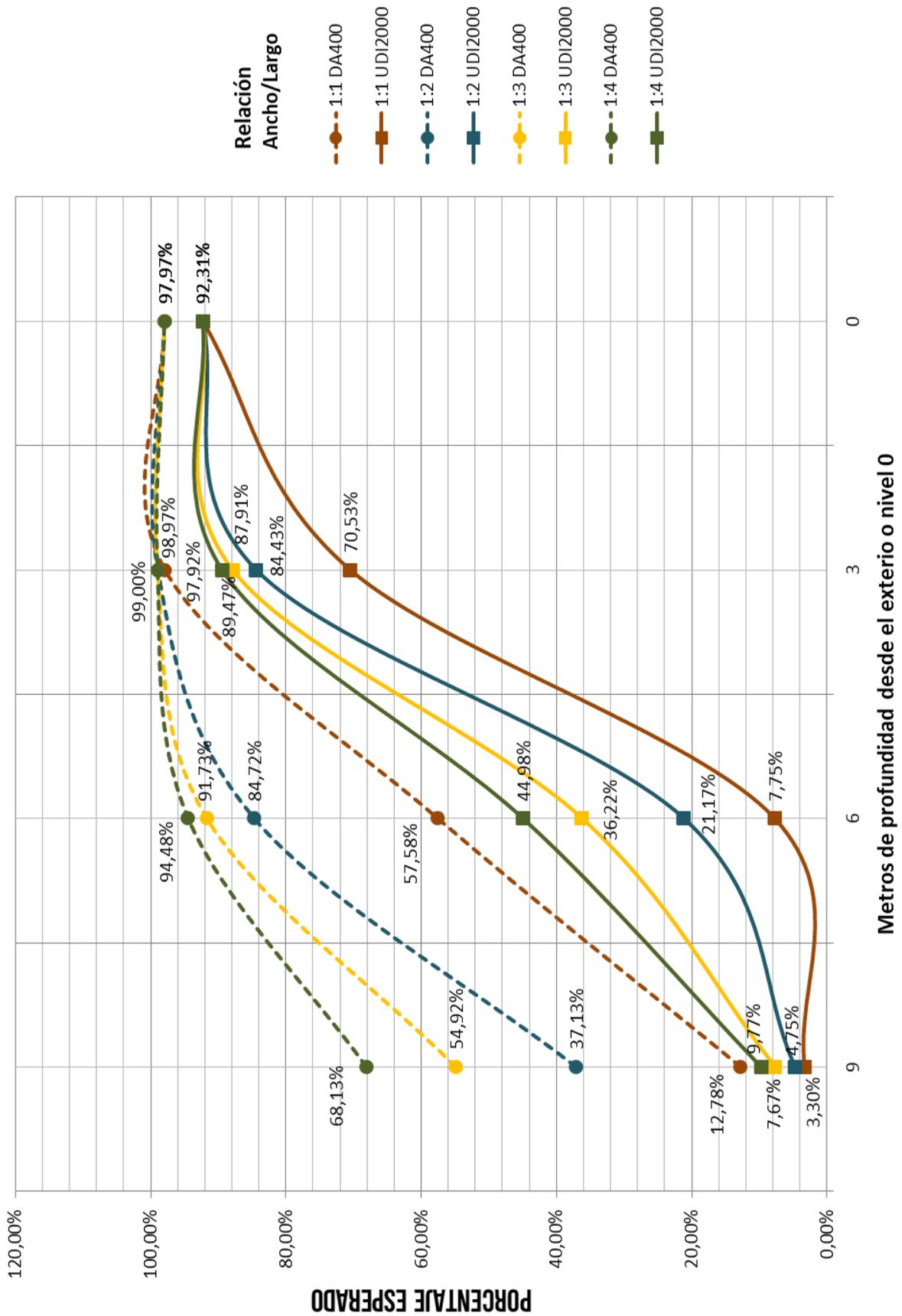
San José, Costa Rica



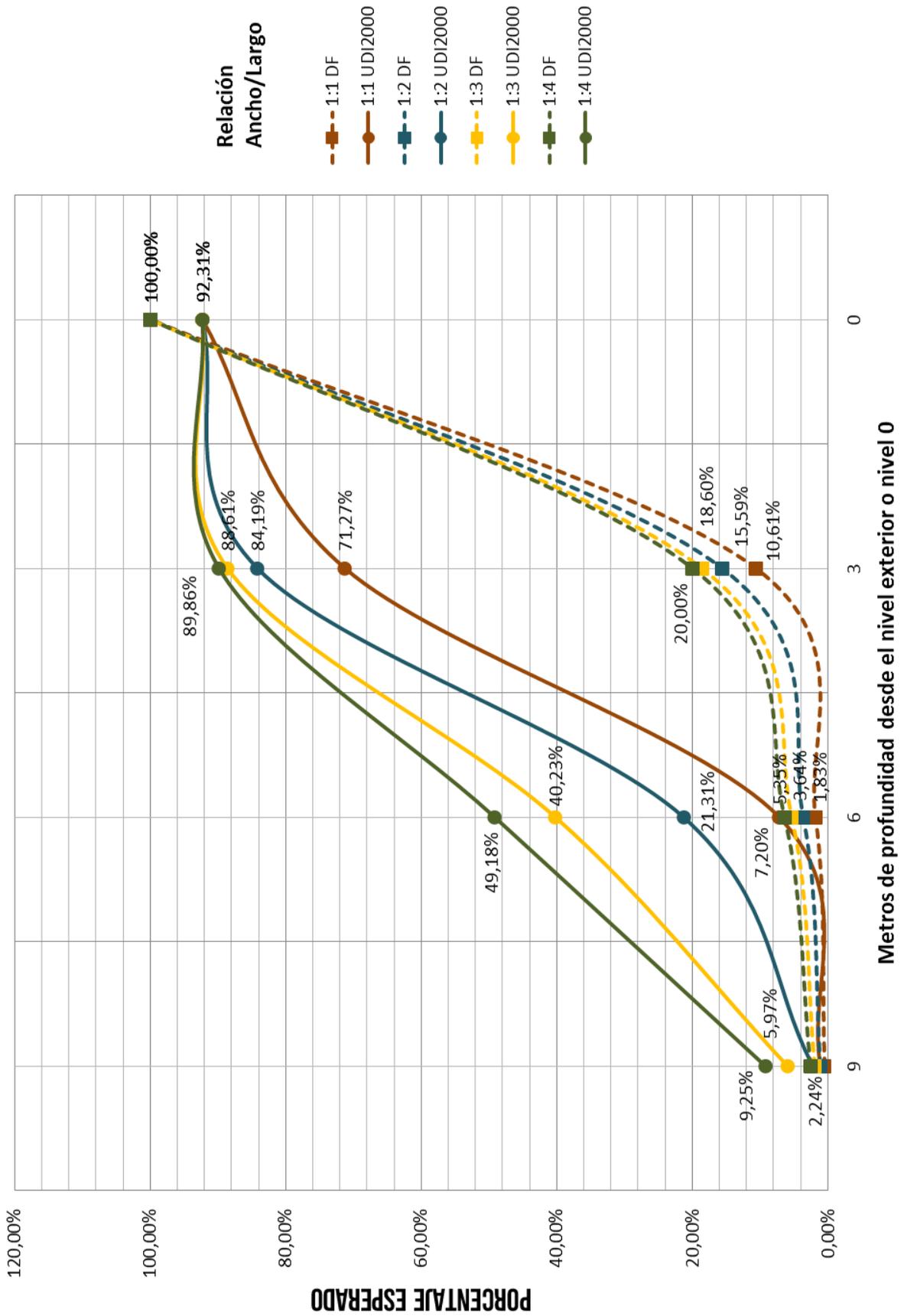
ESCUELA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

San José, Costa Rica

CRUCE DA400- UDI2000 CLERESTORIO DE ORIENTACIÓN PREDOMINANTE: N-S



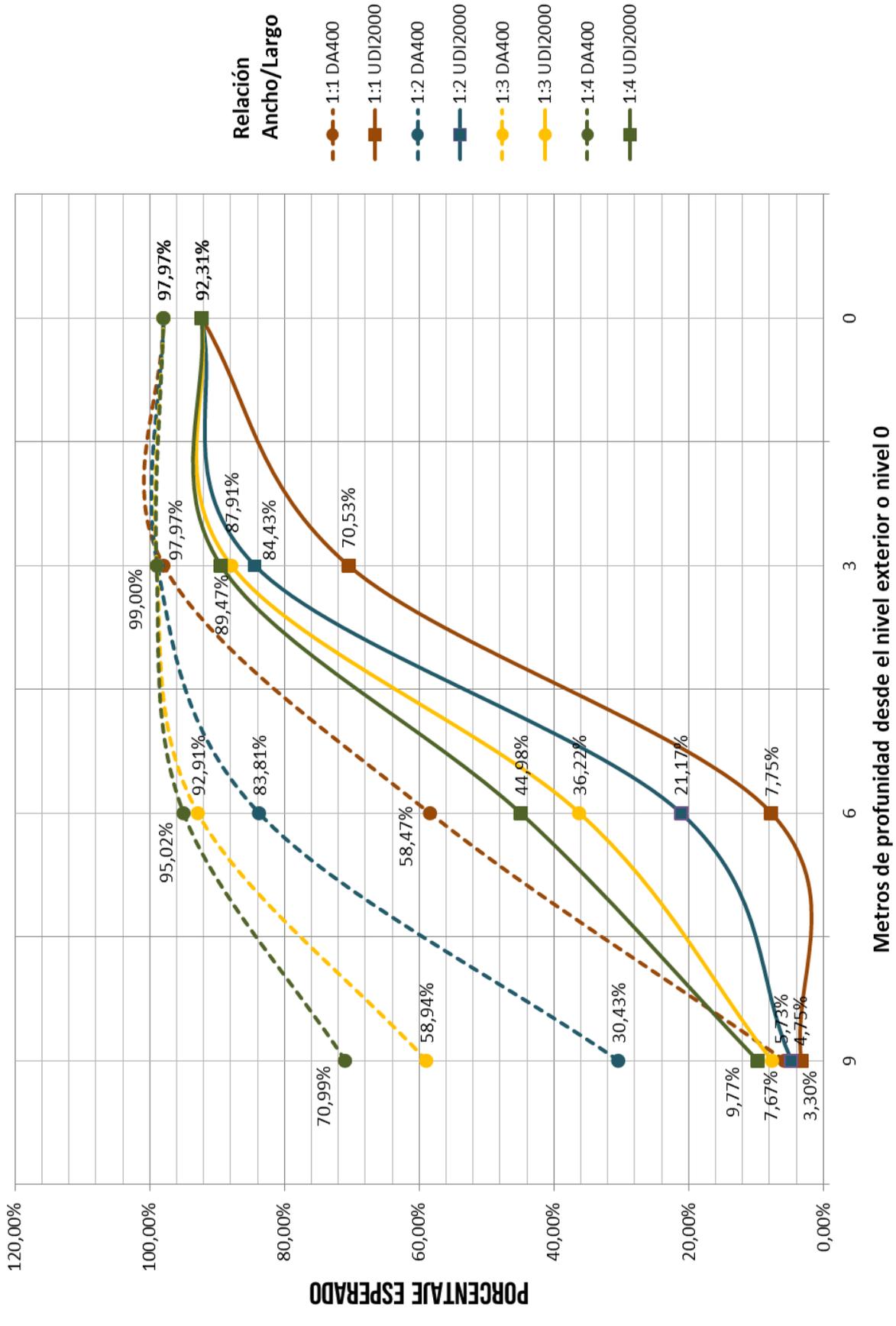
CRUCE DF-UDI2000 CLERESTORIO DE ORIENTACIÓN PREDOMINANTE: E-O



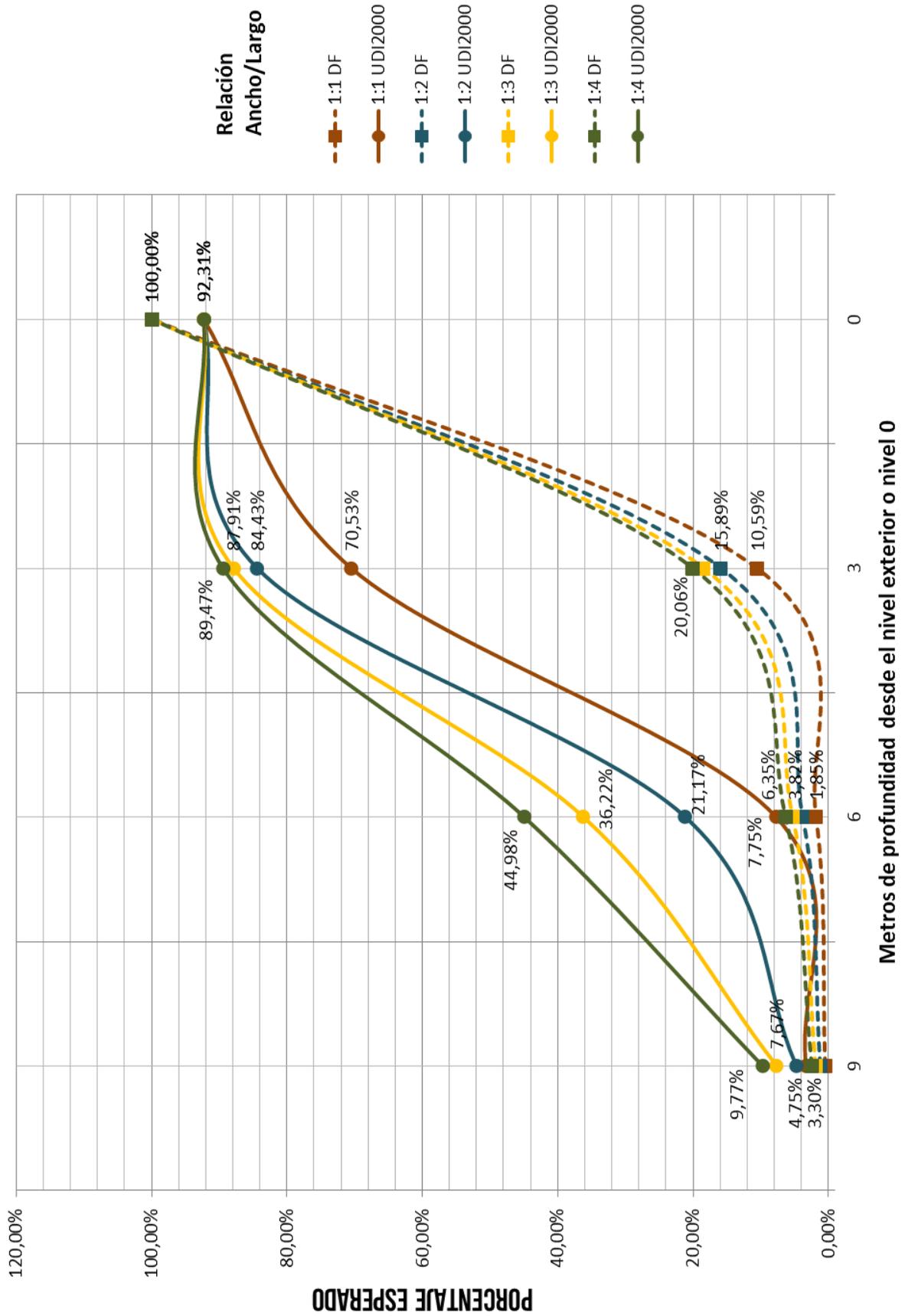
ESCUELA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

San José, Costa Rica

CRUCE DA400-UDI2000 CLERESTORIO CON ORIENTACIÓN PREDOMINANTE: E-O



CRUCE DF-UDI2000 CLERESTORIO CON ORIENTACIÓN PREDOMINANTE: DIAGONAL 45



CRUCE DA400-UDI2000 CLERESTORIO CON ORIENTACIÓN PREDOMINANTE: DIAGONAL 45

