



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

**OPTIMIZACION GEOMETRICA DE ATRIOS CON POTENCIAL DE ILUMINACIÓN
NATURAL EN EDIFICACIONES AISLADAS EN ALTURA**

Alejandra Susa Páez

Arquitecta

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
MAGISTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA.**

Profesora Guía: Dra. Beatriz Piderit
Profesor Co-Guía: Dr. Rodrigo García

Concepción, 09 de Marzo de 2020



*"La luz artificial es sólo un breve momento estático de la luz,
es la luz de la noche y nunca puede igualar a los matices
creados por las horas del día y la maravilla de las
estaciones".*

Louis Kahn (Architectural Design, 1961)

Resumen

La civilización humana y sus hábitats, se encuentran inmersos en un tiempo de crisis ambiental y climática, por lo cual es premisa la implementación rigurosa de criterios de sostenibilidad ambiental en los diferentes hábitats urbanos y su conjunto edificatorio para dar respuesta efectiva a buenas condiciones de habitabilidad, garantizando la calidad de vida de la población presente y futura en relación a las pilares ambiental, económico y social de un desarrollo sostenible.

Los centros de las ciudades contemporáneas han sufrido a través del tiempo, fenómenos de densificación y compactación urbana que han generado todo tipo de propuestas urbanas y arquitectónicas, de las cuales, una buena parte no ha sido concebida teniendo en cuenta criterios sustentables sino obedeciendo a factores económicos especulativos. A causa de que la mayoría de edificaciones a gran altura presentan grandes áreas en planta, se producen altos gastos energéticos para suplir las necesidades de iluminación en el núcleo central de estas; lo anterior evidencia que el recurso de iluminación natural generalmente no se tiene en cuenta como un elemento determinante de diseño arquitectónico para esta tipología de edificios. De acuerdo a lo anterior, esta investigación se enfoca en el estudio de la tipología del espacio atrio como estrategia de diseño de iluminación natural para edificios en altura con superficies en planta entre 900 y 2500 m² y desde 15 niveles de altura.

Los atrios son espacios con variadas funcionalidades ambientales, estéticas y sociales, los cuales han estado presentes desde la arquitectura clásica, sufriendo diferentes cambios a través de la historia. La implementación de estos espacios en el diseño de dichas edificaciones, permite reducir grandes gastos energéticos y contribuir con el confort y bienestar de sus ocupantes. Para realizar la investigación, se partió por el estudio de las principales variables de diseño anteriormente investigadas de atrios centrales verticales, que permiten un comportamiento lumínico óptimo en el atrio y los espacios adyacentes. Así mismo se hizo un análisis del contexto urbano, edificatorio y climático de la ciudad de Santiago de Chile como lugar de estudio y se construyó un modelo teórico paramétrico que integró toda la información, dando como resultado 216 variaciones morfológicas a ser evaluadas por método de simulación lumínica dinámica.

A partir de los resultados de simulación por métrica UDI, se seleccionaron las configuraciones geométricas con mayor potencial lumínico y se construyeron lineamientos de diseño para cada superficie en planta evaluada. Los resultados dan cuenta de la pertinencia de los atrios como estrategia de iluminación natural efectiva en esta tipología de edificios, dando solución al déficit de iluminación natural que presentan las áreas centrales de grandes superficies en planta con 15 niveles de altura o más. Así mismo, la pertinencia de nuevos estudios sobre el comportamiento térmico y el bienestar por afectación del ciclo circadiano en los ocupantes que puede ofrecer dichas tipologías optimizadas.

TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS	7
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.3. RELEVANCIA DEL PROBLEMA.....	4
1.4. HIPÓTESIS.....	4
1.5. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.7. METODOLOGÍA.....	5
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1. DEFINICION Y DESARROLLO HISTÓRICO DEL ATRIO.....	7
2.2. CATEGORIZACIÓN DE ATRIOS.....	14
2.3. ILUMINACIÓN NATURAL Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ESPACIOS ATRIO	17
2.4. TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN LUMÍNICA EN ATRIOS.....	19
2.5. VARIABLES DE DISEÑO GEOMÉTRICAS Y MATERIALIDAD EN ATRIOS CENTRALES Y ESPACIOS ADYACENTES PARA EL COMPORTAMIENTO ÓPTIMO DE ILUMINACIÓN NATURAL.	22
2.6. CONFORT VISUAL EN ESPACIOS DE OFICINA: ILUMINACIÓN NATURAL	29
2.6.1. ESTANDAR NACIONAL Y NORMATIVA INTERNACIONAL DE DISEÑO Y EVALUACIÓN PARA ILUMINACIÓN NATURAL Y CONFORT VISUAL.....	¡Error! Marcador no definido.
3. DEFINICIÓN DEL ESTUDIO DE CASO.....	37
3.1. FUNCIÓN Y TIPOLOGÍA DE EDIFICIO ESCOGIDO.	37
3.2. FORMULACIÓN DE CASO BASE DE ESTUDIO.....	39
3.2.1. SELECCIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO PARA CASO BASE.....	39
3.2.2. Definición de herramienta de simulación para el estudio de iluminación natural por métrica dinámica UDI.	54
3.2.3. Metodología de evaluación lumínica.....	55
3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
3.3.1. RESULTADOS FASE 1. DE EVALUACIÓN LUMÍNICA. Proporciones geométricas del modelo, sin WWR en fachadas exteriores de espacios adyacentes.	58
3.3.2. RESULTADOS FASE 2. DE EVALUACIÓN LUMÍNICA.	72
4. LINEAMIENTOS DE DISEÑO	81
4.1. VARIABLES E INDICES DE PROPORCIÓN GEOMETRICA DEL ATRIO Y ESPACIOS ADYACENTES.	81
4.2. VARIABLES DE DISEÑO MATERIALES.....	87

4.3. CUADROS RESUMEN DE LINEAMIENTOS DE DISEÑO	89
5. CONCLUSIONES	91
6. INVESTIGACIONES FUTURAS	95
7. BIBLIOGRAFÍA.....	96
8. ANEXOS	99

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Santiago de Chile. Fuente: https://www.flickr.com/photos/transmundi/albums/72157667472738467	2
Ilustración 2.Comparación lumínica edificios sin y con espacio atrio integrado. Fuente: Hung & Kong (2003).....	2
Ilustración 3. Esquema metodológico de investigación. Fuente: Elaboración propia	7
Ilustración 4. Planta y fotografía de la Casa del Meleagro, Pompeya. Fuente: artehistoriaestudios.blogspot.com ..	8
Ilustración 5.ilustración del Palacio de Cristal de Paxton por parte de los Hermanos Dickinson, 1851.	9
Ilustración 6. Edificio Bradbury. Los Angeles USA, 1897. Arq. George H. Wyman. Fuente: https://arquiscopio.com/archivo/2013/02/16/edificio-bradbury-de-los-angeles/	10
Ilustración 7. Edificio Guggenheim de Nueva York. Frank Lloyd Wright. Fuente: https://www.newyorker.com/magazine/1959/12/05/what-wright-hath-wrought	11
Ilustración 8. Atrio del Museo Británico de Londres. Norman Foster, 2000. Fuente: http://www.tublogdearquitectura.com/2012/11/british-museum-museos-del-mundo/	11
Ilustración 9. Torre Jin Mao, Shangai, 1999. Fuente: https://www.skyscraper.org/EXHIBITIONS/SUPERTALL/jinmao.php/http://doi.org/10.5169/seals-59947	12
Ilustración 10. Edificio Commerzbank Headquarters, 1997. Alemania. Norman Foster + Partners. Fuente: https://www.fosterandpartners.com/es/projects/commerzbank-headquarters/	13
Ilustración 11. Edificio Leeza SOHO, Beijing, China,2019. Zaha Hadid Architects. Fuente: https://www.zaha-hadid.com/architecture/leeza-soho/	13
Ilustración 12. Clasificación y /o categorización de tipos de atrios según morfología. Fuente: Saxon,1985.....	14
Ilustración 13. Categorías de atrio según Enio Kainlauri. 1987.	15
Ilustración 14.Clasificación de atrios según Yoshino, Ito; Aozasa. 1995.....	15
Ilustración 15.Tipologías de 4 tipos de atrio. Fuente: Hung & Chow,2001.....	16
Ilustración 16.Clasificación de los atrios en edificios de Hong Kong, Según aspectos de proporción geométrica. Fuente: Chow.2011.....	16
Ilustración 17. Clasificación de los atrios en edificios de Hong Kong según su ubicación en el edificio. Fuente: Chow.2011.....	17
Ilustración 18. Resultados de DF en piso de atrios de modelos investigados por Acosta. Fuente: Acosta:2018	21
Ilustración 19.Tabla de resultados de DA y consumo de energía por latitudes en modelos investigados por Acosta, 2018	21
Ilustración 20. Pozos de luz y ventilación estudiados por Ahadi, Saghafi y Tahbaz 2018.....	23

Ilustración 21. Detalle de las superficies de acristalamiento del atrio con WI: 1.11. Fuente : Calcagni y Paroncini.	23
Ilustración 22. Diferentes valores de DF en los espacios contiguos según índice WI y valores de reflectancia en paredes del atrio.....	24
Ilustración 23.Diagrama esquemático de diferentes clarestorios de atrio. H: altura del atrio; h = altura de la ventana del claristorio. Investigación Ghasemi_2015.....	25
Ilustración 24.Comparación entre el ADF de simulación (Sim) y las mediciones experimentales (Exp) en un modelo de atrio con 4 m y 8m de altura de claristorio respectivamente. Fuente: Investigación Ghasem_2015i.	25
Ilustración 25.Diagramas esquemáticos de la definición del ángulo de visión del cielo y el ángulo de altitud para la habitación en cada piso. Fuente: Investigación Ghasemi_2015 / Source: CSTC.	26
Ilustración 26. Evaluación de Niveles de iluminancia natural para 8, 6 y 4 pisos por debajo de un atrio de 17 metros de ancho con espacios adyacentes de 11mt. Fuente: Guía de patrones de Diseño de Iluminación Natural. NBI.	27
Ilustración 27.Comparativa de relación aspecto geométrico de modelos. Fuente: Investigación Roldán_2016	27
Ilustración 28. Variaciones de modelo base de atrio de 4 caras. Fuente: Investigación Roldán_2016	28
Ilustración 29. Dimensiones promedio de 27 atrios de edificaciones en la ciudad de Santiago. Fuente: Roldan Rojas, 2016.....	38
Ilustración 30. Relación de dimensiones y configuración Formal de los 27 atrios estudiados por Roldan Rojas.2016.....	38
Ilustración 31. Veinte años de crecimiento urbano en la ciudad de Santiago de Chile. Fuente: Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales UC.....	40
Ilustración 32. Densificación urbana desde 1930 en sector centro, Plaza Baquedano, comuna de Providencia....	41
Ilustración 33. Densificación urbana, Sector centro, Comuna de Providencia.....	41
Ilustración 34.Ubicación geográfica de Santiago de Chile.....	42
Ilustración 35. Imagen satelital de Santiago de Chile. 2014. Fuente: NASA	42
Ilustración 36. Temperaturas mensuales, radiación y zonas de confort térmico para invierno y verano. Fuente: Elaboración propia en Climate Consultant.....	43
Ilustración 37.Grafica temperatura vs humedad y rangos de confort para la ciudad de Santiago. Fuente: Climate Consultant.....	43
Ilustración 38. Gráfica Velocidad y dirección de vientos en santiago. Fuente: meteoblue weather.	44
Ilustración 39. Diagrama Solar Ciudad de Santiago. Fuente: Weather Tool 2011.....	44
Ilustración 40. Frecuencia de cielos para la Ciudad de Santiago de Chile. Fuente: IluminaChile.Cl	45
Ilustración 41. Esquema de atrio vertical estudiado por Ghasemi, 2015.....	46
Ilustración 42. Características generales del modelo geométrico y localización de claristorios.	47
Ilustración 43. WWR (%) para superficies del atrio en niveles de Claristorios y espacios de oficinas.	52
Ilustración 44. WWR (%) para fachadas niveles de Claristorios y de espacios de oficinas.	52
Ilustración 45. Softwares utilizados para construcción de modelo y simulación lumínica.	55
Ilustración 46.Proporción de atrio 2:1 optimizada para la superficie en planta de 50x50m ² . Fase I de evaluación.	81
Ilustración 47.Proporción de atrio 2:1 optimizada para la superficie en planta de 30x30m ² . Fase I de evaluación.	81
Ilustración 48. Proporciones de atrio 1:2 y 1:1 optimizadas para la superficie en planta de 30x30m ² . Fase de evaluación II.....	84

Ilustración 49. Proporciones de atrio 1:1 y 2:1 optimizadas para la superficie en planta de 50x50m ² . Fase de evaluación II.....	84
Ilustración 50. Aplicación de regla básica de iluminación lateral en proporción geométrica con valor WI=2.7.	
Análisis de ángulos solares máximos y mínimos para invierno y verano.....	85
Ilustración 51. Regla básica de iluminación natural. (O'Connor, et. al, 1997).....	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de Iluminancia recomendada (lx). Fuente: EN 12464-1.....	30
Tabla 2. Actividad y valores mínimos de luminancia recomendados por IESNA. Fuente CITEC UBB	30
Tabla 3. Escala Factor de luz día. Fuente: Bülow-Hübe 2001/ TDRé.....	31
Tabla 4. Valores límite FLD. Fuente: TDRé.....	31
Tabla 5. Niveles de aplicación de la autonomía de luz día (DA). Fuente: Rensselaer Polytechnic Institute, 2010 / TDRé.....	31
Tabla 6. Valores de Autonomía de luz natural en el espacio (DA) mínimos exigidos para escuelas, oficinas y hospitales. Fuente: Ilumina 2014.....	31
Tabla 7. Rangos de valores de Iluminancia Util (UDI). Fuente: TDRé.....	31
Tabla 8. Valores límite de Índice de deslumbramiento de luz natural. (DGP). Fuente: TDRé.....	32
Tabla 9. Valores límite de Uniformidad Media. Fuente: TDRé.....	32
Tabla 10. Valores límites de reflectancias de las superficies interiores. Fuente: The Society Of Light And Lighting 2002/ TDRé.....	33
Tabla 11. Valores de Reflectancias: referencia de colores y materiales. Fuente: CITEC UBB./ TDRé.....	33
Tabla 12. Tipo de vidrios y valores de referencia para la elección de los cristales. Fuente: IDAE 2005 / TDRé.....	33
Tabla 13. Rango reflectancias para superficies interiores. Fuente: CIE	35
Tabla 14. Listado de actividades para edificios de oficinas con especificaciones de valores de iluminancia, limitación de deslumbramiento y calidad del color.....	36
Tabla 15. Iluminancia de entornos inmediatos.....	36
Tabla 16. Registro de Edificios de Gran Altura en Santiago de Chile. Fuente: www.emporis.com/city/santiago-chile	39
Tabla 17. Altitud solar para solsticios y equinoccios en Santiago. Fuente: Meteororm 7.1	44
Tabla 18. Variables geométricas óptimas para iluminación natural en atrios, registrados en el cap. 2 Estado del arte.....	46
Tabla 19. Rangos de proporción geométrica para construcción de modelo 3D. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 20. Rangos de proporción geométrica del edificio del modelo de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 21. Rangos de proporción geométrica de atrios adosados del modelo de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 22. Rangos de proporción geométrica de atrio central del modelo de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 23. Cuadro resumen de rangos de crecimiento de construcción geométrica del modelo de estudio con valores WI. Fuente: Elaboración propia.....	50

Tabla 24. Evaluación UDI según WWR Vs Reflexión de muros opacos por niveles.	51
Tabla 25. Coefic. de reflectancia y transmisión luminosa de superficies geométricas del modelo de estudio.	53
Tabla 26. Resultados generales de rangos UDI con WRR 40% en Fachadas de esp. Adyacentes. Planta 30x30mt2.	72
Tabla 27. Descripción de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en primeros niveles. Planta 30x30 mt2.....	75
Tabla 28. Descripción de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en últimos niveles. Planta 30x30 mt2.	76
Tabla 29. Resultados generales de rangos UDI con WRR 40% en Fachadas de esp. Adyacentes. Planta 50x50mt2.	77
Tabla 30. Descripción de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en primeros niveles. Planta 50x50 mt2.....	79
Tabla 31. Descripción de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en últimos niveles. Planta 50x50 mt2.	80
Tabla 32. Índices geométricos de áreas de claristorios del atrio para la fase 1.....	83
Tabla 33. Índices geométricos de proporciones geométricas óptimas escogidas en evaluación Fase 2.	85
Tabla 34. Índices geométricos de áreas de claristorios del atrio para la fase 2.....	86
Tabla 35. Coefic. de reflectancia y transmisión luminosa de superficies geométricas según referencias normativas TDRe y CIE S008/E:2001.....	88
Tabla 36. Resumen de lineamientos de diseño para Fase I de investigación.	89
Tabla 37. Resumen de lineamientos de diseño en Fase II de investigación.....	90

1 INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La historia del atrio, se remonta a uno de los espacios arquitectónicos arquetípicos más antiguos: el **patio**, que a lo largo de su evolución ha recibido diferentes nombres y transformaciones dependiendo de sus usos. La vivienda romana, representante de la arquitectura clásica, construye un exterior cóncavo, social, íntimo y aislado del entorno, reinterpreta el **patio** como unidad espacial en el interior de la edificación y lo nombra **Atrio**, lo cierra en su perímetro y lo abre cenitalmente, para el aprovechamiento de la luz natural y la recolección de agua por el “impluvium” Mira (1993). Siglos más adelante, dicho atrio, reaparece en edificaciones con diferente función y a diferentes escalas, se cubre y experimenta una serie de transformaciones encaminadas a incorporar los nuevos conceptos espaciales de la modernidad y la revolución industrial, como la apertura de grandes luces espaciales y la aparición de nuevos materiales de la construcción como el acero y el vidrio, permitiendo la esbeltez y transparencia de las superficies, así como nuevas fenomenizaciones de dicho espacio Sharples & Lash (2006); Contemporáneamente, los estudios sobre el atrio, evidencian su potencial ambiental y de interacción social para la convivencia en comunidad Danielski et al. (2016; Yeang (2001).

En cuanto a los aportes ambientales de iluminación que puede brindar la integración de un atrio en una edificación, el mayor beneficio que ofrece esta cavidad es permitir la penetración de la luz natural al interior de este. Si bien, el atrio es un espacio esencialmente luminoso, demanda diferentes estrategias en su diseño arquitectónico para distribuir correctamente la luz natural en su interior y en los espacios adyacentes sin repercutir en pérdidas de eficiencia energética por discomfort térmico.

Diversos parámetros permiten el diseño de la iluminación natural en los espacios atrios; entre los más relevantes, se evidencian la forma del atrio, su orientación solar, el tipo de cubierta y la reflectancia de los materiales de las superficies del atrio. Para evaluar y analizar estas variables de diseño por simulación, la mayoría de autores han aplicado en mayor medida la metodología de evaluación estática, concluyendo que, durante muchos años han dominado los estudios realizados bajo cielo totalmente nublado; en la actualidad se evalúa por metodologías de evaluación estática y dinámica. Debido a los avances tecnológicos es posible simular el desempeño de la iluminación incorporando todas las características del cielo durante el año Hung & Kong (2003); Sharples & Lash (2006).

Reflexionar sobre la luz en la arquitectura y cómo influye en ella de distintas maneras y en quienes la habitan, ha sido uno de los propósitos más importantes desde el campo de estudio teórico y práctico de la arquitectura. La luz es vista como un material que, aunque intangible modela y configura el espacio; este se abre a ella para captarla, dirigirla y distribuirla, logrando dotar de atmosfera su interior. Podemos apreciar la luz en el ambiente arquitectónico de manera cualitativa y cuantitativa, pues influye de manera física y puede medirse desde lo experiencial; por ello, no sólo responde solamente a una cuestión estética y simbólica como ya se ha evidenciado en las diferentes etapas históricas de la arquitectura, sino

también a cuestiones funcionales y biológicas de sus ocupantes, permitiendo desarrollar tareas visuales en condiciones de confort y mantener el equilibrio biológico interno al habitar un espacio.

Diseñar la iluminación natural de una edificación, implica en consecuencia, alcanzar un equilibrio entre calidad lumínica en su esfera estética y funcional, relacionando confort ambiental y bienestar de sus ocupantes. Además de las normativas internacionales existentes para el cumplimiento de las demandas de calidad lumínica respecto al confort visual, en los últimos años se ha investigado el efecto positivo que tiene la luz natural en la salud mental y física de las personas, por encontrarse fuertemente relacionada con el ciclo circadiano o reloj interno biológico.

Esta tesis investiga la tipología de espacio atrio como estrategia espacial de iluminación natural para edificios en altura, evaluando los aportes lumínicos para el confort visual del ocupante en los espacios adyacentes al atrio.

1.2. FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los edificios de gran altura presentan frecuentemente grandes superficies de área en planta y un alto porcentaje de consumo energético para suplir las demandas de iluminación al interior de los mismos, toda vez que las aperturas en fachada para la captación de iluminación natural, no alcanzan a abastecer el núcleo central de estas edificaciones (**Ilustración 2**) y en consecuencia se evidencian altos costos energéticos para iluminar de manera artificial y permanente dichas zonas. Además de esto, el consumo energético aumenta en edificios destinados a oficinas, donde por normativa deben cumplirse estándares específicos de iluminación para el desarrollo de las tareas específicas realizadas. Respecto a lo anterior, la tesis plantea que la inclusión de atrios dentro de ésta tipología de edificios, puede permitir aportes importantes de iluminación natural en su interior, contribuyendo al confort visual de los ocupantes y a la reducción del consumo energético del edificio por iluminación artificial.

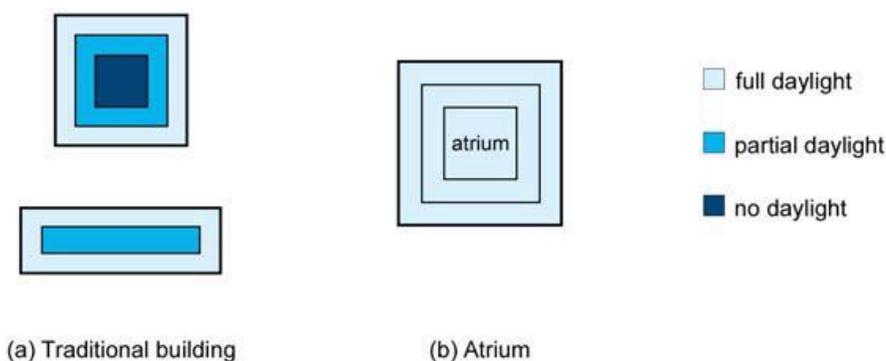


Ilustración 2. Comparación lumínica edificios sin y con espacio atrio integrado. Fuente: Hung & Kong (2003).

En relación al diseño de un espacio atrio central y sus espacios adyacentes, se evidencian diferencias con respecto a resultados de configuración geométrica óptima para el desempeño lumínico natural al interior del atrio central y en los espacios adyacentes; dichas diferencias recaen principalmente en el valor del indicador geométrico - **WI** (índice de cavidad, que relaciona las dimensiones involucradas en los coeficientes PAR y SAR) propuesto por Liu et al (1991)(**PAR** (proporción de la planta del atrio, correspondiente a la razón entre el ancho (a) y el largo (l))- **SAR** (sección o corte al interior del atrio, correspondiente a la razón entre el alto y el ancho) propuestos por Bednar (1986)). Investigaciones de Ahadi, Saghafi y Tahbaz (2018), Calcagni y Paroncini (2004), y Du y Sharples (2011), concluyen que configuraciones con valores **WI < o iguales a 1.5** son óptimos para aportar un DF considerable a espacios adyacentes, lo que correspondería a un atrio de aproximadamente 4 niveles de altura. Por otro lado, Roldán Rojas (2016) concluye una optimización geométrica de atrio según el aspecto de la cavidad **WI > 2**, situando al atrio como un aporte y una estrategia lumínica difusa al interior de éste, en aquellos casos de 10 pisos y luego algunos de 5 pisos, indicando menos favorables aquellos de 3 pisos. En relación a lo anterior, el presente estudio pretende evaluar principalmente los aportes lumínicos en los espacios adyacentes al atrio por la naturaleza de las edificaciones a evaluar y la búsqueda del máximo aporte lumínico al interior de estas.

Así mismo, La mayoría de investigaciones referentes al comportamiento lumínico de atrios, evaluados por metodología experimental de simulación, han sido realizadas con evaluaciones estáticas mediante el indicador Factor de luz del Día (FLD o DF), cuantificando la cantidad de luz diurna difusa en puntos dentro de un espacio bajo una condición de cielo nublado a partir de una relación de iluminancias (int-ext); ésta métrica de luz, no da cuenta de la realidad del comportamiento solar y lumínico al interior de los atrios y espacios adyacentes en condiciones de cielo diferente. Según Mardaljevic, Heschong y Lee (2009) el valor de DF es el mismo, independiente de la orientación del edificio y su ubicación geográfica. En ese sentido, las estrategias de diseño que se plantean a partir de la orientación, el ángulo y la intensidad solar, no pueden ser influenciadas desde el DF. Las métricas dinámicas de luz del día, son una mejora de las métricas estáticas de evaluación, ya que son análisis basados en datos climáticos anuales, que permiten evaluar el componente directo y difuso de la luz del día, de acuerdo a estaciones, hora del día y condiciones climáticas propias de un lugar; métricas como la autonomía de luz diurna (DA), la iluminación de luz diurna útil (UDI) y la exposición anual a la luz solar (ASE), consideran variaciones en las condiciones del cielo durante el año, lo que depende de datos meteorológicos locales Mangkuto et al., (2016). Algunos de los principales investigadores en el tema como Calcagni y Paroncini (2004), Ghasemi et al. (2015), Du y Sharples (2011) y Acosta, Navarro y Sendra (2014), han y siguen utilizando metodología de simulación estática; algunos otros como Reinhart, Mardajevic, Rogers, (2006), Berardi y Wang (2014) y Roldán Rojas (2016) han implementado la metodología de evaluación dinámica de luz natural.

1.3. RELEVANCIA DEL PROBLEMA

Es pertinente continuar con el desarrollo investigativo de estrategias de diseño arquitectónico para iluminación natural, mediante la inclusión de espacios atrio en edificios de gran altura, desde una perspectiva holística que contemple las esferas espaciales, sociales, estéticas y funcionales de la luz natural a favor del mejoramiento del hábitat contemporáneo y el saber arquitectónico. Así mismo, es indispensable seguir con investigaciones de iluminación natural en cuanto a las oportunidades de ahorro energético en edificaciones en altura por medio de la optimización del diseño geométrico espacial, aplicando el método de evaluación dinámico de luz diurna basada en el clima (CBDM), que amplíen el conocimiento del desempeño lumínico de acuerdo al comportamiento solar real y las condiciones climáticas del lugar. Se evidencian referentes de importantes proyectos arquitectónicos construidos en altura, incluyendo espacios atrio, como el Commerzbank Headquarters de Norman Foster con 53 niveles de altura o el Leeza Soho en Beijing de Zaha Hadid con 50 niveles, pero no se han encontrado investigaciones científicas que den cuenta del potencial lumínico de los atrios presentes en edificios de éstas características.

1.4. HIPÓTESIS

La configuración geométrica de un atrio central en edificios de gran altura con adición de claristorios y/o entradas de luz laterales cada 4 niveles, representa un diseño geométrico optimizado que permite el aporte eficiente de luz natural en el atrio y espacios adyacentes, contribuyendo al fortalecimiento del entorno lumínico en el núcleo central de los edificios para el confort visual del ocupante.

PALABRAS CLAVES: Iluminación Natural, Atrios en altura, Optimización Geométrica.

1.5. OBJETIVO GENERAL

Establecer lineamientos de diseño arquitectónico de atrios centrales verticales y espacios adyacentes optimizados geoméricamente, con potencial de iluminación natural, para contribuir con el fortalecimiento de adecuados entornos de luz que promuevan el confort visual del ocupante en edificaciones aisladas en altura.

1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las principales variables de diseño materiales y geométricas eficientes, para el desempeño lumínico de atrios centrales en espacios adyacentes de edificaciones aisladas en altura, como insumo para la construcción de un modelo paramétrico que permita la evaluación lumínica de nuevas configuraciones morfológicas que las integren.
- Evaluar por métrica dinámica de “Iluminación diurna útil” (UDI) la eficiencia lumínica de las configuraciones geométricas propuestas, para determinar las de mayor potencial lumínico.
- Construir lineamientos de diseño arquitectónico para atrios centrales verticales, a partir del análisis de resultados obtenidos de los potenciales lumínicos y variables de diseño espaciales y materiales de las configuraciones geométricas optimizadas.

1.7. METODOLOGIA

Esta investigación se plantea desde una metodología de investigación cuantitativa experimental, en base a técnicas de simulación lumínica dinámica de variables producto de fuentes bibliográficas que determinan criterios óptimos de diseño lumínico arquitectónico.

ETAPAS

1. Construcción Marco teórico y conceptual (Objetivo Específ. 1)

En esta etapa se establecieron definiciones conceptuales bajo las que se abordó el proyecto de investigación, así como la construcción del estado del arte para permitir la caracterización de las variables geométricas relacionadas con el óptimo desempeño lumínico natural en atrios centrales y espacios adyacentes como base para la proposición de configuraciones geométricas que las integren. Así mismo, se analizaron normativas nacionales e internacionales de iluminación natural para incorporar criterios de diseño y evaluación lumínica normativa en estos espacios.

2. Análisis del lugar de estudio, caracterización geométrica de edificios de gran altura en Santiago y construcción de modelo base. (Obj. Específ. 1 y 3)

Se analizaron los parámetros ambientales, geográficos, climáticos y urbanos de la ciudad de Santiago de Chile, para establecer las principales características del lugar que influyen en el diseño de iluminación natural de edificios. De igual manera, se hizo reconocimiento y caracterización de los principales edificios

en altura construidos en el centro de la ciudad y sus inmediaciones, para determinar los rangos de áreas de superficie en planta presentes a través del tiempo, así como aquellas edificaciones que integran espacios atrio; esto como base dimensional y formal para la construcción del modelo paramétrico de configuraciones geométricas que integraron estas características analizadas del contexto y el espacio construido para ser evaluadas.

3. Construcción de modelo paramétrico y simulación lumínica dinámica por fases. (Obj. Esp. 2 y 3)

Se realizó la construcción del modelado paramétrico 3D en el software Grasshopper y con ello, la simulación lumínica dinámica en dos fases de evaluación para 216 configuraciones geométricas (108 configuraciones en cada fase de análisis) en el software DIVA integrado a Grasshopper.

La primera fase de evaluación estuvo orientada a la evaluación del potencial lumínico del atrio en los espacios adyacentes sin tener en cuenta ninguna otra fuente lumínica. La segunda fase de evaluación evaluó el potencial lumínico del atrio en los espacios adyacentes, en relación a un porcentaje de área vidriada en fachada de los niveles de estos espacios correspondiente al 40%.

El software DIVA for Rhino, es un complemento optimizado para el modelado y evaluación de rendimiento de parámetros medio ambientales como la iluminación natural y la energía en edificaciones y entornos urbanos. Este plug in está incluido en el lenguaje de programación visual Grasshopper del programa CAD Rhinoceros; Se desarrolló en la Escuela de diseño de la Universidad de Harvard y es distribuido y desarrollado por Solemma LLC. DIVA realiza los análisis de la luz diurna sobre modelos arquitectónicos a través de la integración con los softwares de cálculo Radiance y DAYSIM del que se vale de Radiance como motor de cálculo. Reinhart1 (2011).

4. Análisis de resultados y Construcción de lineamientos de diseño. (Obj. Específ. 3)

En la última etapa se llevó a cabo la interpretación y análisis de resultados de las configuraciones geométricas optimizadas, estableciendo matrices de análisis de las variables de diseño evaluadas en relación a los resultados de aporte lumínico que justifiquen el resultado de la configuración geométrica. Posterior a esto, se realizó una comparativa de resultados para las dos áreas de superficie en planta evaluadas en la fase I de evaluación y una comparativa de resultados entre las dos fases de evaluación lumínica.

A partir de lo anterior, se construyeron lineamientos de diseño arquitectónico que validan la eficiencia del aporte en iluminación natural en el atrio central y los espacios adyacentes de una edificación en altura.

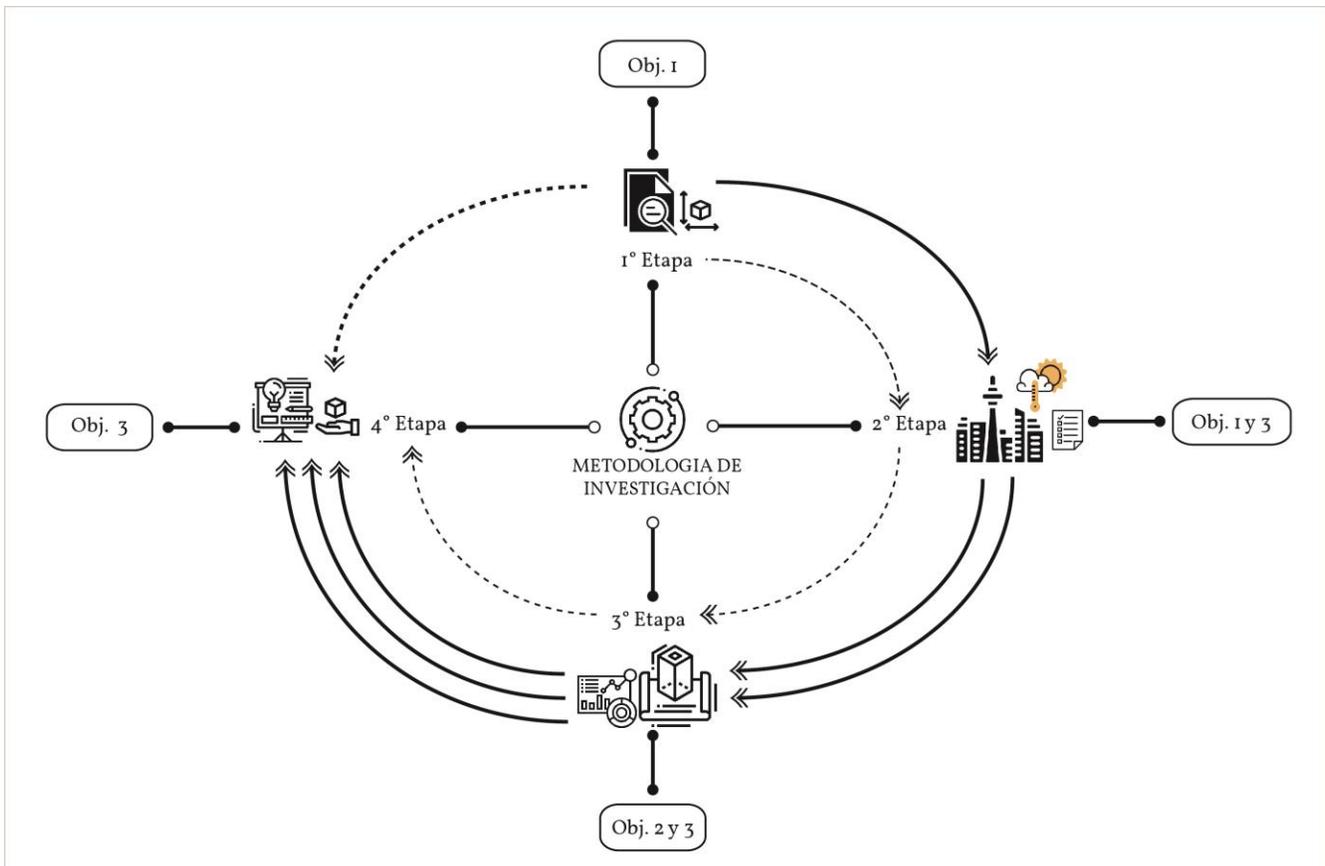


Ilustración 3. Esquema metodológico de investigación. Fuente: Elaboración propia.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. DEFINICION Y DESARROLLO HISTÓRICO DEL ATRIO

Uno de los espacios arquitectónicos arquetípicos más antiguos es el **patio**, que a lo largo de su evolución ha recibido diferentes nombres y transformaciones dependiendo de sus usos; Los edificios con patio se remontan a antiguas civilizaciones como la griega, romana (cultura Etrusca) y árabe, establecidas en ambientes climáticos donde el patio central desempeñaba importantes funciones sociales y de acondicionamiento del espacio Sharples & Lash (2006). La casa atrio pompeyana (Ilustración 4), representante de la arquitectura clásica y correspondiente al siglo II A.C. (Balil) construye un exterior cóncavo, social, íntimo y aislado del entorno, reinterpreta y fusiona la casa etrusca el **patio** como unidad espacial en el interior de la edificación y lo nombra **Atrio**, lo cierra en su perímetro y lo abre cenitalmente, para el aprovechamiento de la luz natural y la recolección de agua por el impluvium. Éste tipo de espacio con comunicación interior-externo, nació en un clima mediterráneo templado con oscilaciones térmicas moderadas y estación seca prolongada.

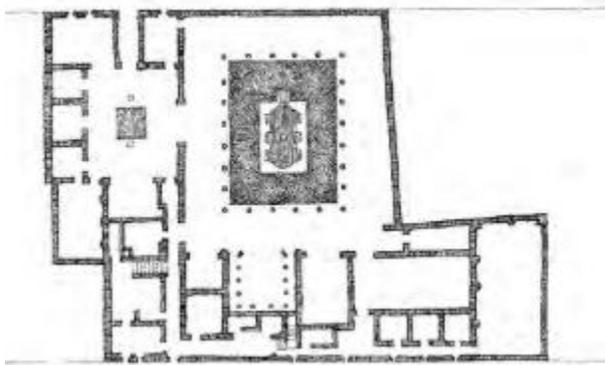


Figura 2.2. Casa del Meleagro, Pompeya. El centro del peristilo está ocupado por un gran estanque. Planta. [Dibujo de Andrés Reboredo]. Basado en "V itinerario", por E. La Rocca y B. Pinna Caboni en *Pompei, Guide archeologica*, 1994, Milán: Mondadori, p. 301. Fotografía reproducida del blog Arte_Historia_Estudios, por M. Miguel, 12 de junio de 2011. Recuperado de <http://arhistoriaestudios.blogspot.com.es/2011/06/arqueologia-roma-pompeya.html>.



Ilustración 4. Planta y fotografía de la Casa del Meleagro, Pompeya. Fuente: arhistoriaestudios.blogspot.com

El papel fenomenológico que el espacio patio o atrio jugaba en la cultura mediterránea, que desde el principio miró al cielo y fundamentó su existencia, pierde importancia en la arquitectura hasta el siglo XIX, donde el atrio, reaparece en edificaciones con diferente función y a diferentes escalas, se cubre y experimenta una serie de transformaciones encaminadas a incorporar los nuevos conceptos espaciales de la primera modernidad y la revolución industrial, como la apertura de grandes luces espaciales y la aparición de nuevos materiales de la construcción como el acero y el vidrio, permitiendo la esbeltez y transparencia de superficies, así como una nueva fenomenización de dicho espacio, que sirviendo de mediador, enlaza un querer y sentir convexo en conexión con el exterior y un instinto cóncavo del habitar humano, logrando crear una tensión armónica espacial y sensitiva.

La tecnificación del atrio se hizo presente en diferentes tipos de edificios como estaciones de ferrocarril, pabellones de exposición, museos, hoteles, mercados, entre otros Saxon (1986). Algunos primeros ejemplos de la presencia de estos espacios en el siglo XIX son el Club de la Reforma en 1837 de Barry y el Palacio de Cristal de Paxton de 1850-51 (Ilustración 5). Sharples y Lash (2006) recoge definiciones del atrio del siglo XIX de investigadores como Edwards, Land, Hakmi & Sibley, (2005) en el que lo describen

como un patio, que es un vacío interno dentro o entre edificios que puede estar cubierto o abierto al cielo.



Ilustración 5. Ilustración del Palacio de Cristal de Paxton por parte de los Hermanos Dickinson, 1851.

Para el siglo XX, según Saxón y Sharples, debido a normativas de construcción de mayor aprovechamiento de las áreas por piso en las edificaciones y los avances tecnológicos en iluminación artificial y climatización mecánica, éste tipo de espacios dejaron de estar presentes en las construcciones de la época, reapareciendo hasta la década del 70' con edificaciones como el hotel Hyatt Regency de John Portman en Atlanta, 1967 (Bednar, 1986). Bednar define éste nuevo atrio en su tercera etapa histórica como un “espacio centroidal interior, organizador del edificio e iluminado por luz natural”; Ésta última etapa histórica continua hasta el presente, en la arquitectura contemporánea en variedad de climas y contextos, en distintas partes del mundo y el concepto del atrio ha ido evolucionando con la aplicación de nuevas materialidades estructurales y de cerramiento, reinterpretación de usos como espacios de transición en edificios de gran altura Yeang (2001), con aprovechamiento bioclimático, de confort y bienestar para sus ocupantes en relación al desarrollo tecnologías computacionales para el diseño en arquitectura.

Es evidente la transformación del pensamiento y definición del atrio moderno y contemporáneo, respecto a su génesis, por el aumento de escala con la aparición de nuevas materialidades, la densificación de los edificios en altura, las diferentes formas y ubicaciones dentro de los mismos que posteriormente fueron categorizados para su investigación y los desarrollos tecnológicos computacionales.

A través del tiempo se pueden ver grandes ejemplos arquitectónicos de atrios de diferentes escalas, formas y funcionalidades que han dotado de gran carácter arquitectónico e icónico a los edificios que los contienen.

Ejemplo de lo anterior a través del tiempo es el edificio Bradbury, del arquitecto George Wyman en 1897, en el que el espacio atrio es ordenador de los espacios perimetrales del edificio, integra las circulaciones verticales y permite iluminar naturalmente el interior del edificio.

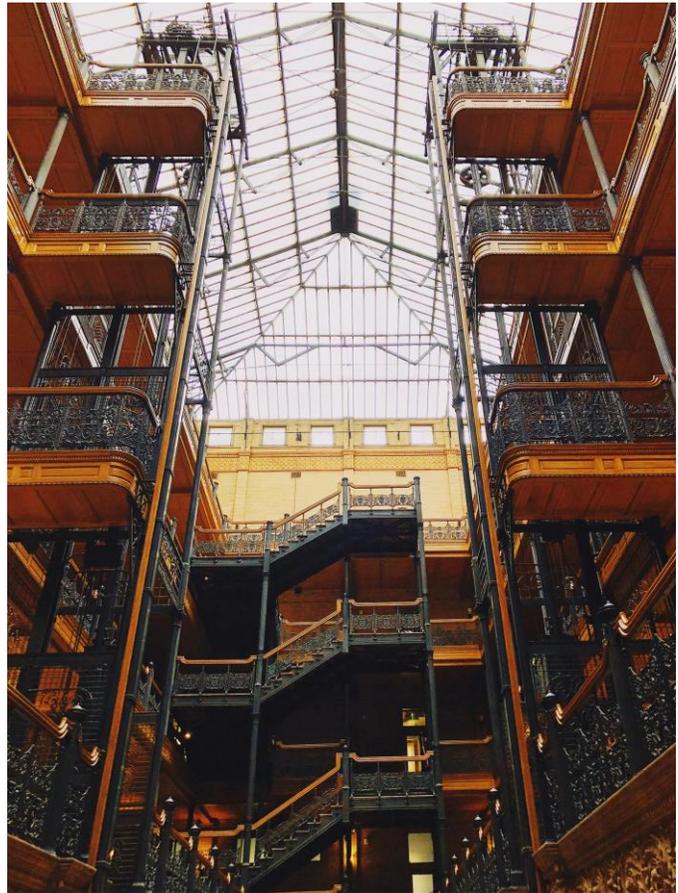
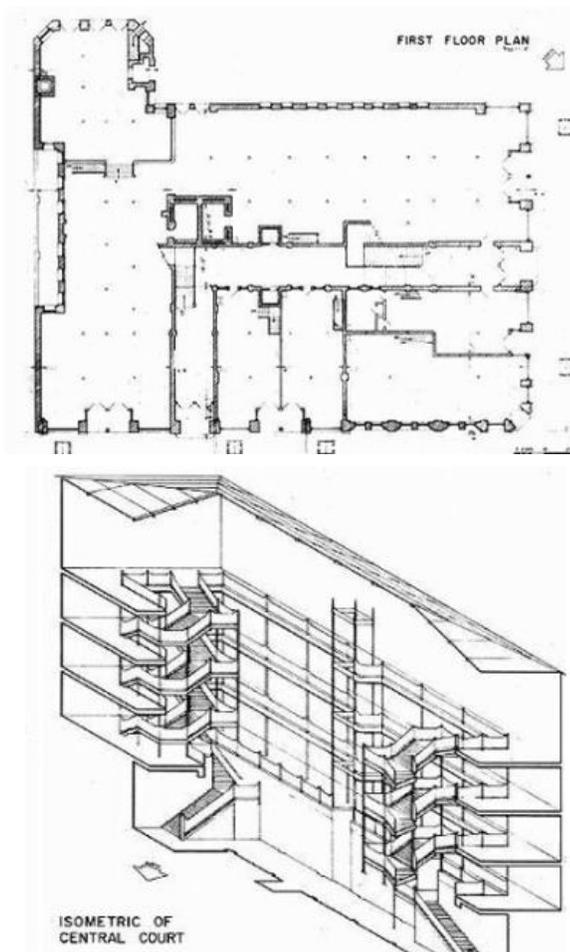


Ilustración 6. Edificio Bradbury. Los Angeles USA, 1897. Arq. George H. Wyman.
<https://arquiscopio.com/archivo/2013/02/16/edificio-bradbury-de-los-angeles/>

Fuente:

Edificios como el Museo Guggenheim de Nueva York del Arquitecto Frank Lloyd Wright en 1959, es también ejemplo de edificios en el que se implementa un atrio para captación de iluminación natural, como living de entrada y distribuidor de circulaciones helicoidales que guían el tránsito de Las personas por el edificio. Por otro lado, también han sido utilizados en la arquitectura, la implementación de atrios en renovaciones patrimoniales entre edificios para la generación de conectores urbanos como plazuelas, calles peatonales, etc.; Un ejemplo es el “Gran Atrio de la Reina Isabel II” del Museo Británico de Londres por Norman Foster And Parners en el 2000, el cual envuelve un volumen cilíndrico central, perteneciente a la sala de lectura que formaba parte de la Biblioteca Británica.



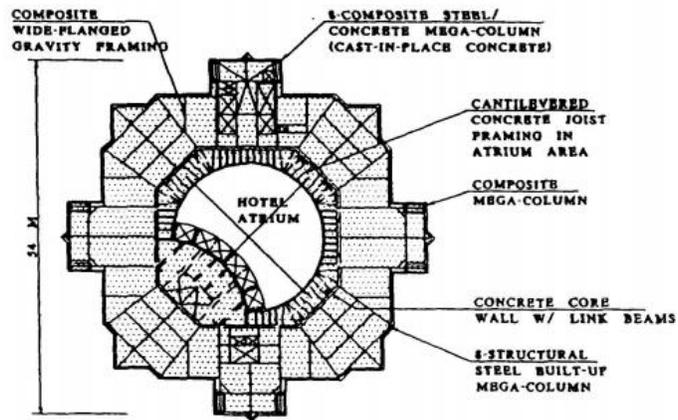
Ilustración 7. Edificio Guggenheim de Nueva York. Frank Lloyd Wright.
<https://www.newyorker.com/magazine/1959/12/05/what-wright-hath-wrought>

Fuente:



Ilustración 8. Atrio del Museo Británico de Londres. Norman Foster, 2000.
Fuente:<http://www.tublogdearquitectura.com/2012/11/british-museum-museos-del-mundo/>

Existen algunos edificios hitos, de gran altura que han integrado atrios como la Torre Jin Mao en Shanghai (Ilustración 9), con 88 pisos de planta octogonal, de los cuales, 34 pisos integran un gran atrio central (desde el piso 53 al 87). El Commerzbank de Norman Foster + Partners, en Frankfurt, Alemania (Ilustración 10) (principal ejemplo para el presente estudio), de 53 niveles de altura, con planta triangular, un atrio central de altura completa y espacios intersticiales como jardines y “plazas” sociales, pensadas para el aprovechamiento de la luz solar y la ventilación natural. Por último, el reciente Edificio Leeza Zoho de Zaha Hadid Architects (Ilustración 11), que integra un atrio lateral de 190mts de altura en rotación a 45° para permitir la entrada de luz natural y diferentes vistas a la ciudad. Todos los edificios con espacios atrio mencionados han servido de gran inspiración para la realización de ésta investigación.



TYPICAL HOTEL FRAMING PLAN

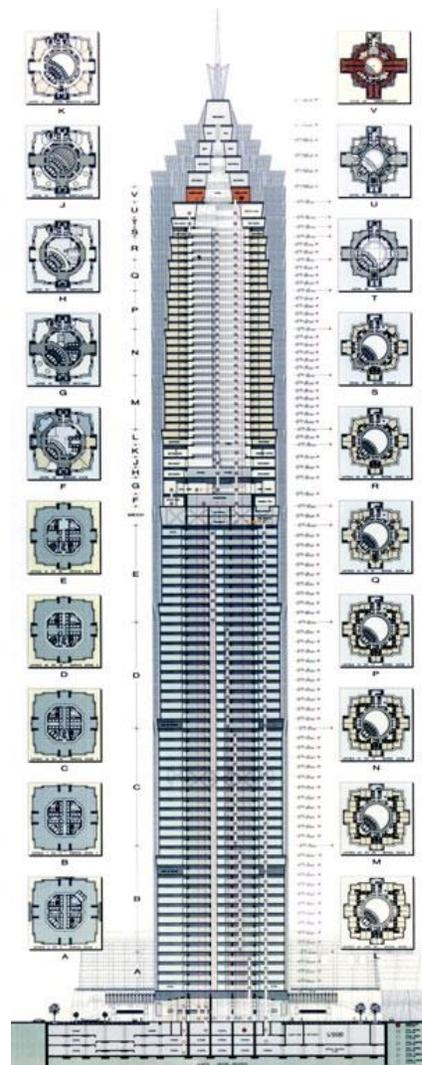


Ilustración 9. Torre Jin Mao, Shanghai, 1999. Fuente: <https://www.skyscraper.org/EXHIBITIONS/SUPERTALL/jinmao.php> / <http://doi.org/10.5169/seals-59947>

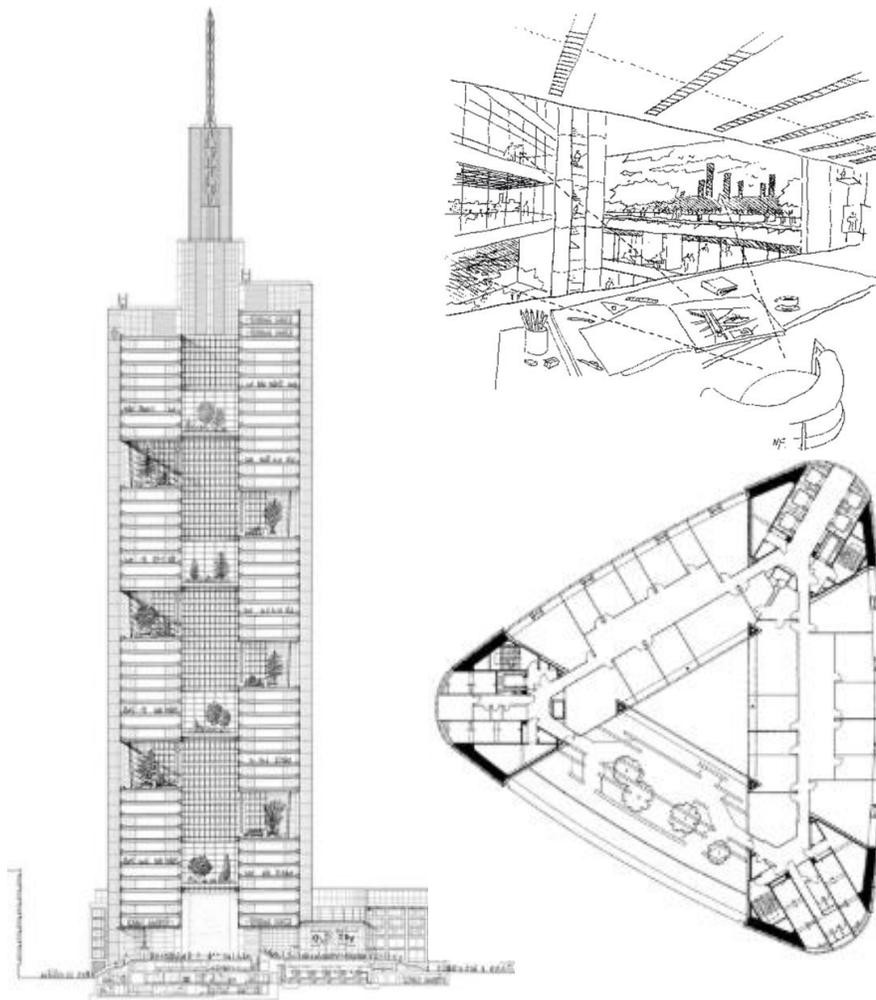


Ilustración 10. Edificio Commerzbank Headquarters, 1997. Alemania. Norman Foster + Partners. Fuente: <https://www.fosterandpartners.com/es/projects/commerzbank-headquarters/>

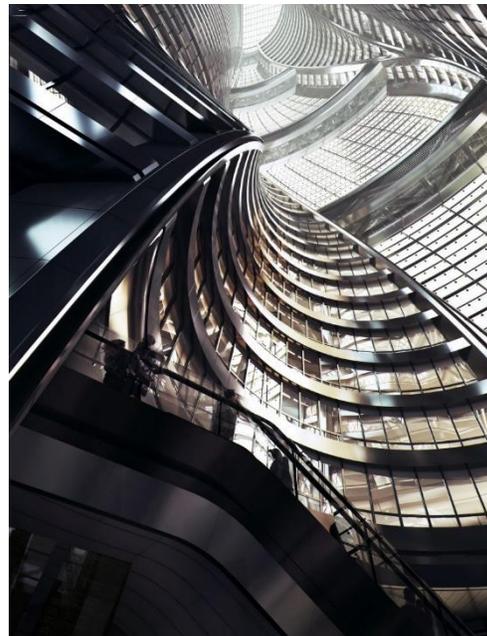


Ilustración 11. Edificio Leeza SOHO, Beijing, China, 2019. Zaha Hadid Architects. Fuente: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/leeza-soho/>

2.2. CATEGORIZACIÓN DE ATRIOS

En 1983, Richard Saxon realizó la primera clasificación morfológica de atrios, estableciendo nueve categorías, las cinco primeras las llamó formas puras, respondiendo a atrios de un lado, dos lados, tres lados, cuatro lados y lineales; el número de lados hace referencia al número de caras interiores en contacto con la cavidad del atrio. Las otras cuatro clasificaciones restantes las denominó formas complejas, respondiendo a morfologías de atrios para conexiones entre edificios, en edificios de tipología placa-torre y los denominados múltiples en sentido vertical y horizontal del edificio (Ilustración 12).

La metodología para la clasificación morfológica se basó en la identificación y levantamiento de información de 107 edificaciones existentes en Estados Unidos, Canadá y Europa, que incluyeran un espacio atrio, para después categorizarlos en grupos por sus condiciones geométricas formales. Hacia 1985, Saxon realizó un nuevo catastro de 60 edificaciones inglesas y 164 norteamericanas que fueron incluidas en la clasificación formal antes propuesta y finalmente plasmadas en la segunda edición del libro *"Atrium Building, development and desing"*. A partir de ésta investigación Saxon evidenció que los atrios de formas puras de tres, cuatro caras y lineales fueron las morfologías más frecuentes. Saxon (1986).

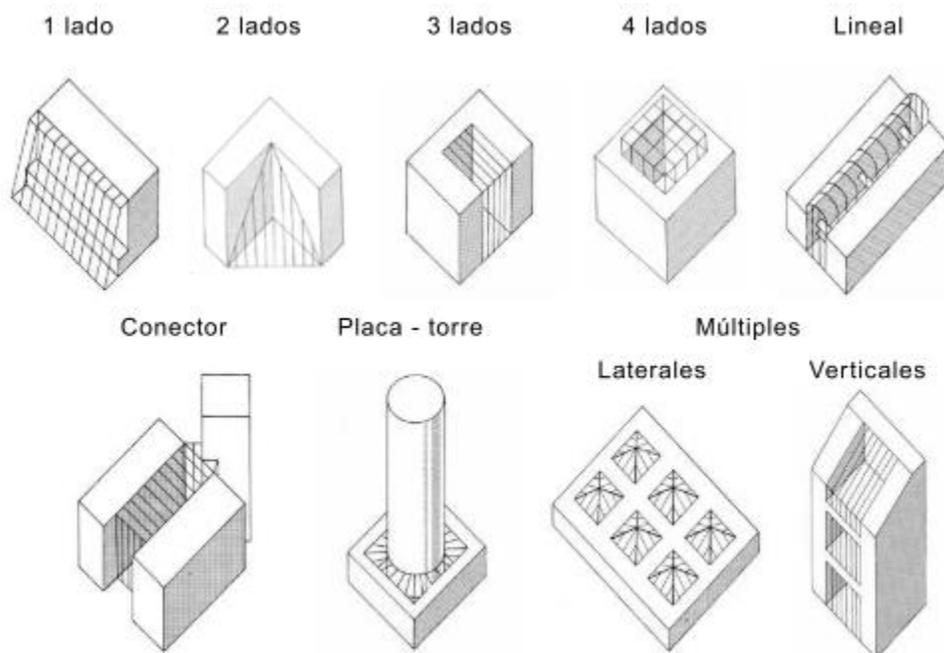


Ilustración 12. Clasificación y/o categorización de tipos de atrios según morfología. Fuente: Saxon, 1985.

Eino Kainlauri en 1987 realiza una nueva clasificación a partir de un catastro de edificios de oficinas estadounidenses. A partir de dicho catastro, clasificó los atrios en 5 tipos (Ilustración 13), según superficies vidriadas de cerramiento y localización en el espacio; se evidencia como la clasificación de los 4 primeros

tipos, corresponde con la planteada por Saxon anteriormente y añade una nueva tipología relacionada con una morfología de atrio que envuelve perimetralmente la totalidad del espacio.

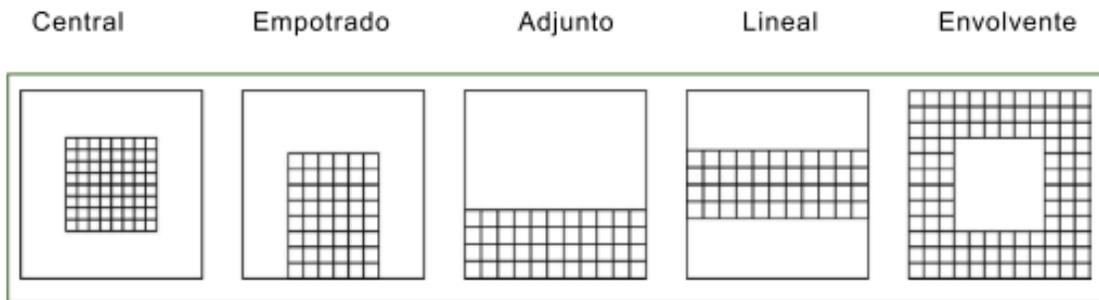


Ilustración 13. Categorías de atrio según Enio Kainlauri. 1987.

En 1995 (Yoshino, H.; Ito, K.; Aozasa) realizan un catastro en Japón de 206 edificios construidos entre 1981 y 1993. A partir de éste estudio, hacen una clasificación de 7 tipologías morfológicas de atrio numeradas de I a VII (Ilustración 14); encontraron que la tipología IV fue la más recurrente en el catastro, seguido de la II y la V. En ésta clasificación se pueden encontrar dos tipologías nuevas correspondientes a la VI y VII.

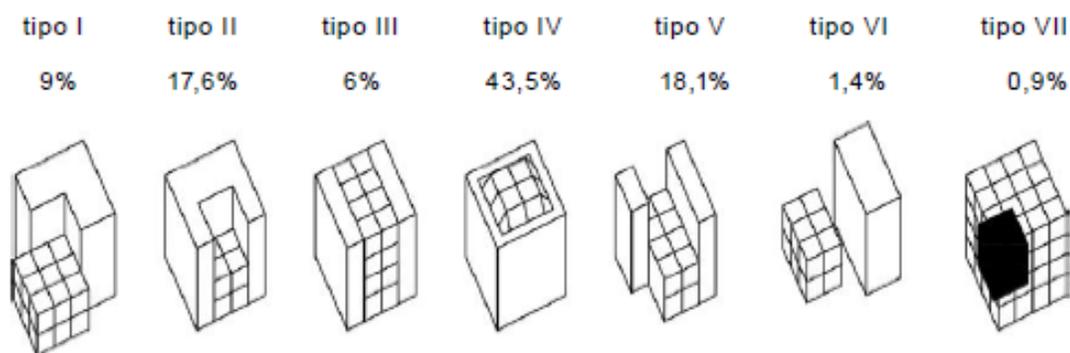


Ilustración 14. Clasificación de atrios según Yoshino, Ito; Aozasa. 1995.

Hung & Chow (2001) hablan de una categorización de atrios respecto a la cantidad de lados internos del edificio con la cavidad del atrio, retomando el criterio de (Saxon) para la clasificación de las formas puras del atrio (Ilustración 15). Por consiguiente, el atrio de 4 lados se denomina ahora centralizado, el de tres caras, semicerrado, y los mismos términos para el adosado y lineal.

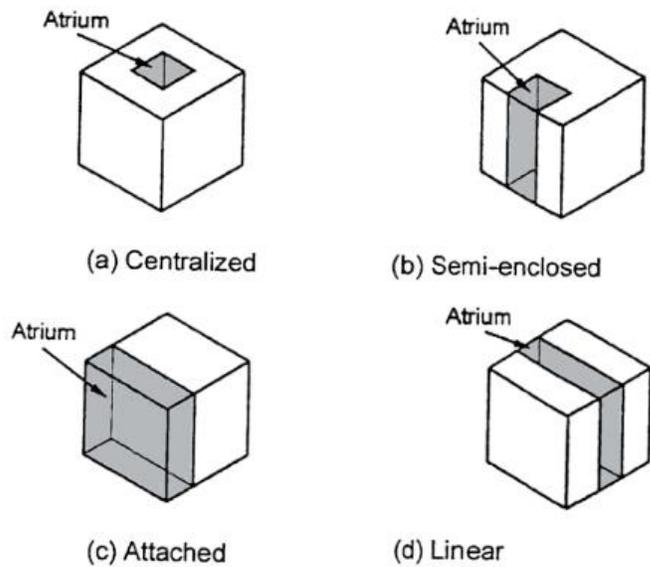


Ilustración 15. Tipologías de 4 tipos de atrio. Fuente: Hung & Chow, 2001.

W. K. Chow & Wong (2011) realizaron después un levantamiento de 138 atrios en la Región Administrativa Especial de Hong Kong, estudiando el área vidriada, usos del edificio, geometría y ubicación de los atrios dentro del edificio. La clasificación de los atrios se realizó de acuerdo a su ubicación en el edificio y dimensiones reales de Largo (L), ancho (W), y alto (H) a partir de los cuales se crearon las proporciones geométricas $a = L/W$; $b = H/W$; $c = H/L$ (Ilustración 16). Chow además clasifica dichos atrios según su ubicación en el edificio (Ilustración 17).

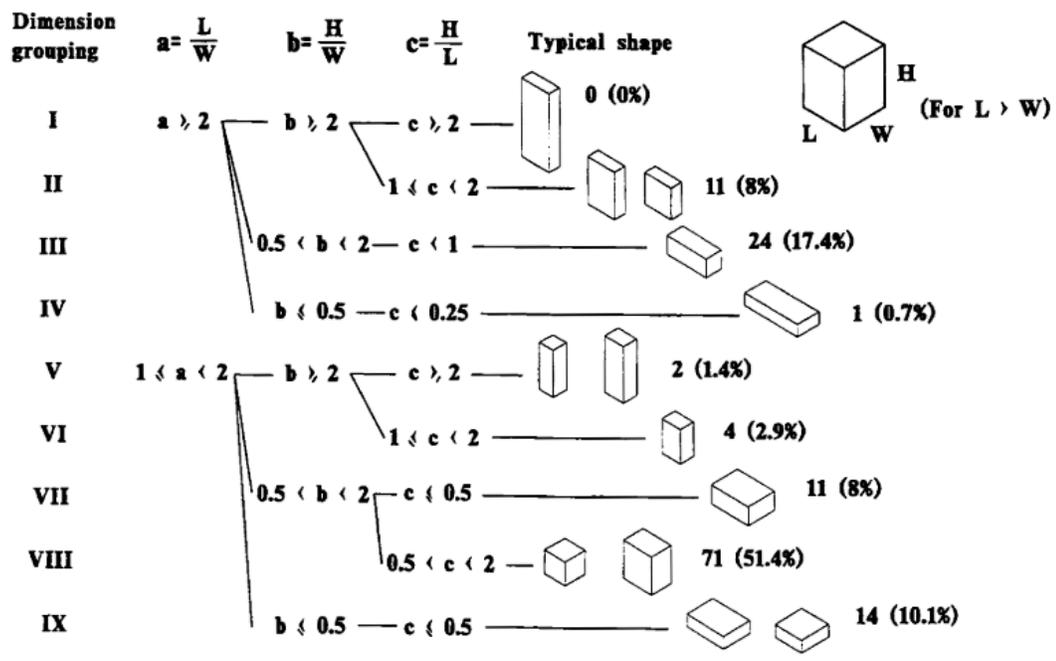


Ilustración 16. Clasificación de los atrios en edificios de Hong Kong, según aspectos de proporción geométrica. Fuente: Chow. 2011.

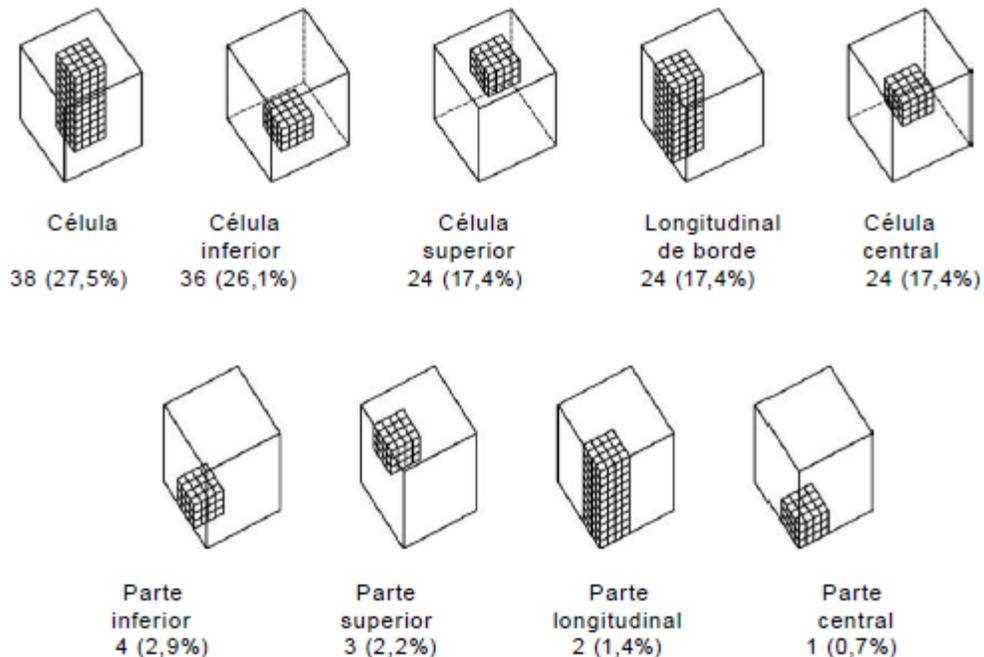


Ilustración 17. Clasificación de los atrios en edificios de Hong Kong según su ubicación en el edificio. Fuente: Chow.2011.

2.3. ILUMINACIÓN NATURAL Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ESPACIOS ATRIO

Los atrios, son espacios que, en su gran mayoría, reciben grandes aportes de iluminación y sirven de estrategia bioclimática por el potencial de aporte lumínico y energético para con él y sus espacios adyacentes; es por esto, que han requerido ser estudiados a partir de diferentes metodologías de evaluación lumínica como ecuaciones analíticas, modelos a escala, mediciones de modelos reales y/o simulaciones por software. Sharples & Lash (2006) a partir de una revisión de investigaciones relacionadas con el uso de luz del día en edificios atrio, realizadas durante 15 años (desde 1990), concluyen que el uso de la luz del día como parte de una estrategia de iluminación integrada y controlada es clave de un enfoque de diseño ambiental y sostenible en lo arquitectónico e identifican componentes claves para el funcionamiento adecuado del atrio como el sistema de ventilación por cubierta y su transmitancia, la geometría del pozo del atrio, la reflectancia de las superficies del pozo y los niveles de luz del día alcanzados en espacios adyacentes Aizlewood (1995). S. K. H. Chow et al. (2013) Estudia la iluminación diurna y el rendimiento energético de un espacio atrio mediante controles de iluminación artificial en conjunto con luz natural; Evalúa el costo, la energía y los problemas medioambientales relacionados con las diferentes iluminancias diurnas y discute las implicaciones del diseño, en el que concluye que el uso racional de la luz diurna a través de herramientas como los controles de iluminación

fotoeléctricos, pueden reducir efectivamente el consumo de electricidad, contaminantes relacionados y emisiones de gases de efecto invernadero.

Berardi & Wang (2014) Investigan las ventajas que existen en diferentes condiciones climáticas, la inclusión en el diseño de un espacio atrio. Se dan detalles de un proyecto de casa diseñada, considerando el clima de Datong y Worcester, Massachusetts (EE. UU.) Para Solar Decathlon 2013, con un atrio central y una gran cantidad de superficie vidriada en la envolvente (80 metros cuadrados). Los resultados de simulación obtenidos con Radiance y Daysim permitieron evaluar los parámetros de índice de autonomía de la luz del día e índice de la luz del día útil. Se calcularon probabilidades de deslumbramiento diurno y acumulativo, así como el diseño de sistemas de sombreado y horarios de uso.

Danielski et al. (2016) investiga el potencial de diseño de atrios condicionados en edificios residenciales en climas nórdicos como estrategia para mejorar la eficiencia energética y la interacción social entre los residentes. Utilizó un modelo energético, para comparar la eficiencia energética entre diseños de edificios residenciales con y sin atrio y para identificar parámetros de diseño importantes; Analizó la interacción social, sobre la base de una encuesta que evaluó la percepción de los residentes que viven en un edificio de apartamentos de varias plantas diseñado con un atrio climatizado en el norte de Suecia. Los resultados muestran que el atrio con calefacción en los climas nórdicos tiene el potencial de reducir la demanda total de energía y al mismo tiempo aumentar el espacio acondicionado del edificio. Para tener un impacto positivo en la eficiencia energética, el atrio debe cumplir tres requisitos:

- (i) Debe estar diseñado para reducir el factor de forma para todo el edificio;
- (ii) Debe tener un área acristalada mínima que cumpla con los requisitos del edificio en relación con la luz natural y el confort visual;
- (iii) La protección solar ajustable debe instalarse en las fachadas del atrio para evitar el sobrecalentamiento no deseado. Los resultados de la encuesta indican que el espacio adicional creado por el atrio tiene el potencial de facilitar y promover la interacción social entre los residentes y aumentar el sentido de identidad, apropiación y comunidad.

A nivel térmico, los atrios tienen el potencial de reducir las demandas de energía a través de diversos procesos, esto se evidencia desde las primeras civilizaciones que crearon e implementaron este espacio, para ayudar al acondicionamiento ambiental además de las funciones sociales Hung & Chow (2001; Sharples & Lash (2006). Por lo anterior, los atrios son áreas de amortiguamiento, que pueden ayudar a disminuir las cargas de calefacción y enfriamiento de edificios, así como manejar el viento por efecto chimenea y con ello permitir una ventilación natural más eficiente. (Chow y Wong, 1999; Sharples y Bensalem, 2001). Cuando el atrio se encuentra conectado de forma activa a los sistemas de climatización del edificio, para Getino et al. (2015), puede reducir hasta un 20% el consumo energético de los edificios, sin embargo, acondicionar el atrio al mismo estado que otros espacios internos puede resultar en un aumento de las cargas energéticas Sharples & Lash (2006).

2.4. TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN LUMÍNICA EN ATRIOS

Las diferentes investigaciones realizadas entorno a la iluminación natural de atrios y espacios adyacentes, comprenden metodologías de evaluación lumínica estática y dinámica, la mayoría, han sido realizadas con evaluaciones estáticas, mediante el indicador Factor de luz diurna (DF), cuantificando la cantidad de luz diurna difusa en puntos dentro de un espacio, bajo una condición de cielo nublado, a partir de una relación de iluminancias (int-ext); ésta métrica de luz, no da cuenta de la realidad del comportamiento solar y lumínico al interior de los atrios y espacios adyacentes en condiciones de cielo diferente. Según Mardaljevic et al. (2009) el valor de DF sería el mismo si el edificio tuviera acristalamiento orientado al sur o al norte, si estuviera ubicado en una latitud diferente, o en cualquier ciudad de cualquier país. Las métricas dinámicas de luz del día, son una mejora de las métricas estáticas, puesto que incluyen el componente directo y difuso de la luz del día, de acuerdo a estaciones, hora del día y condiciones climáticas propias de un lugar; métricas como la autonomía de luz diurna (DA), la iluminación de luz diurna útil (UDI) y la exposición anual a la luz solar (ASE), consideran variaciones en las condiciones del cielo durante el año, lo que depende de datos meteorológicos locales Mangkuto et al. (2016)¹. Algunos de los principales investigadores en el tema de evaluación lumínica en atrios como Calcagni & Paroncini (2004) Ghasemi et al. (2015) Du & Sharples (2011) Acosta et al. (2014) Acosta et al. (2018) Du & Sharples (2011) han y siguen utilizando metodología de simulación estática; algunos otros como (Reinhart, Mardaljevic, Rogers, 2006), Berardi & Wang (2014) y Roldán Rojas (2016) han implementado la metodología de evaluación dinámica de luz natural.

Sharples & Lash (2006) hacen una revisión de investigaciones relacionadas con el uso de luz del día en edificios atrio, realizadas durante 15 años (desde 1990), publicadas en su mayoría, en *Architectural Science Review*. Aportan conocimiento sobre las principales metodologías de investigación realizadas hasta la fecha, destacando con gran importancia que la mayoría son basados a partir de estudios modelo bajo cielos artificiales y/o reales, seguidos por el estudio de casos reales que cuentan con limitantes como la seguridad y las jornadas de trabajo extensas y por último la confianza que se empieza a tener en la metodología de estudio mediante simulaciones de software, particularmente por Radiance y la exactitud de los datos obtenidos, recalcando el uso de ésta metodología a futuro como la que sería más utilizada para el estudio de la luz natural en las edificaciones.

Littlefair (2002) discute sobre las técnicas de predicción y evaluación de la luz diurna en atrios y espacios adyacentes, clasificándolas en tres: estudios por modelos a escala, simulación por ordenador y fórmulas analíticas. Por modelos a escala concluye que se puede evaluar el impacto visual del sistema y medir la luz admitida, verificando la cantidad de luz natural a partir de un cielo artificial nublado y el sombreado solar a partir del sol real o con heliodón junto a un reloj solar, haciendo mediciones internas de luminancia. Para la técnica de medición por software, postula a RADIANCE como ejemplo de

¹ Roldán Rojas. Caracterización geométrica y lumínica de los atrios incorporados en los edificios de Santiago de Chile.

programas de “trazado de rayos” que puede modelar y calcular espacios complejos con reflexiones especulares significativas. En cuanto al método de evaluación por fórmulas analíticas, basadas en simulaciones por software y resultados de modelos a escala, se crearon fórmulas de predicción de DF promedio para la base del atrio² y para las superficies del atrio³ Lynes, (1979), siendo más precisas para atrios poco profundos; así mismo Littlefair y Aizlewood (1998)⁴ propone la fórmula de DF promedio para espacios adyacentes al atrio.⁵

Acosta et al. (2018) presenta un método predictivo para determinar la eficiencia energética y lumínica en patios y atrios mediante el cálculo del factor de luz día DF y DA, bajo cielos cubiertos, en diferentes puntos de un patio rectangular y/o el espacio central de un atrio, basado en geometría variable y la reflectancia de las superficies internas. El método predictivo que ofrece se definió a partir de modelos a escala con cielo artificial y cálculos de iluminancias y DF y DA en tres puntos del atrio (punto central en planta, punto medio de pared del atrio y vértice). Así mismo, la componente del cielo la define basándose en estudios anteriores y algoritmos de Tregenza para cuantificar el componente reflejado; Éste método predictivo propuesto, lo comparó con mediciones de atrios reales, bajo cielos cubiertos reales, concluyendo que ofrece una precisión promedio de más del 90%.

Los resultados de DF en el modelo a escala (Ilustración 18), se obtuvieron de acuerdo a relaciones de altura y longitud del atrio de 1:1 a 1:4, y tres valores de reflectancia de pared diferente. La relación 1:1 fue la que mayor porcentaje de DF registró, con reflexiones mayores en paredes blancas.

Por otro lado, el análisis de DA se desarrolló según el horario de ocupación 8am-5pm en condiciones de cielo nublado y el cálculo del consumo de la energía bajo los supuestos como la relación de ventana a fachada del 60%, en ventana con forma cuadrada, la reflectancia media de las superficies interiores de la habitación del 70%, para suelo gris (60%) y paredes y techo gris claro (80%). La transmitancia optica del vidrio corresponde al 70%.

El área de medición corresponde al área cercana a la ventana, desde la fachada a distancia de 3m. Para atrios luminosos, la autonomía de luz diurna es mucho más alta para latitudes bajas y la eficiencia energética en cuanto a ahorro mínimo de energía varía de 13% a 75% según la relación altura-anchura. Esta variación se hace más notable en latitudes altas (Ilustración 19).

² $DF_{av} = WT_g T_f \theta A (1 - R^2)$

³ $DF_{svs} = WT_g T_f \theta 2A (1 - R)$ “donde W es el área de la abertura del techo del atrio (m^2). T_g es la transmitancia difusa visible del acristalamiento, corregida por la suciedad en el acristalamiento. Se deben tomar medidas para limpiar los cristales de atrio. T_f es un factor que permite que la luz quede bloqueada por la estructura del techo del atrio. θ es el ángulo del cielo visible en grados. A es el área total de las superficies del atrio: techo, piso, paredes y ventanas (m^2). Si los lados del atrio están abiertos, deben incluirse en A agregando el área de las paredes imaginarias del atrio. R es la reflectancia media de estas superficies. Para muchos atrios R es bastante bajo. Incluso si las paredes del atrio son blancas (reflectancia 0.8), el techo y los acristalamientos laterales (reflectancia 0.15 simple, 0.3 doble) reducirán el promedio. Si los lados del atrio están abiertos, su reflectancia se toma como 0”. Paul Littlefair.

⁴ Littlefair, P. J., & Aizlewood, M. (1998). Daylighting in atrium buildings. *BRE Information Paper IP3/98, UK, Garston: Construction Research Communications*.

⁵ $DF_{sav} = 2A_w T_g DF_v A_s (1 - R_s^2)$ A_w es el área neta del acristalamiento entre el espacio y el atrio (m^2). T_g es la transmitancia visible difusa de este acristalamiento. Para un solo vidrio limpio y transparente, se puede usar un valor de 0.8; para doble acristalamiento 0.65; Para no acristalamiento 1.0. A_s es el área total (m^2) de las superficies de la habitación: techo, piso, paredes y ventanas, incluidas las del atrio. R_s es la reflectancia media de la habitación.

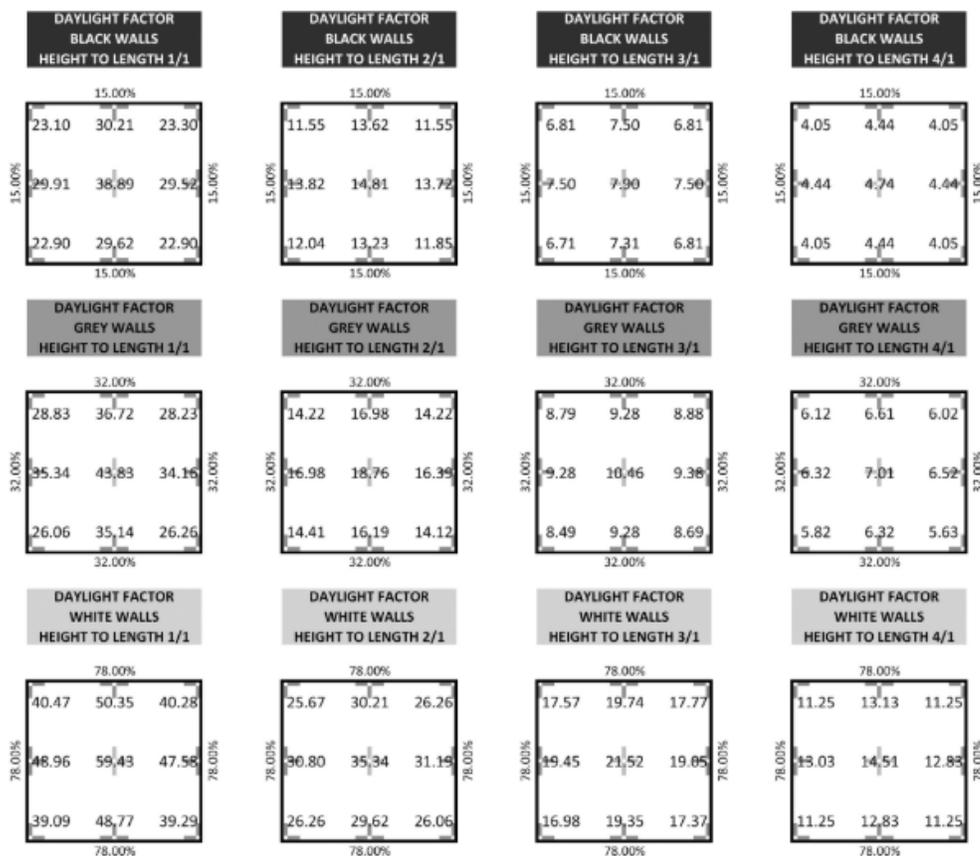


Fig. 5. Daylight factors measured in scale models in an artificial sky, shown in the courtyard floor.

Ilustración 18. Resultados de DF en piso de atrios de modelos investigados por Acosta. Fuente: Acosta:2018

Daylight autonomy in bright courtyards, considering overcast sky conditions, an illuminance threshold of 500 lx and occupancy hours from 8 am to 5 pm.							
Ratio H/L	Latitude						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
1/1	94%	94%	92%	92%	90%	85%	72%
4/3	94%	93%	91%	91%	88%	83%	69%
5/3	94%	92%	91%	90%	87%	81%	65%
2/1	92%	91%	90%	86%	85%	77%	62%
7/3	88%	90%	89%	84%	81%	73%	58%
8/3	86%	87%	87%	83%	78%	68%	55%
3/1	84%	84%	83%	82%	76%	62%	51%
10/3	84%	84%	81%	80%	73%	58%	47%
11/3	84%	81%	78%	75%	68%	54%	44%
4/1	83%	80%	78%	72%	65%	50%	41%

Minimum energy savings in electric lighting for bright courtyards, according to an illuminance threshold of 500 lx and occupancy hours from 8 am to 5 pm. Measured in kW h/m ² .							
Ratio H/L	Latitude						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
1/1	178.17	178.17	174.38	174.38	170.59	161.11	136.47
4/3	178.17	176.27	172.48	172.48	166.80	157.32	130.78
5/3	178.17	174.38	172.48	170.59	164.90	153.53	123.20
2/1	174.38	172.48	170.59	163.00	161.11	145.95	117.51
7/3	166.80	170.59	168.69	159.21	153.53	138.36	109.93
8/3	163.00	164.90	164.90	157.32	147.84	128.89	104.25
3/1	159.21	159.21	157.32	155.42	144.05	117.51	96.67
10/3	159.21	159.21	153.53	151.63	138.36	109.93	89.08
11/3	159.21	153.53	147.84	142.16	128.89	102.35	83.40
4/1	157.32	151.63	147.84	136.47	123.20	94.77	77.71

Daylight autonomy in dark courtyards and atriums, considering overcast sky conditions, an illuminance threshold of 500 lx and occupancy hours from 8 am to 5 pm.							
Ratio H/L	Latitude						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
1/1	93%	92%	91%	91%	87%	82%	66%
4/3	92%	91%	90%	86%	85%	77%	62%
5/3	87%	89%	88%	84%	79%	71%	57%
2/1	84%	84%	83%	81%	76%	62%	51%
7/3	84%	82%	79%	77%	70%	56%	45%
8/3	83%	79%	77%	71%	63%	50%	40%
3/1	77%	77%	73%	68%	54%	44%	34%
10/3	72%	70%	67%	61%	48%	39%	29%
11/3	70%	66%	63%	52%	42%	32%	23%
4/1	64%	63%	57%	45%	35%	27%	17%

Average energy savings in electric lighting for dark courtyards and atriums, according to an illuminance threshold of 500 lx and occupancy hours from 8 am to 5 pm. Measured in kWh/m ² .							
Ratio H/L	Latitude						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
1/1	176.27	174.38	172.48	172.48	164.90	155.42	125.10
4/3	174.38	172.48	170.59	163.00	161.11	145.95	117.51
5/3	164.90	168.69	166.80	159.21	149.74	134.57	108.04
2/1	159.21	159.21	157.32	153.53	144.05	117.51	96.67
7/3	159.21	155.42	149.74	145.95	132.68	106.14	85.29
8/3	157.32	149.74	145.95	134.57	119.41	94.77	75.82
3/1	145.95	145.95	138.36	128.89	102.35	83.40	64.44
10/3	136.47	132.68	126.99	115.62	90.98	73.92	54.97
11/3	132.68	125.10	119.41	98.56	79.61	60.65	43.59
4/1	121.31	119.41	108.04	85.29	66.34	51.18	32.22

Ilustración 19. Tabla de resultados de DA y consumo de energía por latitudes en modelos investigados por Acosta, 2018

2.5. VARIABLES DE DISEÑO GEOMÉTRICAS Y MATERIALIDAD EN ATRIOS CENTRALES Y ESPACIOS ADYACENTES PARA EL COMPORTAMIENTO ÓPTIMO DE ILUMINACIÓN NATURAL.

En las diferentes investigaciones realizadas entorno a la eficiencia de iluminación natural en atrios, se han reflejado las principales variables de diseño arquitectónico de estos espacios, entre las que se encuentran las dimensiones geométricas, tipos de cubierta, tipo de fenestraciones, reflectancia de superficies interiores y ubicación y orientación de los espacios atrio Sharples & Lash (2006).

Sobre configuraciones geométricas óptimas para el desempeño lumínico natural al interior de atrios, Bednar (1986) aporta los indicadores geométricos PAR para la proporción en planta del atrio con la razón entre el ancho (a) y el largo (l) y SAR para la proporción en sección o corte del atrio, con la razón entre alto (h) y ancho (a). A partir del estudio de dichos indicadores, concluye que una relación SAR menor a 1 responde a atrios poco profundos; entre valores 1 y 2 atrios de largos predominantes con proporciones efectivas de iluminación natural y para valores mayores a 2, atrios de mayor altura y menores anchos; Así mismo, la relación SAR con valores menores a 1 responden a atrios lineales y rectangulares y con valores iguales y/o cercanos a 1, cuadrados. Liu et al. (1991) postula el indicador WI (Índice de cavidad), para estudiar la variación y distribución de iluminación natural en atrios, relaciona las dimensiones involucradas en los coeficientes PAR y SAR, un alto valor de éste indicador representa cavidades profundas de atrios. Los análisis realizados, tienen recomendaciones cercanas a la de Bednar sobre atrios rectangulares y lineales.

Investigaciones de Ahadi et al. (2018), Calcagni & Paroncini (2004), Du & Sharples (2011), concluyen que configuraciones con valores WI \leq o iguales a 1.5 son óptimos para aportar un DF considerable a espacios adyacentes, lo que correspondería a un atrio de aproximadamente 4 niveles de altura. Ahadi et al. (2018), evaluaron el rendimiento de iluminación natural y la ventilación natural en diferentes tipos de pozos de luz y sugieren un patrón de forma transversal horizontal y vertical de los pozos para el mejoramiento del rendimiento lumínico y de ventilación natural en los espacios conectados a los pozos de luz para la ciudad de Tehran. Los resultados evidencian que el pozo de luz cuadrado con dimensiones mínimas de 4 x 4 m y el pozo de luz rectangular con dimensiones de 3 x 4 m pueden proporcionar adecuadas tasas de ventilación y autonomía de iluminación anual (DA) para las habitaciones conectadas al pozo de luz, hasta 4 pisos debajo del techo. Así mismo probaron con la rotación horizontal de las ventanas del pozo de luz para la creación de tragaluces directos, logrando aumentar la eficiencia lumínica en los espacios adyacentes (Ilustración 20).

Los resultados de DF horizontal en los espacios adyacentes, evidencian que manteniendo la altura constante y variando la longitud del atrio, el DF aumenta a medida que aumenta el área de ingreso de luz del atrio, es decir, la disminución del WI ($0.78 \leq WI \leq 0.89$) y así mismo, los niveles de luz disminuyen a medida que aumenta la altura del atrio (con valores de WI altos) (Ilustración 22).

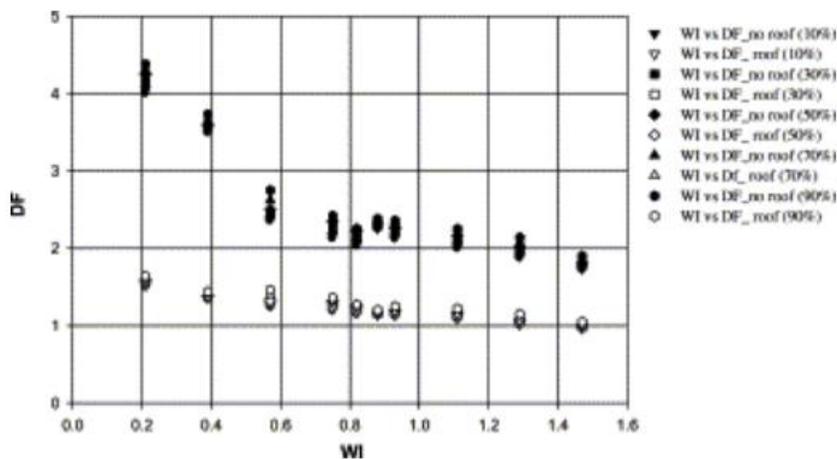


Ilustración 22. Diferentes valores de DF en los espacios contiguos según índice WI y valores de reflectancia en paredes del atrio.

Du & Sharples (2011) Investigaron bajo condiciones del cielo nublado, en modelos de atrio abiertos, factores de luz día horizontales en los espacios adyacentes, así como DF verticales en las paredes del pozo atrios lineales, de 3 caras y 4 caras. Para el estudio llevaron a cabo mediciones a partir de modelos a escala, cálculos teóricos y simulaciones por el software Radiance, estableciendo una comparación de resultados que aportaron validación de las simulaciones realizadas en Radiance. Concluyen que los niveles medios de luz día (DF) en las habitaciones muestran una relación lineal con los niveles de luz día vertical en la pared del pozo. Así mismo, a partir de la geometría de pozo, sus fachadas y la reflectancia superficial, analizaron las variaciones de la luz día en los espacios adyacentes; para un SAR determinado, disminuir el valor de PAR aumenta el DF de los espacios adyacentes. Así mismo al aumentar la reflectancia de las paredes del pozo del atrio cuadrado o rectangular, mejora los valores de DF en las posiciones medias y bajas de los espacios y mencionan estrategias de diseño para apoyar las decisiones preliminares de diseño.

Ghasemi et al. (2015) Usando el software Radiance y por modelo a escala, evaluaron el impacto del ancho del atrio “vertical” y la altura del claristorio orientado al sur, en Malasia, en cuanto a la cantidad del Factor de luz del día promedio (ADF) a diferentes niveles de altura de atrios verticales y determinaron los tamaños geométricos apropiados para un atrio de cuatro pisos y cuatro lados para cubrir la demanda de iluminación natural en espacios de oficinas. El estudio concluyó sobre la relación entre el ancho del atrio (W) y la disponibilidad de luz diurna en los espacios adyacentes del atrio, que las tendencias de variación de ADF en los diferentes pisos del atrio son variables, ya que el máximo ADF se produce cuando el ancho del atrio proporciona una distancia óptima entre las áreas de oficinas en

cada piso y la apertura de cubierta; Esta distancia está significativamente relacionada con el ángulo de visión del cielo, el ángulo de altitud, para que la luz pueda penetrar en las salas de oficina (Ilustración). Además, se concluye que el aumento de la altura de las ventanas de claristorio aumenta la cantidad de ADF en el atrio y sus espacios adyacentes, llegando a la conclusión que la relación mínima aceptable de la altura del clérigo (cubierta) (h) a la altura del atrio (H) para proporcionar el nivel suficiente de ADF en los espacios adyacentes del atrio es $h / H = 3/8$. (Ilustración 23 e Ilustración 24). Ghasemi encuentra que a medida que aumenta la altura del claristorio aumentan los valores de ADF, así mismo, cuando el grado de visión del cielo (θ) tiene mayor valor, el nivel de ADF es mayor en los diferentes pisos del atrio.

Es preciso nombrar que el factor de luz diurna DF, se da como un porcentaje resultado de la suma de cada uno de los tres componentes que inciden en la iluminación de un espacio, ya que cada uno estos es afectado por diferentes elementos del diseño y el contexto del mismo (ver Ilustración 25):

$$DF = SC + ERC + IRC$$

SC= Componente de Cielo directo

ERC= Componente Reflejado exteriormente

IRC= Componente Reflejado interiormente

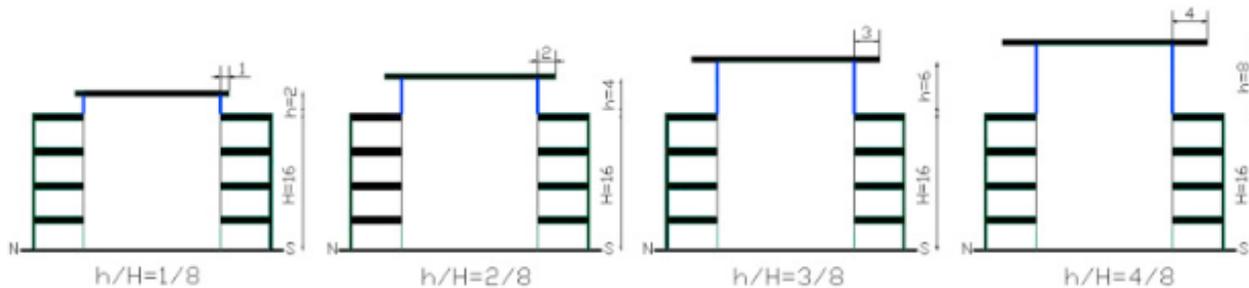


Ilustración 23. Diagrama esquemático de diferentes clarestorios de atrio. H: altura del atrio; h = altura de la ventana del claristorio. Investigación Ghasemi_2015.

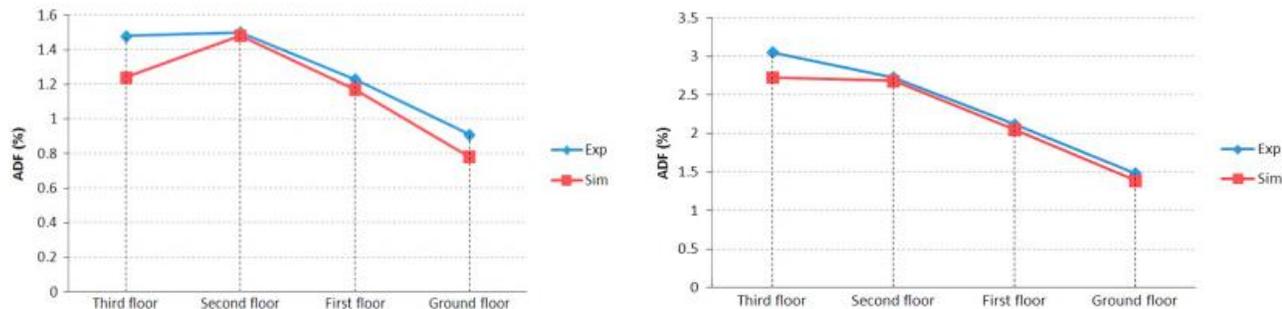


Ilustración 24. Comparación entre el ADF de simulación (Sim) y las mediciones experimentales (Exp) en un modelo de atrio con 4 m y 8m de altura de claristorio respectivamente. Fuente: Investigación Ghasem 2015i.

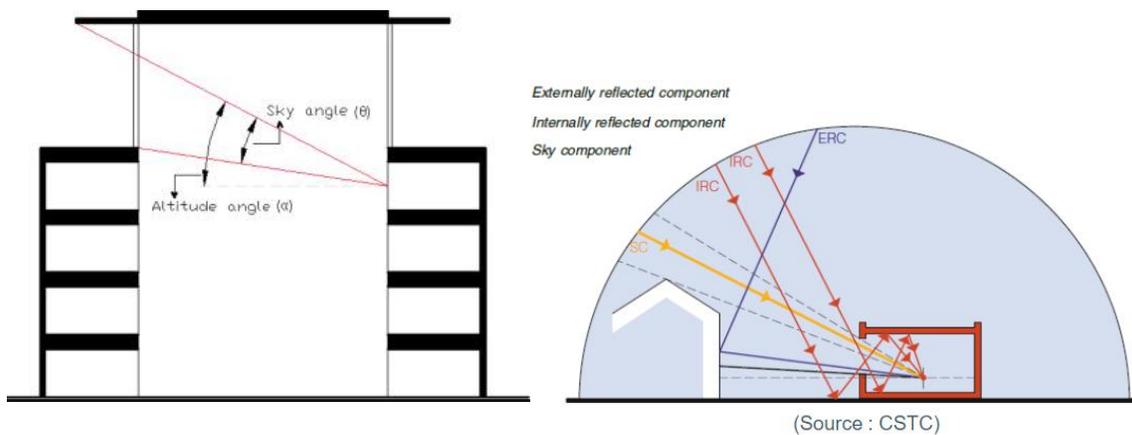


Ilustración 25. Diagramas esquemáticos de la definición del ángulo de visión del cielo y el ángulo de altitud para la habitación en cada piso. Fuente: Investigación Ghasemi_2015 / Source: CSTC.

El New Buildings Institute ; University of Washington ; University of Idaho (2019) realizaron una guía de diseño de iluminación natural, según el estudio del potencial lumínico de atrios abiertos sobre espacios adyacentes teniendo en cuenta variables de altura en número de pisos y ancho del atrio y espacios adyacentes, así como, variaciones en las entradas y diferentes obstrucciones de luz natural por cubierta. Establece un nivel mínimo de iluminancia horizontal en los espacios de adyacentes de 300 lux.

En la evaluación de la guía de diseño, se puede evidenciar que para un atrio con ancho de 17 metros y espacios adyacentes de 11 metros, el atrio empieza a aportar buenos niveles de iluminación natural y uniformidad de la luz dentro de los espacios adyacentes desde 4 pisos por debajo del atrio (Ilustración 26). El estudio también evidenció que al disminuir el ancho del atrio a 3m y manteniendo el ancho de oficinas, los niveles de iluminación natural no son suficientes desde el 3 nivel por debajo del atrio; cuando el ancho del atrio aumenta a 6 metros el acristalamiento del atrio permite equilibrar y homogenizar un poco la iluminación al interior del espacio adyacente. Al tener el mismo ancho de atrio y espacios adyacentes, con referencia al tercer nivel, se logra tener una iluminación natural efectiva al interior, pero no alcanza el nivel de iluminancia mínimo de 300lux sobre las superficies de trabajo.

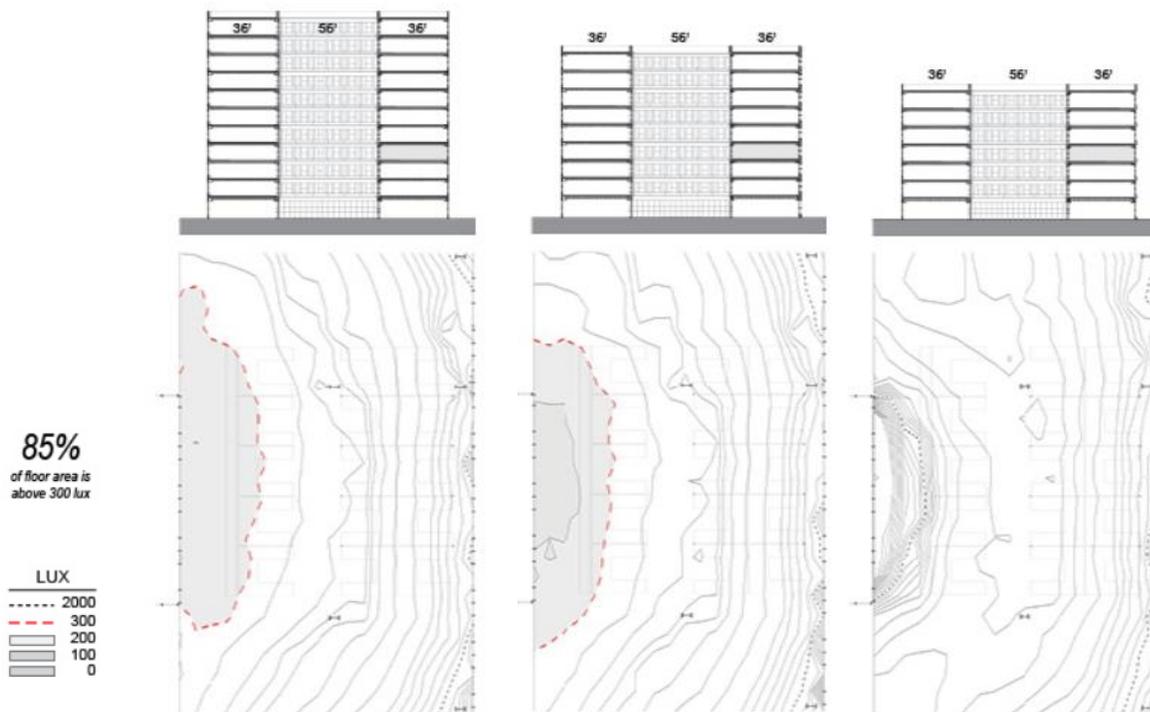


Ilustración 26. Evaluación de Niveles de iluminancia natural para 8, 6 y 4 pisos por debajo de un atrio de 17 metros de ancho con espacios adyacentes de 11mt. Fuente: Guía de patrones de Diseño de Iluminación Natural. NBI.

Roldán Rojas (2016) estableció por comparación, rangos de desempeño lumínico en un modelo base de atrio central o de cuatro lados, con variaciones en coeficientes WI (proporciones de la cavidad del atrio) (Ilustración 27), orientación y tipos de cubierta, en el clima mediterráneo de Santiago, obteniendo 36 modelos parametrizados, evaluados por software Daysim (el cual cuenta como motor de cálculo radiance) por metodología estática y dinámica (Ilustración 28); analizó los resultados promediando el desempeño lumínico, para vincularlos con los atrios de cuatro caras documentados en el inventario local.

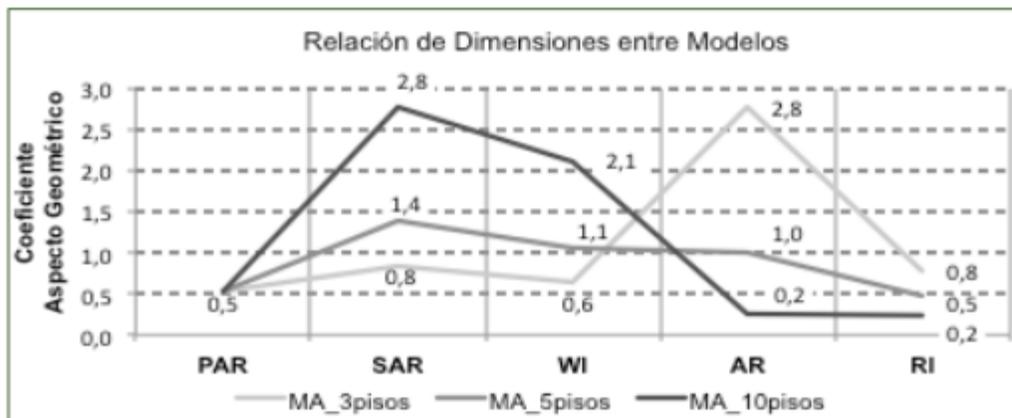


Ilustración 27. Comparativa de relación aspecto geométrico de modelos. Fuente: Investigación Roldán_2016

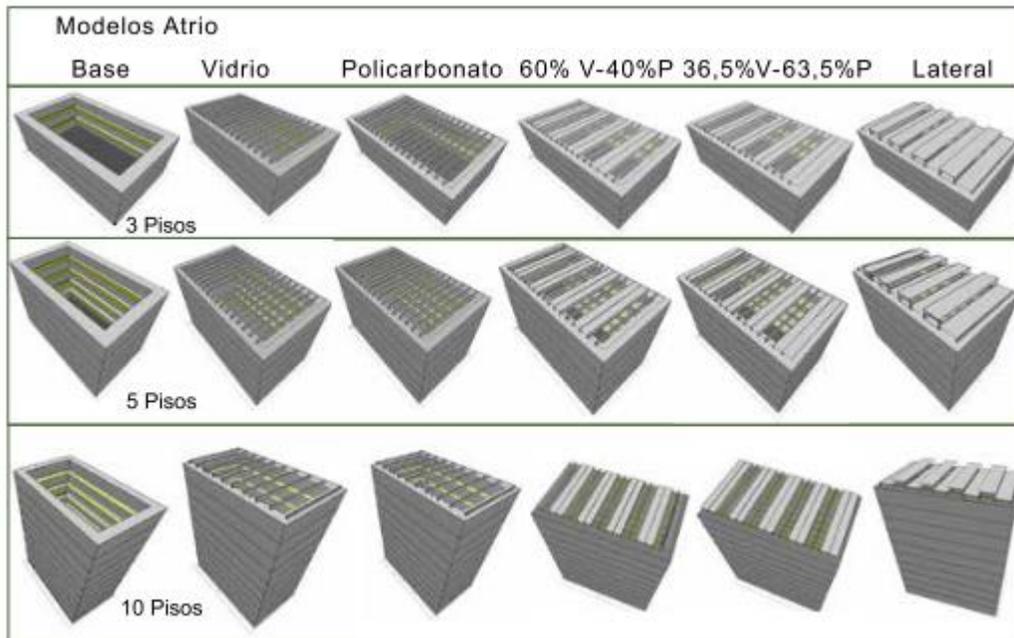


Ilustración 28. Variaciones de modelo base de atrio de 4 caras. Fuente: Investigación Roldán_2016

La evaluación se realizó a partir de los indicadores de evaluación DF , $DA_{(300 \text{ lux})}$ y $UDI_{(100-2000 \text{ lux})}$, concluyendo que el indicador dinámico $UDI_{(100-2000 \text{ lux})}$, resultó más informativo que los otros indicadores y situó al atrio como un aporte y una estrategia lumínica difusa para el mismo en aquellos casos de 10 pisos y luego algunos de 5 pisos, indicando menos favorables aquellos de 3 pisos; de ésta manera obtuvo una optimización geométrica de atrio según aspecto de la cavidad $WI > 2$.

REFLECTANCIA DE LAS SUPERFICIES DEL ATRIO

La reflectancia de un material es un aspecto importante en el diseño de iluminación natural dado que responde al cociente entre la cantidad de luz incidente sobre éste y la cantidad de luz que puede reflejar; Por tanto, las superficies de los atrios desempeñan un papel muy importante en la manera en que la luz puede ser reflejada al interior de estos espacios, a diferentes niveles de altura y su aporte correspondiente lumínico en espacios adyacentes. Esta variable de diseño ha sido estudiada por Acosta et al. (2018), así como analizada y normativizada internacionalmente por la EN 12464-1 e IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) y la ISO 8995-1:2016 (CIE S 008/E: 2001).

RELACIÓN CON EL PORCENTAJE VENTANA MURO

El diseño geométrico para la entrada de luz natural en el atrio combinado con la reflectancia de los materiales de sus superficies envolventes, permite definir el espacio y el entorno visual; Aunque los niveles de iluminación natural pueden ser adecuados para el aporte en el atrio en sí, se ha evidenciado como disminuyen en los espacios adyacentes, principalmente en pisos inferiores. Estudios como el de

Calcagni y Paroncini (2004); Du y Sharples (2011) evidencian que se puede aumentar los niveles de iluminación tanto en el piso del atrio como en los espacios adyacentes, aumentando gradualmente las proporciones de aperturas de área vidriada desde los niveles más altos a los inferiores, para permitir mayores reflexiones de luz en las superficies y lograr un equilibrio entre áreas de superficies opacas y aperturas en el atrio. Samant (2011) documenta que Aschehoug, (1992) presentó un porcentaje de acristalamiento "óptimo" para atrios de 4 pisos con 50% en el cuarto piso, 60% en el tercer piso, 70% en el segundo piso y 100% en el primer piso para dar condiciones de iluminación diurna bastante similares en los espacios adyacentes con acristalamiento hacia la calle.

2.6. CONFORT VISUAL EN ESPACIOS DE OFICINA: ILUMINACIÓN NATURAL

En la actualidad, las personas realizan gran cantidad de actividades cotidianas al interior de edificios, evidenciando que la mayoría del tiempo se habita en espacios construidos; esto ha llevado a establecer criterios de medición y evaluación del confort ambiental, a partir de parámetros, térmicos, lumínicos, acústicos, calidad del aire, etc. El confort visual hace referencia a un estado o impresión subjetiva de comodidad visual respecto a la calidad, cantidad y distribución de la luz en un ambiente. La Comisión Internacional de iluminación (CIE) sostiene que el confort visual está asociado al control de distribución de iluminancias, luminancias, deslumbramiento, direccionalidad de la luz, aspecto del color de la luz y superficies (G et al. [2012]).

La luz del sol es una fuente lumínica natural que puede contribuir a altos niveles de confortabilidad visual, así como, a la eficiencia y autonomía energética de los requerimientos de luz artificial en edificios de oficinas; Proporciona una buena calidad de luz para diferentes tareas visuales desarrolladas, realzando el color y la apariencia de los objetos; además, estimula el reloj biológico al proporcionar el espectro de luz visible completo e influye en la psicología emocional y productividad laboral Van Bommel & van den Beld (2004). Incluir en el diseño de edificios el uso de iluminación natural, teniendo en cuenta aspectos como el deslumbramiento, altos contrastes, entre otros aspectos, aporta a la creación de entornos visuales apropiados para que el ser humano realice tareas con eficiencia sin producir fatiga y otro tipo de molestias visuales y contribuye a su bienestar.

Para efectos del presente estudio, se hablará de los estándares y criterios normativos que se utilizan para evaluar el confort visual en el diseño de iluminación natural de espacios arquitectónicos.

2.6.1. ESTANDAR NACIONAL : TÉRMINOS DE REFERENCIA ESTANDARIZADOS CON PARÁMETROS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y CONFORT AMBIENTAL, PARA LICITACIONES DE DISEÑO Y OBRA DE LA DIRECCIÓN DE ARQUITECTURA, SEGÚN ZONAS GEOGRÁFICAS DEL PAÍS Y SEGÚN TIPOLOGÍA DE EDIFICIOS (TDR_e)

A partir de la política energética del gobierno de Chile y de la necesidad de definir un estándar mínimo de uso energético y condiciones de confort ambiental en edificaciones públicas, el Ministerio de Obras Públicas (MOP), en el año 2006 crea el documento TDR_e; Si bien, éste estándar no es obligatorio para la totalidad de construcciones del país, si representa una guía de diseño eficiente tomada en cuenta.

El TDR_e define indicadores y criterios para evaluar el confort visual y determinar el diseño de iluminación de un ambiente interior, teniendo en cuenta la luz natural como fuente principal de iluminación y la luz artificial como fuente de iluminación complementaria, favoreciendo el comportamiento energético del edificio.

Los criterios que toma en cuenta a partir de la iluminación de los espacios responden a:

- Niveles y distribución de iluminancia (lux) en el área o plano de trabajo tanto para iluminación natural como artificial, estableciendo una grilla de análisis sobre el área determinada o sobre el espacio entero si no se conoce la ubicación exacta del mobiliario.

Los valores de iluminancia deben ser tenidos en cuenta respecto a la actividad desarrollada en los espacios; para las áreas de ocupación continua, los niveles no deberían ser inferiores a 200 Lux. Las siguientes tablas de valores de iluminancia del TDR_e, están en concordancia y/o se crean a partir de normativas e instituciones internacionales como la norma europea EN 12464-1 e IESNA (Illuminating Engineering Society of North America).

Tabla 1. Escala de Iluminancia recomendada (lx). Fuente: EN 12464-1.

20 – 30 – 50 – 75 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – 1000 – 1500 – 2000 – 3000 - 5000
--

Tabla 2. Actividad y valores mínimos de luminancia recomendados por IESNA. Fuente CITEC UBB

ILUMINANCIA MÍNIMA (LUX)	TIPO DE ACTIVIDAD ILUMINACIÓN
30	Circulación en superficies públicas mal encendidas
50	Orientación rápida para visitas de corta duración
100	Tareas visuales estrictamente ocasionales
300	Tareas con exigencias visuales simples
500	Tareas con exigencias visuales medias:
1500-2000	Tareas con elevadas exigencias visuales
3.000 a 10 000	Tareas muy meticulosas

- Métricas de evaluación lumínica natural basadas en cálculo de iluminancia:

-Métrica estática

Tabla 3. Escala Factor de luz día. Fuente: Bülow-Hübe 2001/ TDRé

FLD	
< 1%	insuficiente para la mayoría de las tareas
= 2%	mínimo requerido
entre 2% - 5%	considerado como aceptable
entre 5% - 10 %	el espacio es esencialmente iluminado por luz natural
> 10%.	posibilidades de tener deslumbramiento

Tabla 4. Valores límite FLD. Fuente: TDRé

VALORES LÍMITE	
Aceptable	FLD > 2% - < 5%.
Bueno	FLD ≥ 5% - ≤ 10%
Este indicador podrá ser aplicado sólo en aquellas zonas donde predomina el cielo cubierto sobre un 40 % de año, de acuerdo a Tabla 8.17.	

-Métricas dinámicas de evaluación lumínica natural, basadas en archivos climáticos:

Tabla 5. Niveles de aplicación de la autonomía de luz día (DA). Fuente: Rensselaer Polytechnic Institute, 2010 / TDRé.

DA	POTENCIAL DE AHORRO	VALORES LÍMITE
< 50%	BAJO	NO CUMPLE
≅ 50 - <80%	MEDIO	ACEPTABLE
≅ 80%	ALTO	BUENO

Tabla 6. Valores de Autonomía de luz natural en el espacio (DA) mínimos exigidos para escuelas, oficinas y hospitales. Fuente: Ilumina 2014.

TIPO DE EDIFICIO	HORAS OCUPADAS	EMIN	DA	% SUPERFICIE
Escuelas y Oficinas	8am a 6pm	300 lx	> 50%	>55% (bueno) >75% (muy bueno)
Hospitales	8am a 6pm	300 lx	> 50%	>75% (bueno) >90% (muy bueno)

Tabla 7. Rangos de valores de Iluminancia Util (UDI). Fuente: TDRé.

VALORES LÍMITE	
Aceptable	: ≥ 80% del año UDI 200 - 3000 lux
Bueno	> 50 - < 80% del año UDI 200 - 3000 lux (mínimo)

- Distribución de luminancia (cd/m²) en el campo visual y evaluación de los posibles focos de deslumbramiento, buscando evitar fuentes de luz que puedan causar algún tipo de incomodidad.

Se mide a partir de imágenes fotográficas HDR o a través de la Probabilidad de deslumbramiento (DGP).

Tabla 8. Valores límite de Índice de deslumbramiento de luz natural. (DGP). Fuente: TDRé

VALORES LÍMITE	
Aceptable	DGP > 0.35 % y ≤ 40 % es considerado imperceptible y perceptible, respectivamente.
Bueno	DGP ≤ 0.35 % no hay riesgo de deslumbramiento (mínimo).

Además de lo anterior, (MOP) (2016) en el TDRé, establece que “los valores de luminancia de las superficies de muro de la escena de luz o en el campo visual, deben preferirse valores comprendidos entre 100 - 300 (cd/m²). No ser menores que 30 (cd/m²) ni mayores a 500 cd/m².”

- La uniformidad media es otro aspecto que el TDRé tiene en cuenta al momento de evaluar la calidad lumínica de un espacio. Este aspecto responde a la relación entre la iluminancia en el área de trabajo y la del espacio circundante.

Tabla 9. Valores límite de Uniformidad Media. Fuente: TDRé

VALORES LÍMITE	
Aceptable	Uniformidad media área de trabajo ≥ 0,7
Bueno	Uniformidad media área de trabajo ≥ 0,5 (mínimo)

La relación de uniformidades a utilizar para valorar cada plano de cálculo (horizontal o vertical) será a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Uniformidad media (Um)} = \text{Iluminancia mínima (Emin)} / \text{Iluminancia media (Em)}$$

Adicionalmente el estándar establece referencias de valores de coeficientes de reflexión y reflectancia para los materiales y acabados de las superficies de acuerdo a la funcionalidad del espacio y tipos de cristales de vidrio con coef. de transmisión luminosa del ambiente a iluminar.

Tabla 10. Valores límites de reflectancias de las superficies interiores. Fuente: The Society Of Light And Lighting 2002/TDR.

COEFICIENTE DE REFLEXIÓN R [%]				
SUPERFICIE	EDIFICIOS DE OFICINAS	EDIFICIOS EDUCACIONALES	EDIFICIOS DE SALUD	EDIFICIOS DE SEGURIDAD
Cielos interiores	> 0,7	> 0,7	> 0,75	> 0,7
Paredes :				0,5 - 0,7
*sobre los 2m	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7	0,6 - 0,8	N/A
*bajo los 2m	0,5	0,5	0,5	N/A
Divisiones	0,4 - 0,7	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7	0,4 - 0,7
Suelos	0,2 - 0,4	0,2 - 0,5	0,2 - 0,4	0,2 - 0,4
Muebles	0,25 - 0,5	0,25 - 0,5	0,4 - 0,6	N/A
Cortinas/persianas	0,4 - 0,6	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7	N/A
Pizarra oscura	N/A	0,05 - 0,20	N/A	N/A
Pizarra clara	N/A	0,50 - 0,70	N/A	N/A

Tabla 11. Valores de Reflectancias: referencia de colores y materiales. Fuente: CITEC UBB./ TDR.

COLORES	REFLECTANCIA r [%]	MATERIALES	REFLECTANCIA r [%]
Blanco	0,70 – 0,85	Mortero	0,15 – 0,20
Amarillo	0,50 – 0,75	Pintura blanca nueva	0,65 – 0,75
Azul	0,40 – 0,55	Hormigón	0,25 – 0,50
Verde	0,45 – 0,65	Ladrillo claro	0,45 – 0,50
Rojo	0,30 – 0,50	Ladrillo oscuro	0,30 – 0,40
Granito	0,15 – 0,25	Mármol blanco	0,60 – 0,70
Marrón	0,30 – 0,40	Madera	0,25 – 0,50
Gris oscuro	0,10 – 0,20	Espejos	0,80 – 0,90
Negro	0,03 – 0,07	Acero pulido	0,50 – 0,65
		Vidrio reflectante	0,20 – 0,30
		Vidrio transparente	0,07 – 0,08

Tabla 12. Tipo de vidrios y valores de referencia para la elección de los cristales. Fuente: IDAE 2005 / TDR.

GRUPO	TIPO	ESPESOR VIDRIO (MM)	ESPESOR CÁMARA AIRE (MM)	COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN LUMINOSA
Simple	Claro	3	-	0,90
		4	-	0,89
		6	-	0,89
Doble	Claro - Claro	4	6	0,79
		4	12	0,79
		4	18	0,79
		6	6	0,88
Doble reflectante	Claro	6	12	0,55
	Plata	6	12	0,30
	Verde	6	12	0,23
	Verde oscuro	6	12	0,20
Doble baja emisividad	Claro	6	12	0,16
		4	6	0,77
		4	12	0,77
		4	18	0,77
	Reflectante	6	6	0,67
		4	6	0,75
		4	12	0,75

2.6.2. NORMATIVA INTERNACIONAL.

ISO

8995:2002 (E) (CIE S 008/E: 2002) - ILUMINACIÓN DE LOS LUGARES DE TRABAJO.

La presente norma internacional fue desarrollada por The Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) (2002), una organización internacional reconocido por la ISO para normatizar, cooperar e intercambiar información relacionada al arte y la ciencia de la iluminación entre países miembros. La primera parte de la norma, aporta requisitos de iluminación para espacios de trabajo en interiores que permitan el confort visual para la realización de tareas específicas con facilidad y comodidad, satisfaciendo aspectos cuantitativos y cualitativos como:

- Iluminancia
- Distribución de luminancias
- Deslumbramiento
- Direccionalidad de la luz
- Aspecto de color de la luz y las superficies.
- Parpadeo
- Luz natural
- Mantenimiento

La norma establece otros parámetros ergonómicos visuales que influyen en el mejoramiento del desempeño visual de los trabajadores, sin requerir aumentar la cantidad de iluminancia del ambiente:

- Tamaño, forma, posición, color, reflectancia del detalle y fondo de la tarea a desarrollar.
- Agudeza visual del trabajador (ra), percepción de color y percepción de profundidad.

En cuanto a la iluminación natural, la norma da cuenta de la oportunidad de éste recurso para proporcionar iluminación total o parcial para las tareas visuales; así mismo, del cambio en intensidad y espectro de color al interior de los espacios y los elementos arquitectónicos como ventanas laterales y cenitales por las cuales se pueda diseñar su ingreso al interior del espacio. Menciona que el DF no debería ser menor a 1% en el plano de trabajo a 3 metros desde la pared de la ventana y a 1 metro de las paredes laterales; si estos valores no se cumplen, la iluminación natural deberá ser complementada con iluminación artificial para cumplir con la iluminancia requerida en los puestos de trabajo y equilibrar las distribuciones de luminancias, así como apantallamientos de las ventanas para reducir deslumbramientos si se presentan.

DISTRIBUCIÓN DE LUMINANCIAS

Para controlar el nivel de adaptación de los ojos que influye en la realización de la tarea. Una luminancia balanceada ayudará a la agudeza visual, a manejar la sensibilidad del contraste y la eficiencia de funciones oculares como la contracción de pupilas, movimientos de los ojos, acomodación, entre otros. En el caso contrario, las luminancias desbalanceadas, pueden repercutir en deslumbramientos, fatigas visuales por contrastes demasiado altos y readaptación visual más demorada o contrastes muy bajos poco estimulantes.

Las luminancias están determinadas por la iluminancia y reflectancias de las superficies. La norma establece un rango de reflectancias útiles según el tipo de superficie interior del espacio:

Tabla 13. Rango reflectancias para superficies interiores. Fuente: CIE

Cielo raso o cubierta	0.6-0.9
Paredes	0.3-0.8
Piso	0.1-0.5
Plano de Trabajo	0.2-0.6

ILUMINANCIAS PARA EL AREA DE TRABAJO

La norma establece iluminancia mantenida sobre las áreas de trabajo. Los valores de iluminancia media no deben estar por debajo de los recomendados en la Tabla 14, siendo ellos válidos para condiciones visuales normales y teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Los requeridos para la tarea visual específica.
- La seguridad
- Aspectos psico-fisiológicos como comodidad visual, bienestar y economía.
- La experiencia práctica.

Tabla 14. Listado de actividades para edificios de oficinas con especificaciones de valores de iluminancia, limitación de deslumbramiento y calidad del color.

Tipo de interior, tarea o actividad	E _m lux	CUD _L	R _s	Observaciones
1. AREAS GENERALES DE EDIFICACIONES				
Vestíbulos de entrada	100	22	60	
Salas de estar	200	22	80	
Áreas de circulación y pasillos	100	28	40	En las salidas y entradas proporcionar una zona de transición y evitar cambios súbitos
Escaleras, escaleras mecánicas y bandas transportadoras (de personas)	150	25	40	
Rampas/zonas de carga	150	25	40	
Comedores	200	22	80	
Áreas de descanso	100	22	80	
Salas para ejercicios físicos	300	22	80	
Guardarropas, cuartos de aseo, baños, tocadores	200	25	80	
Enfermerías	500	19	80	
Sala de atención médica	500	16	90	T _{cp} 4 000 k, como mínimo
Cuartos técnicos (industrias), cuartos de equipos eléctricos	200	25	60	
Cuarto de correspondencia, tablero de interruptores.	500	19	80	
Almacén, cuartos de mercancías, almacén refrigerado	100	25	60	200 lux si están ocupados continuamente
Áreas de despacho, embalaje, manipulación	300	25	60	
Estación de control	150	22	60	200 lux si están ocupados continuamente
22. OFICINAS				
Archivado, copiado, circulación, entre otros.	300	19	80	
Escritura, mecanografía, lectura, procesamiento de datos	500	19	80	Para trabajar en PVD, ver 4.10
Dibujo técnico	750	16	80	
Estación de trabajo CAD	500	19	80	Para trabajar en PVD, ver 4.10
Salas de conferencias y reuniones	500	19	80	La iluminación debiera ser controlable (regulable)
Puesto (carpeta) de recepción	300	22	80	
Lugar de archivos	200	25	80	

Escala de iluminancias recomendada: La menor diferencia significativa en el efecto subjetivo de la iluminancia debe responder a un factor de 1.5.

20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – 1000 – 1500 – 2000 – 3000 – 5000 lux.

Iluminancia en entornos inmediatos: Se debe proporcionar una distribución balanceada de iluminancias en el campo visual que tenga en cuenta el área de la tarea visual y el entorno inmediato.

Tabla 15. Iluminancia de entornos inmediatos.

Iluminancia de la tarea lux	Iluminancia de los entornos inmediatos lux
≥ 750	500
500	300
300	200
≤ 200	Igual a la iluminancia de la tarea

3. DEFINICIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

3.1. FUNCIÓN Y TIPOLOGÍA DE EDIFICIO ESCOGIDO.

Se realizará la evaluación de un modelo teórico de un edificio aislado de alta densidad con función de oficinas en la ciudad de Santiago de Chile, que integre como estrategia de iluminación natural un espacio atrio. La elección de estudiar un edificio de gran altura responde a la importancia de las dinámicas de diseño convencionales que se emplean en los planteamientos de ésta tipología de edificación, de la cual bien se sabe, aparte de ser de gran escala, representa grandes gastos energéticos por operación (iluminación artificial y climatización) y materiales embebidos, así como la generación de grandes cantidades de residuos. Pensar los edificios de gran escala con criterios de diseño ecológicos y sustentables es pertinente, puesto que hoy por hoy la mayoría de las ciudades principales los albergan y pueden ser pensados desde planteamientos de diseño que promocionen modelos de ciudad sustentable.

“Las ciudades y sus grandes edificios exigen mayor atención respecto a su diseño ecológico, porque son los lugares donde los problemas de consumo de recursos, relaciones económicas y modos de vida contaminantes del medio ambiente, suponen una amenaza mayor y más insistente para los recursos naturales y los ecosistemas globales” (Yeang, 2001).

La mayoría de edificios de oficina de alta densidad, descarta la iluminación natural para suplir las necesidades de confort lumínico de sus ocupantes, por las grandes áreas de superficie en planta que impiden llevar iluminación natural al centro de las mismas, siendo la iluminación artificial utilizada en la mayor parte del horario operativo y repercutiendo en altos gastos energéticos del edificio, así como en el detrimento del bienestar de los ocupantes, al no estar la mayoría de las veces diseñada respecto al ciclo circadiano (reloj biológico interno y externo estimulado en gran parte por la iluminación natural) de las personas.

Se realiza a continuación una revisión de los principales edificios de gran altura existentes en Santiago y registrados en internet, así como aquellos que integran atrios en la ciudad y han sido clasificados previamente en un estudio realizado por Roldán Rojas (2016), quien realizó un inventario de 27 edificios con atrios de uso público en la Ciudad de Santiago de Chile desde 1982 a 2010, estandarizándolos bajo la clasificación de Saxon (1983), para luego establecer un modelo base parametrizado a partir de las condiciones volumétricas de 19 de esos edificios. Ésta revisión de proporciones volumétricas y áreas de superficie en planta, se toman como referencia para contrastarlas con las variables de diseño geométrico de atrios centrales para iluminación natural estudiados en otras investigaciones y posteriormente establecer el modelo base de estudio.

Según la clasificación de atrios que realizó Roldan, los tipos de atrios de tres y cuatro lados, fueron los que habitualmente se encontraron, dentro de la trama urbana del centro histórico o en sus

inmediaciones, sumando el 56% de la muestra evaluada. El atrio de 4 caras fue el más recurrente en la arquitectura de Santiago, con superficies en planta entre 36 y 404 m² (Ilustración 29).

Dimensiones promedio 27 atrios							
ATRIO			Dimensiones (m)			Planta	Volumen
Caras	Tipo	Edificios	Largo (l)	Ancho (a)	Alto (h)	(m ²)	(m ³)
4		8	24,7	12,8	17,8	337,2	5887,1
3		7	17,9	15,8	32,7	331,7	10240,1
2		3	Irregular	Irregular	18,8	179,9	2813,0
1		3	Irregular	Irregular	14,6	442,4	9221,7
LINEAL		6	35,7	11,3	16,9	317,2	5438,8

Ilustración 29. Dimensiones promedio de 27 atrios de edificaciones en la ciudad de Santiago. Fuente: Roldan Rojas, 2016.

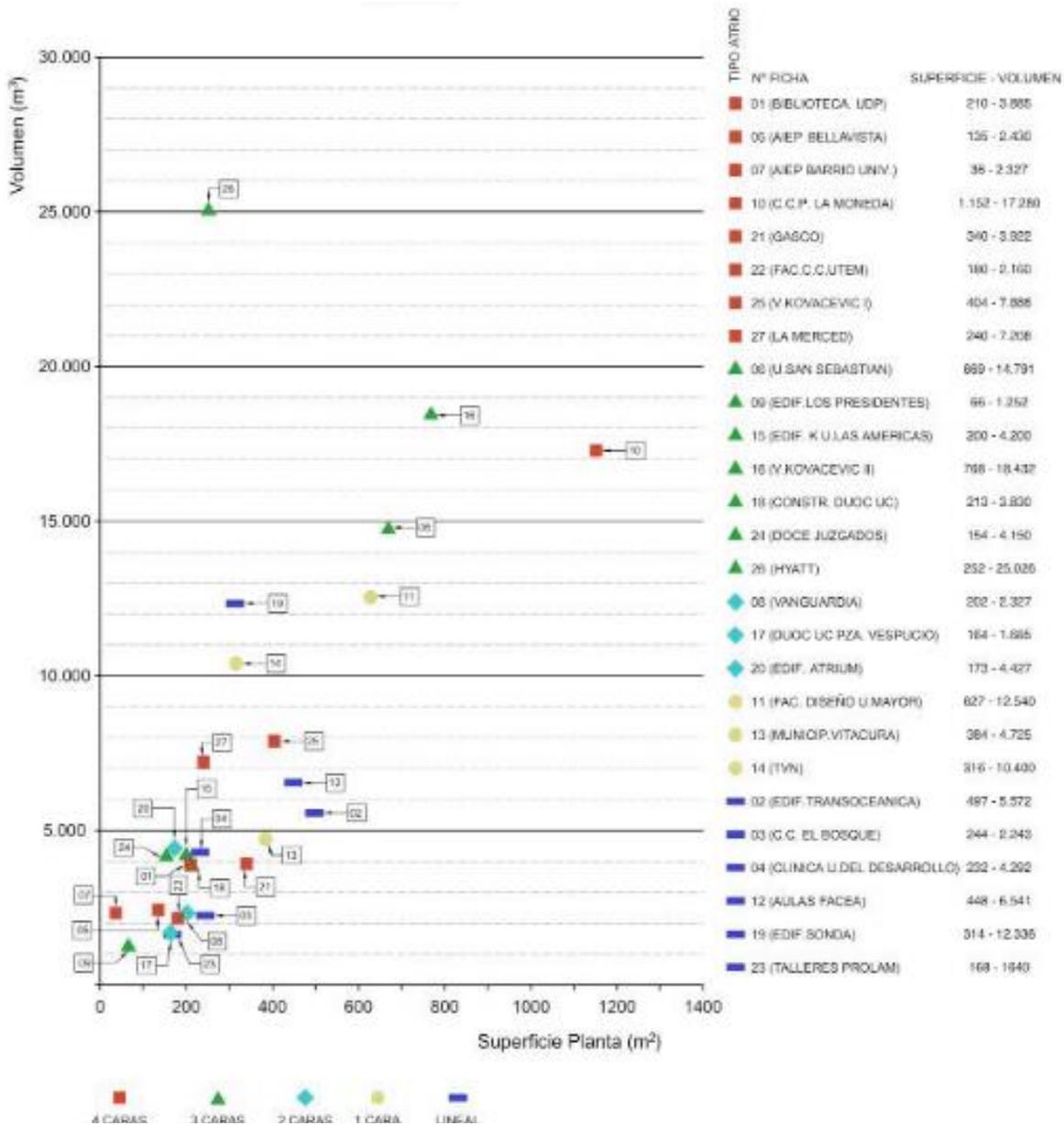


Ilustración 30. Relación de dimensiones y configuración Formal de los 27 atrios estudiados por Roldan Rojas, 2016.

Por otro lado, se toma como referencia la Tabla 16 correspondiente a una clasificación de las principales edificaciones de grandes alturas existentes en Santiago, encontradas en el sitio web de Emporis, un proveedor global de información de construcción, que recopila datos sobre edificios de gran altura y alto valor público y económico. Los datos encontrados de los edificios corresponden a las comunas donde se encuentran emplazados, el número de pisos, altura y año de construcción; el cuadro fue complementado con datos de área de superficie construida de cada edificio, encontrados en internet. Al analizar los datos obtenidos, se puede evidenciar como la altura de los edificios, así como la superficie construida aumentó a través de los años, dando cuenta de una progresiva densificación del centro y sus áreas aledañas. Así mismo, la mayoría de éstos edificios presenta una tipología de planta tipo, por nivel, que permitió conocer en promedio de las áreas de superficie por planta, encontrándose entre los 900 y 2500 m²; éstos valores fueron tomados en cuenta, para establecer los rangos de áreas en planta del modelo de estudio.

Tabla 16.Registro de Edificios de Gran Altura en Santiago de Chile. Fuente: www.emporis.com/city/santiago-chile

PUESTO	EDIFICIO	COMUNA	ALTURA (M)	PISOS	M2 CONSTRUIDOS	AÑO
1	Gran Torre Santiago	Providencia	300	62	128000	2014
2	Titanium La Portada	Las Condes	200	56	130000	2010
3	Torre Telefónica	Providencia	143	34	63000	1996
5	Hotel Marriott Santiago de Chile	Las Condes	145	42	115500	1999
9	Bosque 500	Las Condes	125	24	65000	2001
10	Territoria 3000	Las Condes	120	31	46427	2009
12	Nueva Santa María	Providencia	120	30	25620	2014
14	Torre Centenario	Santiago	112	31	30000	2000
15	Torre de la Industria	Las Condes	120	32	52000	1994
16	Millenium Building	Las Condes	115	30	34200	2000
17	Torre Alameda	Santiago	110	30	-	1996
18	Edificio Las Américas	Santiago	110	31	-	1990
19	Edificio Santiago Centro	Santiago	110	25	16344	1970
20	Edificio CCU	Las Condes	105	28	44300	2007
21	Palladio	Providencia	104	26	-	2000
22	Torre Santa María	Providencia	110	33	20625	1978
23	Edificio Espacio 3	San Joaquín	105	36	32200	2009
25	Grand Hyatt Santiago	Las Condes	100	24	-	1992

3.2. FORMULACIÓN DE CASO BASE DE ESTUDIO.

3.2.1. SELECCIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO PARA CASO BASE.

Se hace un recuento y descripción de las variables dependientes e independientes a analizar en el planteamiento del caso de estudio, a partir de la construcción geométrica y el análisis de los resultados de simulación realizados. Las variables independientes responden a la tipología y proporciones geométricas del caso de estudio (establecidos a partir del estado del arte y el levantamiento de datos de

edificios de la ciudad de Santiago), las propiedades de reflexión de las superficies y su porcentaje de área vidriada, así como el clima de la ciudad de Santiago. Por otra parte, las variables dependientes, corresponden a los resultados de simulación obtenidos para la métrica lumínica UDI en dos fases de evaluación.

3.2.1.1. VARIABLES INDEPENDIENTES:

→ Lugar De Estudio / Contexto Urbano De Emplazamiento.

Se escogió la ciudad de Santiago de Chile para el desarrollo de las evaluaciones lumínicas del edificio caso de estudio, por sus condiciones de ciudad moderna latinoamericana y centro económico, político y administrativo del país, caracterizado por condiciones de constante crecimiento poblacional desde la década de 1920, que en consecuencia, ha generado la mayor concentración de población del país, con el 35,6% y 6'257.516 habitantes a 2017, según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE); dichas condiciones a través del tiempo, se reflejan en un desarrollo urbano territorial expansivo hacia las periferias de la ciudad (Ilustración 31) que han repercutido en el deterioro de la calidad de vida de sus habitantes y la han alejado de una visión de ciudad sostenible.

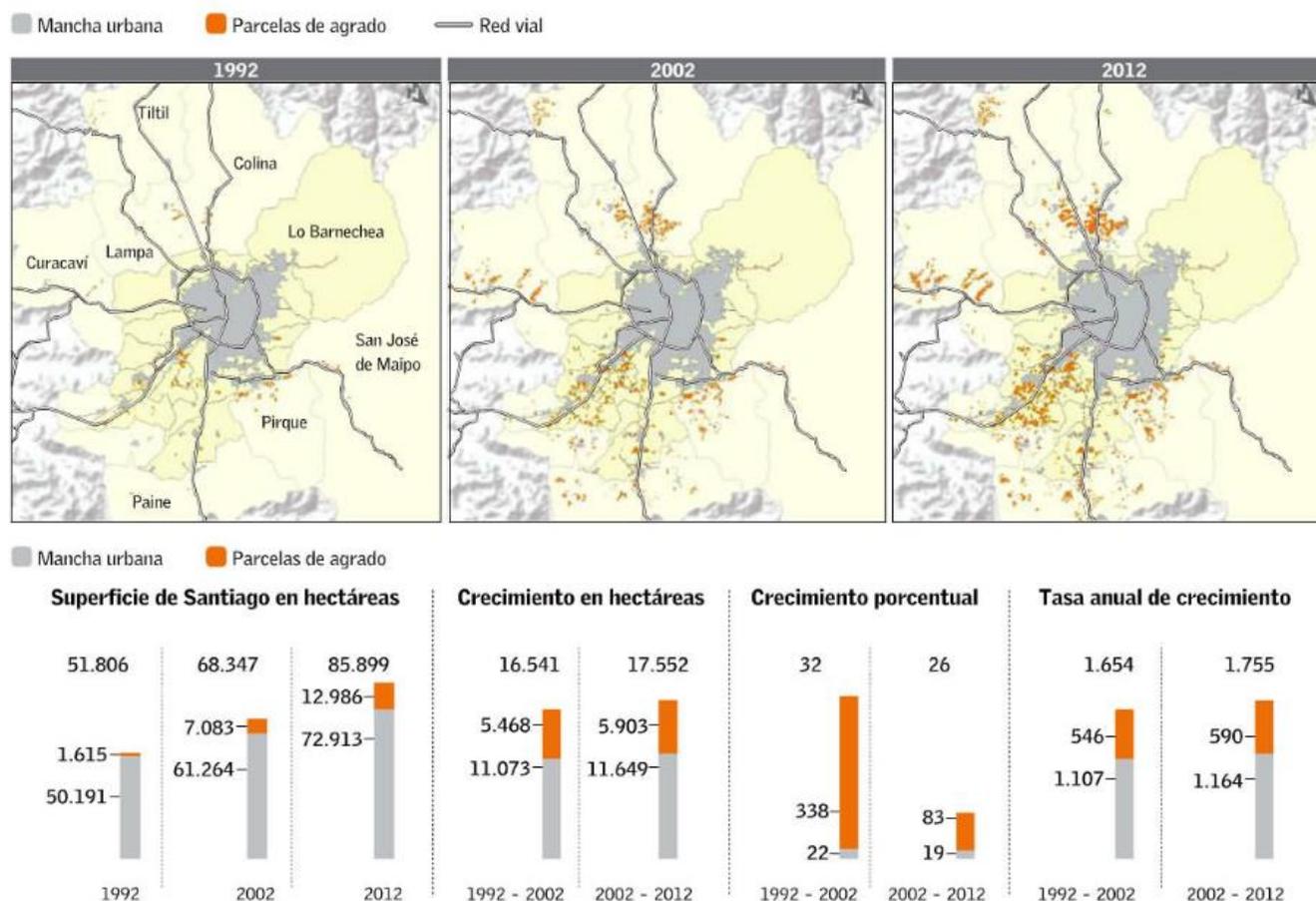


Ilustración 31. Veinte años de crecimiento urbano en la ciudad de Santiago de Chile. Fuente: Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales UC.

En el caso específico de las comunas que constituyen el centro extendido de Santiago, a través del tiempo se ha producido un fenómeno de densificación edificatoria como se puede ver en la Ilustración 32 e Ilustración 33; esto ha sido producto del crecimiento demográfico y en algunos casos por los intereses especulativos inmobiliarios sobre la rentabilidad del uso del suelo en estas áreas de la ciudad, con la implementación de edificaciones de alta densidad que no tienen en cuenta los elementos contextuales físicos y ambientales importantes para la calidad de vida de sus habitantes Vicencio (2018).



Ilustración 32. Densificación urbana desde 1930 en sector centro, Plaza Baquedano, comuna de Providencia.
Fuente: <https://www.facebook.com/FotosHistoricasDeChile>



Ilustración 33. Densificación urbana, Sector centro, Comuna de Providencia.
Fuente: <https://www.flickr.com/photos/transmundi/albums/72157667472738467>

A partir de lo anterior, al propiciar fenómenos de renovación y densificación de las áreas centrales de las ciudades de manera eficiente, deben plantearse criterios de diseño sustentable desde ámbitos cuantitativos de densidad, contextuales (elementos físicos y ambientales urbanos) y demás requerimientos perceptivos y comportamentales para una buena calidad en sus habitantes. La densificación y compactación de áreas principales de la ciudad, puede permitir distintas actividades y usos situados de manera cercana, reduciendo tiempos y energía requerida para su alcance. Es decir, a menor extensión entre usos y actividades requeridos para el hábitat de la ciudad, menores costos en la materialización de equipamientos e infraestructuras Boyko, C., & Cooper (2011).

Contexto geográfico y climático.

Santiago se emplaza en la Cuenca del Valle Central, en la depresión intermedia y se encuentra delimitada por el Cordón de Chacabuco por el norte, la Angostura de Paine por el sur, la Cordillera de los Andes por el oriente y la Cordillera de la Costa (Ilustración 35). Según la clasificación climática de Koppen, es ciudad de clima tipo “C: Templado”, subclasificación “Csb” - Oceánico mediterráneo (verano suave).

Latitud:	-33.4372,
Longitud:	-70.6506
Temperaturas:	Máximas 30°C Mínimas 3°C
Vientos:	8 a 10 Km/h
Clima	Mediterráneo seco.
Precipitaciones:	60mm al año
Altitud:	572mts.

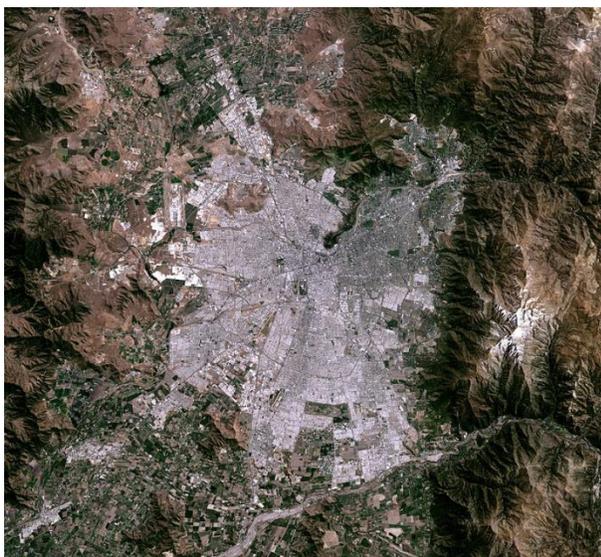


Ilustración 35. Imagen satelital de Santiago de Chile. 2014.
Fuente: NASA

Ilustración 34. Ubicación geográfica de Santiago de Chile.
Fuente: Google Images.

La subclasificación “csb” tiene las siguientes características:

- **s:** el verano es seco por lo que el mínimo de precipitaciones está bastante marcado y coincide con el periodo de temperaturas más altas. La estación más lluviosa no tiene porque ser el invierno.
- **b:** Templado. El verano es suave pues no se alcanzan los 22 °C de media en el mes más cálido. Las temperaturas medias superan los 10 °C al menos cuatro meses al año.

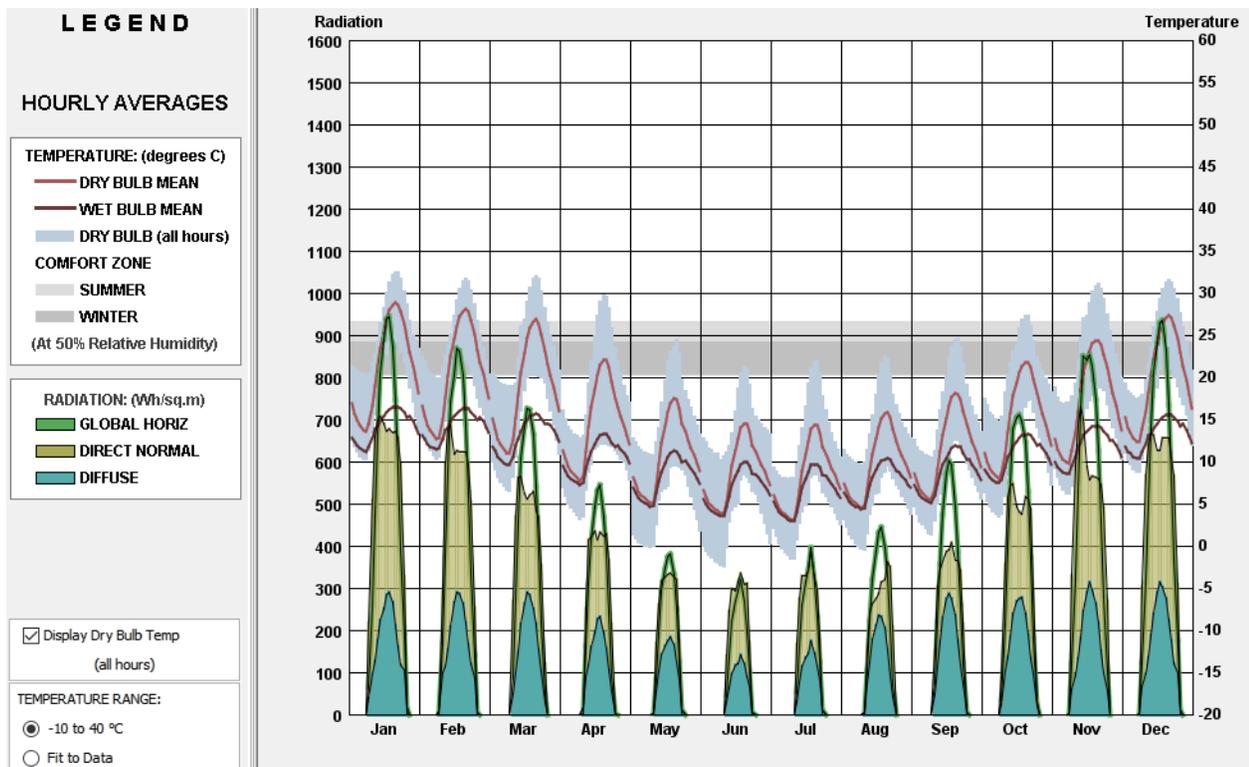


Ilustración 36. Temperaturas mensuales, radiación y zonas de confort térmico para invierno y verano. Fuente: Elaboración propia en Climate Consultant.

La temperatura media del mes más cálido no supera los 22 °C pero se disminuye a menos de los 10 °C durante cuatro o más meses al año. Este clima es muchas veces de transición entre el *Csa* (mediterráneo) y el *Cfb* (oceánico). A diferencia del mediterráneo presenta un verano más suave, pero al contrario que en el oceánico hay estación seca y esta es en los meses más cálidos.

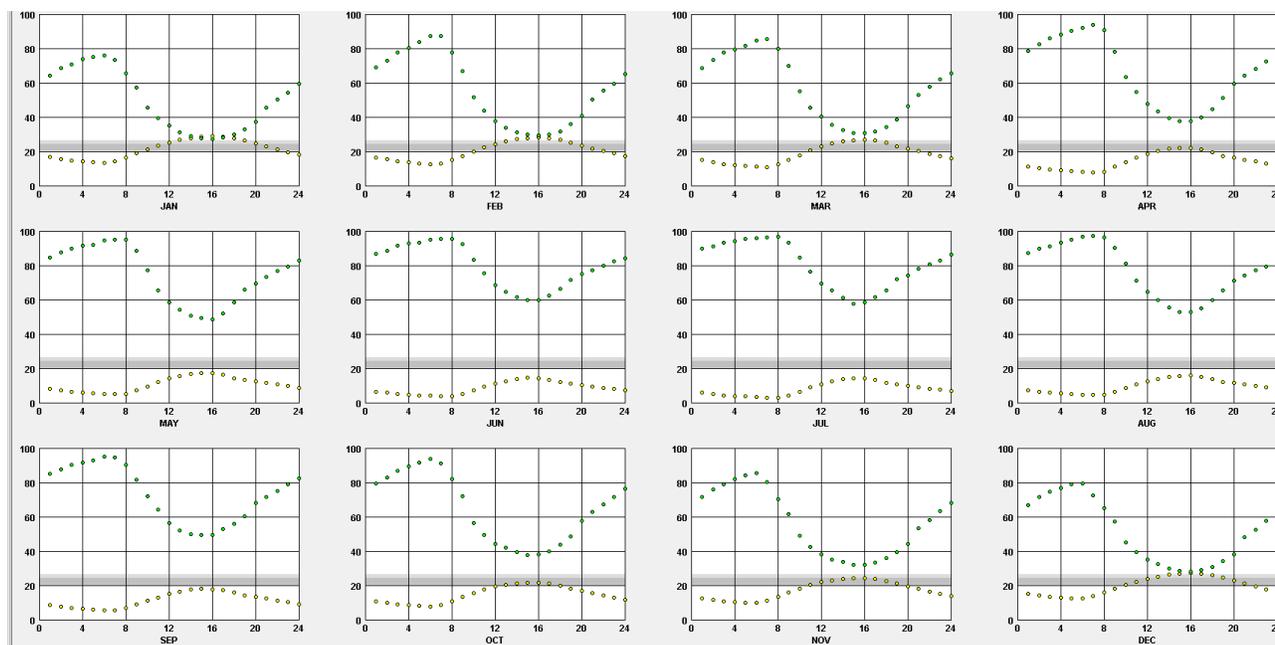


Ilustración 37. Grafica temperatura vs humedad y rangos de confort para la ciudad de Santiago. Fuente: Climate Consultant.

En Santiago se evidencian temperaturas superiores a los 24°C en varios períodos del año junto con bajas de humedad relativa y temperaturas bajo rango de confort, evidenciando alta oscilación térmica. De mayo a agosto se presentan las temperaturas más bajas, siendo el mes de julio el más frío y enero el mes más cálido (Ilustración 37). Así mismo, los niveles de radiación solar más altos, predominan en los meses cálidos de verano, descendiendo paulatinamente hasta el invierno (Ilustración 36).

Velocidad promedio del viento:

El gráfico nos presenta las direcciones predominantes de vientos desde el Sur Oeste y del Noreste. Con velocidades de viento predominantes superiores a 3m/s e inferiores a 8m/s.

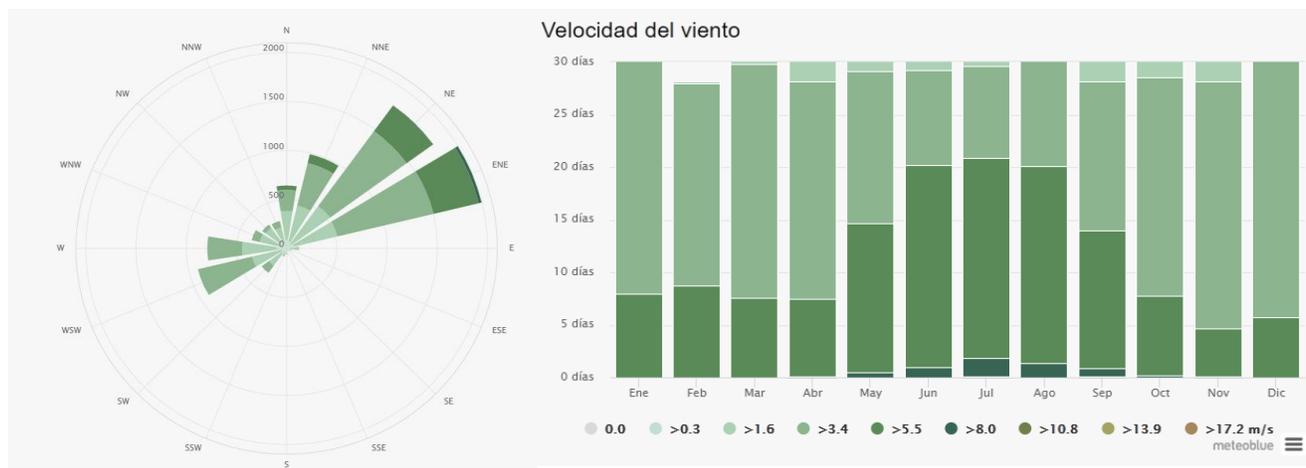
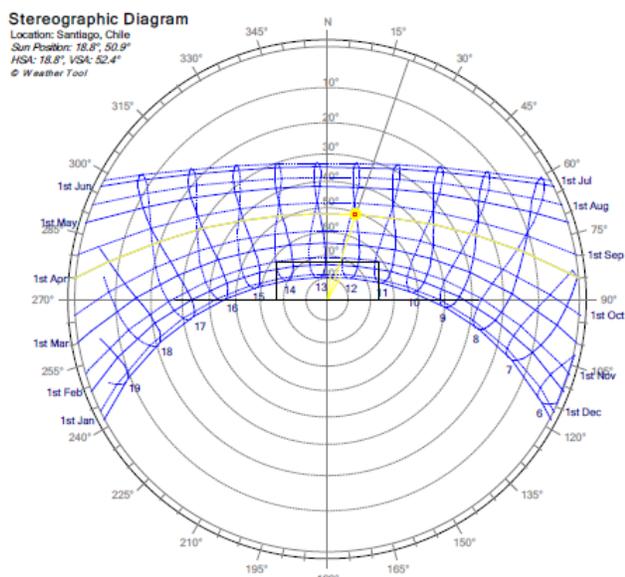


Ilustración 38. Gráfica Velocidad y dirección de vientos en Santiago. Fuente: meteoblue weather.

Trayectoria solar de Santiago.

Para la latitud -33 en la que se encuentra la ciudad, el comportamiento del sol se encuentra desplazado hacia el norte; este dato es importante para los criterios de diseño arquitectónico para el control térmico y lumínico de la edificación. Para el horario de evaluación lumínica del estudio, se presentan los ángulos solares máximos y mínimos que influyen en las geometrías estudiadas.



Altura Máxima [Grados]	21-dic	21-sept	21-jun	21-mar
12:30hrs	79,8	55,6	33,1	56,8
Altura Mínima [Grados]	21-dic	21-sept	21-jun	21-mar
8:00-17:00hrs	33,1	19,3	6,8	22,9

Tabla 17. Altura solar para solsticios y equinoccios en Santiago. Fuente: Meteonorm 7.1

Ilustración 39. Diagrama Solar Ciudad de Santiago. Fuente: Weather Tool 2011.

Tipos de cielo

A partir del estudio de frecuencia de cielos estándar en Chile realizado por Ilumina Chile, se tomaron datos de la ciudad Santiago, en donde se puede analizar que los tipos de cielo promedio más frecuentes en el lugar durante todo el año, corresponden al cielo “nublado” e “intermedio”, presentes en las estaciones de otoño, invierno y primavera; en verano el tipo de cielo despejado el más predominante.

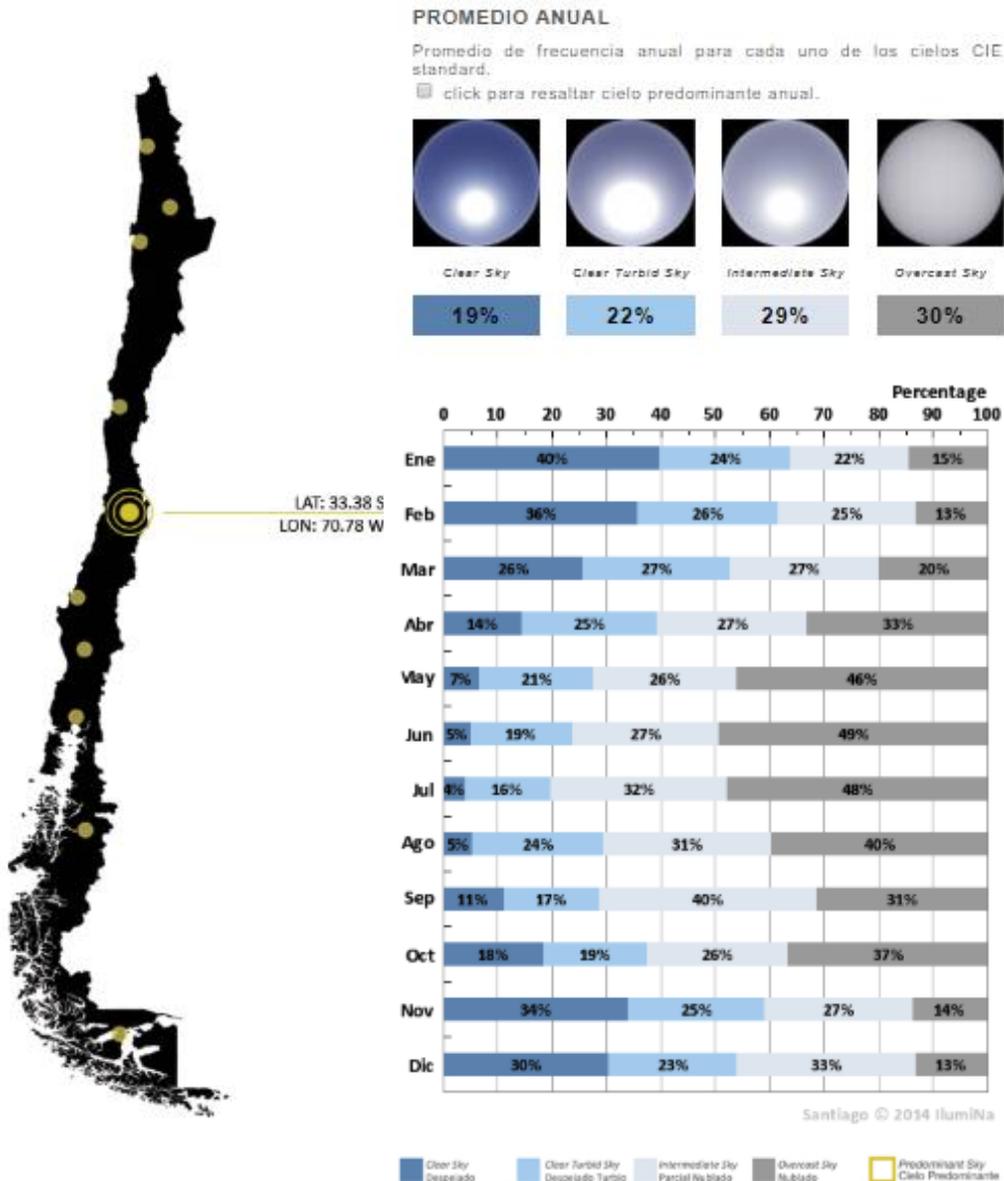


Ilustración 40. Frecuencia de cielos para la Ciudad de Santiago de Chile. Fuente: IluminaChile.Cl

VARIABLES DE DISEÑO GEOMÉTRICO.

El planteamiento geométrico del caso base, se realizó a partir de las principales variables de diseño geométricos de atrios para iluminación natural, encontrados en el estado del arte desarrollado en el Capítulo 2. Las principales variables a tenidas en cuenta para el estudio, se resumen en la tabla Tabla 18.

Tabla 18. Variables geométricas óptimas para iluminación natural en atrios, registrados en el cap. 2 Estado del arte.

Cantidad de niveles de atrio óptima para iluminación en espacios adyacentes. Indicador WI	4 pisos de altura $WI < \text{o iguales a } 1.5$
Proporciones del atrio central: Relación ancho de atrio –ancho en espacio adyacente.	2:1 – 1:1– 1:2
Para atrios verticales: la relación mínima aceptable de la altura de claristorios (cubierta) (h) a la altura del atrio (H) para proporcionar el nivel suficiente de ADF en los espacios adyacentes del atrio es $h / H =$	3/8 –4/8
Relación Ventana-Muro para superficies verticales del atrio.	Variabilidad en el % de acristalamiento por niveles para control excesivo de iluminación en últimos pisos y mayor aporte lumínico en pisos inferiores, gracias a mayores áreas opacas para reflexión de la luz.

→ Tipología de atrio propuesto.

En base a las áreas obtenidas en edificios de gran altura existentes en Santiago y la tipología de atrio más recurrente según Roldán Rojas (2016), se determinó evaluar la tipología de atrio central “vertical”, investigada por Ghasemi et al. (2015); éste atrio se caracteriza por recibir el aporte de luz natural a partir de superficies verticales laterales, llamadas “claristorios”. Además, esta tipología de atrio, tiene en cuenta el ángulo de visión del cielo y el ángulo de altitud, en relación a cada nivel de altura y al ancho del atrio, los cuales determinan la penetración de luz en las áreas de espacios de adyacentes, como se muestra en la Ilustración 41.

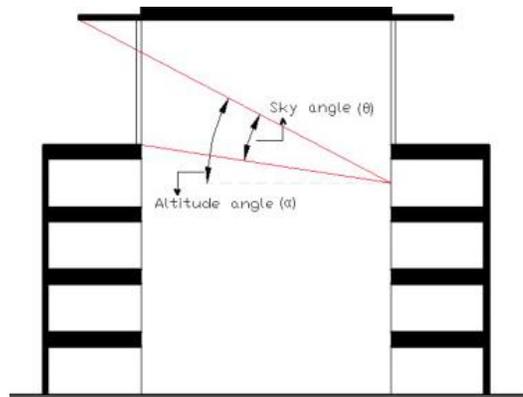


Ilustración 41. Esquema de atrio vertical estudiado por Ghasemi, 2015.

→ **Número de pisos y Orientación de Claristorios.**

Se determinó realizar un modelo geométrico parametrizado de un edificio de 15 niveles de altura, respondiendo a las conclusiones de investigaciones de Ahadi, Saghafi y Tahbaz (2018), Calcagni y Paroncini (2004) y Du y Sharples (2011), en las que se evidencia, que configuraciones geométricas de atrio con valores $WI < o iguales a 1.5$, son óptimas para aportar un DF considerable a espacios adyacentes; Este valor WI responde a un atrio de aproximadamente 4 niveles de altura.

Con el objetivo de optimizar lumínicamente un atrio central, con indicadores geométricos $WI > a 1.5$, se incorporaron en el modelo, áreas laterales para entrada de luz o “claristorios”, cada 5 niveles y desde las diferentes orientaciones posibles, con el fin de evaluar la eficiencia lumínica del atrio a partir de éstas. Los resultados obtenidos, de la evaluación de este modelo, pueden aplicarse a futuro para casos de edificios con más de 15 niveles de altura.

Respecto a lo anterior, se determinaron claristorios (ver Ilustración 42), cada 5 niveles así:

- Nivel 5, claristorios desde las cuatro orientaciones: norte, sur, este y oeste;
- Nivel 10, claristorios en orientaciones: norte y sur;
- Nivel 15, claristorios en orientaciones: este y oeste.

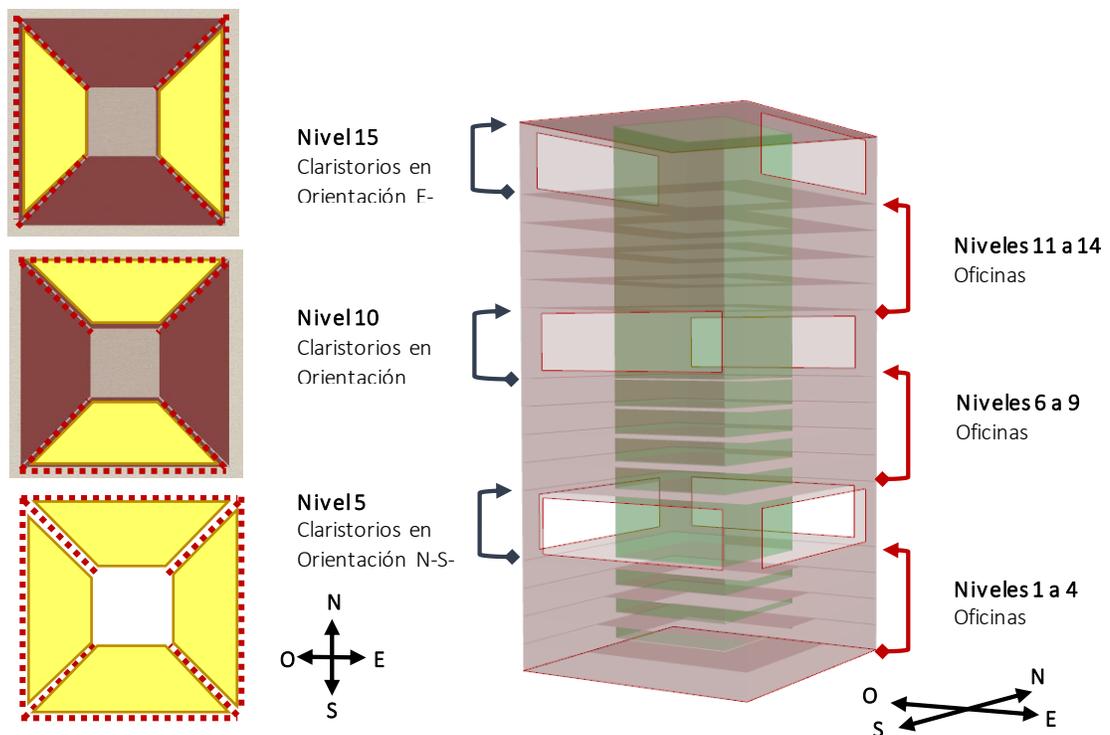
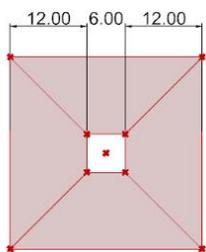
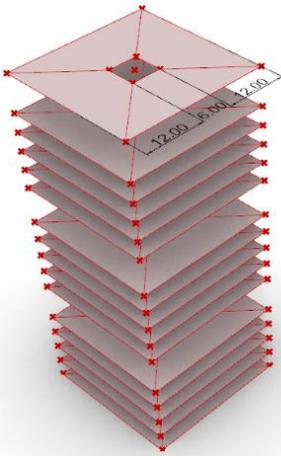
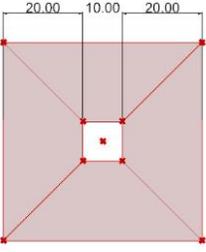
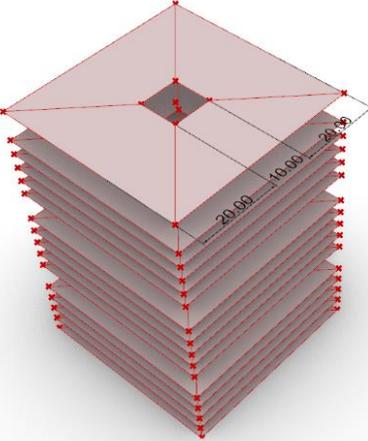
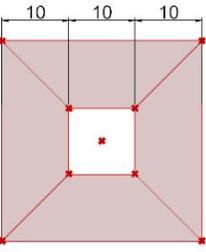
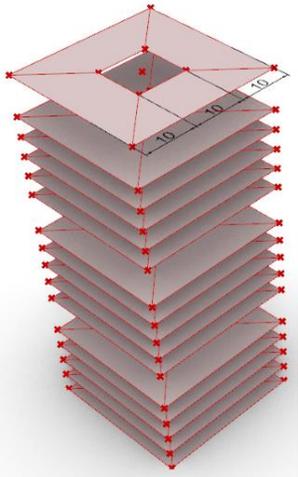
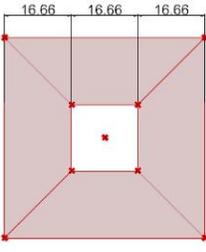
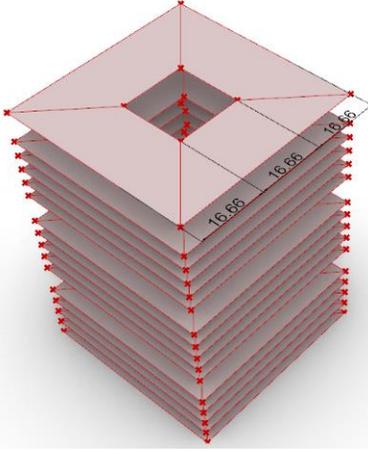


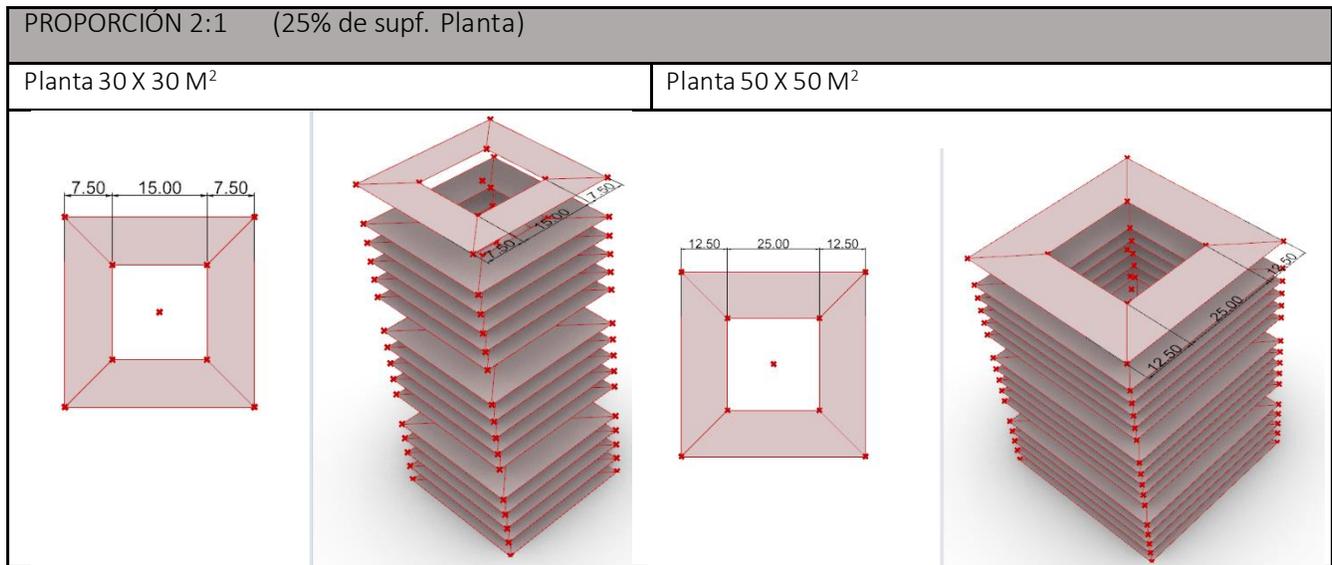
Ilustración 42. Características generales del modelo geométrico y localización de claristorios.

→ Proporciones y rangos de crecimiento del atrio por tipo de planta.

Se determinaron para el estudio las proporciones de atrio 1:2, 1:1 y 2:1 en superficies de planta de 30X30 m² y 50X50 m². Las proporciones de atrio son correspondientes al 4%, 11% y 25% del area, como se muestra a continuación:

Tabla 19. Rangos de proporción geométrica para construcción de modelo 3D. Fuente: Elaboración propia.

PROPORCIÓN 1:2 (4% de supf. Planta)			
Planta 30 X 30 M ²		Planta 50 X 50 M ²	
			
PROPORCIÓN 1:1 (11% de supf. Planta)			
Planta 30 X 30 M ²		Planta 50 X 50 M ²	
			



Las Tabla 20, Tabla 21, y Tabla 22, informan sobre los valores geométricos en rango de las superficies en planta propuestas en el modelo y espacios adyacentes en relación a las proporciones de atrio. Así mismo, presentan información del rango de proporciones geométricas de claristorios y del atrio central en sí. La Tabla 23, recoge los anteriores valores geométricos, en relación a los coeficientes geométricos PAR, SAR y WI.

Tabla 20. Rangos de proporción geométrica del edificio del modelo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Rangos de proporciones geométricas modelo de Edificio						
Area Edif. (m ²)	Número de pisos	Área Planta (m ²)	Ancho espacios adyacentes (m)			Alto espacios adyacentes (m)
			1-2	1-1	2-1	
13500 (30x30)	15	900	12	10	7,5	3,0-4,0
37500 (50x50)	15	2500 m ²	20	16,6	12,5	3,0-4,0

Tabla 21. Rangos de proporción geométrica de atrios adosados del modelo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Rango de proporciones geométricas de claristorios.				
Area planta (m ²)	Area (m ²)	Ancho (m)	Altura (m)	Relación altura atrio/claristorio y altura 4 pisos (h/H)
30x30	169,0	7,5	4	2/6
			8	4/8
50*50	600,0	20,0	4	2/6
			8	4/8

Tabla 22. Rangos de proporción geométrica de atrio central del modelo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Rangos de proporciones geométricas del atrio central vertical												
Area Edif.	Niveles	Proporción	% de area de Atrio en planta	Area atrio central	Largo atrio (l)	Ancho atrio (a)	Alto atrio central 4 niveles (h)	WI 4 niveles $h*(a+l)/2*(a*l)$	Alto total atrios /edificio (h)			WI total $h*(a+l)/2*(a*l)$
									EA	CL		
30*30	15	2:1	25%	225	15	15	12	0,8	3	4	48	3,2
							16	1,1	4	8	72	4,8
		1:2	4%	36	6	6	12	2,0	3	4	48	8,0
							16	2,7	4	8	72	12,0
50*50	15	2:1	25%	625	25	25	12	0,5	3	4	48	1,9
							16	0,6	4	8	72	2,9
		1:2	4%	100	10	10	12	1,2	3	4	48	4,8
							16	1,6	4	8	72	7,2

Tabla 23. Cuadro resumen de rangos de crecimiento de construcción geométrica del modelo de estudio con valores WI. Fuente: Elaboración propia.

CUADRO RESUMEN DE RANGOS DE EVALUACIÓN GEOMÉTRICA																		
Area Edif.	Niveles	Proporción	Ancho espacios adyacentes	Area por espacio adyacente	% de area de Atrio en planta	Area atrio central	Largo atrio (l)	Ancho atrio (a)	Alto total atrios /edificio (h)			Alto atrio central 4 niveles (h)	PAR a/l	SAR(1) h/a	WI 4 niveles $h*(a+l)/2*(a*l)$	SAR (2) h/a	WI total $h*(a+l)/2*(a*l)$	
									EA	CL								
30*30	15	2:1	7,5	169	25%	225	15	15	3	4	48	12	1	0,8	0,8	3,2	3,2	
									4	8	72	16	1	1,1	1,1	4,8	4,8	
		1:1	10	200	11%	100	10	10	3	4	48	12	1	1,2	1,20	4,8	4,80	
									4	8	72	16	1	1,6	1,6	7,2	7,2	
13500 m2 totales	1:2	12	216	4%	36	6	6	3	4	48	12	1	2,0	2,0	8,0	8,0		
								4	8	72	16	1	2,7	2,7	12,0	12,0		
50*50	15	2:1	12,5	469	25%	625	25	25	3	4	48	12	1	0,5	0,5	1,9	1,9	
									4	8	72	16	1	0,6	0,6	2,9	2,9	
		2500 m2 por planta	1:1	16,66	557	11%	277,5	16,66	16,66	3	4	48	12	1	0,7	0,7	2,9	2,9
										4	8	72	16	1	1,0	1,0	4,3	4,3
37500 m2 totales	1:2	20	600	4%	100	10	10	3	4	48	12	1	1,2	1,2	4,8	4,8		
								4	8	72	16	1	1,6	1,6	7,2	7,2		

→ Porcentaje de ventana en muros WWR (*Window Wall Ratio*)

Se determinó un porcentaje de área vidriada para los claristorios del 90%. Estas son las áreas que proporcionarían la entrada de luz para el atrio central.

A partir del modelo con superficie en planta de 30x30 m², con proporción de atrio 1:1 y sin superficies vidriadas en fachada, se realizó un estudio para determinar la variabilidad del porcentaje de ventanas por nivel, en los muros del atrio. La relación de porcentaje se establece por cada nivel que compone el conjunto de 4 niveles (ver Ilustración 42. Características generales del modelo geométrico y localización de claristorios. y Tabla 24), acorde a la metodología utilizada por Calcagni y Paroncini (2004) y Du y Sharples (2011).

Se establecieron y simularon 4 relaciones de porcentajes de área vidriada como se muestra en la Tabla 24, para determinar la relación óptima que permitiera el mayor valor UDI _(100-2000lux) sobre el plano de trabajo de espacios adyacentes en todos los niveles.

Estas simulaciones pudieron dar cuenta que, los niveles 2, 7 y 12 (segundos niveles de cada conjunto de 4) presentaron valores de UDI inferiores a los de los niveles 1, 6 y 11 (primeros niveles de cada conjunto de 4) en dos relaciones de porcentajes propuestas. Por otro lado, al igualar el porcentaje de WWR a 40% en los niveles superiores, disminuye el valor UDI en los niveles 3, 8 y 13 (terceros niveles de cada conjunto de 4).

Una proporción de ventanas de **90%, 80%, 50% y 40%**, desde los niveles más bajos (de cada bloque de 4 pisos), fue la relación que permitió igualar y superar el valor UDI en los segundos niveles, sin disminuir el de los terceros.

Tabla 24. Evaluación UDI según WWR Vs Reflexión de muros opacos por niveles.

ORIENTACIÓN CLERISTERIOS	% AREA VIDRIADA	UDI 100-2000 lux (%)	% AREA VIDRIADA	UDI 100-2000 lux (%)	% AREA VIDRIADA	UDI 100-2000 lux (%)	% AREA VIDRIADA	UDI 100-2000 lux (%)	
N-S-E-O	PLANTA 1	90	14,7	90	14,76	90	14,84	90	15,04
	PLANTA 2	60	12,44	70	12,92	80	14,75	80	15,76
	PLANTA 3	50	18,9	50	18,93	50	19,28	40	12,3
	PLANTA 4	40	29,85	40	29,7	40	30,33	40	30,37
N-S	PLANTA 6	90	13,71	90	13,94	90	14,08	90	14,67
	PLANTA 7	60	11,72	70	12,6	80	12,74	80	13,33
	PLANTA 8	50	15,16	50	15,1	50	15,28	40	10,73
	PLANTA 9	40	18,92	40	18,93	40	19,01	40	19,42
E-O	PLANTA 11	90	11,22	90	11,27	90	11,31	90	11,57
	PLANTA 12	60	10,78	70	11,58	80	12,67	80	12,86
	PLANTA 13	50	16,48	50	16,68	50	16,44	40	12,75
	PLANTA 14	40	18,93	40	19,17	40	19,92	40	20,28

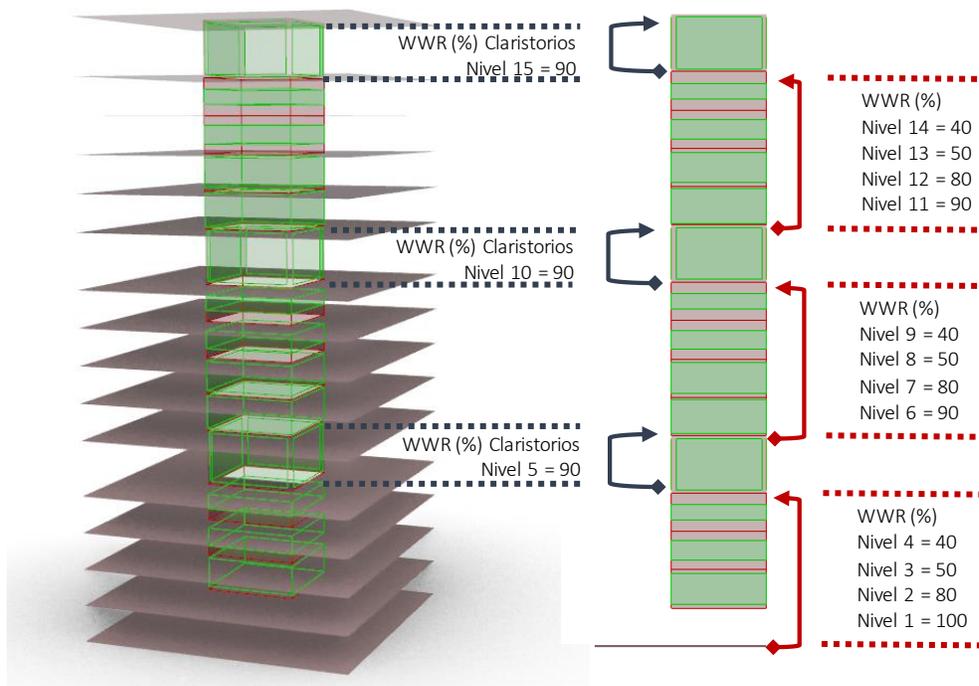


Ilustración 43. WWR (%) para superficies del atrio en niveles de Claristorios y espacios de oficinas.

Para el WWR de fachadas exteriores del edificio (ver Ilustración 44), se determinó un 40%, como porcentaje documentado por (VÁSQUEZ 2015; Swet 2015) para contribuir a la eficiencia energética en edificios. Este WWR es utilizado en la segunda fase de la evaluación.

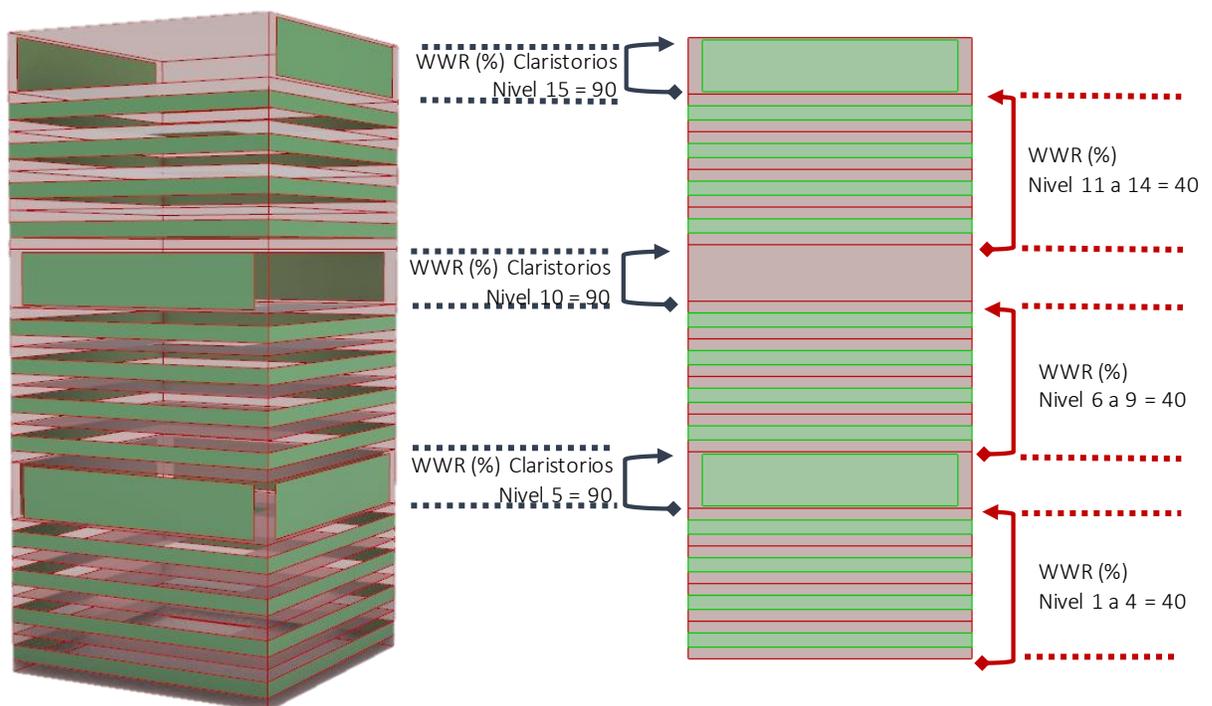


Ilustración 44. WWR (%) para fachadas niveles de Claristorios y de espacios de oficinas.

→ **Variables de Diseño materiales / Reflexión de las superficies del modelo.**

A partir de las normativas estudiadas en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en referencia a valores de coeficientes de reflectancia para los materiales y acabados de las superficies en espacios de oficina, así como los cristales de vidrio con coeficiente de transmisión luminosa del ambiente, se determinan los siguientes coeficientes en el modelo de estudio:

Tabla 25. Coefic. de reflectancia y transmisión luminosa de superficies geométricas del modelo de estudio.

COEFICIENTE DE REFLECTANCIA DE SUPERFICIES DEL MODELO.		COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN LUMINOSA	
Cielo raso	0.9	Superf. acristalada Claristorios/ Ventanas en fachadas (Doble panel vidriado)	0.8
Muros del atrio central	0.8		
Muros interiores divisorios	0.6		
Piso	0.4	Superf. Acristalada del interior del atrio. (Panel vidriado Sencillo)	0.88
Plano de Trabajo (Mobiliario)	0.5		

3.2.1.2. VARIABLE DEPENDIENTE:

Métrica lumínica UDI (Iluminancia útil de luz diurna)

La métrica UDI, hace parte del Método de Simulación de luz diurna basada en el clima (CBDM); este método de evaluación predictivo de iluminación natural, evalúa el comportamiento dinámico de la luz diurna anualmente, en un espacio determinado, considerando variaciones en las condiciones del cielo durante todo el año, a partir de datos meteorológicos locales. Métricas como el DA y ASE integran también la metodología CBDM.

La iluminancia útil a la luz del día (UDI), fue propuesta por Mardaljevic y Nabil en 2005; representa la distribución de iluminación anual en el plano de trabajo de un espacio, con el objetivo, de determinar cuando los niveles de luz diurna son “útiles” para el ocupante, es decir, no muy oscuros (menores a 100 lux), ni demasiado brillantes (superiores a 2000 lux). En el rango entre 100–2000 lux, el umbral superior, reporta el porcentaje de tiempo en el año, en los que se presenta un exceso de iluminación que podría conducir a molestias visuales y/o térmicas. Este rango fue propuesto por Nabil y Mardaljevic en 2005 a partir de preferencias reportadas por ocupantes de oficinas, por lo que podría decirse, tiene potencial como indicador de deslumbramiento. Reinhart et al. (2006).

Así mismo este rango de UDI fue subdividido en base a los umbrales inferior y superior de 100 lx y 2000 lx, dando como resultado las siguientes tres métricas:

- * UDI-c. Los porcentajes de tiempo anual, en que se logró un $UDI_{(100-2000\text{ lx})}$
- * UDI-Underlit. Porcentajes de tiempo anual en los que permaneció la iluminación por debajo de los 100 lx.
- * UDI-Overlit. Porcentajes de tiempo en los que o se superó (2000 lx) y supone probabilidades de deslumbramiento.

Porcentaje de Incidencia espacial de UDI

La métrica UDI, ofrece resultados espacio-temporales, por lo cual, el porcentaje de afectación por m^2 en el plano de trabajo, fue un valor analizado en este estudio, como una manera de dar cuenta de la uniformidad lumínica alcanzada en relación al porcentaje de UDI temporal.

3.2.2. Definición de herramienta de simulación para el estudio de iluminación natural por métrica dinámica UDI.

DIVA “Design Iterate Validate Adapt”

Con el objeto de llevar a cabo la metodología de evaluación y análisis geométrico del modelo de estudio, se utilizó el software DIVA for Rhino Reinhart1 (2011), un plug in de optimización incluido en el lenguaje de programación visual Grasshopper del programa CAD Rhinoceros. Es un complemento optimizado para el modelado y evaluación de rendimiento de parámetros medio ambientales como la iluminación natural y la energía en edificaciones y entornos urbanos; Se desarrolló en la Escuela de diseño de la Universidad de Harvard y es distribuido y desarrollado por Solemma LLC. DIVA realiza los análisis de la luz diurna sobre modelos arquitectónicos a través de la integración con los softwares de cálculo Radiance y DAYSIM del que se vale de Radiance como motor de cálculo. Reinhart1 (2011).

Softwares Integrados en DIVA

DAYSIM

Es una herramienta de simulación dinámica de iluminación interior desarrollada por Reinhart y Walkenhorst en 2001; se basa en un enfoque de coeficiente de luz diurna que puede simular el desarrollo de iluminaciones interiores para intervalos de tiempo arbitrarios basados en series temporales de haz de luz e irradiaciones difusas, calculando un perfil anual de iluminación interna a partir de archivos climáticos y la descripción de la geometría y los materiales del edificio por medio de archivos de entrada regulares de Radiance. DAYSIM utiliza el modelo de distribución de luminancia del cielo de R. Perez et al.

(1993) y la eficacia luminosa del cielo de Richard Perez et al. (1990), por lo cual, necesita ser sustentado con datos anuales de irradiaciones globales y de haz Walkenhorst et al. (2002).

RADIANCE

Es un software y motor de cálculo de iluminación de código abierto que se utiliza para el diseño de control solar, iluminación y luz natural para apoyar el diseño medioambiental y la eficiencia energética de los edificios. Es el motor de cálculo validado más utilizado en iluminación y está integrado en una serie de aplicaciones de diseño de ingeniería lumínica y arquitectónica como IES Virtual Environment, Design Builder y Sefaira Architecture. («United States Department of Energy» [9-09-19])

3.2.3. Metodología de evaluación lumínica.

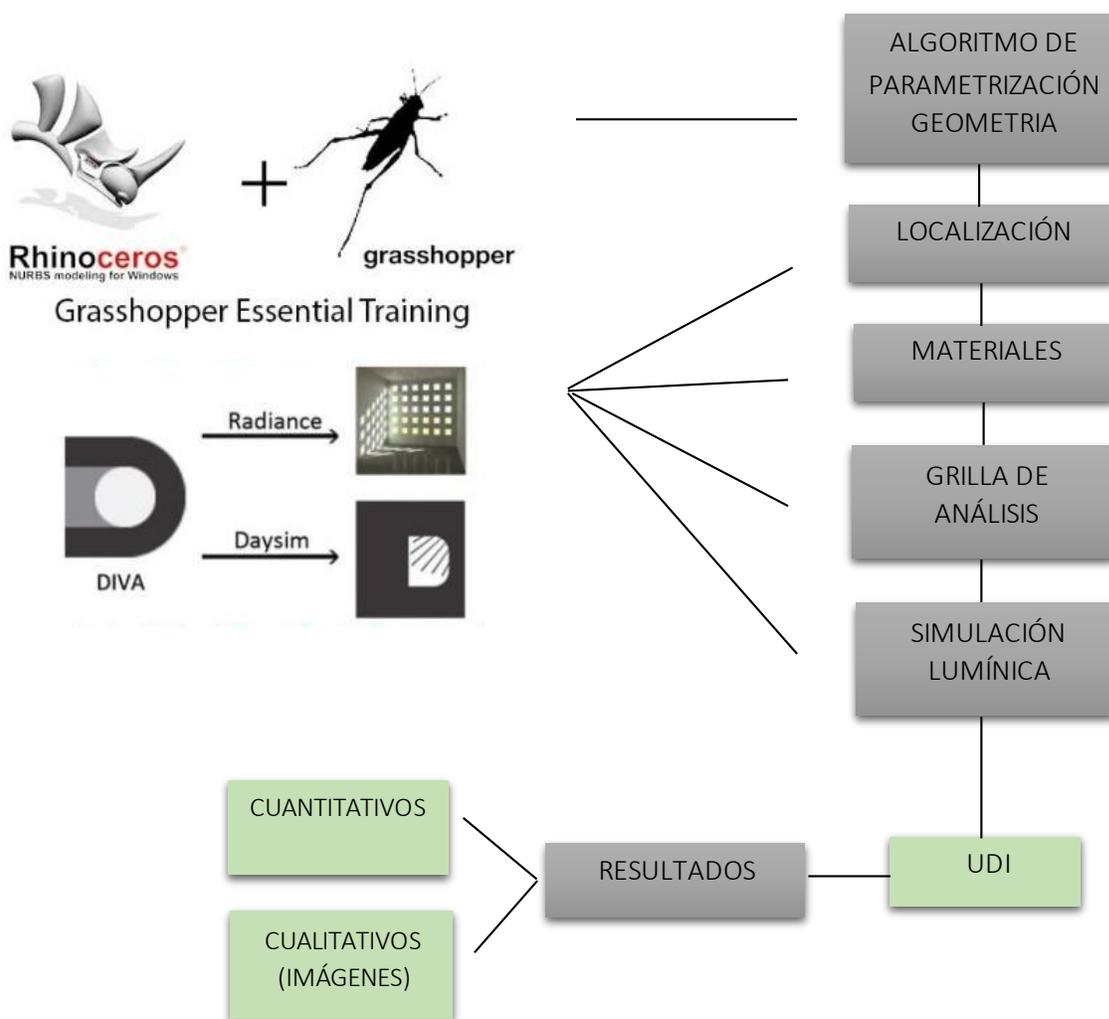


Ilustración 45. Softwares utilizados para construcción de modelo y simulación lumínica.

Consideraciones de Evaluación Lumínica:

- Todas las evaluaciones lumínicas se realizaron a partir de un solo modelo, construido y parametrizado geoméricamente desde el software Grasshopper de Rhinoceros (Ver Ilustración 45). La implementación de la optimización paramétrica en la arquitectura, tiene el objetivo de mejorar la relación entre el diseño y el desempeño de los proyectos desde diferentes aspectos. las parametrizaciones permiten la evaluación cuantitativa de variables de diseño, para obtener resultados de alto rendimiento a determinados problemas arquitectónicos como el lumínico.
- La evaluación lumínica se realizó en rangos de 4 niveles del atrio, respondiendo a la ubicación de los niveles de claristorios y a los criterios óptimos de diseño obtenidos en el estado del arte. Cada conjunto de 4 niveles, presenta valores de índice de pozo WI entre 0,5 y 2,7 con áreas de atrio entre 36m² y 625m² para superficies en planta de 30*30 m² y 50*50 m² y una altura entre 12 y 16 metros para espacios adyacentes y entre 4 y 8 metros para los niveles de claristorios en todas sus orientaciones. Los rangos resultantes del índice de pozo del atrio central total del edificio que se evaluaron (niveles de espacios adyacentes más niveles de claristorios), correspondieron a valores entre 1.9 y 12.
- Las evaluaciones lumínicas se realizaron simultáneamente para para los niveles 1, 4, 6, 9,11 y 14; Estos hacen referencia a los niveles 1 y 4 de cada conjunto de 4 niveles de atrio propuesto, según la orientación de los claristorios. En primer lugar, se realizaron 36 simulaciones sin contemplar superficies vidriadas en las fachadas del edificio, para evaluar el potencial lumínico sólo del atrio. Posterior a esto, se realizaron otras 36 simulaciones incorporando las superficies vidriadas en las fachadas del edificio con un WWR del 40%, sin tener en cuenta algún tipo de dispositivo de control solar.
- Se determinó una grilla de análisis lumínico a 0.80 mts de altura, a la cual se le otorgó una materialidad con coeficiente de reflectancia 0.5, en relación a una posible materialidad de mobiliario para la superficie de trabajo.
- La ubicación de los sensores de iluminación en la grilla estuvo sujeta a la cantidad de plantas analizadas simultáneamente, la magnitud de las áreas en planta evaluadas y el tiempo de simulación, por lo que se determinó, una distancia entre sensores de iluminación cada 2 metros.⁶
- Se determinó un horario de ocupación en las simulaciones de 8:00 a 17:00 horas.
- En total se evaluaron 216 configuraciones geométricas en 72 simulaciones lumínicas; 108 configuraciones en la primera fase de evaluación y 108 en la segunda fase.

⁶ El tercer método de evaluación lumínica en la Certificación LEED, en el que se solicita un cumplimiento de niveles de iluminancia en planta entre 300 lux y 3000 lux para el área del piso, especifica que para espacios de más de 150 pies cuadrados (14 metros cuadrados), se pueden tomar medidas en una cuadrícula máxima de 10 pies (3 metros). Fuente: <https://www.usgbc.org/credits/healthcare/v4-draft/eqc-o>

- Se utilizó el archivo climático en formato EPW de Santiago de Chile, de la estación meteorológica ubicada en Quinta normal. El archivo fue tomado de la plataforma oficial de Desing Builder Latinoamérica.
- Se extrajeron resultados de aporte lumínico a partir de la métrica UDI y el % de afectación espacial por planta.

3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Consideraciones

Esta sección tiene como objetivo presentar el análisis de resultados obtenidos de la evaluación lumínica de las configuraciones geométricas de atrio propuestas en el modelo parametrizado. El análisis se realizó en dos fases; En la primera fase, se estudia el aporte lumínico del atrio en los espacios adyacentes por niveles (plantas 1 y 4 de cada grupo de 4 niveles), sin contemplar porcentajes de área vidriada o WWR en fachadas. En ésta fase, el análisis estuvo enfocado en el rango de $UDI_{C(100-2000LUX)}$ y su % de incidencia en metros cuadrados por planta. Con lo anterior se pretendió determinar el comportamiento lumínico espacio temporal de los espacios adyacentes, desde el atrio.

Para el análisis de resultados de la segunda parte de evaluaciones lumínicas, en la que se evalúan los aportes de iluminación natural desde el atrio y fachadas exteriores con un WWR de 40% sobre los espacios adyacentes, se realizó una comparativa desde los diferentes rangos de UDI documentados por Reinhart et al. (2006), correspondientes a $UDI-c = UDI_{(100-2000 lx)}$, $UDI-Underlit = <100 lx$ y $UDI-Overlit = >2000 lx$.

Los resultados gráficos de color, muestran la distribución espacio-temporal de las dos fases de evaluación lumínica del atrio. Estos resultados junto sus respectivas tablas, están indexados en el Capítulo 8, anexos I y II.

En los cuadros de resultados y análisis, se implementó un “Código de planta” para la identificación de las diferentes tipologías geométricas evaluadas, en el que se identifica consecutivamente el área de la planta evaluada, la proporción del atrio, la altura del entrepiso de los espacios adyacentes y la altura de claristorios del atrio de la siguiente manera:

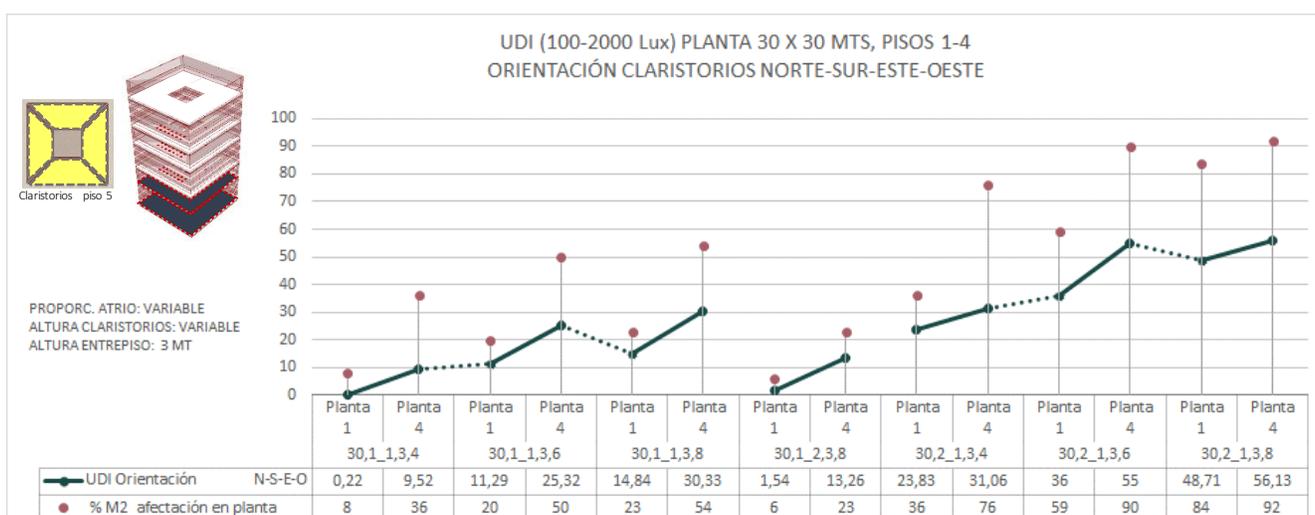


3.3.1. RESULTADOS FASE 1. DE EVALUACIÓN LUMÍNICA. Proporciones geométricas del modelo, sin WWR en fachadas exteriores de espacios adyacentes.

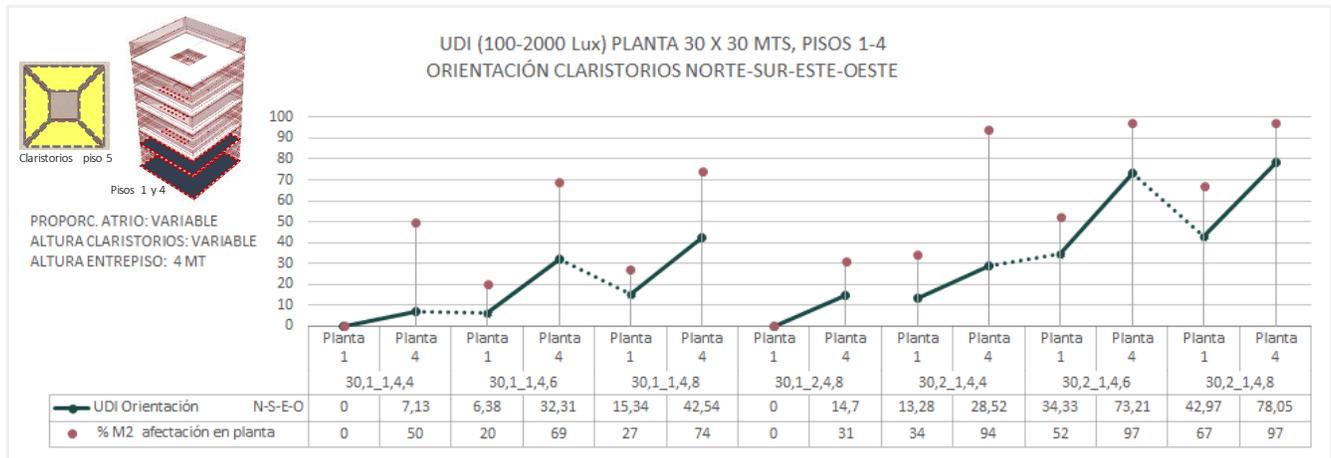
3.3.1.1. Configuraciones geométricas de atrio en Planta de 30X30 m²

Respecto a la variación de altura entre 3 y 4 metros de entresijos de espacios adyacentes y entre 4, 6 y 8 m de altura para claristorios en orientación norte-sur-este-oeste, para los niveles 1 y 4, según las gráficas de análisis 1 y 2 se evidencia:

- En las proporciones del atrio con altura de claristorios de 4 m y entresijos de oficinas de 4 m, los aportes lumínicos tienden a disminuir en el primer y último nivel, en relación a aquellos que cuentan con 3 m de altura en entresijos; esto es debido al aumento de la profundidad del atrio, que evidencia el aumento del ángulo de altitud y la disminución del ángulo de visión de cielo incidente en las paredes del atrio.
- En las proporciones de atrio con altura de claristorios entre 6 y 8 m y entresijos de espacios adyacentes de 4 m, los aportes lumínicos en los pisos inferiores disminuyen y en los superiores aumentan en relación a 3 m de altura en entresijos.
- Para todas las configuraciones geométricas, se evidencian mayores aportes lumínicos en el nivel 4, respecto a los del nivel 1.
- Para todas las configuraciones geométricas, el porcentaje de m² de incidencia lumínica en planta aumenta en el piso superior, cuando la altura de entresijo de espacios adyacentes es de 4 metros.



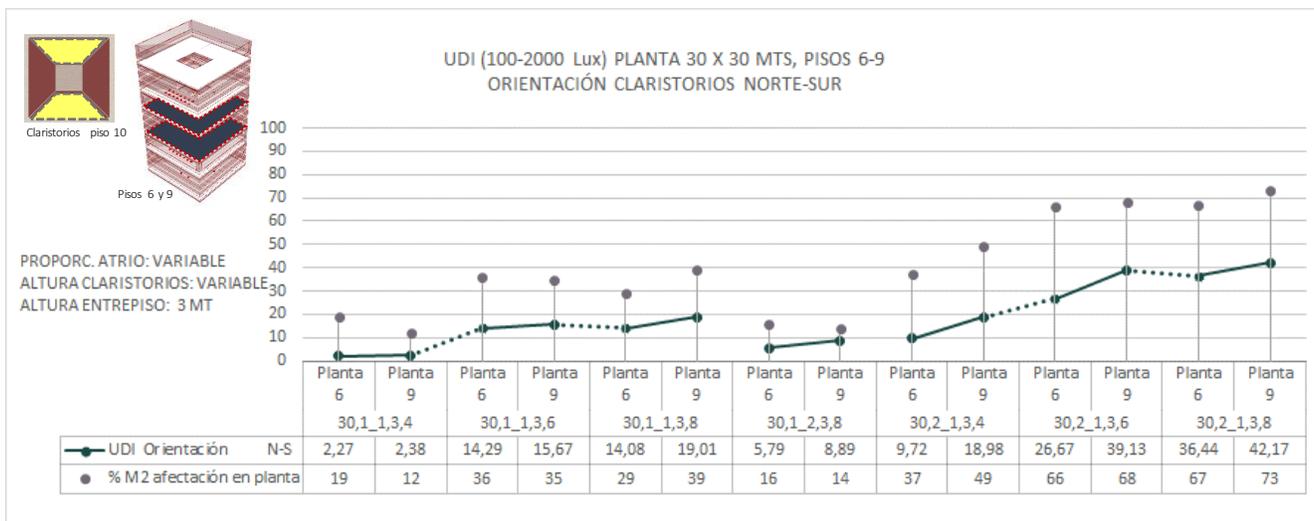
Gráfica 1. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios N-S-E-O, Planta 30x30m². Pisos 1 y 4. (h) entresijo esp. ady. 3mts.



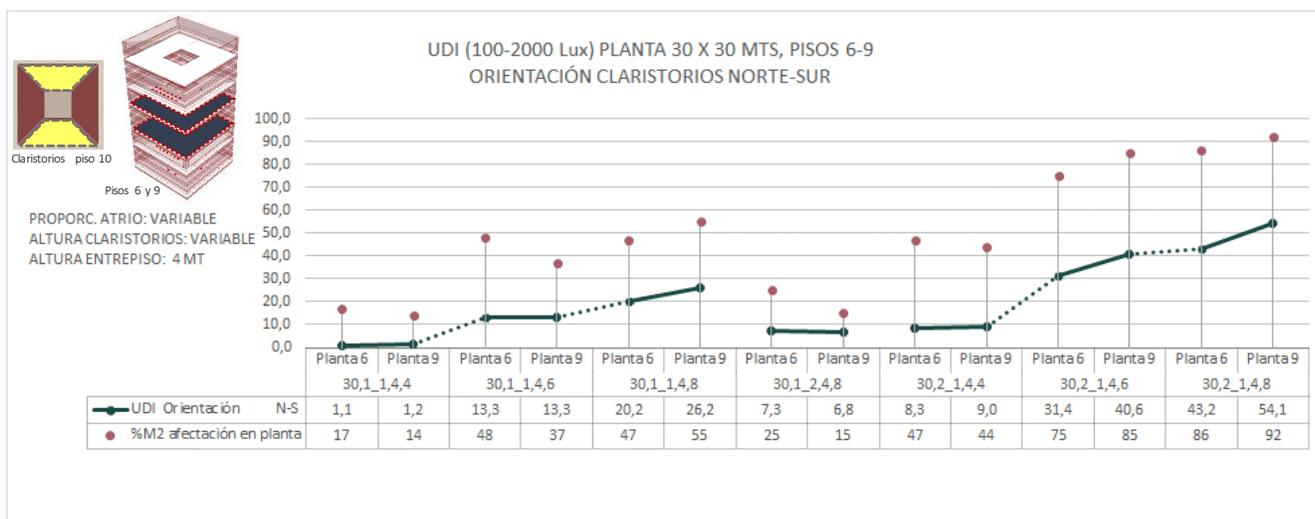
Gráfica 2. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios N-S-E-O, Planta 30x30m². Pisos 1 y 4. (h) entrepiso esp. ady. 4mts.

Respecto a la variación de altura entre 3 y 4 metros de entrepisos de espacios adyacentes y entre 4, 6 y 8 m de altura para claristorios en orientación norte-sur, para los niveles 6 y 9, según las gráficas de análisis Gráfica 3 y Gráfica 4, se evidencia:

- En las proporciones de atrio con 4 m de altura de entrepisos en espacios adyacentes y 4 m de altura en claristorios, los niveles inferiores y superiores disminuyen su aporte lumínico respecto a las configuraciones con 3 m de altura de entrepisos.
- En la proporción de atrio 2:1, con 4 m de altura en entrepisos de espacios adyacentes y 6 m de altura de claristorios, el nivel superior e inferior aumenta su aporte lumínico, respecto a la proporción 2:1 con altura de entrepiso de 3m. Para 8 m de altura de claristorios y 4 m de entrepiso, el aporte lumínico aumenta en las diferentes proporciones de atrio evaluadas respecto a las configuraciones con 3m de entrepiso.
- Para todas las configuraciones geométricas, se evidencian mayores aportes lumínicos en el nivel 9, respecto a los del nivel 6.
- Para las proporciones de atrio 1:2, 1:1 y 2:1, con 6 y 8 m de altura en claristorios, el porcentaje de m² de incidencia lumínica en planta aumenta, cuando los niveles de entrepiso son de 4 metros respecto de aquellas que tienen 3 metros de entrepiso.



Gráfica 3. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios N-S, Planta 30x30m². Pisos 6 y 9. (h) entrepiso esp. ady. 3mts.



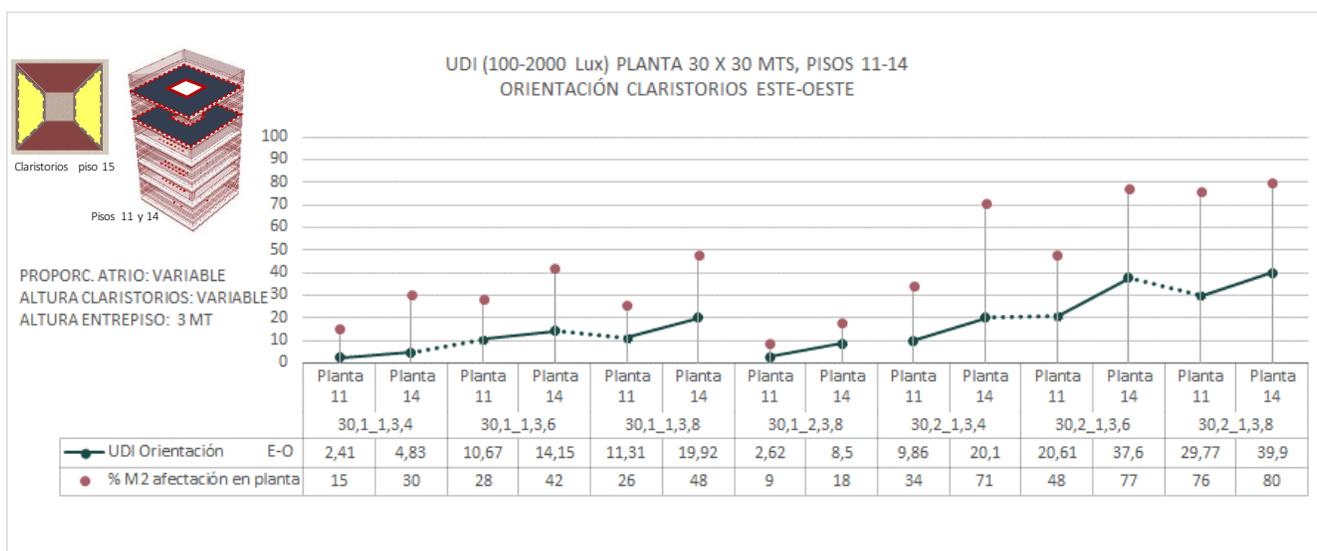
Gráfica 4. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios N-S, Planta 30x30m². Pisos 6 y 9. (h) entrepiso esp. ady. 4mts.

Respecto a la variación de altura entre 3 y 4 metros de entrepisos de espacios adyacentes y entre 4, 6 y 8 m de altura para claristorios en orientación Este-Oeste, para los niveles 11 y 14, según las gráficas de análisis 5 y 6, se evidencia:

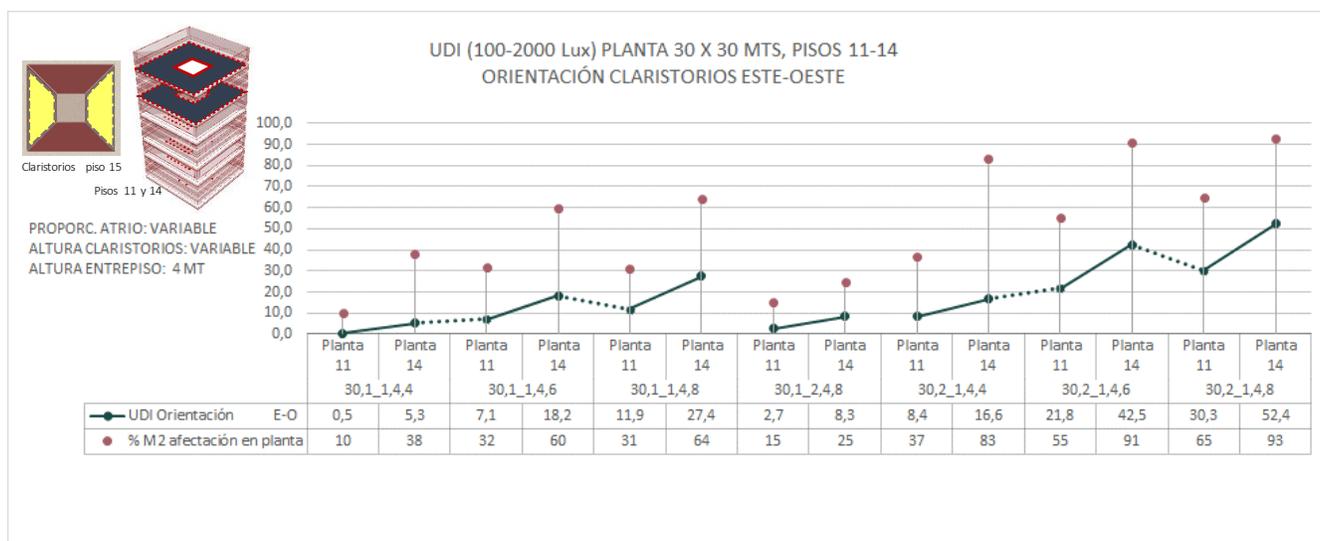
- Las configuraciones con altura de claristorios de 4 metros, se evidencia al igual que en las otras orientaciones, una disminución de aportes lumínicos para primeros y últimos niveles con entrepisos de oficinas de 4 m y en todas las proporciones de atrio, respecto a aquellas con altura de entrepisos de 3m.
- Para las configuraciones con altura de claristorios entre 6 y 8 metros, no se representa aumentos significativos de los aportes lumínicos en la proporción de atrio 1:2 al variar la altura en entrepisos. En la proporción 1:1, con altura de entrepisos de 4m, se aumenta los aportes lumínicos en el nivel superior respecto a las configuraciones con altura de entrepisos de 3 m. Por último, en la proporción

2:1, los aportes lumínicos aumentan para el primer y último nivel con altura de entrepisos 4, respecto a aquellas configuraciones con altura de 3 m en entrepisos.

- Para todas las configuraciones geométricas, se evidencian mayores aportes lumínicos en el nivel 14, respecto a los del nivel 11.
- Para las proporciones de atrio 1:2, 1:1 y 2:1, el porcentaje de m² de incidencia lumínica en planta aumenta, cuando los niveles de entrepiso son de 4 metros y altura de claristorios entre 6 y 8 m, respecto de aquellas con 3 m de altura en entrepiso. Para las demás configuraciones, sólo el nivel superior aumenta la incidencia lumínica en m².



Gráfica 5. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios E-O, Planta 30x30m². Pisos 11 y 14. (h) entrepiso esp. ady. 3mts.

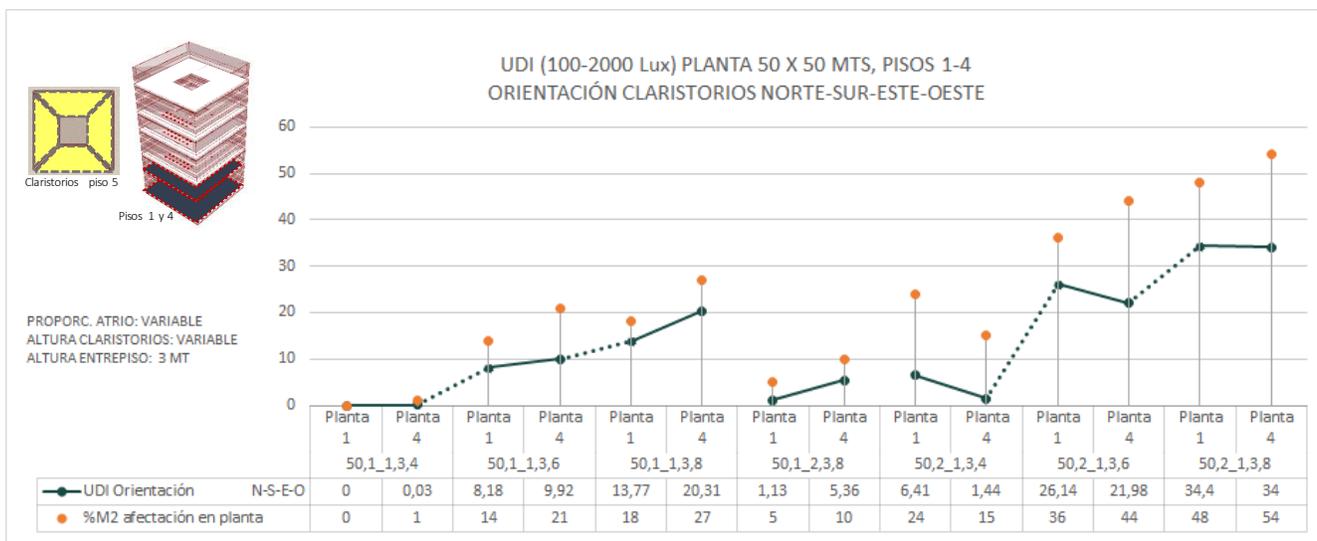


Gráfica 6. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios E-O, Planta 30x30m². Pisos 11 y 14. (h) entrepiso esp. ady. 4mts.

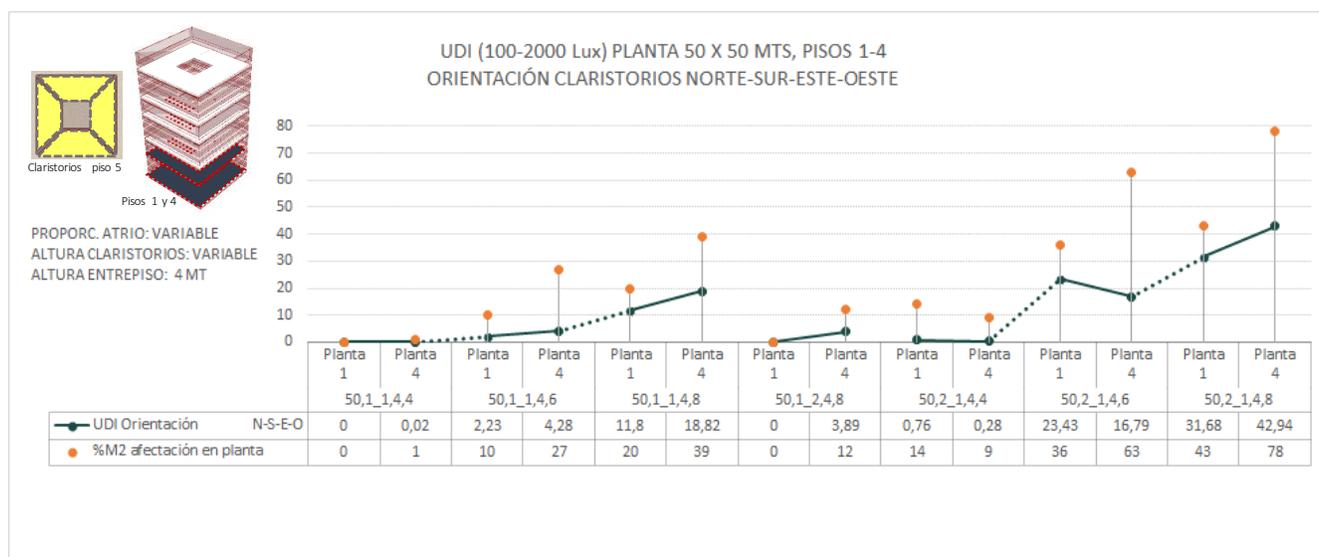
3.3.1.2. Configuraciones geométricas de atrio en Planta de 50X50 m²

Respecto a la variación de altura entre 3 y 4 metros de entrepisos de espacios adyacentes y entre 4, 6 y 8 m de altura para claristorios en orientación norte-sur-este-oeste, para los niveles 1 y 4, según las gráficas de análisis 7 y 8 se evidencia:

- El aumento de la altura de entrepisos de espacios adyacentes de 3 a 4 metros, muestra en los primeros y últimos pisos un menor valor UDI, pero evidencia un aumento del porcentaje de m² de incidencia en planta en el nivel superior.
- El mayor valor UDI para la proporción 1:2, se registra para la geometría con la máxima altura de claristorios (8 metros) y la mínima altura de entrepisos en espacios adyacentes (3 metros). Dichos valores se encuentran entre 1% (1 piso) y 5.36% (piso 4), con incidencias en planta entre 5 y 10% respectivamente. Se tomó la decisión de no incluir en las gráficas de análisis, las geometrías de esta proporción de atrio, con alturas de claristorios entre 4 y 6 metros de altura, por presentar aportes de UDI para la planta de 50x50mts de 0%.
- Los valores UDI para las geometrías con proporción de atrio 1:1, altura de claristorios de 4 metros, y con las dos alturas de entrepiso de espacios adyacentes correspondientes a 3 y 4 metros, se registran en 0 y con porcentajes de afectación de metros cuadrados en planta entre 0 y 1%. Es decir, que dicha proporción geométrica tiene aportes lumínicos la mayor parte del año por debajo de 100 lx e incide en muy poca área para generar un aporte por sí sólo a los espacios adyacentes. Con altura de claristorios entre 6 metros se alcanza un aporte de UDI del 9% e incidencia de m² en planta hasta del 21%, con 3 m de altura en entrepisos, y con claristorios de 8 metros, un aporte lumínico del 20% con 27% de m² de incidencia en planta.
- En la proporción 2:1, con altura de claristorios 4, 6 y 8m y 3 m de entrepiso en espacios adyacentes, muestra un mayor aporte lumínico en el primer nivel que en el último. Lo mismo ocurre cuando la altura de entrepisos es de 4 metros, con claristorios de 4 y 6 m de alto. Con altura de claristorios de 8 metros, se evidencia mayor aporte lumínico en el nivel 4, que en el 1 cuando la altura de entrepiso es 4 m.



Gráfica 7. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios N-S-E-O, Planta 50x50m². Pisos 1 y 4. (h) entrepiso esp. ady. 3mts.

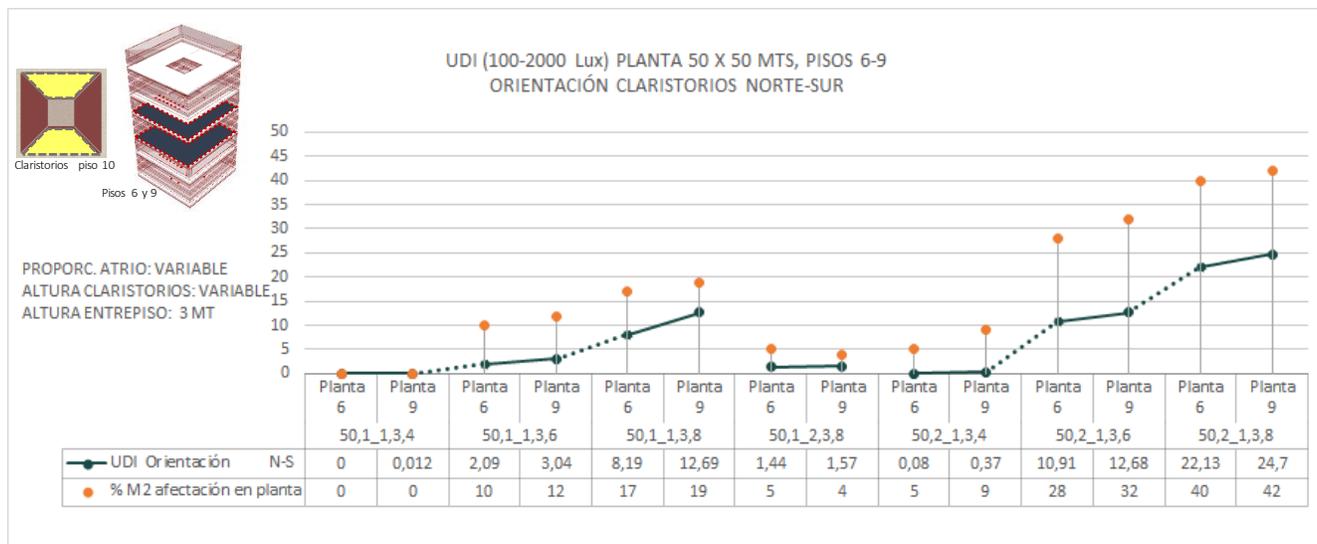


Gráfica 8. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios N-S-E-O, Planta 50x50m². Pisos 1 y 4. (h) entrepiso esp. ady. 4mts.

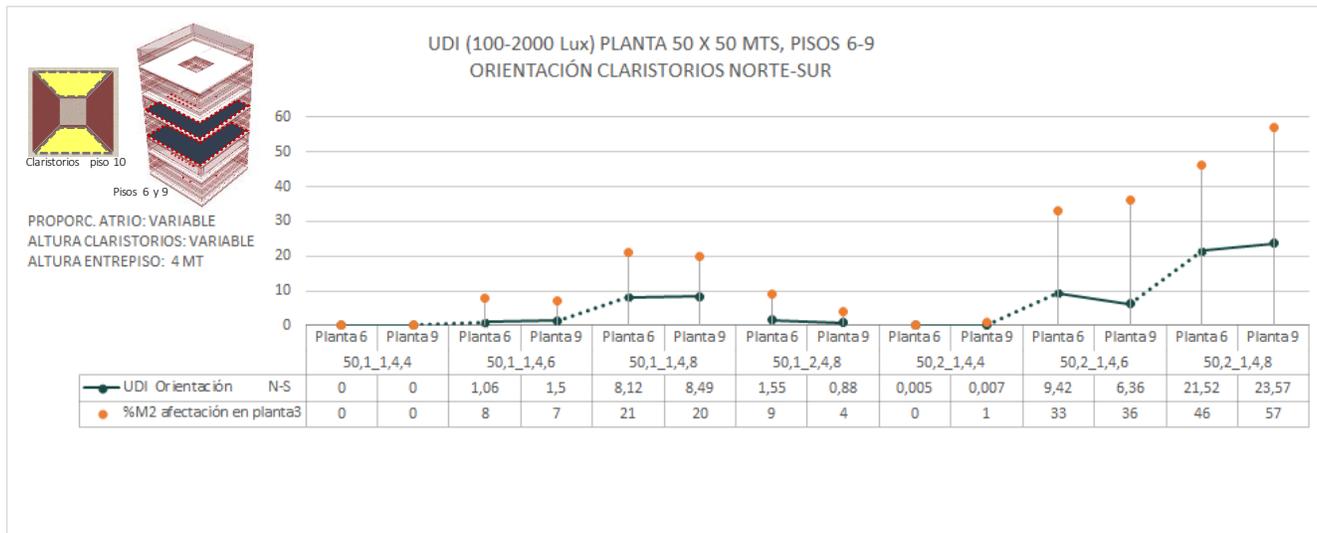
Respecto a la variación de altura entre 3 y 4 metros de entrepisos de espacios adyacentes y entre 4, 6 y 8 m de altura para claristorios en orientación norte-sur, para los niveles 6 y 9, según las gráficas de análisis 9 y 10 se evidencia:

- El aumento de la altura de entrepisos de espacios adyacentes de 3 a 4 metros con 6 metros de claristorios, evidencia en el primer y último nivel de la proporción de atrio 2:1, un menor valor UDI, pero el aumento del porcentaje de m² de incidencia en planta. Eso mismo ocurre en todas las proporciones de atrio con 8 metros de altura en claristorios.

- El valores de UDI para la proporción 1:2, en primer y último nivel son menores a 2%, con afectación de m² de planta entre un 4 y 9%; así mismo, se tiende a equilibrar el % de UDI entre el piso inferior y superior. Se tomó la decisión de no incluir en el análisis, las geometrías de esta proporción de atrio, con alturas de claristorios entre 4 y 6 metros de altura, por presentar aportes de UDI para la planta de 50x50m de 0%.
- Para las geometrías con proporción de atrio 1:1 y 2:1, con altura de claristorios a 4 metros y las dos alturas de entrepiso de espacios adyacentes (3 y 4 metros), se obtienen valores UDI de 0% y % de afectación de m² en planta inferiores a 9%. Lo anterior evidencia, que los aportes lumínicos la mayor parte del año, se encuentran por debajo de 100 lx. Con una altura de claristorios de 8 metros, los aportes lumínicos alcanzan entre 8 y 12% para el primer y último nivel con entrepisos de 3 metros y 8 % para entrepisos de 4 metros.
- La proporción de atrio 2:1 con altura de claristorios de 8 metros registra el mayor valor de UDI correspondiente entre 20 y 24% para primer y último nivel, con un porcentaje de m² de incidencia en planta entre 40 y 57%.



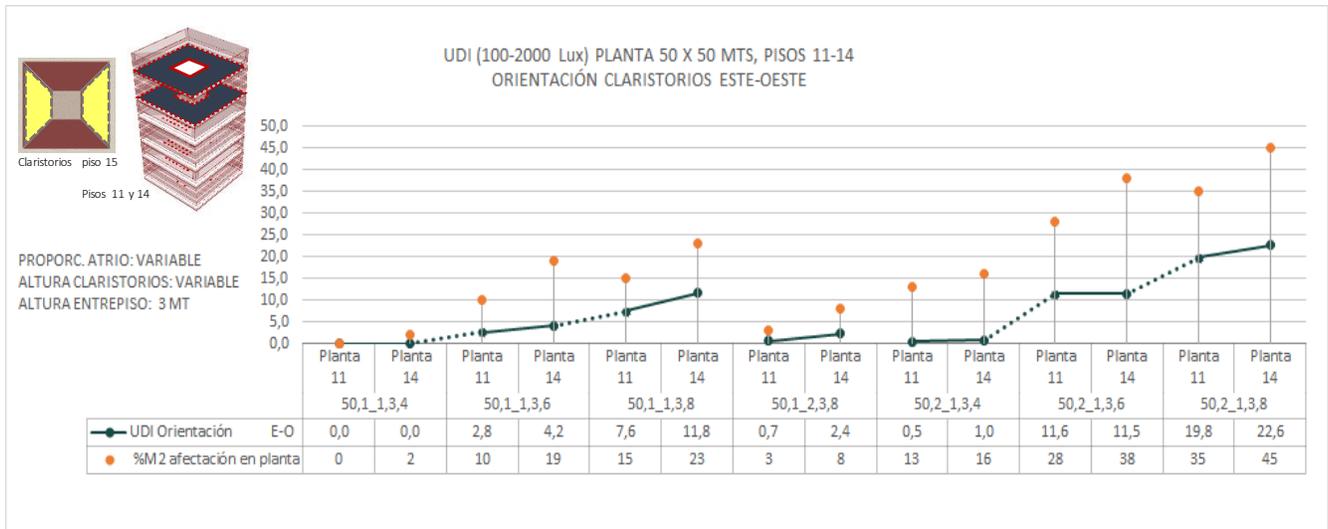
Gráfica 9. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios N-S, Planta 50x50m². Pisos 6 y 9. (h) entrepiso esp. ady. 3mts.



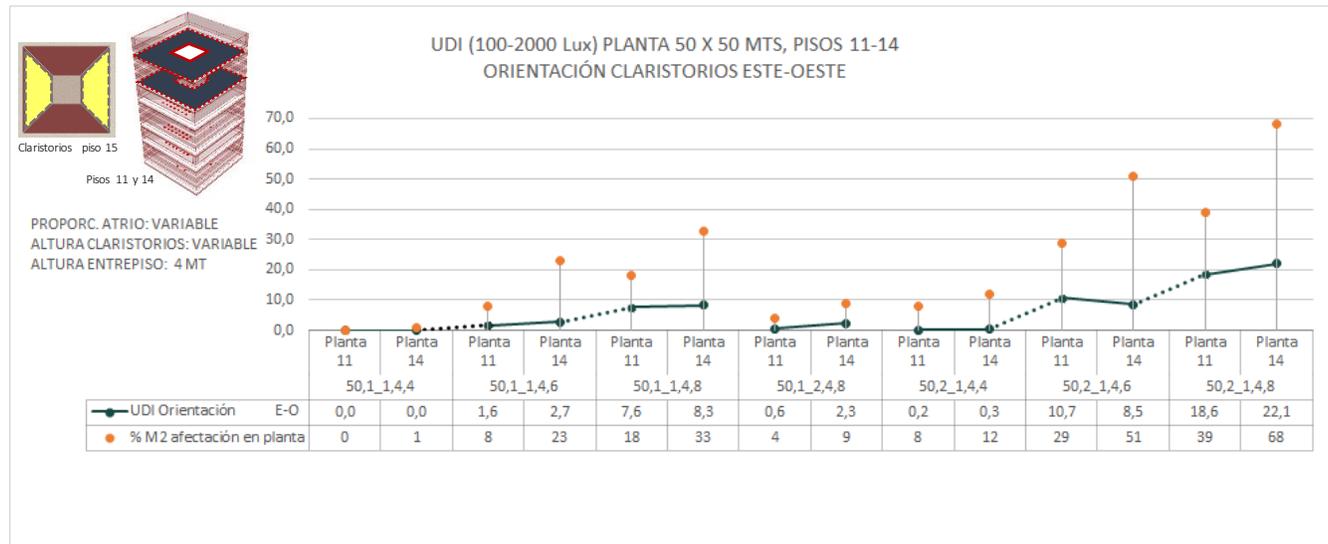
Gráfica 10. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios N-S, Planta 50x50m². Pisos 6 y 9. (h) entrepiso esp. ady. 4mts.

Respecto a la variación de altura entre 3 y 4 metros de entrepisos de espacios adyacentes y entre 4, 6 y 8 m de altura para claristorios en orientación Este-Oeste, para los niveles 11 y 14, según las gráficas de análisis 11 y 12, se evidencia:

- Al aumentar la altura de entrepisos de espacios adyacentes de 3 a 4 metros, en los primeros y últimos pisos se muestra un menor valor UDI en contraste con el aumento del porcentaje de incidencia de m² en planta en aquellas proporciones de atrio con altura de claristorios de 6 y 8 m.
- Para todas las proporciones de atrio, con altura de claristorios de 4 metros, los valores de UDI oscilan entre 0,6 y 2.4% para primer y último nivel, con un máximo de afectación en m² en planta del 16%, por lo que los mayores aporte lumínicos, la gran mayoría del año se encuentran por debajo de los 100lux.
- El mayor valor de UDI se registra en la proporción de atrio 2:1, con altura de claristorios de 8 metros, con entre 18 y 19% para primer y 22% para el último nivel y porcentaje de afectación en m² de planta entre 35 y 68%, para las dos alturas de entrepiso evaluadas.



Gráfica 11. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios E-O, Planta 50x50m². Pisos 11 y 14. (h) entrepiso esp. ady. 3mts.



Gráfica 12. Resultados UDI, fase I. Orientación de claristorios E-O, Planta 50x50m². Pisos 11 y 14. (h) entrepiso esp. ady. 4mts.

GENERALIDADES DE SUPERFICIE EN PLANTA DE 30X30M² EN FASE I.

Existe una tendencia de mayores aportes lumínicos y mayor área de incidencia de m² en planta, en espacios adyacentes de los últimos niveles evaluados (4,9 y 14), respecto de los primeros niveles (1,6 y 9) para las diferentes orientaciones de claristorios analizadas. Ésta tendencia, muestra mucha más incidencia en los niveles con disposición de claristorios en orientaciones norte, sur, este y oeste (niveles 1 y 4), seguidos por los niveles con claristorios en orientación este y oeste (11 y 14) y con menos incidencia en los niveles con orientación norte y sur de claristorios (6 y 9).

La proporción de atrio 1:1, con orientación de claristorios norte y sur, permite equilibrar los aportes lumínicos y el % de incidencia de m^2 en planta, para los niveles inferiores y superiores del atrio, respecto de las demás proporciones evaluadas.

GENERALIDADES DE SUPERFICIE EN PLANTA DE 50X50M2 EN FASE I.

Para las proporciones de atrio 1:2 y 1: 1 principalmente, existe una tendencia de mayores aportes lumínicos y mayor área de incidencia en m^2 en planta, en los espacios adyacentes de los últimos niveles (4, 9 y 14), respecto de los primeros niveles (1,6 y 9) e independiente de la orientación de claristorios y su altura. Se evidencia igualmente que al aumentar la altura de entresijos de espacios adyacentes a 4 m, ésta tendencia tiene a disminuir y el aporte lumínico tiende a normalizarse en los niveles inferiores y superiores.

Para la proporción de atrio 2:1, se evidencian mayores aportes lumínicos en los primeros niveles (1,6 y 9) respecto de los últimos, (4, 9 y 14), mostrando un tendencia de comportamiento inverso a las proporciones de atrio comentadas anteriormente. Éste comportamiento es más evidente en niveles que reciben aportes lumínicos de claristorios N-S-E-O con alturas de claristorios entre 4 y 6 m y las dos alturas de entresijo y para niveles con aporte de claristorios en orientación N-S y E-O, con altura de claristorios de 6 m y altura de entresijos de espacios adyacentes de 4m. Lo anterior puede deberse a disminuciones en el ángulo visible de cielo, junto a un porcentaje reducido de ventanas, presente en las paredes del atrio en los niveles superiores.

Por otro lado, la tendencia al equilibrio de aporte lumínico entre las plantas superiores e inferiores, responde principalmente al aumento de proporción del atrio. Con una altura de claristorios de 8 metros, la tendencia de mayores aportes lumínicos por UDI, en general, desde las distintas orientaciones de claristorios, vuelve a presentarse en los últimos niveles y decrece en los primeros.

Para todas las proporciones de atrio con las diferentes orientaciones de claristorios analizadas, en general, existe una tendencia de mayor área incidencia de m^2 en planta, en espacios adyacentes de los últimos niveles evaluados (4,9 y 14), respecto de los primeros niveles (1,6 y 9).

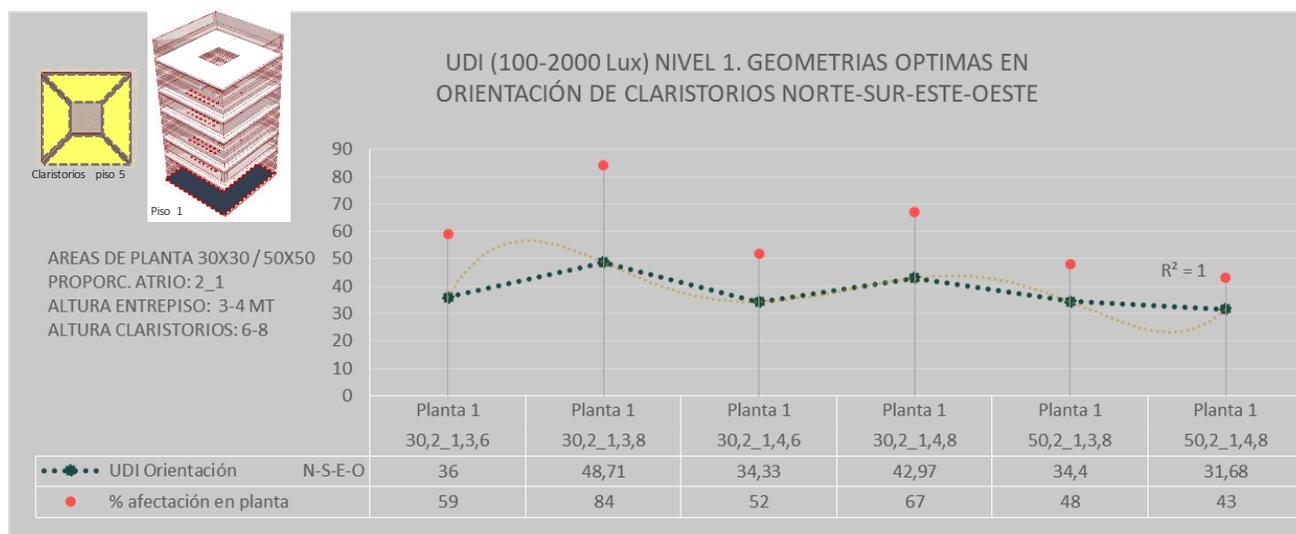
3.3.1.3. COMPARATIVA DE APORTES UDI ENTRE SUPERFICIES EN PLANTA DE 30x30 m² Y 50x50 m²

Tanto para las áreas en planta de 900 m² (30x30) y 2500 m² (50x50) se seleccionaron las geometrías con los mayores aportes lumínicos obtenidos por UDI, evidenciando los siguientes resultados:

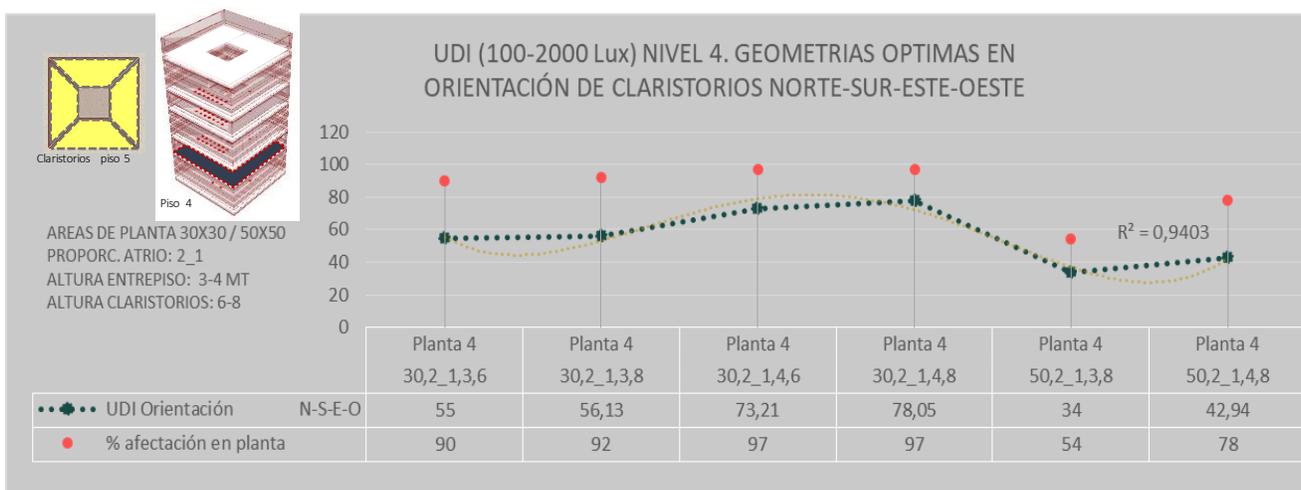
El comportamiento lumínico mostrado por UDI₍₁₀₀₋₂₀₀₀₎ en todos los niveles inferiores y superiores de las configuraciones geométricas óptimas escogidas, evidenció que un UDI igual o superior a 30% para niveles inferiores, así como un valor igual o mayor al 50% de UDI para niveles superiores, son valores óptimos en el desempeño lumínico de los espacios adyacentes de estas configuraciones, cuando sólo se reciben aportes de iluminación desde el atrio. Los anteriores valores permitieron realizar la clasificación de las geometrías óptimas que se analizan a continuación.

Los espacios adyacentes que reciben aportes de iluminación del atrio con claristorios en todas las orientaciones (niveles 1 y 4), para las dos áreas en planta evaluadas, fueron los resultados que mayor valor de UDI obtuvieron (ver gráficas de análisis 13 y 14):

- Para la planta de 30x30 m², se seleccionaron cuatro configuraciones geométricas que responden a la proporción de atrio 2:1, con alturas de claristorios entre 6 y 8 m de altura en orientación de claristorios N-S-E-O y las dos alturas de entrepiso posibles (3 y 4 metros). Estas configuraciones geométricas obtuvieron valores de UDI entre 34% (para el 1 nivel) y 73% (para el 4 nivel), con incidencia lumínica entre el 52 y 97% de área en planta respectivamente.
- Para la planta de 50x50 m² se seleccionaron dos configuraciones geométricas, que respondieron a los mayores aportes posibles de UDI, entre 31% (para el primer nivel) y 43% (para el cuarto nivel) con incidencia lumínica entre el 43% y 78 % de área en planta respectivamente. Estas configuración al igual que para la planta de 30x30 m², respondieron a una proporción de atrio 2:1, con alturas de espacios adyacentes de 3 y 4 metros pero con sólo 8 metros de altura de claristorios.
- La planta de 50x50 m² evidenció un comportamiento lumínico inferior, respecto a la planta de 30x30 m², en las mismas condiciones de configuraciones geométricas evaluadas: un 14% de aporte menos en la primera planta y un 19% para la última y con diferencias entre incidencias por área en planta de 36% y 38% respectivamente. Para los niveles que reciben aportes con orientaciones de claristorios norte-sur (6-9) y este-oeste (11-14) por separado en ésta tipología, los valores de UDI se encontraron por debajo del 25%; por tanto, no se consideró óptima ninguna de estas configuraciones geométricas, cuando sólo se recibe aportes de iluminación natural por un atrio central.



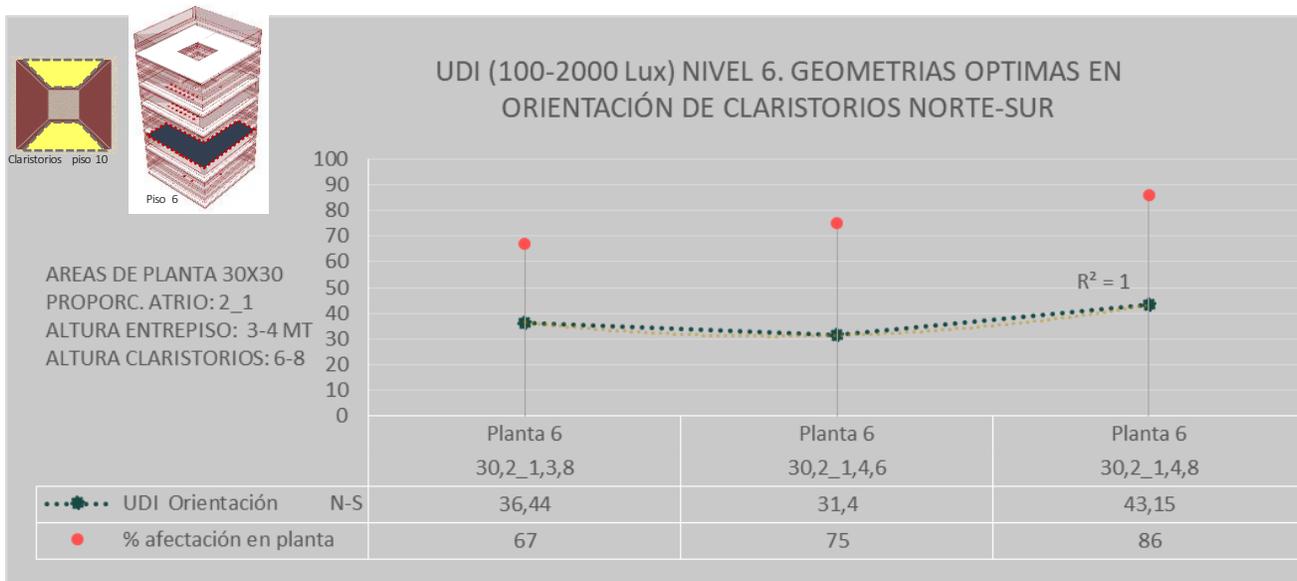
Gráfica 13. Clasificación de Geometrías óptimas para orientación de Claristorios Norte-sur-este-oeste. Plantas 30x30 y 50x50mt2. Nivel 1



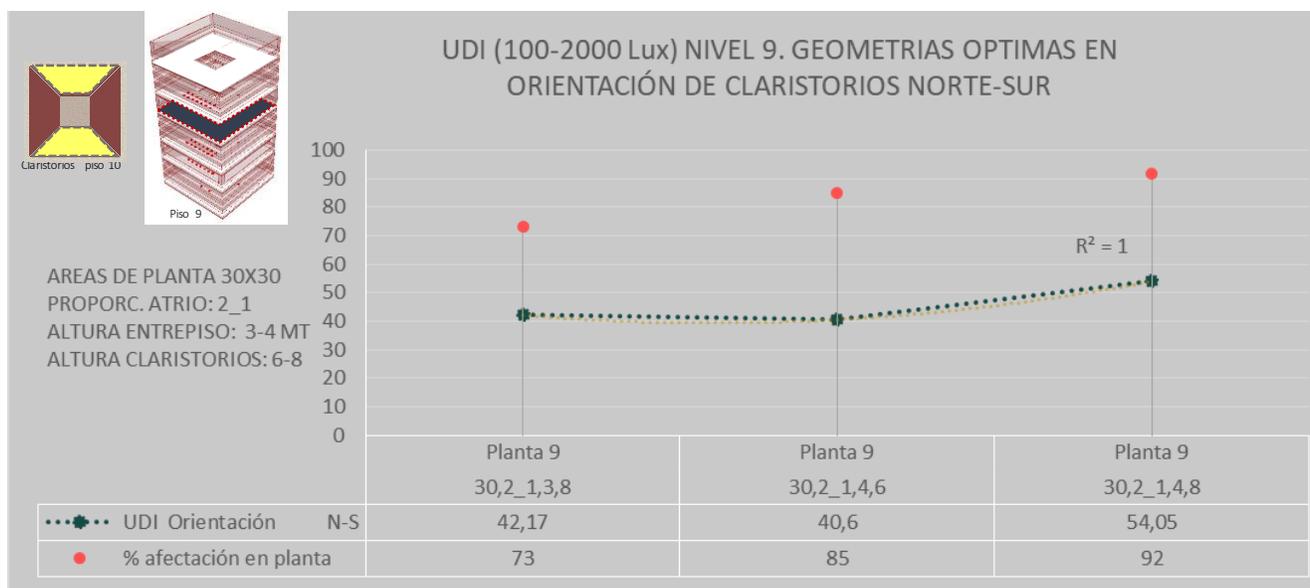
Gráfica 14. Clasificación de Geometrías óptimas para orientación de Claristorios Nortesur-este-oeste. Plantas 30x30 y 50x50mt2. Nivel 4

Las configuraciones geométricas con mejor desempeño lumínico para los niveles 6 y 9, con claristorios en orientación norte-sur para la planta de 30X30 m², respondieron a aquellas con una proporción de atrio 2:1, alturas de entrepisos de espacios adyacentes de 3 y 4 metros y con claristorios entre 6 y 8 metros (ver gráficas de análisis 15 y 16):

- Las diferencias de UDI respecto a la altura del entrepiso en espacios adyacentes de oficinas, representa entre un 10 y 12% más de tiempo, cuando la altura es de 4 metros y un 19% de incidencia en afectación de metros cuadrados en planta. En general estas configuraciones, mostraron aportes UDI entre 31% para primeros niveles y 54% para los últimos.



Gráfica 15. Clasificación de Geometrías óptimas para orientación de Claristorios Norte-sur. Planta 30x30 mt2. Nivel 6.

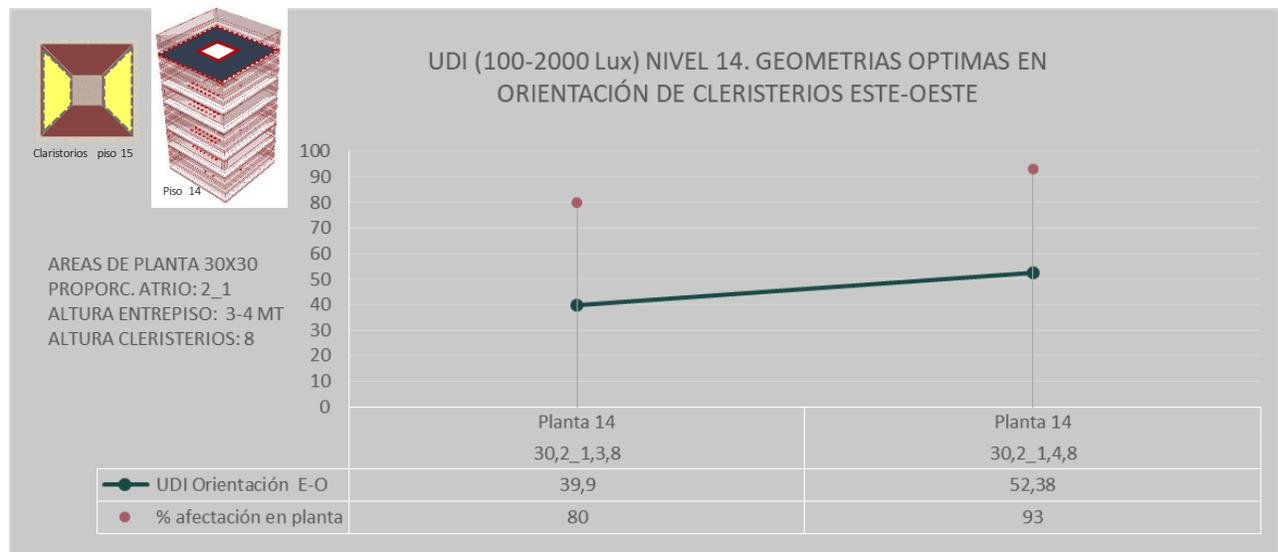


Gráfica 16. Clasificación de Geometrías óptimas para orientación de Claristorios Norte-sur. Planta 30x30 mt2. Nivel 9.

- Igual que para las demás orientaciones de claristorios, las geometrías más óptimas para iluminación natural, en los niveles 11 y 14 con claristorios en orientación este-oeste en la planta de 30X30 m², responden a la proporción de atrio 2:1, con alturas de entrepiso variable (3 y 4 metros) y la altura de claristorios, máxima evaluada (8 metros). Estas configuraciones muestran un aporte entre un 30% y 50% del tiempo en cumplimiento de UDI, con una afectación en m² de planta entre un 65% y 93% para primeros y últimos niveles respectivamente.



Gráfica 17. Clasificación de Geometrías óptimas para orientación de Claristorios Este-Oeste. Planta 30x30 mt2. Nivel 11



Gráfica 18. Clasificación de Geometrías óptimas para orientación de Claristorios Este-Oeste. Planta 30x30 mt2. Nivel 14.

3.3.2. RESULTADOS FASE 2. DE EVALUACIÓN LUMÍNICA.

Se realizaron 108 simulaciones de las diferentes proporciones geométricas parametrizadas en relación a las áreas de superficie en planta de 30 x 30 m² y 50x50 m², con un WWR de 40% en fachadas de los espacios adyacentes y las diferentes orientaciones de atrios. Los resultados se registran en las tablas Tabla 26 y Tabla 29. **Resultados generales de rangos UDI con WRR 40% en Fachadas de esp. Adyacentes. Planta 50x50mt2.** y en el capítulo 8, Anexo II.

Para el análisis se seleccionaron aquellas configuraciones que presentaron variables geométricas optimizadas en cuanto a ahorro espacial y comportamiento óptimo lumínico en relación a los rangos UDI definidos por Reinhart, Mardaljevic y Rogers (2006) así:

- UDlc (100-2000 Lux)
- UDI “Underlit” (<100lux)
- UDI “Overlit” o excedido (>2000 lux)

Tabla 26. Resultados generales de rangos UDI con WRR 40% en Fachadas de esp. Adyacentes. Planta 30x30mt2.

30,1_2,3,4		PLANTA 1	PLANTA 4	PLANTA 6	PLANTA 9	PLANTA 11	PLANTA 14
	UDlc	65,96	65,32	65,68	64,69	65,66	65,02
	UDI Underlit	1,72	2,24	1,91	2,93	1,91	2,59
	UDI Overlit	31,16	31,26	31,22	31,23	31,26	31,21
30,1_2,3,6							
	UDlc	66,1	65,78	65,86	65,42	65,76	65,63
	UDI Underlit	1,64	1,69	1,73	2,27	1,84	1,94
	UDI Overlit	31,1	31,37	31,25	31,15	31,23	31,23
30,1_2,3,8							
	UDlc	66,17	66,04	65,99	65,75	65,73	65,75
	UDI Underlit	1,52	1,33	1,7	1,88	1,9	1,75
	UDI Overlit	31,19	31,43	31,16	31,25	31,21	31,35
30,1_2,4,4							
	UDlc	53,84	56,69	56,43	56,5	56,42	56,68
	UDI Underlit	0,51	0,52	0,51	0,57	0,47	0,57
	UDI Overlit	44,49	41,62	41,89	41,78	41,94	41,59
30,1_2,4,6							
	UDlc	53,86	56,55	56,5	56,68	56,43	56,63
	UDI Underlit	0,52	0,5	0,5	0,55	0,47	0,54
	UDI Overlit	44,48	41,75	41,87	41,65	41,94	41,68
30,1_2,4,8							
	UDlc	54	56,6	56,35	56,8	56,5	56,61
	UDI Underlit	0,5	0,34	0,49	0,45	0,5	0,45
	UDI Overlit	44,33	41,89	42,04	41,56	41,86	41,77

30,1_1,3,4							
	UDic	66,37	66,48	66,09	66,29	66,08	66,34
	UDI Underlit	1,06	1,06	1,15	1,31	1,19	1,18
	UDI Overlit	31,37	31,31	31,55	31,26	31,52	31,25
30,1_1,3,6							
	UDic	66,46	66,48	66,18	66,52	66,03	66,25
	UDI Underlit	0,97	0,75	1,12	1,06	1,15	1,06
	UDI Overlit	31,39	31,61	31,51	31,27	31,61	31,51
30,1_1,3,8							
	UDic	66,47	66,18	66	66,59	66,15	66,23
	UDI Underlit	0,94	0,5	1,15	0,79	1,09	0,82
	UDI Overlit	31,4	32,1	31,64	31,42	31,57	31,7
30,1_1,4,4							
	UDic	51,94	56,16	55,08	56,27	55,31	56,17
	UDI Underlit	0,26	0,3	0,27	0,34	0,28	0,32
	UDI Overlit	46,56	42,33	43,43	42,2	43,23	42,32
30,1_1,4,6							
	UDic	51,97	55,63	54,89	56,08	55	55,97
	UDI Underlit	0,2	0,18	0,29	0,25	0,25	0,26
	UDI Overlit	46,61	42,99	43,61	42,46	43,5	42,56
30,1_1,4,8							
	UDic	51,87	54,72	54,64	55,95	54,86	55,46
	UDI Underlit	0,23	0,02	0,28	0,18	0,27	0,17
	UDI Overlit	46,66	44,01	43,86	42,68	43,68	43,17
30,2_1,3,4							
	UDic	64,22	58,64	58,81	59,11	58,89	59,13
	UDI Underlit	0,47	0,44	0,51	0,56	0,48	0,59
	UDI Overlit	34,06	39,71	39,48	39,13	39,41	39,07
30,2_1,3,6							
	UDic	61,76	57,84	58,59	59,07	58,78	58,53
	UDI Underlit	0,36	0,1	0,46	0,39	0,47	0,42
	UDI Overlit	36,65	40,75	39,72	39,37	39,54	39,86
30,2_1,3,8							
	UDic	58,04	54,66	58,34	58,65	57,76	57,58
	UDI Underlit	0,17	0,01	0,32	0,18	0,39	0,24
	UDI Overlit	40,46	44,1	40,12	39,96	40,63	40,93
30,2_1,4,4							
	UDic	41,03	43,73	41,33	45,06	41,81	45,19
	UDI Underlit	0	0,03	0	0,05	0	0,09
	UDI Overlit	57,81	55,08	57,51	53,74	57,02	53,53
30,2_1,4,6							
	UDic	38,22	40,84	39,22	44,32	40,05	43,49
	UDI Underlit	0	0	0	0,03	0	0,07
	UDI Overlit	60,68	57,99	59,63	54,44	58,76	55,26
30,2_1,4,8							
	UDic	34,05	34,62	37,82	41,94	39,52	41,26
	UDI Underlit	0	0	0	0,03	0	0,05
	UDI Overlit	64,86	64,31	61,06	56,93	59,34	57,56

3.3.2.1. ANÁLISIS DE CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS CON SUPERFICIE EN PLANTA DE 30X30 M²

De los resultados de UDI registrados en las gráficas 19 y 20 de las 6 configuraciones geométricas descritas en las tablas 27 y 28, se evidencia lo siguiente:

- Las proporciones geométricas escogidas respondieron a alturas de espacios adyacentes entre 3 y 4 metros y a la menor altura de claristorios propuesta, correspondiente a 4 metros.
- Al incluir el aporte lumínico por fachadas en la evaluación, se muestra la homogenización de los aportes de UDI para todos los niveles inferiores y superiores evaluados.
- Para ésta fase, se demuestra que cuando el análisis del comportamiento lumínico se realiza con las dos fuentes de luz natural previstas (atrio y área vidriada por fachada), la orientación de los claristorios pasa a ser una variable que funciona para todos los casos evaluados, toda vez que, los resultados se mostraron bastante homogéneos. Ésta variable de orientación, en conclusión, estaría más relacionada a las condiciones del entorno urbano del proyecto para recibir luz exterior.
- Los resultados del comportamiento lumínico por rangos de UDI propuestos, evidencian un bajo porcentaje de UDI “Underlit” o insuficiente (<100lux) en la mayoría de las configuraciones, porcentajes de UDI complementario (100-2000 lux) por encima del 50% y un porcentaje moderado de UDI “Overlit” o excedido (>2000 lux) teniendo en cuenta que la evaluación se ejecutó sin ningún dispositivo de sombreado por fachadas.
- Que el porcentaje de UDI excedido corresponde en mayor medida a las áreas en planta perimetrales a las fachadas exteriores, como lo muestran los resultados gráficos adjuntos en el capítulo 8, sección de anexos II.
- De los rangos de UDI en espacios adyacentes respecto a las proporciones del atrio, en general los resultados se muestran muy equitativos entre ellos; se evidencia que la proporción 2:1 disminuye considerablemente los valores de UDI y aumenta los de UDI overlit, cuando la altura de los espacios adyacentes cambia de 3 a 4 metros.
- El aumento de proporción del atrio de 1:2 ó 1:1 a 2:1, resulta ser un diseño sobredimensionado para la eficiencia lumínica de los espacios adyacentes en la superficie en planta de 30X30 m².

Tabla 27. Descripción de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en primeros niveles. Planta 30x30 mt2.

	1	2	3	4	5	6
Pisos Inferiores						
11						
6						
1						
Código Prop. Geom.	30,1_2,3,4	30,1_2,4,4	30,1_1,3,4	30,1_1,4,4	30,2_1,3,4	30,2_1,4,4
* Área planta	30 x30m2					
* Propor. Atrio:	1_2	1_2	1_1	1_1	2_1	2_1
* (h) Entrepisos esp. Adyacentes:	3m	4m	3m	4m	3m	4m
* (h) Claristorios:	4m	4m	4m	4m	4m	4m

Gráfica 19. Clasificación de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en primeros niveles. Planta 30x30 mt2.

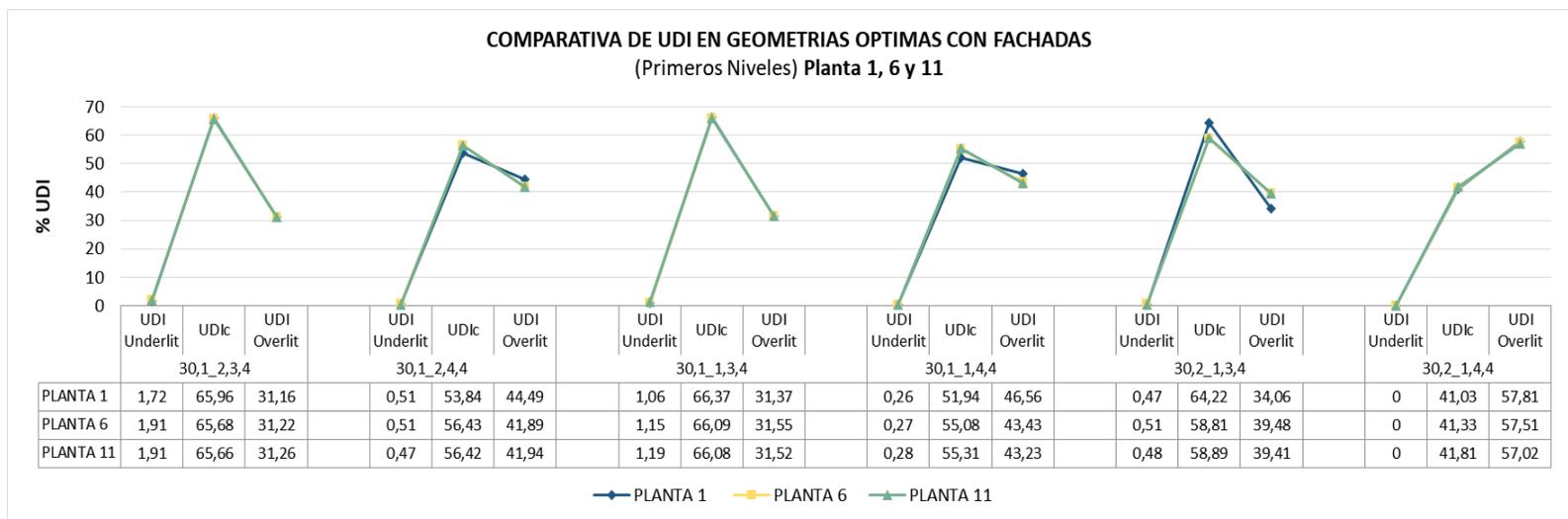
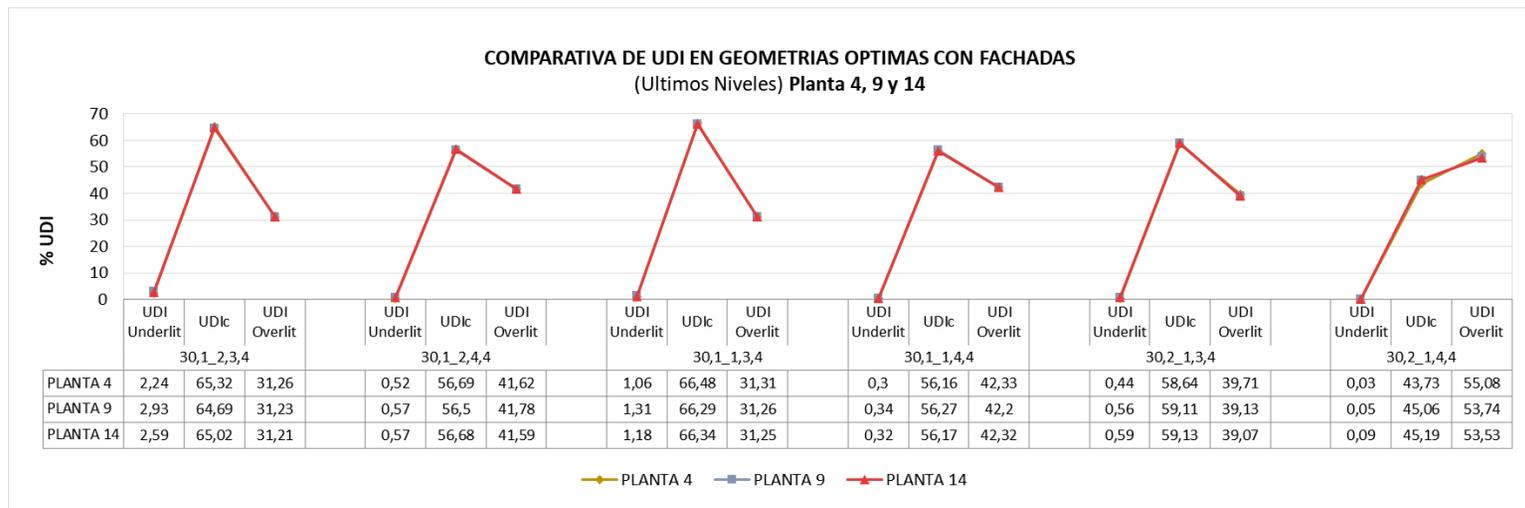


Tabla 28. Descripción de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en últimos niveles. Planta 30x30 mt2.

	1	2	3	4	5	6
Pisos Superiores						
14						
9						
4						
Código Prop. Geom.	30,1_2,3,4	30,1_2,4,4	30,1_1,3,4	30,1_1,4,4	30,2_1,3,4	30,2_1,4,4
* Área planta	30 x30m2					
* Propor. Atrio:	1_2	1_2	1_1	1_1	2_1	2_1
* (h) Entrepisos esp. Adyacentes:	3m	4m	3m	4m	3m	4m
* (h) Claristorios:	4m	4m	4m	4m	4m	4m



Gráfica 20. Clasificación de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en últimos niveles. Planta 30x30 mt2.

3.3.2.2. ANÁLISIS DE SUPERFICIE EN PLANTA DE 50X50 M2

Para el análisis de las proporciones geométricas en plantas de 50X50 m² descritas en las tablas 30 y 31, se tomaron en cuenta igualmente, aquellas con los mayores valores para UDlc, y menores para UDI Underlit en relación a la optimización espacial de las variables geométricas propuestas. El análisis de resultados fue registrado en las gráficas de análisis 21 y 22.

Tabla 29. Resultados generales de rangos UDI con WRR 40% en Fachadas de esp. Adyacentes. Planta 50x50mt2.

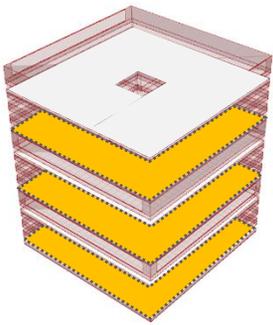
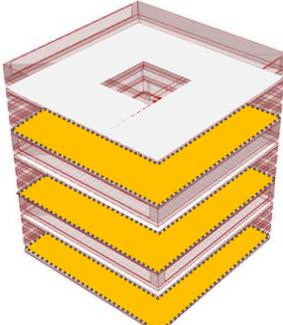
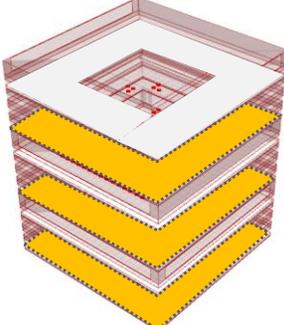
50,1_2,3,4		PLANTA 1	PLANTA 4	PLANTA 6	PLANTA 9	PLANTA 11	PLANTA 14
	UDlc	47,6	45,27	46,81	46,08	46,4	45,76
	UDI Underlit	32,36	34,44	32,84	33,63	33,24	33,95
	UDI Overlit	18,93	19,29	19,3	19,3	19,33	19,28
50,1_2,3,6							
	UDlc	48,09	49,28	48,97	46,96	46,93	47,32
	UDI Underlit	31,9	30,36	30,66	32,76	32,68	32,35
	UDI Overlit	18,92	19,3	19,3	19,28	19,32	19,29
50,1_2,3,8							
	UDlc	49,39	54,39	51,59	50,27	48,92	50,64
	UDI Underlit	30,56	25,27	28,05	29,42	30,71	28,99
	UDI Overlit	18,95	19,27	19,29	19,29	19,32	19,31
50,1_2,4,4							
	UDlc	68,18	66,22	67,63	65,32	67,5	64,35
	UDI Underlit	4,27	6,33	5,25	7,6	5,38	8,55
	UDI Overlit	26,42	26,02	25,96	25,94	25,98	25,97
50,1_2,4,6							
	UDlc	68,1	68,16	68,22	66,45	68,02	66,82
	UDI Underlit	4,46	4,77	4,55	6,45	4,79	6,07
	UDI Overlit	26,3	25,91	26,08	25,95	26,03	25,98
50,1_2,4,8							
	UDlc	68,6	69,5	69,1	67,83	68,36	67,87
	UDI Underlit	3,78	3,36	3,74	5,06	4,45	4,98
	UDI Overlit	26,48	25,99	26,02	25,98	26,04	26,02
50,1_1,3,4							
	UDlc	60,52	57,53	58,41	53,52	56,81	51,74
	UDI Underlit	19,42	21,28	20,37	25,27	21,92	27,05
	UDI Overlit	18,94	20,08	20,11	20,11	20,17	20,13
50,1_1,3,6							
	UDlc	63,28	68,15	65,75	61,63	61,94	61,01
	UDI Underlit	16,68	10,63	13	17,15	16,79	17,73
	UDI Overlit	18,91	20,1	20,14	20,13	20,14	20,13
50,1_1,3,8							
	UDlc	64,59	71,16	69,04	66,92	64,89	65,39
	UDI Underlit	15,34	7,57	9,71	11,88	13,85	13,31
	UDI Overlit	18,96	20,19	20,13	20,09	20,13	20,15
50,1_1,4,4							
	UDlc	70,64	69,33	69,82	68,98	69,79	69
	UDI Underlit	1,59	2,47	1,77	2,79	1,82	2,77
	UDI Overlit	26,61	27,06	27,23	27,1	27,22	27,09
50,1_1,4,6							
	UDlc	70,56	69,96	69,95	69,6	69,88	69,54
	UDI Underlit	1,59	1,77	1,58	2,19	1,74	2,17
	UDI Overlit	26,68	27,1	27,32	27,06	27,22	27,1
50,1_1,4,8							
	UDlc	70,58	70,33	70,02	69,96	69,97	70
	UDI Underlit	1,57	1,25	1,59	1,75	1,66	1,66
	UDI Overlit	26,67	27,27	27,22	27,14	27,2	27,17

50,2_1,3,4							
	UDlc	76,88	72,4	72,85	71,66	72,55	70,35
	UDI Underlit	2,84	3,4	2,84	4,16	3,22	5,51
	UDI Overlit	19,11	23,06	23,16	23,05	23,11	23
50,2_1,3,6							
	UDlc	77,31	73,78	73,21	73,19	73,24	72,96
	UDI Underlit	2,34	1,99	2,49	2,67	2,5	2,84
	UDI Overlit	19,22	23,09	23,18	23,01	23,12	23,05
50,2_1,3,8							
	UDlc	77,72	74,12	73,6	73,64	73,38	73,56
	UDI Underlit	1,77	1,38	2,07	2,12	2,15	2,11
	UDI Overlit	19,34	23,32	23,17	23,1	23,29	23,14
50,2_1,4,4							
	UDlc	70,4	66,86	66,42	66,74	66,44	66,7
	UDI Underlit	0,9	0,87	0,86	0,95	0,89	1
	UDI Overlit	27,47	31,12	31,53	31,15	31,46	31,15
50,2_1,4,6							
	UDlc	70,4	66,53	66,33	66,6	66,39	66,74
	UDI Underlit	0,84	0,79	0,86	0,91	0,87	0,92
	UDI Overlit	27,54	31,52	31,62	31,35	31,55	31,16
50,2_1,4,8							
	UDlc	70,41	66,43	66,19	66,72	63,71	66,43
	UDI Underlit	0,75	0,58	0,86	0,76	0,87	0,83
	UDI Overlit	27,58	31,8	31,78	31,36	31,6	31,57

Se escogieron 4 proporciones geométricas que cumplieron con la consideración del análisis, evidenciando lo siguiente:

- Las proporciones geométricas escogidas respondieron a alturas de espacios adyacentes entre 3 y 4 metros y a la menor altura de claristorios propuesta, correspondiente a 4 metros.
- Se evidencia un comportamiento lumínico homogéneo en los diferentes niveles superiores e inferiores evaluados, independientemente de las orientaciones de claristorios propuestas.
- Para ésta área en planta, los porcentajes de UDI, Overlit (>2000 lux), son significativamente menores al de la planta de 30X30 m², así como mayor, el porcentaje de UDlc (100-2000 lux), lo que evidencia un comportamiento lumínico distinto, en razón al área en planta y la profundidad de los espacios adyacentes.
- Que el porcentaje de UDI excedido corresponde en mayor porcentaje a las áreas adjuntas al perímetro de fachadas del modelo, como lo muestran los resultados en imágenes adjuntas en la sección de anexos.

Tabla 30. Descripción de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en primeros niveles. Planta 50x50 mt²

	1	2	3	4
Pisos Inferiores				
11				
6				
1				
Código Prop. Geom.	50,1_2,4,4	50,1_1,4,4	50,2_1,3,4	50,2_1,4,4
* Área planta	50 x50m ²	50 x50m ²	50 x50m ²	50 x50m ²
* Propor. Atrio:	1_2	1_1	2_1	2_1
* (h) Entrepisos esp. Adyacentes:	4m	4m	3m	4m
* (h) Claristorios:	4m	4m	4m	4m

Gráfica 21. Clasificación de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en primeros niveles. Planta 50x50 mt².

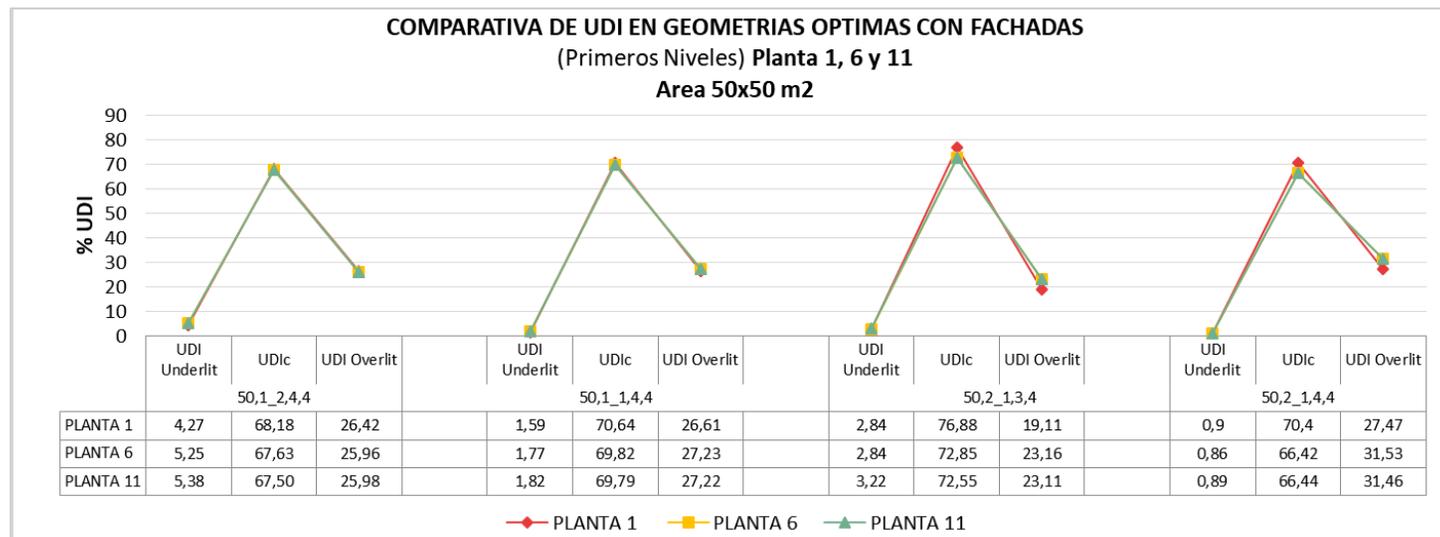
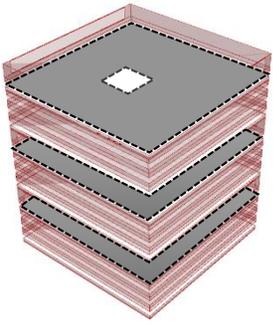
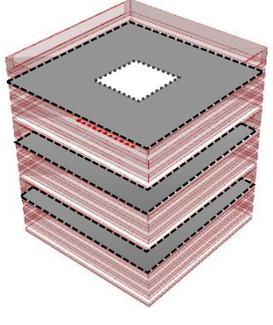
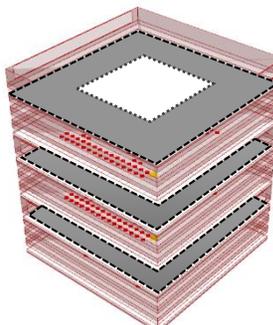
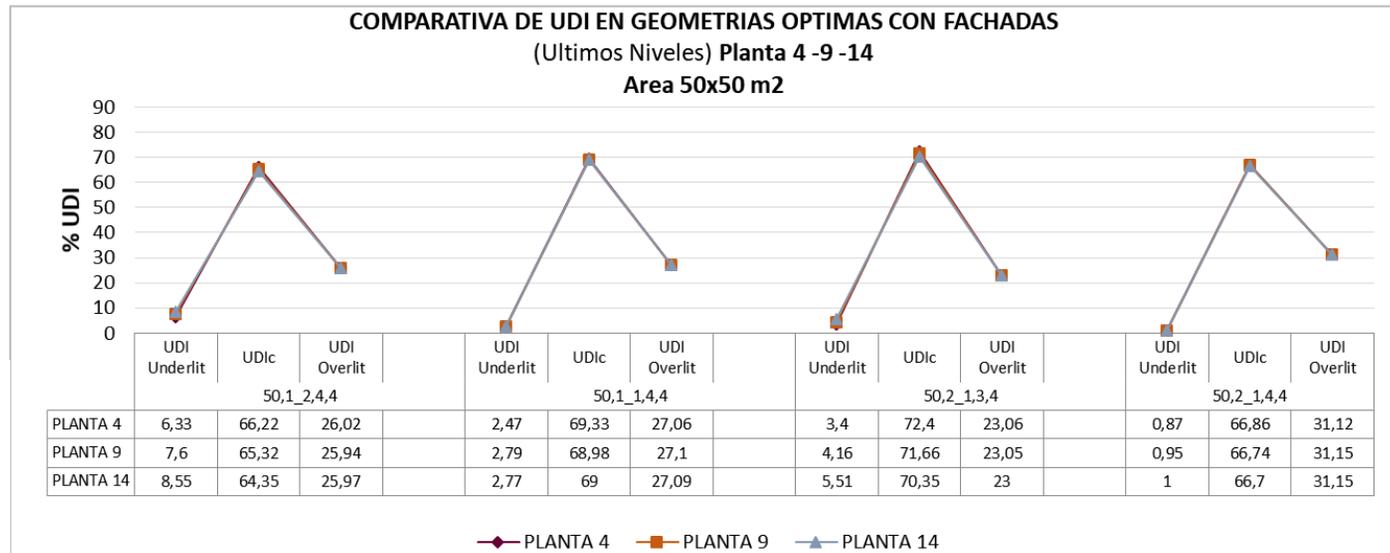


Tabla 31. Descripción de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en últimos niveles. Planta 50x50 mt2.

	1	2	3	4
Pisos Superiores				
14				
9				
4				
Código Prop. Geom.	50,1_2,4,4	50,1_1,4,4	50,2_1,3,4	50,2_1,4,4
* Área planta	50 x50m2	50 x50m2	50 x50m2	50 x50m2
* Propor. Atrio:	1_2	1_1	2_1	2_1
* (h) Entrepisos esp. Adyacentes:	4m	4m	3m	4m
* (h) Claristorios:	4m	4m	4m	4m



Gráfica 22. Clasificación de Geometrías óptimas con WWR de 40%, por rangos UDI en últimos niveles. Planta 50x50 mt2

4. LINEAMIENTOS DE DISEÑO

A partir de los resultados de evaluación que permitieron determinar las mejores configuraciones geométricas del atrio respecto al máximo valor $UDI_{(100-2000\text{ lx})}$ en superficies en planta entre 900 m^2 ($30 \times 30\text{ m}^2$) y 2500 m^2 ($50 \times 50\text{ m}^2$) para las dos fases en las que se evaluó el aporte lumínico del atrio como única fuente de iluminación y en conjunto con un WWR de 40% en fachadas de espacios adyacentes, se construyen lineamientos de diseño a partir de la selección de aquellas configuraciones geométricas que representaron los mejores comportamientos lumínicos por UDI en relación el máximo ahorro espacial. A partir de lo anterior, se hacen cuadros resumen de estas configuraciones y sus respectivos índices PAR, SAR y WI y son contrastados con los resultados de investigaciones realizadas en la temática, documentadas en el capítulo 2 del estado del arte. Se presentan igualmente características materiales de coeficiente de transmisión luminosa de superficies vidriadas y valores de coeficientes de reflectancia para los materiales de las superficies opacas de los espacios del atrio en relación a un adecuado porcentaje de ventana por niveles en los muros del atrio.

4.1. VARIABLES E INDICES DE PROPORCIÓN GEOMETRICA DEL ATRIO Y ESPACIOS ADYACENTES.

4.1.1. RESPECTO AL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO DE MODELO PARAMETRIZADO SIN WWR EN FACHADAS. FASE I DE EVALUACIÓN.

Al evaluar la eficiencia lumínica del atrio en los espacios adyacentes como única fuente de luz por medio de la métrica de evaluación lumínica UDI, se determinaron 4 proporciones geométricas óptimas para la superficie en planta de $30 \times 30\text{ m}^2$ y 2 proporciones para la superficie en planta de $50 \times 50\text{ m}^2$ como se muestra en la Tabla 32. Dichas proporciones en ambos casos, responden a una proporción de atrio 2:1 (25% del área total en planta), con altura de claristorios entre 6 y 8 m y la opción la altura de entresijos entre 3 y 4 m.

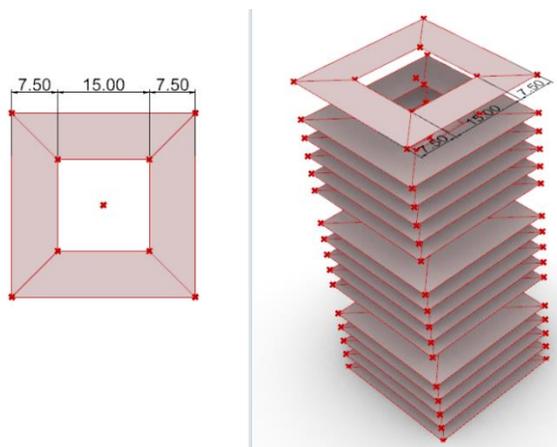


Ilustración 47. Proporción de atrio 2:1 optimizada para la superficie en planta de $30 \times 30\text{ m}^2$. Fase I de evaluación.

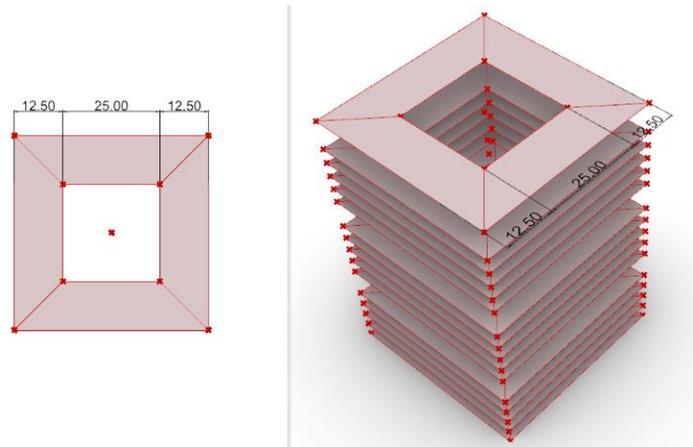


Ilustración 46. Proporción de atrio 2:1 optimizada para la superficie en planta de $50 \times 50\text{ m}^2$. Fase I de evaluación.

Las geometrías correspondientes a la planta de 30X30 m² muestran índices WI entre **0.8 y 1.1** para cada conjunto de 4 niveles evaluado en el modelo. Así mismo, para las dos configuraciones óptimas de la planta de 50X50 m², se presentan valores de WI entre **0.5 y 0.6**. Estos valores de WI corresponden con los resultados en investigaciones como la de Ahadi, Saghafi y Tahbaz (2018), Calcagni & Paroncini (2004), Du y Sharples (2011) en las que se concluyó que configuraciones con valores WI < o iguales a 1.5 son óptimos para aportar un DF considerable a espacios adyacentes, lo que responde a un atrio de 4 niveles de altura.

Al calcular el valor de WI total de los grupos de 4 niveles sumados a los niveles de claristorios que conforman el modelo de 15 pisos evaluado, se puede concluir que la evaluación permitió validar y optimizar lumínicamente valores de índice de pozo WI entre **3.6 y 4.8** para el modelo de 30x30 m² y entre **2.4 y 2.9** para el modelo de 50X50 m².

Tabla 32. Índices geométricos de proporciones geométricas óptimas escogidas en evaluación Fase 1.

CUADRO RESUMEN PROPORCIONES GEOMÉTRICAS OPTIMAS PARA MODELO SIN FACHADAS																
Area Edif.	Niveles	Proporción	Ancho espacios adyacentes	Area por espacio adyacente	% de area de Atrio en planta	Area atrio central	Largo atrio (l)	Ancho atrio (a)	Alto total atrios /edificio (h)			Alto atrio central 4 niveles (h)	PAR a/l	SAR h/a	WI 4 niveles $h*(a+l)/2*(a*l)$	WI total $h*(a+l)/2*(a*l)$
									EA	CT						
30*30 900 m2 por planta. 13500 m2 totales	15	2:1	7,5	169	<u>25%</u>	225	15	15	3	6	54	12	1	3,6	0,8	3,6
									4	6	66	16	1	4,4	1,1	4,4
			7,5	169	<u>25%</u>	225	15	15	3	8	60	12	1	4,0	0,8	4
									4	8	72	16	1	4,8	1,1	4,8
50*50 2500 m2 por planta 37500 m2 totales	15	2:1	12,5	469	<u>25%</u>	625	25	25	3	8	60	12	1	2,4	0,5	2,4
									4	8	72	16	1	2,9	0,6	2,9

Al evaluar la relación mínima aceptable “ h/H ” entre la altura del claristorios (h) y la altura del atrio (H) para proporcionar un nivel de suficiencia lumínica natural en los espacios adyacentes al atrio tal como lo propuso Ghasemi et al. (2015), se evidencia en la tabla 32 que la relación resultante de las geometrías seleccionadas como óptimas, responden a $h/H= 3/6, 3/8, 4/6$ y $4/8$ como valores mínimos aceptables asociados directamente a la altura de entresijos que determina la altura total del atrio de 4 niveles. Ghasemi et al. (2015) establece un valor mínimo de relación $h/H= 3/8$ cuando la altura de entresijo es de 4 m, lo que permite validar los resultados obtenidos en este estudio.

Rango de proporciones geométricas de claristorios, modelo sin fachadas			
Area Edif. (m2)	Altura Atrio (H)	Altura Claristorios (h)	Relación (h/H)
30x30	12	6	3/6
	16	6	3/8
	12	8	4/6
	16	8	4/8
50*50	12	8	4/6
	16	8	4/8

Tabla 32. Índices geométricos de áreas de claristorios del atrio para la fase 1.

Aportes de iluminación natural por métrica UDI

Los mejores valores de UDI obtenidos de las diferentes configuraciones geométricas evaluadas en la primera fase de evaluación, son aquellos con cumplimiento en rango entre 30% y 50% o más del tiempo para pisos inferiores y superiores respectivamente y una afectación en metros cuadrados de planta, mayor al 50%.

Orientación de Claristorios

La orientación de claristorios en esta fase de evaluación representa una variable a tener en cuenta, principalmente para las superficies en planta de 50X50 m². Para ésta área de superficie se recomienda disponer de claristorios en orientación N-S-E-O simultáneamente para alcanzar valores UDI entre 30% (para el primer nivel) y 45% (para el cuarto nivel) con incidencia en m² de área en planta entre el 43% y 78 % respectivamente.

Para la superficie en planta de 30x30 mt², todas las orientaciones posibles de claristorios en relación a los parámetros geométricos óptimos ya mencionados, permiten obtener valores de UDI entre 34% (para el 1 nivel) y 73% (para el 4 nivel), con incidencia lumínica entre el 52 y 97% de área en planta respectivamente.

4.1.2. RESPECTO AL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO DE MODELO PARAMETRIZADO CON WWR DE 40% FACHADAS. FASE II DE EVALUACIÓN

Al evaluar la eficiencia lumínica del atrio en los espacios adyacentes con un 40% de WWR en fachadas por medio de la métrica de evaluación lumínica UDI, se determinaron 3 proporciones geométricas óptimas para la superficie en planta de 30X30 m² y 2 proporciones para la superficie en planta de 50X50 m² como se muestra en la Tabla 33.

Las proporciones en la planta de 30X30 m², responden a una proporción de atrio 1:2 y 1:1 (4% y 11% del área total en planta), con altura de claristorios de 4 m y la opción la altura de entresijos entre 3 y 4 m. Las proporciones en la planta de 50X50 m², responden a una proporción de atrio 1:2 y 1:1 (4% y 11% del área total en planta), con altura de claristorios de 4 m y altura de entresijos de 4 m.

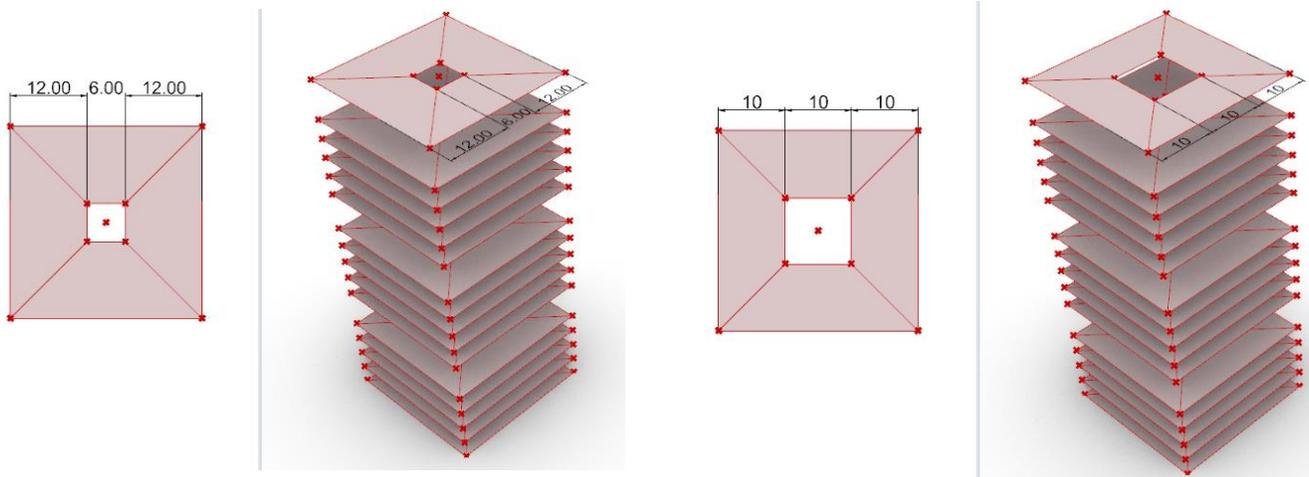


Ilustración 49. Proporciones de atrio 1:2 y 1:1 optimizadas para la superficie en planta de 30x30m². Fase de evaluación II.

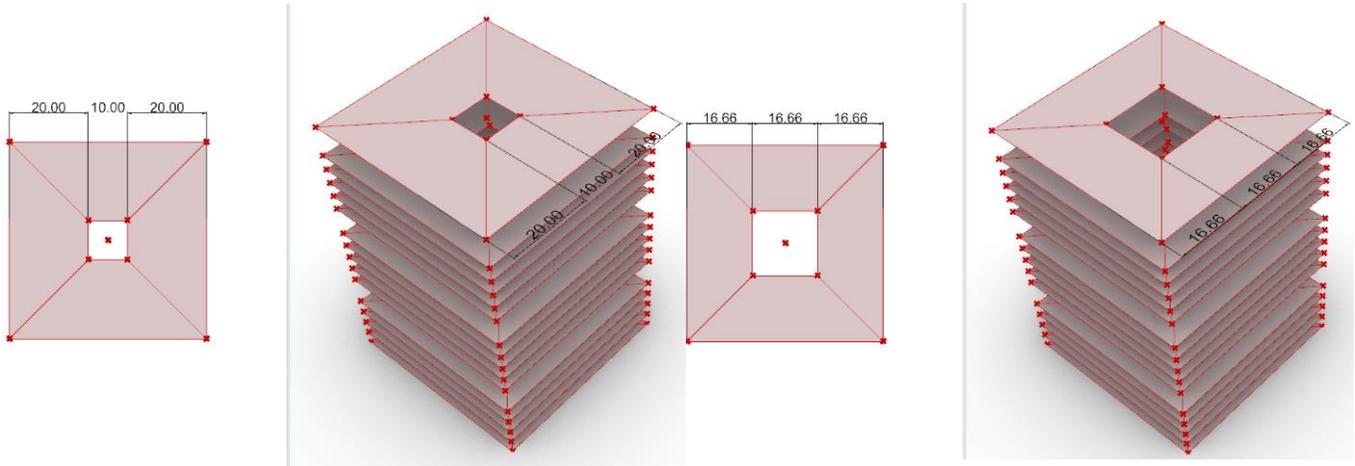


Ilustración 48. Proporciones de atrio 1:2y 1:1 optimizadas para la superficie en planta de 50x50m². Fase de evaluación II.

Las geometrías correspondientes a la planta de 30X30 m² muestran índices WI entre **1.2** y **2.7** para cada conjunto de 4 niveles evaluado en el modelo. Así mismo, para las dos configuraciones óptimas de la planta de 50X50 m², se presentan valores WI entre **1** y **1.6**. La mayoría de estos valores WI obtenidos, corresponden igualmente con los resultados encontrados en investigaciones de Ahadi, Saghafi y Tahbaz (2018), Calcagni & Paroncini (2004), Du y Sharples (2011). La configuración con valor WI de 2.7 en la superficie en planta de 30X30 m² que no se encuentra dentro de estos valores WI encontrados en el estado del arte, si se cumple desde la regla base de iluminación lateral (ver Ilustración 43) en la que La luz natural puede penetrar una distancia equivalente a una vez y de media o dos la altura de la ventana en relación al suelo. Este porcentaje de iluminación natural junto con el aporte del atrio central, presentó valores óptimos de iluminación útil por simulación.

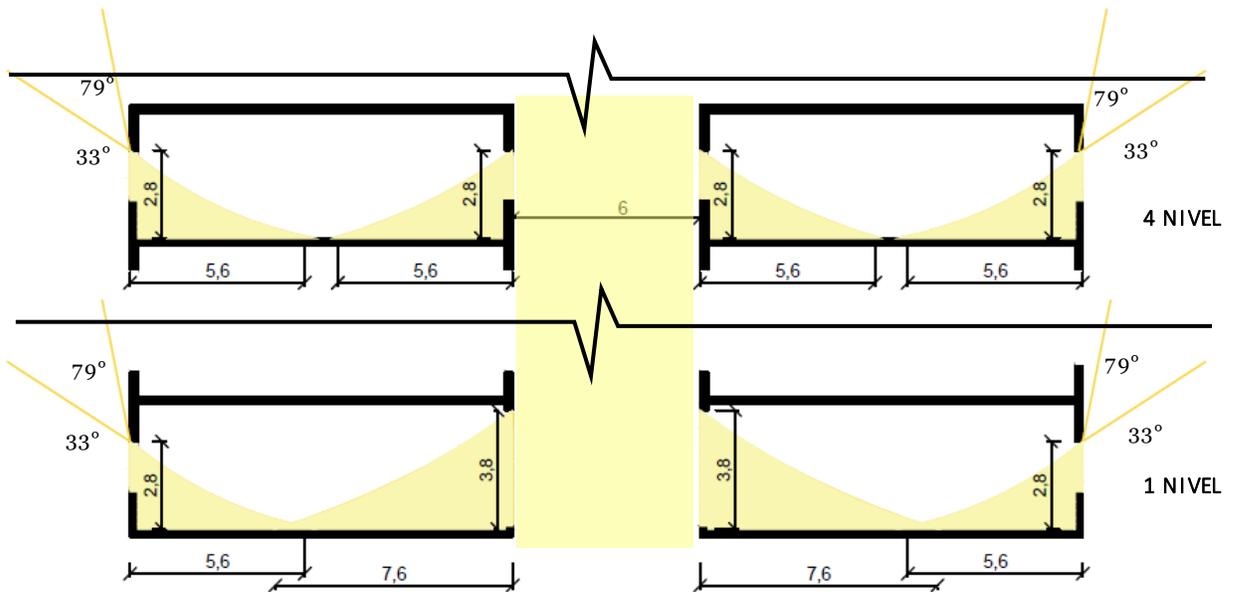


Ilustración 50. Aplicación de regla básica de iluminación lateral en proporción geométrica con valor WI=2.7. Análisis de ángulos solares máximos y mínimos para invierno y verano.

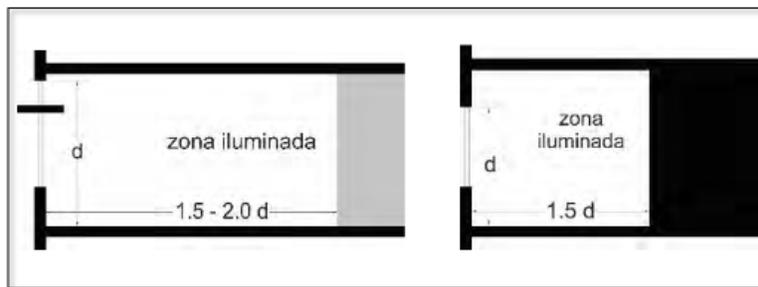


Ilustración 51. Regla básica de iluminación natural. (O'Connor, et. al, 1997).

Al calcular el valor de WI total de los grupos de 4 niveles sumados a los niveles de claristorios que conforman el modelo de 15 pisos evaluado, se puede concluir que la evaluación permitió validar y optimizar lumínicamente, valores de índice de pozo WI entre **4.8** y **10** para el modelo de 30x30 m² y entre **3.6** y **6.0** para el modelo de 50x50 m².

Tabla 33. Índices geométricos de proporciones geométricas óptimas escogidas en evaluación Fase 2.

CUADRO RESUMEN PROPORCIONES GEOMÉTRICAS OPTIMAS PARA MODELO CON 40% DE WWR EN FACHADAS																
Area Edif.	Niveles	Proporción	Ancho espacios adyacentes	Area por espacio adyacente	% de area de Atrio en planta	Area atrio central	Largo atrio (l)	Ancho atrio (a)	Alto total atrios /edificio (h)		Alto atrio central 4 niveles (h)	PAR a/l	SAR h/a	WI 4 niveles $h*(a+l)/2*(a*l)$	WI total $h*(a+l)/2*(a*l)$	
									EA	CT						
30*30 900 m2 por planta. 13500 m2 totales	15	1:2	12	216	<u>4%</u>	36	6	6	3	4	48	12	1	8,0	2,0	8
		1:2	12	216	<u>4%</u>	36	6	6	4	4	60	16	1	10,0	2,7	10
		1:1	10	200	<u>11%</u>	100	10	10	3	4	48	12	1	4,8	1,2	4,8
50*50 2500 m2 por planta 37500 m2 totales	15	1:2	20	600	<u>4%</u>	100	10	10	4	4	60	16	1	6,0	1,6	6,0
		1:1	16,66	557	<u>11%</u>	277,5	16,66	16,66	4	4	60	16	1	3,6	1,0	3,6

Al evaluar la relación mínima aceptable “ h/H ” entre la altura del claristorios (h) y la altura del atrio (H) para proporcionar un nivel de suficiencia lumínica natural en los espacios adyacentes al atrio según metodología de Ghasemi et al. (2015), se evidencia en la tabla 34 que la relación resultante de las geometrías seleccionadas como óptimas, responden a $h/H= 2/6$ y $2/8$ como valores mínimos aceptables asociados directamente a la altura de entresijos que determina la altura total del atrio de 4 niveles (Ver tabla 34). Estos valores de relación a comparación de los de la fase I de evaluación y el valor mínimo determinado por Ghasemi $h/H= 3/8$, evidencian la optimización espacial que presenta el atrio cuando los espacios adyacentes a él, reciben aportes lumínicos desde dos fuentes de iluminación simultáneamente.

Rango de proporciones geométricas de claristorios, modelo con %WWR en fachadas			
Area Edif. (m2)	Altura Atrio (H)	Altura Claristorios (h)	Relación (h/H)
30x30	16	4	2/8
	12	3	2/6
50*50	16	4	2/8
	16	4	2/8

Tabla 34. Índices geométricos de áreas de claristorios del atrio para la fase 2.

Aportes de iluminación natural por métrica UDI

El comportamiento lumínico por rangos de UDI obtenidos de estas configuraciones geométricas optimizadas, evidencian para la superficie en planta de 30X30 M², porcentajes de:

- UDIC o complementario (100-2000 lux) entre 53% y 66%;
- UDI “Overlit” o excedido (>2000 lux) teniendo en cuenta que la evaluación se ejecutó sin ningún dispositivo de sombreado por fachadas, entre 30% y 42%
- UDI “Underlit” o insuficiente (<100lux), menor a 3%.

Así mismo, para la superficie en planta de 50X50 M², porcentajes de:

- UDIC o complementario (100-2000 lux) entre 65% y 70%;
- UDI “Overlit” o excedido (>2000 lux) teniendo en cuenta que la evaluación se ejecutó sin ningún dispositivo de sombreado por fachadas, entre 25% y 27%
- UDI “Underlit” o insuficiente (<100lux), menor a 9%.

Los resultados de UDI Overlit, dan cuenta de la necesidad de implementar un diseño de fachadas exteriores con elementos de sombreado para disminuir la iluminancia excedida y aumentar el porcentaje de UDlc considerablemente.

Orientación de Claristorios

La orientación de claristorios en esta fase II de evaluación, es una variable que funciona similar para todos los casos de orientaciones evaluados, toda vez que, los resultados obtenidos fueron bastante homogéneos. Ésta variable de orientación, en conclusión, se debe tener en cuenta a partir de las condiciones del entorno urbano del proyecto y su disponibilidad de luz solar directa.

4.2. VARIABLES DE DISEÑO MATERIALES

Coeficientes de reflectancia para materiales y acabados de las superficies opacas

- La aplicación correcta de los coeficientes en las superficies geométricas del modelo según su función arquitectónica permitirá una mejor reflexión y distribución de la luz dentro del atrio y los espacios adyacentes así como evitará reflexiones que podrían causar fenómenos de deslumbramiento para el ocupante.
- Para las superficies acristaladas de los claristorios del atrio y fachadas del edificio en un clima mediterráneo como el de Santiago de Chile, se tomó la decisión de implementar un coeficiente de transmitancia luminosa alto junto con un coeficiente de transmitancia térmico bajo; esto a partir del estudio del comportamiento climático del lugar y la influencia que tienen las características materiales sobre el diseño ambiental de los espacios. Con estas características materiales, se aseguran valores de transmitancia lumínica óptimos y un control térmico adecuado en los espacios interiores. Así mismo, para las superficies acristaladas en las paredes del atrio, se puede implementar un material acristalado simple con alto coeficiente de transmitancia luminosa. Al no recibir incidencias de luz solar permanentemente sobre estas superficies no se encuentra necesario la implementación de un dvh para el control térmico en el núcleo del edificio, sin embargo es necesario un estudio a profundidad para el comportamiento de éste lineamiento de diseño al interior del atrio y los espacios adyacentes si así se requiere.
- Los valores de coeficientes de reflectancia implementados en los materiales de las superficies geométricas del modelo, responden a lo referenciado en el estándar nacional TDR y normativas internacionales como la ISO 8995-1:2016 (CIE S 008/E: 2001), según la siguiente tabla:

Tabla 35. Coefic. de reflectancia y transmisión luminosa de superficies geométricas según referencias normativas TDR y CIE S008/E:2001.

COEFICIENTE DE REFLECTANCIA DE SUPERFICIES DEL MODELO.		COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN LUMINOSA	
Cielo raso	0.9	Superf. acristalada Claristorios/ Ventanas en fachadas (Doble panel vidriado)	0.8
Muros del atrio central	0.8		
Muros interiores divisorios	0.6		
Piso	0.4	Superf. Acristalada del interior del atrio. (Panel vidriado Sencillo)	0.88
Plano de Trabajo (Mobiliario)	0.5		

Relación de porcentaje ventana-muro para superficies verticales del atrio

La variabilidad del porcentaje de acristalamiento por niveles en el atrio, es una variable de diseño importante asociada a los coeficientes de reflectancia y transmisión luminosa de los materiales de la superficies, así como a las áreas que representa cada materialidad. Investigadores como Calcagni y Paroncini (2004); Du y Sharples (2011); Samant (2011) y Aschehoug, (1992) la han utilizado en sus estudios de atrios centrales.

Cuando el área de las superficies opacas de los niveles superiores es mayor y disminuye en porcentajes hasta los niveles inferiores del atrio, se permiten importantes reflexiones de la luz al interior para:

- Alcanzar mayores niveles de iluminación en el interior del atrio y espacios adyacentes,
- Permitir el control excesivo de iluminación en los últimos niveles y mejor aporte lumínico en los niveles inferiores,
- Construir un equilibrio entre áreas de superficies opacas y áreas vidriadas.

Un porcentaje de ventanas de **90%, 80% ,50% y 40%**, desde los niveles más altos (de cada bloque de 4 pisos), fue la relación que permitió el mejor comportamiento lumínico a partir de la métrica UDI para los niveles del atrio y espacios adyacentes (Ver ilustración 39).

4.3. CUADROS RESUMEN DE LINEAMIENTOS DE DISEÑO

Tabla 36. Resumen de lineamientos de diseño para Fase I de investigación: Evaluación lumínica del modelo sólo con aportes de luz desde el atrio.

I FASE DE EVALUACION.		 PLANTA DE 30*30 M ²	 PLANTA DE 50*50 M ²
 LINEAMIENTOS DE DISEÑO	Proporción de atrio	2:1 (25% del área total en planta)	2:1 (25% del área total en planta)
	Índice WI (4 Niveles)	0.8 – 1.1	0.5 – 0.6
	Índice WI (Total)	3.6 – 4.8	2.4 – 2.9
	Altura de claristorios	6 – 8 m	8 m
	Relación h/H	3/6 – 3/8 – 4/6 – 4/8	4/6 – 4/8
	Claristorios		
	Altura de entrepisos	3 – 4 m.	3 – 4 m.
	WWR Superficies del atrio.	90%, 80% ,50% y 40% desde los niveles más altos (de cada bloque de 4 pisos)	90%, 80% ,50% y 40% desde los niveles más altos (de cada bloque de 4 pisos)
Coef. reflect. materiales	TDre ISO 8995–1:2016 (CIE S 008/E: 2001),	TDre ISO 8995–1:2016 (CIE S 008/E: 2001),	
Orientación	N–S–E–O / N–S / E–O	N–S–E–O	
APORTE LUMÍNICO	Promedio UD _{Ic} (100–2000 lux)	34% (primer nivel) 73% (cuarto nivel)	30% (primer nivel) 45% (cuarto nivel)
	Incidencia en m ² de área en planta.	52% (primer nivel) 97% (cuarto nivel)	43% (primer nivel) 78% (cuarto nivel)

Tabla 37. Resumen de lineamientos de diseño en Fase II de investigación: Evaluación lumínica del modelo con aportes de luz desde el atrio y WWR del 40% en fachadas.

II FASE DE EVALUACION.		 PLANTA DE 30*30 M ²	 PLANTA DE 50*50 M ²	
 LINEAMIENTOS DE DISEÑO	Proporción de atrio	1:2 (4% del área total en planta)	1:2 (4% del área total en planta)	
	Índice WI (4 Niveles)	1:1 (11% del área total en planta)	1:1 (11% del área total en planta)	
	Índice WI (Total)	1.2 – 2.7	1.0 – 1.6	
	Altura de claristorios	4.8 – 10.0	3.6 – 6.0	
	Relación h/H	4 m	4 m	
	Claristorios	2/6 – 2/8	2/8	
	Altura de entresijos	3 – 4 m.	4 m.	
	WWR Superficies del atrio.	90%, 80% ,50% y 40% desde los niveles más altos (de cada bloque de 4 pisos)	90%, 80% ,50% y 40% desde los niveles más altos (de cada bloque de 4 pisos)	
	Coef. reflect. materiales	TDre ISO 8995-1:2016 (CIE S 008/E: 2001),	TDre ISO 8995-1:2016 (CIE S 008/E: 2001),	
	Orientación	Dependiente del contexto	Dependiente del contexto	
	APORTE LUMÍNICO	Promedio UD _{Ic} (100–2000 lux)	53%–66%	65%–70%
		Promedio UD _{Io} (>2000 lux)	30%–42%	25%–27%
Promedio UD _{Iu} (< 100 lux)		< 3%	< 9%	

5. CONCLUSIONES

Respecto a la hipótesis y Objetivo General de la investigación

La implementación de un atrio de luz central vertical con claristorios cada 4 pisos en edificios de 15 niveles o más y superficies en planta entre 900 m² y 2500 m² planta y en el caso más desfavorable para control solar en fachadas (sin dispositivos), resultó ser una estrategia de iluminación natural efectiva en relación al indicador $UDI_{(100-2000lux)}$ para resolver la escasa iluminación natural que comúnmente presentan los edificios de gran altura en su núcleo central con grandes superficies de área en planta. Esto permite tener un comportamiento lumínico con aportes significativos de iluminación natural en su interior entre un 50% y 70% del año, contribuyendo al confort visual y estético de los ocupantes además de la reducción del consumo energético por iluminación artificial en estas edificaciones.

Respecto de la investigación del estado del arte

La mayoría de investigaciones realizadas entorno a las condiciones geométricas óptimas para el desempeño lumínico en atrios centrales presentaron categorías de lineamientos de diseño afines y resultados homólogos entre ellas. Lo anterior ayudó para la construcción de las principales variables espaciales y materiales implementadas en el modelo paramétrico estudiado, así como para la validación de resultados obtenidos en las dos fases de evaluación lumínica.

Es necesario seguir en el estudio lumínico de otras categorías de espacios atrio, para la optimización de estándares de diseño que contribuyan al mejoramiento de entornos de luz natural en edificaciones a partir del confort visual, estético, biológico y la eficiencia energética del edificio.

Respecto de los resultados de las dos fases de evaluación lumínica

En la fase 1. Evaluación lumínica del modelo sólo con aportes de luz desde el atrio :

Las diferentes configuraciones geométricas evaluadas, en todas las orientaciones de atrio propuestas, con los mejores valores de UDI, son aquellas con cumplimiento entre 30% y 70% del tiempo para pisos inferiores y superiores respectivamente y una afectación en metros cuadrados de planta, mayor al 50%. Estas geometrías respondieron a una proporción de atrio 2:1, que corresponde al 25% del área de planta total.

Se evidencia una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de tiempo en cumplimiento UDI de los niveles inferiores y el porcentaje de incidencia lumínica por área en planta, cuando la altura de entresijos de espacios adyacentes aumenta de 3 a 4 metros. Es decir, a una altura de 4 metros en espacios adyacentes, el porcentaje de tiempo de cumplimiento disminuye pero la distribución de la luz abarca mayor área en planta.

Los parámetros más relevantes a nivel geométrico de los atrios centrales verticales, para las áreas de planta evaluadas, son la proporción del atrio, la altura de claristorios y su orientación, los cuales afectan directamente las componentes de cielo y el ángulo de altitud respecto a la altura de cada nivel del atrio.

En general, la distribución de la luz por orientación de claristorios, a partir de la incidencia lumínica por área en planta, tiende a ser mayor en los primeros niveles de espacios adyacentes con atrios nutridos por claristorios en orientación norte-sur, mientras que los espacios superiores presentan mejor distribución de luz en atrios nutridos por claristorios en orientación este-oeste.

En la fase 2. Evaluación lumínica del modelo con aportes de luz desde el atrio y WWR del 40% en fachadas.

Las diferentes configuraciones geométricas evaluadas, en todas las orientaciones de atrio propuestas, para las dos superficies en planta y en el caso más desfavorable para control solar (sin dispositivos) que registraron los mejores valores de UDI, son aquellas con cumplimiento entre 50 y 70% del tiempo en los diferentes niveles evaluados.

Al incluir el aporte lumínico por WWR en fachadas y desde el atrio en la evaluación, se muestra un aumento en la homogenización de los aportes de UDI para todos los niveles del modelo paramétrico propuesto.

Las proporciones geométricas escogidas para ésta fase de evaluación, evidencian la optimización de los criterios geométricos y la economía de espacio en relación a altos aportes de iluminación natural. Esto comprobó que para configuraciones de planta de 30X30 m², se precisa de los valores mínimos en las variables geométricas de altura en entresijos en espacios adyacentes y claristorios, así como la menor proporción de atrio 1:2, correspondiente al 4% de ocupación de superficie en planta, para manifestar valores de UDI óptimos. Así mismo, para la planta de 50X50m², se precisa igualmente de los mínimos valores en las variables de diseño para altura de claristorios y porcentaje de atrio 1:2, para tener altos aportes lumínicos por métrica UDI.

El total de las variables geométricas propuestas para la evaluación, podrían aportar en la óptima iluminación de superficies en planta mayores a 2500 m².

Puesto que la distribución de la luz y los valores de UDI sobre el plano de trabajo de los espacios adyacentes se mostraron equitativos independientemente de la orientación de claristorios para la entrada de luz, se considera que ésta variable de diseño será dependiente en mayor medida a partir de

las posibilidades o limitaciones en la incidencia directa de luz natural que permita el contexto urbano en el que se emplace el proyecto.

Un porcentaje importante de UDI Overlit o excedido evidenciado en la evaluación, indica la necesidad de realizar un diseño de protección solar en fachadas para el control excedido de iluminancias al interior de los espacios y lograr un rango de UDI útil superior a lo obtenido en las evaluaciones.

Respecto de los lineamientos de diseño

El índice geométrico WI fue una variable de diseño geométrico indispensable para la evaluación lumínica de atrios centrales de esta investigación, permitiendo enlazar y validar los resultados obtenidos con los investigados por otros autores.

Las configuraciones geométricas óptimas resultantes de las dos fases de evaluación lumínica por indicador UDI, presentaron en el 90% de los casos, índices WI entre 0.5 y 1.5 para cada conjunto de 4 niveles evaluado en el modelo. Con ello, se validan y ratifican los valores obtenidos en los resultados en esta investigación a partir de los resultados de otras investigaciones realizadas y analizadas en el capítulo 2 del estado del arte.

La implementación de niveles de claristorios cada 4 niveles para nutrir de iluminación natural el atrio central propuesto en un modelo paramétrico de 15 pisos de altura, permitió validar la eficiencia lumínica de índices WI entre 2.4 y 10 del atrio central, en las dos fases de evaluación realizadas.

La orientación de claristorios como variable de diseño para un atrio central vertical, es indispensable sólo cuando se evalúan aportes lumínicos del atrio sin otras fuentes de iluminación natural. Por el contrario, al evaluar la eficiencia lumínica del atrio y un porcentaje de WWR en fachadas, la orientación de los claristorios pasa a ser una variable de diseño dependiente del contexto urbano y sus incidencias de luz y sombra sobre el emplazamiento del edificio.

La elección de coeficientes de reflectancia y luminancia de la materialidad de las superficies envolventes de los espacios atrio y adyacentes según los lineamientos planteados por el estándar nacional y normativas internacionales, fueron efectivas para su desempeño lumínico por reflexión e incidencia lumínica de estos espacios.

Una relación de porcentajes de área vidriada de 90%, 80%, 50% y 40% desde los niveles inferiores a los superiores en bloques de 4 pisos, permitió mejor incidencia lumínica por UDI en los niveles inferiores por reflexión de la luz de las superficies opacas y un control de deslumbramiento o iluminancias excedidas en los niveles superiores.

El atrio central vertical presenta mejor comportamiento lumínico en la temporada de invierno que en verano, dado por la presencia de menores ángulos solares presentes en ésta fecha y el aumento de reflexión de la luz en las superficies del atrio.

Respecto de la metodología y métrica Evaluación de lumínica

Los resultados temporo-espaciales numéricos y gráficos obtenidos a partir de la métrica lumínica UDI para el evaluación de los espacios adyacentes al atrio, permitieron conocer el comportamiento lumínico en porcentaje de tiempo anual y su influencia espacial a partir de rangos establecidos de iluminancia complementaría, insuficiente y excedida, lo cual es una herramienta que facilita la toma de decisiones adecuadas de diseño lumínico para cada rango de comportamiento presentado.

La multiplicidad climática, hace necesaria la implementación de evaluaciones dinámicas CBDM para iluminación natural con el fin de poder establecer criterios de diseño que abarquen la totalidad del comportamiento lumínico interior de los espacios evaluados. En la mayoría de investigaciones analizadas en el estado del arte, se implementó la métrica DF para el análisis lumínico de los atrios, por lo cual se profundiza muy poco en el porcentaje de iluminancia excedida que reciben éstos con condiciones dinámicas reales de cielo en el año.

La construcción de un modelo de 15 pisos de altura, permitió reducir 216 simulaciones lumínicas en 72, toda vez que se pudo evaluar simultáneamente la influencia lumínica de claristorios desde todas las orientaciones posibles en un solo modelo geométrico parametrizado.

Para hacer posible la evaluación simultánea de 6 pisos representativos en el modelo de 15 pisos con superficies de área en planta de 900m² y 2500m², fue necesario establecer una grilla de análisis lumínico cada 2 m. al intentar realizar la evaluación con disposiciones de grilla a 0.5m y 1m, los tiempos de simulación se triplicaban y en varios casos el programa dejaba de correrla.

El uso del software grasshopper para la construcción del modelo geométrico parametrizado, optimizó tiempos importantes en la evaluación de las 216 variaciones geométricas evaluadas. Así mismo, dentro del software se pudo realizar la evaluación lumínica con el complemento de análisis para iluminación natural DIVA.

Respecto a la relevancia energética de la implementación de atrios centrales propuestos en relación a costos y dilemas sísmicos.

Si bien la presente investigación no llegó a establecer con datos exactos la reducción económica por disminución de demanda energética en la implementación de un atrio central con niveles dedicados a claristorios o entradas de luz para nutrir lumínicamente un edificio de gran altura, los resultados de evaluación lumínica evidenciaron el aumento considerable del potencial lumínico natural al interior de éste, el cual puede asociarse a una reducción de demanda energética operacional por iluminación artificial.

Así mismo, dicha inclusión del espacio atrio en el núcleo de la edificación manifiesta unas implicaciones sísmicas que deberían ser evaluadas colaborativamente en la etapa de diseño para el funcionamiento correcto e integral del mismo.

6. INVESTIGACIONES FUTURAS

1. Evaluar las demandas energéticas de las proporciones de atrio optimizadas para determinar el ahorro energético alcanzado al implementar un espacio atrio como estrategia de diseño de iluminación natural.
2. Evaluar el estímulo circadiano de las proporciones de atrio optimizadas, para establecer relaciones entre resultados de confort visual y bienestar humano para el potencial integrado de iluminación natural.
3. Evaluación térmica de las proporciones de atrio optimizadas, para establecer relaciones entre resultados de confort visual y térmico.
4. Evaluación lumínica y térmica de las proporciones optimizadas en otras latitudes geográficas para determinar el comportamiento de los atrios centrales en otras climatologías.

7. BIBLIOGRAFÍA

- (MOP), M. de O. P. (2016). *Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obra de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y Según Tipología de Edificios*. TDR.
- Acosta, I., Navarro, J., & Sendra, J. J. (2014). Lighting design in courtyards: Predictive method of daylight factors under overcast sky conditions. *Renewable Energy*, *71*, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.020>
- Acosta, I., Varela, C., Molina, J. F., Navarro, J., & Sendra, J. J. (2018). Energy efficiency and lighting design in courtyards and atriums: A predictive method for daylight factors. *Applied Energy*, *211*(September 2017), 1216–1228. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.104>
- Ahadi, A. alah, Saghafi, M. R., & Tahbaz, M. (2018). The optimization of light-wells with integrating daylight and stack natural ventilation systems in deep-plan residential buildings: A case study of Tehran. *Journal of Building Engineering*, *18*(March), 220–244. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.03.016>
- Aizlewood, M. E. (1995). Daylighting of atria: a critical review. *Proceedings of the 1995 ASHRAE Annual Meeting*, *101*(Pt 2), 841–857. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0029521592&partnerID=40&md5=1f98c46cbaaf04e0491e03669fcdc6ef>
- Balil, A. (n.d.). El origen de la casa de atrio. *Zephyrus*, *10*.
- Berardi, U., & Wang, T. (2014). Daylighting in an atrium-type high performance house. *Building and Environment*, *76*, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.008>
- Boyko, C., & Cooper, R. (2011). *Clarifying and re-conceptualising density*. *Progress in Planning*. Elsevier, 2 - 53. *Obtenido de Progress in Planning*.
- Calcagni, B., & Paroncini, M. (2004). Daylight factor prediction in atria building designs. *Solar Energy*, *76*(6), 669–682. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.01.009>
- Casal López-Valeiras, J. M. (1984). Iluminación de museos. In *Boletín de la ANABAD* (Vol. 34, Issue 2, pp. 211–238). <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=964672>
- Chow, S. K. H., Li, D. H. W., Lee, E. W. M., & Lam, J. C. (2013). Analysis and prediction of daylighting and energy performance in atrium spaces using daylight-linked lighting controls. *Applied Energy*, *112*, 1016–1024. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.033>
- Chow, W. K., & Wong, L. T. (2011). *Thermal Environment Design of Atria in the Hong Kong Special Administrative Region : A Survey Study Thermal Environment Design of Atria in the Hong Kong Special Administrative Region : A Survey Study*. 8628. <https://doi.org/10.1080/00038628.1999.9697426>
- Danielski, I., Nair, G., Joelsson, A., & Fröling, M. (2016). Heated atrium in multi-storey apartment buildings, a design with potential to enhance energy efficiency and to facilitate social interactions.

Building and Environment, 106, 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.038>

Du, J., & Sharples, S. (2011). Assessing and predicting average daylight factors of adjoining spaces in atrium buildings under overcast sky. *Building and Environment*, 46(11), 2142–2152. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.020>

G, J. A. Y., Colombo, E. M., Rodríguez, R. G., & Pattini, A. E. (n.d.). *Evaluación de confort visual en escenas con iluminación natural directa Visual comfort evaluation in presence of direct daylight in office*. 54(261), 189–199.

Getino, R., Mano, D. La, & Cavero, L. F. (2015). *Análisis de la aportación energética de un “Atrio” conectado de forma activa con el sistema de climatización de un edificio*.

Ghasemi, M., Noroozi, M., Kazemzadeh, M., & Roshan, M. (2015). The influence of well geometry on the daylight performance of atrium adjoining spaces: A parametric study. *Journal of Building Engineering*, 3, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.job.2015.06.002>

Hung, W. Y., & Chow, W. K. (2001). A review on architectural aspects of atrium buildings. *Architectural Science Review*, 44(3), 285–295. <https://doi.org/10.1080/00038628.2001.9697484>

Hung, W. Y., & Kong, H. (2003). *Architectural aspects of atrium*. 5(4), 131–137.

Littlefair, P. (2002). *DAYLIGHT PREDICTION IN ATRIUM BUILDINGS*. 73(2), 105–109.

Mardaljevic, J., Heschong, L., & Lee, E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research and Technology*, 41(3), 261–283. <https://doi.org/10.1177/1477153509339703>

Mira, J. R. i. (1993). *La casa pompeyana: Referencias al conjunto de casas-patio realizadas por L. Mies Van Der Rohe en la década 1930-40.pdf*. Departament de Projectes de l'E.T.S.A.B. U.P.C.

New Buildings Institute ; University of Washington ; University of Idaho. (2019). *Inicio | Guía de patrones de luz natural*. <https://patternguide.advancedbuildings.net/home>

Perez, R., Seals, R., & Michalsky, J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235–245. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-1)

Perez, Richard, Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). MODELING DAYLIGHT AVAILABILITY AND IRRADIANCE COMPONENTS FROM DIRECT AND GLOBAL IRRADIANCE. *Solar Energy*, 44(5), 271–289.

Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 3(1), 7–31. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001>

Reinhart1, J. A. J. and C. F. (2011). DIVA 2.0: INTEGRATING DAYLIGHT AND THERMAL SIMULATIONS USING RHINOCEROS 3D, DAYSIM AND ENERGYPLUS. *Organizational Dynamics*, 8. [https://doi.org/10.1016/0090-2616\(89\)90032-6](https://doi.org/10.1016/0090-2616(89)90032-6)

Roldán Rojas, J. A. (2016). *Caracterización geométrica y lumínica de los atrios incorporados en los edificios de Santiago de Chile*. 89–197.

- Samant, S. R. . (2011). *A parametric investigation of the influence of atrium facades on the daylight performance of atrium buildings*. PhD thesis, University of Nottingham.
- Saxon, R. (1986). *Atrium buildings : development and design*. (Segunda Ed).
- Sharples, S., & Lash, D. (2006). Daylight in Atrium Buildings: A Critical Review. *Architectural Science Review*, 50(5 September 2007), 37–41. <https://doi.org/10.3763/asre.200>
- Swet, T. (2015). *Edificios de Oficinas, Un prototipo mundial en problemas*. (p. 6). www.swettarq.com
- The Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). (2002). Lighting of Indoor Work Places. *Iso 8995 Cie S 008/E, 2002*, 1–19. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3403/02609865>
- United States Department of Energy. (n.d.). Retrieved September 9, 2019, from <https://www.energy.gov/>
- Van Bommel, W. J. M., & van den Beld, G. J. (2004). La iluminación en el trabajo: Efectos visuales y biológicos. *Philips Lighting*, 18.
- VÁSQUEZ, C. F. E. R. D. (2015). Edificios de oficinas en Santiago: ¿Qué estamos haciendo desde el punto de vista del consumo energético? *Scielo*.
- Vicencio, K. L. M. (2018). *Impacto de la densificación - vertical e intensiva - sobre la dotación y uso del espacio público bajo el enfoque de la sustentabilidad urbana Comuna de Estación Central, Santiago de Chile*. UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO.
- Walkenhorst, O., Luther, J., Reinhart, C., & Timmer, J. (2002). Dynamic annual daylight simulations based on one-hour and one-minute means of irradiance data. *Solar Energy*, 72(5), 385–395. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00019-1)
- Yeang, K. (2001). *El rascacielos Ecológico*. (2001 Editorial Gustavo Gili, SA (Ed.)).
- Yoshino, H.; Ito, K.; Aozasa, K. . (1995). (1995). Trends in thermal environmental design of atrium buildings in Japan. *ASHRAE Transactions*.

8. ANEXOS