



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO**

**Estrategias de diseño de iluminación natural aplicados a espacios de oficina
con luz unilateral, en contextos climáticos de Chile.**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

AUTOR: Cecilia Palarino Vico

Arquitecta UDELAR

PROFESOR GUÍA: María Beatriz Piderit M.

PhD Art de Bâtir et Urbanisme, UC Louvain

Master en Sciences Appliquée, UC Louvain

Arquitecto UBB

CONCEPCION, 2019

Resumen

Las fachadas acristaladas comúnmente constituyen las envolventes de los edificios de oficinas. Sin embargo, estas no se comportan efectivamente porque no se adaptan a las condiciones climáticas de los sitios donde se localizan, ocasionando problemas de deslumbramiento, sobrecalentamiento y en los niveles generales de iluminación. Esta situación afecta el confort de los usuarios y demandan grandes cantidades de energía para lograr el confort interior.

El objetivo del trabajo es desarrollar estrategias de iluminación natural para la fenestración vertical de espacios de oficina con iluminación unilateral, para tres ciudades de Chile con diferentes condiciones climáticas. Con el fin de demostrar como diversos climas requieren diferentes estrategias adaptadas, se analiza un mismo prototipo de oficina en los tres climas. El confort visual de las soluciones propuestas es evaluado mediante simulación dinámica con el software Diva-for-Rhino, con las métricas sDA-ASE y UDI efectivas para predecir la relación de iluminancia y probabilidad de deslumbramiento, resultados contrastados con el cálculo de DGP.

Como resultado se verifica que los modelos adaptados al contexto climático tienen un mejor rendimiento de luz diurna en comparación a los edificios acristalados, y que el UDI tiene un gran potencial para ser utilizado como herramienta de diseño de iluminación natural.

Palabras claves: Iluminación natural, estrategias de diseño, espacios de oficina, luz unilateral, métricas sDA&ASE y UDI.

Abstract

Glass facades are the most used technology in the envelope of an office building. However, overheating, glare probability, and low levels of lighting for the use of ineffective solar protection are common problems of glazed facades, as they do not adapt to climatic conditions. This situation affects user comfort, daylighting performance, and energy efficiency because they require large amounts of energy to achieve indoor comfort.

The objective of this research is to develop passive design strategies applied to vertical fenestration complex for side-lit offices in three locations of Chile with different sky conditions. An office prototype is evaluated in the selected locations to improving the daylight performance with effective strategies according to each climate. The objective is to achieve a healthy balance between the illuminance levels and glare control for indoor environmental quality. The visual comfort is evaluated through the dynamic simulation, with the sDA-ASE and UDI metrics to predict the ratio of illuminance and glare probability; results are contrasted with DGP evaluation.

As a result, it is verified that the models adapted to the climate have high-performance and effective daylight than glass facades buildings and the great potential of using UDI as a daylighting design tool.

Keywords: daylighting, daylight passive strategies, side-lit office spaces, sDA-ASE, and UDI measurements.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 Antecedentes	5
1.2 Confort visual en edificios de oficina	8
1.2.1 Los efectos de la luz en los espacios de trabajo.....	8
1.2.2 La fenestración vertical como fuente de iluminación natural	8
1.2.3 Requerimientos de iluminación en edificios de oficina	9
1.3 Objetivos generales y específicos.....	10
CAPÍTULO 2. ESTRATEGIAS DE DISEÑO DE ILUMINACIÓN NATURAL	12
2.1 Revisión del estado del arte	12
2.1.1 Guías de diseño de iluminación natural para edificios de oficina.....	13
2.1.2 Herramientas de diseño de iluminación natural.....	15
2.1.3 Síntesis de conceptos para el diseño de iluminación natural	16
2.2 Principales criterios de iluminación natural para edificios de oficina.....	17
2.2.1 Aspectos formales del edificio	17
2.2.2 Fenestraciones verticales	18
2.2.3 Sistemas y dispositivos de sombreado.....	22
2.2.4 Características del espacio interior	23
CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LUZ DIURNA	27
3.1 Indicadores de evaluación de luz diurna	27
3.1.1 Revisión de las métricas para el cálculo de iluminancia y deslumbramiento	27
3.1.2 Revisión de los criterios admisibles de la normativa local	30
3.2 Comparación de los parámetros sDA-ASE con el UDI	33
3.3 Metodología de evaluación de estrategias de iluminación natural.....	36
CAPÍTULO 4. ESTRATEGIAS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN CONTEXTOS DE CHILE.	38
4.1 Construcción de un prototipo de oficina.....	38
4.2 Estudio de casos en el contexto de Chile	40
4.2.1 Análisis de las características climáticas	41
4.2.2 Resumen de variables climáticas por ciudad	45

4.2.3	Validación de estrategias de iluminación natural	48
4.3	Estrategias de diseño de iluminación natural aplicadas a los contextos definidos	50
4.3.1	Calama.....	50
4.3.2	Santiago.....	54
4.3.3	Puerto Montt.....	58
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS		62
5.1	Resultados modelos optimizados por ciudad	62
5.2	Resultados comparados fachada acristalada con modelo optimizado	64
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		68
6.1	Trabajos futuros	71
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		72
ANEXO A – DATOS CLIMÁTICOS POR LOCALIDAD.....		76

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Los edificios de oficinas tradicionalmente han constituido sus envoltentes con elementos acristalados imitando el modelo de fachadas ligeras surgido en el SXIX. Esta tecnología constructiva es ampliamente utilizada especialmente en edificios con programas arquitectónicos flexibles, por su posibilidad de maximizar la iluminación natural en espacios iluminados unilateralmente los cuales tienen un potencial limitado en cuanto a la capacidad de recibir luz natural en relación con la profundidad de la planta. Su uso se ha extendido convirtiéndose en la identidad corporativa de las oficinas cualquiera sea la localización (Ilustración 1.1), aunque no sean capaces de adaptarse de forma pasiva a las características de los distintos climas.

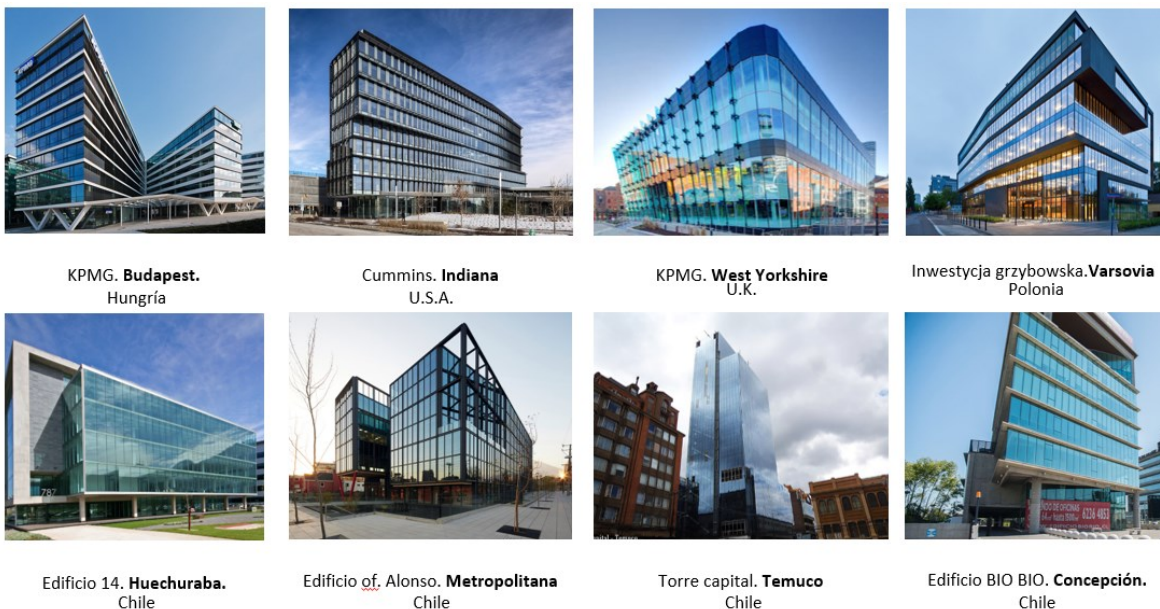


Ilustración 1.1- Edificios corporativos con fachadas acristaladas. Fuente: Plataforma de arquitectura.

En el contexto de Chile, Bodart, M.; Bustamante, W. & Encinas, F. (2010), analizan la tipología edilicia de oficinas en una muestra de cincuenta edificios en Santiago construidos entre el año 2005 y 2010 en diversas comunas de la región Metropolitana. En la muestra analizada determinan dos tipologías de edificios de oficinas predominantes: fachadas completamente transparentes con doble vidriado de tipo selectivo (68% de la muestra), y fachadas combinadas de muros de hormigón armado con ventanas de vidriado simple. Detectan problemas de confort térmico y lumínico por

sobrecalentamiento y deslumbramiento en ambos tipos edilicios, siendo más críticos los presentados por la fachada completamente acristalada. El estudio concluye que un mejor comportamiento térmico y lumínico es posible mediante una *“relación adecuada de porcentaje de superficie vidriada, combinado con estrategias de diseño como la protección solar, el uso de ventilación nocturna y aislación térmica en las superficies opacas”*. (Bodart et al., 2010).



Ilustración 1.2-Edificios de oficina acristalados en Chile, Metropolitana y Regiones.

Las envolventes de oficina han mantenido una tendencia de fachadas completamente acristaladas, evolucionando hacia soluciones técnicas de acristalamientos mejorados en cuanto a su performance térmica y lumínica, así como a dispositivos estandarizados de sombreado; sin embargo, los acristalamientos son hasta el día de hoy el eslabón más débil de la envolvente de los edificios. Presenta mayor transferencia de energía que un cerramiento opaco ocasionando *pérdida de energía térmica* por conducción y ganancias solares que pueden generar *sobrecalentamiento*. Estos problemas, fomentan la dependencia con los sistemas activos para lograr el balance térmico al interior del espacio e impactan notoriamente en la calidad ambiental interior (Zambrano Prado, 2013). La sobreexposición de los espacios interiores a la luz solar directa no controlada produce molestias de *deslumbramiento* por el brillo relativo del sol incidente; eventualmente *bajos niveles de luz diurna* al emplear dispositivos para bloquear el acceso solar, y en consecuencia el bloque del acceso visual de los ocupantes al exterior.

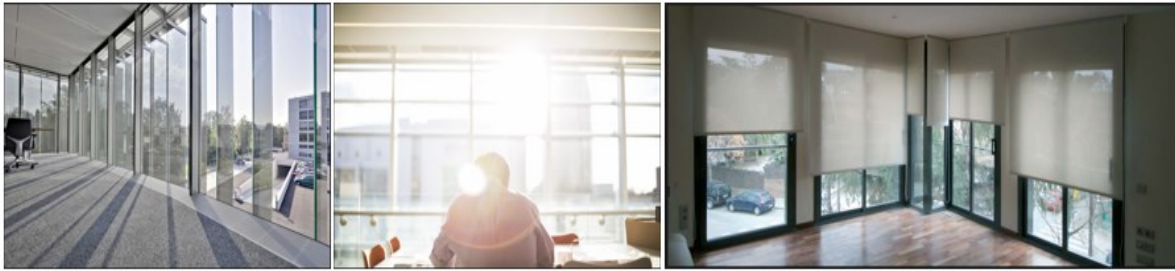


Ilustración 1.3-Problemáticas asociadas a la luz diurna: sobrecalentamiento, deslumbramiento y bajos niveles de iluminación

Estos problemas afectan la comodidad de los usuarios, quienes valoran la luz natural, las visuales al exterior y se ven altamente beneficiados en su salud y productividad por ambientes interiores saludables. Problemas que también impactan en el rendimiento energético del edificio por el uso de iluminación artificial (Kolås, T., 2013) y sistemas de HVAC para lograr el confort interior; alejándose del paradigma actual de concebir Edificios de Energía Reducida hacia Edificios Net Zero.



Figura 1.1 - Esquema descriptivo de la problemática. Fuente: elaboración propia.

1.2 Confort visual en edificios de oficina

1.2.1 Los efectos de la luz en los espacios de trabajo

En la actualidad los aspectos positivos de la luz diurna son valorados no sólo por ser un recurso natural clave para la gestión eficiente de la energía, sino también por su contribución a crear entornos saludables y ecológicos (Leung et al., 2013). Las normativas de la Unión Europea de salud, seguridad y bienestar (1992) referidas a lugares de trabajo, exige una iluminación adecuada, suficiente y siempre que sea posible provista por luz diurna. Esto es porque beneficia la salud física y mental de los trabajadores asociando la iluminación natural con un mejor estado de ánimo, una mejor moral, menos fatiga y fatiga visual reducida (Miller et al., 2009) (Robbins, 1986). A pesar de no comprobarse la relación causa-efecto entre el rendimiento humano y la luz diurna, es posible afirmar que afecta positivamente en su rendimiento y productividad (HMG 2003) (Patricio, Martínez, 2004). “Se cree que la iluminación brillante hace que las personas estén más alerta y perciben que los espacios bien iluminados con “mejores” que los sombríos” (Mardaljevic et al., 2012). Numerosos estudios han concluido que la luz diurna es un recurso valorado por los ocupantes quienes optan por puestos cercanos a las ventanas para ser provistos de iluminación natural, de visuales al exterior y de la posibilidad de conocer la variabilidad del clima (Collins, 1975) (Heerwagen y Orians, 1986). Un estudio realizado con trabajadores de oficina en Dinamarca (Christoffersen, Petersen et al., 1999) determina en sus conclusiones la preferencia de las personas (más del 70%), por puestos de trabajo cercanos a una ventana incluso si perciben reflejos solares en el ambiente o en las pantallas de las computadoras. (Kolås, 2013). La preferencia de la luz del día sobre la iluminación artificial en el trabajo a menudo se relaciona con la variación dinámica de intensidad, color y dirección de la luz del día y el efecto positivo que tienen en nuestra experiencia y estado de ánimo (Christoffersen, 1999; Veitch, 2003). Lo claro es que las aberturas tienen un rol cada vez más importante en el diseño de oficinas e influyen en la comodidad de los ocupantes tanto de manera positiva como negativa; considerando además la luz solar y el resguardo de la privacidad. La comprensión de las necesidades y preferencias del ocupante respecto a las ventanas y de la luz es la base de un buen diseño de iluminación natural.

1.2.2 La fenestración vertical como fuente de iluminación natural

El presente trabajo centrará la discusión en los criterios de diseño de iluminación natural aplicados a fenestración vertical. Se define **fenestración** como: “*las áreas abiertas de la envolvente diseñadas*

para proporcionar transmisión de luz de un espacio a otro” como ventanas, tragaluces u otras superficies de emisión de luz como puertas de vidrio, paredes de bloques de vidrio o paneles translúcidos. La definición incluye además otros elementos compositivos de la abertura: el sistema de acristalamiento, los marcos, las persianas, las rejillas de ventilación u otros elementos. Es **vertical** cuando los acristalamientos tienen inclinaciones o pendientes iguales o mayores a 60° respecto a la horizontal, comprendiendo en esta categoría los clerestorios, los monitores de techo y otras aberturas de similares características. (ASHRAE Standard 90.1-2007). La **fenestración vertical** es la principal fuente de iluminación natural en los edificios de oficina comúnmente constituidos en varios niveles de altura, y muchas veces el único contacto con el medio exterior. Por lo tanto, las estrategias de diseño de iluminación incorporadas desde etapas iniciales del edificio son una oportunidad valiosa para aprovechar los recursos disponibles de forma eficaz. Deberán buscar el equilibrio de los aspectos humanos y energéticos logrando los niveles de iluminación natural requeridos, las vistas al exterior, el control de la privacidad; y sopesar el impacto energético en términos de calentamiento, refrigeración e iluminación contemplando las pérdidas de calor y el riesgo al sobrecalentamiento de las grandes aberturas (CITEC UBB, 2012).

1.2.3 Requerimientos de iluminación en edificios de oficina

El requisito para la iluminación de tareas para oficinas varía entre 200 lux y 750 lux según el tipo de trabajo (CEN 2003); siendo típicamente de 500 lux para los lugares con estaciones de trabajo con pantallas de computadora (EN 12464-1). Sin embargo, los niveles de iluminación preferidos en las oficinas varían mucho entre individuos y la mayoría de los trabajadores de oficina prefieren niveles más altos, superiores a 800 lux (Aries, 2005). Para John Mardaljevic, (2015), el hecho puede atribuirse a la evolución de la tecnología visual en oficinas y también a los hallazgos sobre los efectos no visuales de la luz en cuanto al mantenimiento del *ritmo circadiano*; y a que biológicamente la luz que entra en el ojo no es únicamente la de un plano de trabajo, sino que proviene desde el ambiente (Bommel, 2006). A raíz de esta observación, han surgido variables enfocadas a los niveles de iluminación vertical que permitirían satisfacer las necesidades biológicas, admitiendo iluminancias entre 1000 - 1500 lux. Aunque no existe una definición de los niveles óptimos, los estudios sugieren que la exposición ocasional a iluminancias superiores a 3.000 lux es beneficiosa para la salud y la productividad de los trabajadores (Webb, 2006) y por tanto no deben ser completamente eliminadas. Sin embargo, estos requerimientos deberán cruzarse con la predicción de las molestias del deslumbramiento, causada por contrastes extremos, o una distribución de luminancia

inadecuados [LG7 CIBSE / SLL, 2005]. Existen métodos de análisis y métricas de luz natural para predecir estos comportamientos. Dado que se dispone de una serie de parámetros para evaluar la iluminación natural, es un objetivo de este trabajo ahondar en los parámetros más idóneos en cuanto a la predicción de la cantidad luminosa de la iluminancia y/o la luminancia, la distribución lumínica y el control del deslumbramiento; para proponer una metodología de evaluación de los criterios de diseño de iluminación natural unilateral en las fenestraciones verticales.

Las preguntas que se manifiestan en este contexto son: ¿Cuáles son las estrategias de iluminación aplicables a la fenestración vertical de espacios de oficina iluminados unilateralmente más efectivas en tres contextos climáticos seleccionados de Chile?, ¿Cuál es el método más eficiente para predecir si las estrategias desarrolladas cumplen las expectativas en cuanto al aprovechamiento de la luz natural para lograr buenos niveles de iluminancia, el control del calentamiento pasivo, el sobrecalentamiento y el deslumbramiento por efecto de la luz solar directa?

1.3 Objetivos generales y específicos

El objetivo del presente trabajo es desarrollar estrategias de iluminación natural efectivas aplicables a la fenestración vertical de espacios de oficina iluminados unilateralmente en tres contextos climáticos de Chile; validadas mediante un método de evaluación que permita relacionar la iluminancia y la luz solar directa para lograr espacios bien iluminados, sin riesgo de deslumbramiento, ni sobrecalentamiento. Para lograrlo, perseguirá los objetivos específicos:

Objetivo Específico 1

Definir las principales estrategias de diseño de iluminación aplicables espacios de oficina con fenestración vertical y lateral en distintos tipos de climas, a partir de guías de diseño de referencia internacional y nacional.

Metodología del objetivo:

- M1. Revisión del estado del arte de los criterios de diseño de iluminación natural en edificios de oficina en bibliografía de referencia.
- M2. Selección de las principales estrategias de diseño de iluminación natural en la aplicación de espacios de oficina con fenestración vertical y lateral.

- M3. Construcción de una lista de comprobación con los principales criterios de diseño para iluminación vertical unilateral.

Objetivo Específico 2

Definir las métricas de iluminación natural para analizar la distribución de la luz diurna asegurando suficientes niveles de iluminación natural sin deslumbramiento ni riesgo de sobrecalentamiento de los espacios; y desarrollar la metodología de evaluación de iluminación natural mediante CBDM, que permita analizar las condiciones de confort visual con los métodos aprobados.

Metodología del objetivo:

- M4. Revisión de las métricas de evaluación de iluminación natural.
- M5. Selección de las métricas para evaluar los niveles de iluminación natural, distribución uniforme de la luz día y deslumbramiento, y definir los valores límites objetivos de cálculo.
- M6. Construcción de la herramienta de evaluación con software DIVA-for-Rhino.

Objetivo Específico 3

Desarrollar un modelo de oficina prototipo, y construir los modelos de estudio integrando estrategias de iluminación en tres climas diferenciados de Chile. Evaluar la efectividad de las estrategias en los contextos climáticos seleccionados.

Metodología del objetivo:

- M7. Construcción de un prototipo de oficina de acuerdo con las principales estrategias seleccionadas.
- M8. Confección de casos de estudio para contextos con distintas condiciones lumínicas de Chile.
- M9. Evaluar la iluminancia de los casos de estudio para los contextos climáticos de Chile definidos mediante el indicador sDA-ASE y UDI y la probabilidad de deslumbramiento para momentos del año crítico seleccionado, mediante indicador DGP.
- M10. Concluir sobre los resultados de los modelos optimizados en cada condición climática-lumínica analizada y comparativamente con modelos de fachadas acristaladas.

Capítulo 2. Estrategias de diseño de iluminación natural

El objetivo del capítulo es determinar las principales estrategias de iluminación natural con criterios energéticos para espacios oficinas, con el fin de elaborar una guía de diseño de iluminación natural aplicable al contexto de Chile. Para determinarlo, se ofrece una revisión de las principales recomendaciones para espacios de oficina con fenestración vertical y luz unilateral para alcanzar el confort visual considerando criterios funcionales y de iluminación según la situación climática.

2.1 Revisión del estado del arte

Se consultan documentos desarrollados por los organismos líderes en eficiencia energética y el ambiente construido, con el fin de conocer lo implementado hasta el momento en el ámbito internacional y nacional. En particular se revisa las guías elaboradas en Estados Unidos por la Advanced Energy Office (AEO) con organismos colaboradores; y en el marco nacional chileno lo elaborado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) con organismos colaboradores.

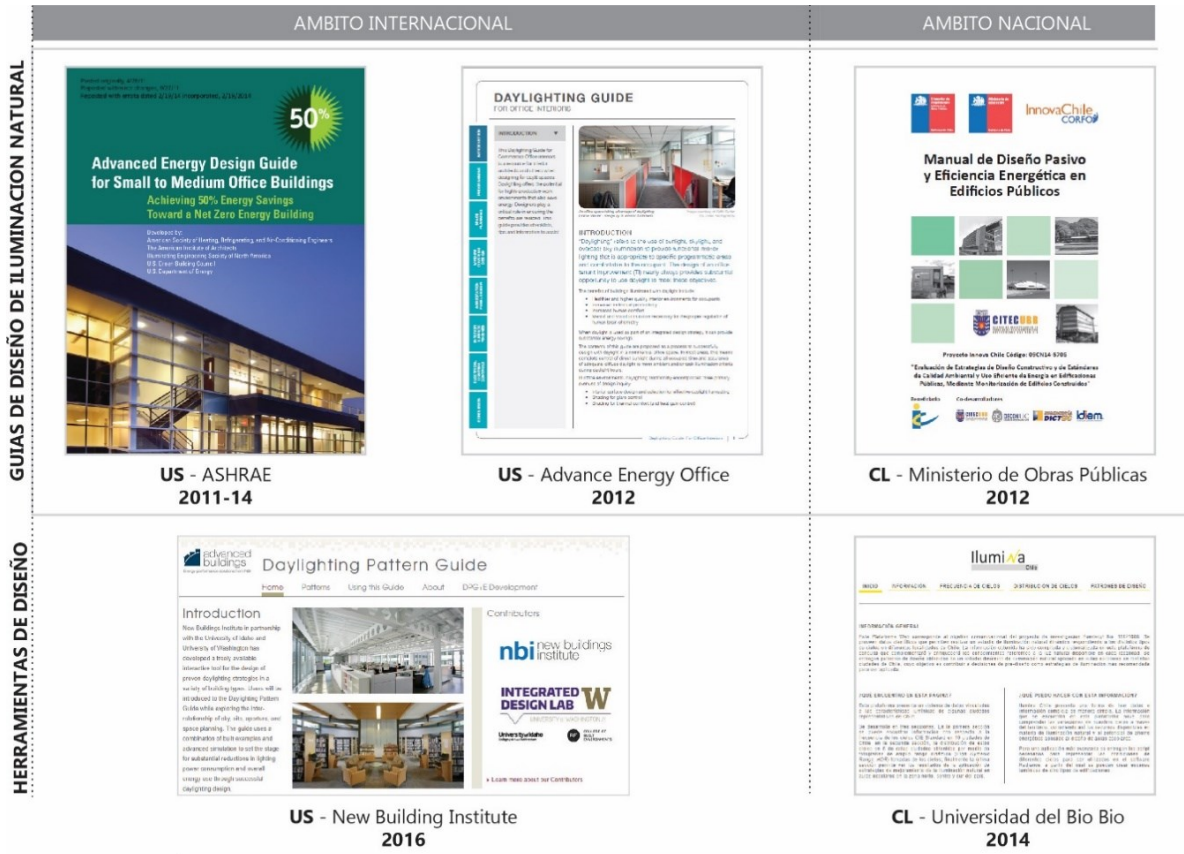


Figura 2.1- Principales documentos consultados

La Figura 2.1 muestra la clasificación en dos categorías, la primera corresponde a guías o manuales con criterios de diseño de eficiencia energética e iluminación natural para edificios de oficina y edificios en general. La segunda son herramientas interactivas con estrategias de iluminación natural aplicadas en edificios con distintas condiciones de cielo.

2.1.1 Guías de diseño de iluminación natural para edificios de oficina

La Guía de diseño energético avanzado para edificios de oficinas (AEDG)(Ashrae, 2014) tiene como objeto promover prácticas de eficiencia energética en edificios de oficina comerciales de alto estándar de pequeña y mediana escala; para alcanzar un ahorro de energía del 50% tendiente a energía neta cero, así como lograr entornos de trabajo eficientes y saludables. Las recomendaciones se establecen desde un proceso de diseño integrado y gran parte de los criterios referidos a iluminación natural consideran además aspectos térmicos y energéticos. Es conveniente su consideración porque resultan una ruta de cumplimiento prescriptivo de aspectos de interés, no desarrollados en el trabajo, debido a que el enfoque se centra en los aspectos lumínicos; y también porque los criterios que guardan relación con las características climáticas pueden homologarse mediante un análisis comparativo de las zonas definidas por ASHRAE para Estados Unidos con las definidas por la NCh1079 para Chile. Los criterios destacados refieren a la definición de *la forma del edificio*, para disminuir la profundidad de la planta e incrementar las oportunidades de iluminar naturalmente el espacio y permitir las vistas del usuario al exterior. También *zonificación del programa* arquitectónico, respecto a la orientación del edificio y a la ubicación de las zonas de luz; así como el *dimensionamiento de las aberturas* y las protecciones solares para controlar las ganancias no deseadas. Otros criterios refieren a la óptima distribución de la luz diurna, con la selección de *tipologías de ventanas unilaterales verticales* y la configuración de estrategias que permiten incrementar la luz diurna. Entre estas están las repisas de iluminación, la altura de los cielos, la reflectancia de las superficies interiores y la selección de cristales de acuerdo con el rango de visión, el nivel de iluminación y el deslumbramiento.

La Guía de iluminación natural para oficinas comerciales(AEO, 2011) orienta criterios de diseño para el interior de las edificaciones, siendo complementaria a la Guía AEDG. Los criterios buscan mejorar los espacios interiores una vez que ya ha sido determinada la geometría del edificio, orientación, dimensión de las aberturas, dispositivos de control solar exterior y la profundidad de los recintos. Profundiza en la *distribución del programa arquitectónico* según los requerimientos de luz diurna de

las distintas actividades (considerando los tiempos de ocupación, los niveles máximos requeridos y el control del deslumbramiento). Los temas se centran en la *distribución del mobiliario*, orientación de los puestos de trabajo y la altura de las particiones intermedias para preservar la luz diurna y no generar sombreado ni interferir con ella o bloquear las vistas de los espacios; y en los *acabados de los materiales interiores* para mejorar el rendimiento de la luz diurna regulando la percepción del brillo dentro de los espacios interiores.

El Manual de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios públicos (CITEC UBB, 2012) reúne recomendaciones para edificios con prestaciones energéticas, destinando un capítulo a la iluminación natural. A pesar de no dirigirse únicamente al programa oficina, ofrece información del clima de Chile y retoma gran parte de los criterios de iluminación natural anteriormente mencionados. Aborda las estrategias de luz diurna en 4 categorías: *captación, transmisión, distribución y control de luz diurna*. Las estrategias de captación buscan aprovechar la disponibilidad lumínica en el sitio, las decisiones influyen en la forma del edificio, la geometría, la orientación y la disposición de los elementos de captación, dependiendo del tipo de cielo CIE¹, la incidencia solar, la variación lumínica según la latitud y época del año del lugar. Las estrategias de transmisión buscan potenciar la disponibilidad lumínica del edificio e influyen en las decisiones sobre fenestración, relativas a la proporción de las ventanas, las características de los cristales y los marcos estructurantes. Las estrategias de distribución influyen decisiones del espacio interior como la zonificación del programa y las características de las superficies, el equipamiento y las particiones de los puestos de trabajo según la disposición de las aberturas, así como dispositivos aplicados a la abertura (repisas de luz). Las estrategias de protección se resuelven con dispositivos confinados en la fenestración que limiten las ganancias solares y el deslumbramiento en el campo visual mediante protecciones solares fijas exteriores (celosías, corta soles y quiebra vistas); fijas interiores (pantallas difusoras) y móviles interiores-exteriores (cortinas roll up, cortinados, persianas venecianas). En síntesis, las primeras dos estrategias guardan relación con los aspectos de composición definidos en la Guía AEDG, mientras las otras dos con aspectos expuestos en la Guía para interiores de oficinas comerciales.

¹ (Commission Internationale de l'Eclairage 1994)

2.1.2 Herramientas de diseño de iluminación natural

En cuanto a las herramientas de diseño, analizan el comportamiento de estrategias aplicadas en distintos contextos para conocer cuál es *a priori* la más efectiva según la localización.

La Guía de patrones de la luz diurna (<https://patternguide.advancedbuildings.net/>) es una herramienta interactiva que permite visualizar el comportamiento de estrategias de iluminación natural aplicadas en edificios construidos, con distintos usos y escalas. Analiza el comportamiento de 19 patrones de diseño mediante método de simulación dinámica para cuantificar las alternativas y comprobar su efectividad en cuanto a los niveles de luz diurna y al confort visual. La representación se aborda desde una perspectiva multidimensional con diagramas de iluminancia, luminancia y de percepción espacial. Los patrones incluyen estrategias de fenestración vertical y luz unilateral combinando factores de condición de cielo, porcentaje de apertura del edificio y distribución de las aberturas en el espacio. Para el desarrollo del trabajo se destacan los patrones que analizan: la relación del lleno con el vacío de la fenestración vertical en dos tipologías de ventana -vertical y banda horizontal-, incrementando el porcentaje de apertura, la posición y el distanciamiento entre ellas; la relación del porcentaje de apertura con la profundidad de la planta; y el uso de persianas con distinto sombreado y redireccionamiento de luz. La herramienta resulta de interés en la etapa de diseño, pues representa los patrones de iluminación más efectivos en el espacio según el tipo de cielo y permite estimar las estrategias que permitirían optimizar la fenestración vertical.

La plataforma interactiva Ilumina Chile, (<http://iluminachile.ubiobio.cl/>) desarrollada en el ámbito nacional ofrece datos científicos de las características lumínicas de localidades de Chile. Presenta datos científicos de 9 ciudades ubicadas en diversas altitudes, latitudes y zonas climáticas; con características de cielo y frecuencia de nubosidad basados en la clasificación de los cielos CIE. El programa arquitectónico analizado es educativo revisando estrategias de iluminación natural en aulas escolares en la zona norte, centro y sur del país con distintos tipos de cielo comparando los resultados lumínicos de cada una de ellas a través de un análisis de iluminancia horizontal en tiempo anual. Es una herramienta significativa en el desarrollo del trabajo; pues permite conocer las condiciones del cielo en el contexto local y comprender el comportamiento lumínico de estrategias de captación, protección y distribución en los cielos de Chile.

2.1.3 Síntesis de conceptos para el diseño de iluminación natural

Los documentos consultados exponen varios elementos a considerar en el diseño de iluminación natural de una edificación. Las estrategias para captar, transmitir, distribuir y controlar la luz diurna están asociadas a decisiones de: forma del edificio, fenestración, dispositivos de control en las aberturas, y al espacio interior; e inciden en distintas etapas del proceso de diseño arquitectónico (desde la definición preliminar de la forma hasta las decisiones de los acabados interiores). Además, deja ver las decisiones de iluminación natural no sólo afectan las prestaciones lumínicas, sino que impactan en las prestaciones energéticas y térmicas de los edificios. La Figura 2.2 sintetiza el contenido analizado ordenando los principales conceptos en los cuatro grandes grupos mencionados.

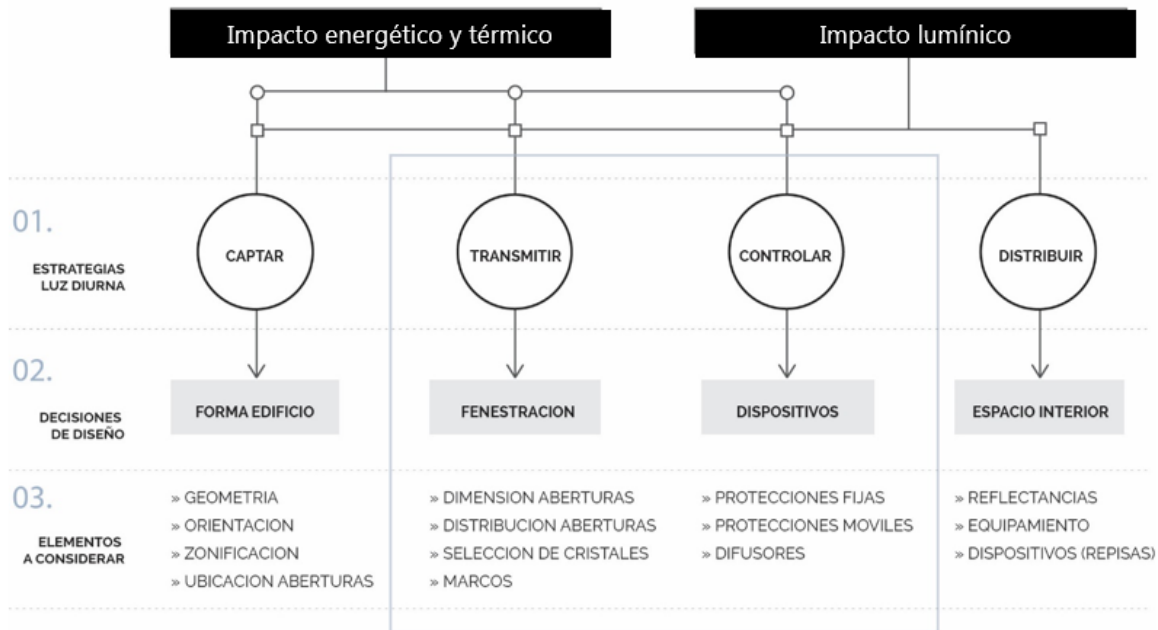


Figura 2.2-Principales conceptos del diseño de iluminación natural. Fuente: elaboración propia

El esquema es útil para situar el tema y el alcance de este trabajo referido a la iluminación natural unilateral en distintas condiciones de cielo. El foco se centrará en las estrategias de transmisión y control, mediante la manipulación de los elementos de fenestración y dispositivos de control. Las recomendaciones referidas a forma del edificio y espacio interior serán útiles para generar un prototipo de oficina en donde aplicarlas.

2.2 Principales criterios de iluminación natural para edificios de oficina

Esta sección reúne los principales criterios y consideraciones seleccionadas con el fin de crear una lista de comprobación con criterios de diseño para iluminación vertical unilateral, de fácil implementación para el diseño de espacios de oficina.

2.2.1 Aspectos formales del edificio

Geometría y profundidad de la planta

La forma del edificio tiene un gran impacto en el potencial energético, térmico y lumínico de los interiores. Las plantas con distancias controladas entre el perímetro y el núcleo del edificio aseguran mejores oportunidades de iluminación natural porque logran mayor penetración y distribución de la luz diurna, y también, acceso visual al exterior por parte de los usuarios. La regulación de la profundidad de planta es posible configurando la geometría del edificio hacia formas menos compactas, incorporando de atrios y/o patios de iluminación. Se consideran 3 áreas de iluminación unilateral de fenestración vertical indicadas en la Figura 2.3:

- » **Zona 1**– 4.55 m iluminación primaria, recomendada para recintos regularmente ocupados.
- » **Zona 2** – 6.00 m iluminación secundaria, recomendada para otros espacios de ocupación.
- » **Zona 3** – 9.15 m distancia máxima del ocupante a la fachada para acceder a luz diurna y vistas al exterior.
- » En profundidades de más de 18.2m (9.15m + 9.15m espejado) es necesario incorporar atrios o patios que provean iluminación natural.

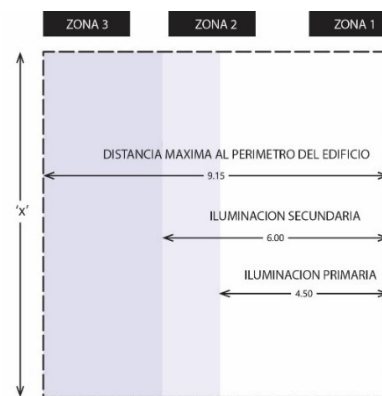


Figura 2.3-Areas de iluminación en planta. Fuente: elaboración propia.

Distribución del programa arquitectónico

La distribución del programa arquitectónico depende en gran medida de la luz diurna disponible en el espacio. Los requerimientos de luz diurna según la actividad, la necesidad de vistas al exterior y cuan crítico es la incidencia o control solar para la actividad; son determinantes en la sectorización de la planta considerando que:

- » Oficinas de planta libre: tiene requerimientos de luz diurna y visual al exterior, y un control general del deslumbramiento.
- » Oficinas privadas: tiene requerimientos de luz diurna y visual al exterior, y un control individual del deslumbramiento.
- » Espacios de soporte: tiene mínimos requerimientos de luz diurna.
- » Corazón del edificio: sin requerimientos de luz diurna.

Alturas interiores

La altura de los cielos interiores incide en la distribución de la iluminación natural; así como la geometría en los espacios de captación que pueden potenciar las reflexiones interiores. Las recomendaciones generales para alturas interiores se grafican en la Figura 2.4 :

- » **Altura mínima 2.75m**
- » Altura en zonas de gran ocupación 3.00m-3.65m
- » **Altura mínima en el perímetro del edificio 3.35m**
- » Elevar el cielo en el perímetro para extender la abertura permite incrementar las reflexiones.
- » Inclinarse el cielo hacia permite reflexiones adicionales.

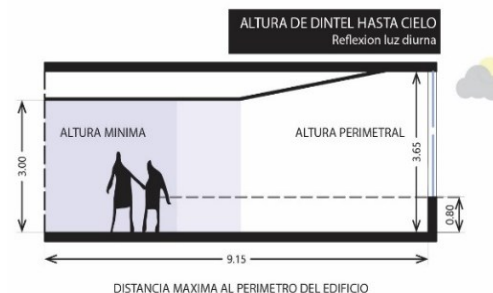


Figura 2.4-Alturas interiores.
Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Fenestraciones verticales

La fenestración cumple un rol fundamental en los aspectos energéticos del edificio; en la calidad del ambiente interior (CAI) al proveer luz diurna y permitir la conexión visual de los ocupantes con el mundo exterior y también por criterios estéticos siendo un objeto compositivo de la fachada. Una serie de consideraciones permiten encontrar el equilibrio entre energía y los beneficios socioespaciales al incorporar aberturas:

Fenestración sensible a la orientación cardinal

La orientación del edificio respecto a los cardinales afecta el comportamiento energético debido a la orientación que enfrentan sus aberturas. Las aberturas sensibles a la orientación ayudarán a controlar las ganancias solares, el deslumbramiento o incomodidad visual. En el hemisferio sur:

- » **Norte.** Recibe la mayor intensidad solar y variación en el ángulo solar; sin embargo, presenta oportunidades para controlar la radiación solar. Es la más favorable para lograr buena captación y control solar, admitiendo una desviación máxima de 15°.
- » **Sur.** Captura luz diurna reflejada en la bóveda celeste con un contenido mínimo de calor solar y no requiere control de deslumbramiento porque no recibe radiación solar.
- » **Este y Oeste** presentan condiciones más complejas debido a la variabilidad de la posición solar azimutal en ángulos bajos, que ingresan al interior del recinto. Deben ser evaluados críticamente debido al deslumbramiento y a la contribución de la carga de enfriamiento.

Porcentaje de abertura del muro lleno (WWR %)

La relación entre la abertura y la pared **WWR (Window Wall Ratio)** es el porcentaje que resulta de dividir el área total acristalada del edificio por el área total de la pared exterior. Las recomendaciones en la (AEDG), sugieren:

- » Limitar WWR% entre 20 y 40 para lograr un ahorro de energía del 50% sin modelamientos energéticos.
- » WWR% superiores en fachadas Norte y Sur
- » WWR% reducidos en fachadas Este y Oeste, por la dificultad de controlar la variabilidad solar.
- » La reducción del acristalamiento debe considerar los requerimientos de luz diurna y vista según el tipo de ocupación, estrategias solares pasivas.

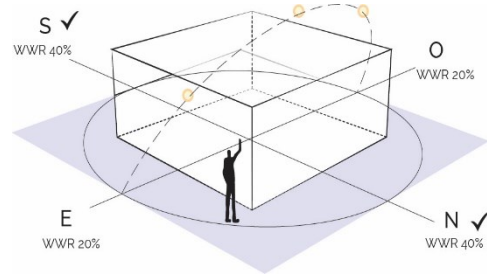


Figura 2.5-WWR preferido por orientación. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente el caso de recintos con luz diurna unilateral se recomienda aumentar el WWR% para lograr una mayor profundidad de la luz. La Tabla 2.1 presenta el porcentaje de ventana mínimos en relación con la profundidad de una habitación con iluminación lateral en una sola pared.

Tabla 2.1-Superficies mínimas de ventanas cuando están restringidas a una pared. Fuente: CITEC (2016)

Profundidad de la habitación desde la pared exterior (max.)	Porcentaje de la pared de la ventana visto desde el interior (min.)
<8 m	20 %
≥8 m 11 m	25 %
>11 m ≤14 m	30 %
>14 m	35 %

Aberturas de iluminación lateral

La iluminación unilateral de un edificio establece un límite en la profundidad de su planta para lograr adecuados niveles de iluminación. Para la planificación conceptual, existe una relación entre la profundidad de los espacios y en la altura de la ventana, representada en la Figura 2.6. La profundidad practica de la zona de la luz diurna es 1,5 veces la altura de la ventana en relación con el suelo, pudiendo extenderse 2 veces la penetración de la luz al incorporar estrategias de distribución en la ventana, con una repisa de luz. Mientras más alta se ubica la ventana mayor es la profundidad de la luz en el recinto, generando una mejor distribución de iluminación interior.

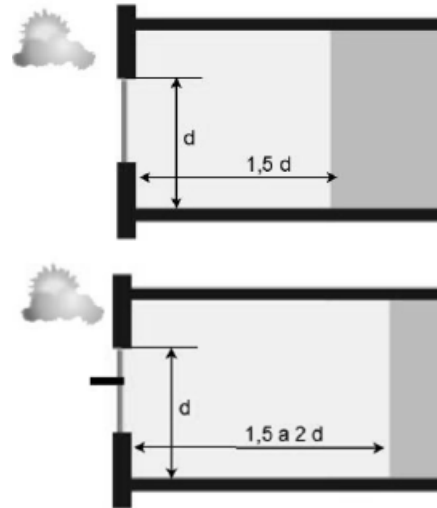


Figura 2.6-Profundidad de la luz natural. Fuente: CITEC (2016).

Es recomendable categorizar las aberturas en acristalamientos para captación de luz diurna y para las vistas, atendiendo a distintos requerimientos de uso y por ende admiten distintas características.

Aberturas para visualización (Figura 2.7):

- » Antepechos hasta la altura 0.80m (nivel plano de trabajo); para acceder a vistas al exterior.
- » Dinteles hasta los 1.80m -2.20m, sobre esta altura no se aprecian las vistas.

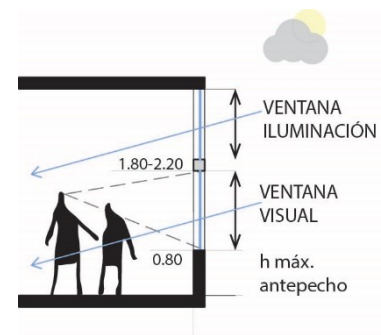


Figura 2.7-Categorización aberturas. Fuente: elaboración propia.

Aberturas de captación de luz diurna:

- » Proveer luz diurna sobre los 2.15m entrega el nivel más alto de iluminación disponible.
- » Ubicar los dinteles hasta la línea del cielo y vidrios claros (con alto índice de TL) permite incrementar las reflexiones de luz.
- » Priorizar ventanas continuas sobre las individuales o verticales para que la distribución y profundidad de la luz sea más efectiva.
- » Maximizar el ancho de la ventana para equilibrar los niveles de luz en la habitación y mitigar el contraste.

Vidrios

Existe una gran cantidad de magnitudes que describen las características de los materiales de acristalamiento, sin embargo, en cuanto al aprovechamiento de la luz natural se consideran la **transmisión luminosa** del vidrio: coeficiente que expresa el porcentaje de luz natural, en su espectro visible, que deja pasar un vidrio, y el **factor solar (FS)**: energía térmica total que pasa a través del acristalamiento a consecuencia de la radiación solar, por unidad de radiación incidente. La importancia de estas dos magnitudes radica en que afecta las visuales, el deslumbramiento y captación de luz diurna comúnmente se requiere que un acristalamiento permita la máxima transmisión de luz con una baja transmisión de calor radiante solar; es decir, que el vidrio tenga una alta transmisión solar con el mínimo factor solar posible. Los valores referenciales se encuentran en la Tabla 2.2; así como criterios generales sobre los vidrios a continuación:

- » TL (0.6-0.7) % en general para todos los tipos de vidrios
- » TL superior a (0.6-0.7) % en predominancia de cielos cubiertos
- » TL superior a (0.6-0.7) % en ventanas de captación de luz diurna
- » TL inferior a (0.5-0.6) % en fachadas oriente y poniente, o con alto WWR%
- » Priorizar el vidrio de color neutro. Evitar el vidrio tintado especialmente el bronce y verde
- » Evitar el vidrio reflectivo, pues reduce significativamente la transparencia.

Tabla 2.2- Tipos de vidrio y valores de referencia para diferentes tipos de vidrios. Fuente: IDAE (2005).

Grupo	Tipo	Espesor Vidrio (mm)	Espesor Cámara Aire (mm)	Coefficiente Transmisión luminosa	Factor solar	Transmitancia (W/m².K)
Simple	Claro	3		0.90	0.89	5.85
		4		0.89	0.85	5.8
		6		0.89	0.85	5.7
Doble	Claro-Claro	4	6	0.79	0.77	3.3
		4	12	0.79	0.77	2.9
		4	18	0.79	0.77	2.7
		6	6	0.88	0.72	3.4
		6	8	0.88	0.72	3.2
		6	12	0.88	0.72	3.0
Doble reflectante	Claro	6	12	0.55	0.30	1.8
	Plata	6	12	0.30	0.32	1.8
	Verde	6	12	0.23	0.21	1.8
	Verde oscuro	6	12	0.20	0.18	1.8
	Bronce	6	12	0.18	0.23	1.8
	Azul	6	12	0.16	0.20	1.8
	Gris	6	12	0.14	0.21	1.8
Doble Bajo emisor	Claro	4	6	0.77	0.65	2.5
		4	12	0.77	0.65	1.8
		4	18	0.77	0.65	1.5
		6	6	0.67	0.52	2.4
		6	8	0.67	0.52	2.3
		6	12	0.67	0.52	1.8
	Reflectante	4	6	0.75	0.54	2.5
		4	12	0.75	0.54	1.6
		4	18	0.75	0.54	2.4

2.2.3 Sistemas y dispositivos de sombreado

Los sistemas de control permiten minimizar la ganancia térmica no deseada y el deslumbramiento ocasionado por la luz solar en los espacios interiores. Existen múltiples sistemas de control de la luz natural para limitar, redirigir o filtrar la luz solar y evitar incomodidad visual en las estaciones de trabajo. Abarcan desde elementos estáticos simples (como los voladizos) hasta los dinámicos (persianas, cortinas o acristalamientos regulables) y las combinaciones de ambos. La efectividad de los sistemas de sombreado varía, dependiendo de su capacidad de adaptarse a las condiciones del lugar, interpretando la carga de calor y la capacidad luz diurna, así como las vistas. Las soluciones correctas comienzan con los sistemas estáticos y la posterior incorporación de los elementos dinámicos en aquellos lugares en que sean necesarios

Sombreado externo fijo: La ganancia de calor solar se controla de manera más efectiva cuando se bloquea la penetración antes de ingresar al edificio,

Dispositivos horizontales:

- » Los aleros, los toldos y los enrejados responden bien a los ángulos solares pronunciados y funcionan mejor en las fachadas orientadas hacia el norte.
- » Las ganancias solares pasivas son posibles en invierno; sin embargo, se requerirá sombreado interior adicional para contrarrestar el deslumbramiento.

Dispositivos verticales:

- » Las pantallas verticales o las lamas horizontales configuradas en matrices verticales funcionan cuando están orientadas hacia el norte, oeste o este

Sombreado dinámico: Son de gran efectividad en climas con predominancia de cielo cubierto, cuando la ganancia solar es beneficiosa.

- » Los sistemas dinámicos u operables son los dispositivos de sombra más efectivos disponibles, ya que no tienen que comprometerse en una sola posición para minimizar la ganancia de calor y maximizar la luz del día.
- » Las tecnologías más comunes que se utilizan son los sistemas de persianas y las cortinas enrollables basadas en tela, que pueden reducir la ganancia de calor solar entre un 80% y un 90%, mientras que al mismo tiempo permiten la luz diurna y las vistas.

2.2.4 Características del espacio interior

En un espacio iluminado las superficies interiores tienen un efecto considerable en la distribución de la luz natural. Mientras que los colores claros mejoran la penetración de la luz natural y tienen la capacidad de reducir el contraste entre las ventanas brillantes y otras superficies, los colores oscuros generan el efecto inverso. Como norma general, se recomiendan menores reflectancias en las zonas bajas e incrementarlas en los niveles superiores. En la Tabla 2.3 se resume la reflectancia media de las superficies interiores, y los valores referidos a colores y materiales en la Tabla 2.4.

Tabla 2.3-Valores límites de reflectancias de las superficies interiores. Fuente: TDRE MOP (2016)

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

Fuente: The Society Of Light And Lighting 2002

Tabla 2.4-Valores de Reflectancias: referencia de colores y materiales Fuente: TDRE MOP (2016)

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

Fuente: CITEC UBB

Debe prestarse especial consideración a las paredes de las ventanas. Deben ser al menos tan reflectantes como las otras paredes, para reducir el contraste entre las ventanas y su fondo

inmediato. La Ilustración 2.1 de la *Guía de diseño de interiores comerciales*, analiza las características de las superficies interiores.



Ilustración 2.1-Terminaciones de las superficies interiores. Fuente: AOE (2011)




Comentarios

Como resultado de la revisión de los principales criterios, la Tabla 2.5 presenta una lista de comprobación con criterios de diseño con luz natural de fácil implementación, para llevar a cabo un buen diseño de espacios de oficina. En la Tabla 2.6 se clasifican estrategias efectivas según el tipo de cielo CIE: (cielo claro, cielo intermedio o cielo cubierto), elaborada a partir de la información analizada sobre la en las herramientas de diseño de iluminación natural.

Tabla 2.5-- Lista de comprobación con criterios de diseño para iluminación vertical unilateral. Fuente: elaboración propia

01	Aspectos formales del edificio	Objetivo: Minimizar distancia del núcleo al perímetro, asegurar acceso visual a las ventanas.	
	Orientación	Norte - Sur dominante dentro de los 15°	
	Profundidad planta	Priorizar plantas alargadas (extensión hacia el Este – Oeste)	
		Distancia máxima de los ocupantes a la fachada 9,15mt. (30ft)	
		Espacios regularmente ocupados a la fachada 4,55mt (15ft) > 40%	
		Espacios ocupados a la fachada 6,0mt (20ft) > 75%	
		Profundidad máxima 18,2mts (60ft) – Sin uso de Skylight	
	Articulación de la huella	Patios / Pozos de luz / Atrios	
	Altura	Altura del Cielo mínima > 2.75mt. (9ft)	
		Altura del Cielo espacios públicos > 3.10 a 3.65mt. (10-12ft)	
Altura del Cielo Espacios Públicos Superiores + Reflectancia			
02	Zonificación del programa arquitectónico	Objetivo: Coordinar los espacios según requerimientos de luz diurna	
	Oficinas Abiertas	Priorizar perímetro Norte / Sur	
		Zona de iluminación primaria / secundaria	
		Particiones bajas y translúcidas	
	Circulación Oficinas Abiertas	Entre puestos de trabajo	
		Al finalizar zona iluminación diurna	
	Oficinas Privadas	Orientación Este / Oeste	
		Perímetros interiores en zonas secundarias	
		Paredes de vidrio paralelas a la fachada (acceso al exterior)	
	Sala de Reuniones	Perímetros interiores en zonas secundarias	
Lejos de la fachada para evitar sobrecarga por ganancia interna			
Espacio Público (Hall/Rec.)	Potencial de captación de luz diurna - Iluminación superior		
03	Fenestración vertical	Objetivo: Optimizar la envolvente para luz diurna y disminuir ganancias solares	
	Dimensionamiento de aberturas (WWR%)	Maximizar % Norte / Sur	
		Minimizar % Este / Oeste	
		Relación de Lleno Vacío 20-40%	
	Características de ventanas	Ventana Visible (V1) + Ventana de Iluminación (V2) + Repisa	
		Altura (V1): 0,75 a 1,80 -2.20mt.	
		Altura (V1): cielo cubierto aberturas hasta el piso	
	Características de vidrios Transmisión Visible (VT):	Altura (V2): Hasta el cielo (3,35mts)	
		VT Alto (0,6 - 0,7) en general	
		VT fachadas ponientes < (0,6 - 0,7) < VT cielo cubierto	
Evitar vidrio reflectivo o tintado			
04	Estrategias de luz diurna	Objetivo: Estrategias de diseño de luz diurna y características del interior	
	Distribución de luz diurna	Repisas de luz, pantallas difusoras, dispositivos reflectores	
		Incrementar la reflexión de las superficies interiores	
	Control Solar	Protecciones Exteriores (Perforadas en climas fríos / cielo cubierto)	
		Aleros al Norte - Aletas Verticales Este/Oeste con dirección Norte	
	Ver: Tabla 2.6-Clasificación de estrategias por tipo de cielo.		

Tabla 2.6-Clasificación de estrategias según el tipo de cielo. Fuente: elaboración propia.

Estrategias efectivas por tipo de cielo				
A	Captar			
	Repisa Exterior	•	•	–
	Repisa Interior	•	•	•
	Área de Ventana (mayor %)	–	•	•
	Ventanas Superiores	•	•	•
	Ventanas Inferiores	–	–	•
	Clerestorios y monitores	•	•	•
	Verandas	•	–	–
B	Distribuir			
	Luz cenital interior	•	•	•
	Aumentar las reflexiones interiores	–	•	•
	Cristal con mayor transmisión luminosa	–	–	•
	Altura de Cielo	•	•	•
	Dispositivos de Reflexión de luz	•	•	•
C	Proteger			
	Sombreado exterior fijo	•	•	–
	Sombreado interior dinámico	•	•	•
	Celosía superior	•	–	–
	Celosía Inferior	•	•	–
	Bandeja Celosía	–	•	•
	Área de Ventana (menor %)	•	•	–
	Profundidad del canto de las ventanas	•	•	•
Cristal con menor transmisión luminosa	•	•	–	

Capítulo 3. Métodos de análisis de luz diurna

El argumento del capítulo se centra en los indicadores de luz diurna y métodos de evaluación validados por organizaciones nacionales e internacionales, con el fin de construir un método de evaluación de luz diurna efectivo. En particular se profundiza en las métricas Autonomía de la luz diurna en el espacio (sDA), Exposición anual a la luz solar (ASE) e Iluminancia útil de la luz diurna (UDI), por el potencial predictivo de iluminancia y probabilidad del deslumbramiento; y el Deslumbramiento de la luz diurna (DGP) como el indicador para determinar la insatisfacción en un ambiente visual.

3.1 Indicadores de evaluación de luz diurna

El activo más valioso de la luz diurna es su disponibilidad gratuita. Sin embargo, es un recurso que varía estacionalmente planteando desafíos al momento de incorporarla eficazmente en los edificios. La simulación de luz diurna basada en el clima (CBDM por sus siglas en inglés), es un método de evaluación predictivo de la cantidad luminosa de la iluminancia y/o la luminancia, que analiza el comportamiento dinámico de luz diurna, horario y estacional anual. Surge como alternativa a la evaluación de cálculo estático implementado con el Factor Luz día (DF). El método CBDM fue aceptado por la comunidad académica y profesional gracias a estudios de campo que mostraron una precisión del 10% en los resultados respecto al escenario real, porcentaje que puede asumirse dentro del margen de error de los instrumentos de medición (Mardaljevic, 2015). Actualmente es el método de evaluación obligatorio para el marco normativo internacional y nacional.

3.1.1 Revisión de las métricas para el cálculo de iluminancia y deslumbramiento

Existen múltiples métricas para el cálculo del comportamiento lumínico, y resulta de interés referir las validaciones de organismos internacionales de Estados Unidos y Reino Unido, por los aportes significativos que han hecho a través de la investigación y de las certificaciones ambientales.

En Estados Unidos la última versión de la Certificación LEED V4 (2014) incluye la simulación dinámica como método aprobado para estimar los niveles y la calidad de luz diurna a través del indicador LM-83. Fue desarrollado por la *Illuminating Engineering Society of North America* (IESNA) como una combinación de dos métricas de iluminancia: sDA y ASE.

sDA Autonomía de la luz diurna en el espacio

La métrica evalúa la suficiencia anual de los niveles de luz diurna en el ambiente interior. Se define con el porcentaje de un área de análisis que cumple con los niveles mínimos de iluminación en las horas de operación (IESNA, 2012). Establece un requerimiento mínimo de 300 lux para realizar tareas visuales en condiciones de confort, para al menos un 50% de las horas de operación de un área de análisis. La evaluación se realiza sobre un plano de trabajo definido por una grilla horizontal a 0.80m sobre NPT, en el período comprendido entre 8:00 - 18:00hs. Como resultado se espera un porcentaje de superficie que cumpla o supere esta condición y la aceptabilidad se determina con los criterios de suficiencia indicado en la Tabla 3.1. sDA cuantifica todas las iluminancias superiores a 300 lux, y aunque la certificación LEED advierte que a partir de 3.000 lux existe riesgo de incomodidad visual de los ocupantes; el parámetro no puede limitar el umbral máximo; por lo que en el análisis podría estar admitiendo luz solar directa. A razón de esto IESNA analiza una segunda medida para evaluar el riesgo de sobre iluminación originada por la exposición a la luz solar directa.

Tabla 3.1 – sDA - Criterio de admisibilidad. Fuente: Certificación LEED V4 USGBC. 2014

Esquema sDA		Rango (%)	Descripción
sDA	(300lux/50%)	> 55	Iluminación aceptable
		> 75	Iluminación favorable o preferida

ASE Exposición anual a la luz solar

La métrica evalúa el potencial de incomodidad visual en ambientes de trabajo. Se define con el porcentaje de área que excede un nivel específico de iluminancia por efectos directos de la luz solar, un número específico de horas por año. (IESNA, 2012). Establece un requerimiento máximo de 1.000 lux durante 250 horas en el transcurso de un año, para realizar tareas visuales sin percibir incomodidad visual por exposición solar directa. La evaluación se realiza en las mismas condiciones que sDA, sin considerar los dispositivos de control solar operables como persianas o pantallas; buscando analizar el caso más desfavorable. Como resultado se espera un porcentaje máximo de superficie que cumpla esta condición. El método LM-83-12 refiere tres rangos de aceptación ASE_{1000,250}: cuando es inferior a 3% el confort visual es aceptable, inferior a 7% es neutro o nominalmente

aceptable, y superior el 10% es insatisfactorio. Sin embargo, una interpretación de LEED V4 del 2017 define el criterio simplificado de suficiencia indicado en la Tabla 3.2. Los resultados son orientadores de estrategias de control solar, y permiten analizar el impacto de los dispositivos de sombreado en sDA. Debido a que la métrica no determina el deslumbramiento por reflejos especulares, no puede tratarse de forma independiente.

Tabla 3.2 – ASE – Criterios de admisibilidad. Fuente: certificación LEED V4 USGBC. 2014

Esquema ASE		Rango (%)	Descripción
ASE	1000,250h	<10	Confort visual insatisfactorio, aceptable hasta 20%

En Reino Unido la *Education Funding Agency* (EFA) en el año 2013 para el Programa de construcción de escuelas prioritarias (PSBP), introduce como requisito obligatorio métricas CBDM para estimar los niveles y la calidad de luz diurna: UDI.

UDI Iluminancia útil de la luz diurna

La métrica evalúa la ocurrencia anual de iluminancias en el plano de trabajo dentro de un rango considerado "útil" por los ocupantes. (Mardaljevic, Andersen, Roy, & Christoffersen, 2012). La evaluación se realiza sobre un plano de trabajo definido por una grilla horizontal a 0.80m sobre NPT y distanciado 0.50m del perímetro, en el período comprendido entre 8:00 - 18:00hs. A partir de encuestas sobre las preferencias de iluminación en espacios de oficinas con dispositivos de sombreado operados por los ocupantes; el rango útil fue redefinido entre 100 a 3.000 lux, con subdivisión en categorías:

- » UDI-f (fell-short) < 100 lux insuficiente para realizar tareas visuales
- » UDI-s (supplementary) 100 a 300 lux útil para áreas con menor exigencia visual
- » UDI-a (autonomous) 300 a 3.000 lux con nivel de iluminación preferido.
- » UDI-e (exceedeed) > 3.000 lux iluminación con riesgo a incomodidad visual
- » UDI-c (combined) 100 a 3.000 lux Combinado UDI-s + UDI-a

Como resultado se espera que el porcentaje de superficie con niveles de iluminancia dentro del rango cumpla o supere lo indicado en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 – UDI - Criterios de admisibilidad. Fuente: PSPB, EFA 2013

Esquema UDI-c		Tiempo %	Descripción
UDI-c	100-3000 lux	>80	Nivel de iluminancia útil deseable o preferido

3.1.2 Revisión de los criterios admisibles de la normativa local

En Chile la Guía Técnica N°8 de Confort Lumínico de los Términos de Referencia Estandarizados del Ministerio de Obras Públicas (TDRé V2) 2° edición en el año 2015 y la Certificación Ambiental de la Edificación Sustentable (CES) del año 2014, son los principales documentos que tienen por objeto difundir estándares de eficiencia energética y confort ambiental aplicables a la edificación nacional.

En cuanto a los objetivos lumínicos ambos sistemas incluyen algunas de las métricas dinámicas mencionadas, pero los criterios admisibles de cumplimiento difieren entre ellos y con la normativa internacional señalada. Ambos sistemas indican las métricas sDA y UDI, pero no incluyen el indicador ASE como parámetro de altas iluminancias. Se comparan los objetivos de cumplimiento de sDA y UDI en las normas internacionales LEED, PSBP con las normas TDRé V2 y CES; para realizar una valoración de la normativa nacional. Una de las principales diferencias, es que LEED, PSBP y TDR proponen objetivos de cumplimiento para todos los tipos de cielo, pero en CES los objetivos los clasifica en 3 grupos según el cielo predominante de las zonas climáticas: Z1: localidades con predominancia de cielo claro, Z2: localidades con predominancia de cielo intermedio; y Z3: localidades con predominancia de cielo cubierto.

Respecto al sDA: los objetivos según LEED, TDRé y CES Z2 son semejantes (Gráfico 3.1); considera aceptable la autonomía de la luz diurna en el espacio cuando al menos un 55% de la superficie tiene 300 lux el 50% del tiempo; y mejorada cuando la superficie supera el 75%. En CES el criterio varía \pm 5% en las zonas Z1 y Z3, esto es porque depende del cielo predominante y a mayor disponibilidad luminosa, mayor es la oportunidad de incrementar la autonomía de la luz diurna en el espacio.

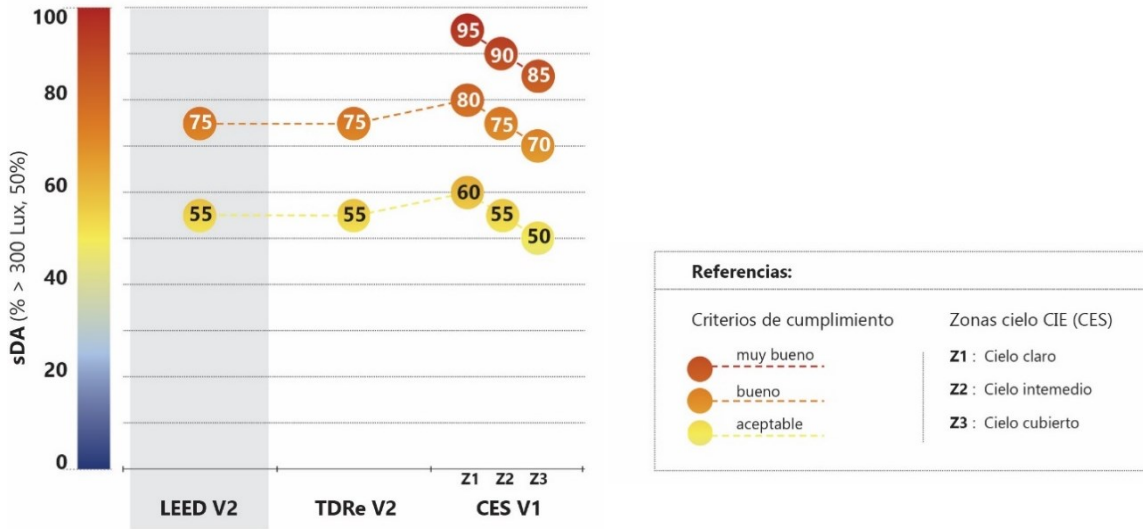


Gráfico 3.1-Criterios de cumplimiento de sDA (LEED vs. Normas chilenas). Fuente: elaboración propia

Respecto al UDI: existen diferencias respecto al rango de iluminancia útil admitido (Gráfico 3.2): PSBP V2 considera el rango más amplio de 100 a 3.000 lux, TDRé V2 de 200 a 3.000 lux y CES V1 el menor rango de 100 a 2.000 lux.

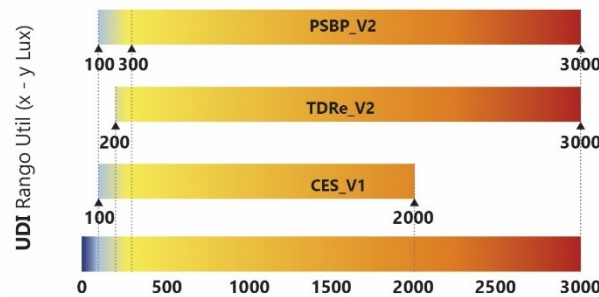


Gráfico 3.2-Rangos útiles UDI admisibles según norma PSBP V2, TDRé V2; CES V1. Fuente: elaboración propia

Respecto a los objetivos de cumplimiento, PSBP V2 y TDRé V2 consideran que la iluminancia útil de la luz diurna es deseable cuando el 80% del tiempo se encuentra dentro del rango útil; y TDRé asume un mínimo aceptable de 50%; y aunque los rangos no son semejantes se aproximan. En CES V1, al igual que con el parámetro anterior, el criterio varía según la predominancia del tipo de cielo: Z1 (cielo claro) UDI > 60% y Z3 (cielo cubierto) UDI > 40%. A mayor disponibilidad luminosa del cielo, mayor la oportunidad de lograr niveles de iluminancia útiles sostenidos en el tiempo. La comparación de objetivos de cumplimiento puede verse en el Gráfico 4.3 .

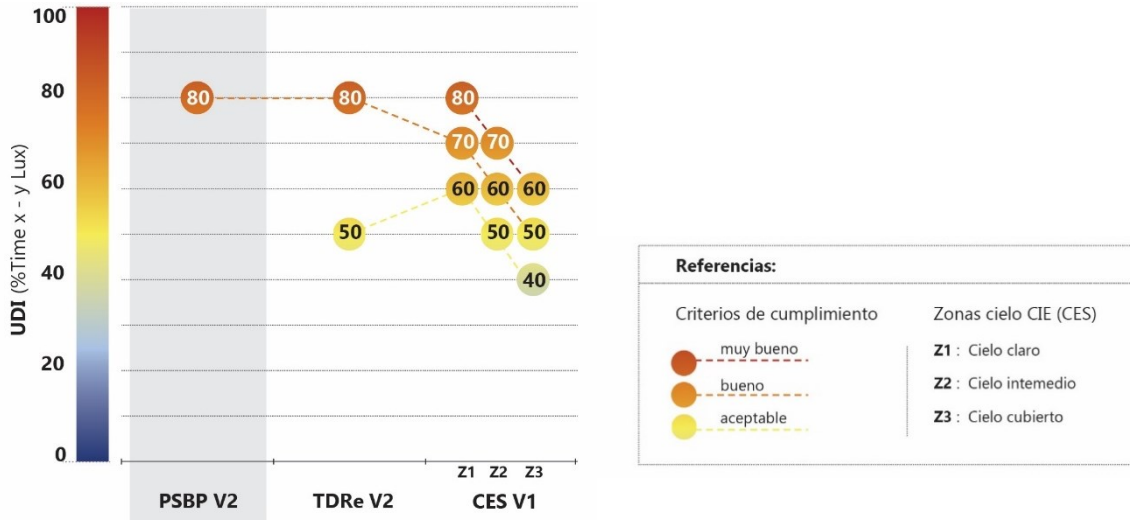


Gráfico 3.3- Criterios de cumplimiento de UDI (PSBP vs. Normas chilenas). Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra un resumen de las métricas y objetivos propuestos en normativas nacionales e internacionales.

Tabla 3.4 - Resumen de indicadores y objetivos normativas. Fuente: elaboración propia

Métrica	sDA		ASE		UDI rango		
LEED	300 lux,50%	≥ 55%	1000 lux, 250h	< 10%	-	-	
PSBP	-		-	-	100-3000 lux	≥ 80%	
TDRé V2	300 lux,50%		-	-	200-3000 lux	≥ 50%	
CES	300 lux,50%	Z1	≥ 60 %	-	-	Z1	≥ 60 %
		Z2	≥ 55 %	-	-	Z2	≥ 50 %
		Z3	≥ 50 %	-	-	Z3	≥ 40 %

Cabe señalar que el sistema de Certificación CES propone tres métodos de evaluación optativos (DF, UDI y sDA) con el objetivo de “aumentar los niveles de confort visual y disminuir el consumo energético de la iluminación artificial” (Instituto de la Construcción, 2014). No obstante, la evaluación del DGP; a pesar de ser el único método propuesto para determinar la incomodidad visual por deslumbramiento; se mantiene de cumplimiento voluntario.

DGP Deslumbramiento de la luz diurna

La métrica determina la probabilidad que una persona tenga incomodidad visual por el brillo de la luz diurna, analizando el contraste de luminancia percibido en el campo visual entre la

tarea y el plano de fondo. El deslumbramiento varía por la posición del observador respecto a la fuente de encandilamiento y depende de la iluminancia vertical en el campo visual, el brillo de la luminancia de la fuente, el ángulo sólido del brillo y el índice de posición de la fuente de encandilamiento. El DGP es considerada como la métrica fundamental para concluir acerca de la incomodidad de la luz del día por resplandor, pese a que no determina el nivel de iluminancia y debe combinarse con otra métrica (Mcneil, Burrell, 2016).

Tabla 3.5-Rango de deslumbramiento subjetivo. Fuente: Wienold and Christofferson, 2006.

Esquema DGP	Rango (%)	Descripción
DGP	< 0.35	deslumbramiento es imperceptible
	0.35-0.40	deslumbramiento es perceptible
	0.40-0.45	deslumbramiento es distorsivo
	≤ 0.45	deslumbramiento es intolerable

3.2 Comparación de los parámetros sDA-ASE con el UDI

UDI, sDA y ASE son métricas de evaluación de iluminancia sobre un plano horizontal, por lo que el área analizada y las consideraciones espaciales son similares en todos los casos. Las principales diferencias se encuentran en los valores objetivos y la información luz día entregada por la métrica:

1. La información medida: UDI analiza porcentaje de tiempo y sDA porcentaje de superficie, suponiendo al menos un 50% de tiempo.
2. Los límites de iluminancia: UDI define un rango de iluminancias global preferido por los usuarios con valores mínimos y máximos; sDA sitúa un requerimiento mínimo de iluminancia sin distinguir valores máximos y regula las altas iluminancias con ASE.
3. Los valores objetivos mínimos de iluminancia: sDA supone 300lux; UDI estima un umbral inferior dado que iluminancias entre 100 a 300 lux son útiles para realizar tareas con menor exigencia visual y pueden suplementarse con luz artificial.
4. Los valores objetivos máximos de iluminancia: en UDI el umbral máximo es 3.000 lux a mientras que en el método IES LM-83 define el umbral de ASE en 1.000 lux.

La definición del umbral máximo ha sido el principal motivo de cuestionamiento del método IES LM-83 por la comunidad académica, con un ASE de 1.000 lux basado en *“una diferencia de umbral razonable entre un “parche de luz solar” observable y áreas sombreadas adyacentes iluminadas por luz diurna difusa”*. (IESNA, 2012). Según Reinhart (2015), el umbral puede resultar muy estricto

impidiendo buenos niveles de luz día en los ambientes. Además, la definición resulta contraria a los estudios referidos a la preferencia de los ocupantes a altos niveles de iluminación diurna, y a la admisión de la luz solar directa en el espacio siempre que no interfiera con los requisitos visuales; así como a los hallazgos sobre los efectos beneficios no visuales de la luz para la salud y la productividad, y su importancia en el mantenimiento del ritmo circadiano de los ocupantes.

Una hipótesis planteada durante el desarrollo del trabajo es acerca del gran potencial en el planeamiento de iluminación en edificios que presenta UDI, la cual ofrece una visión dinámica espaciotemporal de la iluminación de la luz. El esquema de segmentación de iluminancias UDI en el plano de trabajo (UDI-s, UDI-a, UDI-e) permite interpretar de forma sencilla las iluminancias útiles, para zonificar el espacio en términos de provisión total de la luz diurna y definir la distribución del programa de acuerdo con los requerimientos de las distintas tareas. Informa de la correlación entre el uso de iluminación eléctrica permanente, suplementaria y alternativa, según se trate un segmento de UDI-f (insuficiente), UDI-s (suplementaria) o UDI-a (autónoma). Además, advierte de los altos niveles de iluminación que están asociados con la incomodidad y de las ganancias solares mediante el UDI-e (excedido) por ocurrencia de superaciones de un límite máximo de iluminancia. A pesar de que no distingue si la sobre iluminación es en origen por luz difusa o solar directa, es un indicador de que en determinadas áreas se pueda necesitar sombreado o control de ganancias solares cuando además se analiza el clima y la orientación. Por lo que, comprendido el rango de tolerancia para la penetración de la luz solar en los espacios de trabajo, y qué esfuerzos de mitigación pueden ser más exitosos para optimizar y mejorar la comodidad de los ocupantes, tiene un potencial para ser usado como indicador de deslumbramiento.

En el año 2012 los autores Mardaljevic, Andersen, Roy y Chrisoffersen realizaron un análisis exploratorio sobre la relación entre el UDI (medida en el plano de trabajo) y la probabilidad de deslumbramiento DGP por el resplandor de la luz diurna según las predicciones en la posición del ojo (medida de iluminación vertical); para determinar si UDI-e puede emplearse como proxy de deslumbramiento. Fue evaluada la iluminancia a nivel del plano de trabajo y a la altura del ojo humano para predecir la iluminación vertical en el ojo en las cuatro

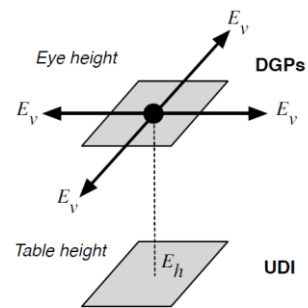


Figure 2: UDI calculation planes were the same size and directly below the planes used to predict vertical illuminance at the eye

Figura 3.1-Esquema de cálculo de UDI como proxy de deslumbramiento. Fuente: Mardaljevic, et. al (2012)

direcciones cardinales (Figura 3.1); medida que fue convertida a DGP mediante ecuaciones simplificadas. El estudio concluyó sobre la factibilidad de calcular el deslumbramiento sin recurrir a representaciones de luminancia, utilizando métodos indirectos a partir de los indicadores UDI-a y UDI-e; maximizando las iluminancias en el rango UDI-a de 300 a 3.000 lux y limitando la aparición de iluminancias > 3.000 lux en el rango UDI-e.

A pesar de que los autores refieren a la evaluación como una prueba de concepto, que requiere una segunda etapa de análisis *“exhaustiva de sensibilidad/paramétrico, para determinar el dominio de aplicabilidad de las métricas UDI como un proxy para la probabilidad de deslumbramiento de luz diurna”*; es una aproximación a que UDI es una métrica sólida para justificar un mayor desarrollo de este enfoque. (Mardaljevic et. Al, 2012). Debido a que el estudio aún se encuentra en una primera fase de validación: para el desarrollo del trabajo se considerará el uso de DGP como parámetro irremplazable de verificación de la luminancia y ausencia de incomodidad visual; el cual podrá compararse con la interpretación de UDI-e resultante; y es un tema que podrá ser abordado en trabajos futuros.

3.3 Metodología de evaluación de estrategias de iluminación natural

Para el desarrollo de la metodología CBDM se explora el programa de modelamiento *DIVA for Rhino* (*Design Iterate Validate Adapt*), *plug-in* para Rhinoceros-NURBS y Grasshopper con interfaz de cálculo Radiance, capaces de simular el escenario real (Reinhart et al., 2006), utilizando un modelo geométrico y un archivo climático de la localidad de interés. En la Figura 3.2 se indica la interacción de los softwares utilizados para la evaluación lumínica y la información ingresada en cada uno de ellos.

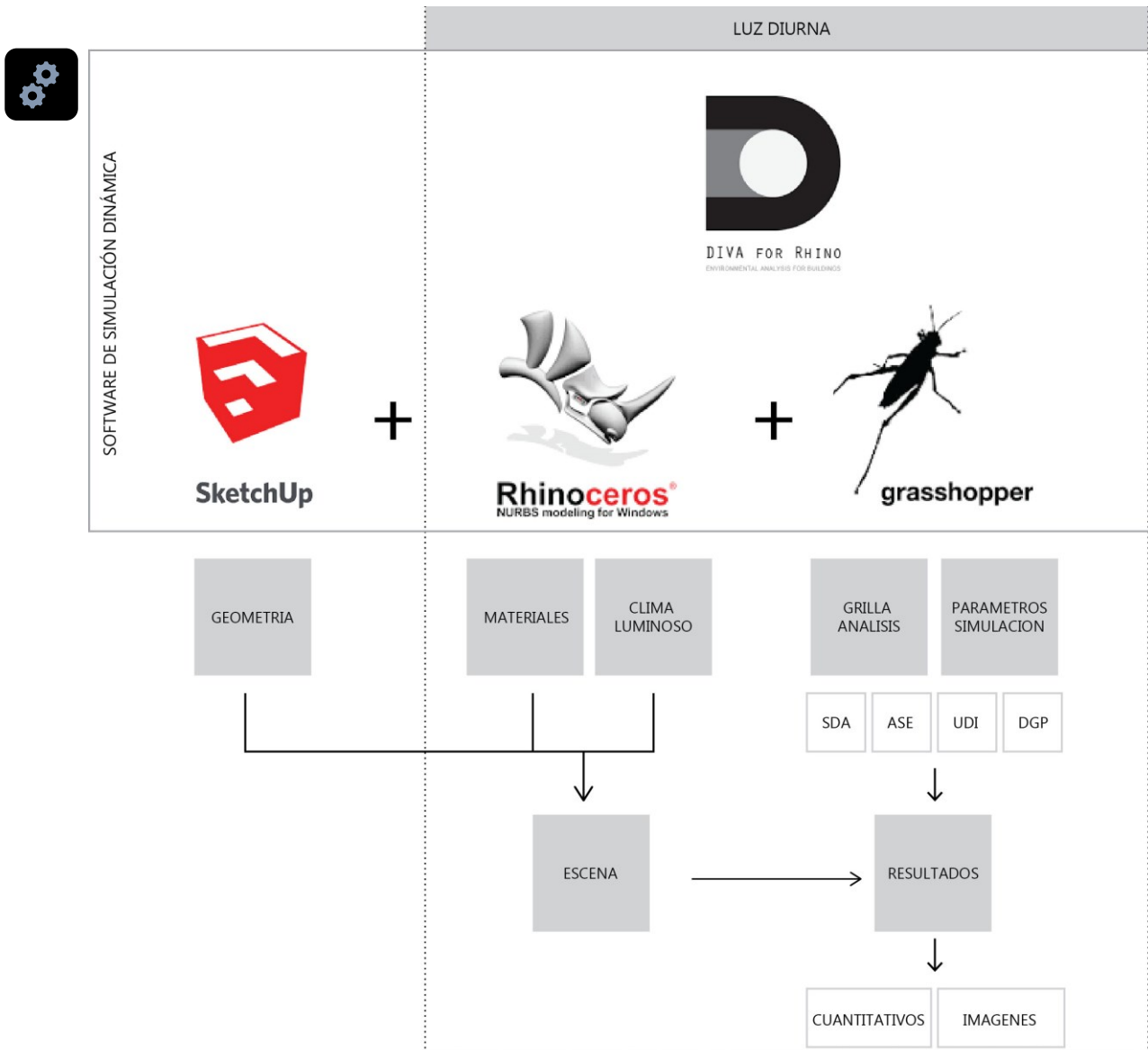


Figura 3.2 - Diagrama de interacción de aplicaciones para evaluación lumínica. Fuente: elaboración propia.

Se considera *una geometría* en 3D con las principales superficies, obstrucciones fijas y/o fuentes de deslumbramiento del entorno inmediato; *la ubicación y clima* con la posición relativa del edificio respecto al cardinal Norte; *las áreas de evaluación* con grilla de análisis a nivel del plano de trabajo y sensores de medición orientados hacia arriba; *el período de análisis* representativo de las horas operativas del edificio. Las principales características de la escena luminosa para la evaluación se detallan en la Tabla 3.6, como una lista de comprobación para la construcción del modelo lumínico.

Tabla 3.6 - Lista de comprobación para la construcción del modelo lumínico. Fuente: elaboración propia.



1	SketchUp (V8)	Definición de la geometría arquitectónica		
		1	Pisos, cielos, muros interiores, muros exteriores, aberturas traslucidas	
		2	Aberturas: considerar separadamente vidrios y subdivisión de marcos	
		3	Incluir equipamiento principal y mobiliario interior	
		4	Incluir principales obstrucciones exteriores del edificio y del entorno	
		5	Incluir potenciales fuentes de deslumbramiento	
		6	Definir cada uno de los elementos en distintas capas. Cada capa corresponderá a un material con una reflectancia asociada.	
		7	En el piso: generar el polígono del área de análisis, distanciado 0.50m del perímetro del recinto	
2	Rhinoceros + DIVAforRhino	Definición del clima luminoso		
		9	Localización mediante archivo climático (.epw)	
		10	Asignación de materiales superficiales del archivo material (.rad) Materiales plásticos con reflectancia: RGB, especularidad, rugosidad Vidrios con transmisividad (relación de la luz total que pasa a través del vidrio) por conversión de la transmitancia (relación de la luz incidente normal medida, valor suministrado por el proveedor del vidrio).	
3	Grasshopper+ DIVAforRhino	Definición de los parámetros de evaluación		
		11	Asignación de recintos a evaluar	
		12	Definición de plano de análisis: Grilla de puntos 0.50m x 0.50m distante a 0.80m del nivel del piso (Nabil A and Mardaljevic J, 2005). Distancia de 0.50m del perímetro de la pared. (J Mardaljevic et al., 2012) (Mardaljevic, J., 2015)	
		13	horario de oficina típico de 10 horas de 8:00 a 18:00hs (3650hs)	
		14	Definición de parámetros de simulación indicando umbrales para cada caso	
4	DIVAforRhino	Simulación dinámica		
		15	Interpretación de resultados cuantitativos, cumplimiento objetivo	
		16	Interpretación de imágenes con la distribución luminosa	

Capítulo 4. Estrategias de iluminación natural en contextos de Chile

El objetivo del capítulo es construir diseños de iluminación diurna efectivas para espacios de oficina con fenestración vertical con luz unilateral en zonas de Chile con distintas condiciones de cielo; y concluir sobre la efectividad de los criterios de diseño aplicados. El desarrollo del capítulo se inicia con la construcción de un prototipo de oficina a partir de los aspectos formales, aberturas y criterios de espacio interior definidas en la guía de diseño del Capítulo 2.2. El modelo es adaptado a tres zonas de Chile seleccionadas a partir del análisis de las variables climáticas, en donde aplicar estrategias de iluminación natural efectivas a los distintos escenarios. Para validar las estrategias se propone un procedimiento de evaluación a partir de las métricas revisadas en el Capítulo 3.

4.1 Construcción de un prototipo de oficina

Debido a que se trata de un estudio teórico proyectual se construye un prototipo de oficina como un espacio arquitectónico de referencia al que puedan integrarse estrategias de iluminación natural en la fenestración vertical, e ilustrar la cantidad y distribución de la luz diurna dentro de los interiores.

Se propone como unidad de análisis, el cual al agruparse pueda admitir distintas configuraciones geométricas de huella edilicia y altura, como se ve en la

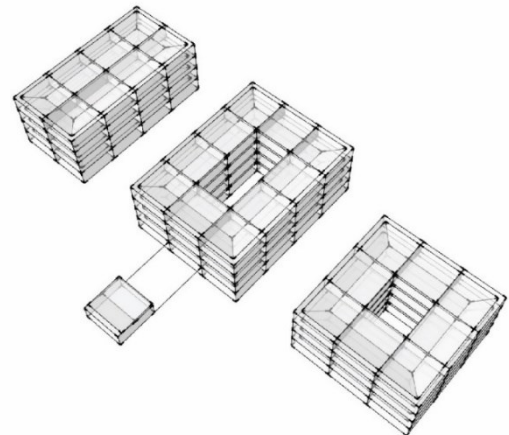


Figura 4.1. Esto podría permitir la adaptación a los distintos requerimientos lumínicos de cada zona climática.

El prototipo cumple con las recomendaciones de distancias máximas del observador a la fachada y profundidad de la planta para garantizar las visuales de los ocupantes al exterior anteriormente analizadas; por lo que la geometría buscará definir una planta poco profunda, es decir minimizar la distancia del núcleo del edificio al perímetro.

Figura 4.1-Esquema de configuración del prototipo.

Fuente: elaboración propia.

Debido a que se trata de una exploración proyectual de iluminación natural que además busca considerar la optimización energética, se toma como premisa una relación de ventana a pared de 40% (WWR). Las características geométricas del prototipo generado son:

- » Es un espacio cuadrado de 9.15 m de lado. Las dimensiones están determinadas por la distancia máxima del ocupante a la fachada, en cuanto al alcance de la iluminación percibida desde las fenestraciones y las visuales al exterior.
- » La abertura se coloca en una de las paredes en dos aperturas de ventanas: una apertura de luz diurna superior y una apertura de vista inferior. Las dos aberturas de las ventanas tienen 5.0 m de ancho y una posición central, dejando dos metros de pared a cada lado.
- » La abertura de la ventana superior es de 1.0 metro de altura, comenzando a una altura de 2.20 metros. La abertura de la ventana inferior es de un 1.4 metros de altura, comenzando a una altura de 0,8 metros para lograr vistas al exterior desde una posición sentado.
- » El área de la pared de la ventana es de 30.6 m², y la superficie del piso es de 84 m². El área total de la ventana es de 12 m².
- » La altura del cielo es de 3.00m, incrementándose en una diagonal hacia el perímetro del recinto alcanzando 3.35m.
- » La abertura se considera orientada hacia el Norte.

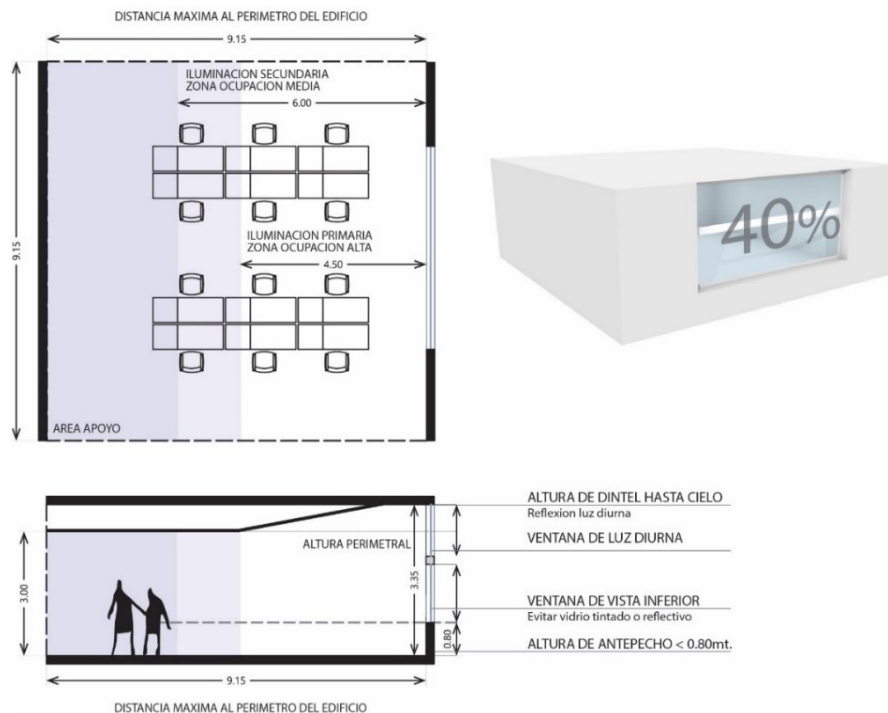


Figura 4.2-Prototipo de oficina según los criterios de diseño. Fuente: elaboración propia.

4.2 Estudio de casos en el contexto de Chile

El objetivo es analizar contextos climáticos con distintas condiciones lumínicas en Chile. Para la selección de los escenarios se realiza una preevaluación de los cielos característicos expuestos en la plataforma Ilumina Chile. La misma provee información de 10 ciudades distribuidas a lo largo del territorio chileno desde Punta Arenas hasta Iquique (Tabla 4.1). Como resultado se concluye que las ciudades de Calama, Santiago y Puerto Montt presentan condiciones de cielo predominante diferentes entre sí y que, además, debido a su ubicación geográfica en las zonas norte, centro y sur del país, contextualizan características climáticas diferenciadas.

Tabla 4.1-Clasificación de cielos predominantes CIE. Fuente: Datos proporcionados por Ilumina Chile.

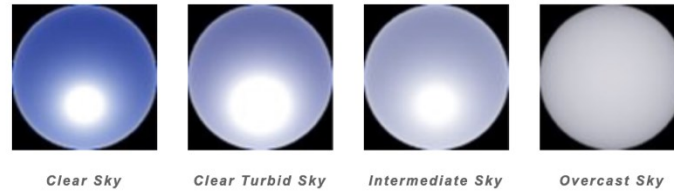
Distribución de Cielos										
Ciudades de Chile	IQUIQUE	CALAMA	ANTOFAGASTA	LA SERENA	SANTIAGO	CONCEPCIÓN	TEMUCO	PUERTO MONTT	COYHAIQUE	PUNTA ARENAS
Latitud	LAT (20,25S) LON (70,13W)	LAT (22,47S) LON (68,92W)	LAT (23,43S) LON (70,43W)	LAT (29,90S) LON (71,25W)	LAT (33,38S) LON (70,78W)	LAT (36,77S) LON (73,05W)	LAT (38,75S) LON (72,67W)	LAT (41,47S) LON (72,93W)	LAT (45,23S) LON (72,40W)	LAT (53,90S) LON (70,55W)
Zona Climática NCh 1079 Of.2008	1 NL	2 ND	1 NL	4 CL	5 CI	6 SL	7 SI	6 SL	8 SE	8 SE
Clear Sky	12%	50%	30%	7%	19%	14%	12%	10%	15%	6%
Clear Turbid Sky	27%	23%	25%	19%	22%	21%	16%	12%	18%	22%
Clear Sky + Turbid Sky	39%	73%	55%	26%	41%	35%	28%	22%	33%	28%
Intermediate Sky	34%	16%	28%	36%	29%	32%	31%	32%	31%	43%
Overcast Sky	27%	11%	17%	39%	30%	32%	41%	46%	36%	29%
	NORTE			CENTRO			SUR			

En el desarrollo de este capítulo se analizan las principales variables de las cuales se obtienen importantes definiciones para el diseño de iluminación natural, coherente con las características del emplazamiento.

4.2.1 Análisis de las características climáticas

Nubosidad asociada a la frecuencia de cielo (CIE)

La frecuencia en la nubosidad es uno de los factores que inciden en las decisiones de diseño de estrategias de iluminación asociadas a la distribución de la luz y al control solar. Esta puede variar considerablemente dependiendo del emplazamiento. Para establecer las características de esta variable se ha considerado la revisión del sitio web Ilumina Chile (<http://iluminachile.ubiobio.cl/>), desarrollada por el departamento de Arquitectura de la Universidad del Bio Bio, en la cual se presentan distintas calificaciones de cielo para varias ciudades del territorio nacional. El objetivo de esta herramienta es clasificar los distintos tipos de cielos en CIE Standard (claro, claro-turbio, intermedio y nublado), determinando su distribución y frecuencia en el transcurso del año.



Comparación Promedios de Frecuencia anual de cielos

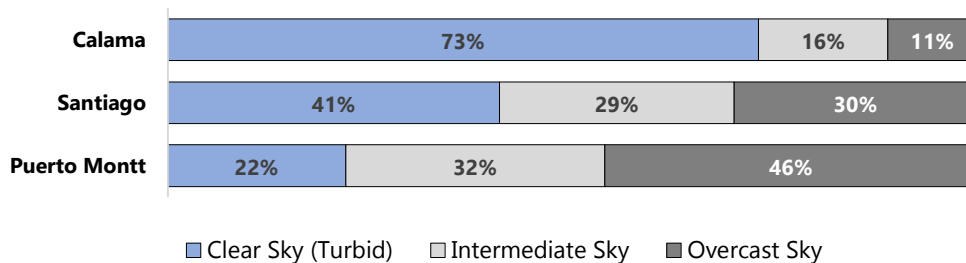
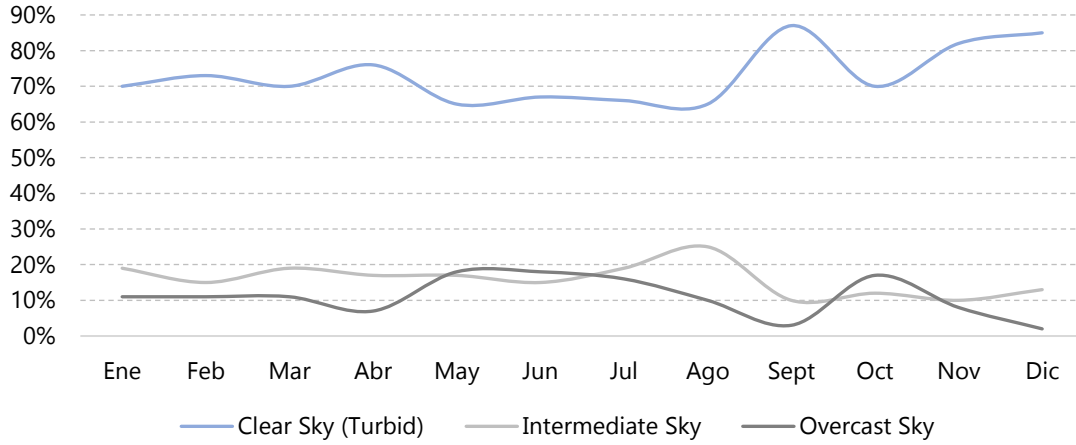


Figura 4.3- Comparación de frecuencia promedio anual de cielos. Fuente: Ilumina Chile.

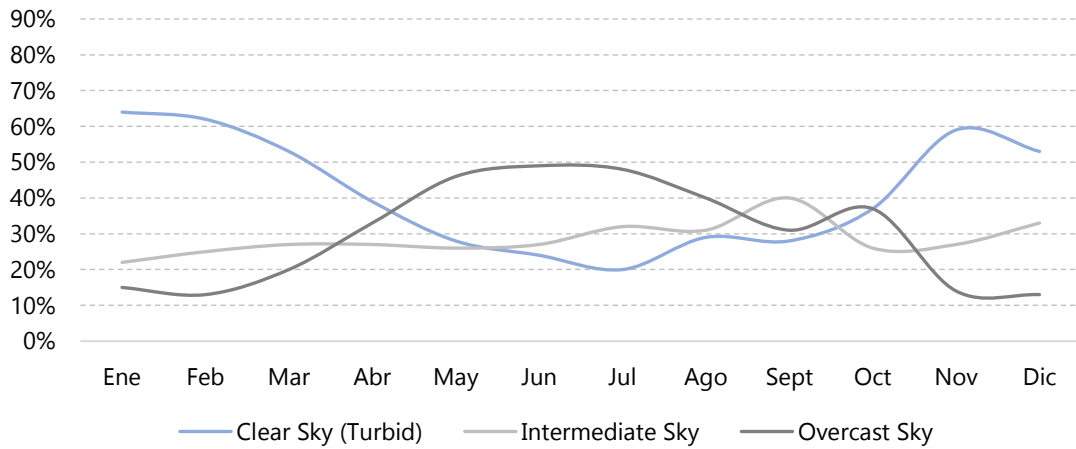
La Figura 4.3 resume las frecuencias de cielos para las zonas evaluadas. Debido a que las características del cielo claro y cielo claro turbio admiten las mismas estrategias y analizan de forma conjunta, estableciendo para el análisis 3 cielos predominantes: cielo claro (claro-turbio), cielo intermedio y cielo cubierto. Se puede apreciar que existen diferencias importantes en las frecuencias de cielos para todos los casos (Gráfico 4.1). Para el caso de Calama, ubicado al extremo norte del país, predominan los cielos despejados, mientras que en Puerto Montt es más característico un cielo nublado. La distribución para la ciudad de Santiago es bastante homogénea en tanto, con una leve tendencia a cielos despejados durante el transcurso del año.

Capítulo 4: Estrategias de iluminación natural en contextos de Chile

Calama - Predominancia anual de cielos



Santiago - Predominancia anual de cielos



Puerto Montt - Predominancia anual de cielos

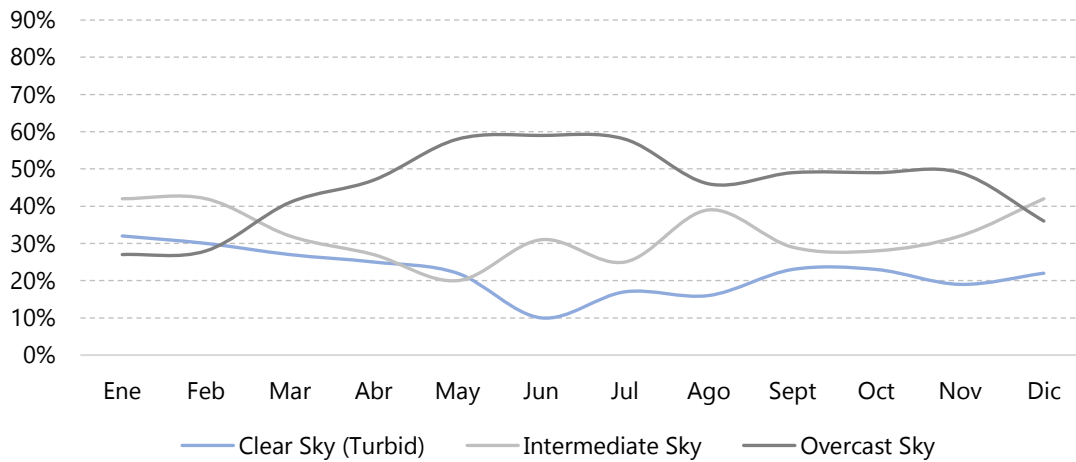


Gráfico 4.1- Predominancia anual de cielos por ciudad. Fuente: Elaboración propia datos Ilumina Chile.

Temperatura

El análisis de las temperaturas durante el transcurso del año aporta significativamente en la elaboración de las estrategias de protección solar, pues permite establecer la relación de temperaturas entre el confort del edificio y las del entorno en la que se encuentra emplazado. Para obtener esta información se han analizado los datos climáticos horarios obtenidos desde el software Meteonorm v7.1, que incluye información de estaciones climáticas alrededor de todo el mundo. Desde esta herramienta se obtienen los archivos EPW que contienen el detalle horario para las distintas variables que inciden en los análisis de modelamientos dinámicos de los edificios en la actualidad. El resumen de esta variable, para las zonas en estudio, se puede revisar en detalle en el Anexo A. Además, se ha revisado que exista una adecuada correlación con la información disponible en la normativa local, específicamente con la NCh1079. A continuación, se presentan los valores de temperatura media, medias mínimas y medias máximas para cada mes:

Tabla 4.2 - Comparación de temperaturas medias mínimas mensuales. Fuente: Meteonorm v7.1

T ° Mínima Media (°C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Calama	5,1	5,5	4,5	2,2	0,7	-0,5	-0,9	-0,9	0,4	1,7	2,8	3,6
Santiago	11,4	10,8	8,9	6,0	4,6	2,7	2,5	3,4	4,7	6,7	8,6	10,4
Puerto Montt	9,4	9,1	8,0	6,7	6,0	4,1	3,9	4,0	4,2	5,5	7,2	8,6

Tabla 4.3 - Comparación de temperaturas medias máximas mensuales. Fuente: Meteonorm v7.1

T° Máxima Media (°C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Calama	24,1	24,1	23,6	23	22,1	20,6	20,9	21,5	22,6	23,7	25,2	24,4
Santiago	29,8	29,4	27,1	23,2	18,3	14,9	14,7	16,4	18,7	22,2	25,8	28,6
Puerto Montt	19,6	19,2	17,8	15,2	12,7	10,7	10,3	11,1	12,8	14,4	16,6	18,5

Tabla 4.4 - Comparación de temperaturas medias mensuales. Fuente: Meteonorm v7.1

T° Media (°C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Calama	15,1	14,9	13,9	12,1	10,3	8,7	8,6	9,4	11,2	12,7	14,1	14,8
Santiago	20,2	18,1	16,7	13,1	10	7,7	7,3	8,6	10,6	13,6	16,6	19,2
Puerto Montt	14,3	13,6	12,1	10,1	8,8	6,7	6,6	6,8	7,8	9,6	11,6	13,4

De los resultados se puede concluir que las mayores temperaturas se producen en la ciudad de Santiago, entre los meses de noviembre a marzo. La ciudad de Calama presenta una estabilidad en las temperaturas máximas a lo largo de todo el año. Sin embargo, es la que presenta una mayor oscilación térmica por mes (promedio de 21°C anual). Por último, Puerto Montt registra las menores temperaturas durante todo el año, principalmente entre los meses de mayo a octubre.

Radiación Solar

La radiación solar es otro parámetro que permite estimar una aproximación sobre las ganancias al interior de los recintos. Esta variable, en zonas frías reviste un potencial que puede ser aprovechado para reducir los requerimientos de calefacción en la edificación, no obstante, en zonas cálidas o en edificios con alta ganancia interna puede ser la causa de sobrecalentamiento que incrementa los requerimientos de refrigeración, afectando además en términos lumínicos el confort de los espacios. Para el análisis de la radiación solar se ha considerado la revisión del sitio web del Ministerio de Energía (<http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>), desarrollada por el departamento de geofísica de la Universidad de Chile, de la cual obtener información validada para el diseño de sistemas de aporte solar, la cual desarrolla un “modelo de transferencia radiativa” que permite calcular la radiación solar incidente en superficie para cualquier localidad del país. De esta forma se obtienen los valores de radiación directa normal por hora para las ciudades evaluadas, los que son presentados en las tablas siguientes (para ver la tabla completa ver Anexo A).

Tabla 4.5 - Valor máx. promedio de la radiación directa normal hora [W/m²]. Fuente: Min. Energía Chile.

Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Calama [W/m²]	1018	1018	1042	1016	1016	998	998	1011	1036	1054	1064	1042
Santiago [W/m²]	803	791	738	624	490	504	457	473	549	612	742	793
Puerto Montt [W/m²]	677	634	565	407	536	547	521	392	528	509	521	590

Tabla 4.6 - Valor promedio por hora de la radiación directa normal [W/m²]. Fuente: Min. Energía Chile.

Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Calama [W/m²]	842,3	815,9	896,1	833,0	924,1	898,8	899,0	813,7	900,9	870,6	858,1	849,8
Santiago [W/m²]	647,5	658,5	563,6	521,5	421,1	431,2	378,1	390,5	452,7	532,1	582,4	654,1
Puerto Montt [W/m²]	491,7	493,3	403,4	306,0	290,2	290,7	284,3	281,5	376,3	332,7	360,9	444,9

Las Tabla 4.5 y Tabla 4.6, resume los valores promedios para las zonas evaluadas. Se puede apreciar que existen diferencias importantes en la intensidad de radiación directa para todos los casos. Para el caso de Calama, ubicado al extremo norte del país, la radiación es elevada y constante durante todo el año, mientras que en Puerto Montt es característico por radiaciones bajas durante todo el año, disminuyendo aún más en los meses más fríos. La incidencia para la ciudad de Santiago es intermedia, con tendencia a altas radiaciones en los meses cálidos y medias en los meses fríos.

Altura Solar

El análisis de altura solar define uno de los parámetros más incidentes en el diseño de protecciones solares puesto que permiten un adecuado confort lumínico en los planos de trabajo y disminuyen los potenciales riesgos de sobrecalentamiento en los edificios. La Tabla 4.7 y Tabla 4.8, presentan los resultados comparativos para las tres ciudades, (para ver la tabla completa ver Anexo A).

Tabla 4.7- Altura solar máxima para solsticios y equinoccios. Fuente: dato climático.

Altura Máxima [Grados]		21-dic	21-sept	21-jun	21-mar
Calama	12:30hrs	88,7	66,5	44,0	67,5
Santiago	12:30hrs	79,8	55,6	33,1	56,8
Puerto Montt	12:30hrs	72,0	47,5	25,1	48,9

Tabla 4.8 - Altura solar mínima para solsticios y equinoccios (8:00hrs y 18:00hrs.). Fuente: dato climático.

Altura Mínima [Grados]		21-dic	21-sept	21-jun	21-mar
Calama	8:00-18:00hrs	16,0	6,2	5,3	10,0
Santiago	8:00-18:00hrs	20,8	7,0	1,5	10,6
Puerto Montt	8:00-18:00hrs	24,4	7,8	1,0	11,3

En todos los casos la máxima altura solar se obtiene aproximadamente a las 12:30hrs. En épocas de verano las diferencia en la latitud genera variaciones de 17º aproximados entre las zonas más extremas (Calama y Puerto Montt). La altura máxima de la ciudad de Santiago coincide con el promedio de las aturas máximas de estas dos ciudades extremas. Para acotar el análisis de alturas y definir rangos de diseño se considera la altura mínima entre los horarios de funcionamiento comunes para las oficinas en Chile (8:00hrs. – 18:00hrs.). De esta forma para la ciudad de Santiago se tiene que la altura solar oscila entre los 20,8º y los 79,8º para el 21 de diciembre. Lo mismo aplica para todas las fechas evaluadas.

4.2.2 Resumen de variables climáticas por ciudad

Calama. Presenta una condición climática cálida. El Gráfico 4.2 resume la tendencia en el comportamiento mensual de las variables climáticas para la ciudad. Los niveles de radiación son altos y homogéneos durante el año. La temperatura media resulta también homogénea durante el año con variaciones de apenas 4ºC entre invierno y verano. Los cielos son prácticamente despejados durante todo el año y los ángulos solares son los más altos que en los casos anteriores. Las estrategias de diseño en la fenestración vertical para Calama apuntarán a proteger de la radiación durante todo el año, puesto a que la radiación reviste un riesgo potencial de sobrecalentamiento.

Capítulo 4: Estrategias de iluminación natural en contextos de Chile

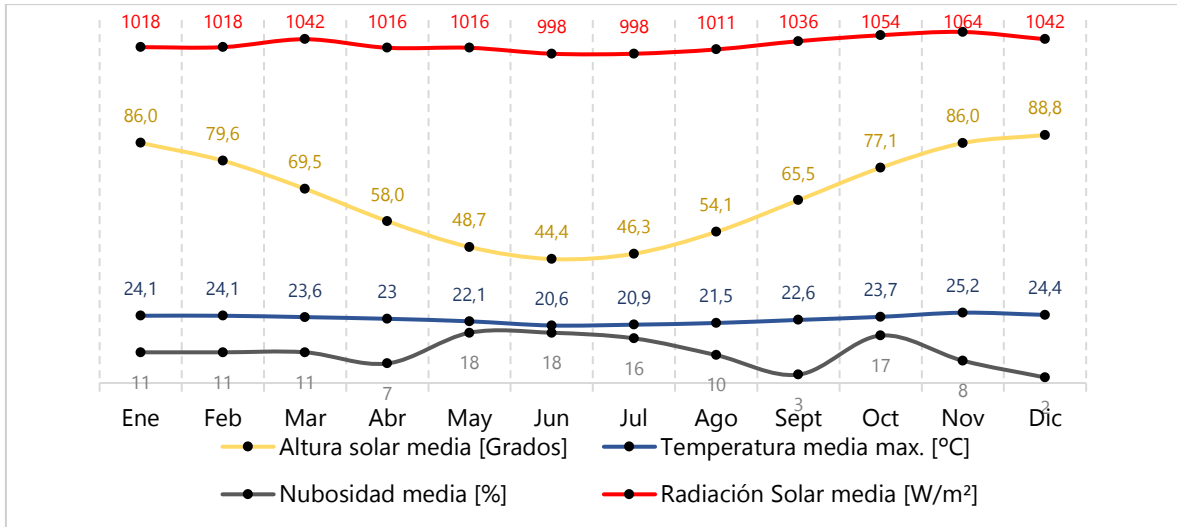


Gráfico 4.2-Análisis de variables climáticas para diseño. Calama. Fuente: Elaboración propia.

Santiago. Presenta una condición climática intermedia. El Gráfico 4.3 resume la tendencia en el comportamiento mensual de las variables climáticas para la ciudad. Los niveles de radiación varían anualmente siendo más altos en meses de verano, coincidente con la altura solar en estos meses y con una temperatura media cercana a los 30°C con cielos prácticamente despejados. Sin embargo, en el período frío la radiación disminuye, junto con las alturas solares y las temperaturas. En este período, la predominancia del cielo es cubierto, por lo que la incidencia solar no reviste un riesgo de sobrecalentamiento. Las estrategias de diseño en la fenestración vertical apuntarán a proteger de la radiación de setiembre a abril y captar las ganancias solares pasivas de mayo a agosto.

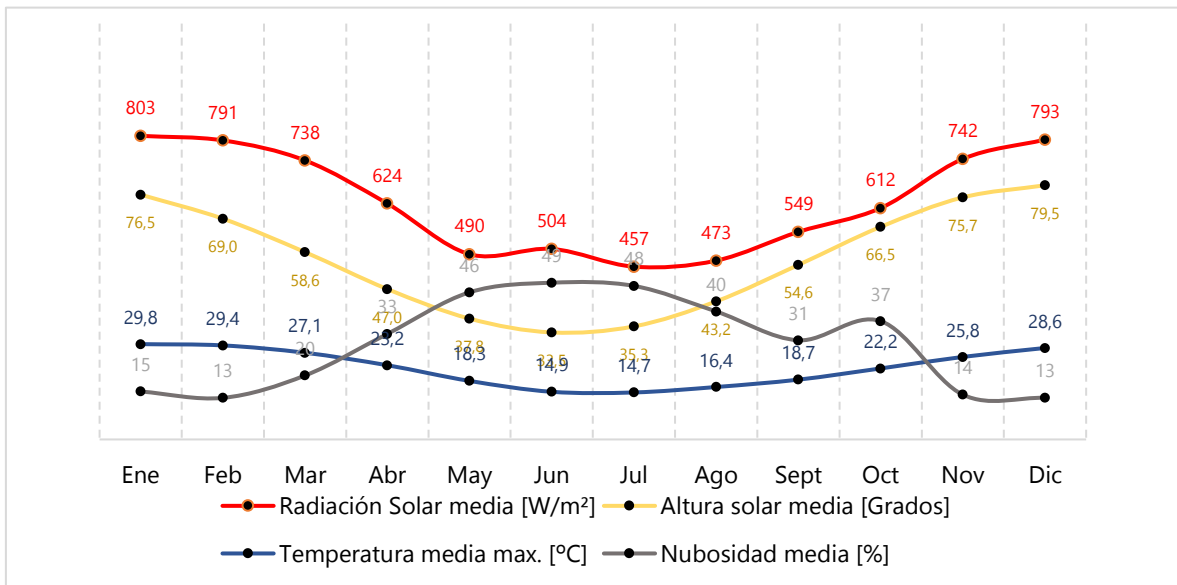


Gráfico 4.3 - Análisis de variables climáticas para diseño. Santiago. Fuente: Elaboración propia.

Puerto Montt. Presenta una condición climática fría. El Gráfico 4.4 resume la tendencia en el comportamiento mensual de las variables climáticas para la ciudad. Los niveles de radiación son relativamente homogéneos durante el año, alcanzando su valor máximo en los meses de enero y febrero. La temperatura media en esta estación es cercana a los 20°C con cielos prácticamente despejados. Desde los meses de marzo en adelante, el incremento de la nubosidad coincide con la disminución de la radiación solar y la temperatura. La predominancia es cielo cubierto, por lo que la incidencia solar no reviste un riesgo de sobrecalentamiento. Las estrategias de diseño en la fenestración vertical apuntarán a proteger de la radiación de diciembre a febrero y captar las ganancias solares pasivas de marzo a noviembre.

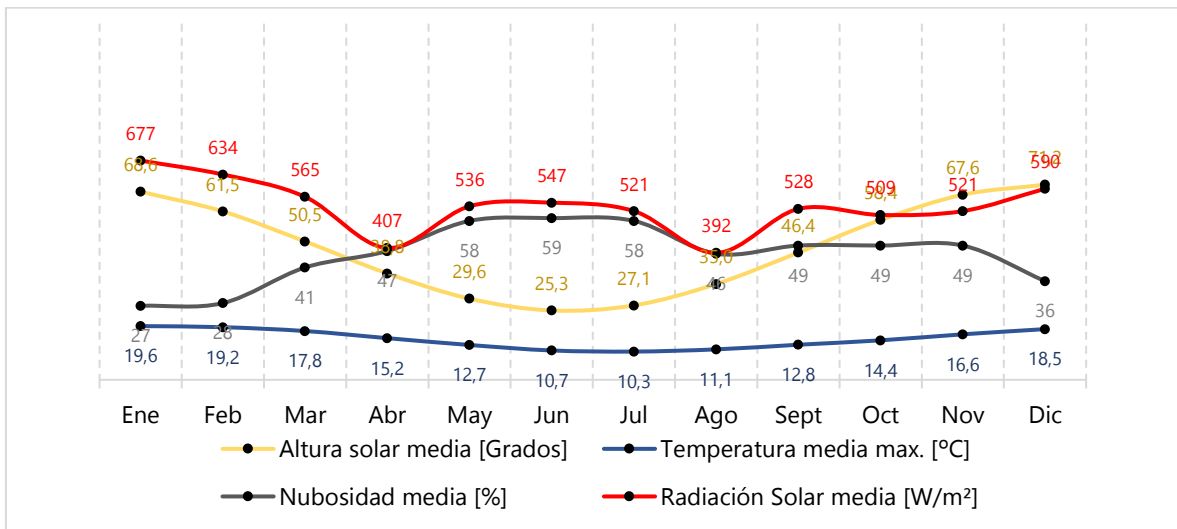


Gráfico 4.4-Análisis de variables climáticas para diseño. Puerto Montt. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Validación de estrategias de iluminación natural

Se implementa un procedimiento de validación de las estrategias de iluminación natural (Figura 4.3). La interpretación de las condiciones climáticas orienta de las estrategias de diseño óptimas para los distintos contextos; la interpretación de los indicadores resultantes en el modelamiento dinámico permite concluir sobre la efectividad de la estrategia o la necesidad de ajustarla para lograr el objetivo de iluminación natural.

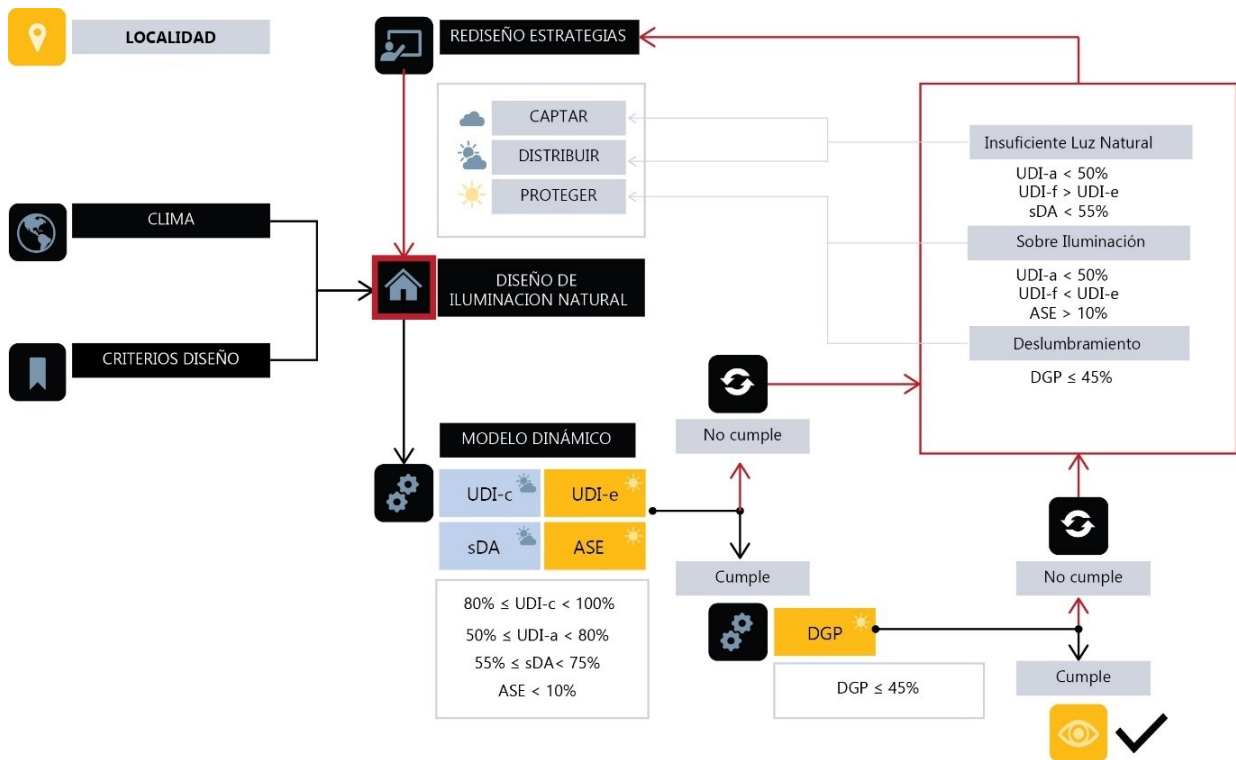


Figura 4.4- Procedimiento para la validación de estrategias de diseño de iluminación natural. Fuente: elaboración propia.

- 1) **Definición del diseño de iluminación natural** para una localidad determinada, a partir del *Análisis del clima* y los *Criterios de diseño* analizados.
- 2) **Validación de las estrategias** implementadas utilizando el *Método CBDM*. La efectividad de las estrategias será evaluada con dos métricas: la iluminancia mediante UDI en sus diferentes segmentos, SDA y ASE; y la luminancia con DGP.

3) **Evaluación de iluminancia (UDI, SDA, ASE):**

1. Lograr un UDI-c (combinado) > 80% y que el porcentaje que esté fuera de rango sea equilibrado entre UDI-f (insuficiente) y (UDI-e) excedido para conseguir una iluminancia homogénea en el espacio.
2. Lograr un UDI-a próximo al 50% para zonificar los segmentos de rango.
3. Lograr un sDA > 55% - con un valor ASE < 10%

Si el objetivo:

- A. *No cumple*: se analizan los indicadores para el rediseño de estrategias.
 - » **Si UDI-f > UDI-e o sDA < 55%** se buscará captar y distribuir la luz diurna.
 - » **Si UDI-f < UDI-e o ASE < 10%** se buscará controlar o proteger el exceso de luz diurna. Se reevalúan mediante CBDM.
- B. *Cumple*: se procede a la evaluación de luminancia para garantizar que no se produzcan situaciones de incomodidad visual.

4) **Evaluación de iluminancia (DGP):**

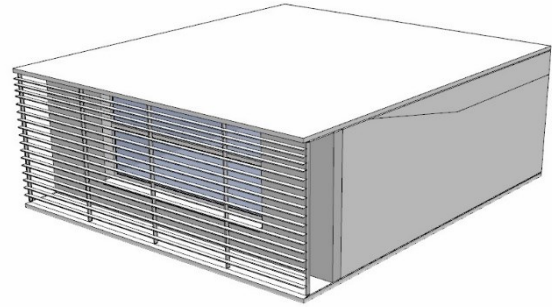
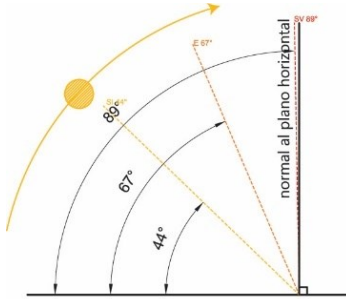
1. Lograr $DGP \leq 45\%$ para garantizar que no existe incomodidad visual intolerable por deslumbramiento.

Si el objetivo:

- A. *No cumple*: se rediseñan estrategias para controlar o proteger el exceso de la luz diurna. Se reevalúan mediante CBDM.
- B. *Cumple*: el diseño de iluminación natural se asume efectivo. Se analizan los indicadores para determinar si es necesario incorporar elementos dinámicos de protección operadas por el usuario para lograr un confort visual óptimo.

4.3 Estrategias de diseño de iluminación natural aplicadas a los contextos definidos

4.3.1 Calama

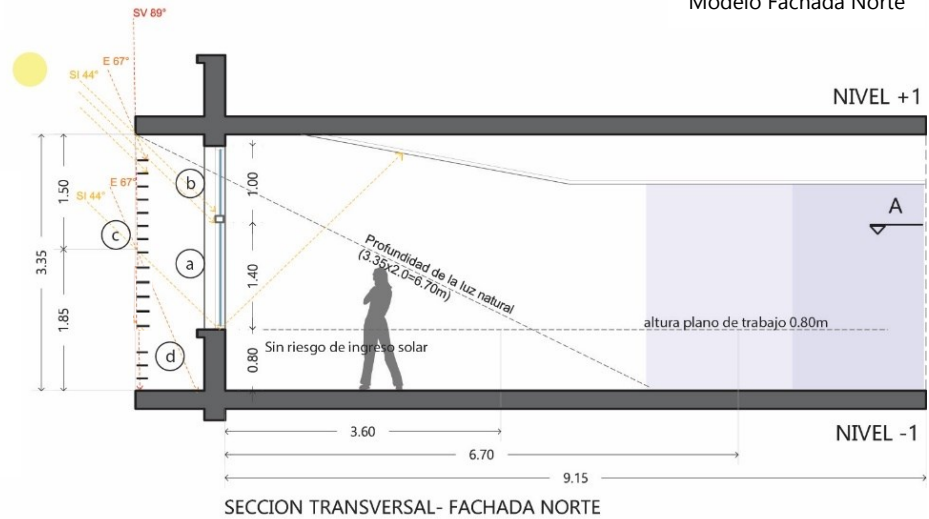


Alturas solares máximas - Calama

Modelo Fachada Norte

Estrategias de iluminación natural aplicadas a Calama

- Distanciamiento entre abertura y perímetro, espacio veranda de 1.5m.
- Dispositivo de sombreado externo con lamas horizontales fijas cada 0.1m.
- Lamas perforadas al 50% para prevenir oscurecimiento.
- Coeficientes de R% elevado en superficies de veranda.
- Acristalamiento VLT diferenciado por abertura: función visión VLT_{vw} 70% - función iluminación VLT_{dw} 79%.



SECCION TRANSVERSAL- FACHADA NORTE

Protecciones Solares,

Celosías horizontales perforadas 50% transparencia.
Distanciamiento 15 cm

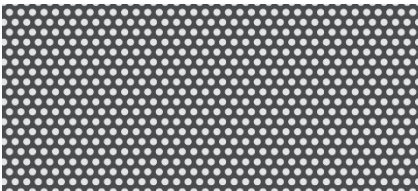
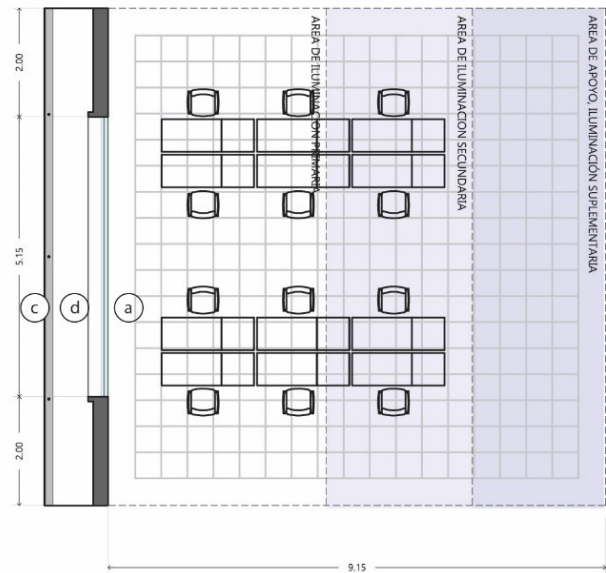


Imagen de referencia.



PLANTA SECCION A - PLANO DE TRABAJO

Del análisis climático realizado se definen intensiones de diseño de iluminación coherentes con las características del emplazamiento:

- » Protección de aberturas de la radiación solar en las dos aberturas. Será un apantallamiento vertical, de lamas horizontales fijas perforadas y distantes a 0.15 m entre ellas.
- » Distanciamiento entre abertura y perímetro. La protección solar se ubica a 1.5 metro de la línea de fachada generando un espacio de sombra “veranda”, siendo una zona ventilada que permita disminuir las temperaturas cercanas a la fenestración vertical para evitar las conducciones.
- » Dispositivo de sombreado externo con lamas horizontales fijas cada 0.1m. Las lamas se dimensionan para obstruir los ángulos incidentes durante todo el año 89° solsticio verano, 67° equinoccios y 44° solsticio de invierno sin obstruir por las visuales al exterior.
- » Lamas perforadas al 50% para prevenir oscurecimiento. El material de la celosía propone con una transparencia de perforación del 50% tal como se ve en la imagen de referencia, siendo permeable al traspaso de la luz diurna.
- » Coeficientes de R% elevado en superficies de veranda. Incremento de reflexiones del espacio veranda con colores claros de altas reflectancias para disminuir la temperatura por conducción e incrementar las reflexiones de iluminación.
- » Coeficiente de transmisión luminosa de los vidrios. Acristalamiento VLT diferenciado por abertura: función visión VLT_{vw} 70% - función iluminación VLT_{dw} 79%.

Se realiza la evaluación con el método CBDM métricas sDA-ASE y rangos UDI para analizar la efectividad de las estrategias. La Tabla 4.9 muestra los diagramas de iluminancias y resultados analizados, mostrando el cumplimiento de los objetivos. Para verificación la eficacia de la protección solar y el riesgo al deslumbramiento, se analiza DGP. Los resultados en la Tabla 4.10 muestran que no existe riesgo de deslumbramiento.

Tabla 4.9- Resultados de iluminancia mediante sDA-ASE y UDI-UDI-e. Calama

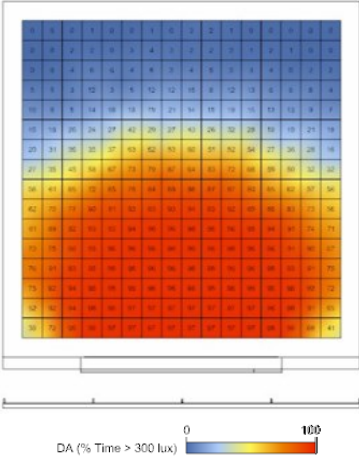
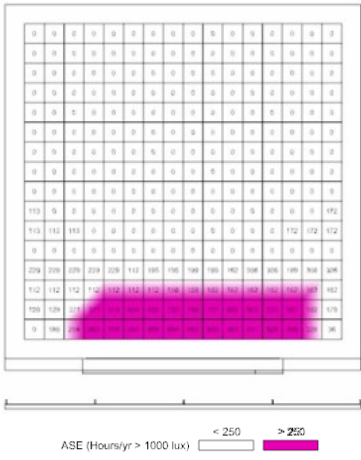
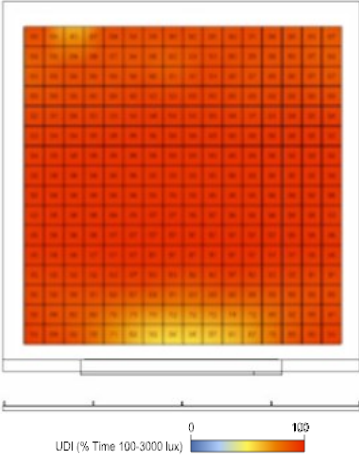
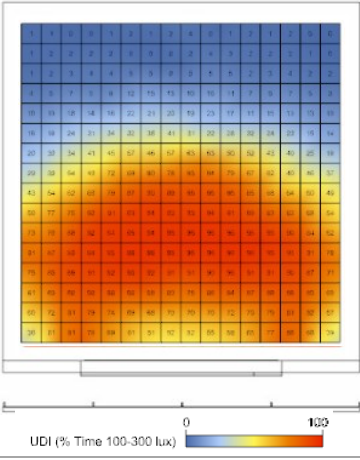
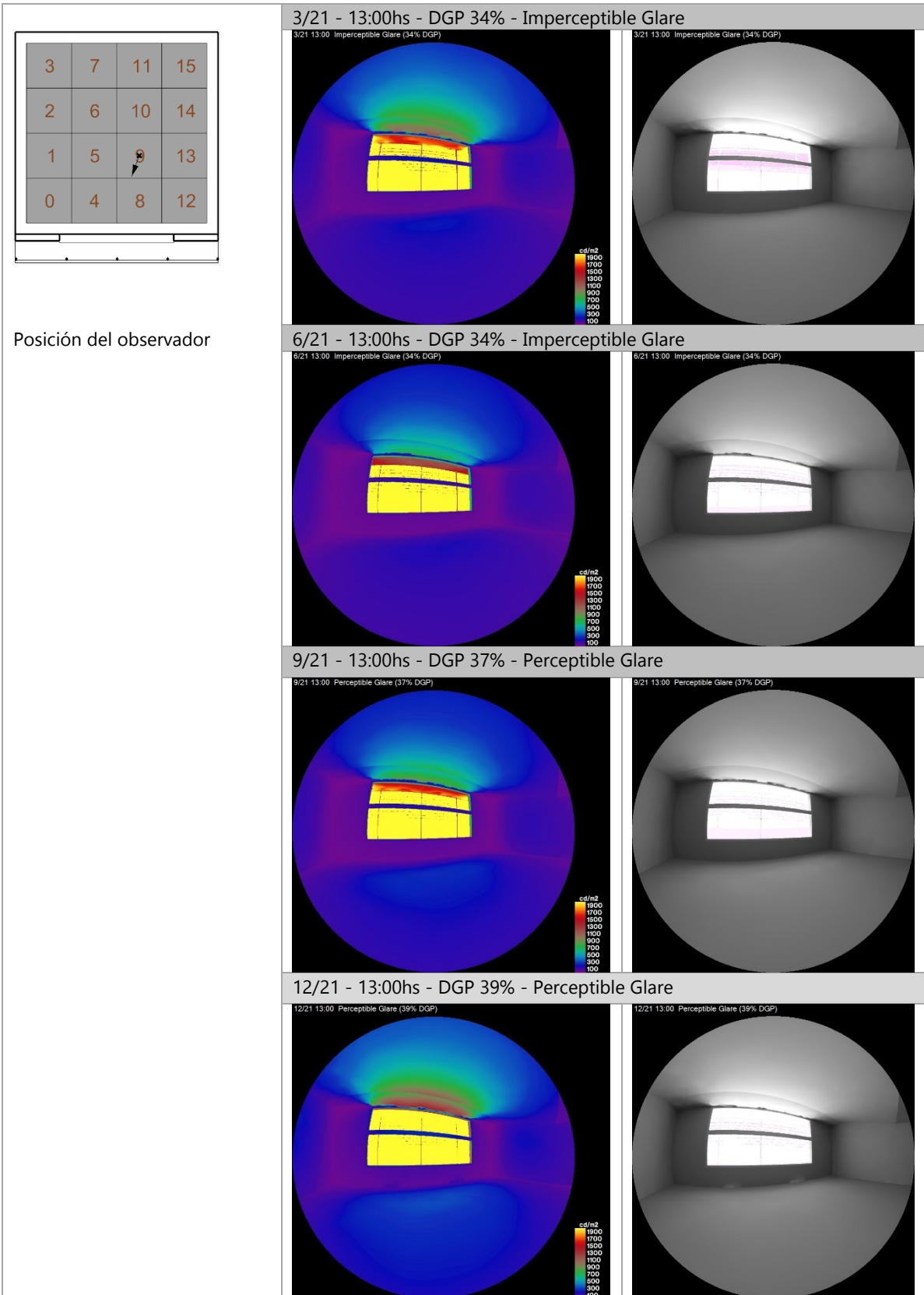
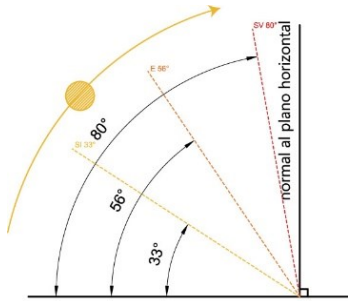
LEED sDA-ASE	<p>sDA 300,50% = 56% > 55%</p>  <p>DA (% Time > 300 lux) 0 100</p>	<p>ASE 1000,250h = 10% ≤ 10%</p>  <p>ASE (Hours/yr > 1000 lux) < 250 > 250</p>
	PSBP UDI c - UDI e	<p>UDI c 100-3000 lux = 91% > 80%</p>  <p>UDI (% Time 100-3000 lux) 0 100</p>
PSBP UDI c = UDI a + UDI s		<p>UDI a 300-3000 lux = 50%</p>  <p>UDI (% Time 100-300 lux) 0 100</p>

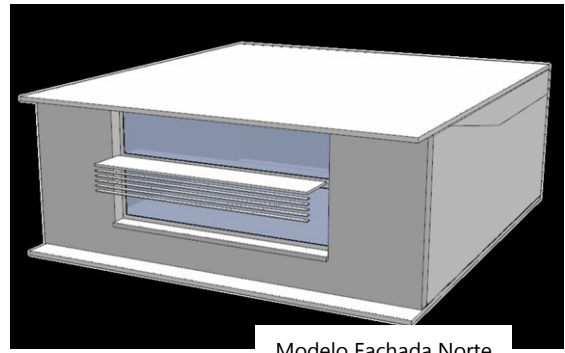
Tabla 4.10-Evaluación de DGP para 4 momentos del año - 13:00 horas. Calama.



4.3.2 Santiago



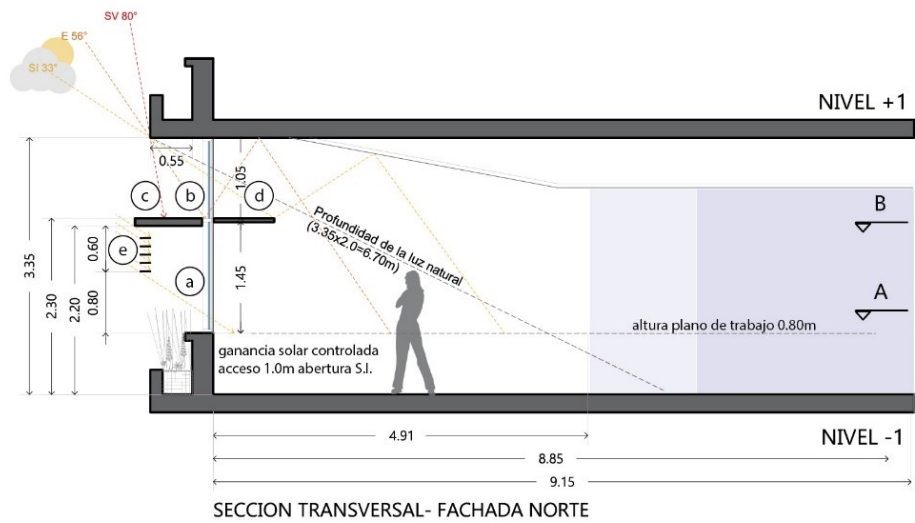
Alturas solares máximas - Santiago



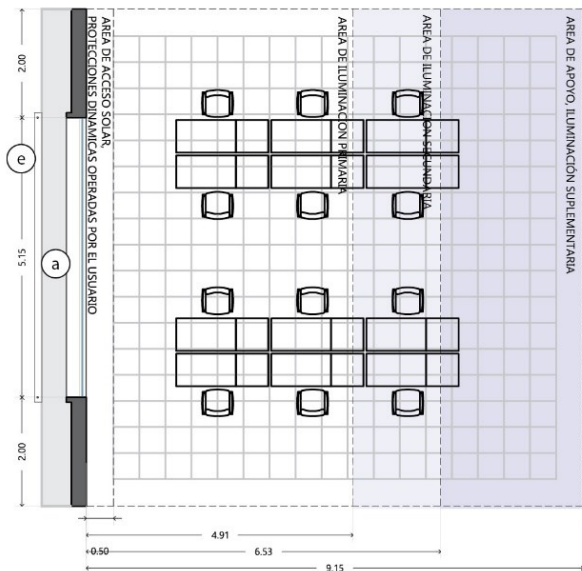
Modelo Fachada Norte

Estrategias de iluminación natural aplicadas a Santiago

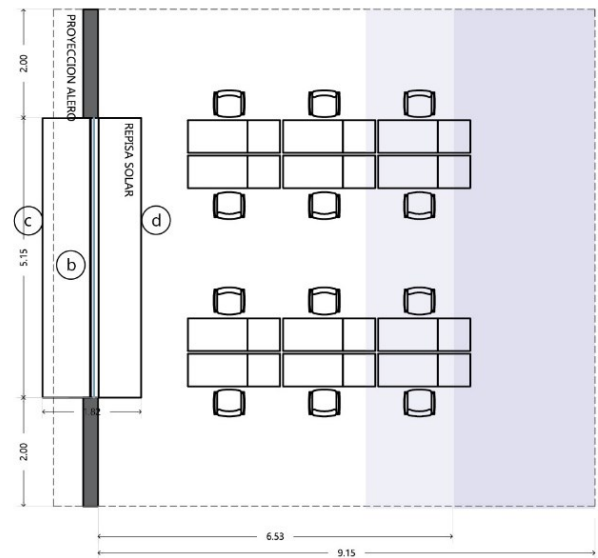
- Dispositivo de sombreado externo de voladizo horizontal sobre aberturas.
- Apantallamiento exterior horizontal fijo en ventana VW, control solar estacional.
- Repisa de iluminación interior
- Coeficientes de R% elevado en superficie perimetral
- Acristalamiento VLT diferenciado por abertura: función visión VLT_{VW} 70% - función iluminación VLT_{DW} 79%.



SECCION TRANSVERSAL- FACHADA NORTE



PLANTA SECCION A - PLANO DE TRABAJO



PLANTA SECCION B - ILUMINACION SUPERIOR

Del análisis climático realizado se definen intensiones de diseño de iluminación coherentes con las características del emplazamiento:

- » Ganancia solar pasiva. La abertura de iluminación se dimensiona para permitir el ingreso solar durante la época invernal para lograr ganancias solares pasivas. De acuerdo con el análisis climático, la predominancia es de cielo cubierto por lo que no reviste riesgo de sobrecalentamiento.
- » Dispositivo de sombreado externo de voladizo horizontal sobre aberturas. Protección de las aberturas de la radiación solar en los meses de setiembre a abril. Se indican protecciones horizontales en las dos aberturas, mediante aleros dimensionados para obstruir los ángulos incidentes en esta época 80° solsticio verano, y 56° equinoccios.
- » Apantallamiento exterior horizontal fijo en ventana VW, control solar estacional. Protección adicional para la abertura de acceso visual al exterior, se incluye apantallamiento vertical de lamas horizontales fijas, (5 lamas distantes a 0.10 cm) que permiten cubrir el ángulo solar de invierno 33° , para proteger la incidencia directa sobre el plano de trabajo.
- » Incremento de reflexiones mediante dimensionamiento de repisa de iluminación interior que permite redireccionar el haz de luz directo proveniente de la abertura de iluminación. Esta estrategia no solo potencia la iluminación natural reflejada, sino que evita el deslumbramiento en el plano de trabajo.
- » Coeficientes de R% elevado en superficie perimetral de abertura.
- » Coeficiente de transmisión luminosa de los vidrios. Acristalamiento VLT diferenciado por abertura: función visión VLT_{VW} 70% - función iluminación VLT_{DW} 79%.

Se realiza la evaluación con el método CBDM métricas sDA-ASE y rangos UDI para analizar la efectividad de las estrategias. La Tabla 4.11 muestra los diagramas de iluminancias y resultados analizados, mostrando el cumplimiento de los objetivos. Para verificación la eficacia de la protección solar y el riesgo al deslumbramiento, se analiza DGP. Los resultados en la Tabla 4.12 muestran que no existe riesgo de deslumbramiento.

Tabla 4.11-Resultados de iluminancia mediante sDA-ASE y UDI-UDI-e. Santiago

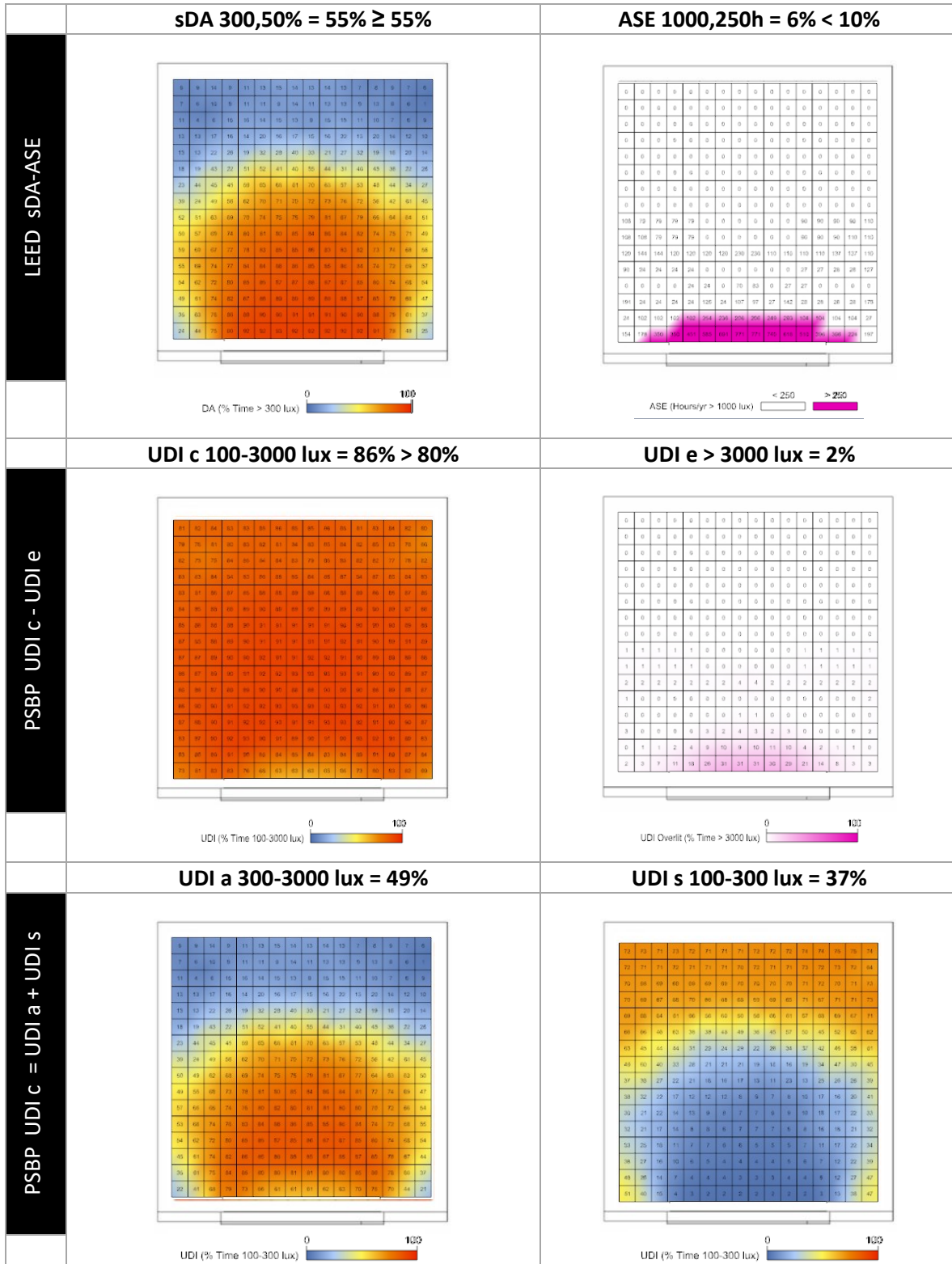
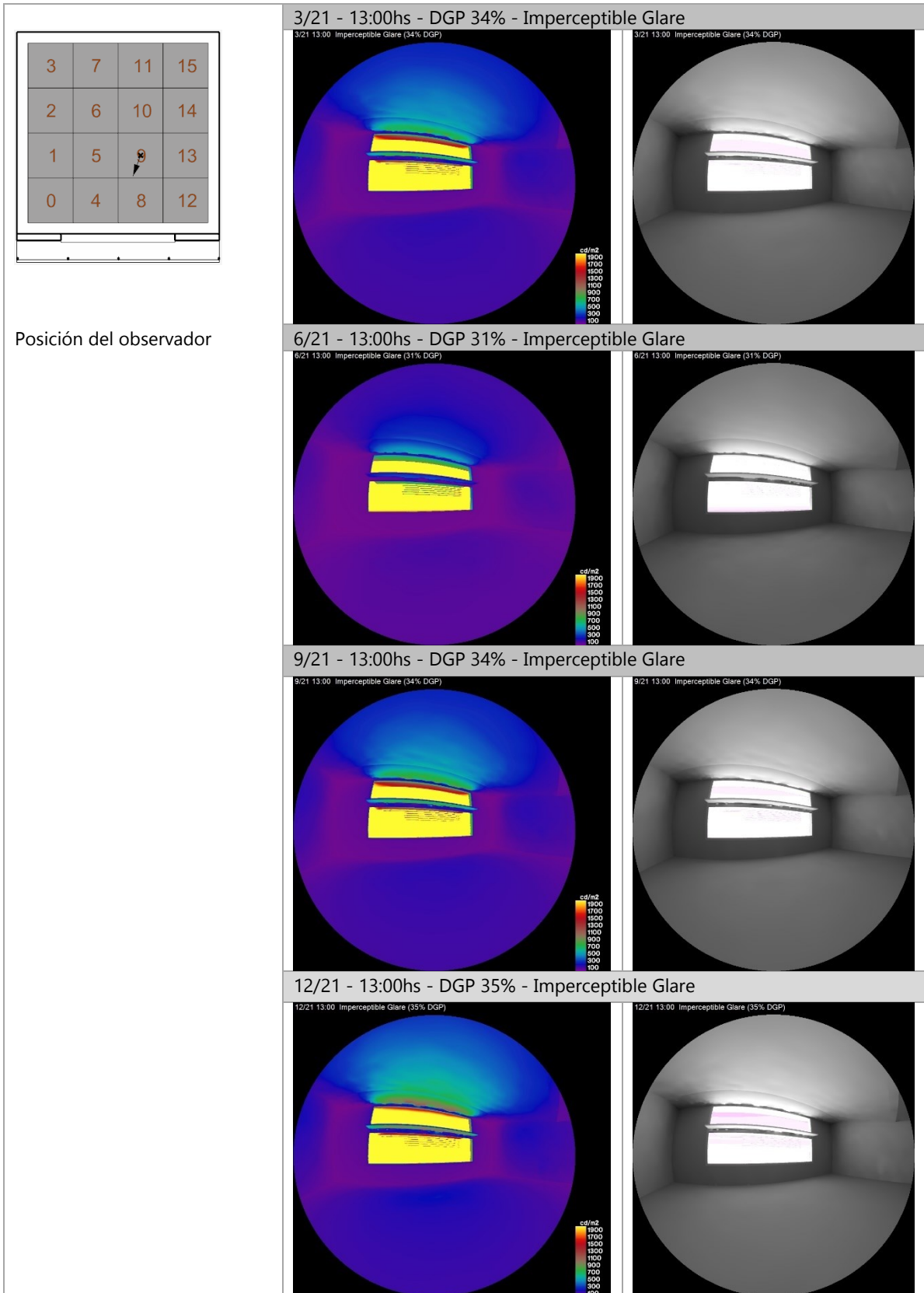
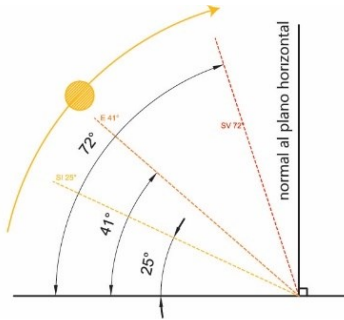


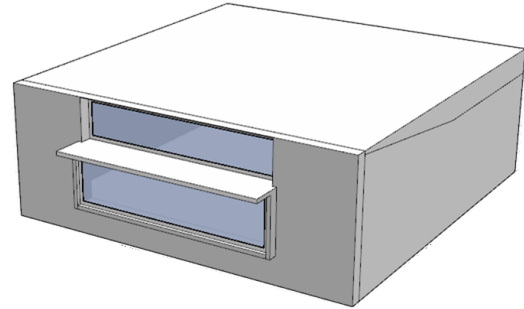
Tabla 4.12-Evaluación de DGP para 4 momentos del año - 13:00 horas. Santiago.



4.3.3 Puerto Montt



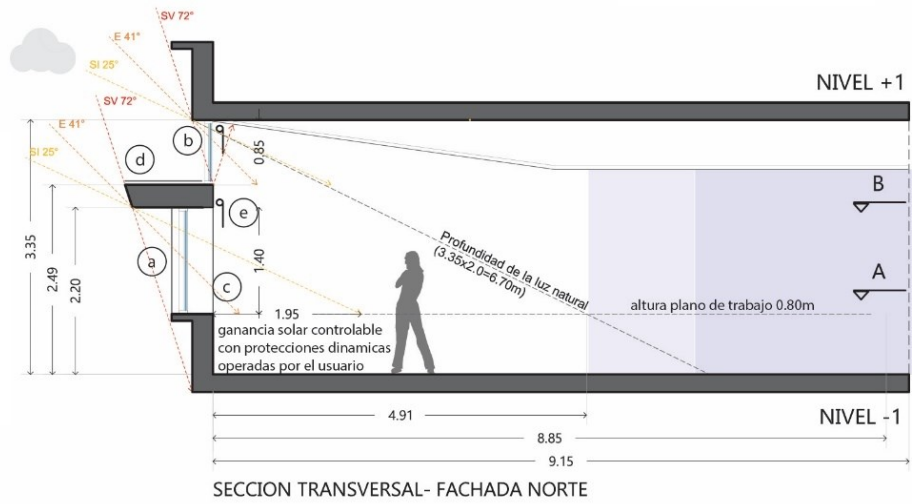
Alturas solares máximas – Puerto Montt



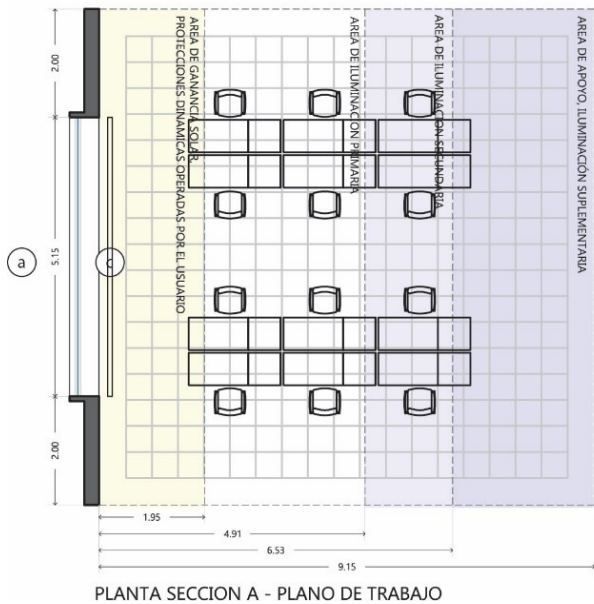
Modelo Fachada Norte

Estrategias de iluminación natural aplicadas a Puerto Montt

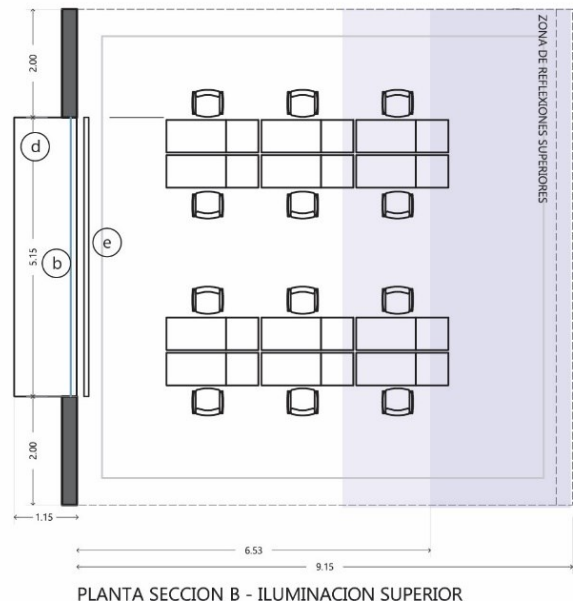
- Solución de voladizo horizontal sobre ventana VW.
- Marcos de ventanas profundos con alto coeficiente R90%
- Repisa exterior de alta R%
- Superficies interiores de alto R%
- Acristalamientos con VLTW $\geq 79\%$
- Control solar interior dinámico diferenciado por abertura: sistema de venecianas para VW y sistemas de cortinas rollers – difusor para DW.



SECCION TRANSVERSAL- FACHADA NORTE



PLANTA SECCION A - PLANO DE TRABAJO



PLANTA SECCION B - ILUMINACION SUPERIOR

Del análisis climático realizado se definen intenciones de diseño de iluminación coherentes con las características del emplazamiento:

- » Solución de voladizo horizontal sobre ventana VW. Protección de las aberturas de la radiación solar en los meses de diciembre a febrero. Se indica un alero en la abertura de acceso visual al exterior como protección horizontal, dimensionado para obstruir el ángulo incidente en el solsticio de verano 72° .
- » Ganancia solar pasiva. Ambas aberturas se dimensionan para permitir el ingreso solar durante el equinoccio (41°) y la época invernal (25°) para lograr ganancias solares pasivas. De acuerdo con el análisis climático, la predominancia es de cielo cubierto por lo que no reviste riesgo de sobrecalentamiento
- » Protección adicional para las aberturas. Se incluye protecciones solares dinámicas operadas por el usuario, consistente en cortinas “rollers” con entramado transparente que permiten evitar la incidencia directa sobre el plano de trabajo que pueda generar deslumbramiento. De acuerdo con el análisis climático, la predominancia es de cielo cubierto por lo que no reviste un riesgo de deslumbramiento permanente.
- » Incremento de reflexiones. Se propone potenciar la iluminación natural reflejada mediante marcos profundos con superficies de altas reflectancias a nivel del contorno de ventana y la superficie sobre alero actuando como repisa exterior; coeficiente R90%.
- » Coeficiente de transmisión luminosa de los vidrios. Se propone aberturas diferenciadas: abertura para acceso visual al exterior y aberturas de iluminación. Debido a la frecuencia de cielo cubierto de la zona, el cristal es de TL 79% para captar la luminosidad disponible.

Se realiza la evaluación con el método CBDM métricas sDA-ASE y rangos UDI para analizar la efectividad de las estrategias. La Tabla 4.13 muestra los diagramas de iluminancias y resultados analizados, mostrando el cumplimiento de los objetivos. Para verificación la eficacia de la protección solar y el riesgo al deslumbramiento, se analiza DGP. Los resultados en la Tabla 4.14 muestran que no existe riesgo de deslumbramiento intolerable.

Tabla 4.13-Resultados de iluminancia mediante sDA-ASE y UDI-UDI-e. Puerto Montt

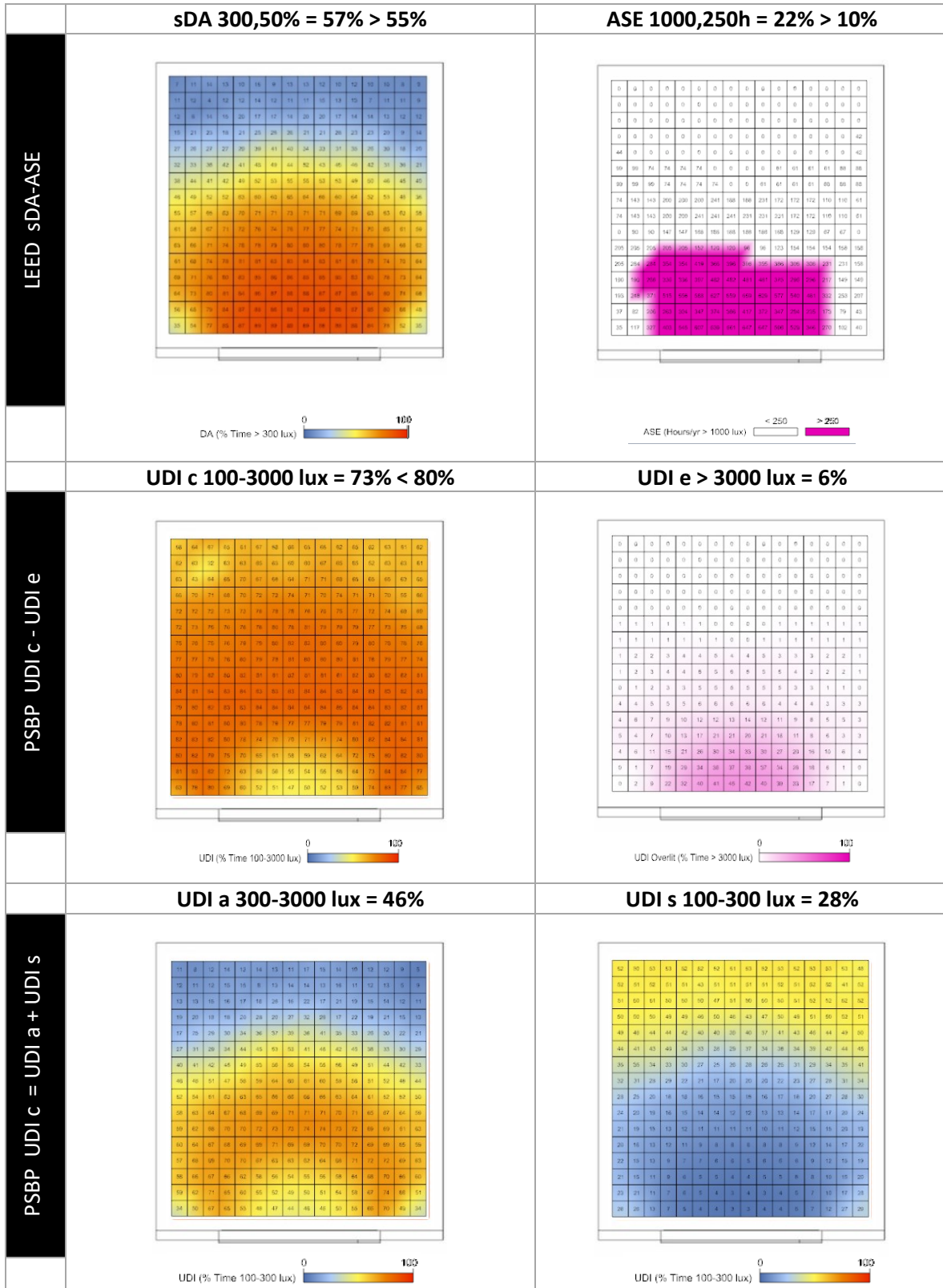
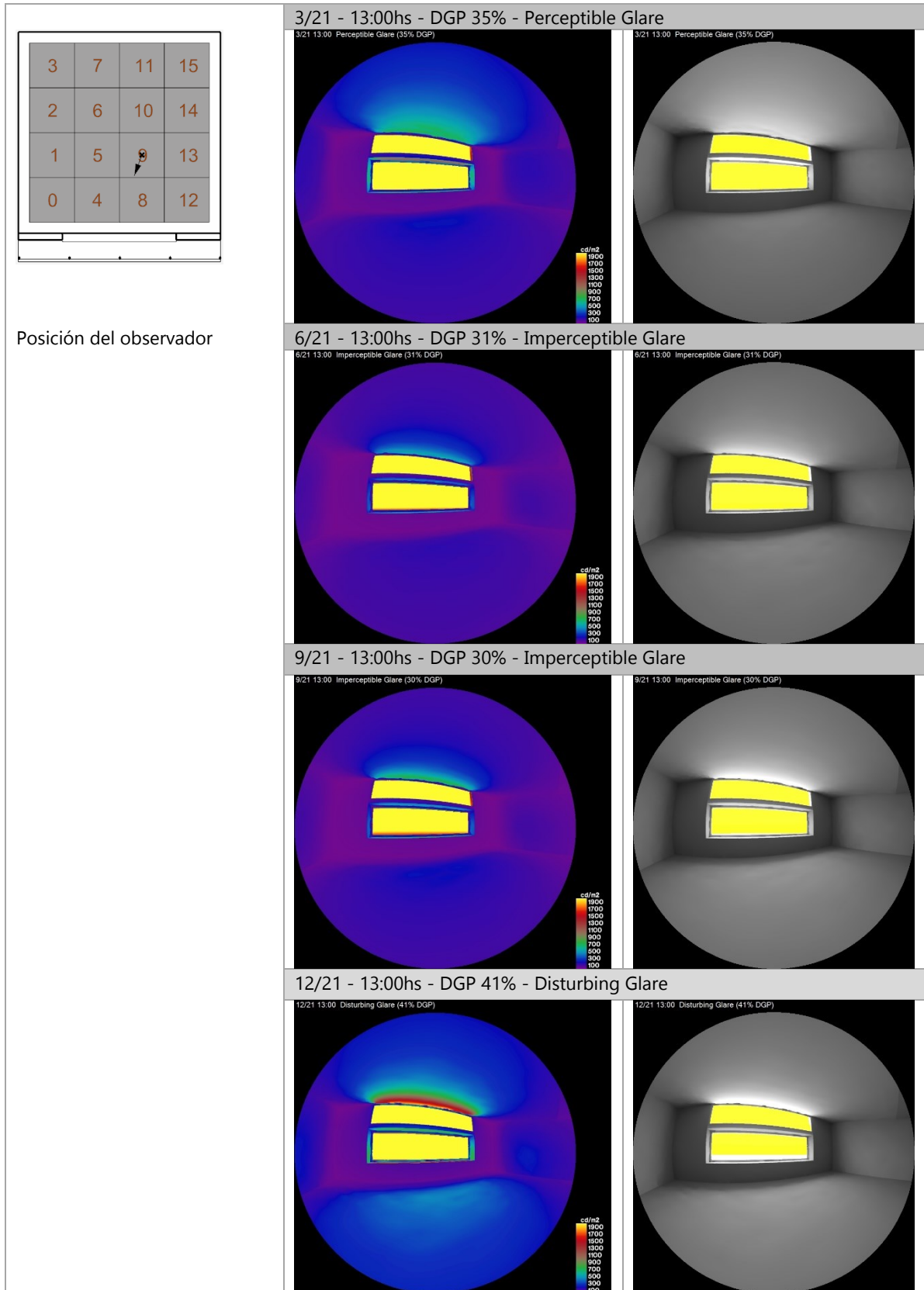


Tabla 4.14-Evaluación de DGP para 4 momentos del año - 13:00 horas. Puerto Montt



Capítulo 5. Discusión de resultados

5.1 Resultados modelos optimizados por ciudad

La evaluación muestra que los modelos optimizados logran en gran parte los objetivos propuestos.

En Calama, los resultados en la Tabla 4.9 muestran que logra un sDA de 56% superior a 55% y un ASE de 10%, cumpliendo el requerimiento LEED. El análisis determina que el 56% del área logra una autonomía lumínica en el espacio el 50% del tiempo, y únicamente el 10% de esta superficie cuenta con una exposición anual a la luz solar de 1000 lx, 250hrs. El resultado es aceptable en la Certificación LEED y en los TDRé MOP. No cumple los objetivos de Certificación CES debido a que el indicador para la zona NL según NCh1079: Of.2008 es sDA \geq 60%. Al respecto de la iluminancia útil, logra un UDI-c de 91% superior a 80%, cumpliendo con el requerimiento PSBP. El análisis determina que el 91% del tiempo la superficie se encuentra con una iluminancia útil entre 100 y 3000 lx; y si bien el UDI-e no define en la bibliografía analizada el objetivo alcanzable, el diagrama muestra que la iluminancia excedida de 3% corresponde al área inmediata de la abertura coincidente en el diagrama de UDI-c. Respecto al rango autónomo, logra UDI-a 50%. Si bien el rango evaluado no es el mismo que el propuesto en TDRé MOP, cumple el 50% mínimo y podría incrementarse aún más si se considera en rango 200 – 3000 lx. Con la evaluación realizada no es posible determinar si cumple con el objetivo CES. Con UDI-a y UDI s indica el segmento que deberá contar con un sistema de control de iluminación eléctrica diferenciado debido a los requerimientos de iluminación suplementaria y es posible comprobar que es correcto el alcance de la luz natural unilateral predeterminado en los criterios de diseño. En cuanto al riesgo de deslumbramiento en la Tabla 4.10, el DGP para un observador sentado a 1.20m indica que existe deslumbramiento imperceptible junio y marzo y un deslumbramiento perceptible en setiembre y diciembre, demostrando el cumplimiento efectivo de la solución proyectada.

En Santiago, los resultados en la Tabla 4.11 muestran que sDA es 55% igual al mínimo requerido y un ASE de 6% cumpliendo el requerimiento LEED. El análisis determina que el 55% del área logra una autonomía lumínica en el espacio el 50% del tiempo, y solo el 6% de dicha superficie está expuesta a la luz solar anual con 1000 lx, 250hrs. El resultado es aceptable en la Certificación LEED y en los TDRé MOP. Además, cumple con los objetivos de Certificación CES, debido a que el indicador para la zona CI según NCh1079: Of.2008 es sDA \geq 55%. Respecto a la iluminancia útil, logra un UDI-

c de 86% superior a 80%, cumpliendo con el requerimiento PSBP. El análisis determina que el 86% del tiempo el área de análisis se encuentra con una iluminancia útil entre 100 y 3000 lx. El diagrama UDI-e muestra que la iluminancia excedida de 2% corresponde al área inmediata de la abertura coincidente en el diagrama de UDI-c. Respecto al rango autónomo, logra un UDI-a del 49%. Si bien el rango evaluado no es el mismo que el propuesto en TDRé MOP indicado entre 200-3000lx, se presume por aproximación y al ampliar el rango de evaluación cumple con el objetivo del 50%. Con la evaluación realizada no es posible determinar si cumple con el objetivo CES. Con el rango UDI-a y UDI-s se visualiza el área de análisis que requiere apoyo suplementario de iluminación artificial y es posible comprobar que es correcto el alcance de la luz natural unilateral predeterminado en los criterios de diseño. En cuanto al riesgo de deslumbramiento del margen de iluminancias excedidas, se verifica en Tabla 4.12 mediante cálculo del DGP para un observador sentado a 1.20m, que no existe riesgo de deslumbramiento en ninguno de los cuatro momentos del año evaluados.

En Puerto Montt, los resultados en la Tabla 4.13 muestran que logra un sDA de 57% superando el 55% y un ASE de 22%. En este caso, el cumplimiento LEED queda condicionado por la métrica ASE que supera el 20%; por lo cual habrá que adicionar protecciones solares dinámicas las cuales están incluidas en las estrategias de diseño, pero se excluyen del análisis CBDM. Cumple además con el TDRé MOP que tiene el objetivo de sDA > 50% y con la Certificación CES, debido a que el indicador para la zona CI según NCh1079: Of.2008 es sDA \geq 50%. Respecto a la iluminancia útil, con UDI-c 73% no logra el objetivo de lograr un 80% del tiempo una iluminancia útil entre 100 – 3000lx requerido por PSBP. El diagrama UDI-e muestra que la iluminancia excedida de 6% corresponde al área inmediata de la abertura coincidente en el diagrama de UDI-c. En lo que refiere al rango autónomo logra un UDI-a del 46%, a pesar de que el rango no es el mismo del TDRé MOP indicado entre 200-3000 lx, se presume por aproximación y al ampliar el rango de evaluación cumple con el objetivo del 50%. Con la evaluación realizada no es posible determinar si cumple con el objetivo CES; no obstante, se presume que cumple el objetivo definido en UDI 100-2000 lx > 40%. Con el rango UDI-a y UDI-s se visualiza el área de análisis que requiere apoyo suplementario de iluminación artificial y es posible comprobar que es correcto el alcance de la luz natural unilateral predeterminado en los criterios de diseño. En cuanto al riesgo de deslumbramiento en la Tabla 4.14, el DGP para un observador sentado a 1.20m indica que existe deslumbramiento imperceptible en invierno y equinoccio de primavera, deslumbramiento perceptible en marzo y deslumbramiento distorsivo en diciembre, el cual puede ser corregido mediante la operación de los dispositivos dinámicos propuestos.

Tabla 5.1- Resumen de resultados y cumplimiento de normativas

Ciudad	sDA [%]	ASE [%]	LEED		TDRé MOP	CES
	300lux,50%	250h,1000lx	sDA [%]	ASE [%]	sDA [%]	sDA [%]
Calama	56	10	logra	logra	logra	no logra
Santiago	55	6	logra	logra	logra	logra
Puerto Montt	57	22	logra	no logra	logra	logra

Ciudad	UDI-c [%]	UDI-a [%]	PSBP	TDRé MOP	CES
	100-3000lux	300-3000lux	UDI-c 100-3000 lx [%]	UDI-a 200-3000 lx [%]	UDI-a 100-2000 lx [%]
Calama	91	50	logra	logra	N/A
Santiago	86	49	logra	logra	N/A
Puerto Montt	73	46	no logra	logra	N/A

5.2 Resultados comparados fachada acristalada con modelo optimizado

Con el fin de comparar el comportamiento de las métricas en cada uno de los climas, se realiza un análisis de 3 modelos por ciudad: un modelo correspondiente a fachada acristalada (Modelo WWR 100%), un modelo energéticamente optimizado correspondiente al prototipo de oficina base *sin protecciones solares* (Modelo WWR 40%) y el modelo con la propuesta optimizada por cada localidad (Modelo Optimizado). Los resultados pueden verse en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2-Resultados comparativos de modelos por ciudad.

Calama	sDA [%]	ASE [%]	UDI-f [%]	UDI-s [%]	UDI-a [%]	UDI-c [%]	UDI-e [%]
	300lx,50%	250h,1000lx	<100 lx	100-300lx	300-3000lx	100-3000lx	>3000 lx
Modelo WWR 100%	100	27	2	6	73	79	18
Modelo WWR 40%	69	24	3	27	60	88	8
Modelo Optimizado	56	10	5	41	50	91	3

Santiago	sDA [%]	ASE [%]	UDI-f [%]	UDI-s [%]	UDI-a [%]	UDI-c [%]	UDI-e [%]
	300lx,50%	250h,1000lx	<100 lx	100-300lx	300-3000lx	100-3000lx	>3000 lx
Modelo WWR 100%	100	41	5	7	66	73	20
Modelo WWR 40%	72	34	7	24	57	81	10
Modelo Optimizado	55	6	11	37	49	86	2

Puerto Montt	sDA [%]	ASE [%]	UDI-f [%]	UDI-s [%]	UDI-a [%]	UDI-c [%]	UDI-e [%]
	300lx,50%	250h,1000lx	<100 lx	100-300lx	300-3000lx	100-3000lx	>3000 lx
Modelo WWR 100%	98	51	11	13	56	69	19
Modelo WWR 40%	65	29	16	24	49	73	10
Modelo Optimizado	57	22	19	28	46	73	6

Tabla 5.3- Diagramas de iluminancia sDA-ASE y UDI-c-UDI-e. Fachada Acristalada WWR 100%.

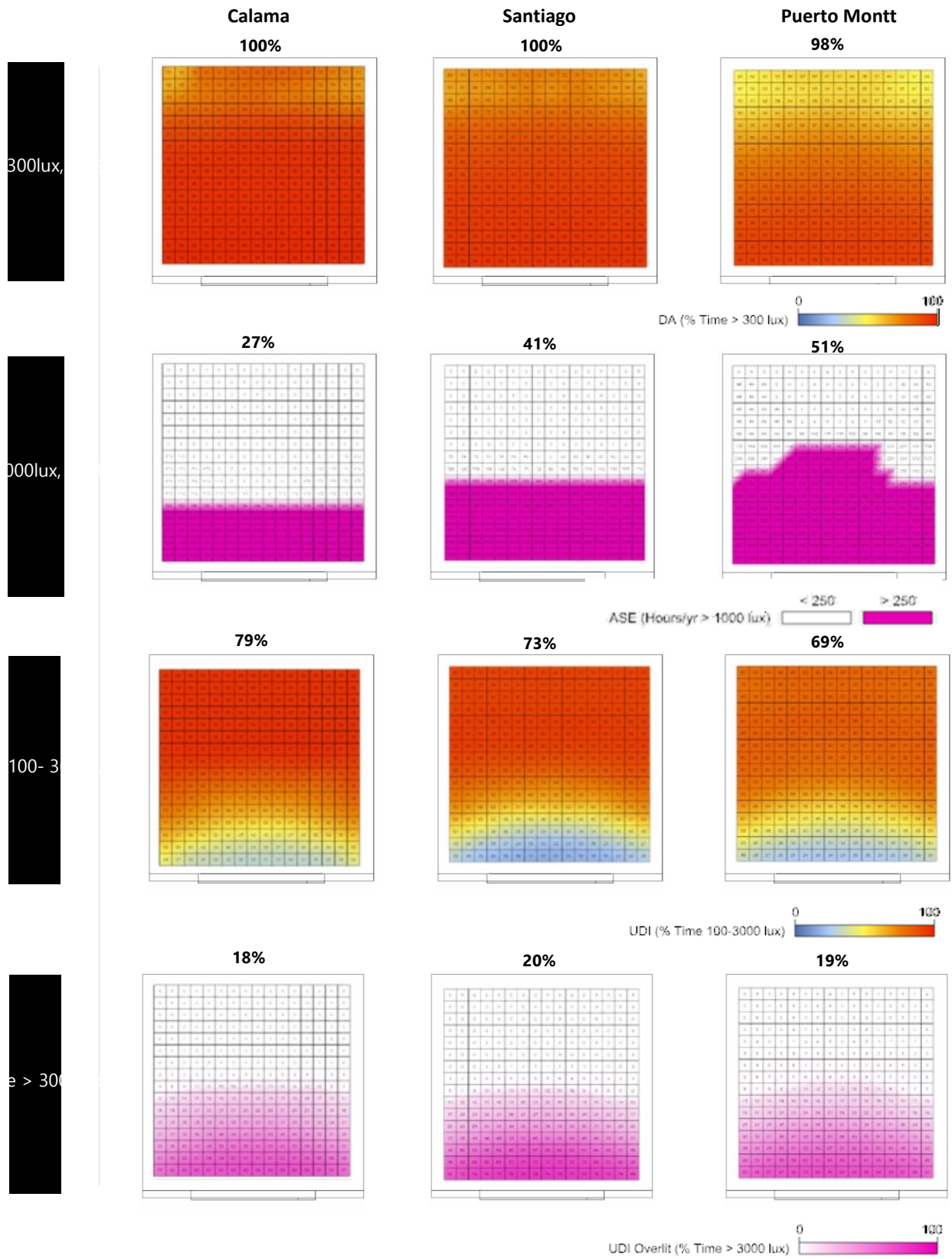
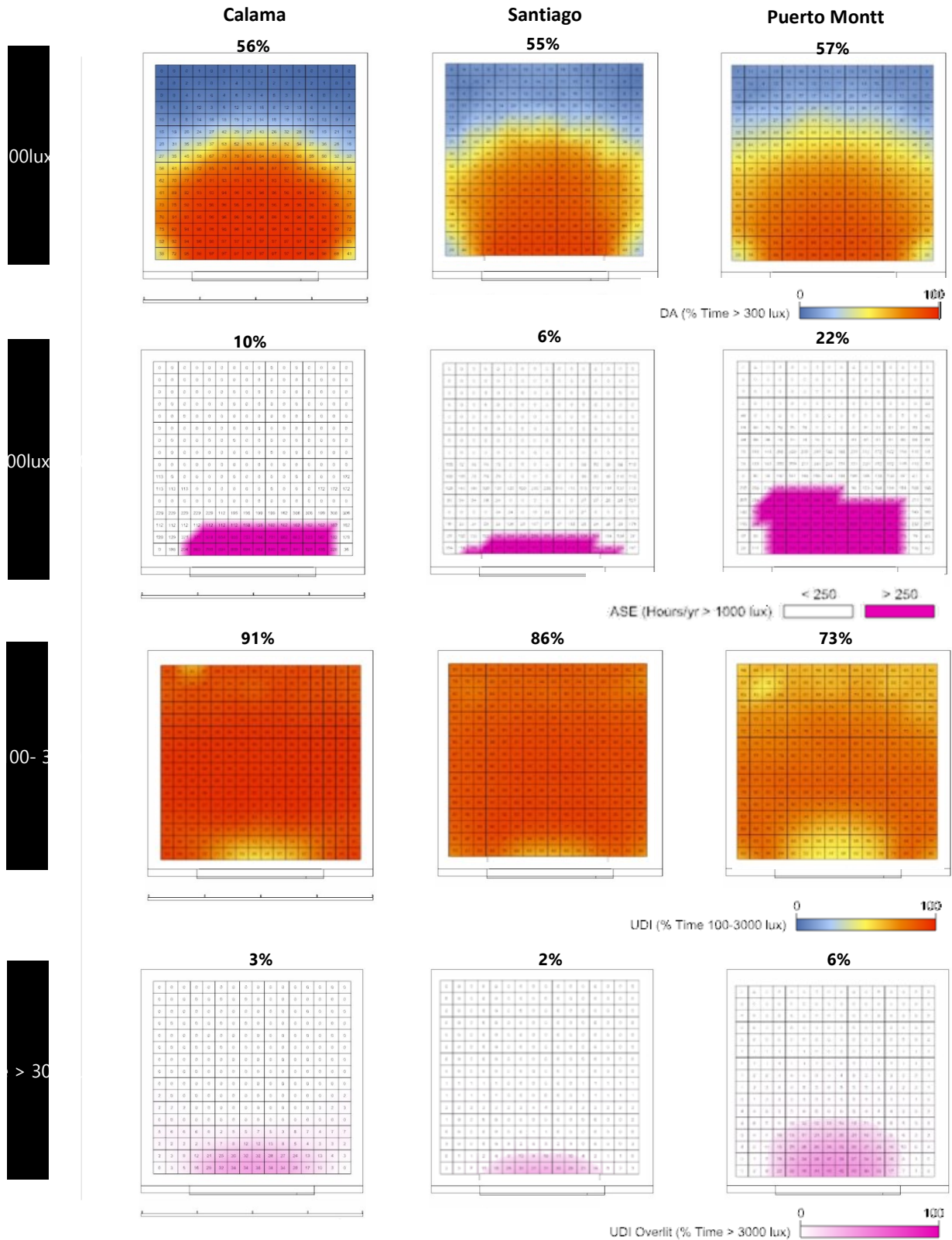


Tabla 5.4-Diagramas de iluminancia sDA-ASE y UDI-c-UDI-e. Modelo Optimizado WWR 40%.



En la Tabla 5.3 y Tabla 5.4 se muestran los diagramas de iluminancias de las métricas para el Modelo de fachada acristalado WWR 100% y Modelo Optimizado WWR 40%.

Los resultados muestran que, en las tres ciudades los modelos de fachada acristalada WWR 100% presentan altos niveles de iluminancia comprobada con $sDA_{300,50\%}$ de 100%. No obstante, los porcentajes de exposición solar anual superan lo máximo aceptable. $ASE_{1000,250}$ es de 27% en Calama, 41% en Santiago y 51% en Puerto Montt. Este incremento de la luz solar en la profundidad del recinto se debe principalmente a los ángulos solares más bajos a medida que la latitud se aleja del ecuador. En lo que refiere a la iluminancia útil $UDI-C_{100-3000lx}$ es 79% en Calama, 73% en Santiago y 69% en Puerto Montt, por lo que a medida que la latitud se aleja del ecuador disminuyen los valores de iluminancia útil. No obstante, este decremento no se debe tanto a la iluminación excedida de 3000 lx, ya que el indicador $UDI-e_{3000}$ se mantiene constante con un porcentaje próximo al 20%; sino a la iluminancia útil insuficiente $UDI-f$ por la condición luminosa del cielo.

Los modelos optimizados WWR % en las tres ciudades se aproximan a los objetivos. A pesar de que los niveles de iluminancia disminuyen de $sDA_{300,50\%}$ de 100% a 56% en Calama, 55% en Santiago y 57% en Puerto Montt; la calidad de iluminación es más saludable debido a que se regula la exposición solar anual en los espacios interiores. $ASE_{1000,250}$ es de 10% en Calama, 6% en Santiago y 22% en Puerto Montt. Esto se debe a que existe una relación proporcional entre sDA y ASE ; por lo que al limitar el ingreso solar se limitan también los niveles de iluminancia medidos por sDA quien analiza un nivel mínimo, pero no el nivel máximo admisible. En lo que refiere a la iluminancia útil $UDI-C_{100-3000lx}$ es 91% en Calama, 86% en Santiago y 73% en Puerto Montt, incrementando los porcentajes del Modelo WWR 100%. Es coincidente con la disminución de los porcentajes de $UDI-e$ que disminuyen de 20% a 3% en Calama, 2% en Santiago y 22% en Puerto Montt. Las estrategias aplicadas permiten controlar los niveles de alta iluminancia y captarlas dentro del rango útil, es decir, al disminuir las iluminancias excedidas debajo de los 3000 lux entran dentro del rango útil definido entre 100-3000 lux.

Capítulo 6. Conclusiones

Las fachadas acristaladas de los edificios generalmente fuera de su contexto ambiental sobreexponen el confort de los usuarios a problemas de deslumbramiento, sobrecalentamiento y altos consumos energéticos asociados. Estos pueden ser controlados mediante diseños planificados. La investigación sobre el estado del arte evidencia que existe suficiente información con lineamientos base para el diseño de estrategias efectivas de captación, transmisión, distribución y control de la luz diurna; y también, una correlación en la información desarrollada por las normas internacionales y nacionales. La diversidad climática del Chile hace necesaria la adecuada contextualización del edificio en su entorno para desarrollar estrategias de diseño lumínico que aporten al diseño integrado, y resuelvan coordinadamente las decisiones que aporten a mejorar pasivamente el confort en la edificación.

Algunas consideraciones del buen diseño de la luz diurna son propias a las funciones del programa arquitectónico, independiente de la localización, y aportan definición de la geometría, la distribución, alturas de recintos, características de las superficies interiores entre otras que permiten al usuario acceder a vistas del exterior y a mejores condiciones de luz natural. Estas variables consolidadas han permitido la confección de un prototipo de oficinas sobre el cual aplicar las estrategias para los distintos tipos de cielos predominantes de Chile. El prototipo de oficina se construye como un espacio arquitectónico de referencia con iluminación lateral, sobre el que se incorporan estrategias aplicadas a la fenestración vertical desde donde proviene la luz natural. Las dimensiones se determinaron en función de las distancias máximas del ocupante a la fachada, sobre la cual se incorporan aperturas de ventanas en una relación de ventana pared del 40% según las recomendaciones de la AEDG para un ahorro energético.

La optimización se realiza en tres ciudades que representan distintas situaciones climáticas y por ende proponen diferentes estrategias para el aprovechamiento de la luz natural. En primer lugar, la ciudad de Calama en el extremo norte del país, con una predominancia de cielos despejados y altos niveles de radiación solar, con una amplia oscilación térmica diaria y estabilidad en las temperaturas durante el año. Luego la ciudad de Santiago, en la zona central presenta temporadas de alta radiación solar vinculadas a temperaturas superiores a los 30°C en los meses de verano con predominancia a cielos despejados, mientras que en los meses de invierno la predominancia de

cielos nublados, la reducción de los niveles de radiación solar se conjuga con el descenso de las temperaturas. Finalmente, la ciudad de Puerto Montt, en la zona sur del país propone un escenario con bajos niveles de radiación solar en gran parte del año, temperaturas moderadas en verano, pero con una predominancia a los cielos nublados casi todo el año, especialmente en los meses de invierno, cercano al 60%. En base a esta conjugación de variables se establecen criterios de diseño que se traducen en:

- » Calama: Control solar de apantallamiento exterior que funciona durante todo el año.
- » Santiago: Control solar de apantallamiento exterior que funciona durante los meses de verano, permitiendo el ingreso de sol controlado en meses de invierno.
- » Puerto Montt: Control solar de apantallamiento exterior para el mes de enero, permitiendo el ingreso de sol controlado en el resto del año.

El análisis de los distintos contextos climáticos ratifica que el comportamiento de la luz diurna demanda acciones y diseños diferenciados, contrario a replicar fachadas acristaladas indistintamente el contexto climático o la actual tendencia de encamisar los grandes acristalamientos con sistemas de control solar en serie como es el uso de los paneles perforados. El material disponible sobre estrategias efectivas es suficiente para desarrollar estrategias adecuadas. Su integración exitosa depende de la interpretación del contexto climático y de las necesidades de los usuarios; así como del ingenio del diseñador para lograr una expresión arquitectónica de los edificios de oficina coherente en su contexto local.

Para evaluar la efectividad de las estrategias aplicadas se utiliza el método de evaluación dinámico basado en el clima CBDM. Se explora el programa de modelamiento DIVA for Rhino (Design Iterate Validate Adapt), plug-in para Rhinoceros-NURBS y Grasshopper con interfaz de cálculo Radiance, por ser una herramienta que permite configurar y simular simultáneamente todos los parámetros pretendidos y se perfila con gran potencial para el análisis de la luz natural.

Se analizan las variables de Autonomía de luz diurna en el espacio (sDA 300/50%) que mide cuanto porcentaje del plano de trabajo está un 50% del tiempo por sobre la Iluminancia de 300lux; Exposición anual a la luz solar (ASE) que mide el porcentaje de área que excede un nivel específico de iluminancia por efectos directos de la luz solar; Iluminancia Útil (UDI) que mide la ocurrencia anual de iluminancias en el plano de trabajo y Deslumbramiento (DGP) que analiza el contraste de luminancia percibido en el campo visual entre la tarea y el plano de fondo.

A nivel internacional estas variables establecen criterios de cumplimiento según distintos sistemas de certificación. Estados Unidos, por ejemplo, mediante LEED V4 establece una combinación de sDA y ASE, mientras que Reino Unido se establece la segmentación de rangos UDI. A nivel nacional las normativas indican objetivos lumínicos para sDA y UDI y considera el DGP como una evaluación optativa tanto en TDRé MOP y CES. No obstante, en ningún caso incluye el indicador ASE y los rangos UDI difieren de los propuestos a nivel internacional. Esto es porque las normas nacionales no han acompañado la evolución internacional en cuanto a la definición de niveles máximos y mínimos.

Los modelos optimizados resultan efectivos en cuanto al cumplimiento en mayor medida de los objetivos de iluminación natural propuestos por sDA, ASE, UDI-c y DGP. No obstante, para comprender el comportamiento de las métricas en cada uno de los climas, se realiza una evaluación comparativa entre los modelos optimizados y los modelos correspondientes a las fachadas acristaladas (Modelo WWR 100%), por cada ciudad. Los resultados demuestran que en las tres ciudades los modelos optimizados logran niveles de iluminancia más eficientes que los acristalados, pues en las fachadas acristaladas logran mayores niveles de iluminancia, pero son también los más afectados por la luz solar directa. No obstante, los resultados de los modelos optimizados no muestran los mismos diagramas ni logran el mismo nivel de iluminancia, variando de acuerdo con el contexto climático y según los parámetros cuantificados.

De acuerdo con el contexto climático, los niveles de iluminancia de Puerto Montt son sensiblemente más bajos que los de Calama y Santiago; incluso cuando el diagrama ASE admite iluminancias excedidas. Este hecho se encuentra relacionado al ambiente luminoso de la localidad, influido por las variables climáticas analizadas. Extensos estudios han concluido que ambiente luminoso de una localidad influye sobre la tolerancia de las personas a los niveles de iluminación natural fuera de los rangos estandarizados. Por lo que este trabajo pone en valor la propuesta de la Certificación CES en cuanto a la definición de objetivos diferenciados por clima luminoso asociado a las zonas climáticas, definiendo categorías en función del tipo de cielo y su potencial luminoso fuera de los rangos estandarizados.

Acercas de los parámetros, existe una relación proporcional entre sDA y ASE en donde a medida que el indicador ASE disminuye también disminuye sDA. Los diagramas muestran que la regulación del control solar conlleva un incremento de bajas iluminancias en las zonas más distantes a la fenestración; y, por lo tanto, una disminución general en los niveles de iluminancia; relación que

dificulta el cumplimiento de objetivos preferibles ($sDA > 75\%$ - $ASE < 10\%$), aún más lejano en Puerto Montt. Por su parte, UDI presenta una relación inversamente proporcional en donde a medida que UDI-e disminuye UDI-c aumenta porque se captan las altas iluminancias dentro del rango útil. Los diagramas de UDI-c presentan una iluminancia más homogénea en la profundidad del recinto que los de sDA (debido a que admiten un rango útil más amplio que inicia en 100 lux) y un recorte en las áreas cercanas a la abertura debido a que excluye del diagrama las altas iluminancias (no posible para sDA). Perseguir el objetivo de UDI-c $> 80\%$ y mantener balanceados sus dos extremos (UDI-f UDI-e) garantizan niveles de iluminación equilibrados. No se ha determinado bibliográficamente los objetivos de UDI-a, en el estudio se concluye que cuando sDA alcanza el nivel de iluminancia objetivo de 55%, UDI-a logra un tiempo de iluminación en rango del 50%.

Del estudio se concluye que UDI es una métrica recomendada para el análisis de luz diurna, que presenta información de fácil interpretación. La segmentación en rangos UDI aporta lineamientos para el diseño integrado del proyecto de iluminación artificial (sectorización en niveles), y a través de los diagramas de iluminancias puede identificarse el área con iluminancia autónoma y preferible para realizar las tareas visuales; de la que debe ser suplementada con iluminación eléctrica. Si bien para determinar el deslumbramiento aún no puede prescindirse del cálculo de DGP, la métrica ASE y el segmento UDI-e permite mayor precisión de la efectividad de las estrategias de control solar, limitando las altas iluminancias y que son indicadores efectivos en la relación de iluminancia y deslumbramiento.

6.1 Trabajos futuros

El desarrollo del trabajo ha permitido al autor introducir conceptos relativos a las estrategias de diseño de iluminación natural más efectivas y los métodos de análisis asociados, dejando temas de interés que puedan retomar en futuros trabajos. En primer lugar, desarrollar criterios de diseño de iluminación natural aplicado a fenestraciones verticales para las fachadas sur, oriente y poniente de las localidades seleccionadas, para completar las estrategias en los 3 cardinales. En segundo lugar, profundizar en las métricas sDA y ASE con UDI en todos sus segmentos, analizando comparativamente su comportamiento en distintas zonas climáticas, que sirvan para definir objetivos de cumplimiento diferenciado de acuerdo con las condiciones luminosas de la localidad. Y también, profundizar en UDI como parámetro de diseño y en la relación del UDI-c y UDI-e como proxy de deslumbramiento, retomando el estudio desarrollado (Mardaljevic et al., 2009).

Capítulo 7. Referencias bibliográficas

- AEO/NBI/iDL/IA, Daylighting Guide for the Commercial Office. United States. 2011. Revisada 18 junio 2019 en https://www.lightsearch.com/pdf/DaylightingGuide_CommercialOffice.pdf.
- ANSI/ASHRAE/IESNA. Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings. 1°ed 2° reimp. Atlanta, 2014. ISBN 978-1-936504-05-3.
- ARIES, M. B. C. Human lighting demands: healthy lighting in an office environment Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. DOI: 10.6100/IR594257.
- BELLIA, L., FRAGLIASSO, F., STEFANIZZI, E. Daylit offices: A comparison between measured parameters assessing light quality and users' opinions. En: Building and Environment, 2016.
- BREMBILLA, E., MARDALJEVIC, J., HOPFE, C. Sensitivity Analysis Studying the Impact of Reflectance Values Assigned in Climate-Based Daylight Modelling. Conference Paper, 2015.
- BODART, M., BUSTAMANTE, W. et ENCINAS, F. Iluminación Natural de Edificios de Oficina. En ARQ 76 Santiago, 2010. p. 44-49.
- BOMMEL, W., Dynamic Lighting at work - both in level and color, en JOUR. 2006.
- BOYCE, P., HUNTER, C. The Benefits of Daylight through Windows. Lighting Research Center. Troy, NY, 2003.
- BUSTAMANTE, W., ENCINAS, F., PINO, A., AND OTÁROLA, R. Strategies for improving thermal performance and visual comfort in office buildings of Central Chile. In Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain la Neuve, Belgium. pp 903-908, 2011.
- BUSTAMANTE, W., VERA, S., PRIETO, A., AND VÁSQUEZ, C. Solar and Lighting Transmission through Complex Fenestration Systems of Office Buildings in a Warm and Dry Climate of Chile. J. Sustainability 2014, 6(5), 2786-2801, 2014 en <https://doi.org/10.3390/su6052786>
- CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. Window and Offices: A study of Office Worker Performance and the Indoor Environment. Technical Report. New Building Institute. California, 2003.
- CEN (2003). Lighting of indoor workplaces. EN 12464-1. E. C. f. Standardization.
- CEN (2003). Solar protection devices combined with glazing - Calculation of solar and light transmittance - Part 1: Simplified method. EN 13363-1. Standardization.
- COLLINS, B. L. Windows and people: a literature survey. Psychological reaction to environments with and without windows. Natural Bureau of Standards. Gaithersburg, MD, pp. 93, 1975.

- CHRISTOFFERSEN, J., PETERSEN, E., JOHNSEN, K., VALBJØRN, O. AND HYGGE, S. Vinduer og dagslys – en feltundersøgelse i kontorbygninger (SBI - rapport 318) Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, 1999
- CITEC UBB. Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos. Instituto de la Construcción. 1° ed. 2012. ISBN: 978-956-8070-04-5
- DIVA-FOR-RHINO, Version 5.0, Retrieved 18 January 2016, from <http://diva4rhino.com/>
- EFA Education Finance Agency. Priority School Building Programme (PSBP). PSBP 2: Documents and overview. GOV.UK. 2° ed., 2015.
- GRYNNING, S., LOLLII, N., WAGØ S., RISHOLT, B. Solar Shading in Low Energy Office Buildings - Design Strategy and User Perception, en Journal of Daylighting Nº4, 2017 1–14. ISSN 2383-8701
- HEERWAGEN, J. H., AND G. H. ORIAN. Adaptations to Windowlessness: A Study of the Use of Visual Decor in Windowed and Windowless Offices. Environment and behavior 18(5): 623-639, 1986.
- HESCHONG MAHONE GROUP (HMG). Windows and offices: A study of office worker performance and the indoor environment. Technical Report for the California Energy Commission. Revisada 18 June 2019, 2003. <http://www.h-m-g.com/>.
- HECHONG MAHONE GROUP (HMG) Office Daylighting Potential. Task 3 of the PIER Daylighting Plus Research Program. PIER. Public Interest Energy Research. California Energy Commission. CEC-500-2013-002, 2013.
- IC_INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN. Manual Evaluación y Calificación CES V1. 1° Ed. Santiago De Chile, 2014. ISBN: 978-956-8070-11-3.
- IDAE. Guía Técnica de Aprovechamiento de la Luz Natural en la Iluminación de Edificios. Comité Español de Iluminación. Madrid, 2005. ISBN: 84-86850-92-4.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE), IES document LM-83, New York, NY: Illuminating Engineering Society. 2012.
- INN_CHILE. Nch 1079. Of2008 Arquitectura y Construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico. Norma Chilena Oficial- instituto nacional de normalización. 2° reimp. 2010.
- KOLÅS, T., Performance of Daylight Redirecting Venetian Blinds for Sidelighted Spaces at High Latitudes, Thesis for the degree of Philosophiae Doctor. Norwegian University of Science and Technology Faculty of Architecture and Fine Art Department of Architectural Design, Form and Colour. Trondheim, December 2013.
- KONIS, K. Evaluating daylight effectiveness and occupant visual comfort in a side-lit open-plan office building in San Francisco, California, in Build Environment, 59, 662-677, 2013.

- MARDALJEVIC, J. Daylight, Indoor Illumination, and Human Behavior, in Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Springer-Verlag New York Inc, New York, pp 2804-2846, 2012. ISBN 978-0-387-89469-0
- MARDALJEVIC, J. Daylight, Indoor Illumination and Human Behavior. En: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Springer-Verlag New York Inc, New York. 2012, pp 2804-2846. ISBN 978-0-387-89469-0
- MARDALJEVIC, J. Climate-Based Daylight Modelling and its Discontents. Presented at the Simple Buildings Better Buildings? Delivering performance through engineered solutions, CIBSE Technical Symposium, London, April 16-17th, 2015.
- MARDALJEVIC, J., ANDERSEN, M., ROY, N. et CHRISTOFFERSEN, J. Daylighting, Artificial Lighting and Non-Visual Effects Study for a Residential Building. En: VELUX Corporation. 2012.
- MARDALJEVIC, J., ANDERSEN, M., ROY, N. AND CHRISTOFFERSEN J. Daylighting Metrics: Is There a Relation Between Useful Daylight Illuminance and Daylight Glare Probability? En: Proceedings of the Building Simulation and Optimization Conference BSO12, International Building Performance Simulation Association. 2009. p. 1-8.
- MCNEIL, A., BURRELL, G., Applicability of DGP and DGI for evaluating Glare in a Brightly Daylit Space. ASHRAE and IBPSA-USA SimBuild 2016, Salt Lake City. p. 57-64.
- MOP. Términos de Referencia Estandarizados TDR Confort Ambiental y Eficiencia Energética. Guía técnica de apoyo Confort Lumínico N°8. DECON UC y CITEC UBB. 2° ed. 2015.
- NBI/IDL. Advanced Buildings Daylighting Pattern Guide Fact Sheet. University of Idaho, University of Washington. 2012
- NICOL, F., WILSON, M., CHIANCCARELLA, C. Using field measurements of desktop illuminance in European Offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effects on occupant's satisfaction, and the use of lights and blinds, in Energy Build, 38, 802-813, 2006.
- LEUNG, T., RAJAGOPALAN, P. et FULLER, R., Performance of a daylight guiding system in an-office building. En: Solar Energy 2013. Vol. 94, p. 253-265.
- PIER. Public Interest Energy Research. Oddice Daylighting Potential. Task 3 of the PIER Daylighting Plus Research Program. California Energy Commission
- PIDERIT, M. B., CAUWERTS, C., et. DIAZ, M. Definition of the CIE standard skies and application of high dynamic range imaging technique to characterize the spatial distribution of daylight in Chile. En: Journal of Construction, 13(2), 22-30. 2014.
- PINO, A., BUSTAMANTE, W., ENCINAS, F., ESCOBAR, R. Thermal and lighting behavior of office buildings in Santiago of Chile. Energy Build, 38, pp- 661-672, 2012.
- POIRAZIS, H.; BLOMSTERBERG, Å. AND WALL, M. Energy simulations for glazed office buildings in Sweden, in Energy and Buildings 40, pp.1161-1170, 2008.

- REINHART, C. Opinion: Climate-based daylighting metrics in LEEDv4 - A fragile progress. En: Lighting Research and Technology. 2015. Vol. 47, n° 4, p. 388.
- REINHART, C. Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices. En: Conference Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficient Buildings, Pacific Grove, CA., U.S.A., August 2002, pp. 1-12
- REINHART, C., MARDALJEVIC, J., ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. En: LEUKOS - Journal of the Illuminating Engineering Society of North America, 3:1, 7-31, 2006.
- ROBBINS, C. L. Daylighting Design and Analysis, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986
- SPAIN GBC. LEEDv4 Diseño y Construcción de Edificios, 2014.
- STEVANOVIĆ, S. Optimization of passive solar design strategies: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 25 (2013) 177–196, 2013.
- TRUDEAU, M., LI, C., FRISQUE, A. Modelling for Daylight Autonomy for Leed V4 – Implications for Cities in Northern Latitudes. Vancouver.
- UBB. Ilumina Chile, Proyecto FONDECYT No. 11121608-2012. Universidad del Bio-Bio, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, 2014. Revisada 18 June 2019. <http://iluminachile.ubiobio.cl/>
- U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. LEEDv4 Reference Guide for Building Design and Construction, Washington DC, 2013.
- U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. LEED Interpretation, ID#100002149, 2017. Retrieved 18 June 2019. <https://www.usgbc.org/leedaddenda/100002149>
- VEITCH, J. A., CHARLES, K. E., NEWSHAM, G. R., MARQUARDT, C. J. G. AND GEERTS, J. Environmental Satisfaction in Open-Plan Environments: 5. Workstation and Physical Condition Effects. IRC Research Report RR-154. Institute for Research in Construction. National Research Council Canada, Ottawa, ONT, K1A 0R6, Canada, 2003
- WEBB, A.R., Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light. En: Energy and Buildings. 2006. Vol. 38, n° 7, p. 721-727.
- ZAMBRANO PRADO, P. Control solar e iluminación Natural en la arquitectura dispositivos de control solar fijos en clima semicálido-subhúmedo, 2013.

Referencias Web:

Daylighting Pattern Guide: <https://patternguide.advancedbuildings.net/>

DIVA For Rhino: <https://www.solemma.com/>

Ilumina Chile: <http://iluminachile.ubiobio.cl/>