

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética

# Factores de diseño de la luz natural para el Confort visual en Aulas Escolares con Aprendizaje Activo

Nombre tesista:

Septiembre, 2021

**Romina Toledo Piccardo**

**Prof Guía:** Beatriz Piderit

**Prof Co-Guía:** Cecilia Palarino



MAGÍSTER EN  
HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

**5 Años**



Qualitas  
**PROGRAMA ACREDITADO**

Desde el 07 de diciembre de 2017  
Hasta el 07 de diciembre de 2022

SDE Concepción MODOBIO Preselec

## Resumen

### Resumen

La iluminación natural influye positivamente en el proceso de aprendizaje de los estudiantes, de esta manera existen diversos manuales de diseño de aulas escolares para aprovechar las características espaciales con diseño pasivo.

A su vez existen nuevas maneras de utilizar el espacio, por medio de distribuciones según las actividades que se lleven a cabo, en las cuales la orientación puede afectar el modo en que los usuarios perciben la luz. Siendo esta, una variable importante a considerar al momento de analizar un aula.

El objetivo de esta investigación es identificar los factores de diseño de luz natural que influyen en las condiciones de confort visual de los alumnos en espacios educativos con modalidades de aprendizaje activo que implican disponer espacios flexibles en relación a espacio educativos más tradicionales para los nuevos requerimientos de aprendizaje.

El estudio es de tipo experimental con enfoque cuantitativo, en el cual se llevó a cabo un análisis del estado del arte para posteriormente clasificar las variables de diseño del espacio, y distribuciones de las áreas de trabajo, las cuales en conjunto se llevaron a un modelo de simulación 3D en el que se analizó la Probabilidad de Deslumbramiento (DGP) y Luminancia en dos prototipos de aulas con orientación norte por medio del plugin DIVA for Rhino. Los resultados de estos análisis se compararon con los estándares lumínicos para aulas escolares del TDRe.

En cuanto a los resultados, se obtuvo una variación de los porcentajes de deslumbramiento y contrastes de luminancia en las distintas maneras de distribuciones y ángulos de visión de los espacios de trabajo seleccionados, para los casos que no cumplieron con los rangos establecidos para un confort lumínico se propusieron lineamientos de diseño y uso del espacio para la iluminación que acogen metodologías de aprendizaje activo.

**Palabras claves:** *Aulas escolares; Diseño pasivo; Métricas lumínicas; Confort visual; Espacio flexible; Aprendizaje activo.*

## *Abstract*

### **Abstract**

Research has shown the importance of natural lighting in the learning process of students. That is why there are several design manuals for school classrooms to take advantage of the spatial characteristics with passive design.

At the same time, there are new ways of using the space, through distributions according to the activities that are carried out, in which the orientation can affect the way in which users perceive light. This is an important variable to consider when analyzing a classroom.

The objective of this research is to identify the natural light design factors that influence the visual comfort conditions of students in educational spaces with active learning modalities that involve providing flexible spaces in relation to more traditional educational spaces for new learning requirements.

The study is experimental with a quantitative approach, in which an analysis of the state of the art was carried out to subsequently classify the design variables of the space, and distributions of the work areas, which together were taken to a 3D simulation model in which the selected lighting metrics were analyzed (Probability of DGP glare and false color). The results of these analyses were compared with the lighting standards for school classrooms indicated in the document.

As for the results, a variation of the lighting ranges was obtained in the different ways of distributions and viewing angles of the selected workspaces, for the cases that did not meet the established ranges for lighting comfort, design guidelines and use of space for lighting were proposed to accommodate active learning methodologies.

**Keywords:** *Active learning classrooms; Passive design; Lighting metrics; Visual comfort; Flexible space.*

## Índice

### Índice general

Resumen .....	i
Abstract.....	ii
Índice general.....	iii
Índice de tablas .....	v
Índice de figuras .....	vi
Estructura de la tesis.....	viii
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Problema de investigación .....	3
1.3. Preguntas e hipótesis de investigación .....	4
1.3.1. Hipótesis .....	4
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos .....	5
1.5. Síntesis de la metodología de investigación.....	6
Capítulo 2. Marco Teórico.....	9
2.1. Distribuciones de aprendizaje activo .....	9
2.2. Estrategias de diseño.....	13
2.2.1. Criterios de diseño.....	13
2.2.2. Reflexión de superficies en aulas. ....	18
2.3. Definición casos de estudio.....	20
2.3.1. Criterios de prototipos de aula .....	20
2.3.2. Métricas de iluminación natural y programa de simulación.....	23

## Índice

Capítulo 3. Metodología.....	25
3.1. Propuesta de prototipos según estrategia.....	25
3.2. Materialidades .....	26
3.3. Métricas de luz diurna.....	27
3.4. Ángulos de Visión.....	28
3.5. Programa de simulación.....	30
3.5.1. Datos y tiempos de simulación.....	31
Capítulo 4. Resultados.....	32
4.1. Prototipo Alero .....	32
4.1.1. Distribución tradicional.....	33
4.1.2. Distribución circular.....	36
4.1.3. Distribución grupal .....	38
4.2. Prototipo Alero + Repisa de Luz .....	40
4.2.1. Distribución tradicional.....	41
4.2.2. Distribución circular.....	44
4.2.3. Distribución grupal .....	46
4.3. Recomendaciones de optimización.....	48
Conclusiones .....	53
Referencias bibliográficas.....	55

## Índice

### Índice de tablas

Tabla 1. Tipología de pedagogías centradas en el alumno. Fuente: (Dovey & Fisher, 2014).....	10
Tabla 2. Valores de reflexión recomendados para un aula. Fuente: Ministerio de Obras Públicas (2005).....	19
Tabla 3. Valores de reflexión de diferentes superficies. Fuente: Ministerio de Obras Públicas (2005).....	19
Tabla 5. Criterios de diseño para prototipos de aula con iluminación lateral. ....	21
Tabla 4. Tipología de pedagogías centradas en el alumno. Fuente: (Dovey & Fisher, 2014).....	22
Tabla 9. Modelos con estrategias solares pasivas para contexto climático de Concepción , Chile. Elaboración propia. ....	25
Tabla 6. Materialidades y sus valores para prototipos de aulas. ....	26
Tabla 7. Métricas de luz diurna que se utilizarán para la evaluación de prototipos de aula. Elaboración propia. ....	27
Tabla 8. Luminancias en las superficies de una sala (oficina). Fuente: Dubois (2003).....	28
Tabla 10. Ángulos de visión según distribución en cada cuadrante. Elaboración propia.....	29
Tabla 11. Daylight Glare Probability (DGP) P. Alero y P. Alero + Repisa.....	48
Tabla 12. Daylight Glare Probability (DGP) P. Alero y P. Alero + Repisa (Cuadrantes Ventana) .....	49

## Índice

### Índice de figuras

Figura 1. Zona dorada y zona de sombra en el aula. Fuente: Park & Choi (2014) .....	10
Figura 2. Diseño de aula elaborado por los profesores. Fuente: Kepez & Ust (2020) .....	12
Figura 3. Diseño de aula elaborado por los alumnos. Fuente: Kepez & Ust (2020) .....	13
Figura 4. Daylight Factor en el caso de que la altura de la ventana supere los 90 cm desde el suelo. Fuente: Inan (2013) .....	14
Figura 5. Criterios para las estrategias de iluminación natural en las aulas orientadas al norte. Fuente: Piderit & Bodart (2012) .....	15
Figura 6. Criterios para las estrategias de iluminación natural en las aulas orientadas al sur. Fuente: Piderit & Bodart (2012) .....	16
Figura 7. Ventana larga bilateral. Fuente: Leslie et al. (2010) .....	17
Figura 8. Tabla resumen prototipos de aulas. Fuente: Leslie et al. (2010) .....	17
Figura 9. Estrategias analizadas para la ciudad de Concepción. Fuente: Ilumina (Universidad del Bio Bio, n.d.) .....	18
Figura 10. <b>(a)</b> Distribución para Presentación <b>(b)</b> Distribución para Gran interactivo. Fuente: Kepez & Ust (2020) .....	23
Figura 11. Ángulos de visión en el aula de distribución tradicional, circular y grupal superpuestas. Elaboración propia. ....	29
Figura 12. Metodología de análisis programa de simulación. Fuente: Elaboración propia. ....	30
Figura 13. Prototipo Alero: Modelo Experimental de aula. Elaboración propia. ....	32
Figura 14. Glare Probability (DGP) Prototipo Alero distribución tradicional (ventana). Elaboración propia. ....	33
Figura 15. Análisis Luminancia. Prototipo Alero distribución tradicional (ventana). Elaboración propia. ....	34
Figura 16. Glare Probability (DGP) Prototipo Alero distribución tradicional (muro). Elaboración propia. ....	35

## Índice

Figura 17. Análisis Luminancia. Prototipo Alero distribución tradicional (muro). Elaboración propia .....	35
Figura 18. Prototipo Alero: Análisis de Glare probability (DGP) y luminancia distribución circular el 21 de junio. Elaboración propia.....	36
Figura 19. Prototipo Alero: Análisis de Glare probability (DGP) y luminancia distribución grupal el 21 de junio. Elaboración propia.....	38
Figura 20. Prototipo Alero + repisa de luz: Modelo Experimental de aula. Elaboración propia.....	40
Figura 21. Glare Probability (DGP) Prototipo Alero + repisa de luz distribución tradicional. Elaboración propia. ....	41
Figura 22. Análisis Luminancia. Prototipo Alero + repisa de luz distribución tradicional. Elaboración propia. ....	42
Figura 23. Glare Probability (DGP) Prototipo Alero + Repisa distribución tradicional (muro). Elaboración propia. ....	43
Figura 24. Análisis Luminancia Prototipo Alero + Repisa distribución tradicional (muro). Elaboración propia. ....	43
Figura 25. Prototipo Alero + repisa de luz: Análisis de Glare probability (DGP) y luminancia distribución circular el 21 de junio. Elaboración propia.....	44
Figura 26. Prototipo Alero + repisa de luz: Análisis de Glare probability (DGP) y luminancia distribución grupal el 21 de junio. Elaboración propia. ....	46
Figura 27. Daylight Glare Probability (DGP) P. Alero y P. Alero + Repisa (Cuadrante Ventana .....	49

## *Estructura de la tesis*

### **Estructura de la tesis**

El capítulo 1 presenta los antecedentes respecto a estudios realizados en el ámbito de aulas escolares, en cómo la iluminación natural influye en el desempeño de los alumnos, la relación de los parámetros espaciales (orientación, forma, porcentaje de acristalamiento del aula, etc.) y su relación con los valores de las métricas de iluminación, o en el comportamiento y en la capacidad de adaptación de los alumnos en espacios flexibles. Se mencionan manuales de diseño en los cuales se sugieren estrategias de diseño dependiendo de la ubicación y orientación de las aulas, además de la definición de rangos para métricas de iluminación natural. También se plantea el problema de investigación, hipótesis y objetivos.

El capítulo 2 presenta el marco teórico centrándose en las aulas y su cambio en el uso del espacio, pasando de distribuciones tradicionales que consisten en columnas orientadas hacia la pizarra con el profesor como foco principal, y los nuevos métodos de uso del espacio en relación al aprendizaje activo, centrándose en los alumnos. Por otro lado se menciona más detalladamente las estrategias de iluminación al interior de las aulas, e investigaciones que han estudiado las variaciones de los valores de ciertas métricas en cuanto a la distribución de la luz al presentar distribuciones de dispositivos con más de una orientación.

El capítulo 3 presenta la metodología utilizada. Se describen las tipologías de distribución de aulas y materialidades utilizadas en los modelos 3D para su análisis. Las métricas y los rangos de confort son también explicados en este capítulo como referencia para los análisis y conclusiones. Además, se describen los procesos de simulación desempeñados por Diva for Rhino y los múltiples procedimientos conducidos para generar mapas de luminancias para evaluar el confort visual en false color a partir de los modelos en estudio.

El capítulo 4 presenta los resultados de las simulaciones para los dos prototipos de aulas propuestos, en los cuales se estudian tres distintas distribuciones, tradicional (columnas con una única dirección hacia la pizarra), circular y grupal. Los resultados son presentados con respecto al deslumbramiento y mapas de luminancias que influyen en el confort visual y bienestar del ocupante. Para los casos en que no se cumplió con los rangos establecidos para las métricas estudiadas se desarrolló una serie de sugerencias de uso para mejores resultados en cuanto al control visual.

## *Estructura de la tesis*

El capítulo 5 presenta las conclusiones a las cuales se llegó al interpretar los resultados. En ella se demuestra la importancia de los ángulos de visión con respecto a la ventana y cómo el estar en un mismo sitio en el aula varía con respecto a eso a la iluminación en el campo visual. Además se menciona posibles líneas de investigación a partir de esta.

## *Estructura de la tesis*

## Capítulo 1. Introducción

### Capítulo 1. Introducción

#### 1.1. Antecedentes

La base para una comunidad ideal y saludable está en enfatizar la importancia del diseño en los espacios para los niños, ya que son la siguiente generación en la comunidad. Esto debe ser por medio de infraestructuras urbanas que permitan el mejoramiento de las ciudades hacia un desarrollo correcto y sostenible, enfatizando en espacios interesantes que permitan hacer crecer sus habilidades y creatividades (Anbari & Soltanzadeh, 2015).

Diferentes investigaciones han demostrado la importancia del confort ambiental en el rendimiento y bienestar del aprendizaje de los estudiantes para un mayor confort por medio de la iluminación natural, acústica, calidad del aire y la relación con la naturaleza en la arquitectura en las aulas escolares (Agencia Chilena de eficiencia energética, 2012). Esto genera un desafío para los diseñadores de entender cómo estas necesidades humanas pueden ser estimuladas, creando soluciones dinámicas que pueden generar variaciones significativas en las necesidades de los usuarios (P. Barrett et al., 2015).

La iluminación natural en las **aulas escolares** cumple un rol significativo al momento de desarrollar actividades al incidir directamente en el bienestar corporal ya que regula el ciclo circadiano que se sincroniza al ciclo solar influyendo en el comportamiento (actividad/ descanso), los niveles de cortisol (que permiten enfocarse y concentrarse en las actividades), y a nivel celular; además los niños son más sensibles a estas variaciones de luz/oscuridad. La iluminación natural a su vez es importante para un ambiente interior confortable, pero para ello es necesario limitar la intensidad o posibles focos de deslumbramiento evitando así tensión ocular y dolores de cabeza; para que de esta manera se lleven a cabo las actividades en el recinto, ya que las tareas visuales necesitan distintos niveles de iluminación dependiendo del tipo de actividad, por ejemplo para aquellas tareas que requieren un trabajo más detallado se necesitarán niveles de iluminancia más altos. Por otra parte, las aulas diseñadas adecuadamente permiten la eficiencia energética y ahorro de costos de operación reduciendo así la necesidad de iluminación artificial y permitiendo ahorros durante el día (Agencia Chilena de eficiencia energética, 2012).

Es por ello que se han desarrollado diversos estudios internacionales en los cuales se han estudiado los parámetros que influyen en la iluminación de los espacios, ya sea por la forma del edificio, la orientación, el porcentaje de acristalamiento de los muros, la distribución interior, la

## Capítulo 1. Introducción

reflectancia de los materiales, y cómo estas pueden influir en las **métricas de iluminación natural** en las aulas escolares como Diffuse daylight, daylight autonomy, estímulo circadiano, iluminancia promedio, y alcance; esto por a través de mediciones de dichas métricas que cumplan con ciertos estándares que se proponen para lograr una buena iluminación natural, como lo es “Patterns to Daylight Schools for People and Sustainability”(Leslie et al., 2010).

En Chile el Mineduc ha promovido que los nuevos proyectos sean concebidos bajo la óptica de diseño sustentable, estableciendo como exigencia la obtención de la “Certificación Edificio Sustentable”. Se ha avanzado bastante en estudios de eficiencia energética en edificios de educación y existen guías para diseños de espacios educativos que hacen recomendaciones según zonas climáticas con estrategias de diseño sustentable, haciendo referencia a orientación de ventanas, confort térmico entre otros (Pagliero, Piderit, 2017) como lo es La Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos (GEEEduc) de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) y el Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética para Edificios Públicos. También cuenta con la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción, la cual reglamenta la ley general de urbanismo y construcciones, incluyendo normativa estándar para establecimientos públicos y educacionales, regulando el proceso administrativo, el proceso de planificación urbana, el proceso de urbanización, el proceso de construcción, y los estándares técnicos de diseño y de construcción (MINVU, 2020). Por otro lado, se cuenta con los Términos de Referencia Estandarizados (TDRe) el cual cuenta con parámetros de eficiencia energética, y en el caso de la iluminación natural se definen requerimientos mínimos para asegurar las condiciones de calidad y **confort visual** (Ministerio de Obras Públicas, 2005)

Por otro lado, se han llevado a cabo investigaciones en las cuales se evalúa el comportamiento y la capacidad de adaptación de las personas a **espacios flexibles** que responden a metodologías de aprendizaje activo, lo anterior entendiéndolo como espacios diseñados que permitan una serie de estilos y actividades de aprendizaje para facilitar una pedagogía centrada en el alumno a través de la versatilidad y libertad que permite la estructura del recinto. De esta manera se tienen múltiples posibilidades de distribución del espacio permitiendo elegir el área de trabajo de acuerdo a las actividades desarrolladas grupal como individualmente (Kariippanon et al., 2020). En el caso de Chile, si bien se han desarrollado guías de diseño para recintos educacionales (mencionadas anteriormente), estos consideran una única distribución al interior del aula.

## Capítulo 1. Introducción

Existen distintas maneras de utilizar el espacio al interior de un aula dependiendo de la actividad que se realice, pero con ello ¿se ve afectado el confort visual de los usuarios? Esto desde la premisa de que las estrategias de diseño de luz natural para espacios educativos consideran la distribución en columnas (distribución tradicional del aula escolar). Si consideramos que habrá agrupaciones que utilizaran el espacio con distinta orientación y distribución del espacio a diferencia de lo que propone el uso tradicional del espacio.

### 1.2. Problema de investigación

Existen evidencias en cuanto a la estrecha relación existente entre las características físicas de los edificios escolares, el espacio que se utiliza y el rendimiento académico. Si estas condiciones no son las óptimas, se dificultará tanto la enseñanza como el aprendizaje (P. P. Barrett & Zhang, 2009).

Por la importancia de la luz natural en las aulas, se han llevado a cabo investigaciones para evaluar los parámetros de iluminación natural, establecer rangos de confort lumínico en los usuarios, y elaborar distintos manuales de diseño de aulas educativas, con el fin de proponer soluciones que respondan a los requerimientos de sus usuarios como lo es el caso de la Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos el cual se desarrolló en el marco del programa de apoyo a la gestión de proyectos de edificación pública de alta eficiencia energética de los años 2011 y 2012 (Agencia Chilena de eficiencia energética, 2012), pero en los casos de aulas escolares, las investigaciones se inclinan a usar métricas de iluminación natural que se miden a la altura de plano de trabajo, sin considerar el ángulo de visión de los usuarios. Además estos manuales consideran una ocupación tradicional del espacio con distribución lineal de los pupitres orientados unidireccionalmente hacia el profesor.

Existen distintas interacciones entre el diseño de espacios educativos y los estudiantes que lo utilizarán; en el caso de las aulas de clases se podría mencionar dos tipos de interacciones a continuación; el primero una sala de clases como un espacio actuado en el cual los usuarios se relacionan con este de acuerdo a las intenciones del proyecto y el espacio socialmente definido, como lo es cuando la distribución que se utiliza es aquella que se propuso al momento de diseñar el espacio; el segundo caso se da un conjunto de prácticas adaptativas en un intento de modificar o alterar el espacio a uno que responda sus necesidades, como es el caso de utilizar distintas distribuciones en el espacio para adaptarlo a sus actividades (Chiesi, 2010).

## Capítulo 1. Introducción

Actualmente en los métodos de enseñanza se han comenzado a utilizar modalidades de aprendizaje activo y a su vez, se recomienda proponer espacios educativos flexibles, en el cual el espacio pase a ser un medio que se adapta a las actividades con distintos tipos de distribuciones de los usuarios (Ministerio de Educación, 2014). Estos cambios en la organización del espacio de trabajo puede afectar el modo en que los usuarios perciben la luz, por lo cual es una variable que se debe considerar al momento de analizar un aula.

**Las estrategias de diseño de las aulas son concebidas con un solo tipo de distribución, sin considerar los cambios en el uso del espacio. Estos distintos tipos de usos generan distintos ángulos de visión (puntos de vista) de los alumnos generando posibles variaciones en el confort visual de los usuarios y en los valores de las métricas que las evalúan.**

### 1.3. Preguntas e hipótesis de investigación

1. ¿Las estrategias de iluminación natural para aulas escolares darán resultados similares dentro de los rangos para distintas distribuciones al interior del aula?
2. ¿Una misma ubicación en el aula con distintas orientaciones del campo visual tendrá valores dentro del rango y otros de deslumbramiento?

#### 1.3.1. Hipótesis

Las condiciones de confort visual de los alumnos podrán verse negativamente afectados al realizar metodologías de aprendizaje activo en aulas tradicionales, ya que las estrategias de iluminación natural propuestas han sido concebidas para distribuciones unidireccionales de los alumnos; y algunas métricas importantes para lograr el confort visual se modificarán al cambiar la distribución y posición del observador generando incomodidad visual. Es importante considerar la ubicación en el aula, la orientación del usuario (campo visual) y evaluar el punto de vista en aquellas situaciones en las que el espacio presenta condiciones desfavorables.

## Capítulo 1. Introducción

### 1.4. Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo general

Identificar los **factores de diseño de luz natural** que influyen en las condiciones de **confort visual** de los estudiantes en espacios educativos con modalidades de **aprendizaje activo**, que implican disponer **espacios flexibles** en aulas **tradicionales**.

- **Aprendizaje activo:** Método de enseñanza que utiliza estrategias didácticas centradas en el aprendizaje del alumno, donde éste participa de manera activa y consciente en su proceso de aprendizaje,
- **Espacios flexibles:** Espacios que permitan llevar a cabo actividades con distintos tipos de usos del espacio, ya sea de distribución o tipo de actividades.
- **Aulas tradicionales:** única distribución la cual centra la atención en el maestro

#### 1.4.2. Objetivos específicos

1. Clasificar las distribuciones espaciales de las modalidades para aprendizaje activo y las estrategias de iluminación natural aplicadas en las aulas.
2. Determinar los métricas de iluminación que inciden en el confort visual de los alumnos al modificar la distribución espacial del aula y la posición del observador al aplicar modalidades de aprendizaje activo.
3. Analizar el impacto de las estrategias de iluminación natural y las modalidades flexibles en las métricas de iluminación en aulas que fueron concebidas para distribuciones unidireccionales.
4. Proponer lineamientos para la iluminación que acogen modalidades de aprendizaje activo que implican disponer espacios flexibles, para optimizar los diseños de aulas tradicionales.

## Capítulo 1. Introducción

### 1.5. Síntesis de la metodología de investigación

Se llevó a cabo un estudio experimental con enfoque cuantitativo, en el cual como primera etapa se realizó un análisis del estado del arte para posteriormente clasificar las distintas variables estudiadas:

En relación al **primer objetivo** se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Se llevó una revisión del estado del arte en donde se definieron patrones para diseño de aulas escolares sugeridas para la franja climática de Concepción en la guía de diseño de Ilumina. A partir de esto se definió las características espaciales que se utilizarían para el prototipo de aula.
2. Se identificaron los tipos de distribuciones más recurrentes en espacios de aprendizaje activo. Se definieron los puntos de vista del observador en estas distintas distribuciones dentro de un mismo cuadrante en el aula.
3. Se elaboró una matriz de análisis espacial de las aulas, las cuales incluyen características espaciales como las dimensiones del aula, número de cuadrantes en el aula, y punto central de cada una para la definición del ángulo visual del observador, esto desde una distancia respecto a la ventana para cada cuadrante y su posición con respecto a ella, la altura del aula y materialidad del cielo, altura de antepecho de la ventana, etc.
4. Se graficó la información recopilada en cuanto a las distribuciones que se utilizan, y el tipo de actividad que se realiza.

En relación al **segundo objetivo** se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. A partir de la revisión del estado del arte, se llevó a cabo una revisión de investigaciones que se hayan realizado en aulas escolares, en relación a las métricas de iluminación natural. También se estudió las métricas que se utilizan para evaluación de iluminación natural en oficinas, esto ya que en las oficinas se llevan a cabo análisis lumínicos desde el punto de vista del usuario, al ser importante la distribución de los puestos de trabajos en un espacio compartido. Se determinó cuales métricas se evaluarían en el estudio, considerando aquellos que se verán afectados al modificar la distribución del aula y la posición del observador.

## Capítulo 1. Introducción

2. Se elaboró una matriz de análisis de las estrategias de diseño, las métricas de iluminación evaluadas y la distribución espacial.

En relación al **tercer objetivo** se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Se propuso los casos a analizar considerando estrategias de diseño para iluminación natural, para el primer caso un alero, y en el segundo un alero y repisa de luz. Ambos prototipos con ventanas en dos orientaciones, la de fachada norte y otra a pasillo (lado sur), a cada modelo se le incorporó las distribuciones espaciales para aprendizaje activo.
2. Se evaluó los prototipos por medio de un programa de simulación en este caso DIVA for Rhino en el cual se consideró la ubicación geográfica en que se emplaza el modelo junto con la orientación.
3. Se definió los documentos de referencia para los rangos de iluminación seleccionados para el análisis, y de acuerdo a los resultados obtenidos en el modelo de simulación se llevó un estudio de los resultados para interpretarlos y graficar la información. Una vez clasificado los resultados, se comprobó si cumplieron con los rangos de métricas que se exigen para aulas escolares según el documento de referencia seleccionado.

En relación al **cuarto objetivo** se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Se llevó a cabo una clasificación y selección de casos dependiendo de qué tan fuera de los rangos propuestos se encontraron los resultados para de esta manera proporcionar recomendaciones para optimizar el diseño.
2. En los casos que el diseño no cumple con los rangos establecidos se evaluó por qué se generaron esos resultados (que parte de las estrategias no está respondiendo a los requerimientos lumínicos esperados).

## **Capítulo 1. Introducción**

## Capítulo 2. Marco teórico

### Capítulo 2. Marco Teórico

El aprendizaje activo anima a los alumnos a ser participantes activos en el aula con actividades de aprendizaje significativas y a pensar en lo que están haciendo por medio de la disposición del espacio como respuesta a la aplicación de estas nuevas pedagogías (Bonwell y Eison, 1991).

El estudio del arte de las aulas se lleva a cabo dentro de dos temáticas, la primera es con respecto a las distribuciones del mobiliario (y alumnos) dentro de las aulas para las distintas actividades que conllevan al aprendizaje activo; y la segunda se refiere a las estrategias de diseño que se utilizan para las aulas (y que sugieren los manuales de diseño escolar).

#### 2.1. Distribuciones de aprendizaje activo

El diseño y la distribución del espacio al interior de un aula escolar cumple un rol fundamental dentro del proceso de aprendizaje de los alumnos.

Talbert y Mor-Avi (2019) realizaron una revisión del estado del arte de las aulas de aprendizaje activo, comenzando desde la definición de las aulas hasta los errores que se pueden llegar a cometer en un intento de adaptar aulas tradicionales a aulas de aprendizaje activo, al no estar los espacios en sintonía con las necesidades particulares de este tipo de método de aprendizaje. Por otra parte mencionan las habilidades del siglo XXI las cuales son competencias que también las aulas de aprendizaje activo ayudan a adquirirlas o reforzarlas en los alumnos, entre ellas se refieren al procesamiento y la comunicación de la información. Estos caracterizados por comportamientos como la motivación, perseverancia o flexibilidad de la persona.

Investigaciones realizadas en aulas tradicionales en la Universidad de Soongsil, Corea del sur indicaron mejoras en los resultados académicos y la experiencia de aprendizaje de los alumnos al usar ALC (Active Learning Classrooms) para aulas universitarias; y evidenciaron problemas de zonificación con distribución tradicional, identificando una zona dorada (como un entorno de aprendizaje que permite una mejor comunicación) y una zona de sombra (donde están los alumnos con menos participación) ver Figura 1. Aunque el 74,8 % de los estudiantes prefería sentarse en la zona dorada, se genera una segregación en el aprendizaje, los alumnos con rasgos positivos de aprendizaje suelen sentarse en la zona dorada, en consecuencia están situados de forma natural para obtener mejores condiciones de aprendizaje, y estos estudiantes acaban demostrando mejores

## Capítulo 2. Marco teórico

resultados de aprendizaje en comparación con los estudiantes de otras zonas de asiento (Park & Choi, 2014).

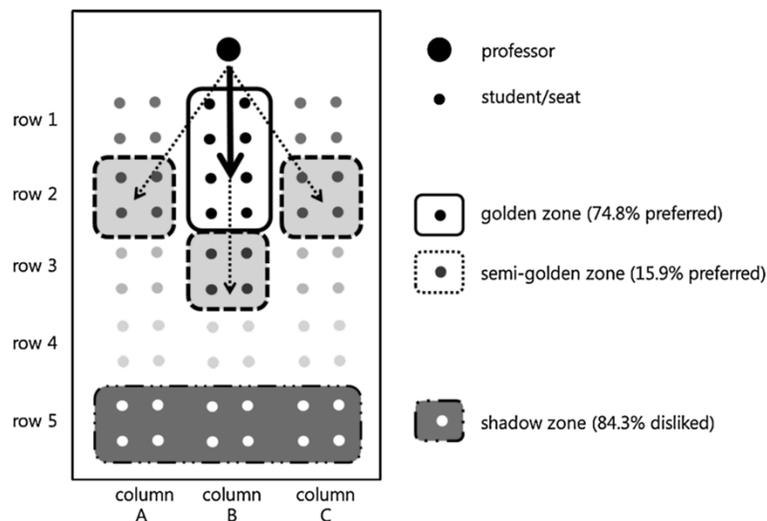


Figura 1. Zona dorada y zona de sombra en el aula. Fuente: Park & Choi (2014)

Dovey & Fisher (2014) señalan las tipologías de espacios de aprendizajes que se utilizan para aprendizajes activos, definiendo entre estas el aula como un *espacio de aprendizaje cerrado tradicional de unos 40-60 metros cuadrados para 20-30 estudiantes*, en el caso de poder cerrar espacios mediante paredes flexibles, entonces estas también se pueden clasificar como aulas. Por otra parte en su estudio clasifican los tipos de prácticas/ actividades que se desempeñan en las aulas como métodos de enseñanza, las cuales inciden en los tipos de distribuciones que se utilizarán; estas actividades se clasifican en seis tipos de prácticas (ver Tabla 1) en los cuales requieren distintos tipos de aforos (cantidad de alumnos) para las agrupaciones.

Tabla 1. Tipología de pedagogías centradas en el alumno. Fuente: (Dovey & Fisher, 2014)

Continuidad de los espacios	Tipo de actividad pedagógica
PRESENTACION (25-150 alumnos)	Estudiantes o profesores presentan a un público mayoritariamente pasivo. El tamaño del grupo puede variar desde una cohorte de clases hasta un curso completo. Estas actividades facilitan una comunicación eficaz de la información

## Capítulo 2. Marco teórico

GRAN INTERACTIVO  
(25-75 alumnos)

Actividades que pasan sin problemas de grandes a grupo pequeño y viceversa; a menudo se organizan en subgrupos de 4-6 que pueden volver a subdividirse en 2 ó 3. Facilita el aprendizaje entre iguales y la enseñanza en equipo.

INTERACTIVO MEDIO  
(10-25alumnos)

Actividades con un flujo de movimiento similar al anterior, pero con un grupo más pequeño y generalmente con un solo profesor.

CREATIVO INTERACTIVO  
(10-25 alumnos)

Actividades interactivas pero con énfasis en aprendizaje práctico además de bolígrafos y teclados, además de acceso a una serie de recursos que pueden incluir materiales artísticos, zonas húmedas, laboratorio o exteriores.

INTERACTIVO PEQUEÑO  
(2-5 alumnos)

Este es el modelo de "ruptura" basado en problemas y de aprendizaje entre iguales con pequeños grupos autónomos que pueden dispersarse y responsabilizarse de su aprendizaje.

REFLECCION  
(1 alumno)

Actividades singulares que incluyen la lectura, la escritura o investigación práctica para cumplir los objetivos de aprendizaje.

---

**El espacio de aprendizaje activo** es algo mucho más que un simple mobiliario atractivo y unas paredes multifuncionales geniales. Es un espacio que funciona mejor cuando la pedagogía del aprendizaje activo se combina con las posibilidades que ofrece la configuración del mobiliario (Kepez & Ust, 2020)

Kepez & Ust (2020) llevaron a cabo una investigación en la cual un grupo de estudiantes y un grupo de profesores desarrollaron una serie de distribuciones que consideran necesarias para realizar actividades al interior de las aulas escolares. Cada grupo debía hacerlo sin ver los resultados del otro grupo, y con un tiempo determinado. En este estudio se consideró un número de alumnos determinado para los puestos de distribución dentro del aula que cumpliera con la capacidad ideal para una comunidad de aprendizaje activo, es decir un grupo no mayor de 25 alumnos. Se elaboraron los planos del aula que mostraban las distintas disposiciones. También se mecanizaron los comentarios de los participantes para entender las decisiones que se tomaron al diseñar cada distribución.

Los resultados mostraron que inicialmente se propusieron distribuciones tradicionales para luego dar paso a distribuciones más variadas (ver Figura 2 y Figura 3)

## Capítulo 2. Marco teórico

Los estudiantes compartieron sus opiniones negativas, y mencionaron cómo la educación tradicional y el correspondiente ambiente del aula afectan a la creatividad. Al comparar el ALC con las aulas tradicionales, los alumnos sintieron que en el primero tenían el control del entorno del aula y de la clase. Del mismo modo, los profesores coincidieron en que el diseño del ALC les hace más activos tanto a alumnos como profesores, y les permite moverse por el aula. Mencionaron que la propia actividad de remodelar el aula para una tarea determinada puede aumentar el nivel de actividad de los alumnos.

Los estudiantes experimentaron que el diseño del aula de aprendizaje activo les permite no sólo trabajar en colaboración, sino también trabajar solos, como se muestra en la sexta configuración (Figura 2). De hecho, el análisis de las respuestas abiertas reveló que varios estudiantes mencionaron la importancia de su privacidad en el aula.

Este estudio puso de manifiesto un nuevo tipo de disposición de las aulas; introdujo un único grupo grande en el que los alumnos tenían la oportunidad de sentarse en torno a formas cerradas (rectangulares, circulares, hexagonales), proporcionando la máxima visibilidad de los demás miembros de la comunidad de aprendizaje.

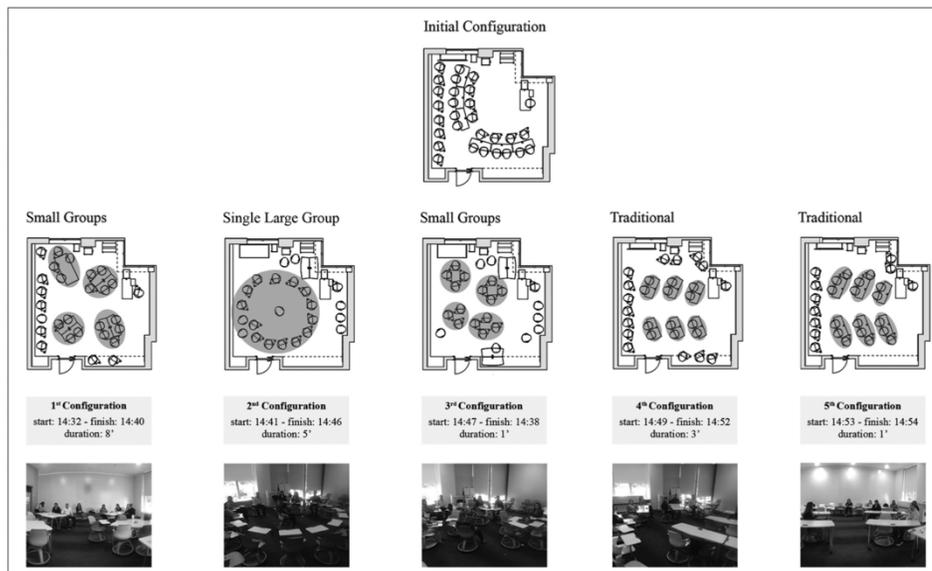


Figura 2. Diseño de aula elaborado por los profesores. Fuente: Kepez & Ust (2020)

## Capítulo 2. Marco teórico

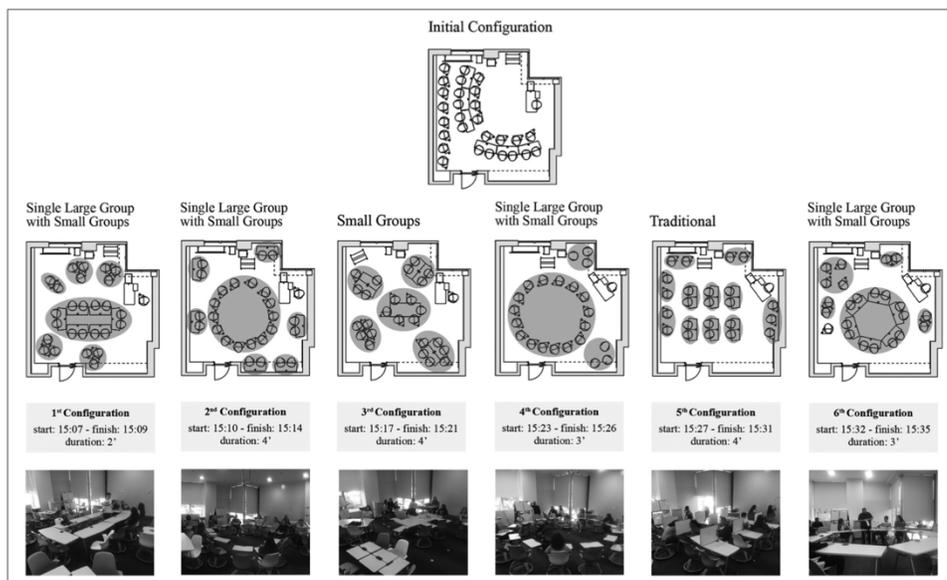


Figura 3. Diseño de aula elaborado por los alumnos. Fuente: Kepez & Ust (2020)

## 2.2. Estrategias de diseño

La luz natural es una fuente gratuita que, dependiendo de su incorporación en el diseño arquitectónico, puede otorgar un alto nivel de confortabilidad en el aula, además de autonomía energética de los requerimientos de luz artificial (Agencia Chilena de eficiencia energética, 2012).

Tanic; et al. (2019) señala que en las condiciones climáticas para el hemisferio norte se considera que la orientación favorable de las aulas en general es el sur y el sureste; en el caso del hemisferio sur, las orientaciones favorables son la norte y noreste.

Los alumnos mientras están en la escuela pasan la mayor parte del día en el aula, estas orientaciones permiten un gran intervalo de sol diario, el cual es importante en invierno, mientras que en verano la inclinación del sol permite que el calentamiento de la sala sea mucho menos que las de las orientaciones este y oeste, siendo estos factores muy importantes al momento de diseño.

### 2.2.1. Criterios de diseño

Para lograr un buen nivel de iluminación natural, se debe tener en cuenta los factores que afectan, entre ellas se encuentra la disposición del aula, las estrategias de iluminación natural, los dispositivos de iluminación natural aplicados para la dispersión de la luz natural y el control del ambiente dentro del aula, de esta manera dependiendo de la forma, la altura y la profundidad del aula en relación al

## Capítulo 2. Marco teórico

vano de abertura, se determina la manera adecuada de admitir la luz del día en las aulas. Se distinguen distintas distribuciones de los dispositivos de iluminación natural en las aulas: iluminación unilateral, bilateral, multilateral y cenital (Tanic; et al., 2019).

La calidad del ambiente de luz natural en las aulas apunta a un conjunto de principios y sistemas que deberían aplicarse en el proceso de diseño arquitectónico del edificio escolar, entre ellos se encuentra la configuración de las ventanas, la cual debe controlarse cuidadosamente para maximizar la iluminación natural en el edificio y garantizar una iluminación uniforme del espacio (Zomorodian et al., 2016) (Inan, 2013) (Tanic; et al., 2019).

Diversos estudios analizan distintos tipos de configuraciones de ventanas, viendo en los resultados cuales son las estrategias a considerar que sean óptimas para una buena distribución de la luz al interior del aula. En el estudio de Inan (2013) se lleva a cabo un análisis mediante el programa Velux, en el cual se simula las ventanas de un aula y su relación con la iluminación al interior de esta. En ella se muestran diferentes gráficos del documento del rendimiento de la luz diurna de las aulas en función de los valores de iluminación y el Daylight Factor (DF) y como estos varían con las distintas alturas de ventana. Tras las simulaciones, se observa la relación entre la iluminación cerca de la ventana y como influyen las dimensiones de esta en la distribución de la iluminación en el aula (ver Figura 4).

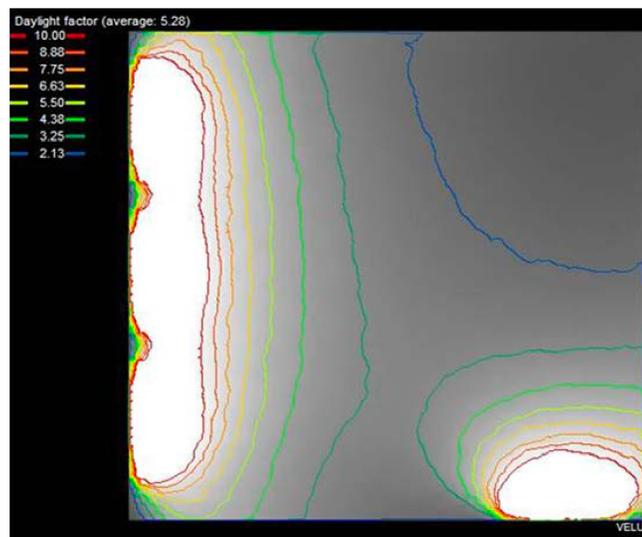


Figura 4. Daylight Factor en el caso de que la altura de la ventana supere los 90 cm desde el suelo. Fuente: Inan (2013)

## Capítulo 2. Marco teórico

Zomorodian et al (2016) señala que los resultados de sus análisis muestran que al igual que en el caso de Inan (2013) al aumentar la altura de la ventana y reduciendo la altura del alféizar, la intensidad y la uniformidad disminuyen. Además menciona que la instalación de un estante de luz con claraboyas, y el aumento de la relación ventana- pared permitieron una iluminación más distribuida, mejorando su uniformidad.

Piderit & Bodart (2012) llevaron a cabo una investigación en la cual seleccionaron ocho tipologías de aulas optimizadas, y por medio de modelos clasificaron estas aulas en dos categorías, las de orientación norte (3 tipos de aulas) y las de orientación sur (5 tipos de aulas). Para ello se evaluaron mediante el software Radiance, realizando una tabla comparativa entre todos los casos, comparando los niveles de luz diurna en el plano de trabajo, distribución de la luz diurna, niveles de iluminación diurna en la pizarra, uniformidad en el plano de trabajo y uniformidad en la pizarra.

A partir de estas tablas (ver Figura 5 y Figura 6) se muestran los resultados a los criterios de diseño que se evaluaron entre 6 tipos de opciones que van desde aplicación extremadamente buena hasta aplicación extremadamente pobre. Con este tipo de gráfica se puede observar qué tipo de estrategias son mejores para aplicar en aulas que eviten la penetración directa de la luz solar, buscando una luz difusa en el interior del aula sin perjudicar los niveles y la distribución de luz. En cuanto a la distribución y uniformidad, las tipologías con doble aportación de luz natural resultaron más eficientes, como es el caso de la tipología g2 y g3 para aulas orientadas al norte y sur. En cuanto al aporte de luz indirecta, la tipología g1 fue la más favorable en todas las orientaciones gracias a la ventana de pasillo que permite una iluminación adecuada para los alumnos que están en zonas más alejadas de la ventana. Por otro lado se menciona que las aulas orientadas al Este y Oeste son las más

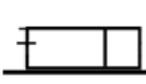
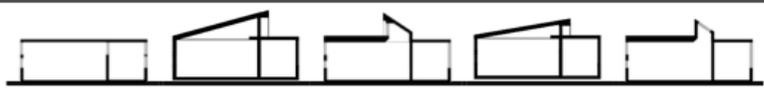
				
Design criteria	Basic and corridor	Clerestory bi-lat window	Clerestory uni-lat window	
<b>1</b> Daylight Levels workplane	○○	○○	○	Extremely good application ○○
Daylight distribution	○○	○○	○○	Good application ○
Daylight Levels whiteboard	○○	○○	○○	Poor application ⊙
<b>2</b> Daylight uniformity workplane	○	○	○	Extremely poor application ⊙⊙
Daylight uniformity whiteboard	○	○	○	Mixed benefits ○/⊙
<b>3</b> Low glare	○	○	N.E	Not evaluated N.E

Figura 5. Criterios para las estrategias de iluminación natural en las aulas orientadas al norte. Fuente: Piderit & Bodart (2012)

## Capítulo 2. Marco teórico

desfavorables debido al escaso control de la luz solar que proporcionan, esto ya que no se puede considerar un control de la luz solar con protecciones fijas, por lo que se deben aplicar protecciones solares móviles que permitan una regulación de la luz necesaria (Piderit & Bodart, 2012).



Design criteria	Typology g1	Typology g2 Opti	Typology g3	Typology g4 Opti	Typology g5 Opti
	Basic and corridor	Clerestory bi-lat window	Clerestory uni-lat window	Clerestory bi-lat and corridor	Skylight
<b>1</b> Daylight levels workplane	○○	○	○○	○○	○○
Daylight distribution	○○	○	○○	○○	○○
Daylight levels whiteboard	○○	○○	○○	○○	○○
<b>2</b> Daylight uniformity workplane	○	○	○○	○○	○
Daylight uniformity whiteboard	○○	N.E	○○	○	N.E
<b>3</b> Low glare	○○	N.E	○○	N.E	N.E

Figura 6. Criterios para las estrategias de iluminación natural en las aulas orientadas al sur. Fuente: Piderit & Bodart (2012)

Leslie et al. (2010) realizaron un manual de diseño que pueden adaptarse en cuanto a configuración y estilo a un proyecto escolar concreto por medio de patrones que cumplen con objetivos de diseño, además identifica los atributos positivos y señala los posibles defectos de cada patrón, resumidos en un diagrama codificado por colores (tablero de control de la iluminación natural), que representa ocho objetivos para un buen diseño de la iluminación natural, cada objetivo incluye una métrica asociada (ver Figura 7). El cuadro de mandos de la iluminación natural resume el rendimiento de un modelo, y se clasifica su desempeño con colores, que van desde el rojo que es una advertencia de que el objetivo es poco probable que se cumpla con el patrón, amarillo indica precaución para realizar una evaluación, hasta el verde que indica que el diseñador está bien encaminado para cumplir el objetivo, a su vez estos se evalúan con las siguientes métricas: iluminancia media, cobertura, luz diurna difusa, autonomía de la luz diurna, potencial de estímulo circadiano, área de acristalamiento, vista y ganancia de calor solar. Cada patrón se evaluó en condiciones de luz diurna típicas de la zona de Albany, Nueva York. Se eligió un día de cada una de las cuatro estaciones: El 21 de marzo, el 21 de junio, el 21 de septiembre y el 21 de diciembre se evaluaron a las 9:00, a las 12:00 y a las 15:00 horas. En el documento se presentan 25 patrones para aulas, pasillos y gimnasios, cada uno incluye dos paneles de iluminación diurna, uno para condiciones de cielo despejado y otro para condiciones de cielo nublado, que representan los puntos

## Capítulo 2. Marco teórico

fuerteres y débiles de cada patrón. Dentro del documento se muestra un cuadro de resumen en donde se muestra el rendimiento de las aulas según las métricas analizadas, de esta manera se logra observar cuales modelos tienen mejores rendimientos dependiendo del objetivo que se busca (ver Figura 8).

Además de evaluar distintos tipos de estrategias, se lleva a cabo una sección en la cual se analiza como influyen las ventanas a pasillos, considerando una iluminación bilateral.

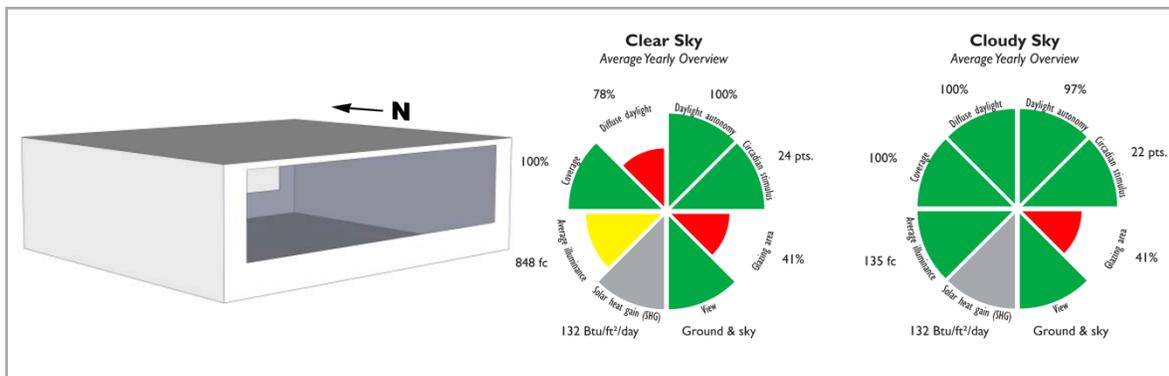


Figura 7. Ventana larga bilateral. Fuente: Leslie et al. (2010)

Page	Space type	Average illuminance (fc)		Coverage (%)		Diffuse daylight (%)		Daylight autonomy (%)		Circadian stimulus (pts.)		Glazing area (%)	View (G=ground; S=sky; N=none)	Solar heat gain (Btu/ft²/day)
		Clear	Cloudy	Clear	Cloudy	Clear	Cloudy	Clear	Cloudy	Clear	Cloudy			
—	All Rooms, No Daylight	0	0	0	0	0	0	0	0	0*	0*	0	N	0
<b>Classroom</b>														
16	North Large Window	113	69	100	93	100	100	96	96	21	18	21	GS	39
18	South Large Window	752	70	100	94	81	100	100	58	24	18	21	GS	92
20	East Large Window	459	69	100	93	88	100	98	57	22	18	21	GS	71
22	West Large Window	385	69	100	93	92	100	98	57	22	18	21	GS	71
24	South Medium Window	336	34	100	76	92	100	98	33	23	12	10	GS	46
26	South Small Window	224	15	100	35	94	100	73	12	21	7	5	GS	23
28	South Large Window with Overhang	332	42	100	90	89	100	100	46	24	16	21	GS	52
30	South Large Window with Lightshelf	425	47	100	91	88	100	100	51	24	16	21	GS	68
32	Bilateral Large Windows	848	135	100	100	78	100	100	97	24	22	41	GS	132
34	Skylights	238	47	100	100	100	100	100	73	24	19	6	N	25
36	North Roof Monitor	47	40	99	89	100	100	71	49	18	16	12	S	22
38	South Roof Monitor with Baffles	85	11	99	42	100	100	77	2	19	4	8	S	52
40	North Large Window + Skylights	236	95	100	100	100	100	100	89	24	21	24	GS	52
42	South Large Window + Skylights	868	92	100	100	78	100	100	89	24	21	24	GS	105
44	North Small Window + Skylights	147	39	100	95	100	100	98	55	22	17	8	GS	22
46	South Small Window + Skylights	342	39	100	95	94	100	100	55	24	17	8	GS	35

Figura 8. Tabla resumen prototipos de aulas. Fuente: Leslie et al. (2010)

## Capítulo 2. Marco teórico

En la plataforma web Ilumina (Universidad del Bio Bio, n.d.) se proporciona información de las características lumínicas de ciudades representativas en Chile. Con ello contribuyen con decisiones de diseño de aulas escolares para diseño de iluminación pasiva con sus respectivos análisis. Esta información la desarrollan en tres categorías, la primera es con respecto a frecuencia de cielos CIE de las ciudades, la segunda es la distribución de los cielos, esto por medio de fotografías de rango dinámico (HDR), y la tercera corresponde a los resultados obtenidos utilizando estrategias de mejoramiento de iluminación natural en aulas escolares de estas distintas ciudades.

Para el caso de la ciudad de Concepción, se proponen siete prototipos de aulas, con las estrategias de captar y distribuir. En todas las aulas se considera ventanas bilaterales, y en la mayoría se utiliza una repisa de luz para distribuir de manera más uniforme la luz natural al interior del aula (ver Figura 9).

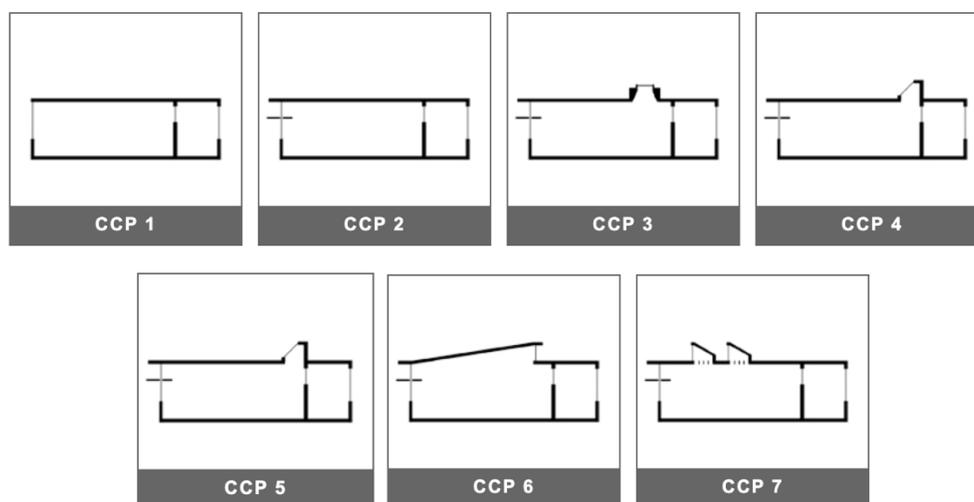


Figura 9. Estrategias analizadas para la ciudad de Concepción. Fuente: Ilumina (Universidad del Bio Bio, n.d.)

### 2.2.2. Reflexión de superficies en aulas.

En relación con la reflexión de la luz y las posibilidades potenciales de crear deslumbramiento, contraste de luz y sombra es necesario armonizar las características superficiales de todos los elementos del interior. El coeficiente de reflexión se expresa por el porcentaje de luz que se refleja en una superficie, y depende del tipo de material, el color y el método de acabado de las superficies del aula (Tanic; et al., 2019).

## Capítulo 2. Marco teórico

Tabla 2. Valores de reflexión recomendados para un aula. Fuente: Ministerio de Obras Públicas (2005)

<b>Superficie aula</b>	<b>Coefficiente de Reflexión</b>
Cielos interiores	> 0,7
Muros:	
*sobre los 2m	0,5 – 0,7
*bajo los 2m	0,5
Divisiones interiores	0,5 – 0,7
Suelos	0,2 – 0,5
Muebles	0,25 – 0,5
Cortinas/persianas	0,5 - 0,7

Tabla 3. Valores de reflexión de diferentes superficies. Fuente: Ministerio de Obras Públicas (2005)

<b>Colores de la pintura</b>	<b>Reflexión</b>
Blanco	0,85
Gris claro	0,7
Gris medio	0,45
Gris oscuro	0,15
Negro	0,05
<b>Materiales</b>	

## Capítulo 2. Marco teórico

---

Pintura blanca nueva	0,65 – 0,75
Madera	0,25 – 0,50
Espejos	0,80 – 0,90
Alfombra	0,45 a 0,1
Ladrillo	0,3 a 0,2
Ventana de cristal	0,1

---

### 2.3. Definición casos de estudio

Para la definición de los casos de estudio, se analizaron qué estrategias se pueden utilizar en aulas de uno o más niveles. De acuerdo a esto, se recopiló criterios que se deben considerar espacialmente en las aulas escolares para tener una buena distribución de la luz al interior; por otro lado, otra de las variables a considerar es la distribución de los usuarios al interior de las aulas, por lo que se mencionan las actividades que se realizan en las aulas de aprendizaje activo, con su respectiva distribución del espacio. Como última variable están las métricas que consideran la distribución y ángulo de visión del usuario.

#### 2.3.1. Criterios de prototipos de aula

Para la definición de los prototipos de aulas se definió qué criterios de diseño se deben considerar para un mejor desempeño lumínico por medio de estrategias pasivas, para ello se desarrollo una tabla recopilando distintos criterios que se proponen en distintas investigaciones (ver Tabla 4). Entre estos criterios se mencionan las variables físicas, y de qué manera se puede considerar dentro del diseño, con ello llevan una explicación que en cada caso la mencionan en distintas investigaciones, como lo es el caso de los tipos de estrategias.

## Capítulo 2. Marco teórico

Tabla 4. Criterios de diseño para prototipos de aula con iluminación lateral.

VARIABLES FÍSICAS	PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN	REFERENCIA
Forma del edificio	Orientación	Las orientaciones Sur y Norte son favorables para estrategias de iluminación fijas.	(Piderit & Bodart, 2012)
	Distribución dispositivo	Unilateral / bilateral / multilateral	(Tanic; et al., 2019)
Fenestración	Vidrio	Coeficiente de transmisión luminosa para ventanas laterales a no menos de 30% para climas de cielo claro y a no menos de 50% a climas muy nublados. En el caso de ventanas con repisa de luz usar vidrio claro con trasmisión de luz entre 60% y 90% en las ventanas altas	(Agencia Chilena de eficiencia energética, 2012)
	Captación	Tipos y distribución de ventana (ventana lateral de vista al exterior, ventana lateral superior, lucarna, claraboya, etc)	(Agencia Chilena de eficiencia energética, 2012)
Estrategias	Distribución	Repisa de luz (orientación norte con un máximo de 15º de inclinación) Reflexión interior, valores recomendados para un aula	(Ministerio de Educación & Ministerio de obras públicas, 2012)

## Capítulo 2. Marco teórico

	>0,7 Cielo / 0,5-0,7 Muro / 0,2-0,5 Suelo / 0,25- 0,5 Muebles	(Agencia Chilena de eficiencia energética, 2012)
		(Ministerio de Obras Públicas, 2005)
		(Agencia Chilena de eficiencia energética, 2012)
Protección	Alero, celosía	(Ministerio de Obras Públicas, 2005)

En cuanto a las actividades, como se puede ver en la Tabla 1, existen seis tipos de actividades de las cuales se seleccionaron dos tipos que permitieran llevarse a cabo en distintas escalas de participación, la primera que incluyera la participación de todo el aula en conjunto y la segunda que fuesen grupos de 4 o 5 personas, en cuanto a lo anterior se seleccionaron: Presentación y Creativo interactivo; cada una de estas representa distintos tipos de distribuciones para lograr el objetivo de la actividad (ver Tabla 5).

Tabla 5. Tipología de pedagogías centradas en el alumno. Fuente: (Dovey & Fisher, 2014)

Continuidad de los espacios	Tipo de actividad pedagógica
PRESENTACION (25-150 alumnos)	Estudiantes o profesores presentan a un público mayoritariamente pasivo. El tamaño del grupo puede variar desde una cohorte de clases hasta un curso completo. Estas actividades facilitan una comunicación eficaz de la información
GRAN INTERACTIVO (25-75 alumnos)	Actividades que pasan sin problemas de grandes a grupo pequeño y viceversa; a menudo se organizan en subgrupos de 4-6 que pueden volver a subdividirse en 2 ó 3. Facilita el aprendizaje entre iguales y la enseñanza en equipo.

## Capítulo 2. Marco teórico

Las distribuciones que se seleccionaron corresponden a dos tipos de configuraciones recopiladas de la investigación de Kepez & Ust (2020) (ver Figura 10) que responden a los tipos de actividades que se seleccionaron y se mencionaron en la Tabla 5.

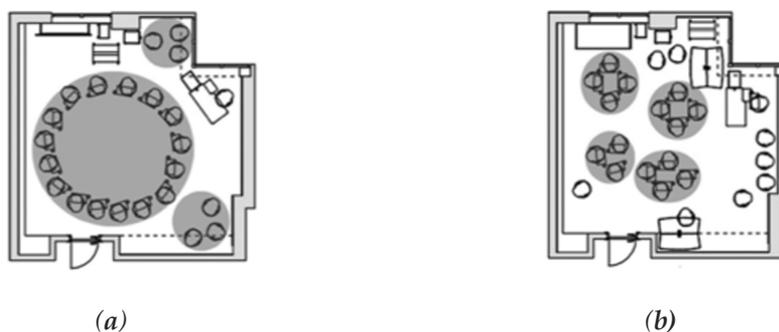


Figura 10. (a) Distribución para Presentación (b) Distribución para Gran interactivo. Fuente: Kepez & Ust (2020)

### 2.3.2. Métricas de iluminación natural y programa de simulación

Las métricas de luz diurna que suelen utilizarse, se centran en la relación con la iluminación (plano de trabajo) o con el confort visual (deslumbramiento a nivel de los ojos). Una tercera categoría menos establecida se relaciona con factores perceptivos de los ocupantes como es el brillo y la diversidad luminosa en un ángulo de visión determinada (Rockcastle & Andersen, 2014). Además señalan que las métricas de iluminación dinámicas como Daylight Autonomy (DA) o Useful Daylight Illuminance (UDI), pueden evaluar los umbrales de iluminación anuales considerando la orientación del edificio y el tipo de cielo relacionado con el clima del lugar, para proporcionar una evaluación más precisa de iluminancia en el plano de trabajo.

Por otra parte Van Den Wymelenberg & Inanici (2014) mencionan que las medidas de luminancia están estrechamente relacionadas con la percepción humana del brillo, es probable que las métricas basadas en la luminancia estén más relacionadas con la aceptación subjetiva y los índices de preferencia que las medidas basadas en la iluminancia.

Se evaluó el Daylight Glare Probability (DGP) desarrollado por Wienold y Christofferen para predecir la probabilidad de que un observador en una posición de visión y orientación determinadas experimente un deslumbramiento incómodo en el aula con distintos tipos de orientaciones dentro de

## Capítulo 2. Marco teórico

un mismo punto en el espacio. Para su cálculo se utiliza una representación de ojo de pez con un ángulo de apertura de 180 grados, y se mide en porcentaje de 0 a 100, donde menor o igual al 35% es imperceptible, menor o igual al 40% es perceptible, menor o igual al 45% es perturbador y mayor al 45% es un encandilamiento intolerable (Solemma LLC, n.d.). También se evaluó la luminancia para ver los contrastes de luz que llegan a las superficies del aula dependiendo de los ángulos de visión, esto ya que si bien puede que no se presente altos valores en el Daylight Glare Probability si se puede presentar molestias visuales con el reflejo de la luz en superficies al interior del aula midiendo las proporciones que se establecen entre fuentes de luz y superficies reflejadas. Se seleccionaron estas métricas para ver de qué manera el ángulo de visión en un mismo punto en el espacio puede afectar visualmente a los usuarios al interior del aula.

El programa a utilizó fue el plug-ing DIVA for Rhino, en el cual se consideraron las materialidades para los prototipos, y luego evaluar el Daylight Glare Probability para posteriormente analizar la luminancia en el programa Photosphere por medio de las imágenes renderizadas obtenidas del análisis del Daylight Glare probability.

### Capítulo 3. Metodología

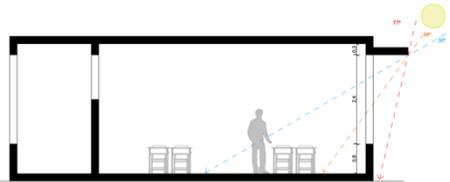
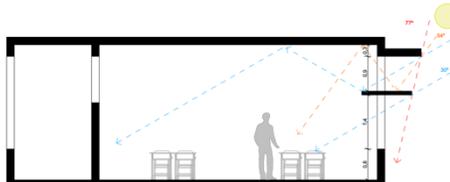
## Capítulo 3. Metodología

### 3.1. Propuesta de prototipos según estrategia

Para el estudio se propusieron dos prototipos de aulas con estrategias para la ciudad de Concepción, Chile. Estos modelos se consideran para un primer nivel, con ancho de 7,2 m y largo de 9m para una capacidad de 25 alumnos y considerando la distancia mínima desde el pizarrón hacia la primera fila de alumnos de 2 m. Ambos prototipos tienen ventana bilateral norte-sur para de esta manera generar protecciones solares y así regular el control solar de la fachada norte, y aportar con iluminación cenital continua y homogénea desde el lado sur. La fachada norte tiene un antepecho de 0,8 m; ventanas de ancho de 2,3 m y alto de 2,4 m. La ventana sur que da a un pasillo tiene un antepecho de 2 m; la ventana de ancho 2,3 m y alto 1,2 m. El pasillo posee ventanas con las mismas dimensiones que las ventanas de la fachada norte (ver Tabla 6).

Las estrategias que se proponen en cada prototipo corresponden a un alero en el primer caso, y un alero + repisa de luz para el segundo caso. Estos modelos fueron diseñados utilizando las inclinaciones del sol correspondientes al 21 de marzo, 21 de junio y 21 de diciembre con los colores naranja, celeste y rojo en la Tabla 6. Con estas estrategias se logra ver una leve diferencia en la manera de ingresar la luz en cada caso, como lo es en marzo que el sol logra ingresar en el prototipo 1, mientras que en el prototipo 2 la luz se refleja en la repisa.

Tabla 6. Modelos con estrategias solares pasivas para contexto climático de Concepción, Chile. Elaboración propia.

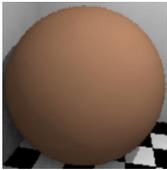
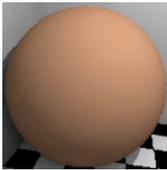
Prototipo	1	2
		
	Alero	Alero + Repisa de Luz
Captar	x	x
Proteger	x	x
Distribuir		x
Cortina	En invierno es cuando el ángulo solar es más bajo.	En invierno es cuando el ángulo solar es más bajo.

### Capítulo 3. Metodología

#### 3.2. Materialidades

A los componentes espaciales de los modelos se les asignó materialidades con colores tuviesen valores de reflexión (ver Tabla 3) que respondieron a los valores de reflexión de elementos para diferentes superficies en aulas escolares (muros, cielos, muebles, etc) que menciona el Ministerio de Obras Públicas (2005) (ver Tabla 2). De esta manera, las materialidades fueron seleccionadas por medio de Color Picker (JALOXIA, n.d.), el cual es un selector de material avanzado para Radiance, el cual permite configurar los colores por medio de deslizadores interactivos para los sistemas de color RGB, con una previsualización de alta calidad con la posibilidad de configurar los niveles de especularidad y rugosidad. Como se puede ver en la Tabla 7, el modelo se configura por seis elementos representativos, muro interior, piso, cielo y muebles. En cuanto al tipo de vidrio utilizado, este corresponde a un vidrio estándar con una transmitancia de 0,88 y transmisividad de 9,96.

Tabla 7. Materialidades y sus valores para prototipos de aulas.

Tipo de superficie	Materialidad	Muestra	RHO	R	G	B	Specularity	Roughness
Muro interior	[Plastic] Estuco pintado		0,489	0,5	0,485	0,485	0	0
Piso	[Plastic] Piso Madera		0,166	0,265	0,135	0,077	0	0
Cielo	[Plastic] Estuco pintado		0,773	0,79	0,766	0,766	0	0
Muebles	[Plastic] Madera		0,261	0,413	0,214	0,125	0	0

### Capítulo 3. Metodología

#### 3.3. Métricas de luz diurna

Las métricas de luz diurna a utilizar corresponden a luminancia y Daylighting Glare Probability (DGP) o probabilidad de deslumbramiento por luz diurna.

La luminancia como se menciona en la Tabla 8 corresponde a la luz reflejada en dirección del observador, y se pide en proporciones según los distintos elementos, es por ello que en distintas investigaciones se señala el valor mínimo y el máximo y así ver el máximo contraste. Además Dubois (2003) presentó una tabla de superficies para una oficina en la cual señala valores en cd/m<sup>2</sup> en cuatro niveles que van desde demasiado brillante a inaceptablemente oscuro.

En cuanto a la probabilidad de deslumbramiento, este se evalúa mediante una imagen de ojo de pez el cual proporciona el plug-in DIVA for Rhino, que entrega un porcentaje (ver Tabla 8) con el que se mide la probabilidad de deslumbramiento para la persona en una ubicación específica. Para esto se llevaron evaluaciones en distintas orientaciones al interior de la sala correspondientes a las distintas distribuciones propuestas las cuales se explicarán en los campos de visión.

Tabla 8. Métricas de luz diurna que se utilizarán para la evaluación de prototipos de aula. Elaboración propia.

Métrica	Definición	Valores recomendados	Fuente
Luminancia	Luz reflejada en dirección del observador (cd/m <sup>2</sup> ), Está limitada por el contraste entre el objeto y el fondo sobre el que se ve.	-Tarea y alrededores inmediatos 3 a 1 -Tarea y fondo general 10 a 1 -Entre fuente luminosa y entorno 20 a 1 - Máximo contraste 40 a 1	(Ministerio de Obras Públicas, 2005)
Daylight Glare Probability (DGP)	Probabilidad de que una persona sea perturbada por el brillo de la luz día.	Imperceptible ≤ 35% Perceptible ≤ 40% Distorsivo ≤ 45% Intolerable > 45%	(Ministerio de Obras Públicas, 2005)

### Capítulo 3. Metodología

Tabla 9. Luminancias en las superficies de una sala (oficina). Fuente: Dubois (2003)

Indicador de rendimiento	Interpretación
> 2000 cd/m <sup>2</sup>	Demasiado Brillante, en cualquier parte del campo visual
> 1000 cd/m <sup>2</sup>	Demasiado brillante, en el campo visual
< 500 cd/m <sup>2</sup>	Preferible
< 30 cd/m <sup>2</sup>	Inaceptablemente oscuro

#### 3.4. Ángulos de Visión

La direccionalidad (ángulos) es fundamental para el confort visual, los programas nuevos de Solemma (CS y ALFA) entregan direccionalidad en su base de datos. Las métricas a evaluar en los prototipos se relacionan con lo que es el campo visual del usuario, por lo que esta deberá tener distintas posiciones al interior del aula, los cuales serán desde una posición sentada. Para esto se determinó las posibles direcciones de visión de acuerdo a las distribuciones de ocupación que se propusieron según cada actividad. El aula se divide en cuatro cuadrantes con cinco puntos de vista en cada uno (ver Figura 11).

La distribución tradicional consiste en columnas que van orientadas hacia una misma dirección (la pizarra). De esta manera existen un punto de visión por cuadrante, y dos distancias distintas a la ventana norte en los que la luz influirá de distinta manera al interior del aula que serían la del primer y tercer cuadrante que se encuentran más cercanos a la ventana, y el segundo y cuarto cuadrante en dirección que están más cercanos a la ventana sur (pasillo) con dirección a la fecha 5 (ver Tabla 10 distribución tradicional).

La distribución circular en la cual se generan tres ángulos todos con dirección distinta con respecto a los otros cuadrantes. En el caso de los cuadrantes uno y tres, se quedan en posiciones perpendicular, de espaldas y en diagonal con respecto a la ventana; mientras que en el cuadrante 2 y 4 se posicionan perpendicular, diagonal y de frente a la ventana pero con una distancia mayor que los cuadrantes anteriores (ver Tabla 10 distribución circular).

### Capítulo 3. Metodología

La distribución grupal presenta cuatro ángulos de visión por cuadrante, los cuales se repiten en todos, pero con la diferencia de los cuadrantes 1 y 3 que están más cerca de la ventana mientras que el 2 y 4 están más cerca de la ventana sur (hacia el pasillo).

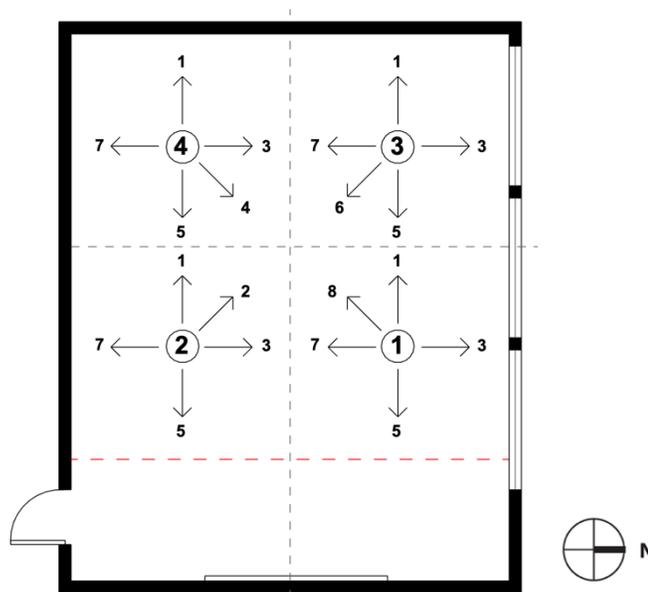


Figura 11. Ángulos de visión en el aula de distribución tradicional, circular y grupal superpuestas. Elaboración propia.

Tabla 10. Ángulos de visión según distribución en cada cuadrante. Elaboración propia.

	Tradicional	Circular	Grupal
Nº Ángulos de visión por cuadrante	1	3	4

Se presenta un total de 20 ángulos de visión por aula al traslapar las tres distribuciones que se muestran en la Tabla 10, en cuanto a los cuadrantes se eligió el cuadrante 1 y 4, ya que en el primero se encuentra cerca de la ventana, por lo que se puede hacer una comparación con el segundo cuadrante seleccionado que se encuentra más alejada de la fuente de luz directa. Se llevó a cabo un

### Capítulo 3. Metodología

análisis con la distribución tradicional para las fechas del 21 de marzo, 21 de junio y 21 de noviembre a las 9.00, 12.00 y 15.00 horas. Al observar que el 21 de junio se presentaba mayor porcentaje de deslumbramiento, se seleccionó esa fecha para evaluar las demás distribuciones a las horas mencionadas anteriormente.

En el caso de la distribución tradicional se presentan dos puntos de vista, el del cuadrante 1 y 4; en la distribución circular se analiza un punto de vista por cuadrante (el diagonal a la ventana); y en la distribución grupal se analizan 2 ángulos de visión por cuadrante, de frente a la ventana y de espalda a esta.

Se presenta un total de 36 análisis de probabilidad de deslumbramiento (DGP) y 36 análisis de luminancia, dando un total de 72 análisis por prototipo, y 144 análisis en total.

#### 3.5. Programa de simulación

El estudio se llevó a cabo utilizando dos programas, DIVA for Rhino y Photosphere. El sistema de simulación DIVA-for-Rhino versión 4 es un plug-in de modelado de luz natural y energía de Solemma para Rhinoceros, un software de modelado NURBS que basa sus simulaciones en EnergyPlus, Radiance y Daysim. Por medio de este programa se obtuvieron los archivos en formato .pic (formato que permite el análisis en otros programas de análisis lumínico) y los resultados de Daylight Glare Probability (DGP). Los archivos .pic fueron analizados mediante el programa Photosphere (Greg ward, n.d.) el cual permite analizar imágenes, calibrar, y producir mapas de luminancias de los ambientes en estudio (ver Figura 12). Los mapas de luminancia fueron formateados a una escala de 25 a 1000 cd/m<sup>2</sup> para generar una fácil comparación de todos los casos.

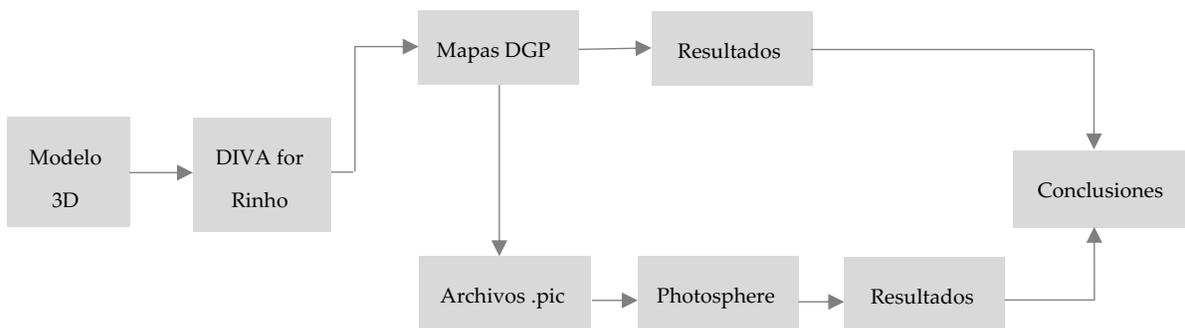


Figura 12. Metodología de análisis programa de simulación. Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 3. Metodología

### 3.5.1. Datos y tiempos de simulación

Los cálculos y las representaciones se realizaron con el archivo climático de Concepción, Chile con el formato .epw que se ingresó en el archivo de climas del plug-in DIVA en tres días (21 de junio, 21 de septiembre y 21 de noviembre) bajo condiciones de cielo soleado CIE, a las 09.00, 12.00 y 15.00 h. Se eligieron las condiciones soleadas para de esta manera ver qué días y horas es más probable tener encandilamiento al interior del aula, y a su vez ver los contrastes de los resultados en false color.

## Capítulo 4. Resultados

### Capítulo 4. Resultados

Los resultados obtenidos se clasificaron según los prototipos mencionados anteriormente, y a su vez estos se sub clasificaron en las distribuciones que se utilizaron para los distintos puntos de vista.

En cuanto a los rangos de análisis para los resultados, se utilizó la Tabla 8 para determinar el Daylight Glare probability (DGP) y Luminancia. En el caso de esta última métrica, en la tabla anteriormente mencionada se analizan los resultados con proporciones según las superficies que se están analizando, por lo que a su vez se mencionará la Tabla 9 para determinar cuándo ciertos valores corresponden con los rangos que se sugieren, o en caso contrario cuando no corresponden.

#### 4.1. Prototipo Alero

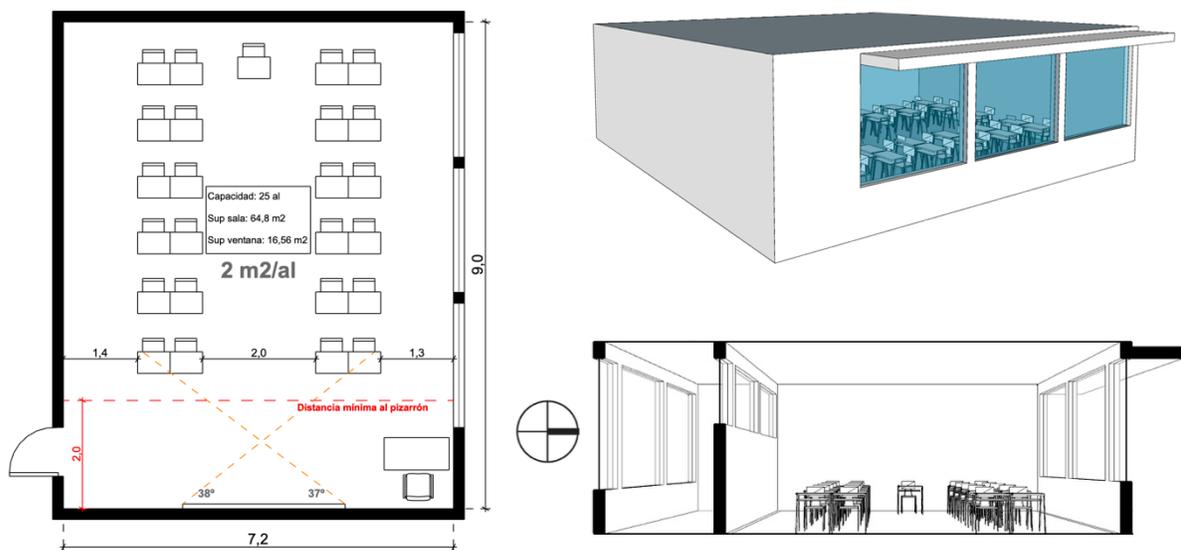


Figura 13. Prototipo Alero: Modelo Experimental de aula. Elaboración propia.

El prototipo de aula con alero posee acristalamiento de un 25% hacia la fachada norte, presenta ventanas superiores que dan hacia un pasillo al lado sur, permitiendo una mayor distribución de la luz. Las distribuciones de los pupitres se mantienen por detrás de la distancia mínima del pizarrón (ver [Figura 13](#)).

Dio formato:

Eliminó: Fig

## Capítulo 4. Resultados

### 4.1.1. Distribución tradicional

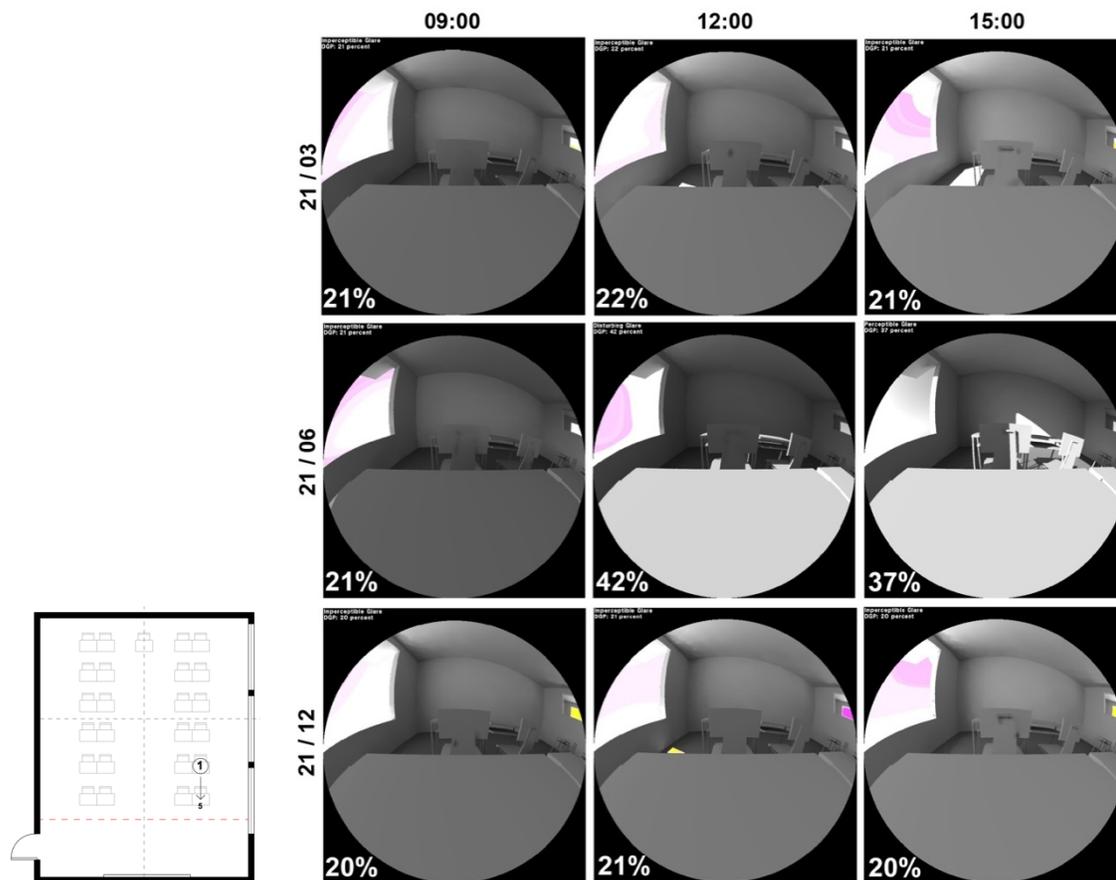


Figura 14. Daylighting Glare Probability (DGP) Prototipo Alero distribución tradicional (ventana). Elaboración propia.

La probabilidad de deslumbramiento (DGP) se mide en porcentajes como se muestra en la Tabla 8, de acuerdo a los rangos que se proponen (ver Figura 14) tanto el 21 de marzo como el 21 de diciembre tienen valores bajo el 35% lo que quiere decir que el deslumbramiento es imperceptible. El 21 de junio a las 12.00 hrs presenta valor de 42% lo cual es “distorsivo” para esa posición esa cantidad de luz a esa hora, mientras que a las 15.00 hrs es perceptible.

De acuerdo al análisis de las de la Figura 14, y de acuerdo a los ángulos solares que se muestran en la Tabla 6 se demuestra que el 21 de junio presenta mayor probabilidad de deslumbramiento, por lo que los análisis de los demás ángulos de visión serán específicamente de esa fecha.

## Capítulo 4. Resultados

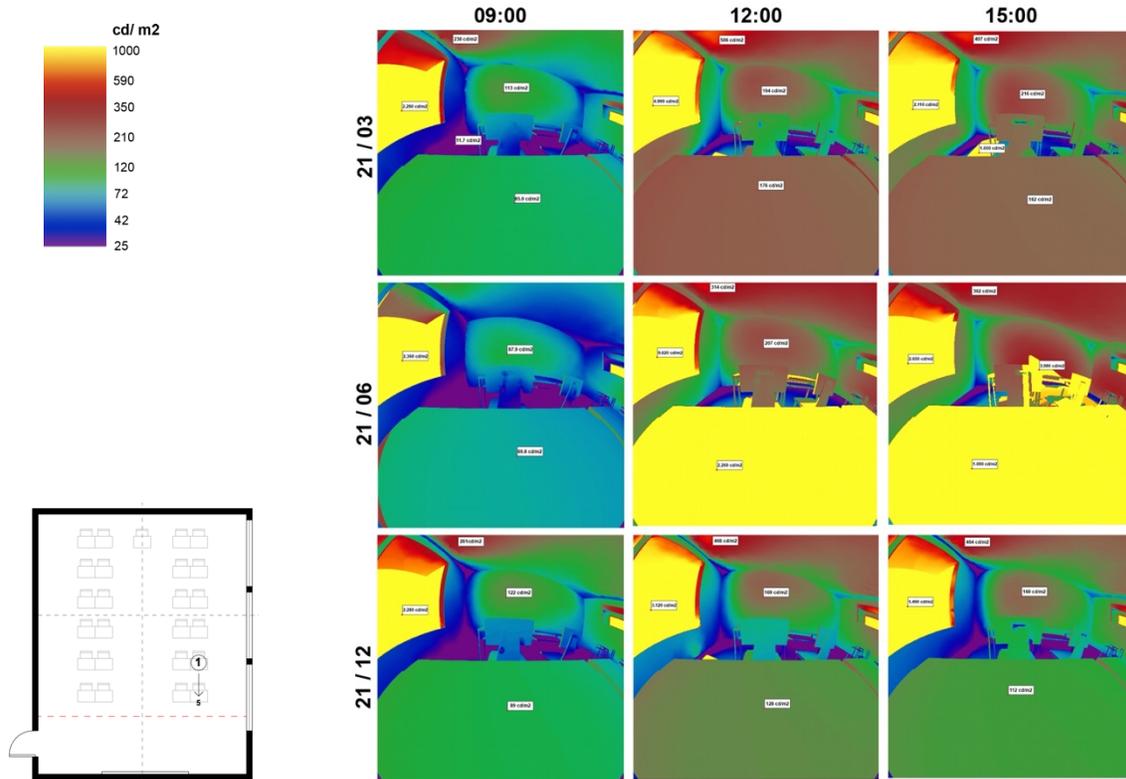


Figura 15. Análisis Luminancia. Prototipo Alero distribución tradicional (ventana). Elaboración propia.

21 marzo: El campo de visión se mantiene dentro de los valores aceptables según los rangos propuestos por Dubois (2003) en la Tabla 9. En cuanto a la escala entre la fuente de luz y entorno (el campo de visión debe ser 20 a 1), en este caso se consideró los valores para el caso de las 9.00 am 2.290 cd/m<sup>2</sup> de la ventana y 8,9 cd/m<sup>2</sup> del campo de visión, el cual da valor cercano a la escala mencionada anteriormente. En el caso de las 12 hrs el contraste entre la fuente luminosa y el plano de trabajo aumenta, siendo la fuente de luz de 4.990 cd/m<sup>2</sup> y el plano de trabajo de 176 cd/m<sup>2</sup>.

21 junio: El campo de visión tiene valores aceptables según los valores de Dubois (2003) en la Tabla 9 para las 9 hrs, mientras que a las 12 y 15 hrs tiene valores demasiado brillantes para el campo visual (ver Tabla 10). De esta manera las proporciones que se empleen con los entornos inmediatos o fuentes de luz del aula no cumplirán con lo recomendado.

21 noviembre: El campo de visión tiene valores aceptables dentro de los rangos propuestos por Dubois (2003) en la Tabla 9. En cuanto a las proporciones, con los valores que se tomen de la fuente de luz y el plano de trabajo, se tienen buenos resultados si se considera las 9 y 15 hrs. En el caso de las 12 hrs el contraste aumenta al tener la fuente de luz 3.120 cd/m<sup>2</sup> y el plano de trabajo 128 cd/m<sup>2</sup>.

Capítulo 4. Resultados

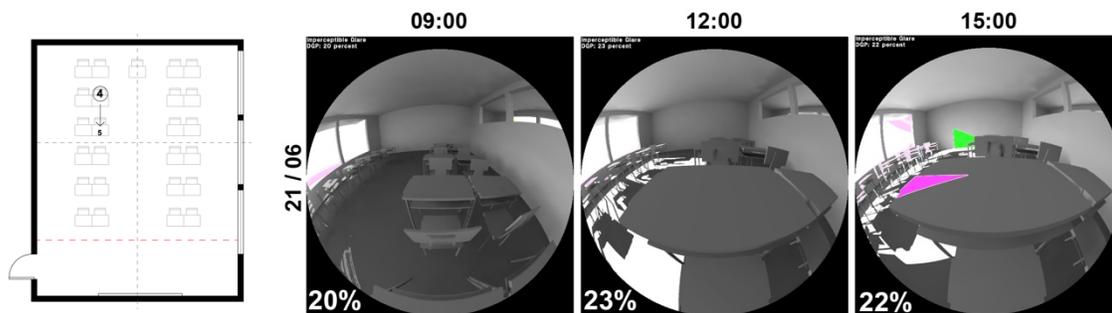


Figura 16. Daylighting Glare Probability (DGP) Prototipo Alero distribución tradicional (muro).  
Elaboración propia.

Los valores de probabilidad de deslumbramiento para el ángulo de visión del cuadrante 4 paralelo a la ventana tiene valores de deslumbramiento imperceptible (ver Figura 16).

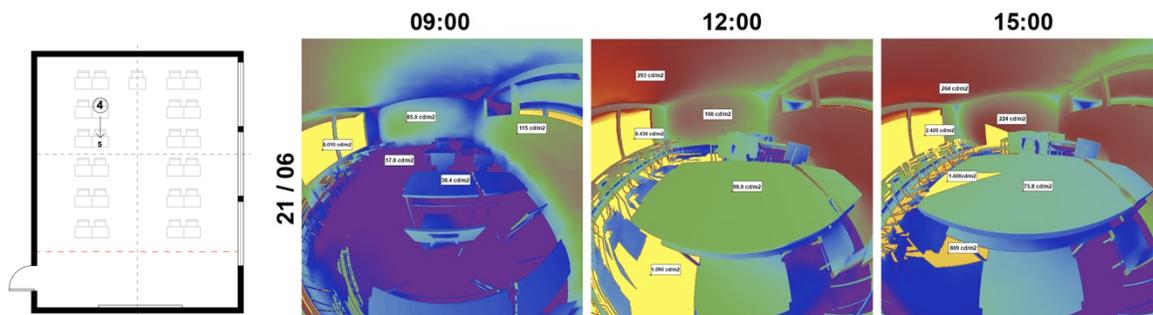


Figura 17. Análisis Luminancia. Prototipo Alero distribución tradicional (muro). Elaboración propia

Los valores que se presentan en el campo de visión en la Figura 17 están dentro del rango que menciona Dubois (2003) en la Tabla 9. Por otro lado las proporciones que se presentan entre la fuente luminosa y el plano de trabajo en el caso de las 15 hrs se encuentra dentro del rango, mientras que a las 9 y 12 hrs aumenta el contraste entre esos valores, ya que la fuente luminosa alcanza valores cercanos a los 8.000 cd/m<sup>2</sup>, y el plano de trabajo se mantiene en los 38 y 98 cd/m<sup>2</sup>.

Capítulo 4. Resultados

4.1.2. Distribución circular

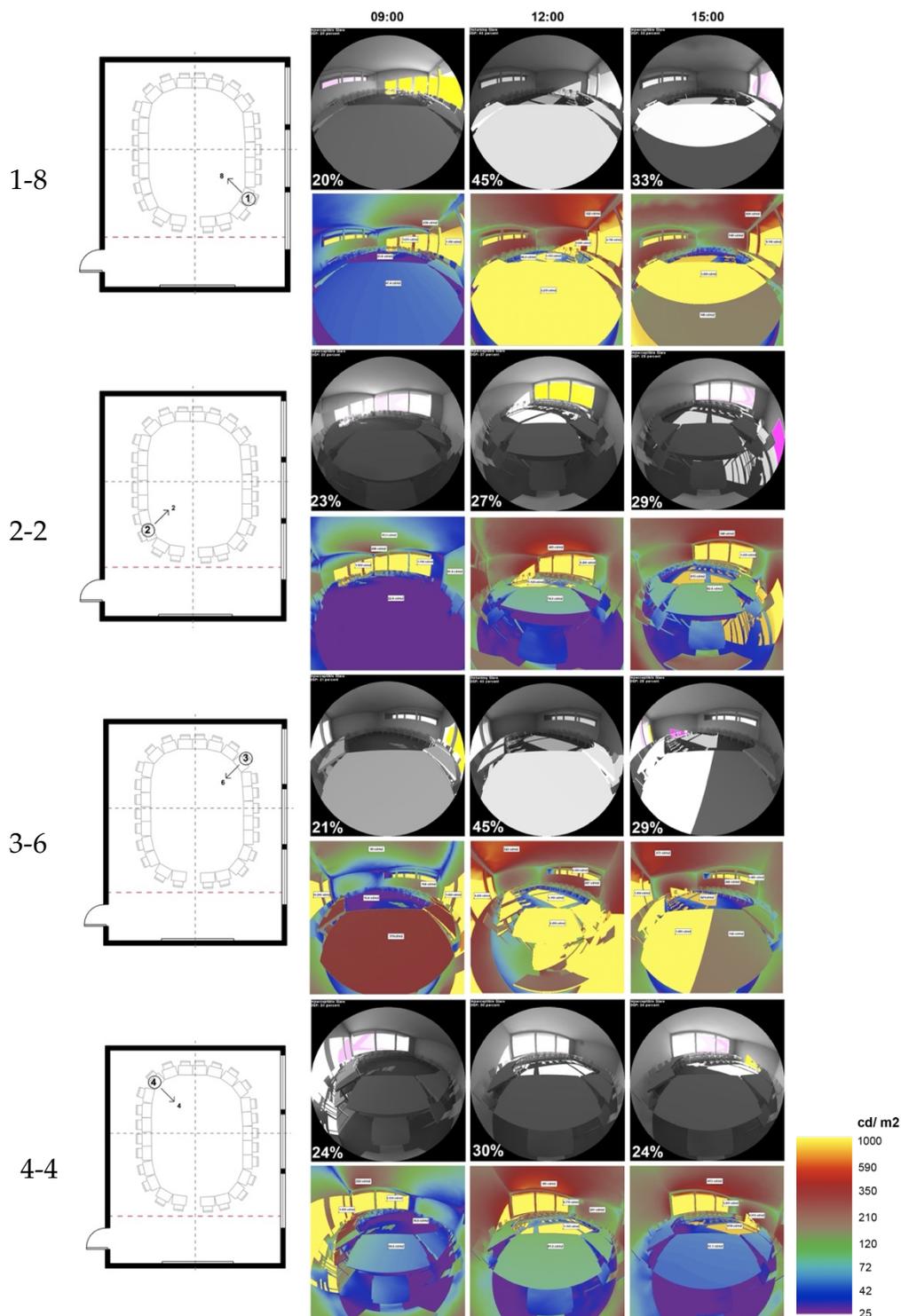


Figura 18. Prototipo Alero: Análisis de Daylighting Glare probability (DGP) y luminancia distribución circular el 21 de junio. Elaboración propia.

## Capítulo 4. Resultados

Ángulo 1-8: En el análisis de DGP en la Figura 18 se puede ver que a las 9 y 15 hrs presenta porcentajes de deslumbramiento imperceptible, mientras que a las 12 hrs presenta valores de deslumbramiento perturbador. En cuanto a los valores de luminancia a las 9 hrs presenta un valor adecuado dentro del rango para el campo de visión, mientras que a las 12 y 15 hrs presenta valores demasiado brillantes. En cuanto a las proporciones entre fuente de luz y plano de trabajo, a las 9 hrs se acerca al valor recomendado, mientras que en los demás horarios no se logra cumplir por los altos niveles de luminancia en dicha zona.

Ángulo 2-2: En el análisis de DGP se puede ver que se cumplen con los porcentajes, al encontrarse dentro del rango imperceptible. En cuanto a los valores de luminancia a las 9 hrs se presenta un valor inaceptablemente oscuro para el campo de visión (22,9 cd/m<sup>2</sup>). A las 12 y 15 hrs se tiene un valor dentro de lo aceptable (74,9 y 82,6 cd/m<sup>2</sup>); en cuanto a la proporción entre fuente de luz y el plano de trabajo a las 12 hrs no se logra cumplir ya que la fuente luminosa esta cercana a los 9.000 cd/m<sup>2</sup>.

Ángulo 3-6: En el análisis de DGP a las 9 y 15 hrs se tienen valores por debajo del 35%, por lo que es imperceptible, mientras que a las 12 hrs presenta 45% por lo que es distorsivo para el usuario. En cuanto a la luminancia a las 9 hrs el plano de trabajo tiene un valor adecuado, mientras que a las 12 y 15 hrs presenta valores demasiado brillantes. En cuanto a la escala de fuente de luz en relación al campo de visión, en ninguna cumple la proporción 20 a 1, ya que en el caso de las 9:00 el contraste aumenta, al estar la fuente de luz cercana a los 10.000 cd/m<sup>2</sup>, mientras que a las 12 y 15 hrs los valores están cercanos a 2 : 1 y 1 : 1.

Ángulo 4-4: En el análisis de DGP se cumple con los valores adecuados de porcentaje, por debajo del 35%. En cuando a la luminancia el campo de visión también presenta valores “preferibles”. En cuanto a la relación entre fuente luminosa y el plano de trabajo no se alcanza en ninguno de los horarios con la proporción, ya que estas quedan por debajo del rango; pero el horario que más se acerca al valor es el de las 9 hrs.

Capítulo 4. Resultados

4.1.3. Distribución grupal

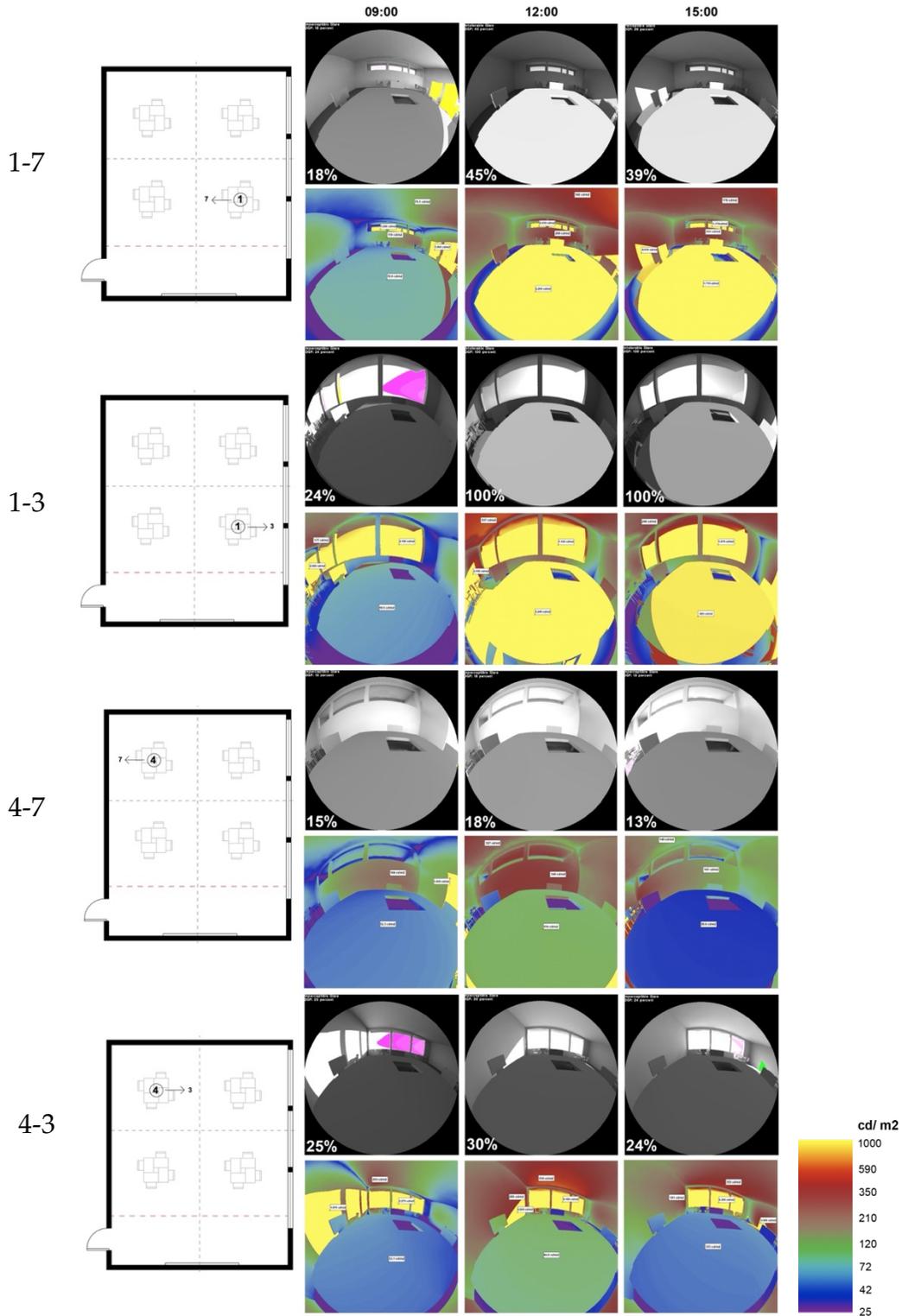


Figura 19. Prototipo Alero: Análisis de Daylighting Glare probability (DGP) y luminancia distribución grupal el 21 de junio. Elaboración propia.

## Capítulo 4. Resultados

Ángulo 1-7: En el análisis de DGP en la Figura 19 se presenta un valor imperceptible a las 9 hrs mientras que a las 12 hrs es distorsivo y a las 15 hrs perceptible. En el análisis de luminancia a las 9 hrs se presenta valor dentro del rango para el plano de trabajo; en cuanto a las 12 y 15 hrs los valores son demasiado brillantes para el plano de trabajo, estando ambos sobre las 1.500 cd/m<sup>2</sup>.

Ángulo 1-3: En el análisis de DGP a las 9 hrs se tiene 24% por lo que el deslumbramiento es imperceptible, mientras que a las 12 y 15 hrs es del 100% siendo un deslumbramiento intolerable. En la luminancia para el campo de visión a las 9 hrs es preferible, mientras que a las 12 y 15 hrs es demasiado brillante. En cuanto a la proporción entre la fuente de luz y el plano de trabajo, ninguno cumple, ya que a las 9 hrs queda bajo el rango, y a las 12 y 15 hrs cercanas a 1:2 y 2:1.

Ángulo 4-7: En el análisis de DGP se tienen valores bajo el 35% para todos los horarios, por lo que la probabilidad de deslumbramiento es imperceptible. En cuanto a la luminancia para el campo de visión también se cumple con los rangos por sobre los 30 cd/m<sup>2</sup>. A las 9 hrs se presenta un reflejo de fuente de luz, al hacer el análisis de proporción con el plano de trabajo no se alcanza con el valor recomendado quedando bajo; a las 12 hrs se hace una relación entre tarea (plano de trabajo) y alrededores inmediatos, el cual es una proporción de 3:1, con el cual se cumple; a las 15 hrs no se cumple con la anterior proporción, al ser el plano de trabajo menor que los alrededores inmediatos.

Ángulo 4-3: En el análisis de DGP se cumple con los valores en todos los horarios teniendo bajo el 35%. En luminancia del campo de visión se cumple con el valor sobre 30 cd/m<sup>2</sup>. En cuanto al análisis de proporción de fuente luminosa y plano de trabajo ninguna logra llegar al valor, siendo la fuente luminosa muy alta en relación a la luminancia que se presenta en el plano de trabajo, pero si se considera como el máximo contraste el único horario que se acerca a la proporción es a las 9 hrs.

Capítulo 4. Resultados

4.2. Prototipo Alero + Repisa de Luz

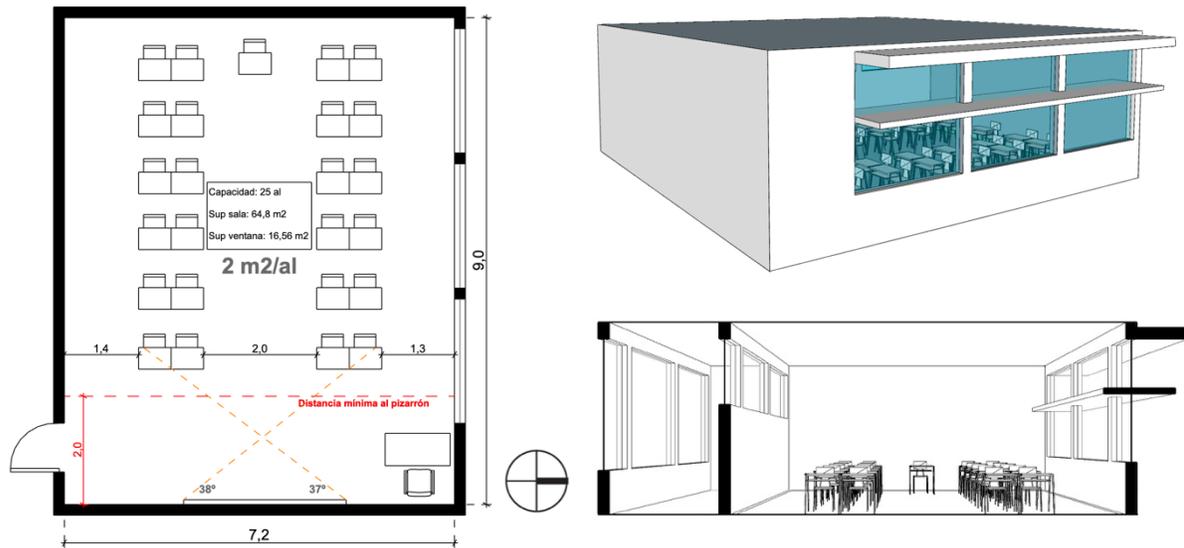


Figura 20. Prototipo Alero + repisa de luz: Modelo Experimental de aula. Elaboración propia

El prototipo de aula con alero + repisa posee acristalamiento de un 25% hacia la fachada norte, presenta ventanas superiores que dan hacia un pasillo al lado sur al igual que el prototipo anterior, pero debido a la repisa de luz, permitirá una mayor distribución de luz a diferencia del prototipo anterior. Las distribuciones de los pupitres se mantienen por detrás de la distancia mínima del pizarrón (ver [Figura 20](#)).

Dio formato:  
Eliminó: Fig

## Capítulo 4. Resultados

### 4.2.1. Distribución tradicional

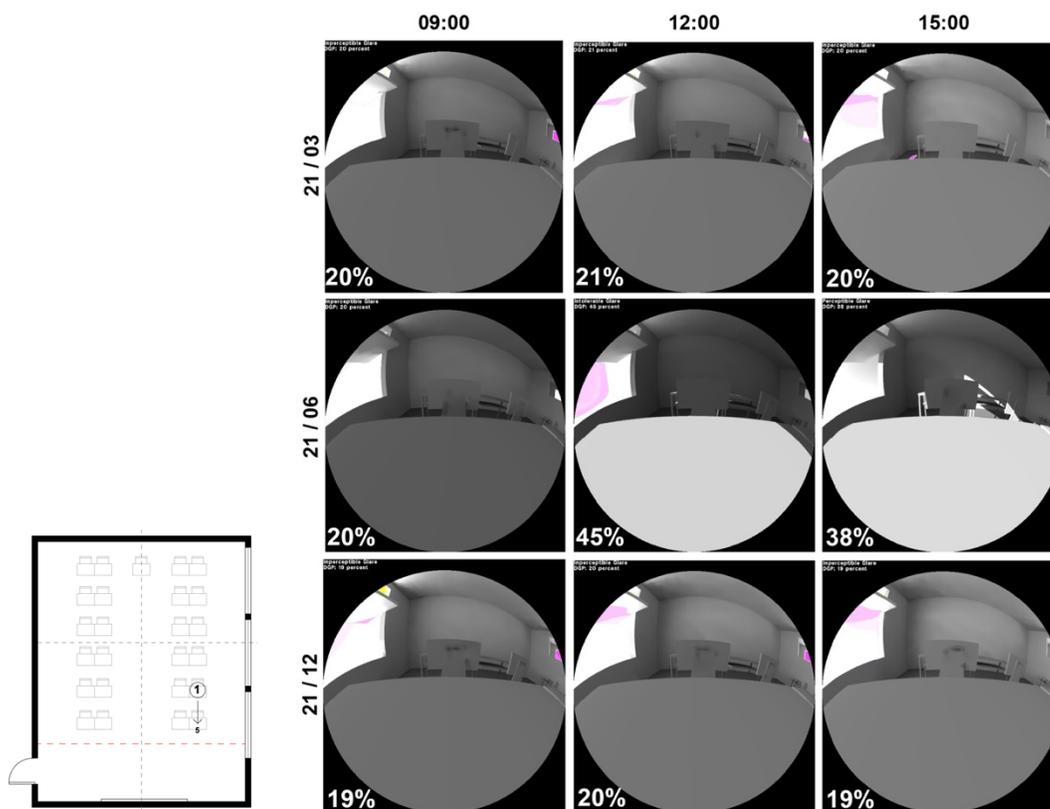


Figura 21. Daylighting Glare Probability (DGP) Prototipo Alero + repisa de luz distribución tradicional.  
Elaboración propia.

La probabilidad de deslumbramiento (DGP) para el prototipo Alero mas repisa presentan valores menores al 35% el 21 de marzo y 21 de noviembre, lo cual quiere decir que la probabilidad de deslumbramiento es imperceptible. El 21 de junio a las 12.00 hrs presenta valor de 45% lo cual es “distorsivo” para esa posición esa cantidad de luz a esa hora, mientras que a las 15.00 hrs es perceptible al ser superior al 35% pero menor al 40%.

De acuerdo al análisis de las de la Figura 14, y de acuerdo a los ángulos solares (al igual que el primer prototipo) que se muestran en la Tabla 6 se demuestra que el 21 de junio presenta mayor probabilidad de deslumbramiento, por lo que los análisis de los demás ángulos de visión serán específicamente de esa fecha.

## Capítulo 4. Resultados

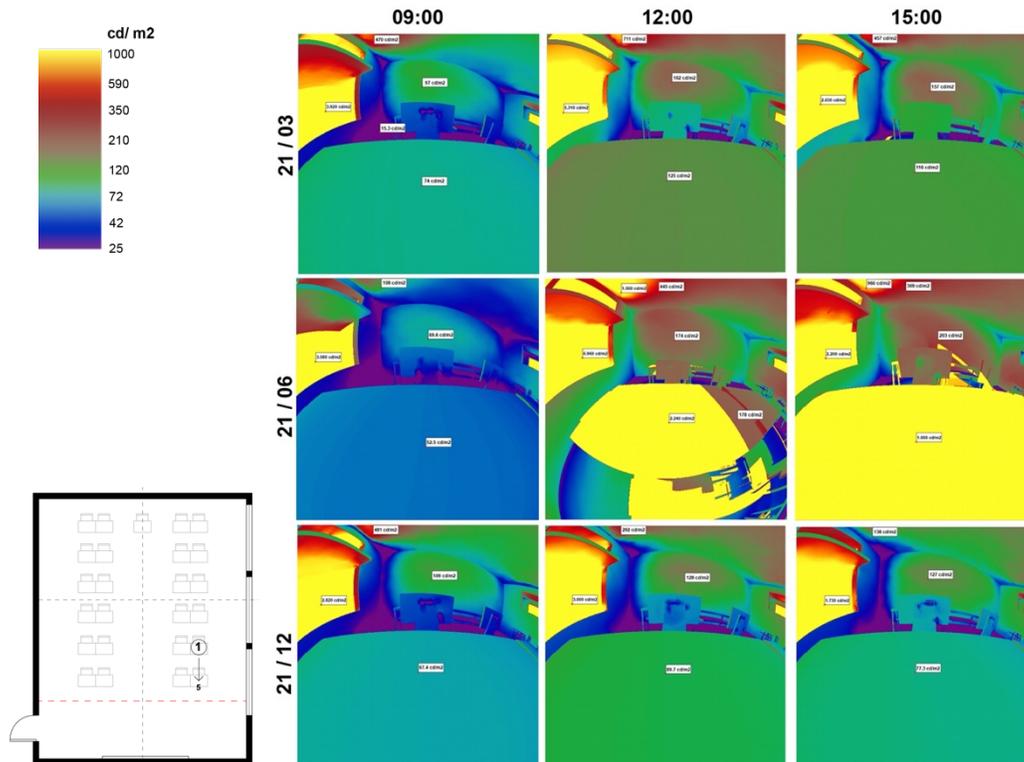


Figura 22. Análisis Luminancia. Prototipo Alero + repisa de luz distribución tradicional. Elaboración propia.

21 marzo: El campo de visión presenta valores preferibles según los rangos propuestos por Dubois (2003) en la Tabla 9 estando superiores a  $30 \text{ cd/m}^2$ . En cuanto a la proporción de fuente de luz y el plano de trabajo a las 9 y 12 hrs no se cumple por tener un resultado menor a la relación 20:1, mientras que a las 15 hrs se tiene un valor cercano a la proporción entre la fuente de luz ( $2.630 \text{ cd/m}^2$ ) y el plano de trabajo ( $116 \text{ cd/m}^2$ ) (ver Figura 22).

21 junio: El campo de visión a las 9 hrs esta dentro del rango de la tabla de valores de Dubois (2003), mientras que a las 12 y 15 hrs tiene valores demasiado brillantes. En cuanto a la proporción entre fuente de luz y plano de trabajo ningún horario cumple, ya que a las 9 hrs el contraste es muy alto, mientras que a las 12 y 15 hrs se alcanzan proporciones de 3:1 en el primer caso y 2:1 en el segundo.

21 noviembre: El campo de visión presenta valores preferibles según los rangos propuestos por Dubois (2003). En cuanto a la proporción de fuente de luz y el plano de trabajo (20 : 1) ninguno cumple, ya que tienen resultados que no alcanzan al que se sugiere.

Capítulo 4. Resultados

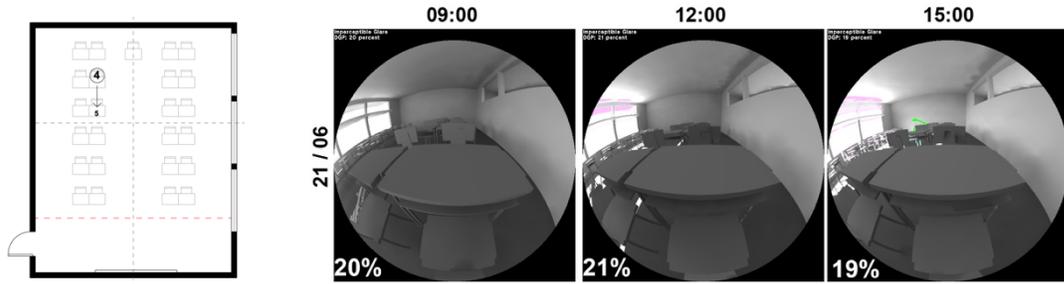


Figura 23. Daylighting Glare Probability (DGP) Prototipo Alero + Repisa distribución tradicional (muro). Elaboración propia.

Los valores de probabilidad de deslumbramiento (DGP) están debajo del 35% por lo que la probabilidad de deslumbramiento para el cuadrante 4 paralelo a la ventana es imperceptible (ver Figura 23).

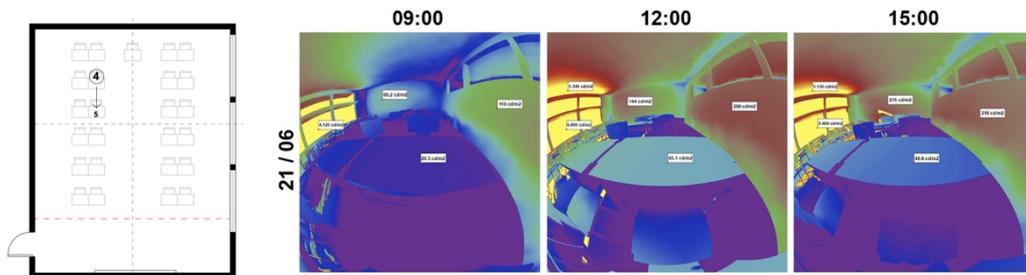


Figura 24. Análisis Luminancia Prototipo Alero + Repisa distribución tradicional (muro). Elaboración propia.

El campo de visión a las 9 hrs no cumple con esta el rango de la tabla de valores de Dubois (2003), mientras que a las 12 y 15 hrs esta dentro de los valores preferibles. La proporción de la fuente de luz y el plano de trabajo (20 : 1) no se cumple en ninguno de los casos al tener valores que se contrastan con los altos niveles de luz de la ventana. Por otro lado si se considera la proporción de máximo contraste (40 : 1) los que más se acercan son el caso de las 9 y 12 hrs (ver Figura 24).

Capítulo 4. Resultados

4.2.2. Distribución circular

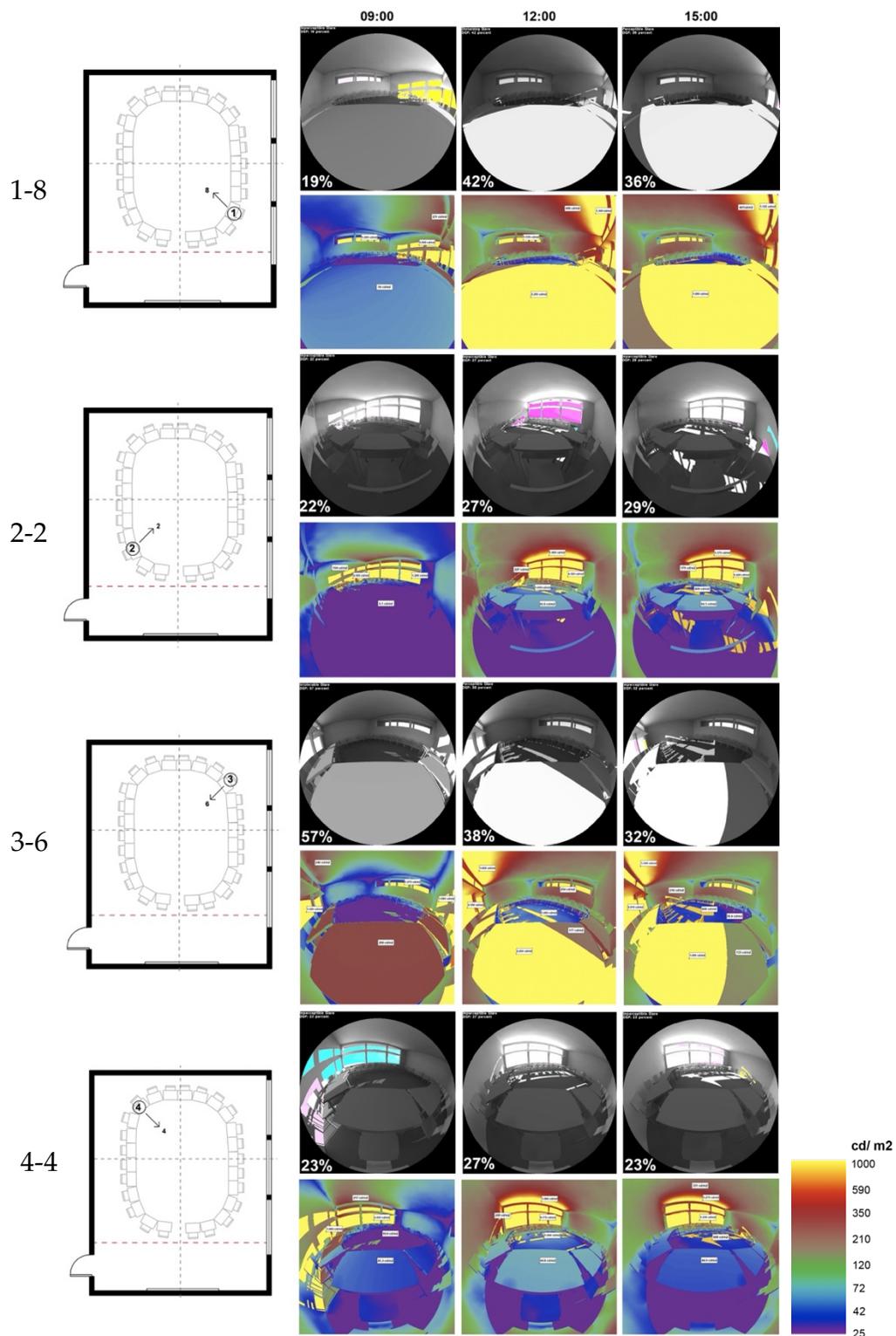


Figura 25. Prototipo Alero + repisa de luz: Análisis de Daylighting Glare probability (DGP) y luminancia distribución circular el 21 de junio. Elaboración propia.

## Capítulo 4. Resultados

Ángulo 1-8: En el análisis de DGP en la Figura 25 se presenta un valor imperceptible a las 9 hrs mientras que a las 12 hrs es distorsivo y a las 15 hrs perceptible. En cuanto a la luminancia del campo de visión, a las 9 hrs se cumple con los valores propuestos por Dubois (2003), en cuanto al plano de trabajo de las 12 y 15 hrs se presentan valores sobre las 1.500 cd/m<sup>2</sup> por lo que es muy brillante. En la proporción entre fuente de luz y plano de trabajo (20 : 1) a las 9 hrs no se cumple ya que queda por debajo del valor, en el caso de las 12 y 15 horas se presentan valores cercanos entre la fuente de luz y el plano de trabajo, por lo que tampoco cumplen.

Ángulo 2-2: En el análisis de DGP se presentan valores bajo el 35% por lo que la probabilidad de deslumbramiento es imperceptible. La luminancia en el plano de trabajo a las 9 hrs esta por debajo del valor recomendado siendo inaceptablemente oscuro; a las 12 y 15 hrs esta dentro de los rangos sugeridos. En la proporción entre fuente de luz y plano de trabajo (20 : 1) ninguno de los horarios cumple, teniendo un gran contraste entre plano de trabajo y ventana, viéndolo por ese lado si se ve con la proporción de máximo contraste (40 : 1) ninguno de los casos cumple, quedando por debajo del valor.

Ángulo 3-6: En el análisis de DGP se presenta un valor intolerable a las 9 hrs siendo superior al 45%, perceptible a las 12 hrs e imperceptible a las 15 hrs. La luminancia en el campo de visión a las 9 hrs esta dentro de los rangos sugeridos, mientras que a las 12 y 15 hrs sobrepasa el valor, siendo demasiado brillante para el campo visual. En la proporción entre fuente de luz y plano de trabajo (20:1) ninguno de los horarios cumple ya que sobrepasa el valor de proporción.

Ángulo 4-4: En el análisis de DGP se presentan valores bajo el 35% por lo que la probabilidad de deslumbramiento es imperceptible. La luminancia en el plano de trabajo cumple con los rangos sugeridos en todos los horarios. En la proporción entre fuente de luz y plano de trabajo (20 : 1) no cumple en ninguno de los horarios quedando por debajo de la proporción que se propone; si se considera la relación de máximo contraste (40 : 1) el horario que más se acerca a la proporción es el de las 9 hrs.

Capítulo 4. Resultados

4.2.3. Distribución grupal

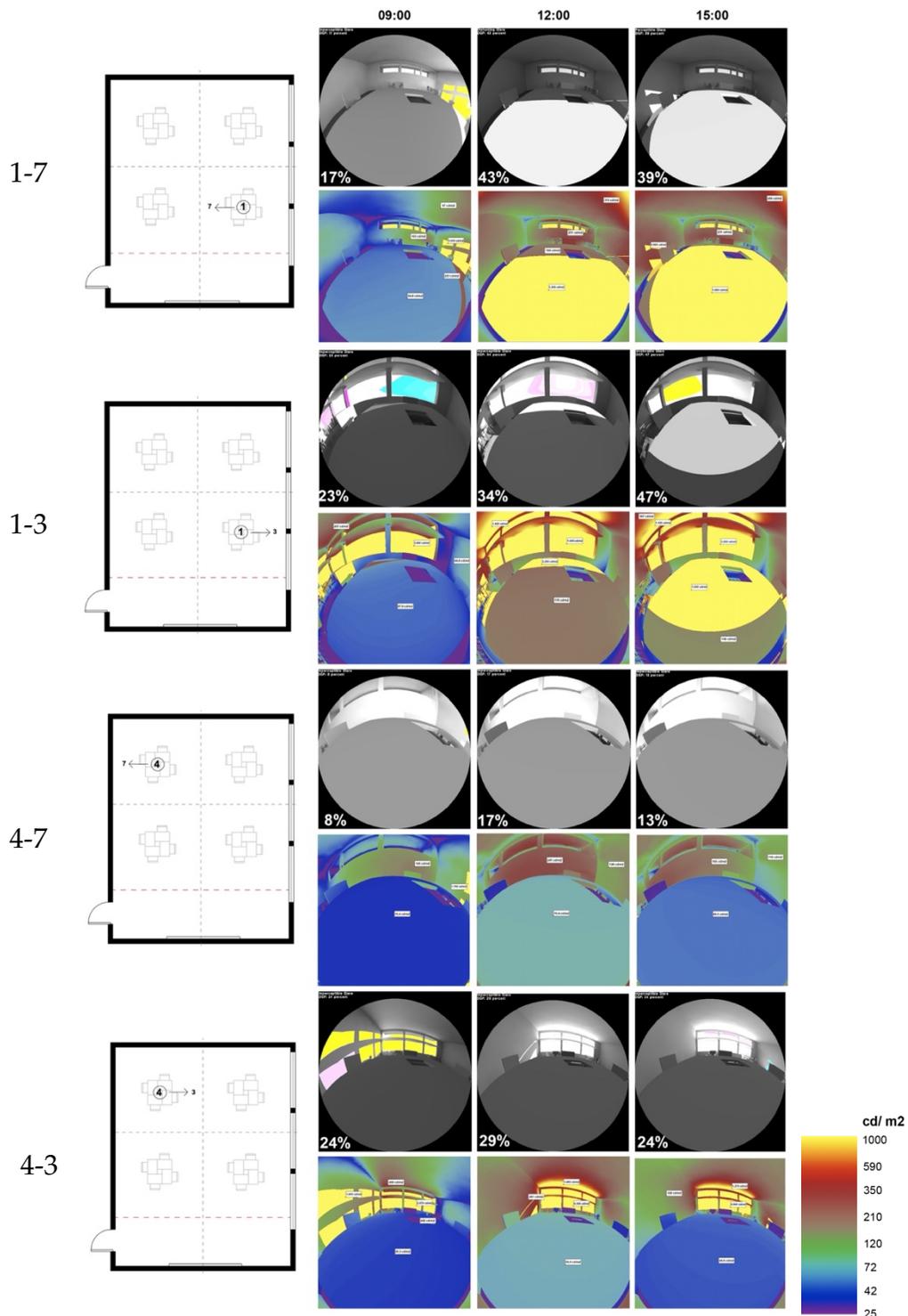


Figura 26. Prototipo Alero + repisa de luz: Análisis de Daylighting Glare probability (DGP) y luminancia distribución grupal el 21 de junio. Elaboración propia.

## Capítulo 4. Resultados

Ángulo 1-7: En el análisis de DGP en la Figura 26 se presenta un valor imperceptible a las 9 hrs mientras que a las 12 hrs es perceptible, y a las 15 hrs distorsivo. La luminancia en el campo de visión a las 9 hrs cumple con los rangos sugeridos, mientras que a las 12 y 15 hrs sobrepasa el valor sugerido, siendo demasiado brillante para el campo visual. En la proporción entre fuente de luz y plano de trabajo (20 : 1) a las 9 hrs se cumple con el valor, al utilizar el valor del reflejo de la luz de ventana en la pared (1.010 cd/m<sup>2</sup>) y la superficie de trabajo (54,8 cd/m<sup>2</sup>).

Ángulo 1-3: En el análisis de DGP a las 9 hrs se presenta un valor bajo el 35% por lo que la probabilidad de deslumbramiento es imperceptible, mientras que a las 12 hrs es perturbador y a las 15 hrs es perceptible. La luminancia en el campo de visión a las 9 y 12 hrs cumple con los rangos sugeridos, mientras que a las 15 presenta la mitad de plano en 142 cd/m<sup>2</sup> y la otra mitad en 1.660 cd/m<sup>2</sup>. Ninguno de los horarios cumple con la proporción entre fuente de luz y plano de trabajo (20:1).

Ángulo 4-7: En el análisis de DGP se presentan valores bajo el 35% por lo que la probabilidad de deslumbramiento es imperceptible. La luminancia en el plano de trabajo se cumple en todos los horarios estando sobre los 30 cd/m<sup>2</sup>. No se presenta fuente de luz en este ángulo de visión del aula, por lo que se buscó la proporción entre tarea y alrededores inmediatos, en la cual ninguno de los horarios cumple al tener menor luminancia la superficie de trabajo que las superficies de muros.

Ángulo 4-3: En el análisis de DGP se presentan valores bajo el 35% por lo que la probabilidad de deslumbramiento es imperceptible. La luminancia en el plano de trabajo se cumple en todos los horarios estando sobre los 30 cd/m<sup>2</sup>. Ninguno de los horarios cumple con la proporción entre fuente de luz y plano de trabajo (20:1).

## Capítulo 4. Resultados

### 4.3. Recomendaciones de optimización

Ambos prototipos presentaron valores que no corresponden con los rangos que se establecen para las métricas que se utilizaron. Si bien se presentan buenos valores en los meses de marzo y noviembre que la inclinación del sol es controlada por las estrategias que se propusieron en ambos casos, no así en el mes de junio que dependiendo de la ubicación y ángulo de visión con respecto a la ventana (y distancia de esta) se vieron alterados los resultados de cada caso. En los casos que superaron el 40% se encuentran en distribuciones cercanas a la ventana (ver Tabla 11).

Tabla 11. Daylight Glare Probability (DGP) P. Alero y P. Alero + Repisa

Distribución	cuadrante	9.00	12.00	15.00
Tradicional	Ventana A	21%	42%	37%
	Ventana A+R	20%	45%	38%
	1-8 A	20%	45%	33%
	1-8 A+R	19%	42%	36%
	2-2 A	23%	27%	29%
Circular	2-2 A+R	22%	27%	29%
	3-6 A	21%	45%	29%
	3-6 A+R	57%	38%	32%
	4-4 A	24%	30%	24%
	4-4 A+R	23%	27%	23%
Grupal	1-7 A	18%	45%	39%
	1-7 A+R	17%	43%	39%
	1-3 A	24%	100%	100%
	1-3 A+R	23%	34%	47%
	4-7 A	15%	18%	13%
	4-7 A+R	8%	17%	13%
	4-3 A	25%	30%	24%
4-3 A+R	24%	29%	24%	

Prototipo alero     Prototipo alero + repisa

En el caso de la distribución grupal de frente a la ventana del prototipo alero se alcanzó un 100% de probabilidad de deslumbramiento lo que lo hace intolerable en ese horario (12 y 15 hrs) no así en otras posiciones y horarios.

Como se puede ver en la Tabla 12, se seleccionaron los casos de los cuadrantes que se encuentran más cercanos a la ventana, ya que son los que presentaron los mayores índices de probabilidad de deslumbramiento. De acuerdo a ello, en la Figura 25 se graficó estos resultados para ver la relación en cuanto a horarios y valores.

### Capítulo 4. Resultados

Tabla 12. Daylight Glare Probability (DGP) P. Alero y P. Alero + Repisa (Cuadrantes Ventana)

Distribución	cuadrante	9.00	12.00	15.00
Tradicional	Ventana A	21%	42%	37%
	Ventana A+R	20%	45%	38%
	1-8 A	20%	45%	33%
Circular	1-8 A+R	19%	42%	36%
	3-6 A	21%	45%	29%
	3-6 B A+R	57%	38%	32%
	1-7 A	18%	45%	39%
Grupal	1-7 A+R	17%	43%	39%
	1-3 A	24%	100%	100%
	1-3 A+R	23%	34%	47%

En la [Figura 27](#), se puede observar que a las 12.00 hrs solo dos cuadrantes ubicados cercanos a la ventana no superan el límite aceptable de probabilidad de deslumbramiento, mientras que en los demás horarios, la mayoría de los casos están dentro del rango aceptable.

Eliminó: Fig

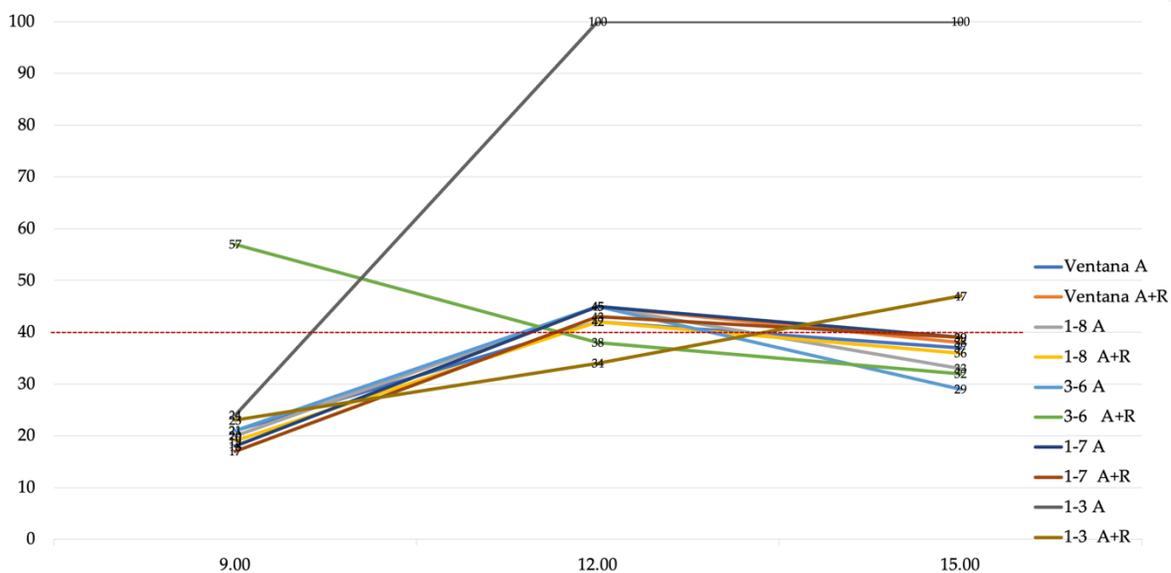


Figura 27. Daylight Glare Probability (DGP) P. Alero y P. Alero + Repisa (Cuadrante Ventana)

## Capítulo 4. Resultados

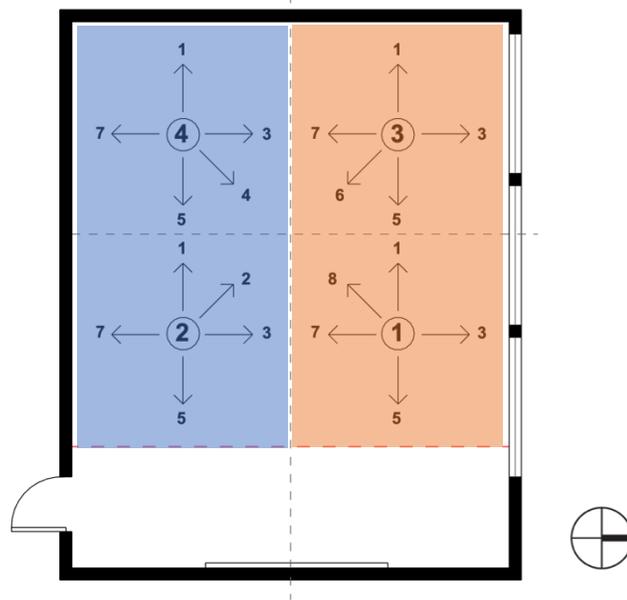


Figura 28. Zonas identificadas según el ingreso de luz natural. Fuente: Elaboración propia.

Por lo mencionado anteriormente, se identifican dos zonas al interior del aula, la zona azul y la naranja (ver Figura 28). En el caso de la primera se caracteriza por no recibir luz directa a la altura de los ojos del usuario, no se presenta probabilidad de deslumbramiento, pero si puede verse perjudicada por los altos niveles de luz reflejada en superficies al interior del aula (paredes, mesas y piso). En cuanto a la zona naranja presenta altas probabilidades de deslumbramiento y luz reflejada en superficies al interior del aula. Para cada zona se presenta diferentes estrategias a lograr, en el caso de la primera se debe captar luz para de esta manera distribuirla hasta esta zona donde no llega directamente, y en el caso de la segunda se debe controlar el ingreso de luz directa a la altura de los ojos del usuario para disminuir las probabilidades de deslumbramiento.

Las soluciones que se deben utilizar frente a estos casos deben ser manipulables, para que los usuarios puedan controlar el ingreso de luz directa en ciertos horarios y a ciertas actividades. Entre estas posibles soluciones están las cortinas, las cuales son la opción más accesible en cuanto a diseño y costos.

Otra opción que conlleva más diseño en cuanto a la estrategia son celosías móviles, para ello se debe considerar la inclinación solar para estudiar el distanciamiento y dimensión de cada elemento

## *Capítulo 4. Resultados*

de la celosía (y el ángulo de estos elementos), y que a su vez estos se puedan mover de manera sencilla para utilizarlo en aquellos horarios en los que el sol es muy directo.

## **Capítulo 4. Resultados**

## Conclusiones

### Conclusiones

El análisis del estado del arte dejó en evidencia la variedad de investigaciones orientadas a las aulas escolares, desde cómo afecta la distribución tradicional en las distintas áreas al interior del espacio a como las distribuciones de aprendizaje activo responden a las distintas actividades que se llevan a cabo al interior de la clase. Por otra parte las investigaciones que estudian la iluminación al interior de las aulas, desde los tipos de ventanas, la distribución de estos dispositivos para una mejor distribución de la luz, hasta los tipos de estrategias que se pueden utilizar. En cuanto a las que se enfocan hacia la medición de la luz, muchas utilizaron métricas en las cuales se lograba ver el espacio en su totalidad, no así el punto de vista de los alumnos, mencionando además que las distribuciones utilizadas en estos análisis correspondían a columnas (distribución tradicional), por lo que aún no se está considerando el efecto de la luz en las actividades que se llevan hoy en día en aulas con aprendizaje activo. Si bien existen investigaciones que estudian las distintas posiciones de los usuarios con respecto a las ventanas, pero estas se han llevado a cabo en oficinas, para así llevar a cabo una optimización de la distribución del espacio interior de estas.

Esta investigación se llevó a cabo de manera virtual, desde el modelado de los prototipos con el archivo de clima hasta la evaluación de las aulas, es una metodología que no implica mayores costes de instrumentos para poder realizarlo (salvo la licencia del programa, que en este caso fue para alumno) si bien el análisis en un ambiente real es mucho más específico y fidedigno comparado con un ambiente virtual, estas herramientas permiten hacer cambios rápidos, sin costo, y con resultados precisos. Por otra parte para la evaluación al interior de las aulas se utilizó puntos del campo visual basados en la investigación de por Dubois (2003) los cuales generan una matriz fehaciente para el análisis de la cantidad de ángulos de visión, esto para generar una matriz de análisis que tenga un orden al momento de la evaluación.

Los resultados reflejados en DGP y luminancia evidencian gran importancia con respecto a los ángulos de visión interior del aula. El análisis ha reflejado que si nuestro ángulo visual confronta la ventana y nos encontramos más cercanos a esta misma, mayor probabilidad de deslumbramiento puede ser percibido por el observador y mayor riesgo de discomfort visual. De esta manera queda en evidencia que el proponer un aula con una única distribución y análisis de métricas de iluminación no implica que sea el resultado final, para ello se debe entender como funciona hoy en día un aula,

## Conclusiones

con usuarios dinámicos que utilizan distintas distribuciones al interior del espacio para las distintas actividades que llevan a cabo.

Estos análisis como bien se mencionó en la metodología, se llevaron a cabo con el clima de la ciudad de Concepción, se vuelve necesario entender cómo funciona la trayectoria solar local para poder proponer estrategias de diseño que respondan a la localidad a la cual se le está proponiendo el proyecto. En este caso quedaron múltiples horarios con valores que no cumplen con los rangos establecidos de DGP y luminancia, sin embargo que se respetó con el porcentaje de acristalamiento del aula, con protección solar (alero en el primer caso y alero + repisa de luz en el segundo caso).

Es fundamental difundir investigaciones desde el punto de vista del confort visual de alumno. Una de las grandes limitaciones de esta investigación es que no produce un punto de comparación con un caso de escuelas reales y en otras latitudes, además de sobredimensionar los valores de DGP en los análisis al no considerar la sombra que genera el usuario al estar de espalda a la ventana, o la sombra que pueden generar otros usuarios en el campo visual. Sin embargo, si entrega lineamientos para futuros proyectos escolares en la región del Bío-Bío con condiciones de cielos similares. Futuras investigaciones deberían considerar como alternativa el analizar aulas con estrategias de iluminación pasiva, y compararlo con resultados que se puedan obtener en programas de simulación y los rangos que se entregan, retroalimentando con encuestas a los usuarios, en los cuales se pueda llevar a cabo posibles modificaciones en los rangos de las métricas lumínicas.

## Anexo A

## Referencias bibliográficas

- Agencia Chilena de eficiencia energética. (2012). *Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE)* ▪ [www.acee.cl](http://www.acee.cl).
- Anbari, M., & Soltanzadeh, H. (2015). Child-oriented Architecture from the Perspective of Environmental Psychology. *European Online Journal of Natural and Social Sciences: Proceedings*, 4(3(s)), 137–144.
- Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y., & Barrett, L. (2015). The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. *Building and Environment*, 89, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.013>
- Barrett, P. P., & Zhang, Y. (2009). Optimal learning spaces: design implications for primary schools. *SCRI Research Report, October*, 47. <http://usir.salford.ac.uk/18471/>
- Chiesi, L. (2010). *Il doppio spazio dell'architettura*. 91.
- Dovey, K., & Fisher, K. (2014). Designing for adaptation: The school as socio-spatial assemblage. *Journal of Architecture*, 19(1), 43–63. <https://doi.org/10.1080/13602365.2014.882376>
- Dubois, M. C. (2003). Shading devices and daylight quality: An evaluation based on simple performance indicators. *Lighting Research & Technology*, 35(1), 61–74. <https://doi.org/10.1191/1477153503li062oa>
- Greg ward. (n.d.). *Anywhere Software*. Retrieved March 5, 2022, from <http://www.anywhere.com/>
- Inan, T. (2013). An investigation on daylighting performance in educational institutions. *Structural Survey*, 31(2), 121–138. <https://doi.org/10.1108/02630801311317536>
- JALOXIA. (n.d.). Retrieved December 13, 2021, from <https://www.jaloxa.eu/>
- Kepez, O., & Ust, S. (2020). Collaborative design of an active learning classroom with high school students and teachers. *Archnet-IJAR*, 14(3), 525–541. <https://doi.org/10.1108/ARCH-11-2019-0262>
- Leslie, R., Smith, A., Radetsky, L., Figueiro, M., & Yue, L. (2010). *Patterns to Daylight Schools for people and Sustainability*. 70.
- Ministerio de Educación. (2014). *Criterios de diseño para los nuevos espacios educativos*. 108. [http://ingenieriaacustica.cl/blog/wp-content/uploads/2016/01/criterios\\_de\\_diseño\\_para\\_espacios\\_educativos\\_fep.pdf](http://ingenieriaacustica.cl/blog/wp-content/uploads/2016/01/criterios_de_diseño_para_espacios_educativos_fep.pdf)
- Ministerio de Educación, & Ministerio de obras públicas. (2012). *Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos*. [www.iconstruccion.cl](http://www.iconstruccion.cl)
- Ministerio de Obras Públicas. (2005). *Términos de Referencia Estandarizados TDRE Confort Ambiental y Eficiencia Energética*.
- Pagliero, María, Piderit, B. (2017). *Evaluación y percepción de la iluminación natural en aulas de preescolar, Región de los Lagos, Evaluation and Perception of Natural Lighting in Pre-School Classrooms, Los Lagos Region, Chile* Introducción. XXXVIII(3), 20. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376854676004>
- Park, E. L., & Choi, B. K. (2014). Transformation of classroom spaces: traditional versus active learning classroom in colleges. *Higher Education*, 68(5), 749–771. <https://doi.org/10.1007/s10734->

## Anexo A

014-9742-0

- Piderit, B., & Bodart, M. (2012). Design strategies applied to classroom's daylight design optimization of classrooms design. *Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA 2012*.
- Rockcastle, S., & Andersen, M. (2014). Measuring the dynamics of contrast & daylight variability in architecture: A proof-of-concept methodology. *Building and Environment, 81*, 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.012>
- Solemnia LLC. (n.d.). *Climatestudio*. Retrieved March 3, 2022, from <https://climatestudiodocs.com/index.html#>
- Talbert, R., & Mor-Avi, A. (2019). A space for learning: An analysis of research on active learning spaces. *Heliyon, 5*(12), e02967. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02967>
- Tanic, M., Stankovic, D., Kondic, S., & Kankhva, V. (2019). Principles and Implementation of Daylighting Systems in Classrooms. *Advances in Intelligent Systems and Computing, 983*, 720–731. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8\\_70](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_70)
- universidad del bio bio. (n.d.). *Illumina*. Retrieved December 5, 2021, from <http://iluminachile.ubiobio.cl/>
- Van Den Wymelenberg, K., & Inanici, M. (2014). A critical investigation of common lighting design metrics for predicting human visual comfort in offices with daylight. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America, 10*(3), 145–164. <https://doi.org/10.1080/15502724.2014.881720>
- Zomorodian, Z. S., Korsavi, S. S., & Tahsildoost, M. (2016). The effect of window configuration on daylight performance in classrooms: A field and simulation study. *Int. J. Architect. Eng. Urban Plan, 26*(1), 15–24.

## **Anexo A**