



**LINEAMIENTOS DE CONFORT LUMÍNICO Y VISUAL DE PIELES  
PARAMÉTRICAS APLICADAS EN ATRIOS DE EDIFICIOS PÚBLICOS**

TESIS DE INNOVACIÓN Y GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO (I+D)

ALUMNA  
PROF. GUÍA

DANIELA IVONNE CARTER  
JEANNETTE ROLDÁN





UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO  
TESIS DE TÍTULO  
2018

# LINEAMIENTOS DE CONFORT LUMÍNICO - VISUAL DE PIELES PARAMÉTRICAS APLICADAS EN ATRIOS DE EDIFICIOS PÚBLICOS

Innovación y generación de conocimiento (I+D)

**Estudiante**

Daniela Ivonne Carter Carvajal

**Profesor Guía**

Jeannette Roldán Rojas

**Escrito por:**

Daniela Ivonne Carter, 2018  
dcarter@ug.uchile.cl

**Imagen Portada:**

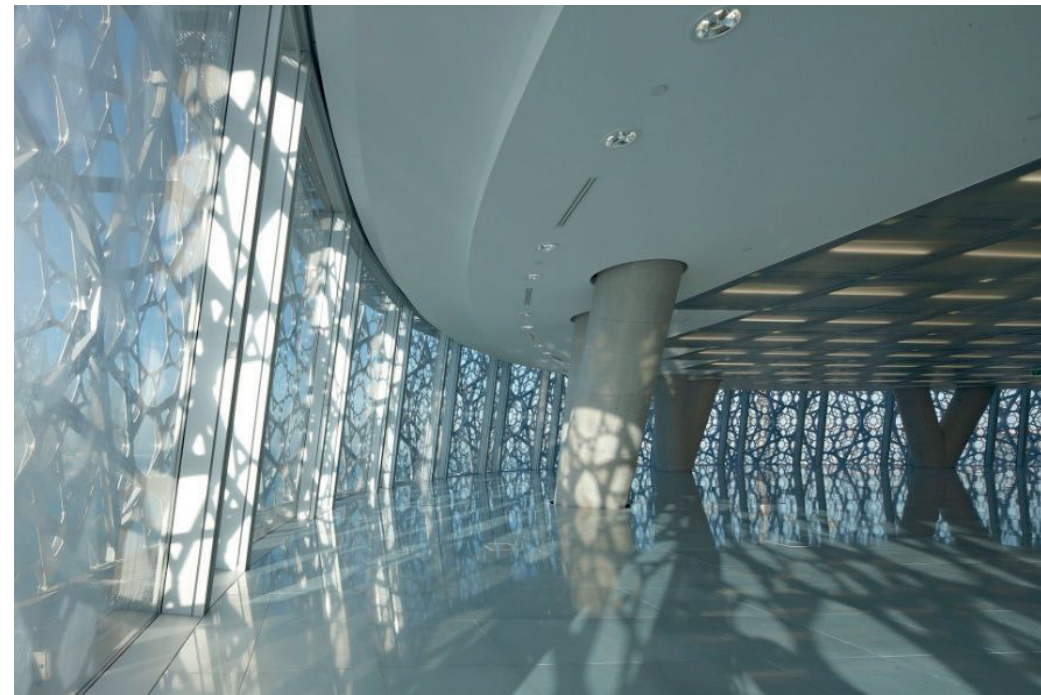
Louvre Abu Dabi, Arquitecto: Jean Nouvel.  
Web: <https://visitabudhabi.ae>

*“La arquitectura contemporánea sustituye la idea de fachada por aquella de piel: una capa exterior que media entre el edificio y su entorno. No una elevación neutral, sino una membrana activa, informada; comunicativa y en comunicación. Más bien paredes con agujeros, pieles técnicas, interactivas. Piel colonizada por elementos funcionales capaces de contener las instalaciones y los servicios; capaces de recibir y de transmitir energías; pero también capaces de contener otras capas incorporadas y traslapes [...] Reversible y virtual –fantasías digitales dirigidas que van transformando la interfaz auténtica del edificio entre el individuo y el entorno; la fachada, en pantalla interactiva, un límite friccional entre el edificio y un contexto que cambia con el tiempo.”*



Piel Paramétrica  
Doppeltes Selbstzitat - Hochhaus  
Vista exterior (arriba). Vista interior (abajo).  
Jean Nouvel Architects

Arq. Manuel Gausa  
The Metapolis Dictionary of Advanced Architecture, 2003





***A mi mamá y hermana por brindarme su amor, apoyo incondicional y sabiduría a lo largo de mi vida entera. A mi tía Carmen por sus consejos, abrazos y sonrisas.***

***A mi profesora guía Jeanette Roldán por encausarme en este proceso con su apoyo constante y buena disposición, siempre.***

***A los profesores Camilo Guerrero, Juan Luis Torres, Mauricio Loyola, Alberto Fernández y Gastón Herrera, por proporcionarme a lo largo de mi carrera, herramientas de modelado en Rhinoceros, Archicad, Revit y distintos plugins de diseño paramétrico y simulaciones de calidad ambiental interior.***

***A mis amigos de Facebook: Giancarlo di Marco, Víctor Orrego, Claudio Escobar y Boris Quezada, por resolver dudas e inquietudes 24/7.***

***A mis compañeros y alumnos por brindarme ánimo siempre!***

***A Geraldí y todos los artistas que con su voz me acompañaron en los traspasos.***

***¡Éxito y Mil Gracias!***

# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1

### PRESENTACIÓN

#### 1. DIRECTRICES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Presentación .....	12
1.2. Motivaciones .....	13
1.3. Introducción .....	14
1.4. Problemática .....	17
1.5. Preguntas de la investigación .....	20
1.6. Hipótesis .....	20
1.7. Objetivos: General y Específicos .....	20
1.8. Metodología de la investigación .....	21

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE: DISEÑO ARQUITECTÓNICO PARAMÉTRICO

#### 2. PIELES PARAMÉTRICAS: CONCEPTOS Y ESTRATEGIAS DE DISEÑO

2.1. ¿Qué es el diseño paramétrico? Parámetros, algoritmos y patrones .....	25
2.2. Pieles arquitectónicas: De la fachada al concepto de piel paramétrica Pielas cinéticas, responsivas, adaptativas y biomiméticas .....	31
2.3. Desde la geometría clásica al parametricismo .....	36
2.4. Manifiesto parametricista: entre formalismo y estilo .....	44
2.5. Softwares de diseño paramétrico .....	46
2.6. Estrategias de diseño paramétrico y procesos de fabricación digital .....	50

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS: CONFORT LUMÍNICO Y VISUAL

#### 3. CONFORT LUMÍNICO - VISUAL: CONCEPTOS Y MÉTRICAS

3.1. Conceptos básicos de iluminación natural .....	61
Luz solar, radiación directa e indirecta, reflexión, refracción, transmisión, difracción	
3.2. Magnitudes fotométricas .....	64
Flujo luminoso, intensidad luminosa, luminancia, iluminancia, contraste de luminancias.	



3.3.	Concepto y evolución de métricas de confort lumínico .....	65
	Métrica estática: Factor luz día (FLD).	
	Métricas Dinámicas: Autonomía lumínica (DA)	
	Iluminancia diurna útil (UDI)	
	Autonomía lumínica espacial (sDA)	
	Exposición solar anual (ASE).	
3.4.	Conceptos y evolución de métricas de comodidad visual .....	71
	Índice de Deslumbramiento y Brillo (DGI)	
	Probabilidad de brillo y deslumbramiento (DGP)	
	Probabilidad de brillo y deslumbramiento simplificado (DGPs)	
3.5.	Revisión de parámetros de configuración de materiales para la obtención de los resultados .....	75

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y LINEAMIENTOS

#### CASO ESTUDIO: ATRIOS EN EDIFICIOS PÚBLICOS

4.1.	Exploración inicial y justificación del caso estudio .....	79
4.2.	Breve síntesis y caracterización geométrica del caso de estudio .....	83
4.3.	Configuración de materiales y parámetros de los modelos de estudio .....	86
4.4.	Herramientas y configuración de modelamiento y simulaciones .....	90
4.5.	Metodología de análisis del caso de estudio .....	103
4.6.	Parámetros climáticos e iluminancia de cielo de Santiago .....	104
4.7.	Análisis y comparación de resultados .....	108
4.8.	Conclusiones parciales y generales .....	130
4.9.	Lineamientos de diseño y ruta de acciones vinculadas a la optimización de modelos paramétricos .....	132
4.10.	Posibles líneas de investigación .....	133

## APÉNDICES

A]	GLOSARIO .....	135
B]	ANEXOS .....	141
C]	BIBLIOGRAFÍA.....	151

El siguiente capítulo da cuenta de las directrices de investigación y expone la problemática de interés, junto a las respectivas preguntas, objetivos asociados y correspondientes metodologías de análisis empleadas a lo largo del desarrollo de la presente tesis de pregrado.

Se pretende avanzar en la temática y ser un aporte para la arquitectura pública contemporánea, particularmente, en la aplicación de celosías paramétricas en la piel de los edificios, de modo que éstas, sean diseñadas criteriosamente y cumplan con los requerimientos lumínicos mínimos, confortables, sin presentar incomodidad visual en los ocupantes.

01

Imagen de Fondo:  
Hotel en Macau  
Zaha Hadid Architects

**PRESENTACIÓN**  
**DIRECTRICES DE LA INVESTIGACIÓN**

## 1.1. PRESENTACIÓN

Esta Tesis de Investigación forma parte del proceso de Título Profesional de la carrera de Arquitectura de la Universidad de Chile y busca establecer lineamientos de diseño paramétrico adecuados para la realización de proyectos y obras de arquitectura pública que promuevan mayor habitabilidad lumínica y visual, enfocándose en los algoritmos utilizados para el desarrollo de celosías, fachadas y cubiertas.

En este capítulo se exponen la problemática, las preguntas, los objetivos y la metodología empleada para desarrollar la investigación con los siguientes enfoques de análisis:

- a) Cualitativo, mediante el análisis de un algoritmo seleccionado a partir de la revisión del estado del arte relacionado al diseño paramétricos de envolventes.
- b) Cuantitativo, a partir de la aplicación de metodologías de análisis lumínico y métricas de evaluación lumínica y visual, mediante el desarrollo de simulaciones para comprobar la hipótesis de investigación y determinar ciertos lineamientos a tener en cuenta en la aplicación futura del algoritmo seleccionado.

Se considera para ello, un modelo de estudio previo con dimensiones de un espacio público estándar y un modelo en particular, con el fin de identificar estrategias de diseño y parámetros adecuados a las condiciones climáticas de Santiago de Chile, según las características luminosas del cielo.

## 1.2. MOTIVACIONES

Decidí estudiar arquitectura porque es una disciplina y profesión integral que involucra el diseño, la construcción y habitabilidad de los edificios en un contexto determinado que evoluciona y se transforma en la medida que transcurre el tiempo, en función de las necesidades del ser humano, mejorando la calidad de vida cuando el diseño cumple con los estándares de calidad ambiental interior, ésto ocurre cuando los espacios proyectados son adecuados al programa arquitectónico y logran satisfacer los requerimientos de confort de los usuarios.

Debido a los intereses vocacionales adquiridos a lo largo de la carrera, realicé los cursos avanzados: Arquitectura Bioclimática en un Medio Sostenible, además de Arquitectura Sustentable y Eficiencia Energética, también distintos cursos de modelamiento digital, que han despertado el interés por las temáticas abordadas en esta investigación. Cabe mencionar además que, la práctica profesional fue realizada en la DA MOP NC (Dirección de Arquitectura, Ministerio de Obras Públicas, Nivel Central), en los Subdepartamentos de Arquitectura y Eficiencia Energética, por el interés en aportar al desarrollo de la arquitectura pública y sustentable en el país.

Durante el desarrollo de la práctica profesional, en relación a las actividades desarrolladas particularmente en el Subdepartamento de Eficiencia Energética en la Edificación Pública, bajo la guía de la tutora Margarita Cordaro, quien actualmente es presidente de la Certificación de Edificio Sustentable (CES), se tomó conocimiento de varias obras, en particular, la que generó mayor interés en mí, fue la de la Escuela Libertador Bernardo O'higgins de Tocopilla, edificio con certificación CES 2017, desarrollado por Valle y Cornejo Arquitectos Ltda., ya que en su fachada norte desarrolló una envolvente paramétrica, mediante el algoritmo voronoi, para enfatizar el acceso y filtrar la iluminación interior del hall de acceso.

Además, en esta instancia, se tomó conocimiento del nuevo PLAN BIM 2020, que promueve el uso de tecnologías BIM (*Building Information Modeling*), con el fin de impulsar la sustentabilidad de las obras públicas en las distintas etapas del ciclo de vida de los edificios, principalmente en las etapas de diseño y construcción, con el fin de reducir los gastos, plazos y costos para el desarrollo y la mantención.

Teniendo esto último en cuenta, cobraron importancia las distintas posibilidades que ofrece el diseño digital en la realización de los proyectos de arquitectura pública. Para ello, habitualmente, se ejecuta un análisis en profundidad de las variables del contexto y se realizan simulaciones, en torno a las distintas alternativas y estrategias pasivas de diseño, modificando los parámetros que definen la forma de los edificios, para así, obtener mejores desempeños.

En síntesis, la presente tesis de investigación surgió a partir del interés por abordar dos grandes conceptos que marcan la tendencia de la arquitectura del siglo XXI:

**a) ARQUITECTURA SUSTENTABLE:** Relacionada con la calidad ambiental interior y desempeño energético pasivo de los espacios, haciendo hincapié en el confort lumínico.

**b) ARQUITECTURA DIGITAL:** Ligada al uso de tecnologías aplicadas a los sistemas de información, proceso de diseño y optimización, mediante el desarrollo de arquitectura paramétrica.

*Imagen de Fondo: Escuela Libertador General Bernardo O'higgins de Tocopilla  
Fuente: Web de Gobernación Provincial de Tocopilla*

### 1.3. INTRODUCCIÓN

La llegada de la era digital a fines de los años 70 permitió dar un salto importante en la aplicación de tecnologías relacionadas con el proceso de diseño y arquitectura, ampliando las capacidades creativas, productivas y analíticas. Las herramientas digitales: *softwares* y *plugins* (programas y aplicaciones computacionales) permiten la realización de múltiples representaciones bidimensionales y tridimensionales, ofreciendo también, la posibilidad de efectuar cambios, análisis y visualizaciones en tiempo récord, referentes a lo existente y lo propuesto en términos de forma, orientación altura, materialidad y otras variaciones, transformándose en un medio para desarrollar diseños de alta performance (Fraile, 2012).

El avance tecnológico ha permitido desarrollar una arquitectura con formas geométricas más complejas que las platónicas y euclidianas, mediante el uso de ecuaciones generativas que, siguiendo una lógica secuencial, reciben el nombre de algoritmo, los que serán analizados en la presente investigación, como base para el entendimiento y análisis del diseño paramétrico, el cual ha marcado una nueva tendencia en la arquitectura contemporánea del Siglo XXI (De Lucas, 2017). Desde esta perspectiva, el diseño paramétrico es un recurso innovador, relacionado con conceptos que aluden a estructuras evolutivas y de crecimiento orgánico, a partir de relaciones de patrones geométricos que pueden variar y modificarse según criterios de evaluación y selección, ofreciendo así, múltiples resultados (Navarrete, 2014). Los patrones generativos y la parametrización de la geometría ofrecen un carácter dinámico y experimental que flexibiliza el proceso de diseño arquitectónico, aportando la posibilidad de desarrollar nuevos espacios que, basados en enfoques biomiméticos, simulan sistemas biológicos y cambiantes, a partir de la incorporación del cálculo matemático digital para articular correlaciones complejas entre elementos y subsistemas. Ésto último, permite la mani-

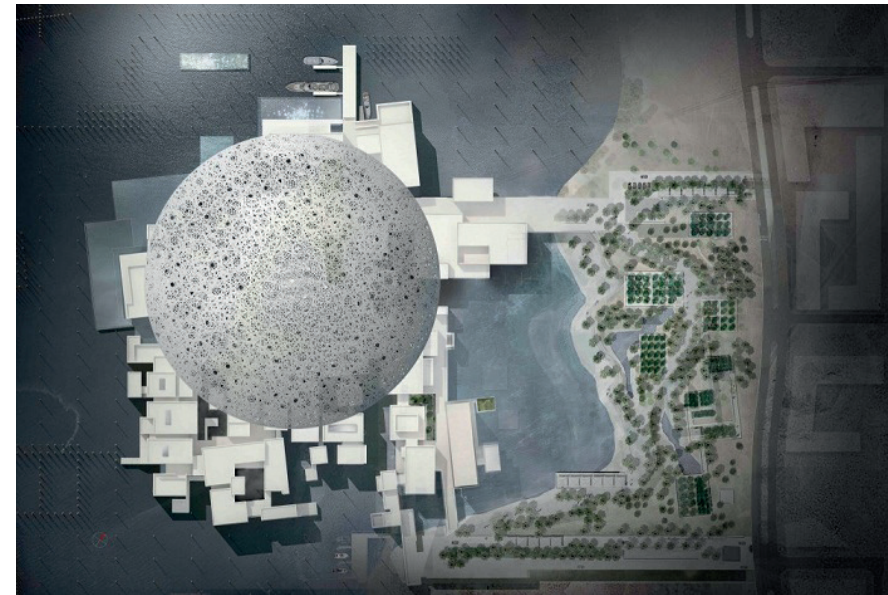


Imagen 1. Planta Cubierta de Museo Louvre de Abu Dhabi, Jean Nouvel  
Fuente: Ateliers Jean Nouvel

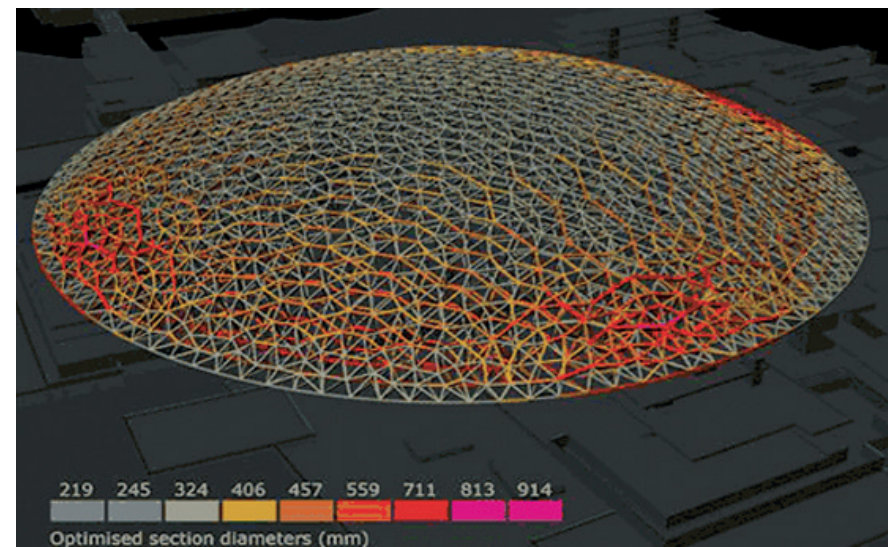


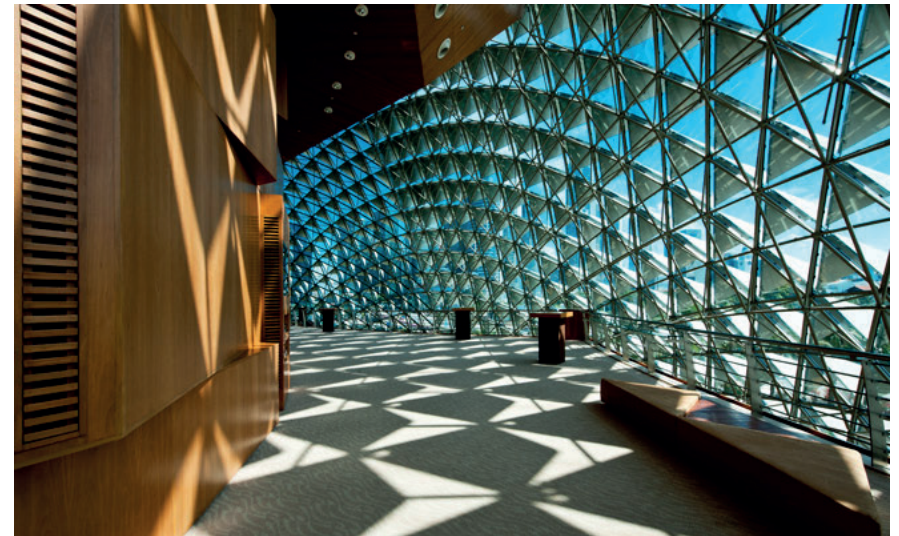
Imagen 2. Optimización de Patrones de Cubierta en función de la luz solar  
Fuente: Intec Infra Technologies

pulación variable de los datos para desarrollar distintas propuestas proyectuales, capaces de ser modificadas y adaptadas fácilmente con tan sólo alterar los parámetros de las funciones matemáticas (Chiarella, Dalla Costa, Veizaga y Gronda, 2011).

El diseño digital además, ofrece la posibilidad de analizar las variables del entorno, mediante el desarrollo de simulaciones que permiten entender la implicancia de las decisiones formales del proyecto, tales como: la distribución de programa, volumetría, orientación, selección de materiales, entre otros factores que fomentan la relación entre el edificio y el lugar de emplazamiento, lo que permite ejecutar una mejor toma de decisiones. Más allá de la forma la arquitectura debe integrar el ambiente construido y el entorno natural, logrando espacios habitables, confortables y saludables, proyectando idealmente, un diseño pasivo bioclimático que se adapte a los agentes externos del medio, para alcanzar el confort en el espacio interior (Edwards, 2006).

Sin lugar a dudas, los sistemas generativos ofrecen el potencial de modificar radicalmente la manera en la cual los arquitectos llevan a cabo el proceso de diseño, al generar diversas alternativas de proyecto que pueden ser comprobadas simultáneamente en términos de los desempeños energéticos, considerando las condiciones climáticas del entorno y la materialidad de éste, al momento de evaluar la efectividad de las propuestas paramétricas complejas, con el fin de favorecer propósitos de sostenibilidad (Andersen y Salomon, 2010).

El desempeño energético de un edificio en gran medida se debe al confort lumínico y térmico que, determina la demanda y consumo de electricidad, sistemas de calefacción y refrigeración en los recintos, aumentando en consecuencia los costos de mantenimiento del edificio (Hattz, Saelzer, Hempel y Gerber, 2012). Un diseño pasivo y sustentable considera crite-



*Imágenes 3 y 4. Ejemplo de Diseño Biomimético en la piel paramétrica de The Esplanade - Theatres on the Bay, Marina Bay, Singapore, basado en la geometría del durian, un fruto tropical típico de la zona. (arriba) interior de la obra (abajo) exterior de la obra  
Fuente: DP Architects*



rios de confort y energía, disminuyendo en consecuencia, el impacto de éste en el medioambiente y promoviendo con ello, el bienestar de las personas que lo habitan y el de futuras generaciones (Castilla, Álvarez, Berenguel, Pérez, Rodríguez, Guzmán, 2010) (ONU, 1987).

El confort lumínico es imprescindible para el desarrollo de múltiples condiciones de vida saludable: la luz influye en los ritmos circadianos que regulan las funciones fisiológicas de los organismos a partir de la segregación de melatonina, hormona responsable de la sensación de somnolencia, temperatura corporal, presión arterial, entre otros procesos celulares de carácter neuroendocrinos, neurofisiológicos vitales para la vida y sensación del bienestar humano, porque permite desarrollar con regularidad sus actividades (Wurtman, 1975).

Es importante por ésto, profundizar en la temática, haciendo énfasis en la capacidad de alcanzar la habitabilidad y comodidad lumínica para que la selección de estos algoritmos sea efectuada apropiadamente, evitando que sea realizada al azar, bajo una lógica de prueba - error y con ésto, promover una mayor calidad ambiental interior en la arquitectura pública desarrollada con envolventes paramétricas.

La presente tesis de investigación, en consecuencia, hace principal énfasis en la metodología exploratoria de evaluación de desempeño de iluminación natural de una piel paramétrica desarrollada con un algoritmo en particular, con el fin de establecer ciertos lineamientos de diseño para la utilización de éste en la edificación pública y optimizar el tiempo utilizado en simulaciones de carácter lumínico. Para ello, se tomará en cuenta la orientación más desfavorable, según la exposición y recorrido solar.

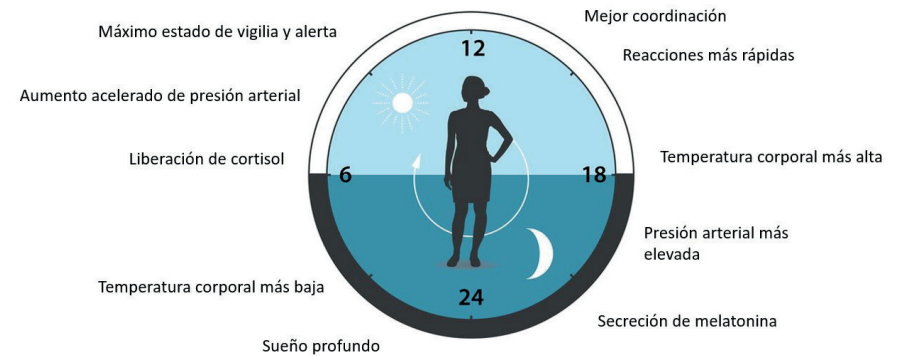


Imagen 5. Reloj biológico interno del cuerpo humano. (Ritmos Circadianos) Fuente: [www.investigaciónyciencia.es](http://www.investigaciónyciencia.es)

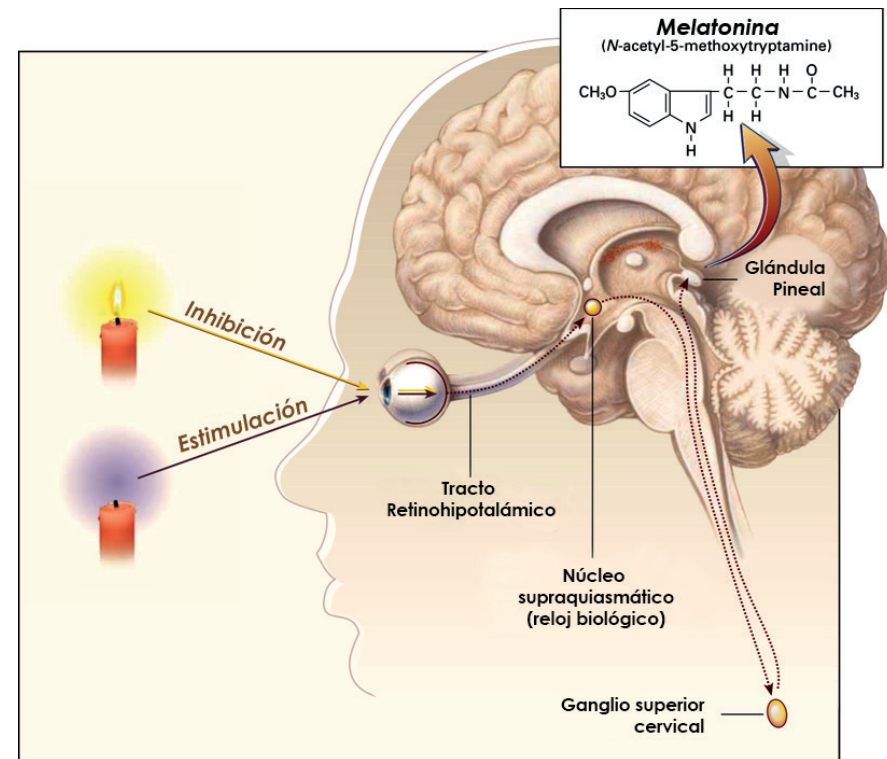


Imagen 6. Secreción de Melatonina: Inhibición y estimulación según niveles de luz Fuente: [www.neolifeclinic.com](http://www.neolifeclinic.com)



## 1.4. PROBLEMÁTICA

El advenimiento de la era digital introdujo nuevas metodologías de diseño y la posibilidad de articular formas complejas con alta productividad, a tal punto que, actualmente, es casi inconcebible imaginar el diseño de los edificios sin la utilización de estas herramientas a lo largo de todas las etapas del proyecto:

“la planimetría, el modelado, la post-producción para la visualización, la parametrización de formas generativas, sistemas de modulación paramétrica, análisis estructurales y térmicos, planificación, gestión y coordinación de obra, producción y fabricación digital, entre otras son funciones realizadas mediante el diseño asistido por el computador (CAD Computer Aided-Design) o Arquitectura Digital” (Iwamoto, 2007).

Los softwares que permiten desarrollar esta arquitectura, buscan aumentar la eficiencia del proceso de diseño, integrando herramientas de análisis de rendimiento de los espacios, con el fin de proporcionar una calidad ambiental interior (CAI), en términos de iluminación funcional, aumento de los niveles de confort de los espacios (térmico, lumínico y acústico), reduciendo, por ende, el consumo de energía por concepto de iluminación natural y baja demanda de calefacción-refrigeración y ventilación, principalmente (Gomma y Jabi, 2016).

No obstante, la rápida adopción del diseño paramétrico en la arquitectura, tal como su nombre lo indica, se articula a partir de parámetros que definen la forma con la capacidad de ofrecer múltiples modificaciones, en torno a las variables que componen el sistema algorítmico. Se ha articulado una tendencia e interés por desarrollar formas y geometrías más complejas mediante el uso de softwares que demandan mayores preci-

siones en estas evaluaciones que, a menudo suelen ser poco aplicables y en consecuencia, poco confiables, debido a la incompatibilidad de los softwares versus la complejidad de la forma que suele configurarse a partir de la intuición, a través de simples juegos formales que pretenden alcanzar la esencia lúdica y estética por sobre el contenido, funcionalidad y aspectos técnicos importantes de la arquitectura que hacen que los espacios proyectados sean realmente habitables (Gomma y Jabi, 2016) (Jakubiec y Reinhart, 2011) (Navarrete, 2014).

Sin orientación de lineamientos de confort interior, relacionados con el uso de algoritmos y metodologías paramétricas, fácilmente podríamos convertirnos en diseñadores “empíricos amantes de la multiplicidad, que dejan de lado el espíritu racionalista”, como lo advirtió Carl Gustav Jung en su texto “Tipos Psicológicos” (1921), en el que el autor da cuenta de la experiencia constante de prueba y error de la “nueva era”, en la que es posible desarrollar múltiples formas encausadas sin propósito definido, ejecutadas por modificaciones de variables con ilimitadas opciones que conllevan a un constante estado de exploración del arquitecto que se aventura a crear formas que tienden a alcanzar un estado formalmente escultórico, dejando de lado, aspectos funcionales claves del espacio, como lo es el aprovechamiento de iluminación natural en el interior (Navarrete, 2014).

En otras palabras, la arquitectura paramétrica de la nueva era transmuta el diseño arquitectónico, hacia un estado de “autoexploración o experimentación múltiple de formas automatizadas” que se articulan con una “lógica de árbol”, donde un cambio ejecutado en los parámetros puede lograr múltiples resultados, dispersándose y abandonando la metodología lineal tradicional. Este tipo de diseño es de carácter flexible y logra establecer un mayor grado de complejidad e innovación en la creación de envolventes, en la que aún hay desconocimiento (Morales, 2012).

La forma y los materiales de la envolvente o "piel", concepto que hace referencia a aspectos multifuncionales, receptivos, dinámicos y adaptativos (Pesenti, Masera, Fiorito y Sauchelli, 2015), inciden directamente en la distribución, direccionalidad e intensidad de la iluminación natural de los espacios interiores (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009); al actuar como un filtro que al tener un diseño óptimo, permite controlar y proteger de los niveles de insolación, deslumbramiento y/o sobrecalentamiento, tanto por la geometría, textura, color y otras características fotométricas que se traducen en factores de reflexión, absorción, transmisión y distribución, según las propiedades de los materiales, con el fin de propiciar la adecuada entrada de luz y facilitar las vistas hacia el exterior, al graduar los contrastes de luminancias (Ávila y Arias, 2015).

Se debe tener en cuenta que un buen diseño de iluminación logra un equilibrio óptimo entre provisión y control de luz natural (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009), de tal modo que el espacio sea confortable, procurando la ausencia de fatiga visual en los ocupantes de los recintos. Para ello es importante, considerar el programa arquitectónico o las actividades que serán desarrolladas en el interior, para cumplir con la iluminación apropiada (Hopkinson, Petherbridge y Longmore, 1969).

En nuestro país, generalmente los edificios públicos que promueven el confort lumínico y visual se limitan a geometrías simples: cajas de distinta materialidad y celosías, que manejan el grado de reflectividad, orientación de fenestraciones y transparencia de los elementos (Ávila y Arias, 2015).

En la etapa de diseño, habitualmente los proyectos que poseen un enfoque ambientalmente sustentable, son modelados y simulados, considerando los factores climáticos del emplazamiento, es por ello, que suelen geo - referenciarse, utilizando la data climática correspondiente a la ciu-

dad en la que se localiza la obra (*Climate Based Daylight Modelling*), para obtener datos del desempeño y calidad ambiental interior (lumínica, térmica, acústica y ventilación) (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009).

En particular, en una simulación lumínica, se deben tener en cuenta los componentes del sol, del cielo y la proyección de métricas de luz natural, procurando realizar análisis de carácter acumulativo - comparativo, ésto es, considerando el desempeño solar anual y una correcta selección entre diferentes alternativas de diseño. Para ello, se debe considerar la variabilidad y distribución de la luz, mediante métricas dinámicas, para alcanzar niveles óptimos de iluminación, evitando el brillo luminoso y deslumbramiento en los espacios diseñados con celosías convencionales o con envolventes paramétricas (Sawyer, 2017) (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009).

El diseño paramétrico de envolventes con geometría compleja se ha masificado en los últimos años y ha hecho que este tipo de evaluaciones de calidad ambiental interior (CAI) sean más desafiantes, demandando mayor precisión en las simulaciones. El número de *softwares, plugins y apps* (aplicaciones) de análisis de este tipo de diseño va aumentando y aún hay desconocimiento en el manejo y uso de éstos, por ende, es necesario establecer criterios de diseño lumínico sustentable, para promover la aplicación de este tipo de pieles y celosías en la arquitectura, más allá de fines estéticos (Gomma y Jabi, 2016).

Es por ésto que, esta tesis de investigación pretende contribuir a la generación de conocimiento, aportando lineamientos de diseño arquitectónicos, basados en evaluaciones de carácter lumínico, aplicados al uso de algoritmos ampliamente difundidos en el extranjero para tener en cuenta en futuras aplicaciones en edificios públicos de Chile, principalmente Santiago, donde existe mayor avance tecnológico en las construcciones.

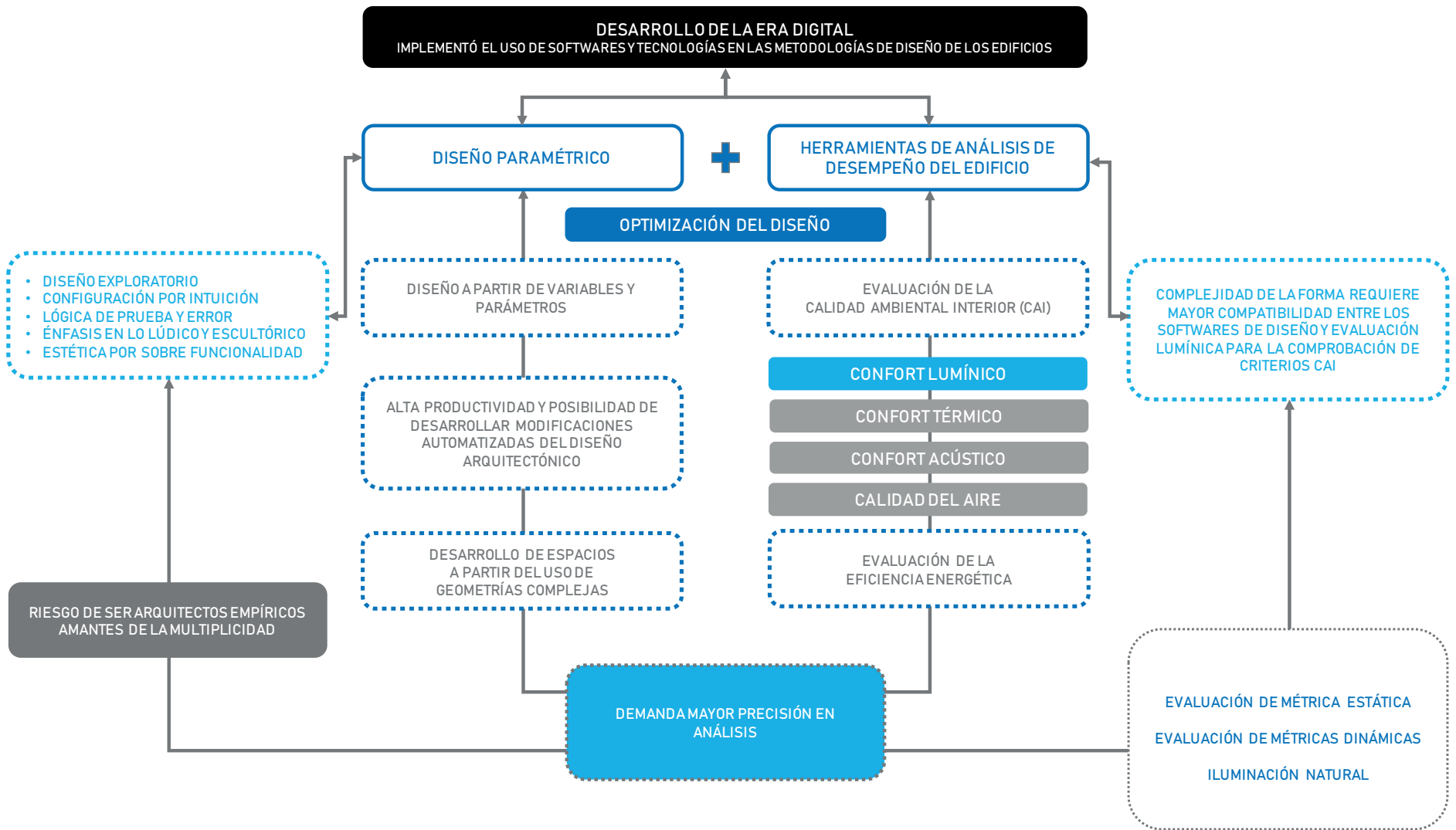


Imagen 7. Esquema de la Problemática  
 Fuente: Elaboración Propia

## 1.5. PREGUNTAS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se inscribe dentro de la temática de calidad ambiental interior de los espacios y pretende ser un aporte para el desarrollo de la arquitectura contemporánea, al profundizar en los criterios y estrategias de diseño paramétrico de envolventes, acordes a las exigencias de confort lumínico de la arquitectura pública.

Surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son los lineamientos arquitectónicos adecuados para el diseño y parametrización de envolventes que promueven el confort lumínico y visual en los edificios públicos?

## ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La presente Tesis de Investigación se organiza a partir de la problemática de arquitectura paramétrica y los criterios lumínicos que promueven la habitabilidad interior en los edificios públicos, con el fin de efectuar una aplicación adecuada de determinados algoritmos matemático ampliamente difundido en el desarrollo de las pieles o envolventes de distintos proyectos y obras. Para ello, se tiene en consideración el estado del arte y se determinan las variables de análisis de la temática, abordando ésta desde 2 ejes conductores:

- Diseño arquitectónico paramétrico, en función de las estrategias de diseño y tipología de algoritmos.
- Confort lumínico y comodidad visual, en torno a las métricas dinámicas de iluminación natural.

## 1.6. HIPÓTESIS

Los lineamientos arquitectónicos que permiten alcanzar el confort lumínico y visual, guardan estrecha relación con la optimización del tamaño de las aperturas o de las células que componen las pieles paramétricas.

## 1.7. OBJETIVOS

### General

Comprobar el desempeño lumínico – visual de los algoritmos utilizados en pieles paramétricas, aplicables a edificios públicos.

### Específicos

- Analizar el estado del arte del diseño de pieles paramétricas, identificando distintas estrategias en base a uso de algoritmos.
- Identificar las metodologías de análisis de confort lumínico y visual apropiadas para la evaluación de envolventes paramétricas.
- Evaluar el desempeño lumínico de las envolventes paramétricas, respecto a las metodologías identificadas.

Cada uno de estos objetivos compone un capítulo de la presente investigación:

- ESTADO DEL ARTE: DISEÑO ARQUITECTONICO PARAMÉTRICO.
- METODOLOGIAS DE ANALISIS: CONFORT LUMÍNICO VISUAL.
- ANALISIS DE RESULTADOS Y LINEAMIENTOS.

## 1.8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En esta investigación se pretende realizar un estudio exploratorio respecto a una temática relativamente reciente en Chile y poco abordada desde el ámbito del confort lumínico. Se realizó un análisis cuantitativo con el fin de comprobar la hipótesis y aportar lineamientos de diseño a considerar en los casos evaluados, tras el análisis y observación de los resultados obtenidos, empleando una lógica deductiva.

### a) Revisión bibliográfica y selección de modelos de estudio

Indagatoria del estado del arte del diseño paramétrico, con el fin de identificar patrones de algoritmos ampliamente difundidos para someterlos a evaluación lumínica. Para ello, se buscaron libros, revistas digitales e investigaciones indexadas en las bases de datos científicas, además ponencias publicadas en los congresos de carácter internacional.

### b) Revisión bibliográfica y selección de metodología de análisis de iluminación natural y comodidad visual

Indagatoria del estado del arte de iluminación natural, con el fin de identificar las metodologías de análisis cuantitativo: métricas estáticas y dinámicas para ser aplicadas en el análisis de resultados obtenidos en software de simulación lumínico - visual.

### c) Modelos y simulaciones

En primer lugar, se modelan módulos de prueba que poseen el algoritmo seleccionado, teniendo en cuenta las dimensiones de un espacio público estándar que posee gran concurrencia de personas para poste-

riormente desarrollar simulaciones de confort lumínico - visual, evaluando el desempeño en las orientaciones más desfavorables (fachada norte y cubierta).

En base a los resultados, se aplican cuatro alternativas de diseño paramétrico en los modelos de estudio, cuyas medidas están basadas en la investigación: "Caracterización geométrica y lumínica de los atrios incorporados en los edificios de Santiago de Chile", que corresponde a la tesis doctoral de la docente Jeannette Roldán, quien además guía la presente tesis de investigación. En ella, la autora realiza un catastro exhaustivo de este elemento constructivo y recurso espacial, utilizado como estrategia de diseño pasivo de iluminación natural aplicada en edificios de carácter público que poseen múltiples funciones.

El objetivo principal es identificar el comportamiento lumínico-visual del diseño de cubierta paramétrica con el algoritmo seleccionado para comprobar la hipótesis de investigación y desarrollar lineamientos de diseño arquitectónico óptimos que tengan un mayor aprovechamiento de luz natural en la aplicación futura del algoritmo. Para ello, se utilizan los siguientes *softwares*, *plugins*, componentes y *apps* con las metodologías, criterios y configuraciones indagadas en la revisión bibliográfica :

- a) Rhinoceros + Grasshopper, Revit (modelado y parametrización).
- b) Ladybug / Galápagos (análisis de recorrido solar y optimización).
- c) LighStanza (simulaciones de iluminación natural, brillo y radiación solar).

### d) Matriz de lineamientos

Tras realizar el análisis de resultados, se precisarán los lineamientos lumínico - visuales que permiten tener una pauta previa al momento de utilizar y ejecutar el diseño del algoritmo seleccionado, incorporándose en las conclusiones.

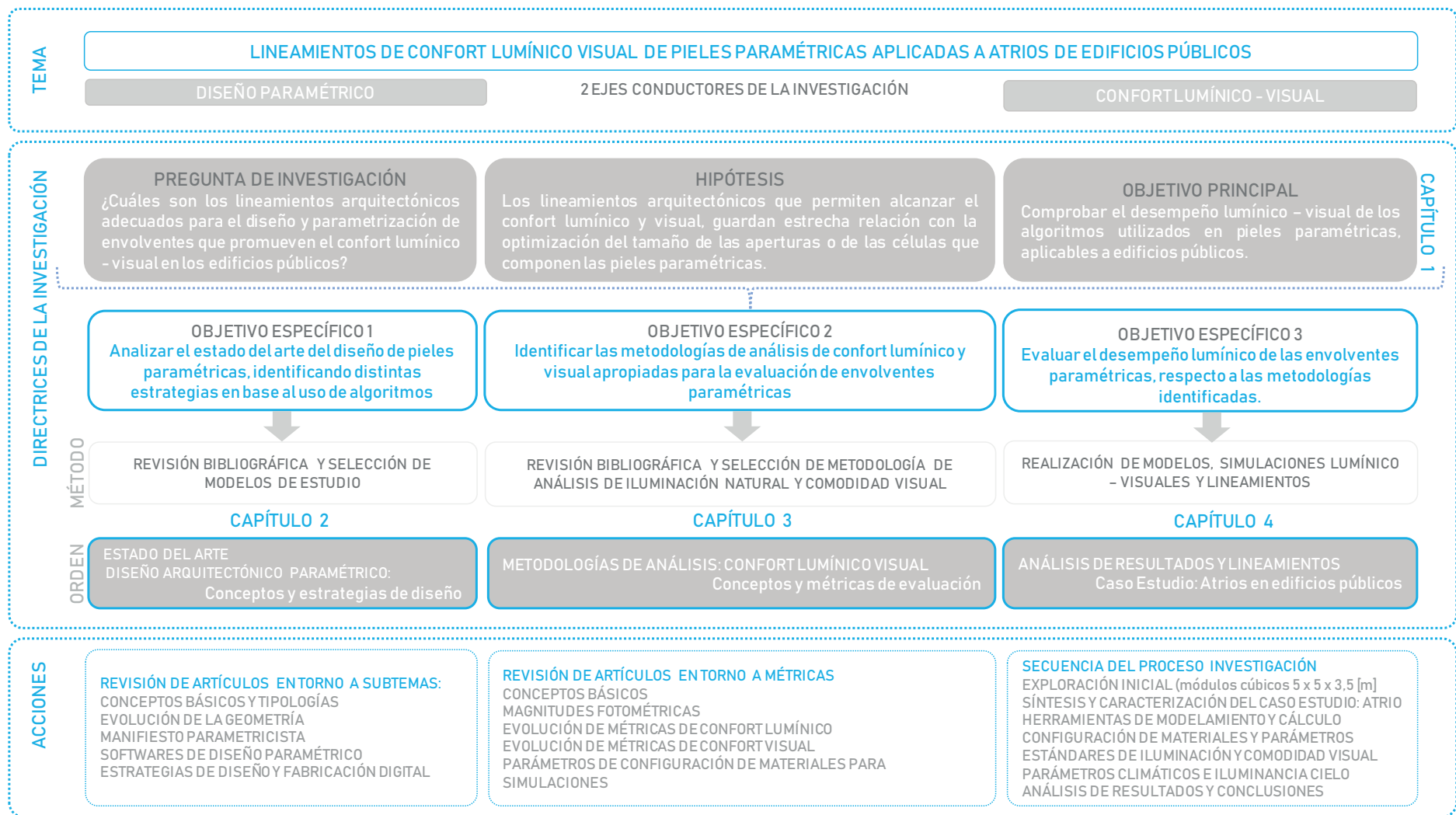


Imagen 8  
 Esquema de metodología de la investigación y cronograma de acciones.  
 Fuente: Elaboración Propia

02

Imagen de Fondo:  
IMA Instituto del  
Mundo Árabe  
Jean Nouvel

**ESTADO DEL ARTE**

**DISEÑO ARQUITECTÓNICO PARAMÉTRICO**

La luz es indispensable para el desarrollo de las actividades humanas, la contemplación de las formas, colores y espacios, por ende, ésta es vital para el desarrollo de la arquitectura y el diseño de elementos de lleno y vacío que son claves para mediar la relación existente entre el espacio interior y exterior, tal es el caso, de la piel o envolvente dinámica de edificios que se configura como un elemento permeable, fijo o dinámico que determina el ingreso de la iluminación natural hacia el interior.

A lo largo de la historia, la arquitectura desde sus inicios ha fijado parámetros de diseño que de una manera u otra, han permitido moldear el espacio vacío donde se desarrolla la vida humana, considerando diversas variables y factores del contexto.

El avance de la tecnología digital, junto a la difusión de diversas herramientas de análisis de desempeños o aprovechamiento de la iluminación natural, combinado con, las metodologías de análisis desarrolladas por diversos organismos y entidades reconocidas, se han difundido ampliamente durante las últimas décadas, proporcionando un mayor grado de eficiencia, funcionalidad y sostenibilidad, en la etapa de proyecto arquitectónico.

En el siguiente capítulo se establece el estado del arte en torno al diseño arquitectónico de pieles paramétricas, reconociendo los conceptos claves asociados a la temática que abarcan desde los más básicos a los más complejos, como los algoritmos o secuencia de pasos y transformaciones geométricas del tipo genético o generativo que abren la posibilidad de desarrollar iteraciones o repeticiones de algunos de éstos, al ser inspirados en la evolución biológica y las mutación de las especies, como se expresa en el Manifiesto Parametricista de Patrik Schumacher en el año 2008, junto a las diversas características que pretenden definir lo paramétrico como estilo contemporáneo, mas allá del formalismo.

Indagando en la temática aquí abordada se logran identificar al menos cuatro tipologías de pieles paramétricas, que pueden agruparse en las envolventes inteligentes, conocidas como *smart skins* - que incluyen el uso de tecnologías y dispositivos, las cinéticas - capaces de accionar movimiento como mecanismos de reacción a estímulos externos del contexto, las responsivas - también conocidas como adaptativas que consideran las variables del contexto, comportándose como una dermis orgánica que media con el espacio exterior y finalmente, las biomiméticas que emulan la naturaleza desde diversos atributos tales como atributos, funciones o composiciones del tipo figurativo.

Finalmente, se indaga en los *softwares* y *plugins* utilizados en el campo profesional para la ejecución de las envolventes paramétricas, aplicadas en la actualidad en distintos proyectos y obras, a través de las estrategias de diseño identificadas que guardan estrecha relación con la composición del algoritmo y las transformaciones geométricas desarrolladas, en torno a 7 tipos, que serán detalladas en el capítulo, ilustrando diversos ejemplos:

- *Sectioning.*
- *Contouring.*
- *Form - Finding.*
- *Paneling - Folding.*
- *Paneling.*
- *Ruled Surfaces.*
- *Tesselation.*



## 2. PIELES PARAMÉTRICAS Conceptos y estrategias de diseño

### 2.1. ¿Qué es el diseño paramétrico? Parámetros, algoritmos y patrones.

El concepto parámetro proviene del griego *para* (para) prefijo que significa junto, cerca, al lado y del sufijo *μετρον* (metron) que significa medida. El término no es nuevo, ni contemporáneo, ya que ha sido utilizado a lo largo de la historia, desde el período clásico, refiriéndose al concepto de variable matemática que otorga un valor numérico o dimensión a un elemento o sistema.

El desarrollo de la arquitectura en función de las variables o condicionantes del terreno, se ha realizado a lo largo de la historia desde las primeras civilizaciones, en que el ser humano adaptó el espacio con ciertas dimensiones, según las necesidades vitales de su supervivencia, para poder resguardarse, protegerse, comer y dormir en el medio en el que vivía. Conforme avanzó el tiempo, el hombre fue evolucionando y transformando las técnicas a nivel de representación y soluciones geométricas, desde un enfoque empírico avanzando hacia un razonamiento de carácter lógico y deductivo (Veas, 2009). Las formas se instauran en el entorno, a partir de numerosas restricciones o transformaciones geométricas con funciones matemáticas implícitas, que definen las dimensiones y conexiones entre volúmenes que conforman las obras de modo sistemático. Estas relaciones geométricas, realizadas de modo secuencial reciben el nombre de algoritmo, que etimológicamente surge del latín tardío *algotarismus* y del griego *arithmos*, ambos relativos al número y reglas numéricas; cuya primera aplicación data del siglo IX D.C. con el matemático Al Khwarizmi, quien acuñó conceptos relacionados con la aritmética, álgebra y el sistema numérico arábigo (Brassard y Bratley, 1997) y determinó que un

algoritmo consiste en un procedimiento para abordar un problema en un número finito de pasos (Terzidis, 2006).

Los algoritmos, desde este punto de vista guardan estrecho vínculo con las relaciones numéricas entre los elementos que conforman un sistema, a partir de las alteraciones de las variables de las ecuaciones paramétricas, es decir, la secuencia de pasos puede ser modificadas a nivel de dominio (x) de las funciones ingresadas como órdenes o valores de entrada (*input*) para la obtención de datos de salida (*output*) o recorrido (y) de las funciones que determinan la forma geométrica resultante de las transformaciones realizadas (Leithold, 1998), que, al estar automatizadas y programadas en un *software*, pueden operar como iteraciones o repetición de la secuencia de pasos.

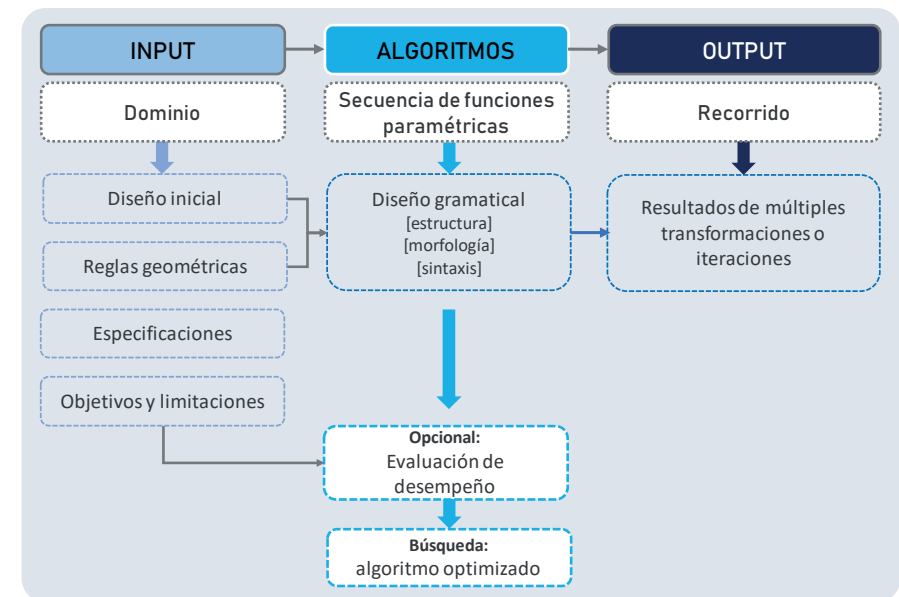


Imagen 9. Algoritmos y relación con las funciones matemáticas, y proceso de diseño. La información base o INPUT: dominio de las funciones, que en suma, representan acciones o algoritmos que en un número finito de pasos permiten obtener un resultado u OUTPUT: recorrido de las funciones. Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica.

A partir de la modificación de los algoritmos (secuencia de funciones geométricas o instrucciones específicas) y parámetros (medidas o variables), en las últimas décadas de la arquitectura contemporánea, han dado lugar a resultados formales más orgánicos, libres y complejos que la geometría tradicional platónica y euclidiana (Dalla, 2015) (Tedeschi, 2014).

La denominación de formas orgánicas, libres y complejas, puede tener cierta ambigüedad, pero se refiere a la creación de nuevas formas en respuesta a la creciente demanda de heterogeneidad de espacios que, en ocasiones, sólo son trazados y configurados bajo criterios puramente aleatorios (Azagra y Bernabeu, 2012). Éstas se articulan basadas en las teorías de la complejidad, tales como: sistemas fractales, dinámicos no lineales, morfogenéticos, biomiméticos y generativos que a simple vista poseen carácter escultórico o conjunciones estructurales y paramétricas. (Jencks, 2006). Cabe señalar además que estas interacciones entre elementos geométricos se asemejan a la simbiótica retroalimentación de las células y sus componentes (De Landa, 2000).

Un término que tiende a confundirse con los conceptos de parámetros y algoritmos es el de patrones, acuñado por primera vez en el ámbito de la arquitectura por Christopher Alexander, quien se refirió a los atributos formales estructurantes de las ciudades que determinan un orden jerárquico que se reitera cíclicamente y que puede llegar a establecerse como una pauta urbana a seguir bajo ciertas normas o reglas que adquieren un valor en términos de escala (parámetros) y dan solución a problemas de diseño, sin efectuar necesariamente soluciones idénticas (Alexander, Ishikawa y Silverstein, 1977).

Sin embargo, el uso de los algoritmos se masificó en el ámbito de la informática, para efectuar múltiples acciones de manera automática, agili-

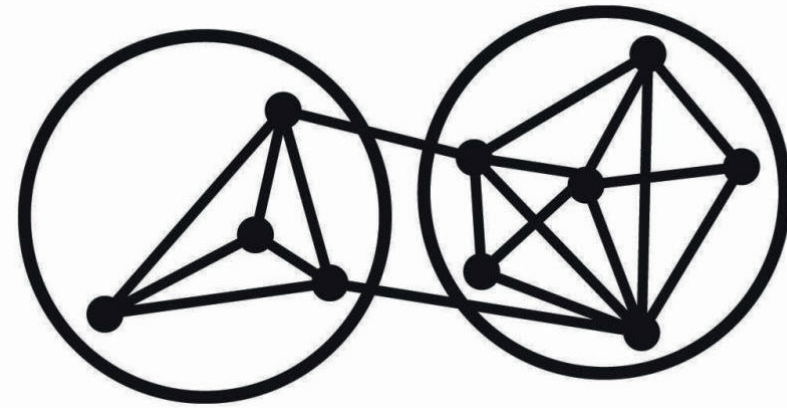


Imagen 10. Diagrama extraído de la portada de "Notes on Synthesis Forms" (1964) donde se realiza una abstracción de cómo los problemas de diseño pueden tener una serie de variables vinculadas o patrones que operan en subsistemas independientes. Fuente: <https://www.architectmagazine.com>

zando el proceso de ejecución y desarrollo de distintos *softwares* que se articulan a partir de la programación de diversas instrucciones con una lógica secuencial y orden correlativo determinado, con finita cantidad de pasos (Terzidis, 2003), descritos en tres partes:

- Entrada (*Begin/Input*)
- Proceso (*Processure*)
- Salida (*End/Output*).

Dichas partes conforman básicamente la geometría computacional para las acciones sean ejecutadas por los computadores a una alta velocidad y de manera eficiente (Johnsonbaugh, 1997). Para ello, están dotados de un seudo - código preciso y universal que permite el desarrollo de *softwares*, programados vía *scripting* (archivos de órdenes y procesamiento por lotes), que facilitan y potencian el proceso de diseño, al tener la capacidad de generar en tiempo real familias de soluciones con el simple

hecho de cambiar valores numéricos (parámetros), automatizando así, el proceso de creación, tras eliminar tareas repetitivas, en pos de la búsqueda de distintas alternativas para un mismo problema de diseño arquitectónico (Skiba, 2005).

Los algoritmos matemáticos poseen un potencial de adaptación, según la creatividad del diseñador y pueden dividirse en dos grandes sub - grupos (Dalla, 2015):

- Algoritmos Genéticos, concepto que John Holland, acuñó entre los años '60 y '70, de acuerdo a los postulados de evolución de Charles Darwin de 1859, un siglo más tarde, al realizar la analogía respecto al modo de fluctuación de la secuencia, que consiste básicamente en: selección - recombinación - inserción y mutación.
- Algoritmos Generativos, aquellos que dan un resultado en función de las variables y que implican realizar ciertas operaciones de evaluación, selección, comparación y transformación, que guardan estrecha relación con los sistemas de flujo de información.

A partir de las últimas décadas del siglo XX varias escuelas de arquitectura de vanguardia como SCI-ARC (*The Southern California Institute of Architecture*) y MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), entre otras que conceptualizaron el proceso de diseño y fabricación digital, al utilizar dos estrategias de ordenamiento de los datos: *Bottom-Up* y *Top-Down*.

El modelo *Bottom-Up* consiste en diseñar las partes individuales más pequeñas para ser ensambladas y así conformar agrupaciones de módulos que se entrelazan para componer un sistema completo. En cambio, la metodología *Top-Down*, cuyo uso es más común, se caracteriza por la visión global del sistema, decantando luego en el detalle de los elementos o partes que estructuran el sistema (Meredith, 2008).

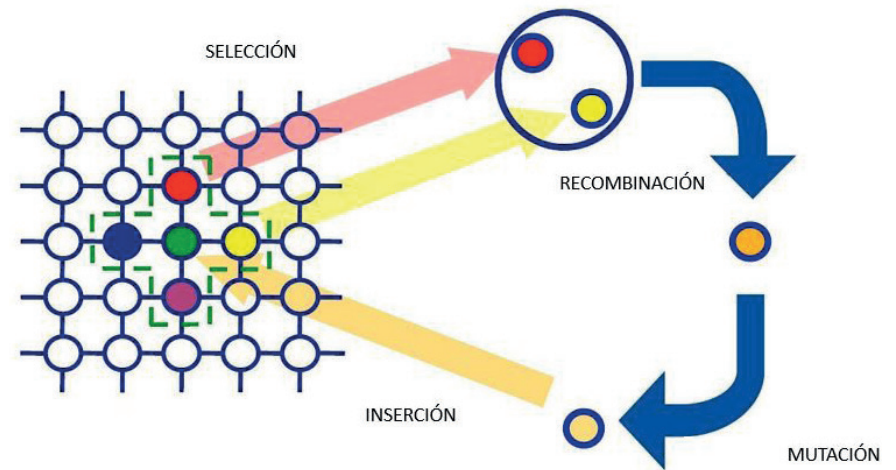


Imagen 11. Diagrama de Algoritmos Genéticos  
Fuente: [www.prodesignspain.com](http://www.prodesignspain.com)

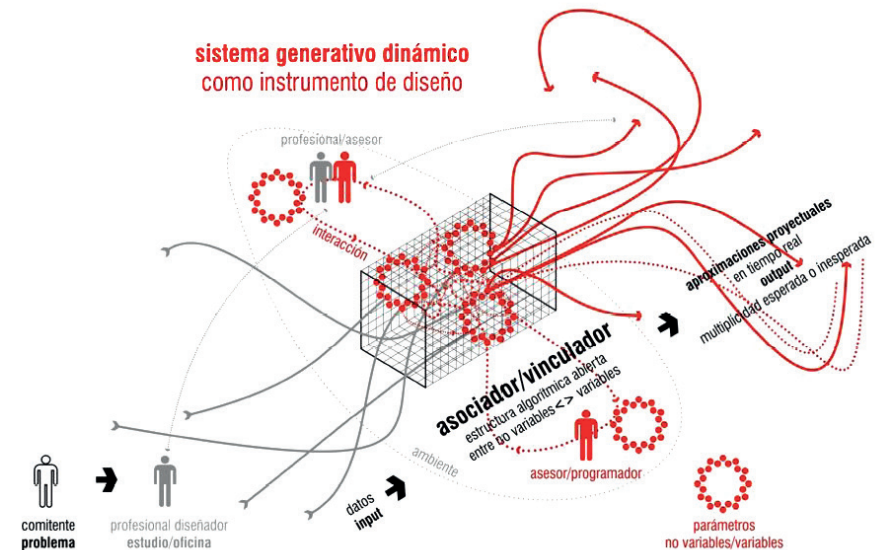


Imagen 12. Sistema de Algoritmos Generativos Dinámicos  
Fuente: Dalla Costa, M. (2015)

Los procesos de información se conectan unos con otros, son modificables, según los factores o parámetros que inciden en la secuencia algorítmica. Este último permite entender el diseño como un mapa genético donde se parte con una serie de datos o valores primitivos que se conectan, agrupan y entremezclan unos con otros aumentando el nivel de jerarquía estructural, en otras palabras, la información primaria evoluciona conforme se conecta con otros conjuntos de información para generar un nuevo conjunto de datos (De Landa, 2000).

Se trata de escribir un algoritmo o una serie de procesos que generan el último componente del sistema como resultado definitivo del diseño. Sin embargo ambas metodologías de carácter generativo poseen una característica asociada a los algoritmos genéticos, son de índole evolutivo, de imposible involución para optar a la recuperación de la información desechada, razón por la cual, el proceso de diseño se articula como una rama de posibilidades, cuya modelación virtual consiste en el planteamiento y simulación de distintos escenarios que implica que estos conjuntos tengan dinámicas de cambio no lineales (De Landa, 2000).

Según Landa (2011), las lógicas de razonamiento que operan detrás del diseño paramétrico que se desarrollan bajo la perspectiva de evolución darwinista son tres: razonamiento poblacional, intensivo y topológico:

La primera, se refiere al planteamiento de "comunidades reproductivas" o módulos replicables. La población de "individuos" o elementos, configuran la matriz bajo la que se fundamenta la forma de carácter progresivo y de propagación "genética", según los parámetros aplicados.

La segunda, tiene que ver con el proceso de diseño basado en las condicionantes que permiten la evolución de cada uno de sus componentes, considerando que éstos no serán capaces de evolucionar si estructural-

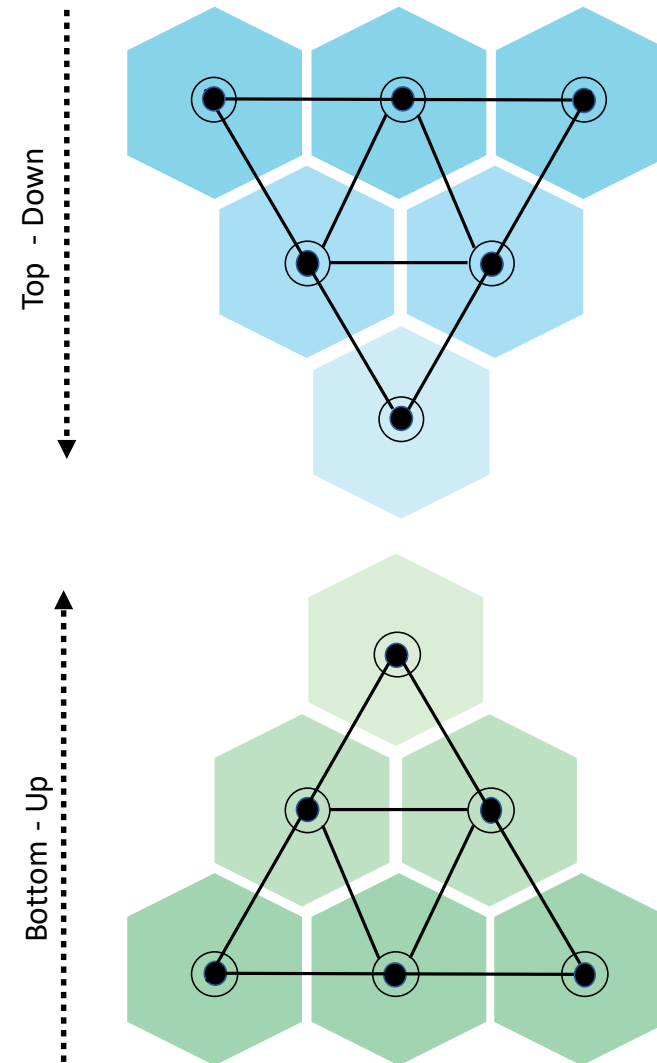


Imagen 13. Metodologías de Orden de la Información Top Down y Bottom Up  
Fuente: Elaboración propia, a partir de la revisión bibliográfica

mente no responden a determinadas variables de carácter vectorial, tales como cargas, esfuerzos o reacciones.

Finalmente, la tercera posee una conexión de datos abstractos en un sistema embrionario del que pueden surgir distintos organismos, según se combinen los factores, a partir de las mutaciones y transformaciones realizadas en las secuencias estructurantes del sistema y la conectividad entre sus partes que variarán en cada escenario de modelado.

Dicha lógica, junto a las estrategias de ordenamiento se traslucen en la manera de componer las formas paramétricas, en función de la relación entre la parte - todo, es decir, entre los componentes y la volumetría total del edificio, con las variantes de parámetros asociados de cada entidad, tales como largo, ancho, alto, diámetro, radio y otras propiedades geométricas, en virtud de los requerimientos y aspectos funcionales del diseño (Navarrete, 2014).

Según Buckminster Fuller (1975), en *"Pattern Integrity"*, cuando estas variantes se componen en forma contante y articulan módulos identificables dentro del sistema estructural, al repetirse de modo secuencial y duplicarse periódicamente sin cambios o modificaciones, configuran un conjunto de células o patrones básicos, denominados teselaciones o mosaicos, que se tornan más complejos al realizar transformaciones geométricas que afecten el orden, orientación y distribución mediante distintas rotaciones, reflexiones, simetrías, traslaciones y homotecias en los componentes que en suma, estructuran la piel paramétrica, que según Leonhard Euler, matemático alemán que introduce en el Siglo XVIII el término de función matemática, es posible de modelar y configurar a partir de tres elementos de patrones: líneas, vértices y áreas o trayectorias, cruces y aperturas, en sinergia (Edmondson, 2007).

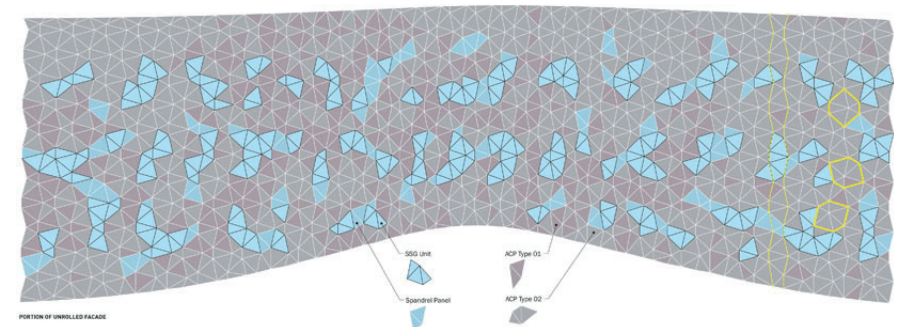


Imagen 14-16. Teselación Piel en Bergeron Centre for Engineering Excellence, NY, USA  
Fuente: Web ZAS Architects + Interiors

Según Navarrete (2014) tanto los patrones (módulos), algoritmos (secuencia de funciones) y parámetros (variables de medida), permiten explorar un lenguaje sistematizado y automatizado de los componentes de la forma a partir de la programación del proceso de diseño paramétrico.

Éste posee tres objetivos principales:

- Diseñar el proceso que permita explorar distintos resultados, teniendo en cuenta ciertos criterios de configuración, sin formas preestablecidas.
- Posibilitar relaciones entre variables y parámetros, para la manipulación de formas y comparación de resultados.
- Resultados paramétricos integrales de carácter responsivo o adaptables a las condiciones del contexto.

Teniendo en cuenta esto último, la parametrización ofrece la posibilidad de enfrentar el desafío de performance energética y sostenible, cuando se busca optimizar el diseño arquitectónico de los edificios, a partir de los procesos de creación, validación y uso de distintas herramientas informáticas (Cavieres, 2007) (Chiarella, Dalla Costa, Veizaga, Gronda, 2011) (Caldera, Silva y Loyola, 2013).

Por último es importante mencionar que para ello, es necesario definir las variables a evaluar del diseño arquitectónico, tales como: altura, distanciamientos, áreas mínimas - máximas, orientaciones, porcentaje de vanos, tamaños de elementos constructivos, entre otros, de modo tal que ante distintas soluciones, sean desechadas aquellas alternativas que no cumplan con los requerimientos mínimos establecidos para alcanzar un mayor rendimiento del edificio (Morales, 2012).

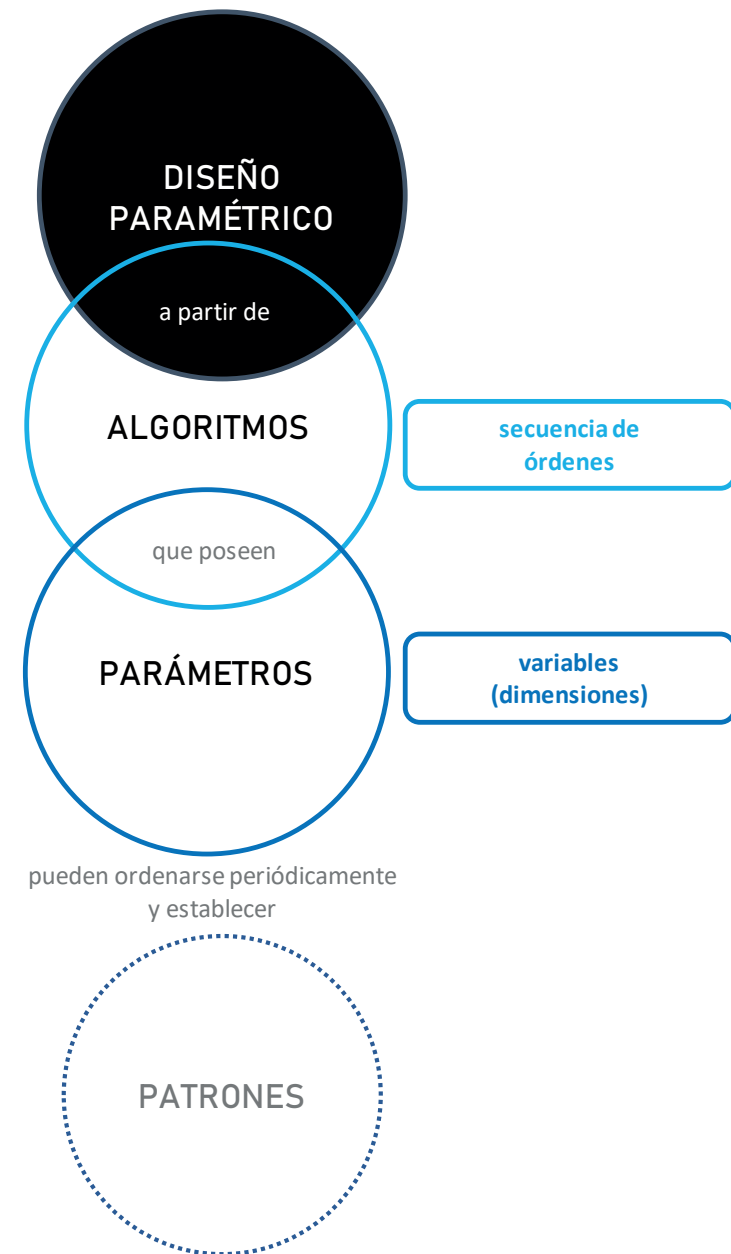


Imagen 17. Diagrama de relaciones entre conceptos; Fuente: Elaboración propia

## 2.2. Piel arquitectónicas: De la fachada al concepto de piel paramétrica

### Piel cinéticas, responsivas, adaptativas y biomiméticas

La arquitectura contemporánea se caracteriza por la tendencia al formalismo, expresionismo, tectónica de los materiales, uso de técnicas constructivas y la sustitución de la idea de fachada por la de piel o membrana exterior mediadora entre el edificio y su entorno que replantea la relación entre arquitectura - estructura - percepción; un espacio intermedio y de transición entre lo público y privado que posee flexibilidad, dinamismo, además de actuar como filtro protector y espacio conector con el mundo, gracias a la permeabilidad y a la transparencia que posee (Segura, 2012).

Cabe mencionar que la función protectora de la piel, que detiene y contiene, se basa en la capacidad inerte de la epidermis o capa exterior; la arquitectura sería una extensión de este espacio entrópico, lo que conforma el cuerpo interior, adentro del límite membranoso, en donde se vive y habita en máximo equilibrio (Lupton, 2002).

El concepto de piel posee cierta analogía orgánica, ya que igual que las membranas en los seres vivos, la envolvente es el órgano más extenso del cuerpo y regula los intercambios energéticos (luz, temperatura, sonido, presión), que al ser optimizados, permiten lograr un mejor desempeño en función de la aislación y el control de las condiciones climáticas adversas, contribuyendo con el confort y el consumo energético del edificio (Chávez, 2010) (Trovato, 2004) (Baixas, 2012).

Desde este punto de vista, la piel actúa como la primera barrera de adaptación del edificio que, en ocasiones requiere de soluciones complejas

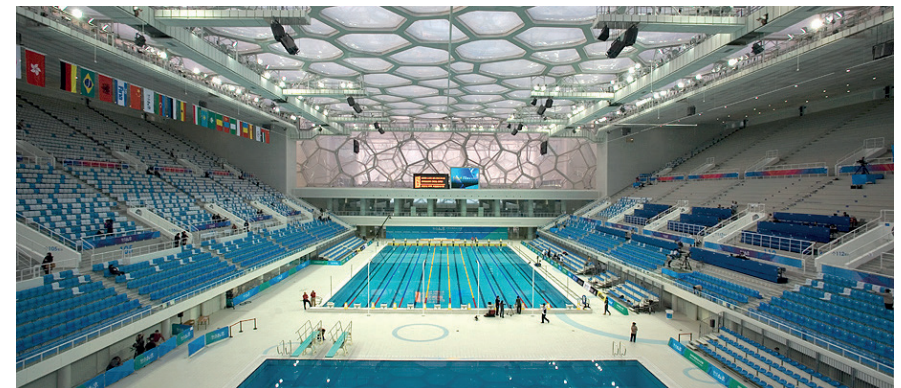
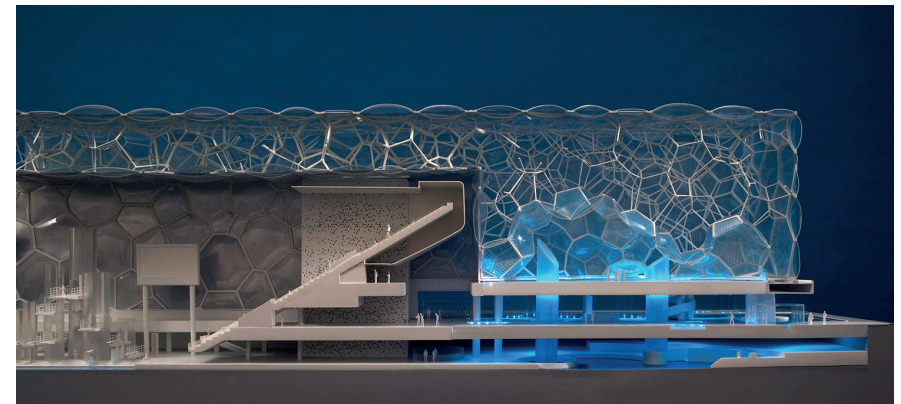
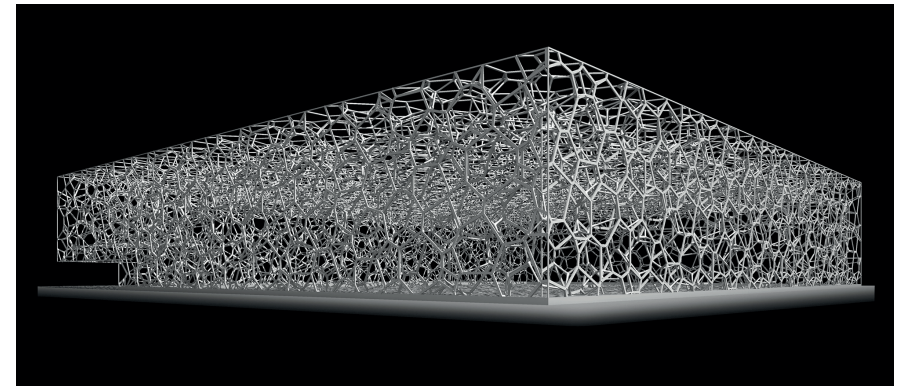


Imagen 18 - 20. Maqueta y obra Watercube Beijing, China  
Fuente: Web PTW Architects. (National Swimming Centre)

para resistir las fluctuaciones de temperatura y la captación de luz natural (Montaner, 1997).

La piel no sólo es un límite que separa dos zonas, es un espacio con espesor, peso y volumen en donde se atenuan, regulan e interactúan el afuera, el adentro y existen intercambios de energía, a modo de membrana activa e interactiva donde se equilibran en forma dinámica las condiciones del espacio interior y exterior, manteniendo el interior en un nivel de bienestar, convirtiéndolo en un espacio acogedor (Deleuze, 1969) (Lupton, 2002) (Segura, 2012).

Esta capacidad de autorregulación para mantener el equilibrio ante los cambios y las variaciones externas, en los organismos vivos, se le denomina "Homeostasis" y se le define al conjunto de procesos pasivos y activos que tienden a estabilizar la acción de los agentes externos, manteniendo constantes las condiciones internas y evitando desequilibrios en el sistema. Desde este punto de vista, el ser humano se mantiene dentro de un rango de tolerancia o confort interior gracias a la arquitectura que actúa como reguladora físico - ambiental de las condiciones climáticas del emplazamiento, a través de las propiedades que le confieren el diseño, la forma y las características de los materiales, que permiten aislar la humedad, controlar el exceso o carencia de la luz natural, de la radiación excesiva, protección del viento, de la lluvia y mitigar la contaminación acústica, entre otros agentes que en exposición directa entre el cuerpo y el medio externo, traerían consecuencias negativas para la salud y el bienestar del ser humano (Vidal, 2004).

Actualmente, existe especial preocupación por el calentamiento global, por el uso eficiente de recursos naturales, por el consumo de materiales, por los costos de uso y mantención de los edificios, por lo que en respuesta, las envolventes o pieles arquitectónicas han ido evolucionando,

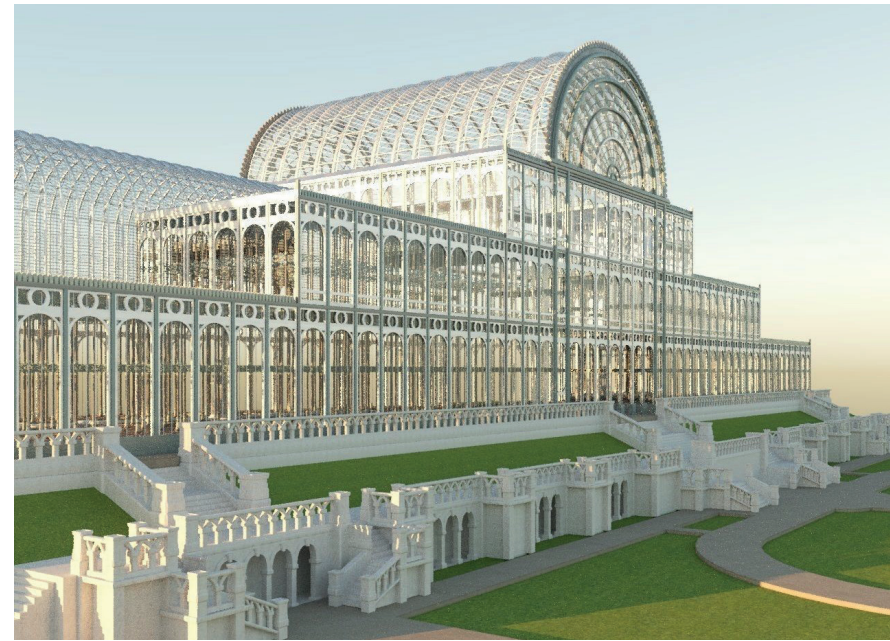


Imagen 21.  
Cristal Palace de Paxton, Londres.(1851)  
Fuente: [www.deviantart.com/Dupsko](http://www.deviantart.com/Dupsko)

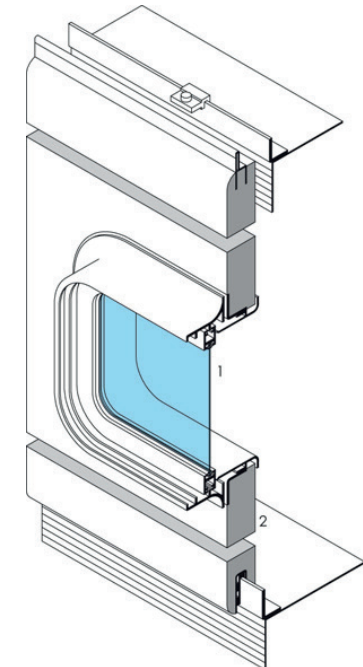


Imagen 22.  
Muro - cortina prefabricado con quiebrasoles de Jean Prouvé (1960)  
(1) Ventana vidrio simple  
(2) Panel de aluminio y espuma de poliuretano.  
Fuente: Juan Baixas (2012)



perfeccionándose para la captación y regulación de las condiciones ambientales adversas (Baixas, 2012).

En tiempos de la Revolución Industrial, se introdujo la prefabricación de materiales en serie, mejorando la precisión y rapidez de montaje de estructuras de grandes dimensiones con nuevos materiales: acero y vidrio que, otorgaban liviandad y transparencias a los edificios, como el Cristal Palace de Joseph Paxton en el año 1851. Un siglo más tarde, Le Corbusier implementó el sistema dominó o fachada libre, Jean Prouvé los primeros muros cortina prefabricados de alto desempeño energético al considerar los puentes térmicos, medidas de control solar y regulación de ventilaciones y Buckminster Fuller acuñó el término de sinergia (conjugación de funciones entre partes para conformar un todo que posee una única función) entre paneles prefabricados ligeros en las cúpulas geodésicas (Mateo, 2013).

Transcurrida la segunda mitad del Siglo XX, se masificó el parametricismo, como potencial herramienta que permite la generación de geometría compleja en envolventes a partir de la mutación de variables (Morales, 2012) y en paralelo se avanzó hacia el concepto de "piel inteligente" o "smart building" que consiste en la implementación de la tecnología, mediante la aplicación de distintos dispositivos electrónicos o sistemas de control lumínico, térmico, acústico que se accionan, ante alteraciones climáticas y en paralelo, "pieles biomiméticas" que buscan emular la naturaleza a partir de diseños biológicos que asemejan las pieles de animales, con el fin de regular los intercambios energéticos, entendiendo el edificio en su totalidad como un organismo viviente, algunas de ellas utilizan emplean altas tecnologías y softwares especializados; otras en cambio, sólo utilizan sistemas mecánicos que alteran algunas características en respuesta a las condiciones exteriores, razón por la cual también se les conoce como "pieles adaptativas o responsivas, tal es el caso del

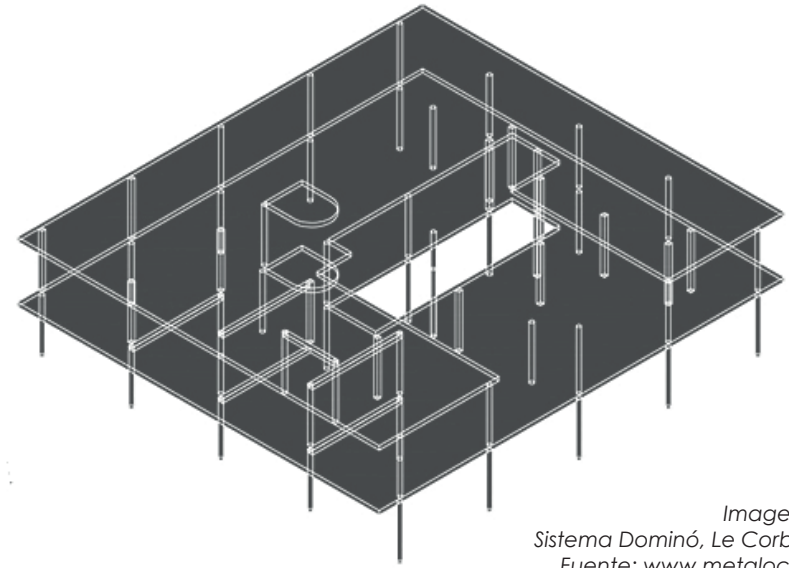


Imagen 23.  
Sistema Dominó, Le Corbusier  
Fuente: [www.metalocus.es](http://www.metalocus.es)



Imagen 24.  
Cúpula Geodésica, Biósfera de Montreal, Buckminster Fuller (1967)  
Fuente: [www.plataformaarquitectura.cl](http://www.plataformaarquitectura.cl)

IMA Instituto del Mundo Árabe de Jean Nouvel (1987) que gradúa las aperturas de las células fotoeléctricas de la piel que, operan similares a los diafragmas de las cámaras fotográficas, mediante el uso de sensores automatizados que se abren o cierran mediante estímulos de gradientes lumínicos y por último están las "pieles cinéticas o activas", cuando los cambios entre elementos involucran movimiento de alguna de sus partes (Ábalos y Herreros, 1988). Sin embargo:

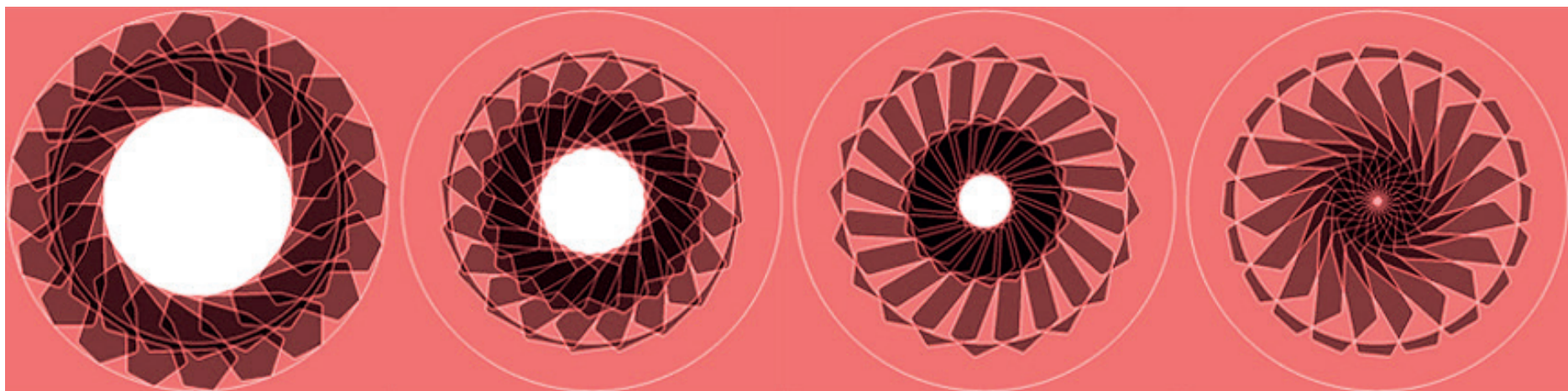
*"Cuanto más sofisticados son los mecanismos y sistemas, más compleja, especializada y costosa es su conservación y mantenimiento en buen uso; por lo que convierte, en nuestro país, a este tipo de "pieles inteligentes" en una "utopía" (Mateo, 2013)*

Esto último da cuenta de la problemática entre costo y beneficio de las pieles contemporáneas que tienen como desafío sustentable, procurar el bienestar del ser humano, respondiendo a las necesidades de confort

y calidad interior de los espacios, siendo rentables y sostenibles en el tiempo. Es por ésto, que para equiparar estos factores sería recomendable complementar el proceso de diseño paramétrico con el ACV (Análisis de Ciclo de Vida) de los edificios, considerando no sólo las etapas de fabricación, construcción, sino también las etapas de uso, mantención y demolición, que podría abordarse a partir de la planificación de la obra en softwares de metodología *BIM (Building Information Modeling)*, tras efectuar distintos análisis con el modelo virtual y las bases de datos integradamente asociadas al edificio, considerando la interoperabilidad y formatos neutrales disponibles para el intercambio de información entre aplicaciones IFC o XML (Cavieres, 2007).

Cabe señalar que, sea cual sea la tipología de las pieles aplicadas en los edificios es de suma importancia tener en cuenta algunos criterios de diseño básicos y fundamentales para alcanzar el confort y reducir el consumo energético respecto al lugar en el que éstos se emplazan.

*Imagen 25. Apertura de las células fotoeléctricas del IMA, Jean Nouvel (1987)  
Fuente: www.jeannouvel.com*



Según Baixas (2012) se debe considerar que:

“Las envolventes para climas fríos se han de desarrollar acentuando la aislación, la hermeticidad y la captación de radiación solar directa e indirecta. [...] En climas de grandes fluctuaciones térmicas, considerar masas acumuladoras de inercia térmica. [...] En climas templados y con altos niveles de radiación solar el acento debería, en cambio, estar puesto en la generación de sombra y ventilación. La radiación solar directa en los recintos debería evitarse en épocas calurosas, al tiempo que debería aprovecharse usando mecanismos de acumulación y devolución de energía al sistema [...] evitando recurrir a equipos mecanizados de alto consumo. [...]

De la cita anterior se infiere que deben reconocerse las condiciones climáticas, la orientación, la incidencia de los sistemas constructivos y las propiedades de los materiales, que incidirán en la "captación, transmisión y distribución de la radiación solar directa e indirecta al interior de los recintos", para aprovechar así, las condiciones del entorno y obtener un mejor acondicionamiento interior (Vidal, 2004).

Finalmente, es importante mencionar que actualmente en Chile, los consumos de "electricidad bordean los 120 kWh/ m<sup>2</sup>, mientras que en el extranjero es posible llegar a los 10 kWh/ m<sup>2</sup>, al año", vale decir, en nuestro país este consumo es doce veces superior. Haciendo hincapié en estas cifras, sin lugar a dudas, se hace necesario evolucionar respecto al aprovechamiento de luz natural, sobretudo en campos aún desconocidos como lo es la configuración de pieles paramétricas, para que se consideren las "distintas orientaciones y condiciones de luz - sombra", entre otros factores que permitan alcanzar el confort lumínico y visual adecuado, sin riesgo de sufrir deslumbramientos excesivos (Baixas, 2012).

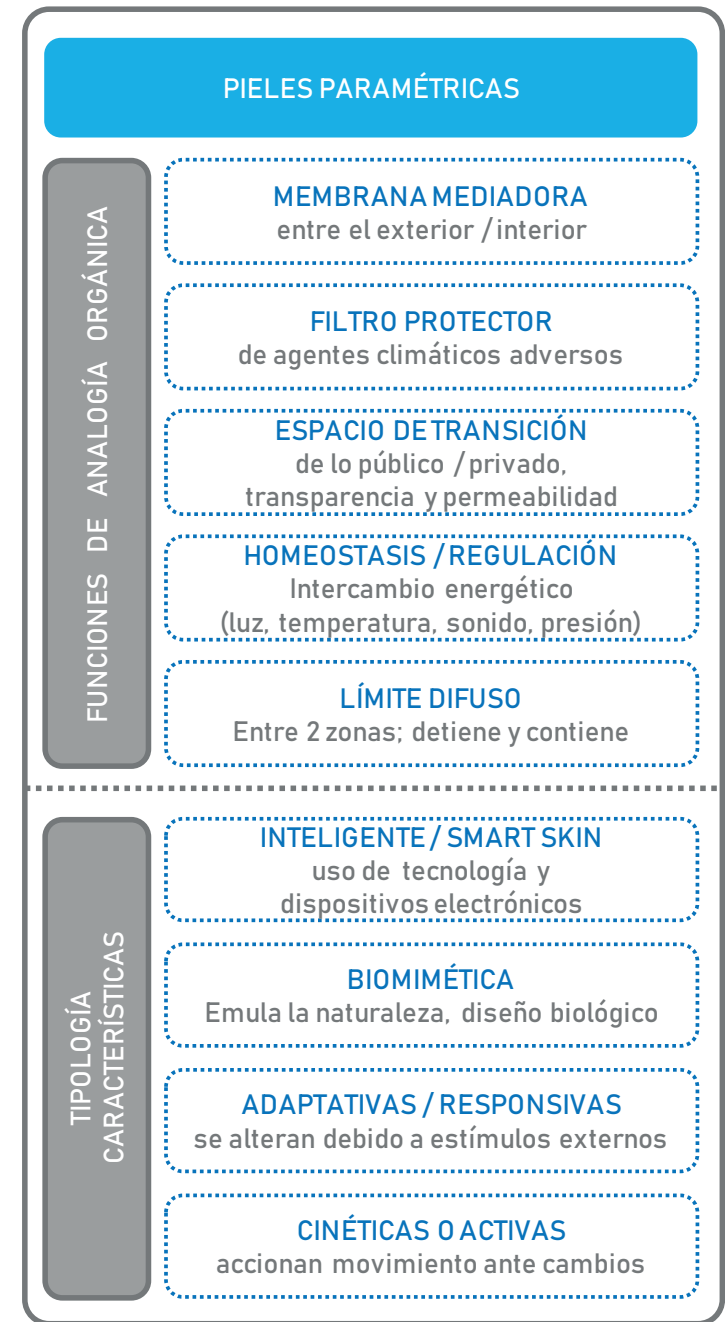


Imagen 26.  
Funciones y  
Tipos de Pieles  
Paramétricas  
Fuente:  
Elaboración  
propia

## 2.3. Desde la Geometría Clásica al paramétrico

La geometría es una de las principales herramientas de diseño y análisis de la arquitectura, ya que con ella se delimita, se precisa y se conforma el espacio. La selección del tipo de volumetría a utilizar debería surgir del estudio de las necesidades y de los requerimientos de resistencia del edificio, ya que la técnica constructiva - estructura estarán supeditadas a ella, sin embargo, no deben dejarse de lado la estética formal y percepción (Sanchis, 2012).

Según Millais (1997) existen dos tipos de geometría, orgánica y definida, de acuerdo al resultado formal y capacidad de representación:

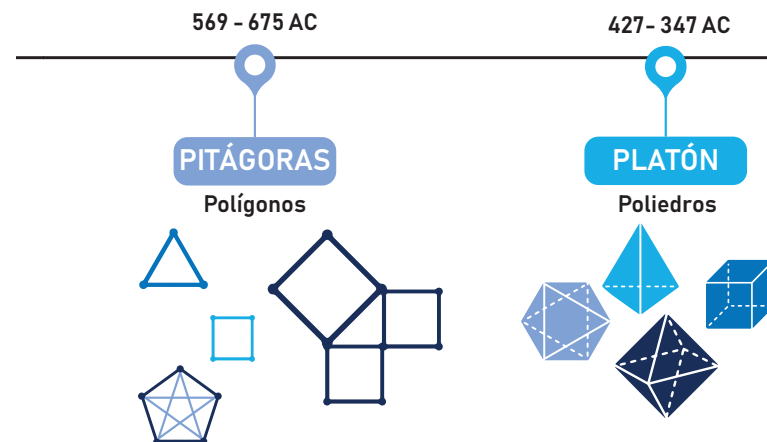
“La Geometría Orgánica, es aquella que no tiene base matemática y que habitualmente provienen de formas de la naturaleza. En cambio, la Geometría Definida, es aquella cuya forma se puede expresar matemáticamente. Serían geometrías definidas los cuadrados, círculos, elipses, parábolas, cilindros, esferas, paraboloides, entre otras”.

La primera, implica modelar formas irregulares, haciendo prototipos o maquetas, como si se realizara una escultura difícil de representar a través de programas. La segunda, corresponde a formas regulares, que no surgen de la experimentación, sino más bien de la utilización de la lógica matemática, que hace posible prever el comportamiento estructural de estos volúmenes (Sanchis, 2012). Las formas tal y como las conocemos se pueden representar y modelar a partir de las contribuciones de los griegos del período clásico. En particular, del matemático griego Euclides (325 A.C. - 265 A. C.), quien en su texto *"Los Elementos"* dividido en 13 libros, compuso un cuerpo geométrico sistemático que contenía

nociones de Thales, Pitágoras, Arquímedes, Platón, Hipócrates, Eudoxo y Demócrito, con el fin de realizar distintos postulados a partir de axiomas (proposiciones lógicas y evidentes que no necesitan comprobación) sobre la representación gráfica del mundo (Heath, 2017).

- Del I-IV establece proposiciones de geometría plana: Conceptos asociados a Thales, Pitágoras y Arquímedes: punto, línea, recta con sus respectivas propiedades (intersección, paralela, secante, tangente, perpendicular), ángulo, figura plana, diagonales, diámetro, radio, segmentos, bisectriz, mediatriz y triángulo áureo.
- Del V-X establece proposiciones sobre las razones y proporciones: Conceptos asociados a Eudoxo e Hipócrates: igualdad, desigualdad, semejanzas: "mayor que", "menor que".
- Del XI-XIII establece proposiciones sobre los cuerpos sólidos: Conceptos asociados a Platón y Demócrito: paralelogramos, polígonos, poliedros y sus respectivas magnitudes -longitudes, áreas, volúmenes- y

Imagen 27. Línea de Tiempo con los hitos principales de la geometría  
Fuente: Elaboración propia a partir de Google Images.



elementos que los componen vértices, aristas y caras), además del concepto de planos ortogonales y no ortogonales.

Más tarde el matemático griego Apolonio de Perga (262 A.C. - 190 A.C.) establecería en su texto "*Las Cónicas*", compuesto por 8 libros, en las que da cuenta de las relaciones entre el cono y sus secciones cónicas: circunferencia, parábola, elipse e hipérbolas, para las cuales estableció las respectivas ecuaciones para cada una de estas curvas (Heath, 2015).

Estos libros tratan de:

- I: El cono y sus propiedades (generatriz e intersección con el plano).
- II: Ejes, diámetros conjugados y tangentes.
- III. Elementos (foco, polo-polar) y lugar geométrico entre 3 rectas.
- IV: Construcción de las secciones cónicas e intersecciones.
- V: Segmentos máximos y mínimos.
- VI: Igualdad y semejanza de cónicas.
- VII: Longitudes y diámetros conjugados.
- VIII: Apéndice.

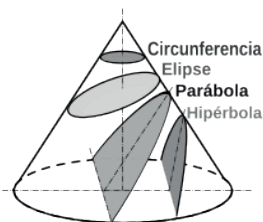
Transcurridos varios siglos, en el Renacimiento volvieron a utilizarse con gran apogeo las propiedades geométricas, con el fin de representar gráficamente la realidad tridimensional con máxima perfección; grandes personajes como Miguel Ángel y Leonardo Da Vinci realizaron grandes aportes en la arquitectura y las artes en general, pero sin duda, las más importantes, según Kemp (2000), fueron las realizadas por:

- Filippo Brunelleschi (1377 - 1446), quien fue el padre de la Perspectiva Lineal que conceptualizó 3 elementos principales: línea del horizonte, puntos de fuga y líneas de fuga, utilizando el método de una tabla transparente para realizar el trazado de un objeto y posteriormente estudiando las propiedades implicadas, considerando la distancia al observador.
- Battista Alberti (1404 - 1472), quien fue el padre de la Sección Proyectiva, definiendo el espacio proyectivo y afín, a través del experimento conocido como el "Velo de Alberti" a partir de la intersección de dos planos: vertical - horizontal y utilizando transparencias y espejos, proyecta los objetos al plano de dibujo.

569- 475 AC

**APOLONIO DE PERGA**

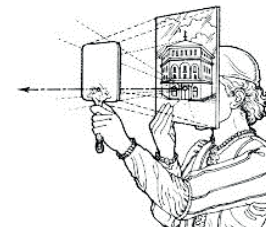
Cónicas



1377 - 1446

**FILIPPO BRUNESLLESCHI**

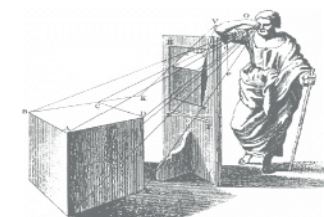
Perspectiva Lineal



1404 - 1472

**BATTISTA ALBERTI**

Sección Proyectiva



Ambos, Brunelleschi y Alberti, serían la base para que Girard Desargües (1591 - 1661), en el Siglo XVIII profundizará en las Transformaciones Proyectivas (homología, afinidad, homotecia y traslación) y la Proyección Cónica con la invención conceptual de los puntos y rectas al infinito que cortan curvas cónicas (Desargües y Boose, 1643).

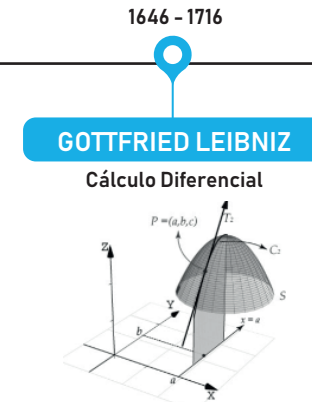
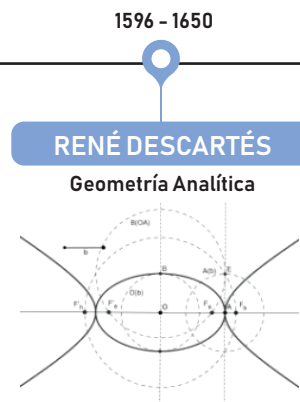
Años más tarde, en el Siglo XVII, René Descartes (1596 - 1650), fue quien asentaría las bases de la Geometría Analítica, posicionando los objetos en el espacio, a través de la creación de un sistema de coordenadas bidimensionales que llevan actualmente su apellido, cartesianas; y con ello las Funciones Geométricas, a partir de la expresión  $F_{(x,y)} = 0$ , que relaciona las dos variables continuas: abscisa ( $x$ ) y ordenada ( $y$ ) a través de  $f$ : función (Descartes, 1886).

Esto conllevó a un cambio de paradigma respecto a la forma de entender la geometría, que pasó desde una lógica deductiva - empírica a una estructura totalmente algebraica que abandonó los axiomas y postulados de los griegos (Coexeter, 1971).

Según Leibold (1998), Gottfried Leibniz, Leonard Euler y Gaspard Monge fueron quienes siguieron profundizando respecto a las funciones y la representación geométrica de éstas, en distintos aspectos:

- Gottfried Leibniz (1646 - 1716), se consolidó como el padre del Cálculo Infinitesimal y Cálculo Diferencial, el primero, tiene como fin el desarrollo de operaciones matemáticas con cantidades infinitamente pequeñas, mientras que el segundo, se preocupa de los cambios producidos por la variación de las variables en las funciones matemáticas. Leibniz, con ello, introdujo los siguientes conceptos:

Función compuesta: Aplicación sucesiva de dos o más funciones;  $(f \circ g)_{(x)}$   
 Límites: Aproximación hacia un punto concreto de una sucesión o una función en la medida que los parámetros se acercan a un determinado valor;  $\text{Lím}(f)_{(x)}$ , lo que otorgó la noción de continuidad entre funciones.  
 Derivadas: Pendiente de la recta tangente a la curva;  $dy/dx$   
 Integrales: Área limitada bajo la curva generada por una función  $\int f(x) dx$   
 Series Infinitas: Representación de las funciones como sumas infinitas;  $S_n$ .



- Leonhard Euler (1707 - 1783), se consolidó como padre de la Geometría Diferencial, utilizando teorías de cálculo del álgebra multilineal aplicándolas a las distintas curvas y a las superficies conocidas. Además fue uno de los precursores del Cálculo Infinitesimal, a través de la representación gráfica del cálculo diferencial e integral y en paralelo, desarrolló la Teoría de Conjuntos o Elementos, utilizando el Diagrama de Venn para demostrar las relaciones existentes entre los conjuntos (Coexeter, 1971).

Además definió la constante o número real e, la que es aproximadamente equivalente a 2.72, que puede ser representado como una serie infinita, un producto infinito  $2,71828182845904523536$ , como una fracción continua  $1 + 1/1 + 1/1x2 + 1/1x2x3 + 1/1x2x3x4 + n$ , o como el límite de una sucesión  $\lim_{n \rightarrow \infty} (1+1/n)$  y finalmente, descubrió la función exponencial y logarítmica a partir del estudio analítico de las sucesiones de potencias, tanto para números enteros, complejos e imaginarios, hallando la relación existente con las funciones trigonométricas a partir del número  $\varphi$  y Fórmula de Euler, que lleva su nombre (Coexeter, 1971).

- Gaspard Monge (1746 - 1818), profundizó las ideas de Alberti y se convirtió en el padre de la Geometría Descriptiva, al crear la Perspectiva Cónica o Sistema Diédrico, que consiste en el método de representación tridimensional en un plano, utilizando una proyección ortogonal de un objeto respecto a dos planos que se cortan perpendicularmente (Coexeter, 1971).

Finalmente, fue el matemático alemán Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855) quien complejizó las teorías del espacio. Hasta ese entonces la Geometría Diferencial analizaba matemáticamente aspectos básicos de la geometría, utilizando variables diferenciales propias del Álgebra Multilineal, pero Gauss avanzó hacia una geometría que analiza el espacio, las curvas y las superficies (Coexeter, 1942) (Lehmann y Sors, 1953) (Parker, 1963) (Gray, 1989) (Greenberg, 1994) (Gardner, 2001) (Pottmann, 2007) (Martínez, 2016), utilizando conocimientos de Cartografía y Geodesia, al introducir la idea de curvatura de una recta y de una superficie, bajo el concepto de "Línea Geodésica o mínima longitud que une dos puntos contenidos en la superficie de la tierra fijada en punto y dirección

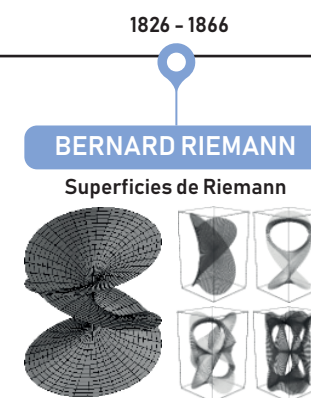
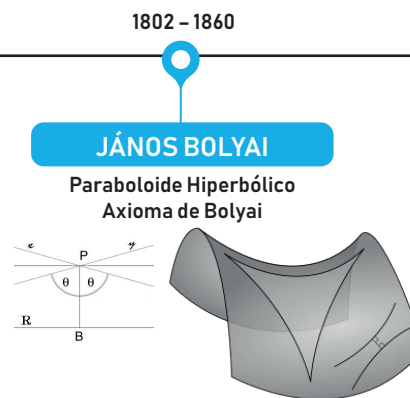


de ésta", dando paso a la Geometría Descriptiva, que más tarde sería la base de las teorías de Geometría Hiperbólica de dos autores que, de manera independiente y en tiempos de la Ilustración negarían el postulado de rectas paralelas de Euclides: el matemático ruso Nikolái Lobatscheski (1792 - 1856) y el matemático húngaro János Bolyai (1802 - 1860), que definieron las paralelas como rectas concurrentes que se intersectan en el centro de la tierra y con ello, dieron origen a teorías más complejas, tales como, las Superficies Cuadráticas, Cálculo Tensorial de Vectores y formas 4D, conocidas más habitualmente como Hiperboloides, Paraboloides Elípticos e Hiperbólicos o bajo los conceptos de superficies regladas o de malla, de generación cilíndrica, de generación cónica, alabeadas y superficies de revolución (Coexeter, 1942) (Lehmann y Sors, 1953) (Parker, 1963) (Gray, 1989) (Greenberg, 1994) (Gardner, 2001) (Pottmann, 2007) (Martínez, 2016).

Años más tarde, Bernhard Riemann (1826 - 1866) se convertiría en el padre de la Geometría Elíptica, al negar al igual que Lobatscheski y Bolyai los postulados de rectas paralelas de Euclides. Se le conoce como el

padre de las Integrales, tras señalar en la Teoría Fundamental del Cálculo que, las derivadas e integrales son funciones inversas, definiéndolas en intervalos o conjunto finito de números reales; de este modo, cualquier función, sea continua o discontinua es integrable, pudiendo particionarse el área bajo la curva en rectángulos sucesivos que representan un subconjunto de integrales dentro de otra integral primitiva u original, vale decir, integrando las sucesivas derivadas de las funciones compuestas de Leibniz, a lo que se le conoce como Regla de la Cadena o Teorema fundamental del cálculo infinitesimal (Lee, 1950) (Farkas y Kra, 1980) (Wald, 1984).

Riemann profundizó además, en el concepto de Curvatura Espacio - Tiempo, tomando como referencia las líneas geodésicas de Gauss y el Cálculo Tensorial de Vectores de Lobatscheski - Bolyai, acuñando con ello término de Tensor de Curvatura y las Superficies de Riemann (parabólicas, hiperbólicas, elípticas y de revolución), así como también, las Superficies Torsionadas, utilizando biholomorfismos o funciones de una o más variables complejas. Se le considera además, el padre de la Proyección





Geodesica a partir del concepto de esfera de Riemann, al añadir un plano complejo que la cubre y la proyecta, incorporando un punto al infinito. Creó también, la Función Zeta de Riemann que distribuye y posiciona a los números primos en el espacio) (Titchmarsh, 1986) (Jost, 2002) (Mercat, 2008).

Ya en el período contemporáneo, transcurrida la segunda mitad del Siglo XIX, el matemático alemán Félix Klein (1849 - 1925), fusionó la Geometría Euclidiana (polígonos y poliedros regulares) y No - Euclidiana (curvas y volumetrías irregulares) en su memoria Programa Erlangen, instaurando con ella un nuevo concepto: el de grupo o conjunto definido por una operación, asociándolas a distintas transformaciones geométricas que poseen procesos invariantes y variables, básicas y complejas, en torno a una secuencia de pasos, que determinan, a su vez, la existencia de elementos neutros y sub-agrupaciones, definidas por funciones matemáticas y asentando las bases del Parametricismo. Incorporó además, el sistema de puntos de control en curvas (Farin, Hoschek y Kim, 2002) (Lyche y Mørken, 2005) (Mortenson, 2006) (Galdames, 2011).

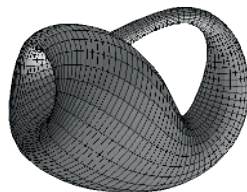
Sin embargo, fue el ingeniero francés Pierre Bézier (1910 - 1999), quien generó las curvas y superficies de bézier (*B-Splines*), a través de funciones lineales, cuadráticas y cúbicas, para deformarlas mediante puntos de control anexos o de interpolación, con el fin de utilizarlas en el software *Unisurf CAD* (1967-8), el cual programó para el diseño de automóviles de la marca francesa *Renault*, dejando de lado los bocetos con plantillas *burmester*, una técnica utilizada hasta ese entonces bastante lenta y poco eficiente a la hora de hacer modificaciones sobre los trazados y bocetos originales aplicados a los diseños de curvas (Farin, Hoschek y Kim, 2002) (Lyche y Mørken, 2005).

Bézier, mediante el *software* que diseñó dió paso a los diseños paramétricos y digitales, que utilizan un *Post-cripting* o "sistema de códigos informáticos para ejecutar las distintas operaciones", aplicado en distintos programas de diseño arquitectónico e industrial de trazado 2D y modelado 3D, tras fundar las bases de la realización de las curvas conocidas como *Non - Uniform Rational B - Spline* o *NURBS* para generar formas más orgánicas y complejas (Mortenson, 2006) (Galdames, 2011).

1849 - 1925

FÉLIX KLEIN

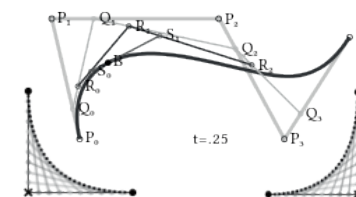
Botella de Klein



1910 - 1999

PIERRE BÉZIER

Curvas de Bézier



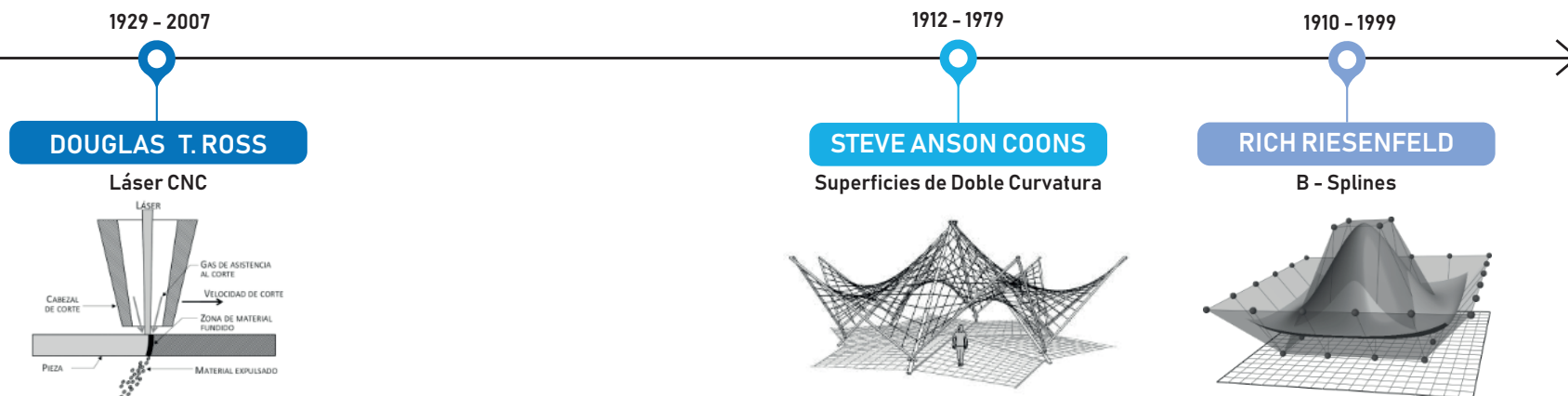
En paralelo, en el año 1967, el científico Douglas T. Ross (1929 - 2007) con motivo de su tesis doctoral en el MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) optimizó el lenguaje compilador de John T. Parsons (1952) para las primeras máquinas de control remoto numérico CNC (*Control Numeric Computer*) implementando funciones matemáticas que eran graficadas en la pantalla de la computadora Whirlwind I del laboratorio, una máquina de control analógico desarrollada por Norbert Wiener, con un brazo de precisión de corte y grabado, apto para trazar curvas al rotar el eje, bajo la acción de radar y ejecutando los datos ingresados. Ross, además, fue quien acuñó el término CAD (*Computer - Aided Design*) y mediante su contribución es considerado el padre de las herramientas APT (*Automatic Programming Tools*) (Ross, 1958).

Posteriormente, Steve Anson Coons (1912 - 1979) en su investigación "*Analytic Method for Calculations of the Contours of Double Curved Surfaces*" (Método analítico para cálculos de los contornos de superficies con doble curvatura), generó una serie de polinomios para programar

las superficies de Bézier, segmentándolas en partes (*segment patches*) o agrupándose (operación inversa) a partir de funciones de fusión (*blending functions*), para potenciar la exploración geométrica al brindar la posibilidad de generar distintas formas más complejas a partir del sistema de puntos de control o puntos críticos (Roger, 2001) (Mortenson, 2006).

Más tarde, Rich Riesenfeld (1910 - 1999) en 1974, amplió el concepto de *B-Splines* de Bézier, utilizando parámetros del conjunto de los números racionales y a lo que les denominó *NURBS* (*Non - Uniform Rational B - Spline*) en programas CAD/CAM (*Computer Aided Design / Computer-Aided Manufacturing*) que permitió representar formas geométricas analíticas (cónicas, cuadrículas, superficies de revolución, superficies torsionadas, entre otras), curvas y superficies libres, sometiéndolas a distintas secuencias de procedimientos o algoritmos otorgando gran flexibilidad al diseño de un modo razonablemente rápido (Piegl, 1998) (Chen, Cohen y Riesenfeld, 2006).

Imagen 27. Línea de Tiempo con los hitos principales de la geometría  
Fuente: Elaboración propia a partir de Google Images



Finalmente, el ingeniero Aristides A.G. Requicha (1939 - ) introdujo el concepto de *B-Reps (Boundary Representation)* que consiste en la formación de un sólido a partir de los límites físicos de otro cuerpo que lo envuelve, deformándolo mediante los puntos de control del volumen auxiliar y a utilización de técnicas CGS (*Constructive Solid Geometry*) o construcción de cuerpos sólidos a partir de transformaciones geométricas booleanas u operaciones de conjuntos, tales como fusiones de uno o más , intersecciones entre cuerpos geométricos y sustracciones de masa con volúmenes auxiliares (Requicha, 1992) (Mortenson, 2006).

Sin lugar a dudas, la geometría y las técnicas avanzaron conforme al análisis de espacio para satisfacer las necesidades de representación y expresión gráfica del mundo, permitiendo así, evolucionar en la configuración espacial de la arquitectura y el desarrollo proyectual de las ideas que, combinados con los avances de la era tecnológica-digital, permitió complacer los requerimientos en términos de tiempo y agilidad para realizar ciertas modificaciones en los trazados de diseño originales (Rivero, 2017).

Sin embargo, la geometría y la informática, fueron originalmente relacionadas recién en el año 1975, en la Tesis Doctoral del matemático estadounidense, Michael Ian Shamos (1947-), quien acuñó el término "Geometría Computacional", al fusionar la lógica computacional y la lógica matemática, ligada al uso de algoritmos y parámetros para la resolución de problemas geométricos, según tipologías de: inclusión, intersección y distanciamientos (puntos, segmentos, polígonos y poliedros), utilizando conceptos de la geometría clásica, la topología, la teoría de grafos, la teoría de conjuntos y el álgebra lineal (O'Rourke, 1997).

Por consiguiente, este hecho en particular, fue un aporte trascendental para establecer la sistematización del diseño con base algebraica (fun-

ciones y variables) al ser aplicada posteriormente en programas de diseño y modelación asistida por ordenador CAD/CAM (*Computer Aided Design / Computer-Aided Manufacturing*) para la creación de objetos bi y tridimensionales (Shamos, 1978).

Cabe mencionar que años más tarde, en 1979, el informático danés, Bjarne Stroustrup (1950- ) creó C++, orientado a la creación de objetos con una sintaxis estructurada, genérica y secuenciada; años más tarde, en 1991, Guido Van Rossum (1956- ), creó *Python*, más legible y de mejor interfaz gráfica; y posteriormente, en el año 2000, *Microsoft*, como parte de su plataforma *.NET*, desarrolló C# (*C Sharp*), siendo estos tres lenguajes de programación los más comúnmente utilizados en la actualidad para la creación y desarrollo de distintos *softwares* AAD (*Algorithmic Aided Design* - Diseño asistido por algoritmos) (Brunet y Barceló, 2003).

En la actualidad, todos los conocimientos en términos de geometría aquí mencionados son utilizados en los *softwares* CAD/CAM/AAD (*Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing / Algorithmic Aided Design*), los cuales se han convertido en herramientas bastante útiles en las instancias de diseño conceptual, analítico, detallado, de planificación de la obra, gestión de mantenimiento y evaluaciones post-ocupacionales o de funcionamiento de los edificios.

Más adelante, en el presente documento se realizara una sinopsis de los *softwares* más utilizados, difundidos y reconocidos en la temática abordada en esta tesis, es decir, se describirán algunos *softwares* de modelamiento AAD (*Algorithmic Aided Design*), con sus correspondientes *plug-ins* de análisis lumínico, señalando las distintas funcionalidades y destrezas de cada uno para mayor conocimiento del campo, a nivel de modelamiento, análisis y representación paramétrica.

## 2.4. Manifiesto Parametricista: entre formalismo y estilo

En el marco de la 11° Bienal de Venecia, Patrick Schumacher, quien había trabajado desde 1990 en el estudio "Zaha Hadid Architects" (ZHA), presentó el *Parametricist Manifesto* (Manifiesto parametricista); en él estableció los conceptos y bases de esta tendencia arquitectónica contemporánea, declarando, en términos generales que la arquitectura "se encuentra en un ciclo continuo de adaptación innovadora en respuesta a una sociedad heterogénea que demanda un mayor nivel de complejidad articulada, mediante sistemas paramétricos" (Schumacher, 2008) que implica que "todos los elementos y composiciones estén sujetos a una modulación a partir de variables" (Schumacher, 2015) que permiten concebir un "plan general de construcción - genotipo - para la generación de múltiples versiones - fenotipo - a través de componentes generativos" que, son ajustados en relación a forma y tamaño en forma individual e interdependiente de otros elementos del sistema, por lo que, cada propiedad de éstos, está sujeta a "variaciones paramétricas y/o deformaciones topológicas" (Schumacher, 2014).

La metodología de diseño paramétrico, conforma un estilo contemporáneo de vanguardia - Parametricismo - posterior al Postmodernismo y Deconstructivismo, que fueron períodos antecesores que marcaron el comienzo de este estilo caracterizado por la "exploración creativa", definiendo estilo como "programas de investigación de diseño" con reglas metodológicas que, requieren de la "alternancia entre estos períodos de avance y transición" para poder generar "programas de innovación" que aborda los "problemas y tareas de diseño" con un "núcleo duro de principios, una forma característica y reglas metodológicas distintas" que permitieron el traspaso hacia una nueva era (Schumacher, 2008).

Según Schumacher, los estilos contemplan disciplinas metodológicas, según los "caminos a evitar o caminos a seguir" o "heurística negativa y positiva", respectivamente, aportando ambas a atributos formales y funcionales. La primera, heurística negativa, representa todo lo contradictorio al estilo, mientras que la segunda, heurística positiva, se refiere a todo aquello que lo promueve y caracteriza (Schumacher, 2008).

Particularmente, en el caso del parametricismo, la heurística negativa contempla las tipologías platónicas, las líneas rectas, los ángulos rectos, las esquinas y articulaciones poco elaboradas; mientras que la heurística positiva, las deformaciones, *splines*, *nurbs*, componentes generativos, *scripting*, lo híbrido e inter-articulado (Schumacher, 2008).

Sin embargo, el diseño paramétrico es aplicable a todo estilo arquitectónico (Schumacher, 2014), al momento de formular y ejecutar las correlaciones entre los elementos y subsistemas (Schumacher, 2008) con el propósito de intensificar las "interdependencias internas del proyecto arquitectónico y las afiliaciones externas del contexto", permitiendo así, la adaptación del edificio con el entorno (Schumacher, 2014). En otras palabras, es compatible con toda arquitectura que requiera ciertos avances tecnológicos, relacionados con ingeniería estructural, además de criterios ambientales posibles de parametrizar con el fin de optimizar el diseño mediante análisis computacional (Schumacher, 2015).

Desde este punto de vista, el parametricismo se establece una metodología proyectual, basado en las "relaciones de diferenciación y correlación", a partir de una estructura de "componentes adaptativos" que varían según los criterios o el goce estético del diseñador, confiriéndole un "carácter evolutivo y orgánico como la vida", al potenciar el desarrollo de geometrías más complejas, dinámicas y generativas que imitan a la naturaleza al producir "múltiples fenotipos a partir de un solo genotipo

que se adapta a diversas condiciones ambientales" (Schumacher, 2015).

Cada estilo tiene un núcleo duro de principios y el parametricismo no es la excepción, desde 1990 el lema clave de éste radica en la "diferenciación continua y la complejidad organizada". Dicha diferenciación no alude solamente al ajuste geométrico de la forma, sino que también considera los parámetros de rendimiento estructural y ambiental, tales como la exposición solar y las cargas de viento, configurando por ejemplo, la abertura u orientación de paneles de la envolvente, uniones más resistentes o flexibles según los requerimientos, formas aerodinámicas, u otros atributos que se deben "trans-codificar" con el fin de que optimicen la relación del edificio con el medio (Schumacher, 2008) (Schumacher, 2014). Desde esta perspectiva el parametricismo influye tanto en la forma global del edificio, como en la envolvente y la estructura o esqueleto, traduciéndose en una diferenciación morfológica de la totalidad o de éstos sub-sistemas que se relacionan entre sí (Schumacher, 2014)

Según Schumacher (2008), las principales características de este estilo son las siguientes:

- a) Inter - articulación de subsistemas: enjambre de componentes de la piel o envolvente.
- b) Acentuación paramétrica: cambios sutiles de los componentes generativos para potenciar las diferenciaciones o mutaciones, a partir de una trans - codificación de parámetros.
- c) Figuración paramétrica: configuraciones complejas a partir de un modelo de variables y parámetros que desencadenen la "Gestalt", entre los cuales debiese incluirse aspectos geométricos, ambientales y el punto de vista del observador, a partir de cámaras.

d) Capacidad de respuesta paramétrica: asociada a estrategias de diseño "cinéticas y adaptativas" en el tiempo para ejecutar "transformaciones morfológicas" que se ajusten al uso y ocupación.

e) Urbanismo paramétrico: enjambre de edificios en constante cambio.

Estas características permiten que el parametricismo sea "compatible con los avances recientes en capacidades de ingeniería estructural y ambiental, basadas en técnicas de optimización y análisis computacional; todos los otros estilos son incapaces de trabajar las diferencias adaptativas, estructurales y tectónicas", que le permitiría convertirse en un "estilo unificado y de carácter hegemónico" que sin lugar a dudas posee cierta libertad creativa al estar abierto (Schumacher, 2014) (Schumacher, 2015)

En relación con el manejo de herramientas computacionales, *Rhinoceros* y *Grasshopper* de Robert McNeel, conforman una de las plataformas más utilizadas en términos de *plugins*, *scripts* y distintos complementos o herramientas que se aplican, para llevar a cabo el proceso de diseño arquitectónico, ya que *Grasshopper* posee una "lógica asociativa gráfica" y una interfaz que permite la "edición de algoritmos" que está estrechamente integrado al proceso de modelado 3D (Schumacher, 2014)

Por último, cabe mencionar que el parametricismo incluye "procesos computacionales" que pueden mejorar de forma única, tanto la generación del proceso de diseño herramientas analíticas, permitiendo así, realizar variaciones, según técnicas de control de los atributos del diseño entre los cuales destacan la "curvilinealidad, uso de gradientes y resonancias correlativas", que más allá de ser aspectos formales y estéticos, podrían desarrollarse considerando las condiciones del entorno del proyecto, avanzando en las capacidades de ingeniería estructural y optimización ambiental (Schumacher, 2014) (Schumacher 2015).

## 2.5. Softwares de diseño paramétrico

La utilización de determinadas herramientas y *softwares* es indispensable para el desarrollo del diseño paramétrico arquitectónico. Entre ellos es importante destacar, inicialmente, la contribución de Frank Gehry, un arquitecto reconocido que adaptó el programa CATIA (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*) de la compañía *Dassault Systèmes*, utilizado desde 1977 para el diseño y fabricación de aviones, para diseñar el Museo Guggenheim de Bilbao en el año 1990 y crear así, junto a *Gehry Technologies* un programa con lenguaje de programación C++ con mejor interfaz, llamado *Digital Project*. Sin lugar a dudas, Frank Gehry con ello se convierte en el primer arquitecto conocido en utilizar manejo de tecnologías CAD/CAM (Diseño y Fabricación asistida por computadora) (Gehry, 2014).

Otro aporte fue realizado por Robert McNeel & Associates, con la creación de *Rhinoceros* en el año 1995, el cual, está basado en el diseño a partir de curvas o *NURBS* (*Non-uniform Rational B-Spline*), lo que ha permitido que tener la capacidad para realizar el modelado 3D utilizando formas menos rígidas que los sólidos y mallas poligonales de *AutoCAD* de manera precisa e intuitiva. Este programa se difundió masivamente para el desarrollo de arquitectura paramétrica cuando David Rutten creó *Grasshopper* – que en su primera versión se denominó *Explicit History*, en el año 2007, un *plugin* de programación visual mediante algoritmos y componentes que son arrastrados al área de trabajo, mediante diagramas secuenciales con las respectivas inter-correlaciones entre los distintos algoritmos de tipo generativo, visualizados en la interfaz como nodos con funciones que poseen entradas - *input* y salidas - *output* (dominios y recorridos, respectivamente) y sus constantes numéricas o parámetros, que funciona también con *Archicad* de *Graphisoft*, *software* de modelación BIM (*Building Information Modeling*) (Oliva, 2015).

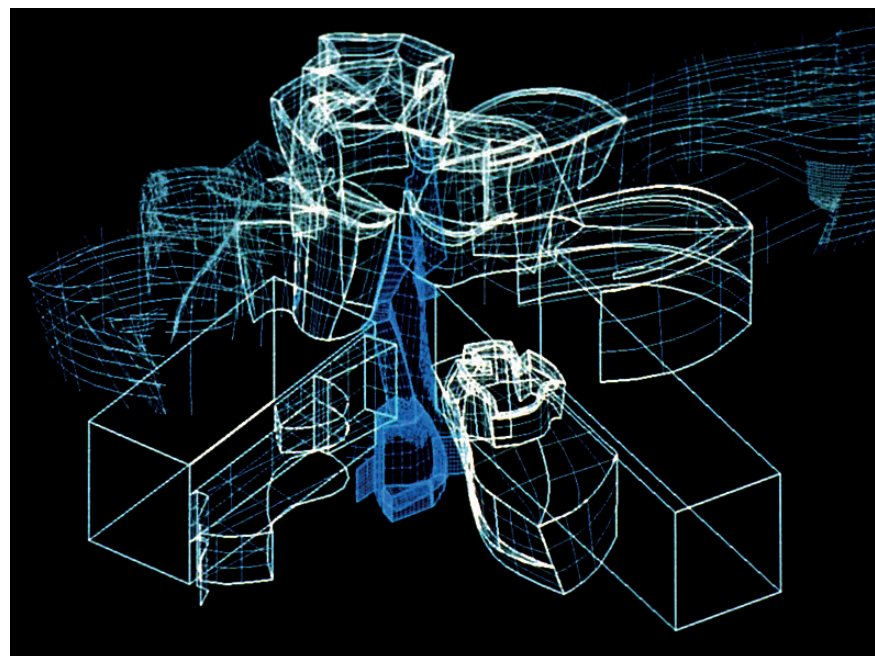


Imagen 28. Museo Guggenheim de Bilbao en *Digital Project*  
Fuente: Gehry (2014)

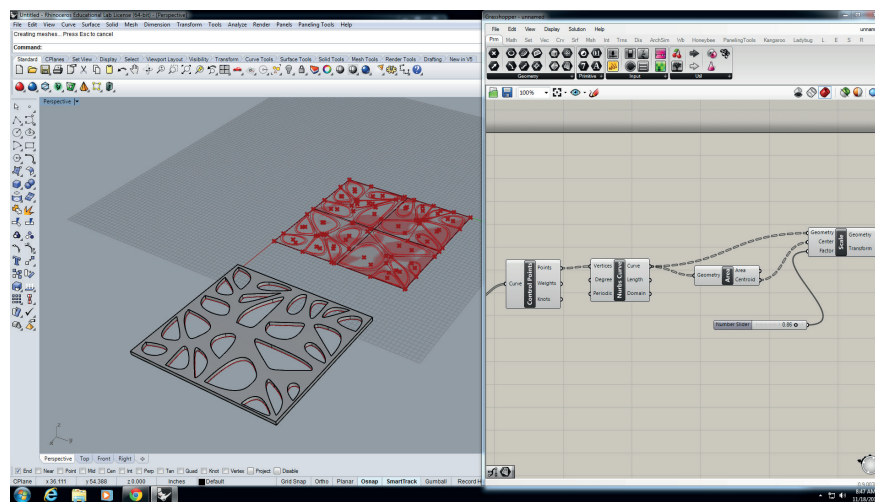


Imagen 29. Voronoi Point con *Rhino* + *Grasshopper*  
Fuente: *Grasshopper*

Ambas plataformas, *Rhinoceros* y *Grasshopper*, poseen archivos propios, en el primero, los modelos poseen extensión .3dm y en el segundo, las definiciones poseen extensión .gh; de modo tal, que un archivo .gh puede ser aplicado en otras creaciones de *Rhinoceros* y vincular los algoritmos a nuevos componentes con distintos datos y variables (Pelletier, 2015).

Las ventajas de *Grasshopper* respecto a *CATIA* no sólo comprende la interfaz más gráfica del primero por sobre el segundo, debido al manejo de distintas acciones paramétricas a partir de componentes generativos concebidos previamente que aplican el concepto de las funciones geométricas que no requieren manejo de lenguaje *Scripting*, de tal modo que, hace posible la optimización del proceso de diseño y el nivel de expertiz del usuario, que no implica amplios conocimientos de ingeniería informática (Oliva, 2015).

Cabe mencionar además que, *Rhinoceros* posee la ventaja que tiene a disposición otros *plugins* de distinta especialidad, entre las que se encuentran las de optimización, automatización de diseño, análisis, evaluación, animación y de diseño en base a elementos constructivos (Wiki McNeel, 2018).

Algunas versiones análogas de *Rhinoceros* y *Grasshopper* reconocidas son *Generative Components* para *MicroStation*, el cual es un *software* desarrollado por *Bentley Systems* en el año 2003, éste es compatible con *softwares* de Autodesk, entre los cuales se encuentra *Revit*, que posee una herramienta paramétrica llamada *Dynamo*, que fue creada en el año 2012 y en la cual se programa visualmente a partir de un código abierto *Python Scripts*, que en su versión más reciente fue incluida dentro del paquete de instalación de la plataforma de modelación BIM, lo que permite la automatización del diseño arquitectónico (Pelletier, 2015).

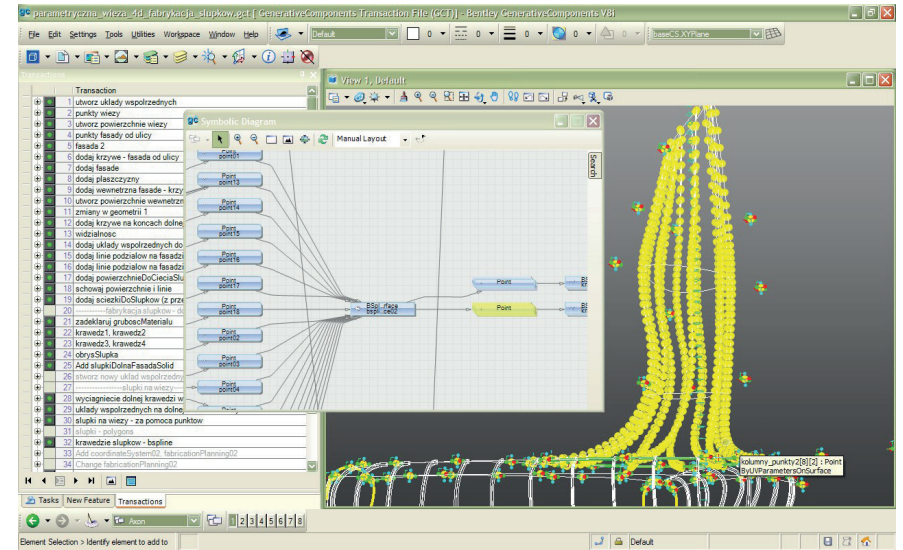


Imagen 30. Torre parametrizada con Generative Components  
Fuente: Blog de Bentley

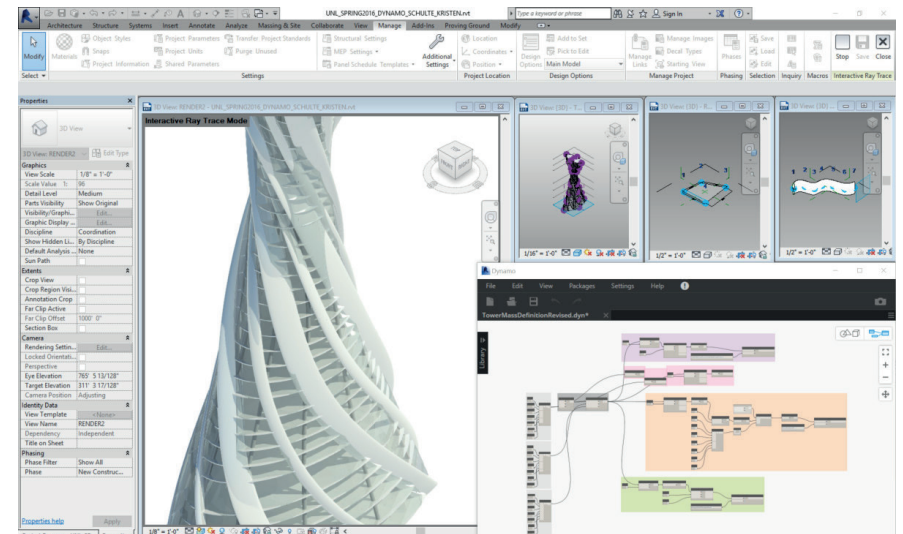


Imagen 31. Torre parametrizada con Revit + Dynamo  
Fuente: Blog de Autodesk

Autodesk también ofrece otros *softwares* que poseen herramientas de parametrización, algunos de éstos son *Maya* y *3D Studio Max* que, además de permitir el modelado arquitectónico son utilizados además, para la realización de animaciones y efectos visuales. Ambos, comprenden una interfaz de usuario con 4 vistas o *viewports*, cada una de ellas ampliable. Además, cuentan con una paleta de herramientas visualmente atractivas e intuitivas en las que se puede diseñar a partir de formas, atributos y parámetros que son modificados mediante vectores X, Y, Z. El segundo ofrece además, la posibilidad de programar mediante *Max Script*, con lenguaje *Phyton* y el *plugin Max Creative Graph* (Pelletier, 2015) (Autodesk, 2018).

Sin embargo, el dúo *Rhinoceros* y *Grasshopper* es el que ofrece mayor cantidad de *plugins* de evaluación de análisis lumínico, ya que posee distintos complementos de distintas funcionalidades y metodologías de evaluación, de los cuales cabe mencionar los más habituales y reconocidos dado el nivel de precisión de resultados y versatilidad, tales como:

**ArchSim Energy:** Complemento de *Rhinoceros* y *Grasshopper*, especializado en cálculos energéticos que utiliza como motor de cálculo *EnergyPlus+*.

**Honeybee:** Permite la conexión con *EnergyPlus+*, *Radiance*, *Daysim* y *OpenStudio* para las simulaciones energéticas y de iluminación natural.

**Ladybug:** Posee código abierto para *Grasshopper3D* y permite crear un diseño arquitectónico bioclimático, importando archivos estándar de *EnergyPlus Weather* (.EPW) y proporcionando una variedad de gráficos interactivos 3D, que respalda el proceso de toma de decisiones durante las etapas iniciales del diseño, utilizando , con motores de cálculo de *Energy Plus*, *Radiance* y *Daysim* (Roudsari, Pak, Smith y Gill, 2013).

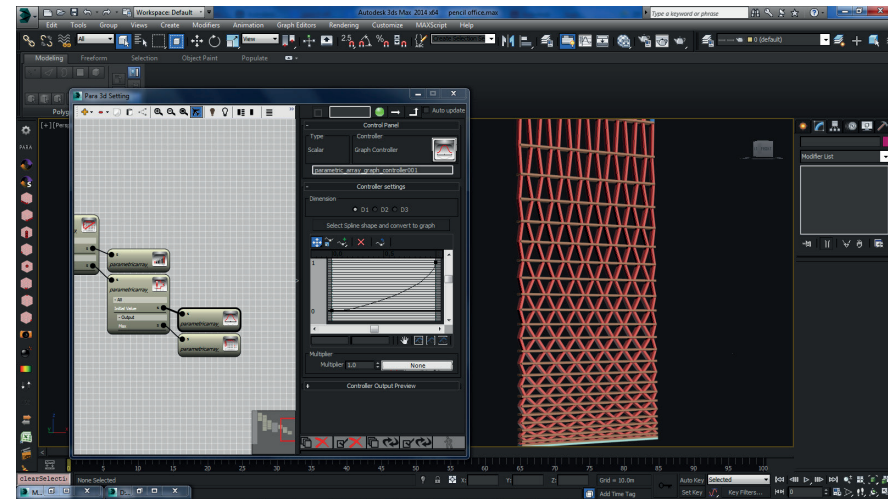


Imagen 32. Diseño de panel parametrizado en Autodesk 3D Studio Max  
Fuente: Autodesk App Store

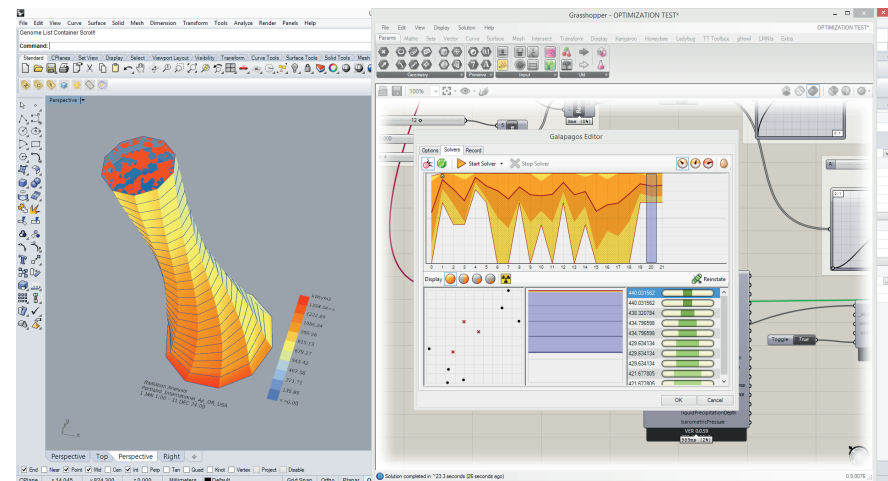


Imagen 33. Optimización de iluminación en Ladybug.  
Fuente: Blog de Grasshopper



**DIVA-for-Rhino:** (*Design Iterate Validate Adapt*) Es un complemento que permite la evaluación y optimización de estrategias de diseño de iluminación natural, confort térmico y demanda de energía para *Rhinoceros* y *Grasshopper* (Solemma, 2018), con motores de cálculo: *Radiance*, *EnergyPlus* y *Daysim*, lo que brinda la posibilidad de realizar un análisis detallado de modelos de volumetría simple a compleja, en torno a métricas estáticas y dinámicas (Jakubiec y Reinhart, 2011).

**LightStanza:** Es una aplicación creada en el año 2011 por Daniel Glaser, miembro del comité *IESNA Daylight Metrics* y publicitada recién a partir del año 2014 (LightStanza, 2019), que mediante el uso de la última versión de *Radiance* opera mediante un algoritmo de trazado de rayos luminosos en modelos tridimensionales (Ward, 1994) que son simulados desde la nube, con una interfaz intuitiva, de fácil uso y legibilidad en los resultados, calculados con matrices programadas según métricas estáticas, dinámicas y magnitudes fotométricas, con metodologías y estándares internacionales, tales como *LEED v4*, *European Standard Compliance* y *WELL v2*, para determinar porcentajes de cumplimiento (LightStanza, 2019) (IBPSA, 2019). Es importante mencionar que la *app* es útil para la optimización lumínica de las estrategias de diseño aplicadas a los modelos realizados en *Sketchup*, *Rhinoceros* y *Revit*, en el cual se añadió un enlace directo en sus versiones 2018 y 2019.

Tanto *DIVA* como *LightStanza* exportan los reportes obtenidos en planillas de extensión .CSV para la revisión estadística de los niveles de luminancia e iluminancia, factor luz día (FLD), umbral útil de iluminancia (UDI), exposición solar anual (ASE), autonomía espacial, autonomía continua de luz natural (cDA), porcentaje de brillo anual (*annual glare*), probabilidad de deslumbramiento diurno (DGP) (Jakubiec y Reinhart, 2011). Además, el segundo, añade las métricas (sDA), (sDGP) y (sDS), las que serán explicadas en detalle en el capítulo siguiente (LightStanza, 2019).

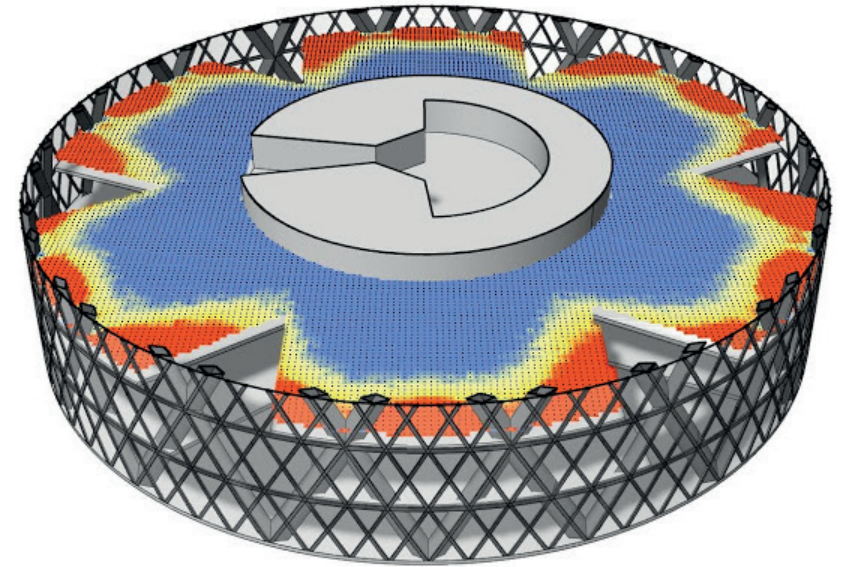


Imagen 34.  
Daylight Factor en plug-in DIVA-for-Rhino  
Fuente: Blog de Solemma

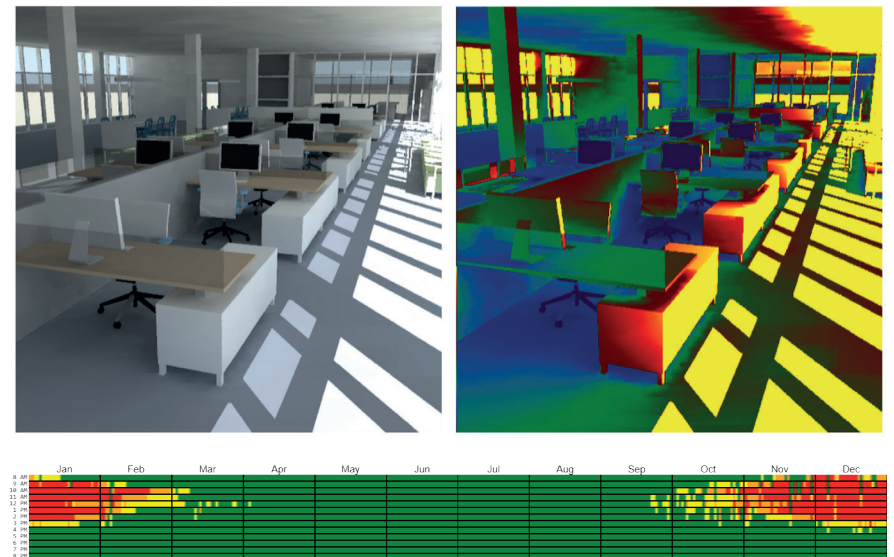


Imagen 35.  
Rendering, Illuminance, Annual glare en LightStanza.  
Fuente: International Building Performance Simulation Association (IBPSA)

## 2.6. Estrategias de diseño paramétrico y Procesos de fabricación digital

El parametricismo establece una búsqueda de nuevas formas a partir de diferentes transformaciones en variables que definen la volumetría de los componentes. Éstas establecen ciertas estrategias de carácter conceptual para la construcción geométrica y fabricación digital de los elementos mediante el uso de *laser CNC*, *printer 3D*, *router*, *water-jet CNC*, *plasm cutter* y *robots* (Iwamoto, 2009) (Pelletier, 2015). Entre las cuales, es posible identificar las siguientes:

**Sectioning (Seccionamiento):** Es una técnica de modelado que consiste en la fragmentación o corte de una o más formas tridimensionales, con el fin de obtener los datos necesarios para realizar la construcción laminar de una serie de perfiles que definen la volumetría total de un objeto, proyecto u obra en madera, acero u otro material.

En los últimos años, la arquitectura ha adquirido cierto grado de complejidad respecto a la geometría, por lo que este método de diseño conlleva a facilitar la ejecución de un proyecto en numerosas secciones transversales, con comandos de control que realizan los cortes a los intervalos designados por los parámetros del algoritmo para que la estructura sea construida y ensamblada por partes de un modo eficaz. Estas secciones pueden tener distintos ángulos o dirección en el espacio y entre sí, pudiendo ser paralelas, perpendiculares o rotar, siguiendo los bordes de la superficie como es el caso del Bird's Nest de Herzog & De Meuron (Iwamoto, 2009).

**Tesselation (Teselaciones):** Consiste en una colección de piezas que pueden estar conformados por distintas formas, siempre y cuando se

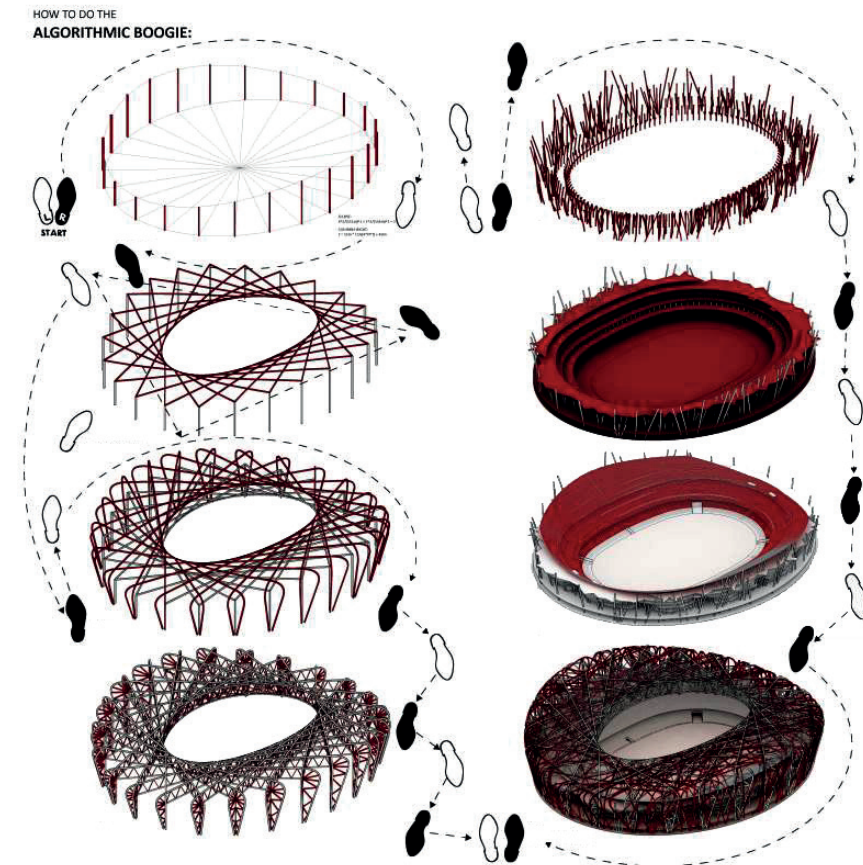
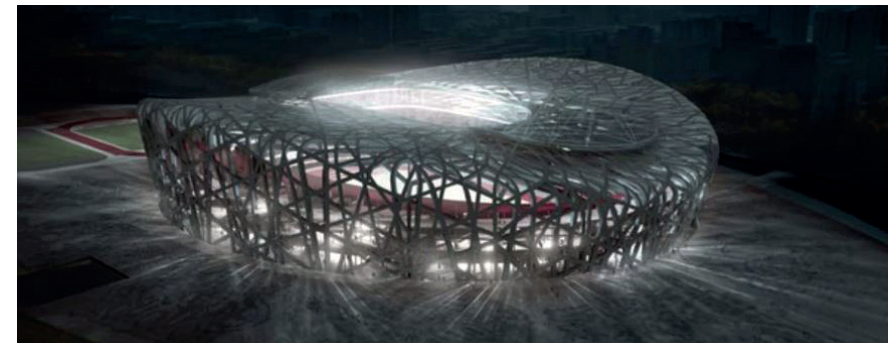


Imagen 36 - 37. Beijing Olympic Stadium (Bird's Nest). Estrategia: Sectioning  
Fuente: Web de Herzog & De Meuron

unan entre sí, sin espacios, conformando una superficie, asemejando mosaicos. Ambos conceptos, teselación y mosaico fueron acuñados por M.C. Escher, aun cuando éstos se originaron en Roma y el Imperio Bizantino con un fin meramente decorativo, revitalizándose mediante el uso de patrones paramétricos para articular pieles. Cabe mencionar que las superficies en las cuales se incorporan dichos patrones no necesariamente son planos, ya que con el uso de algoritmos y el desarrollo de distintos *softwares* es posible ejecutar una subdivisión utilizando diversas figuras en superficies curvas y mallas poligonales (Iwamoto, 2009).

También es importante señalar que las teselaciones pueden ser simples o compuestas por una o más figuras que se repiten de modo uniforme o con ciertas variaciones en tamaño y dimensión. Algunas teselaciones estacadas que establecen patrones de diseño que han sido ampliamente difundidos son:

- Triangulación de Delaunay.
- Voronoi o polígonos de Thiessen.

### **Triangulación Delaunay:**

Este patrón fue creado por el matemático ruso Borís Nikolaevich Delone en 1934, consiste en la subdivisión de una superficie en triángulos circunscritos en una circunferencia que no contiene ningún otro vértice de los triángulos aledaños, en espacios bidimensionales y de manera equivalente, en las formas tridimensionales, están compuestas por vértices y esferas. Cabe señalar que es decir, todos los puntos se encuentran conectados entre sí y la configuración de los triángulos no requiere la intersección de las aristas y el tamaño de éstos es variable, pudiendo adecuarse a distintas superficies regulares, además de aquellas que son "amorfas" o parte de la blobitectura, como es el caso del Bio-TechnoPark en Rusia, específicamente en Novosibirsk (De Berg, Cheong, Van Kreveld y Overmars., 2008).



Imagen 38. Smithsonian Institution, Washington. Estrategia: Tessellation  
Fuente: Web de Foster + Partners



Imagen 39. Bio-TechnoPark en Novosibirsk, Rusia. Estrategia: Delaunay Triangulation  
Fuente: Web de Graitec

### Voronoi o polígonos de Thiessen:

Este patrón matemático fue creado por los matemáticos Georgy Voronoi y Gustav Lejeune Dirichlet que interpretaron la estructura celular de los panales de abeja, las esponjas marinas, las burbujas y las hojas de los árboles a nivel microscópico, presentes en la naturaleza, a partir de la observación de proximidad y distribución de celdas. Cabe mencionar que este patrón conforma un método de interpolación sencillo que consiste básicamente en la unión de puntos dos o más puntos entre sí, que pueden ser o no equidistantes, para posteriormente trazar las mediatrices (recta perpendicular que pasa por el punto medio del segmento que une ambos puntos), determinando una serie de polígonos equidistantes entre sí, los cuales pueden variar en relación a la forma que poseen. La forma de los polígonos resultantes varía desde triángulos, cuadrados, hexágonos, al distribuir en forma regular los puntos o variar a formas más orgánicas cuando estos son distribuidos irregularmente en distintas posiciones (Goodmann, 2004).

De esta manera, se descompone el espacio a partir de una cantidad de puntos con igual cantidad de regiones o áreas de influencia, es decir, la fragmentación de la superficie estará determinada por el número de puntos en el espacio y la respectiva posición o ubicación que éstos tienen en el plano (De Berg, Cheong, Kreveld, y Overmars, 2008) (Casissa, 2015).

Por lo tanto, este patrón define una geometría irregular y orgánica que configura el entramado mediante la graduación y variación de la forma que se configura al modificar la densidad y distribución de puntos que, pueden ser aleatorios o determinados por el diseñador según decisiones específicas de la trama de puntos que al unirse entre sí con mediatrices dan lugar a las zonas o apertura de las células de la piel paramétrica (Velasco y Robles, 2011).

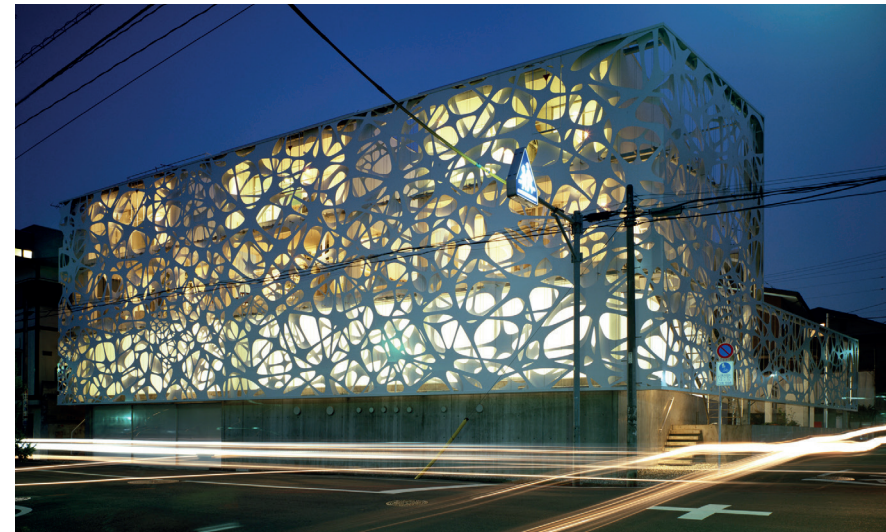


Imagen 40. Airspace de Tokyo. Estrategia: Superposición de entramados Voronoi.  
Fuente: Web de Faulders Studio

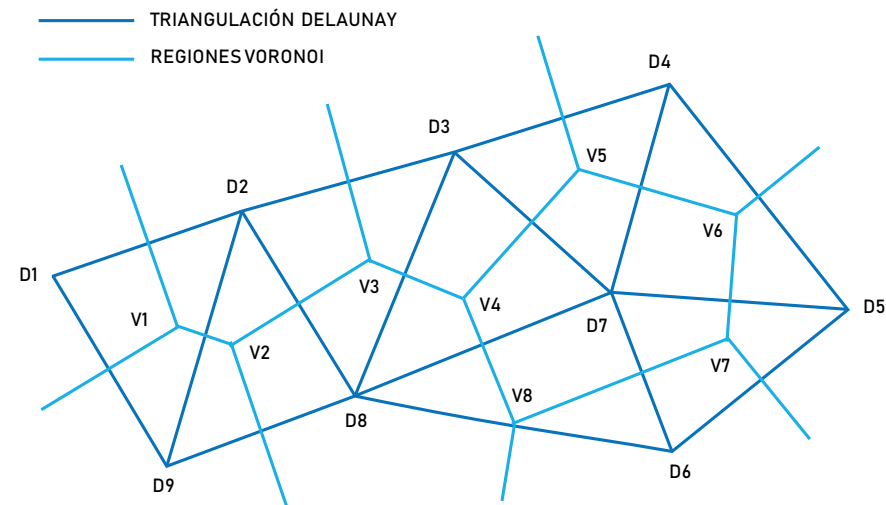
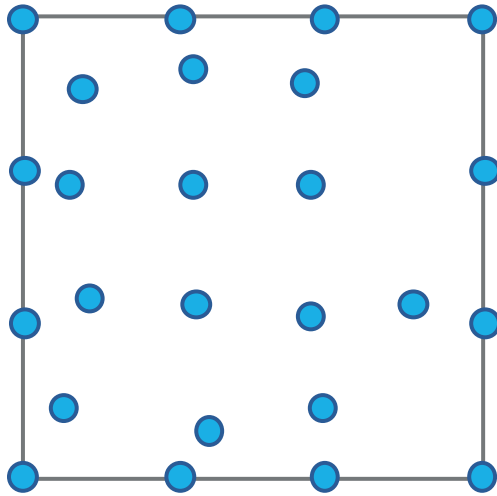
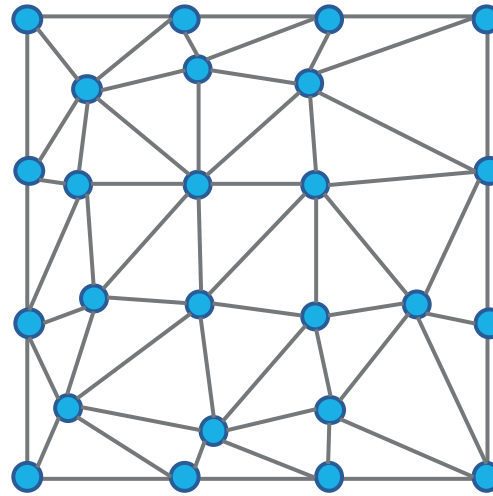


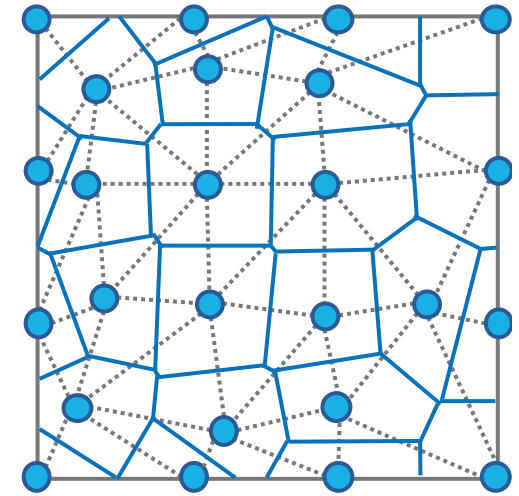
Imagen 41. Relación geométrica entre Voronoi y Delaunay.  
Fuente: De Berg (2008)



**SET DE PUNTOS**  
[Input: Points]



**TRIANGULACIÓN  
DELAUNAY**  
[Input: Points]



**TESELACIÓN  
VORONOI**  
[Input: Points]

*Imagen 42. Teselaciones Delaunay y Voronoi a partir de una trama de puntos.  
Fuente: Rokicki y Gawell (2016)*

Tanto Delaunay como Voronoi son dos patrones algorítmicos ampliamente difundidos para efectuar celosías y pieles paramétricas en la arquitectura contemporánea, además de posibilitar soluciones mediante la aplicación de iteraciones en contexto urbano y territorial, dada la composición o estructura celular altamente diferenciada, la distribución de puntos, diversidad de tamaños y proporciones de las células pueden derivar a formas regulares o completamente irregulares, lo que permite realizar variaciones en torno a los requerimientos de la actividad o programa arquitectónico a desarrollar (Flores, 2007).

En esta tesis de investigación, se considera sólo éste último, como elemento de estudio, considerando que la distribución irregular de puntos deriva directamente en una forma celular más orgánica, a nivel de forma que poseen las regiones atribuidas a cada punto que corresponderán a las aperturas que componen la celosía, así como también la variación en las longitudes de sus barras, razón por la cual, dicha composición geométrica cuando posee un carácter aleatorio, tendrá resultados lumínicamente menos deducibles, y por ende, interesantes de analizar que los obtenidos mediante la teselación de Delaunay.

**Paneling - Folding (Panel plegado):** Esta estrategia de diseño se caracteriza por convertir una superficie plana o lámina modular en una tridimensional a partir de la técnica de plegado auto-soportante, lo cual permite crear estructuras a partir de éstas que, adquieren rigidez mediante el manejo de geometría y otorgan continuidad material al espacio. Existe una clara similitud con la técnica del origami japonés que consiste en el plegado del papel, para conformar quiebres en él, conformando valles (parte cóncava) y crestas (parte convexa) (Iwamoto, 2009).

Plegar o doblar un papel es poner una parte sobre sí misma, no existe adición, ni sustracción, sino una transformación que lo convierte en una superficie retráctil, a partir de las relaciones geométricas existentes entre aristas, vértices y planos; algunas de las cuales fueron formuladas por el matemático Humiaki Huzita que creó seis axiomas que trazan puntos y líneas para construir y explicar esquemas de plegado, comprobando que la técnica del plegado es una operación cuantificable y precisa, sin pérdida de material. Algunos de estos axiomas son utilizados para el desarrollo de modelos analógicos plegables de pieles, utilizando variaciones de pliegues de origami: *reverse fold*, *miura ori-fold* or *tesselation fold*, *diagonal fold*, *curve fold*, entre otros (Lee y Leounis, 2011).

El creciente interés por configurar pieles cinéticas, dinámicas o adaptativas, ha enfatizado la utilización de esta técnica de plegado con el fin de optimizar la respuesta del edificio ante la variación de las condiciones climáticas, principalmente, de radiación solar, al ser aplicada como técnica de sombreado o filtro de iluminación, mediante el uso de sensores y actuadores, de materiales activos o dispositivos mecánicos que controlan los cambios de geometría de los componentes móviles de la piel, en respuesta a los estímulos externos de iluminación natural y necesidades de los usuarios al interior de los espacios (Pesenti, Maserà, Fiorito, Sauchelli, 2015).

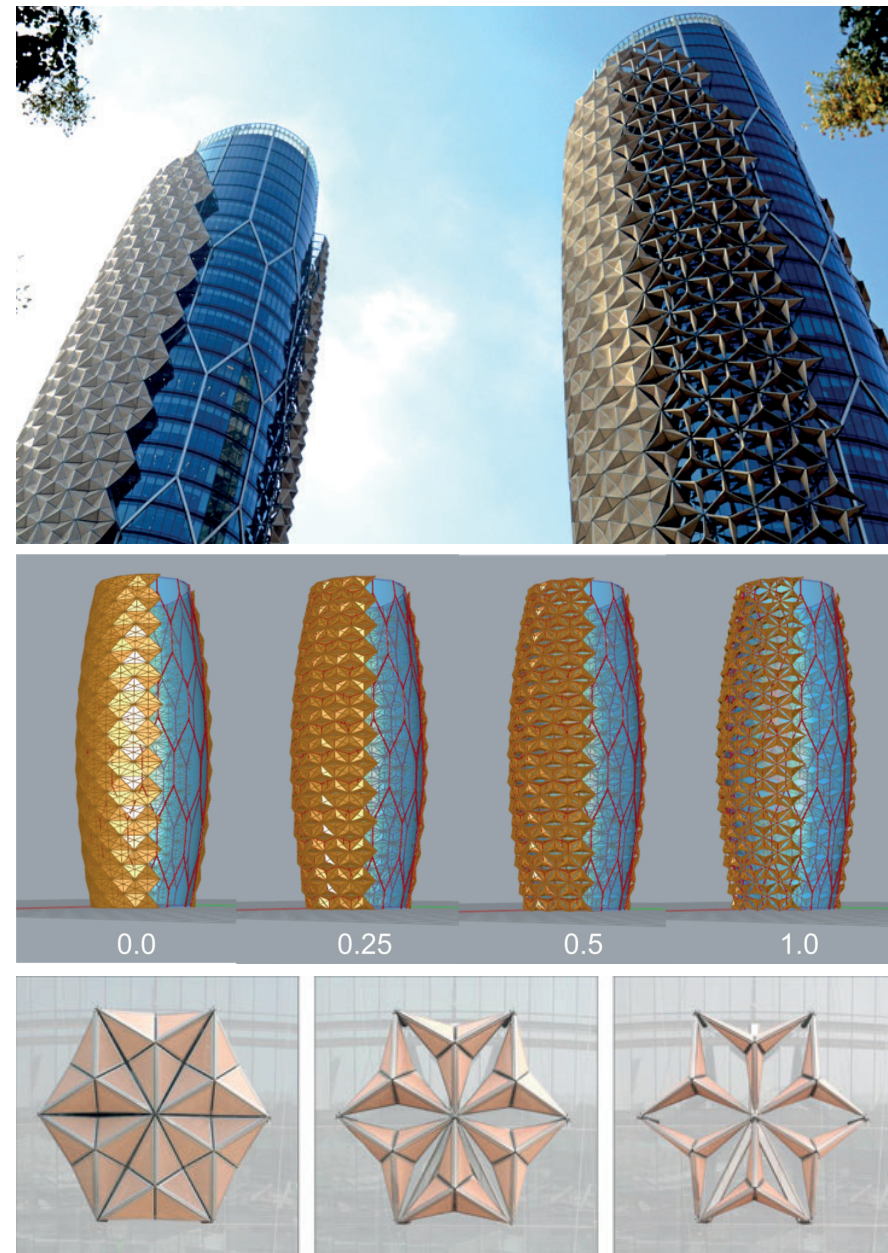


Imagen 43, 44 y 45. Al Bahar Towers, Abu Dhabi. Estrategia: Paneling- Folding  
Fuente: Web Aedas Architects (exterior), Grasshopper (modelo), Inhabitát (módulo)

**Contouring surfaces (Contorneado):** Es una técnica de diseño y fabricación digital que moldea la superficie plana y crea un relieve tridimensional, mediante la eliminación de capas sucesivas de material, es decir, es un proceso sustractivo, que esculpe en patrones regulados. La escultura contemplaba prácticas artesanales y actualmente es posible aplicar enturadores y fresadoras CNC, que utilizan datos de trayectoria en base a modelos digitales para extraer sistemáticamente el material a partir de una serie de contornos. Dichas máquinas tienen la capacidad para desplazarse en 3 ó 5 ejes: X (+/-), Y (+), Z (+/-). (Iwamoto, 2009)

Es importante mencionar que esta técnica tiene el mismo grado de precisión que la agrupación o deposición de placas sucesivas del material siguiendo una ruta de contornos, capa por capa, la cual es indicada en el modelo 3D, conocida como *Additive Manufacturing (AM)*, fabricación aditiva, la estrategia inversa. Esta última permite realizar piezas complejas con detalles, torceduras, ramificaciones, entre otras variaciones a pequeña escala, teniendo en cuenta el grosor del material y el espesor de corte determinado mediante la programación de la máquina (Tedeschi, 2014).

**Form-Finding:** Búsqueda de nuevas formas a partir de la suspensión de un modelo físico colgante, método aplicado por Robert Hooke en el año 1675, éste modelo es realizado con cables o membranas elásticas, que son sometidas a pesos que cuelgan de los extremos, con el fin de representar fuerzas gravitacionales y obtener la curva natural formada a partir de las tensiones. Dicho modelo se denomina "funicular" y se invierte para identificar las compresiones de la estructura (Tedeschi, 2014).

Estas estructuras funiculares son el origen del modelo de bóvedas y cáscaras que utilizan la curva natural de los arcos funiculares de dichas cargas y curvas catenarias, éstas últimas se refieren a la curvatura formada por una cadena o cable en suspensión desde los extremos y su peso



Imagen 46. Patton Boggs Law Offices, Dallas. Estrategia: Contouring  
Fuente: Web Henry Hauer



Imagen 47. Vossair Cloud, Los Angeles. Estrategia: Form-Finding  
Fuente: Web Iwamoto Scott

propio o cuando es además, sometida a la acción de la gravedad y la distribución regular, homogénea y constante de pesos, asemejándose a las parábolas. Éstas fueron definidas matemáticamente por David Gregory en 1697 y en la actualidad son parametrizadas y construidas por piezas (Pelletier, 2015).

Cabe señalar que este tipo de modelos en la actualidad son posibles de realizar con *plugins* como *Karamba* y *Kangaroo*, facilitando la experimentación de diseño al sustituir la ejecución de maquetas a escala (Pugnale, 2018).

**Paneling / Mesh surfaces (Panelización o Mallas):** Consiste en la racionalización de la superficie a través de la fragmentación de ésta en paneles ensamblados entre sí.

El objetivo es la subdivisión sucesiva de partes que componen un entramado o malla de módulos con distintas formas que pueden repetirse con ciertas variaciones en la forma, dirección y tamaño de los patrones de figuras, sean éstas polígonos, tales como triángulos, cuadrados, hexágonos, circunferencias y otro tipo de geometrías más complejas. En algunos casos, la finalidad consiste en optimizar la geometría de la estructura de la envolvente y las uniones entre componentes de ésta (Pelletier, 2015).

**Forming:** Técnica de fabricación de formas y células generadas a partir de múltiples moldes que permiten configurar los relieves de paneles prefabricados, elementos estructurales y ornamentos arquitectónicos, además del moldeado de losas, la piel o paredes e incluso todo el edificio.

Algunos de éstos son realizados en PVC (*Polyvinyl chloride*), concreto fundido y otros materiales en *router* y *milled* CNC con uso de *softwares* CAD / CAM, tal es el caso de P Wall, en el Pompidou (Iwamoto, 2009).



Imagen 48. Yas Hotel, Abu Dhabi. Estrategia: Paneling  
Fuente: Web Asymptote Architecture



Imagen 49. P Wall, Andrew Kudless. Estrategia: Forming  
Fuente: Web Matsys



**Ruled surfaces (Superficies regladas):** Consisten en superficies fabricadas con elementos lineales o generatrices con trayectoria curva gaussianas, hiperbólicas, paraboloidas y helicoidales (Pelletier, 2015).

Según Pelletier (2015) la innovación en las técnicas de diseño y fabricación digital, demandan tener conocimiento sobre las herramientas y maquinarias que permiten su realización. Entre ellas se encuentran:

**Escaneado tridimensional:** Digitalización de coordenadas de una superficie cualquiera con el fin de determinar las distintas dimensiones de los modelos y objetos físicos preexistentes. Existen distintos métodos, tales como: sonda de digitalización, láser, resonancia magnética y robótica.

**Máquinas de fabricación CNC:** Permiten el corte de planchas, placas y planos de distinto espesor, mediante estrategias sustrativas, mediante 2 a 8 ejes de movimiento y cabezales de corte.

**Corte con arco plasma:** Movimiento de un arco eléctrico y un cabezal de corte que, a través de gas comprimido de alta temperatura, posee la capacidad de fundir el material.

**Corte láser:** Utilización de un haz de luz infrarrojo con CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) presurizado que degrada la superficie de corte.

**Corte con chorro de agua:** Utilización de chorros de agua de alta presión que mezclado con esmaltes sólidos abrasivos que erosionan las capas de material.

**Sinterización selectiva con láser (SLS):** Láser que derrite capa por capa superficies de metal.



Imagen 50. Swallow's Nest. Estrategia: Ruled surfaces  
Fuente: Vincent Callebaut

**Estereolitografía (SLA):** Uso de polímeros sensibles a la luz que se solidifican ante la luz láser para componer capas sucesivas de material.

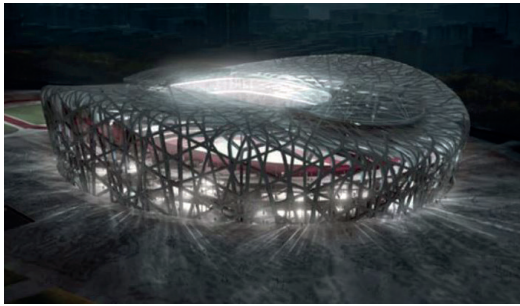
**Fabricación de chorro múltiple:** Cabezal de impresión 3D que inyecta fotopolímeros líquidos, mediante haces de luz UV.

**Impresión 3D:** Adición de capas de almidón, polvo de cerámica.

**Fabricación de objeto laminado (LOM):** Láminas de papel o plástico cortadas en láser.

**Modelado por deposición fundida (FDM):** Filamento de plástico fundido que al solidificarse genera formas al enfriarse.

Todas estas técnicas son posibles de utilizar mediante el uso de *softwares* CAD/CAM/BIM, junto a la selección adecuada de la maquinaria.



Sectioning



Contouring



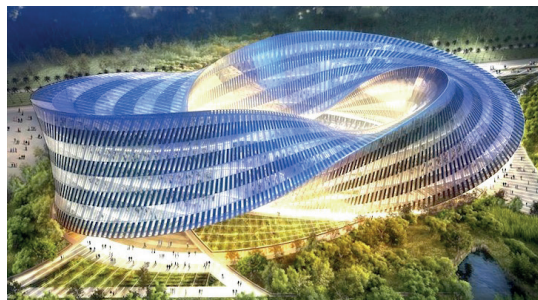
Form - Finding



Folding



Paneling



Ruled Surfaces

Patrones



Tesselation

ESTRATEGIAS DE DISEÑO DE PIELES PARAMÉTRICAS

Imagen 51.  
Síntesis de estrategias de diseño.  
Fuente: Elaboración Propia a partir de imágenes 36 - 50.

03

Imagen de Fondo:  
C Wall - Banvard  
Gallery, Ohio  
Matsys Design

# METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

## CONFORT LUMÍNICO Y VISUAL

La geometría de piel o envolvente paramétrica puede tener un efecto desfavorable a la distribución, direccionalidad e intensidad de la luz que ingresa a un espacio interior, razón por la cual, en el presente capítulo se profundiza en las variables de iluminación natural que poseen un impacto en el confort lumínico visual de los ocupantes de los edificios.

En los últimos años, se ha incrementado la necesidad de establecer herramientas adecuadas de evaluación lumínico - visual, con el fin de potenciar la comodidad y percepción visual del usuario, teniendo en cuenta los efectos de deslumbramiento y aporte solar térmico, relacionado con esquemas de falso color de radiación solar y luminancias.

Inicialmente se consideran los conceptos básicos de iluminación, las magnitudes fotométricas, hasta profundizar en las métricas de iluminación natural, utilizadas en la actualidad para la evaluación y optimización lumínica y visual de los espacios interiores, sean estáticas y dinámicas, poniendo especial énfasis en las relaciones existentes entre ambas tipologías para determinar el método de análisis a utilizar en el siguiente capítulo que contempla los resultados obtenidos.

Es por eso que, se definen en primer lugar, los conceptos básicos, ampliamente difundidos, tales como: luz solar, radiación directa e indirecta y fenómenos de dispersión (reflexión, refracción, transmisión y difracción) para mayor entendimiento de las métricas o combinación de variables que componen la evaluación o medición de cantidad y calidad, en términos de comportamiento y desempeños lumínicos.

Una de las métricas más conocidas por arquitectos es el Factor Luz Día (DF - *Daylight Factor*) que relaciona a través de un porcentaje el flujo luminoso o iluminancia del exterior con el exterior, en condiciones de cielo nublado o cubierto, según tipología de cielo establecida por la *CIE - Commission internationale de l'éclairage*, pero existen otras que aún son un tanto desconocidas en el escenario actual que, consideran el desarrollo de modelo y evaluaciones que consideran tanto la latitud geográfica como los datos meteorológicos de índole local, a este tipo de análisis se le conoce como *Climate Based Daylight Modelling (CBDM)* y permite evaluar los desempeños lumínicos y visuales, considerando la variación de luminancia de cielo de un lugar determinado, en torno a métricas dinámicas que son enunciadas a continuación y detalladas en profundidad en el siguiente capítulo:

*Autonomía Lumínica (Daylight Autonomy) - DA*

*Iluminancia Diurna Útil (Useful Daylight Illuminance)- UDI*

*Autonomía Lumínica Espacial (Spatial Daylight Autonomy) - sDA*

*Exposición Solar Anual (Annual Solar Exposure) - ASE*

*Brillo Luminoso Anual (Glare Annual) - GA*

*Probabilidad de Brillo Luminoso (Daylight Glare Probability) -DGP.*

### 3. CONFORT LUMÍNICO - VISUAL: CONCEPTOS Y MÉTRICAS.

#### 3.1. Conceptos básicos de iluminación natural.

La luz es tan sólo una parte visible del espectro electromagnético que abarca la frecuencia infrarroja de onda corta (760 nm rojo) y la radiación ultravioleta UV (380 nm violeta); lo que compone aproximadamente a un 1% de la radiación solar (Köhler, 1959). Por otra parte, el término tiende a confundirse con el de iluminación que se define como la cantidad y calidad de la luz en una superficie determinada (Mondelo, Gregori, Barrau; 2016). Esta última, posee dos componentes de origen: la luz solar y el cielo luminoso, mediante radiación directa e indirecta, respectivamente (Mardaljevic, 2013):

- El primero, la luz solar, posee longitudes de onda variables y un comportamiento dinámico, análogo a los distintos fenómenos de carácter ondulatorio (Köhler, 1959).
- El segundo, el cielo luminoso o bóveda celeste, influye en la dispersión de la luz debido al ingreso de rayos luminosos en la atmósfera terrestre (Mardaljevic, 2013).

Más claramente, según Roldán (2016) la luz se emite, mediante:

- radiación directa del sol, sin fluctuaciones en su recorrido.
- radiación indirecta del cielo, con ciertas variaciones y cambios en la dirección y modo de dispersión de la luz solar, según las condiciones climáticas y composición atmosférica del medio en el cual ésta es, absorbida, reflejada y difractada por partículas en suspensión, gases, vapor de agua y nubes, para ser finalmente, devuelta al espacio o propagada como luz solar difusa en las superficies de los objetos, de acuerdo a la incidencia de los distintos fenómenos ondulatorios de la luz.

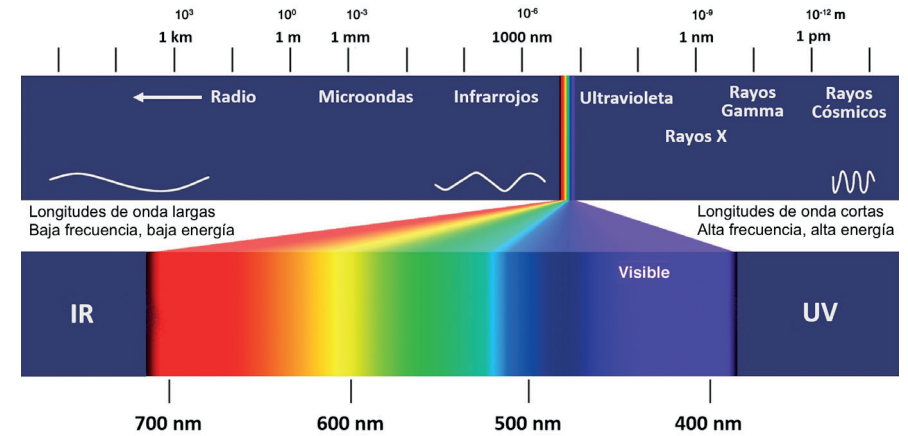


Imagen 52. Espectro electromagnético  
Fuente: <https://unmundointelectualblog.wordpress.com>

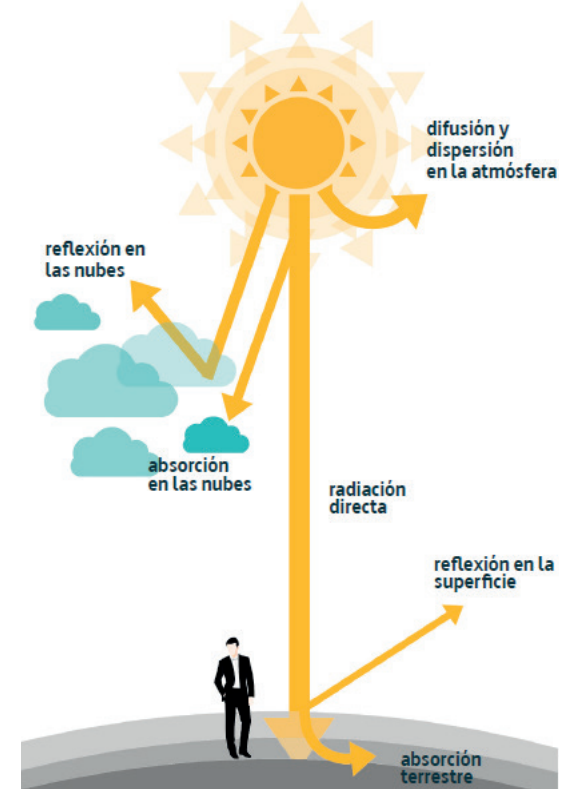


Imagen 53. Radiación solar en la atmósfera.  
Fuente: Soto, P. (2017)

Según D'Alençon (2008) los fenómenos físicos de dispersión de la luz están definidos por:

**Reflexión:** Fenómeno físico que se presenta cuando la luz incide en las superficies produciendo la desviación y devolución del haz luminoso en una dirección, formando un ángulo reflejado igual al incidente, para el caso de las superficies lisas y pulidas (reflexión especular) o en múltiples direcciones, cuando la superficie es rugosa (difusa o dispersa)

**Refracción:** Fenómeno físico entre dos medios transparentes de distintas densidades que son traspasados por un haz luminoso, con cierta desviación que depende del ángulo de incidencia e índice de refracción del material. Cabe señalar que cuando los materiales son muy diversos, los rayos de luz giran y la velocidad de propagación cambia.

**Transmisión:** Fenómeno físico producto de la absorción del haz luminoso en materiales que poseen cierto grado de transparencia y translucidez, dependiendo de la longitud de onda y espesor de filtro solar. En materiales transparentes es directa y difusa en los translúcidos.

**Difracción:** Fenómeno físico ondulatorio que determina la proyección de luz y sombra en el espacio interior, cuando el haz luminoso penetra aperturas de distinto diámetro, en particular, orificios estrechos, que hacen que se produzcan variaciones en la longitud de onda y ángulo de difracción, extendiéndolo y desviándolo de la propagación rectilínea.

Estos fenómenos inciden en el confort lumínico y visual ya que guardan estrecha relación con la el ingreso de luz al espacio y por ende, en la percepción de la luz ante los factores externos e internos (Hopkinson, 1966). Desde este punto de vista, un espacio con buena calidad de iluminación es aquel en que los usuarios visualizan los objetos con un nivel de detalle

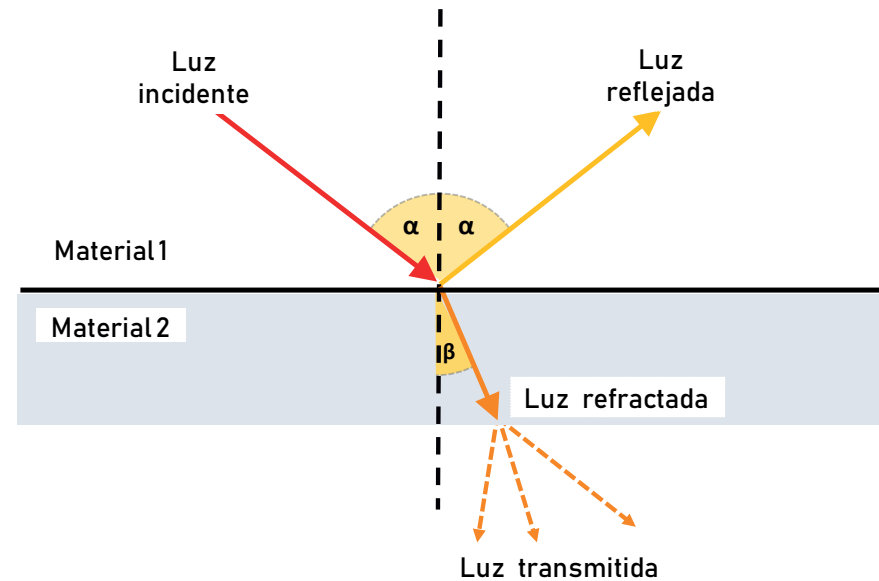


Imagen 54 Diagramas de fenómenos de dispersión de la luz solar: reflexión y refracción  
Fuente: Elaboración propia

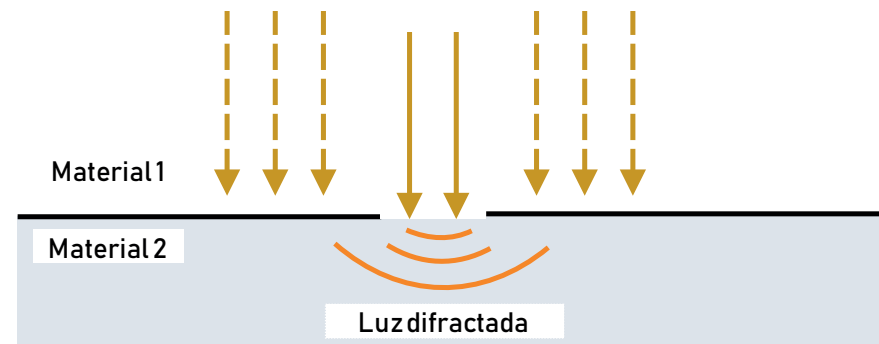


Imagen 55. Diagramas de fenómenos de dispersión de la luz solar: difracción  
Fuente: Elaboración propia

adecuado al tipo de actividad, sin sufrir fatiga visual (Mondelo, Gregori, Barrau; 2016). Para ello es importante, tener en cuenta tanto la exposición como los niveles de radiación solar del espacio interior, ya que influirá en la incomodidad visual de los ocupantes, según la distribución de brillo luminoso (Rockcastle y Andersen, 2012).

Un espacio bien iluminado se producirá una reducción indirecta del consumo y gasto energético, debido a las demandas de enfriamiento y calefacción que tendrán los recintos como consecuencia de las ganancias y pérdidas térmicas, cuando existe un óptimo aprovechamiento de iluminación natural al interior de los edificios (Puigdomenech, Cusidó y Porta, 1986) (Galasiu y Reinhart, 2007). Desde esta perspectiva, el ahorro energético depende del diseño de envolventes eficientes, tras evaluar las ganancias - pérdidas de radiación directa, la distribución de iluminancias, para establecer estrategias de diseño arquitectónico adecuadas según el balance lumínico - térmico de los edificios en el espacio interior (Puigdomenech, Cusidó y Porta, 1986) (Muneer, 2004).

Según Bacha y Bourbia (2018), en términos de diseño, una fachada bien proyectada equivale aproximadamente al 80% de la solución ambiental interior. Ésto es posible, considerando parámetros de dimensionamiento, orientación y forma de las medidas de control solar y fenestraciones o ventanas, que repercuten en la penetración y distribución de la luz natural hacia el interior (Puigdomenech, Cusidó y Porta, 1986) (Nabil y Mardaljevic, 2005) (Wong, 2017).

Se debe tener en cuenta las propiedades de los materiales, tales como el espesor, color, transparencia y transmitancia del vidrio, ya que influye en los niveles de iluminación y en las ganancias por radiación directa. Es por ésto que, el modelado paramétrico combinado con la realización de simulaciones y optimización de las alternativas de diseño permite auto-

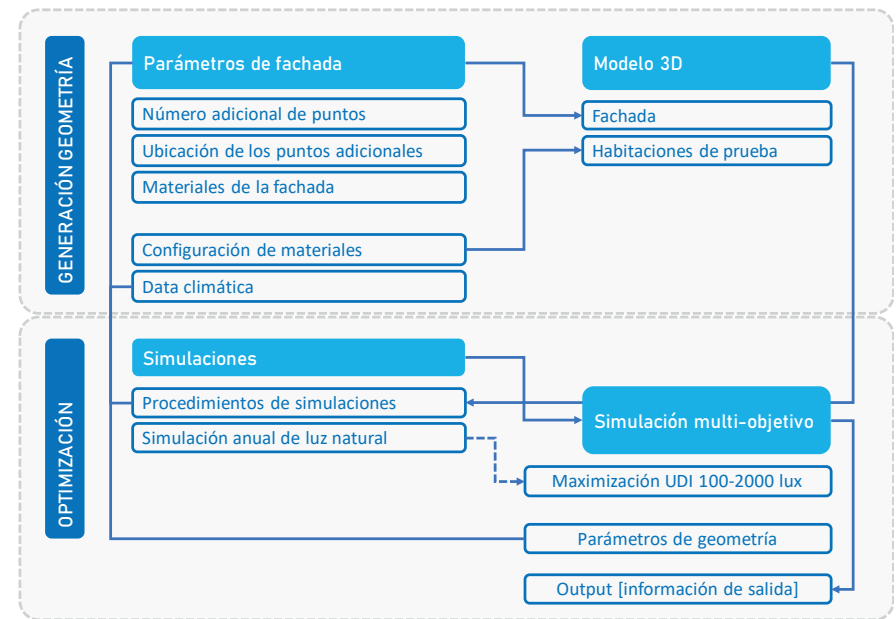


Imagen 56.  
Diagrama del sistema de optimización y generación de unidades de fachada 3D.  
Fuente: Edición y traducción a partir de la revisión de Narangerel, Lee y Stouffs (2016).

matizar la generación e iteración de los parámetros de la piel (Puigdomenech, Cusidó y Porta, 1986) (Narangerel, Lee y Stouffs, 2016) (Wong, 2017). En términos de parametrización, la optimización del diseño interior es posible mediante la aplicación de algoritmos evolutivos (mutables), en conjunto con las simulaciones de rendimiento lumínico y energético del edificio, con el objetivo de jerarquizar y seleccionar la forma adecuada que tendrán los elementos constructivos, siguiendo una lógica multiobjetivo que compara distintas soluciones en torno a diversos parámetros variables en combinación con atributos que se mantienen fijos o constantes (Turrin, Von Buelow y Stouffs, 2011).

## 3.2. Magnitudes Fotométricas.

Para efectuar un análisis lumínico adecuado, es necesario conocer algunos términos básicos, relacionados con las magnitudes y unidades de iluminación natural, para lograr así, un mayor entendimiento de los efectos y control de la luz en los espacios diseñados que se detallan sintéticamente a continuación:

**Flujo luminoso:** Potencia total o cantidad de emisión de luz proporcionada por una fuente luminosa, cuyo símbolo es  $\Phi$  (phi) y unidad de medida en lúmen (lum).

**Intensidad luminosa:** Relación entre la emisión y dirección de la luz. En otras palabras, consiste en el cociente entre flujo luminoso emitido en un ángulo espacial infinitesimal, cuyo eje es la dirección de dicho ángulo. Además, cabe considerar que la intensidad de luz emitida en un cuerpo tendrá la sexagésima parte de 1 cm<sup>2</sup> a una temperatura de 2046 [°K]. Su símbolo es (I) y es medido en lumen/estereorradián o candela. (Roldán, 2017)

**Luminancia:** También llamada brillo luminoso, se le define como la cantidad de luz emitida por una superficie, es decir una intensidad luminosa por una unidad de área. Puede ser emitida o reflejada por otra fuente luminosa. Se simboliza con la letra (L) y se mide en candela/m<sup>2</sup>.

**Iluminancia:** La iluminancia es la medición de un flujo luminoso sobre una superficie. Roldán (2017) lo define como “la relación del flujo luminoso que cae sobre una superficie y el área de la misma.” En el sistema internacional de medidas su unidad es el lux (lx), el cual equivale a lm/m<sup>2</sup> (lúmen por metro cuadrado).

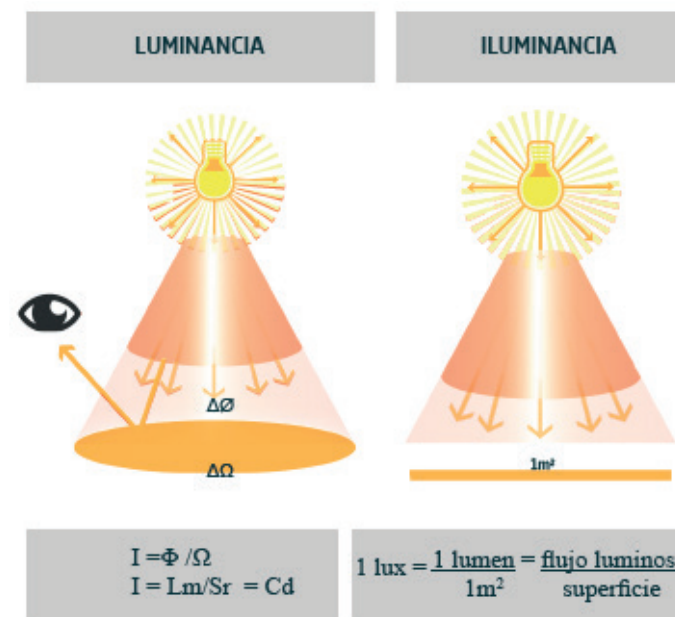


Imagen 57. Esquema de luminancia e iluminancia.  
Fuente: Soto, Pablo (2017)

**Contraste de luminancia:** Consiste en la diferencia existente entre la luminancia del objeto o detalle y la luminancia de fondo o entorno inmediato que puede ser atenuada en la etapa de diseño, mediante una selección adecuada de materiales regulando los niveles de reflectividad de las superficies con el fin de potenciar la comodidad visual de los espacios, al mantener el contraste dentro de límites tolerables (Gilchrist, 2013).

Este término posee una importante relevancia en los sistemas de iluminación interior, ya sea natural o artificial, ya que determina la percepción del entorno por diferencias de luminancias entre objetos o detalles y el fondo o contexto. El adecuado control de dichas diferencias es de vital importancia para alcanzar el confort visual de un espacio (INSHT, 2015).



Según Karwowski (2001), se calcula mediante el cociente entre las diferencias de luminancia (de fondo menos detalle) y la luminancia de fondo:

$$C = (L_f - L_d) / L_f, \text{ donde } L_f > L_d$$

Donde:

C: contraste.

L<sub>f</sub> luminancia de fondo.

L<sub>d</sub> luminancia de detalle.

O bien, mediante la expresión:

$$C = (L_{\text{máx}} - L_{\text{mín}}) / (L_{\text{máx}} + L_{\text{mín}})$$

Donde:

L<sub>máx</sub>: Luminancia máxima.

L<sub>mín</sub>: Luminancia mínima.

Tanto el contraste de luminancias como las variaciones de brillo luminoso, en palabras más simples, el equilibrio entre luz - sombra o entre claro - oscuro, influyen directamente en la percepción visual del espacio, la visualización de los objetos, la comprensión de las profundidades, la complejidad de las configuraciones arquitectónicas, el desarrollo de la agudeza visual respecto a la adaptación del ojo humano para visualización los detalles y distinción de las formas o volúmenes, además de la adaptación a los distintos niveles e intensidades de iluminación (Rockcastle y Andersen, 2012).

Tener en cuenta tanto el contraste espacial y variabilidad de las luminancias es esencial para medir los niveles de percepción de la calidad de iluminación natural de un espacio arquitectónico y con ello la comodidad visual de los ocupantes (Rockcastle y Andersen, 2012).

### 3.3. Concepto y evolución de las métricas de confort lumínico.

Una métrica consiste básicamente en la combinación de mediciones y/o dimensiones, a partir de distintos factores que son representados en una escala continua, con el objetivo de predecir resultados comparativos de rendimiento y distribución de la iluminación natural de los espacios. Estas, son útiles en la etapa inicial de proyecto al momento de analizar en conjunto, las múltiples variables del entorno y las estrategias de diseño, a través del modelamiento y simulaciones (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009) (Reinhart, Mardaljevic y Rogers, 2006).

Una de las simulaciones más habituales es el "Daylight Factor (DF) o Factor de Luz Día (FLD)", una métrica estática que data desde el año 1895 y expresa la relación porcentual entre la iluminancia interior (a la altura de plano de trabajo horizontal ubicado a 0,75 [m] del suelo) y la iluminancia exterior (sin obstáculos), bajo la suposición simplificada del contexto, esto es, cielo nublado o cubierto cielo nublado o cubierto (5.000-20.000 lux), según estándares CIE de la *Commission Internationale de L'Eclairage* (Comisión Internacional de Iluminación) (Omidfar, 2017) (Piderit, Cauwerts y Díaz, 2014) (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009).

Esta es definida por la siguiente expresión:

$$\text{FLD} = \frac{\text{Iluminancia Interior}}{\text{Iluminancia Exterior}} \times 100$$

Imagen 58. Daylight Factor (DF) o Factor Luz Día (FLD), expresa relación porcentual de iluminancias bajo condiciones de cielo nublado.  
Fuente: Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica de Piderit, Cauwerts y Díaz (2014)

Al analizar los espacios mediante esta métrica se obtienen valores mínimos de iluminación establecidos en diferentes normas y certificaciones, a través de dos métodos de simulación, FLD punto (*Point DF*) y/o FLD promedio (*Average DF*). Este último, abarca un rango que va desde 2% al 5%, para predecir la disponibilidad de iluminación natural con niveles aceptables que desprecian los efectos de la orientación del edificio y la luz solar directa (Wong, 2017).

Bülow-Hübe (2001), estableció una escala de valorización de los porcentajes de FLD que es citada en los Términos de Referencia Estandarizados de Eficiencia Energética y Confort Ambiental de la DA MOP y se presenta a continuación:

FACTOR LUZ DÍA [ FLD ]	
Valorización FLD	Porcentaje (%)
INSUFICIENTE	< 1,0
MÍNIMO	= 2,0
ACEPTABLE	2,0 - 5,0
IDEAL	5,0 - 10,0
INACEPTABLE	> 10,0

Imagen 59. Tabla de valorización de los porcentajes del Factor Luz Día (FLD)  
Fuente: Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica de Bülow-Hobe (2001) en TDR DA MOP (2011)

Cabe mencionar que de acuerdo a esta escala de valorización, hay riesgos de deslumbramiento en el espacio interior, cuando se excede el límite superior, vale decir, cuando el espacio interior supera el FLD al 10% que es inaceptable, alcanzando un nivel de brillo luminoso intolerable y por ende, es altamente probable que el usuario del recinto sufra de incomodidad visual y con ello fatiga visual (Bülow-Hübe, 2001).

Sin embargo, según la CIBSE (2019) - *Chartered Institution of Building Services Engineers* (Instituto de Ingenieros de Edificios de Servicio, el factor de luz día medio recomendado para los distintos usos o programas de actividades que se realizan en el interior de los espacios públicos es el siguiente:

FACTOR LUZ DÍA [ FLD ]	
Recinto	Porcentaje (%)
OFICINAS	2,0 - 5,0
AULAS	2,0 - 5,0
GIMNASIOS	3,5 - 5,0
BIBLIOTECAS	1,5 - 5,0

Imagen 60. Factor Luz Día Medio (FLD) según usos de espacios públicos.  
Fuente: Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica de CIBSE (2019).

Es importante tener en cuenta que el Factor Luz Día se creó con el objetivo de evaluar sólo el cumplimiento de estándares mínimos de iluminación natural y que excluye la fluctuación real de iluminancias o los niveles de iluminación diurna que poseen un carácter dinámico, es decir, discrimina las variaciones de la luz producidas por la interacción entre sol, cielo, condiciones climáticas, geometría y propiedades físicas, tanto en el espacio interior como en el contexto exterior (Reinhart, Mardaljevic y Rogers, 2006) (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009) (Piderit, Cauwerts y Díaz, 2014).

En consecuencia, ésto último implica que, se pueden provocar errores de diseño relacionados con la proyección de altas proporciones de vacío o transparencia, repercutiendo en la presencia de altos índices de sobrecalentamiento y deslumbramiento, más gravemente, en aquellas latitudes donde predominan los cielos parcialmente despejados y soleados, del orden de 70.000 y 120.000 lux, respectivamente (Piderit, Cauwerts y Díaz, 2014) (Wong, 2017).

Ésto último se debe a que la luz posee una naturaleza variable, dinámica y fluctuante, en términos de iluminancias o brillo luminoso, especialmente, en aquellas zonas donde los climas son mediterráneos, como lo es Santiago de Chile, estableciendo la necesidad de realizar simulaciones que consideren el comportamiento luminoso de acuerdo al clima local y por ende, a dichos cambios en las condiciones de luminosidad del cielo del lugar de emplazamiento (Nabil y Mardaljevic, 2005).

Por estos motivos, es necesario, indagar en la evolución de las métricas lumínicas que consideran dichas diferencias, es decir, en aquellas que poseen un carácter dinámico, haciendo mayor hincapié en las que permitirán llevar a cabo, la evaluación de los proyectos en su etapa inicial de diseño, considerando las estadísticas climáticas anuales del contexto

o modelado de iluminación natural basado en el clima (*CBDM - Climate Based Daylight Modelling*), para estimar, a grandes rasgos, la cantidad, la calidad y la disponibilidad de la luz natural en intervalos de tiempo determinados (horas, días, mes, temporada, año), basados en los datos meteorológicos históricos de a lo menos 30 años (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009) (Piderit, Cauwerts y Díaz, 2014) (Reinhart, Mardaljevic y Rogers, 2006) (Roldán, 2016).

Cabe mencionar que, en la medida que han evolucionado las metodologías de simulación en torno al modelamiento de los espacios interiores, se ha progresado en relación a las métricas de evaluación de calidad y confort lumínico - visual. Estas últimas, combinan matemáticamente distintos parámetros en torno a los factores incidentes de la medición en una escala continua; permitiendo así, establecer criterios de evaluación del comportamiento de los recintos, que conllevan a una mejor toma de decisiones, cuando se realizan optimizaciones y comparaciones entre las alternativas de diseño, seleccionando la más conveniente en términos de desempeño (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009).

En palabras más simples, las métricas de iluminación natural son datos numéricos obtenidos mediante simulaciones que sirven para analizar el rendimiento lumínico - visual. Algunas de éstas han sido contempladas en distintas certificaciones, de carácter nacional e internacional, tales como CES (Certificación de Edificio Sustentable) y LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*), respectivamente y sólo por nombrar algunas que, tiene el objetivo de promover la habitabilidad de los espacios interiores.

Una de las primeras métricas de evaluación dinámica de la luz diurna es *Daylight Autonomy* (DA) o Autonomía Lumínica, creada en 1989 por la *Association Suisse des Electriciens* (Asociación Suiza de Electricistas), la que

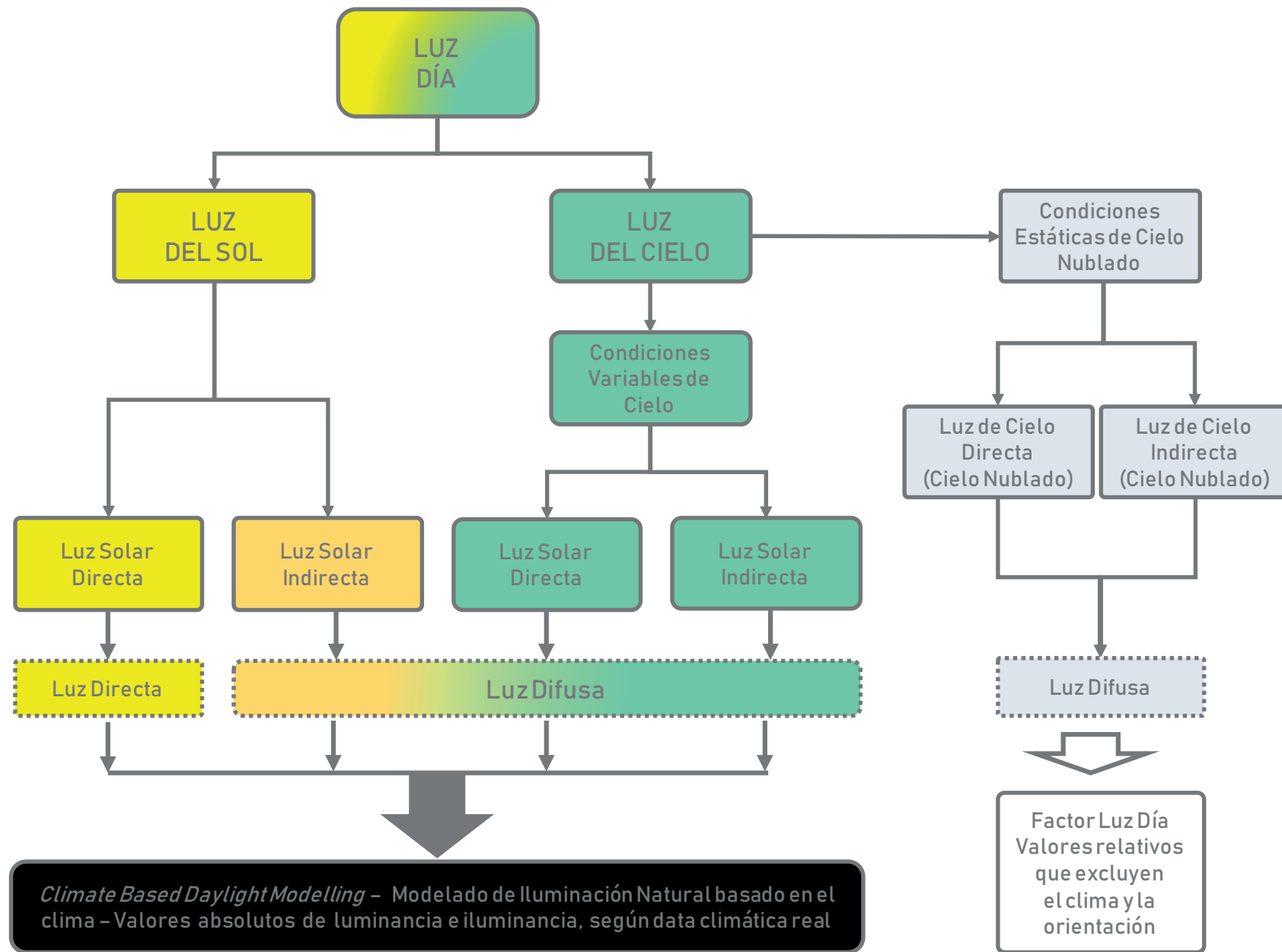


Imagen 61. Comparación entre los modelos de cálculo de métricas estática y dinámica; Fuente: Edición y traducción propia del esquema de Mardaljevic, Hescong y Lee (2009).

posteriormente fue adaptada y definida por Christoph Reinhart entre los años 2001 - 2004 como, la frecuencia o porcentaje anual de las horas en que los recintos poseen un determinado nivel de iluminancia, medidas a la altura del plano de trabajo, considerando sólo como fuente de iluminación la luz natural (Omidfar, 2017) (Reinhart, Mardaljevic y Rogers, 2006).

DA puede utilizarse en el análisis de modelos a escala, ya que considera la información meteorológica, tomando en cuenta tanto la radiación directa y difusa anual, lo que permite deducir cuántas horas los recintos diseñados estarán por sobre un nivel lumínico establecido, 300 [lux], según metodología IES LM-83-12 , con el objetivo de evaluar un rendimiento lumínico mínimo y por ende, propiciando el ahorro de energía eléctrica (Mardaljevic, Heschong y Lee, 2009).

Sin embargo, esta métrica excluye la visualización de los valores que están por debajo del mínimo establecido, es decir, aquellos recintos que poseen valores de iluminancia inferiores a 300 [lux]), hecho que podría conllevar a una iluminación natural deficiente para determinadas tareas específicas, debiendo complementarse con el uso de luz artificial, durante el transcurso del día (Piderit, Cauwerts y Díaz, 2014).

Para evitar aquello, Reinhart, Mardaljevic y Rogers (2006) señaló que es posible efectuar un análisis, en torno a la Autonomía Lumínica Continua (DAcon) que expresa el porcentaje de horas en que un recinto posee valores de iluminancia que son inferiores a los esperados, considerando aquellos que están por debajo del umbral de 300-500 [lux] (Lindelöf y Morel, 2006) (Reinhart y Voss, 2003) u otro valor determinado por el diseñador al momento de realizar las simulaciones, conforme a los estándares y normativas para determinados recintos, según el uso o programa para el cual está diseñando aquel espacio.

Conjuntamente es posible además, realizar la medición de la Autonomía Lumínica Máxima (DA<sub>máx</sub>), que determina 3000 [lux] como iluminancia máxima u otro valor correspondiente a diez veces el valor establecido en normas y estandarizaciones para un uso determinado; lo que permite inferir la ocurrencia de la luz solar excesiva y directa. En otras palabras, esta métrica mide el porcentaje en que el lugar supera dicho umbral, haciendo posible deducir iluminancias o flujos luminosos intolerables, que provocan malestares por sobrecalentamiento, deslumbramiento y sobreexposición a la luz solar en el interior (Rogers y Goldman, 2006) (Kota y Haberl, 2009) (Piderit, Cauwerts y Díaz, 2014).

Una métrica similar a DA, es la propuesta por Nabil y Mardaljevic (2005), denominada *Useful Daylight Illuminance* (UDI) o Iluminancia Diurna Útil, la cual establece rangos de flujo luminoso apropiado en términos de comodidad visual de los ocupantes, que determina el porcentaje de ocurrencia anual de iluminancia en cuatro tramos:

- UDI-f (*fell short*) [0 – 100 lux] iluminación insuficiente.
- UDI-s (*supplementary*) [100 – 500 lux] requiere energía eléctrica.
- UDI-a (*autonomous*) [ 500 – 2,000 lux] no requiere energía eléctrica.
- UDI-e (*exceeded*) [ $>2,000$  lux] inconfortable: brillo, sobrecalentamiento.

Más adelante, se discutirían los valores de los tramos UDI, antes señalados, con la investigación realizada por Mardaljevic, Andersen, Roy y Christoffersen (2012) que, tuvo por objetivo indagar en la implicancia de los niveles de iluminancia y la variable DGP (*Daylight Glare Probability*), relacionada a la comodidad visual de los ocupantes, es decir, la iluminancia diurna útil en función del porcentaje de ocurrencia de niveles de brillo luminoso que se consideran intolerables, concluyendo que 100 y 3000 [lux] serían los nuevos valores límites, para UDI-s y UDI-e (UDI suplementaria y excedida, respectivamente)(Piderit, Cauwerts y Díaz, 2014).

Cabe mencionar que se profundizará en el factor DGP, posteriormente en este capítulo, al definir las variables que tienen directa relación con el confort visual, precisando los porcentajes y escala determinada por Wienold en el año 2009.

En consecuencia, se infiere que un diseño óptimo, en términos de iluminación natural alcanza un gran porcentaje de UDI-a y bajo de UDI-e, vale decir, el espacio alcanza mayormente un rango de 500 - 3000 [luxes], sin exceder el límite superior de éste en una superficie determinada (Nabil y Mardaljevic, 2005)(Mardaljevic,2006).

El mismo año, el 2012, la *Illuminating Engineering Society* (Sociedad de Ingeniería en Iluminación), mediante la publicación y difusión de la norma IES LM-83-12, implementó dos métodos válidos de evaluación de la luz diurna: Autonomía Lumínica Espacial (sDA - *Spatial Daylight Autonomy*) y la Exposición Solar Anual (ASE - *Annual Sunlight Exposure*) (Djunaedy, Mahić y Van Den Wymelenberg, 2013) (Mahić y Nezamdoost, 2017) y adoptadas por LEED v4, son explicadas a continuación:

- La primera, sDA, es una métrica anual que mide el porcentaje de superficie que está iluminado con luz natural suficiente de al menos 300 [lux] durante el 50% del las horas de ocupación, considerando un período estándar que abarca desde las 8 A.M. hasta las 6 P.M., utilizando un sistema de grilla o cuadrículas con sensores de iluminancia de 600 [mm], cada hora en un plano de trabajo horizontal ubicado a una altura de 0,76 [m]. (Heschong y Van Den Wymelenberg, 2016)(Nezamdoost y Van Den Wymelenberg, 2015)(LEED, 2014).

Un espacio que posee un valor de sDA 300/50% mayor al 75% es lumínicamente confortable, ya que sus ocupantes preferirán el uso de iluminación natural por sobre la artificial, mientras que uno que alcanza entre el

55% y 75% es nominalmente aceptable. Por ende, todo arquitecto debe aspirar a alcanzar como mínimo el 75% y en lo posible acercarse al 100% de sDA, para que exista un verdadero ahorro de energía eléctrica (Mahić y Nezamdoost, 2017)(Heschong,2012).

- La segunda, ASE, es otra métrica anual que está enfocada para el análisis de situaciones en que el potencial lumínico es elevado, con el fin de identificar el riesgo máximo de exposición a la luz solar directa, que influye en el disconfort por deslumbramiento y ganancias térmicas, razón por la cual, complementa las mediciones de sDA y UDI - e, al registrar las zonas que poseen una iluminación natural por sobre los límites recomendables, teniendo como límite según investigaciones 1000 [luxes] en al menos 250 [hrs.] al año (Mahić y Nezamdoost, 2017)(Heschong,2012).

Al igual que sDA, los valores de ASE varían de 0 a 100 % según metodología LM - 83 - 12 de la IES (*Illuminating Engineering Society*), cuyo fin radica en reducir los efectos de sobrecalentamiento o estrés térmico y la probabilidad de que exista deslumbramiento por exceso de brillo luminoso. Se debe lograr en lo posible que estos porcentajes sean inferiores a 4%, para que no exista incomodidad visual por insuficiencia de radiación solar y que éstos no excedan el 20%, de lo contrario, se requerirá mejorar los sistemas de control solar y sombreado de carácter permanente (Mahić y Nezamdoost, 2017) (LEED, 2014). Según Heschong (2012), existen distintos tramos para el análisis de ASE, considerando la cantidad de horas de exposición solar:

- Grado A - Preferido, menor a 300 horas.
- Grado B - Aceptable, mayor a 300 y menor a 600 horas.
- Grado C - Provisional, mayor a 600 y menor a 900 horas.
- Grado F - Inaceptable, mayor a 900 horas.

Donde los dos últimos, C y F, requieren incluir sistemas avanzados de fenestración para mejorar el confort visual del ocupante.

### 3.4. Confort visual: conceptos y metodologías de evaluación.

La visión es el proceso en que el ojo humano detecta e interpreta la energía radiante proveniente de la luz, dependiendo de tres factores que determinaran el grado de visión: la sensibilidad del ojo, la agudeza y el campo visual (Zomorodian y Tahsildoost, 2019).

Los elementos arquitectónicos que regulan el ingreso de radiación solar hacia el interior se les conoce como dispositivos de sombreado o de control solar, los que para ser optimizados, son diseñados según iluminancias horizontales y verticales, en particular, considerando las métricas UDI-e y DGP, cuya relación será señalada más adelante (Garretón, Villalba, Monteolvida, Pattini, 2015).

La Comisión Internacional de iluminación (CIE S 008/E, 2000) sostiene que el confort visual está asociado al control de 6 aspectos importantes, que se enuncian a continuación: distribución de luminancias, iluminancias, direccionalidad de la luz, aspecto del color de la luz, aspectos de reflectividad de superficies y deslumbramiento.

El deslumbramiento, se expresa típicamente como la relación entre el tamaño, la ubicación y la luminancia de las fuentes del brillo luminoso en un campo visual [1] (Jakubiec y Reinhart, 2012).

La luz diurna tiene mayor probabilidad de ser optimizada en torno al desempeño de confort visual que la iluminación artificial, ya que es proporcionada en grandes cantidades por la radiación solar, abarcando un rango de espectro electromagnético considerable (Garretón, Villalba, Monteoliva y Pattini, 2015). No obstante, el deslumbramiento puede causar incomodidad y fatiga visual, provocado por los altos niveles de

luminancias en el campo visual del observador, ya sea por reflexión directa e indirectamente reflejada en las superficies interiores del recinto, alcanzando valores superiores a los de adaptación del ojo humano.

Ésto último, genera dificultades en el usuario, tales como, la disminución de la capacidad de distinción de los objetos sin afectar necesariamente la visión de éstos, cuando se desarrollan las diversas actividades para el cual el recinto fue diseñado y en algunos casos más extremos, la detención o cese de éstas (Jakubiec y Reinhart, 2012)(Pierson, Wienold y Bodart,2017).

Para el análisis de incomodidad visual a causa del deslumbramiento por brillo luminoso, se deben tener en cuenta ciertas magnitudes fotométricas, condiciones de iluminación y percepción del observador, tales como el flujo luminoso (emisión de luz por unidad de área), el nivel de adaptación visual del ojo humano , el ángulo sólido de la fuente luminosa, el índice de posición o factor de corrección, además del desplazamiento horizontal y vertical desde la línea de visión del observador que influirán en dicho discomfort (Pierson, Wienold y Bodart,2017).

Según Pierson, Wienold y Bodart (2017) y Kleindienst y Andersen (2009) para evaluar el confort o comodidad visual, habitualmente, se utilizan distintas métricas brillo luminoso obtenidas mediante diversos estudios, estadísticas y cuantificaciones de laboratorio con implementos de medición de los niveles de iluminación, destacándose principalmente dos debido a la congruencia de aquellas simulaciones realizadas en computador y las mediciones con aparatos: *DGI (Daylight Glare Index)* y *DGP (Daylight Glare Probability)*, por sobre los 5 índices restantes: *VCP (Visual Comfort Probability)*, *UGR (Unified Glare Rating)*, *BGI (British Glare Index)*, *CGI (CIE Glare Index)* y *DGR (Discomfort Glare Rating)*, los cuales carecen de desarrollo en términos de *sotwares* y *plugins* de iluminación.

Esto último es respaldado también por la Comisión Internacional de iluminación (CIE S 008/E, 2000), quienes señalan que el deslumbramiento es uno de los factores que requieren mayor control a la hora de iluminar con luz natural e indican como métodos más validados el DGI propuesto por Hopkinson en el año 1971 y DGP por Wienold & Christoffersen el 2006. (Pierson, Wienold y Bodart, 2018).

En lo que respecta a estas métricas, todas ellas son medidas a nivel del ojo del ocupante, preferencialmente a 1,5 [m] (Jakubiec, 2018). De las dos últimas, es importante señalar que la diferencia recae en la situación en la cual es aplicada cada una. En el caso de DGI, éste un indicador ideal para ser utilizado en espacios donde la radiación es controlada, sea por el hermetismo de la forma o presencia de luz difusa observable sólo a través de los vanos del edificio, vale decir, en recintos donde no existe la posibilidad de que la radiación directa ingrese en el interior; en cambio, DGP es utilizado más ampliamente, ya que es el que mejor predice situaciones con exposición e ingreso de luz solar directa, visible en toda la habitación (Jakubiec y Reinhart, 2012) (Yamin, Rodríguez, Ruiz y Pattini, 2014) (Jakubiec y Reinhart, 2011).

Fundamentalmente, esta última métrica, DGP, compara áreas de alta luminancia con respecto a la iluminancia vertical recibida por el ojo humano, por lo que el deslumbramiento, depende de valores absolutos, relativos y de contraste lumínico, habitualmente expresado como relaciones de luminancias de detalle y fondo. La IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*) indica que la relación recomendada de luminancias entre la fuente y la tarea realizada debe ser 20:1 (DiLaura, Houser, Mistrick y Steffy, 2010), aunque autores señalan que algunos ocupantes toleran una razón de 50:1, en base a simulaciones que operan con cálculo matricial de la fórmula introducida por Wienold y Christoffersen en el año 2006 (Van Den Wymelenberg e Inanici, 2014), señalada en la página

adjunta [2], junto a la opción simplificada, DGPs [3], validada por las investigaciones realizadas por J. Alstan Jakubiec en el año 2018, quien experimentó con 720 modelos distintos con simulaciones basadas en diferentes datas climáticas (CBDM's), utilizando diversos dispositivos de sombreado (Jakubiec, 2018). Para ello comparó los resultados en torno a 3 métricas de brillo desarrolladas hasta ese entonces:

- UGR: *Unified Glare Rating*, introducida por la CIE en el año 1995.
- DGP: *Daylight Glare Probability*, ideada por los autores Jan Wienold y Jens Christoffersen en el año 2006.
- DGPs: *Daylight Glare Probability Simplified*, difundida por Jan Wienold en el año 2009.

Cabe mencionar que UGR, a diferencia de DGP y DGPs, calcula el brillo en base al exceso de contraste de iluminancias, considerando tanto la iluminación natural como la iluminación artificial combinadas en los recintos interiores - al igual que VCP y CGI (Suk, Schiler, Kensek, 2016) (Pierson, Wienold y Bodart, 2017) (Kleindienst y Andersen, 2009).

UGR sólo es mencionada para conocimiento en esta tesis, ya que está fuera del alcance del foco de la investigación, restringiéndose al desempeño lumínico visual por concepto aprovechamiento de luz solar; sin embargo, es importante saber que en aquellos casos en que el estudio de iluminancias anuales a través de UDI-a (autonomous) sea porcentualmente bajo, es conveniente desarrollar el análisis de brillo luminoso en torno a esta métrica, determinando el grado de uniformidad u homogeneidad de las luminancias del espacio, considerando la luz día e iluminarias según la distribución que éstas tengan con simulaciones en *Evalglare* u otros, que incluyan la evaluación de fotografías de alto rango dinámico (*High Dynamic Range*) con esquemas de falso color (*false color*) (Jakubiec, 2018) (Suk y Schiler, 2013) (Suk, Schiler, Kensek, 2016).



Según Jakubiec y Reinhart (2012), en las ecuaciones de [1] a [3] de la imagen contigua, las expresiones corresponden a:

- $L_b$ : luminancia de fondo [ $cd / m^2$ ].
- $L_s$  es la luminancia de la fuente de contraste [ $cd / m^2$ ].
- $\omega$  es el tamaño del ángulo sólido percibido de la fuente de deslumbramiento en el campo visual.
- $E_v$  es la vertical iluminancia ocular [lux].
- $P$  es el índice de posición de Guth o desplazamiento horizontal del campo de visión [m].

De las tres ecuaciones se infiere que:

- $G$  posee sólo un término en relación al contraste [1].
- $DGP$  está compuesto por tres términos: la iluminancia, el contraste y un valor constante [2].
- $DGP_s$  tiene dos términos: la iluminancia y una constante [3].

En palabras simples, Jakubiec (2018) señala que el término de iluminación relaciona el brillo total de la escena con la comodidad y el de contraste explica la incomodidad debido a la variación de luminancias y la constante informa que es probable que el 16% ó 18% de las personas se sientan incómodas visualmente, sin importar cual sea la calidad de la iluminación, según valores de las constantes de las fórmulas  $DGP$  [2] y  $DGP_s$  [3]. Dichas constantes fueron determinadas en base a resultados que comprenden la comparación entre mediciones con herramientas de medición, encuestas entre los ocupantes y finalmente, cruzados con los resultados obtenidos mediante el uso de *softwares* para las distintas simulaciones, que operan realizando en forma automatizada los cálculos matemáticos mediante matrices que son ingresadas y programadas mediante códigos secuenciales denominados *Scripting*, razón por la cual es posible afirmar que estos valores numéricos ya han sido validados o comprobados mediante el cruce de información y estos datos.

### Glare

$$G = \sum_{i=1}^n \frac{L_{s,i} \omega_{s,i}}{L_b P_i} \quad \left. \vphantom{\sum} \right\} \text{término de contraste} \quad (1)$$

### Daylight Glare Probability

$$DGP = 5,87 \times 10^{-5} E_v + 9,18 \times 10^{-2} \log_{10} \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{L_{s,i}^2 \omega_{s,i}}{E_v^{1,87} P_i^2} \right) + 0,16 \quad (2)$$

término de iluminación
término de contraste
constante

### Daylight Glare Probability Simplified

$$DGP_s = 6,22 \times 10^{-5} E_v + 0,184 \quad (3)$$

término de iluminación
constante

Imagen 62-64. Fórmulas de métricas de brillo luminoso: Glare, DGP,  $DGP_s$ . Fuente: Edición a partir de revisión de Jakubiec y Reinhart (2012) y Jakubiec (2018).

Se desprende que la medición de DGPs [3] está enfocada a dar resultados numéricos ínfimamente cercanos a la ecuación completa de DGP y que según Jakubiec (2018) proporciona diferencias insignificantes con porcentajes de error inferiores al 2,1%, lo que no implica la necesidad de realizar grandes cambios en la forma de los espacios diseñados.

Según Wienold (2009) y Jakubiec y Reinhart (2010), determinaron una serie de rangos de brillo luminoso en función de la comodidad visual que sienten habitualmente los ocupantes de los espacios interiores, validados mediante el cruce de resultados entre simulaciones y encuestas realizadas a los usuarios de 349 edificios de servicio público que incorporaban gran aglomeración de personas. Cabe mencionar que esta escala, está ampliamente difundida en distintos *softwares* de evaluación del disconfort por deslumbramiento y contraste luminoso excesivo, ya sea DGP/DGPs/DGI o UGR/CGI, respectivamente (Konstantzos y Tzempelikos, 2014).

Dichos rangos son expresados en la siguiente tabla y serán considerados como porcentajes de referencia a considerar en el siguiente capítulo de análisis de los resultados y lineamientos, respecto a la evaluación de un modelo estudio y las respectivas modificaciones de diseño.

<b>DGP</b>	<b>IMPERCEPTIBLE</b>	<b>PERCEPTIBLE</b>	<b>PERTURBADOR</b>	<b>INTOLERABLE</b>
<b>DGPs</b>	≤ 0,35	0,35 - 0,40	0,40 - 0,45	≥ 0,45
<b>DGI</b>	<b>IMPERCEPTIBLE</b>	<b>PERCEPTIBLE</b>	<b>PERTURBADOR</b>	<b>INTOLERABLE</b>
	< 18	18 - 24	24 - 31	> 31
<b>UGR</b>	<b>IMPERCEPTIBLE</b>	<b>PERCEPTIBLE</b>	<b>PERTURBADOR</b>	<b>INTOLERABLE</b>
<b>CGI</b>	< 13	13 - 22	22 - 28	> 28

Imagen 65. Calificación del brillo luminoso, mediante rangos.  
Fuente: Edición a partir de revisión de Jakubiec y Reinhart (2010).

En dichas investigaciones se utilizaron simulaciones de Radiance, un programa en constante desarrollo y perfeccionamiento que fue creado por Greg Ward mediante programación de *Scripting* que permite adicionar distintos cálculos matriciales. Éste ha sido ampliamente validado debido a la rigurosidad y precisión de los cálculos al ser comparados con otras mediciones. Cabe señalar que *Radiance* utiliza el método "Monte Carlo ray tracing based" que permite considerar la reflexión difusa y especular, obteniendo resultados de iluminancias e iluminancias, con gráficas de falso color, cada vez más próximas a la realidad, además del cálculo de diversas métricas dinámicas (Roldán, 2016).

Según señala Wienold (2009) y nueve años más tarde, Jakubiec (2018), es importante considerar que en aproximadamente el 93,1% de los casos, UDI - e (*Useful Daylight Illuminance*) coincide con los porcentajes intolerables de disconfort visual por deslumbramiento; mientras que los 5,8% y 1,1% restantes, superan o están por debajo de dichos umbrales límites definidos para el cálculo de probabilidad de brillo luminoso mediante las métricas DGP y DGPs, pudiendo variar de 0.35 a 0.38%, de 0.40 a 0.42% y de 0.45 a 0.53% ó 0.01% menos en cada uno de ellos, medidos en distintos modelos de sombreado.

Según Jakubiec (2018) y Konstantzos y Tzempelikos (2014), la mayor diferencia entre DGP y DGPs, ambos basados en el cálculo de iluminancias verticales, radica en que la primera proporciona datos muchos más confiables que la segunda, cuando la evaluación corresponde a una fachada con transmisión y reflexión directa en la dirección del observador, para todos los otros casos excluyentes de dicha situación, es posible utilizar, sin grandes variaciones, el cálculo de cualquiera de las dos métricas de brillo luminoso mencionadas. Finalmente, es posible inferir que debido a la complejidad y extensión de la fórmula de DGP por DGPs, éste último contempla menos tiempo, desde allí su nombre.

### 3.5. Revisión de parámetros de configuración de materiales para la obtención de los resultados.

Es importante establecer criterios comunes en torno a las simulaciones, de acuerdo con las propiedades de los materiales, según distintos grados de reflectividad y transmitancia, aplicados en los distintos elementos constructivos, para las evaluaciones de iluminación natural y las ganancias térmicas, respectivamente; razón por la cual, se consideran:

#### Nabil y Mardaljevic (2005) y Reinhart (2018)

- 0,70 en la reflectividad de las paredes.
- 0,80 en la la reflectividad de las techumbres o cubiertas.
- 0,20 en la reflectividad de los pisos y una transmitancia variable entre 0,50 - 0,75.
- 0,80 en la la reflectividad de las ventanas del recinto.

#### Reinhart, Mardaljevic y Rogers (2006)

- 0,60 en la reflectividad de las paredes.
- 0,80 en la la reflectividad de las techumbres o cubiertas.
- 0,30 en la reflectividad de los pisos.
- 0,40 - 0,60 - 0,80 en la la reflectividad de las ventanas del recinto.
- 0,40 - 0,50 en celosías venecianas.
- 0,16 en paneles traslúcidos externos.
- 0,25 en el suelo de emplazamiento exterior.

#### Jakubiec y Reinhart (2012)

- 0,20 - 0,50 en la reflectividad de las paredes exteriores e interiores.
- 0,80 - 0,90 en la la reflectividad de las techumbres o cubiertas.
- 0,20 en la reflectividad de los pisos.
- 0,76 - 0,81 en la la reflectividad de las ventanas del recinto.

#### Rockcastle y Andersen (2012)

- 0,70 en la reflectividad de las paredes.
- 0,90 en la la reflectividad de las techumbres o cubiertas.
- 0,30 en la reflectividad de los pisos.

#### Ávila y Arias (2015):

- 0,15 - 0,35 cuando se utiliza cemento oscuro.
- 0,30 - 0,45 cuando se utiliza cemento claro.
- 0,60 - 0,70 cuando se utiliza acero inoxidable.
- 0,75 - 0,85 cuando se utiliza aluminio brillante.

#### Hasaan, Mahmoud y Elghazi (2015):

- 0,50 en la reflectividad de las paredes.
- 0,80 en la la reflectividad de las techumbres o cubiertas.
- 0,20 en la reflectividad de los pisos.
- 0,80 en la la reflectividad de las ventanas del recinto.

#### Roldán (2016):

- 0,28 en la reflectividad de los pisos y muros de hormigón armado gris
- 0,80 en la la reflectividad de las ventanas con vidrio incoloro, considerando 0,85 de transmitancia.

#### Jahanara y Fioravanti (2017)

- 0,50 en la reflectividad de las paredes.
- 0,80 en la la reflectividad de las techumbres o cubiertas.
- 0,20 en la reflectividad de los pisos.
- 0,65 en la la reflectividad de las ventanas del recinto.

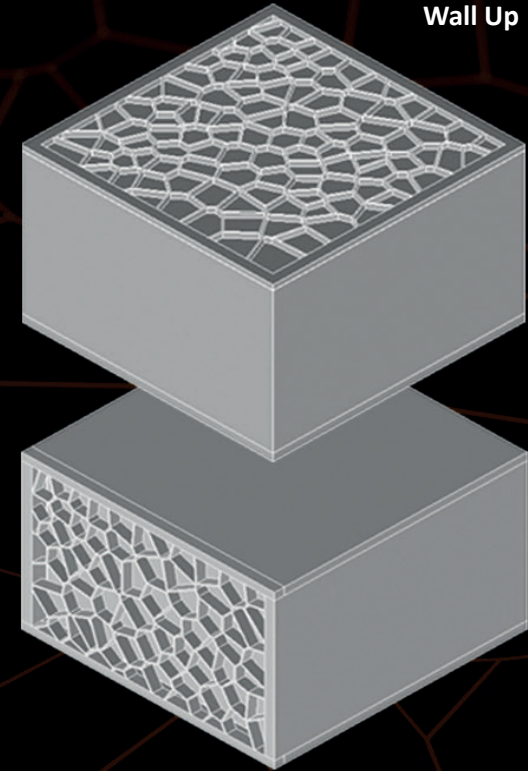
Existen valores de reflectividades concordantes: 0.2 en pisos; 0.50 en paredes; 0.80 en ventanas y cubiertas, razón por la cual los modelos a evaluar, consideran dichos coeficientes genéricos para los materiales.

MÉTRICAS DE ILUMINANCIAS	CONCEPTO	RANGOS, UMBRALES Y LÍMITES SUGERIDOS POR AUTORES
FACTOR LUZ DÍA (FLD)	Relación porcentual entre la iluminancia interior a la altura del plano de trabajo horizontal (0,75m) y la iluminancia exterior sin obstáculos en condiciones de cielo nublado o cubierto.	% < 1,0 : insuficiente % 2,0-5,0 : aceptable % 5,0-10,0: ideal % > 10,0: inaceptable
AUTONOMÍA DIURNA (DA)	Porcentaje de horas en que un recinto alcanza un umbral mínimo de iluminancia sólo con luz natural.	Mínimo: 300 [lux] Límite mínimo: 75-90%
AUTONOMÍA DIURNA CONTINUA (DAcon)	Porcentaje de horas en que un recinto tiene iluminancias inferiores al umbral mínimo.	Umbral mínimo: 300 - 500 [lux] Límite Máximo: 25%
AUTONOMÍA DIURNA MÁXIMA (DAmáx)	Porcentaje de horas en que un recinto tiene iluminancias superiores al máximo 3000 [lux] o algún otro valor a evaluar según lo establecido por normas y certificaciones.	Límite: 3000 [lux] u otro valor. Límite máximo: 10-20%
ILUMINANCIA ÚTIL DIURNA EXCEDIDA (UDI-e)	Porcentaje de horas en que un recinto tiene iluminancias superiores al máximo 3000 [lux], pudiendo afectar a la comodidad visual a causa de los niveles altos de brillo.	Límite: 3000 [lux] Límite máximo: 50%
ILUMINANCIA ÚTIL DIURNA AUTÓNOMA (UDI-a)	Porcentaje de horas en que un recinto cumple con un rango aceptable de iluminancias establecidas como suficientes.	Rango: 500-2000 [lux] Límite mínimo: 75-90%
ILUMINANCIA ÚTIL DIURNA SUPLEMENTARIA (UDI-s)	Porcentaje de horas en que un recinto tiene cumplimiento con un rango mínimo de iluminancias, debiendo complementarse con energía eléctrica.	Rango: 100-500 [lux] Límite mínimo: 50%
ILUMINANCIA ÚTIL DIURNA INSUFICIENTE (UDI-f)	Porcentaje de horas en que un recinto posee iluminancias inferiores a lo establecido.	Rango: < 100 [lux] Límite máximo: 10-20%
EXPOSICIÓN SOLAR ANUAL	Porcentaje de horas de iluminancias que exceden límites recomendados, pudiendo existir riesgos de deslumbramiento, sobrecalentamiento y estrés térmico.	Límite: 2000 ó 3000 [lux] Límite mínimo: 4% Límite máximo: 20%
AUTONOMÍA ESPACIAL DIURNA (sDA)	Porcentaje de horas en que un recinto posee cumple con un mínimo de iluminancias al menos el 50% de horas de ocupación.	Límite: 300 [lux] Límite mínimo: 50%

Imagen 66. Síntesis y relaciones entre métricas de iluminancias.  
Fuente: Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica.

04

Imagen de Fondo:  
Modelos iniciales +  
Voronoi Diagram,  
Wall Up



## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y LINEAMIENTOS

CASO ESTUDIO: ATRIOS EN EDIFICIOS PÚBLICOS

El siguiente capítulo da cuenta, previamente, de las variables climáticas y lumínicas de Santiago de Chile a considerar para la evaluación de los modelos de estudio y posterior comparación de las simulaciones realizadas en la presente tesis de investigación.

En primera instancia se desarrollan dos módulos de estudio de 5 x 5 x 3.5 [m] para ser evaluados lumínicamente en sus posiciones de envoltente más desfavorables, considerando la exposición solar de fachada norte y de la cubierta para luego verificar las estrategias de diseño lumínico existente para el caso de peor desempeño y así definir el caso estudio.

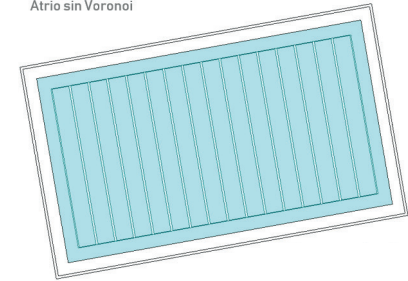
Luego se realiza una breve sinopsis del caso estudio (atrios públicos) y se precisan los siguientes detalles:

- a) configuración del modelo, en términos de dimensiones o parámetros.
- b) configuración de las propiedades de los materiales empleados para la obtención de resultados.
- c) herramientas de cálculo empleadas y metodología de análisis.
- d) configuración de las simulaciones.
- e) estándares de iluminación, a considerar para el análisis de resultados
- f) parámetros climáticos e iluminancia de cielo de Santiago.

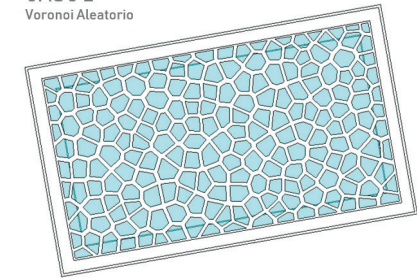
Todos esto con el fin de obtener los resultados y efectuar un análisis comparativo de 4 alternativas de diseño de cubierta:

- ATRIO SIN VORONOI.
- ATRIO CON VORONOI.
- ATRIO CON VORONOI ATRACTOR.
- ATRIO OPTIMIZADO.

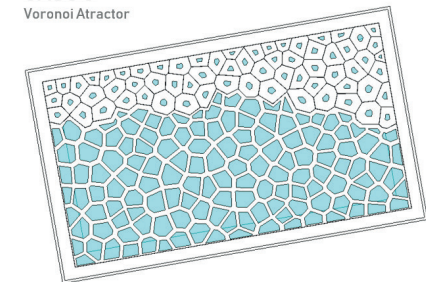
CASO 1  
Atrio sin Voronoi



CASO 2  
Voronoi Aleatorio



CASO 3  
Voronoi Atractor



CASO 4  
Voronoi Optimizado

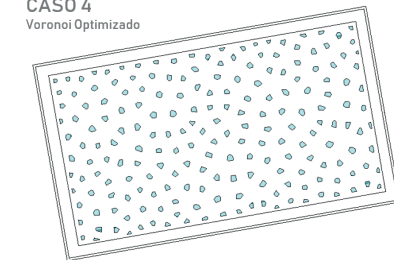


Imagen 90. Casos de Estudio  
Fuente: Elaboración propia.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Caso estudio: Atrios en edificios públicos.

#### 4.1. Exploración inicial y justificación del caso estudio

Un edificio público es aquella construcción de uso, dominio y accesibilidad es de carácter público, social, comunitario y colectivo que acoge diversas actividades en torno a la cultura, educación, trabajo, religión y comercio, entre otros; cuya propiedad jurídica compete al Estado, entidades privadas o instituciones mixtas. La principal característica de los edificios públicos recae en la convergencia y en el encuentro de gran aglomeración de personas que se reúnen entre si para desarrollar un objetivo en común (Borja, 1998)(Segovia y Dascal, 2000). Según los TDR de la DA MOP (2015) los clasifica de acuerdo al destino e institucionalidad de estas construcciones en cuatro tipologías:

- edificios de oficinas.
- edificios educacionales.
- edificios de salud.
- edificios de seguridad.

Posteriormente, teniendo en cuenta que los espacios de oficinas son comunes a las otras tres tipologías y en general, poseen una permanencia de gran número de personas, se desarrollaron dos módulos de carácter experimental de 5.0 x 5.0 x 3.5 [m], cada uno con 25 [m<sup>2</sup>] de superficie, conforme al promedio entre clase económica y confortable para 5 personas, según calculador SKEPP<sub>[1]</sub> que se rige de acuerdo a normas NTP 42 de ergonomía y habitabilidad. Cabe mencionar que para establecer la altura del volumen se consideró la máxima para pisos fijada en la O.G.U.C. en el artículo 2.1.23.

[1] WEB: <https://skepp.com/es/blog/consejos/cantidad-de-metros-cuadrados-por-persona-que-necesitas-para-la-oficina>

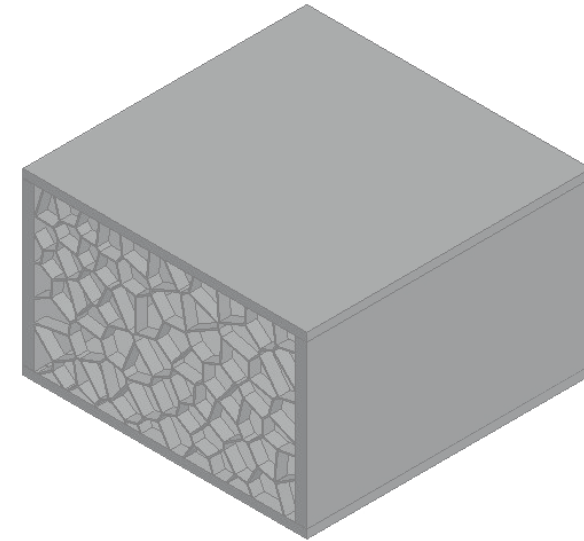


Imagen 67. Módulo de Prueba 5 x 5 x 3 [m] con algoritmo voronoi en la fachada norte  
Fuente: Elaboración propia con Rhinoceros - Grasshopper - Revit.

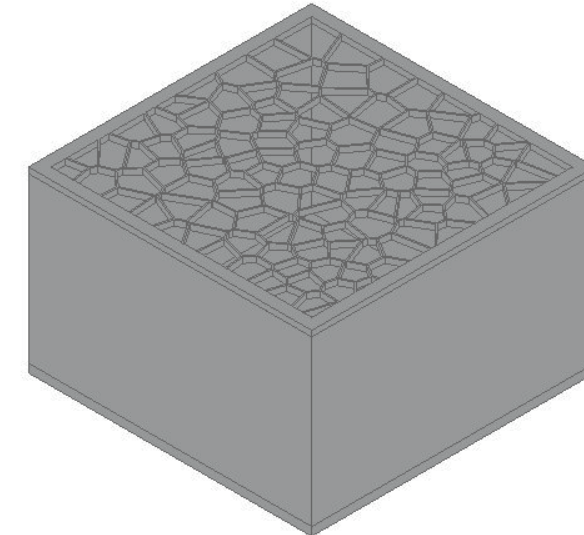
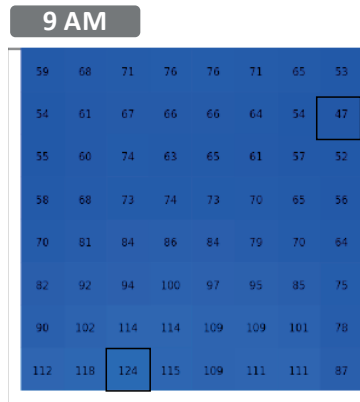
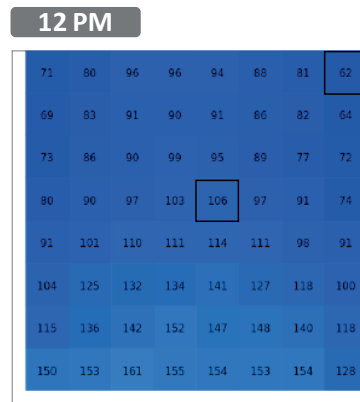


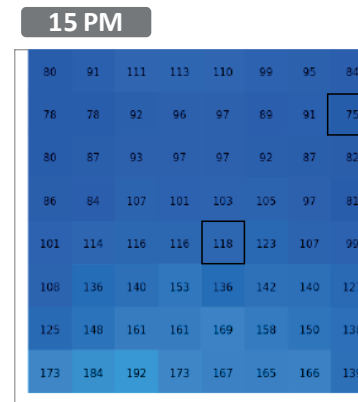
Imagen 68. Módulos de Prueba 5 x 5 x 3 [m] con algoritmo voronoi en la cubierta  
Fuente: Elaboración propia Rhinoceros - Grasshopper - Revit.



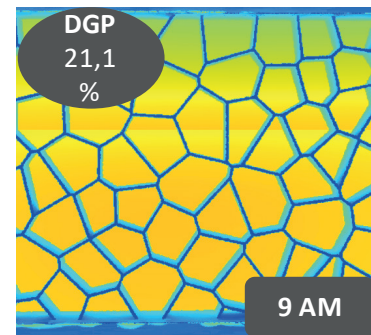
**Máximo: 124,06 lux**  
**Promedio: 79,45 lux**  
**Mínimo: 46,94 lux**



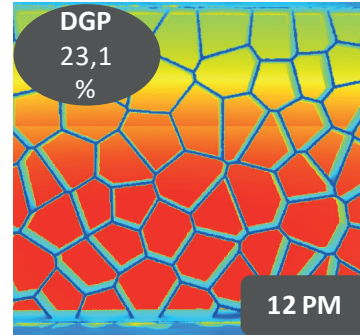
**Máximo: 160,80 lux**  
**Promedio: 107,14 lux**  
**Mínimo: 62,15 lux**



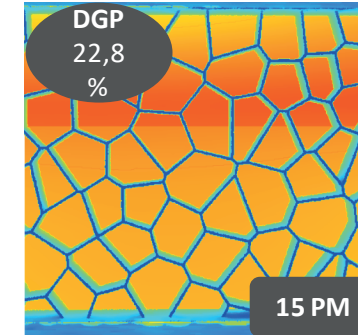
**Máximo: 191,95 lux**  
**Promedio: 117,17 lux**  
**Mínimo: 74,54 lux**



**Máximo: 576,14 cd/m<sup>2</sup>**  
**Promedio: 307,95 cd/m<sup>2</sup>**  
**Mínimo: 4,45 cd/m<sup>2</sup>**

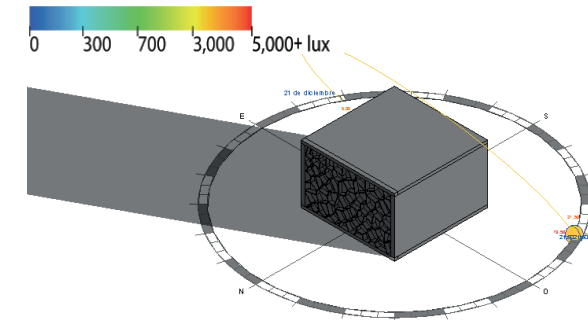


**Máximo: 1028,63 cd/m<sup>2</sup>**  
**Promedio: 466,98 cd/m<sup>2</sup>**  
**Mínimo: 5,49 cd/m<sup>2</sup>**



**Máximo: 855,83 cd/m<sup>2</sup>**  
**Promedio: 410,53 cd/m<sup>2</sup>**  
**Mínimo: 10,42 cd/m<sup>2</sup>**

## Iluminancias/ Luminancias/ DGP



**SOLSTICIO DE VERANO**  
 Diciembre

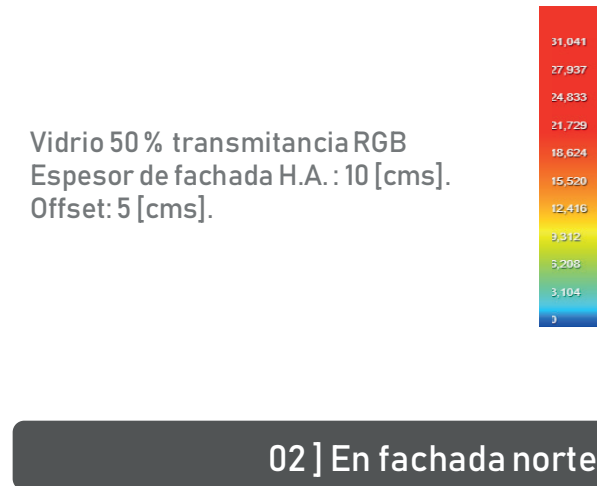
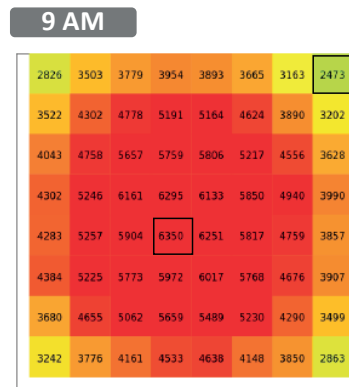


Imagen 69. Resultados de simulación en LightStanza con voronoi en fachada norte.  
 Fuente: Elaboración propia con Rhinoceros + Grasshopper + LightStanza for Revit.

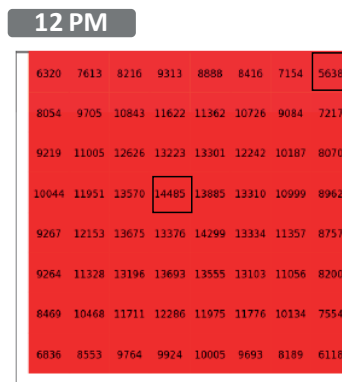
A los módulos de 5 x 5 x 3.5 [m] se les aplicó el algoritmo *Voronoi Point*, el cual está expuesto en detalle el Punto 4.4 del presente capítulo, tras explicar a grandes rasgos la lógica de las herramientas de modelamiento, cálculo y la respectiva configuración de las simulaciones, para tener una mayor comprensión de la interfaz gráfica en la cual se inscribe la secuencia

de pasos. Básicamente consiste en una trama irregular de puntos a la que se le aplica la función, definida geoméricamente en el Punto 2.6, para someterlos a evaluación lumínico visual de iluminancias, luminancias y deslumbramiento, conceptos abordados en profundidad en el capítulo 3 de esta tesis.





**Máximo: 6349,72 lux**  
**Promedio: 4644,46 lux**  
**Mínimo: 2472,90 lux**

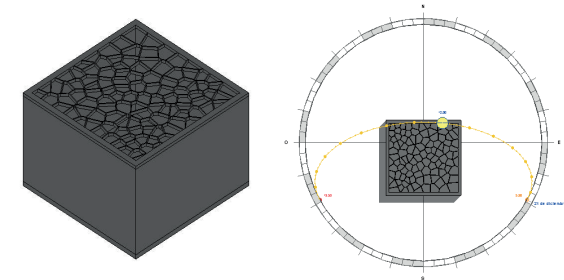
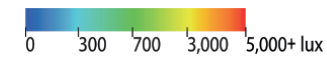


**Máximo: 14485,06 lux**  
**Promedio: 10473,68 lux**  
**Mínimo: 5637,91 lux**

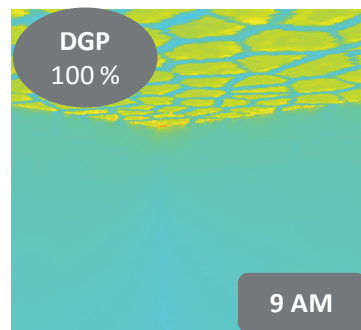


**Máximo: 6387,60 lux**  
**Promedio: 4686,84 lux**  
**Mínimo: 2749,11 lux**

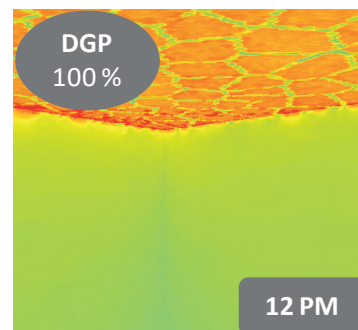
**Iluminancias/ Luminancias/ DGP**



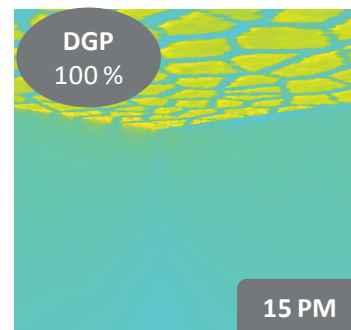
**SOLSTICIO DE VERANO**  
**Diciembre**



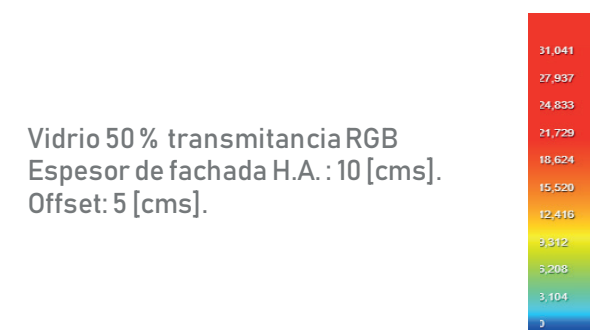
**Máximo: 18036,24 cd/m<sup>2</sup>**  
**Promedio: 2653,75 cd/m<sup>2</sup>**  
**Mínimo: 6167,28 cd/m<sup>2</sup>**



**Máximo: 29411,82 cd/m<sup>2</sup>**  
**Promedio: 6934,25 cd/m<sup>2</sup>**  
**Mínimo: 13656,85 cd/m<sup>2</sup>**



**Máximo: 17670,53 cd/m<sup>2</sup>**  
**Promedio: 3094,13 cd/m<sup>2</sup>**  
**Mínimo: 6546,50 cd/m<sup>2</sup>**



**02 ] En cubierta**

Imagen 70. Resultados de simulación en LightStanza con voronoi en cubierta.  
 Fuente: Elaboración propia con Rhinoceros + Grasshopper + LightStanza for Revit.

Al comparar los resultados de ambos módulos, con la aplicación de la celosía en la fachada norte y en la cubierta, la diferencia es notoria. El segundo respecto al primero, en términos de iluminancias [luxes] a las 9AM, a las 12 PM y a las 15 PM es aproximadamente 50, 90 y 35 veces mayor, respectivamente y a nivel de luminancias [cd/m<sup>2</sup>] en los mismos

horarios, 30, 29 y 20 veces más. Además, a nivel de deslumbramiento [% DGP] el primero alcanza rangos imperceptibles de brillo mientras que el segundo llega a límites totalmente intolerables, lo cual es bastante lógico si se considera el recorrido y exposición solar de cada uno, razón por la cual se decide evaluar la aplicación de Voronoi en las cubiertas.

Según D'Alençon (2008), las estrategias de iluminación natural destinadas al diseño de edificios públicos tienen su enfoque principal en maximizar las vistas y minimizar el deslumbramiento para lograr una comodidad visual entre los ocupantes. En cubierta, se destacan 3 estrategias de diseño que son las siguientes:

- **Lucernarios:** Aperturas desarrolladas en el plano de cubierta y en general poseen excelentes niveles de luz natural, controlando la radiación solar directa mediante la regulación del espesor o profundidad del lucernario o la aplicación de celosías.
- **Claraboyas:** Pares de ventanas verticales enfrentadas u opuestas diseñadas en las cubiertas que pueden tener cierto ángulo o inclinación, conforme a la exposición solar directa.
- **Atrios o Pozos de luz:** Es una cavidad vertical transparente o translúcida en 1 a 5 caras que permiten conducir la luz hacia el interior de los espacios adyacentes que carecen de ésta.

En un espacio de iguales dimensiones el autor, realiza simulaciones de carácter estático (FLD), bajo las mismas condiciones climáticas, obteniendo rangos de 3.3-11.3% para el primero, 3.0-15% para el segundo y 9.4 - 69.4% para el tercero, siendo este último caso, los atrios, los que poseen mayor riesgo de deslumbramiento y por ende de incomodidad visual, razón por la cual, en la presente tesis de investigación considera éste último como caso de estudio.

Según Erlendsson (2014) y Roldán (2016), los edificios que contemplan esta estrategia de diseño poseen una multiplicidad de usos o programas que albergan gran concurrencia de personas y en las últimas décadas, se ha visualizado una creciente tendencia respecto a su aplicación en edi-

ficios públicos, debido al enorme potencial lumínico que ofrecen. Este motivo en particular los convierte en una estrategia ideal y conveniente en las ciudades de climas fríos o templados de escasa radiación. Sin embargo, Santiago de Chile registra altos índices de radiación solar y variabilidad de iluminancias de cielo, alternando entre cielo despejado (19%), despejado turbio (22%), nublado (30%) y parcial nublado (29%) (Roldán, 2016)(Piderit y Cauwerts, 2014).

Según data climática IWEA (*International Weather for Energy Calculations*), accesible a través de la aplicación *Climate Consultant*, Santiago de Chile registra un valor máximo de radiación global horizontal en el mes de enero (suma de la radiación directa, difusa y reflejada) que alcanza los 8227 [kWh/m<sup>2</sup>], mientras que la directa normal llega a los 7921 [kWh/m<sup>2</sup>] (radiación del rayo incidente). En concordancia, cada una de éstas, posee una iluminancia anual que bordea los 63832 y 56434 [luxes], respectivamente para cada caso (*Ver Tabla 1 en anexos*). Dichos valores consideran la variabilidad de cielos ya que contempla registros diarios, mensuales y anuales que datan desde el año 1986 y se encuentran actualizados al año 2018, con los cuales se componen las bases de datos TMY, TMY 2 y TMY3 (*Typical meteorological year*) (EnergyPlusWeather, 2019).

Básicamente, considerando lo anterior, la incidencia de la radiación solar y la variabilidad de cielos en Santiago de Chile, sumado al enorme potencial de flujo luminoso y a la probabilidad de deslumbramiento presente en los atrios de edificios públicos; sobretodo en aquellos casos en que la cara transparente o translúcida de éstos corresponde a la cubierta, es que se desea profundizar en dicho análisis y lineamientos de diseño, teniendo como principal enfoque de investigación para el modelo estudio, criterios de confort y comodidad lumínico - visual. Cabe señalar además, que para ello, se considera la tesis doctoral de la docente, quien guía la presente memoria de título.

## 4.2. Breve síntesis y caracterización geométrica del caso de estudio

En esta investigación se consideró el inventario de 27 atrios en edificios públicos, desarrollado por la arquitecta Jeannette Roldán el año 2016, bajo el nombre de "Caracterización geométrica y lumínica de los atrios incorporados en los edificios de Santiago de Chile" para alcanzar el grado doctoral. En la tesis de quien además es la profesora guía de ésta, se incluyen edificios destinados a múltiples usos.

Éstos se encuentran ubicados en la Región Metropolitana, en las comunas de Santiago, Providencia, Las Condes, Huechuraba, Vitacura, El Bosque y La Florida, en orden descendente, según el número de casos (Ver *Tabla 3 en Anexos*).

De los atrios catastrados por la docente, 51,85 % poseen uso educacional (14 casos), 29,62 % son oficinas (8 casos), 7,41 % tienen uso institucional (2 casos), otro 7,41 % corresponden a edificios cultural (2 casos, también) y un 3,71 % de uso turístico (1 caso.).

Entre las tipologías analizadas por la arquitecta la mayoría de los casos del inventario corresponde a atrios de 4 y 3 caras o poseen una configuración lineal, de los que estableció parámetros regulares, según el promedio de éstos.

Distribución de los atrios catastrados según uso

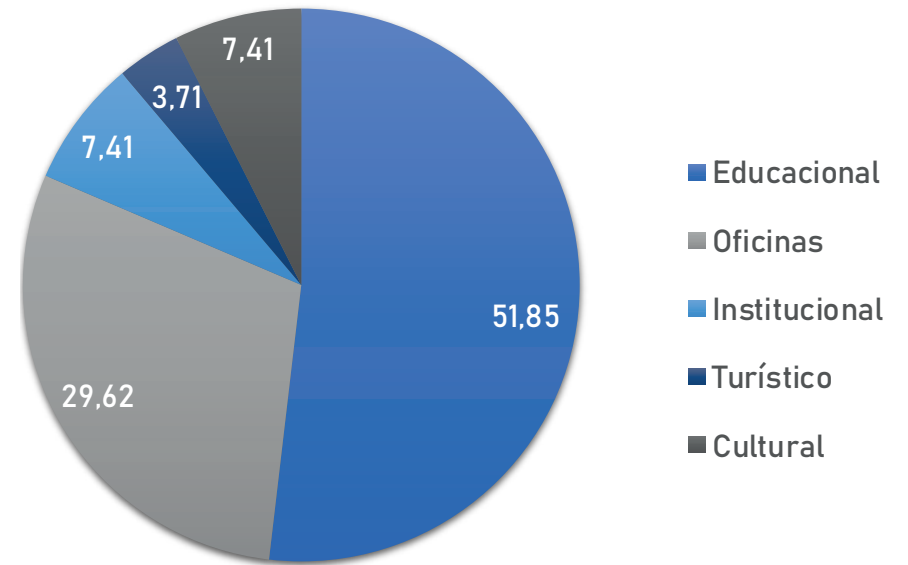


Imagen 72. Distribución de los atrios catastrados según uso  
Fuente: Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica; Roldán (2016)

TIPOLOGÍA	LARGO	ANCHO	ALTO
4 caras	24,7 [m]	12,8 [m]	17,8 [m]
3 caras	17,9 [m]	15,8 [m]	32,7 [m]
Lineal	35,7 [m]	11,3 [m]	16,9 [m]

Imágenes 73 - 74.  
Parámetros de atrios de dimensiones regulares (arriba),  
Cantidad de casos según tipologías de atrios: 1,2,3, 4 caras y lineal (abajo)  
Fuente: Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica; Roldán (2016)



Con ello, la autora determinó las dimensiones del modelo de estudio (4 caras), que además de establecer una mayoría en el inventario fue seleccionado para evaluar el desempeño de iluminación natural cenital, siendo aplicable a las cubiertas paramétricas, enfoque de esta tesis de pregrado.

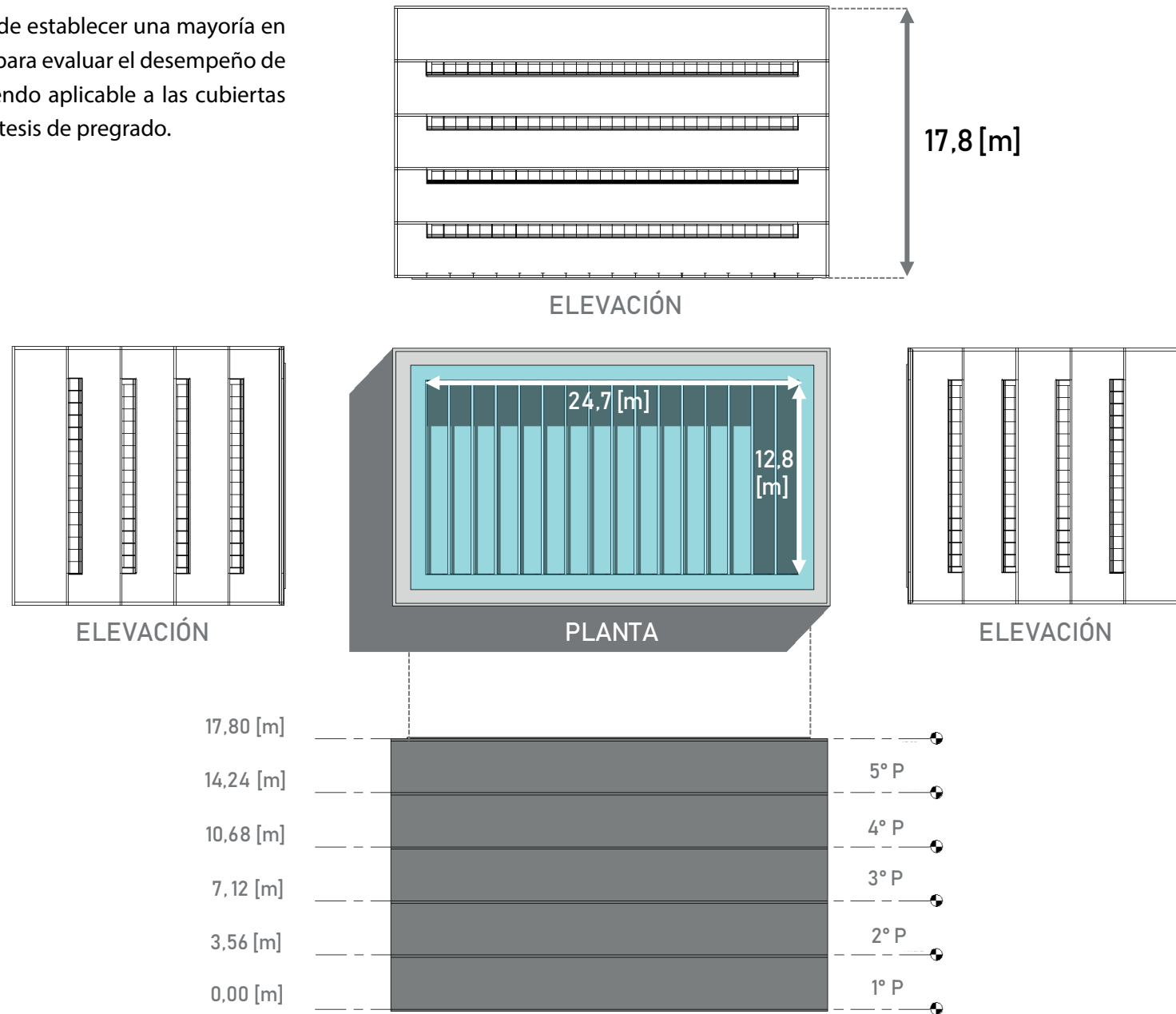
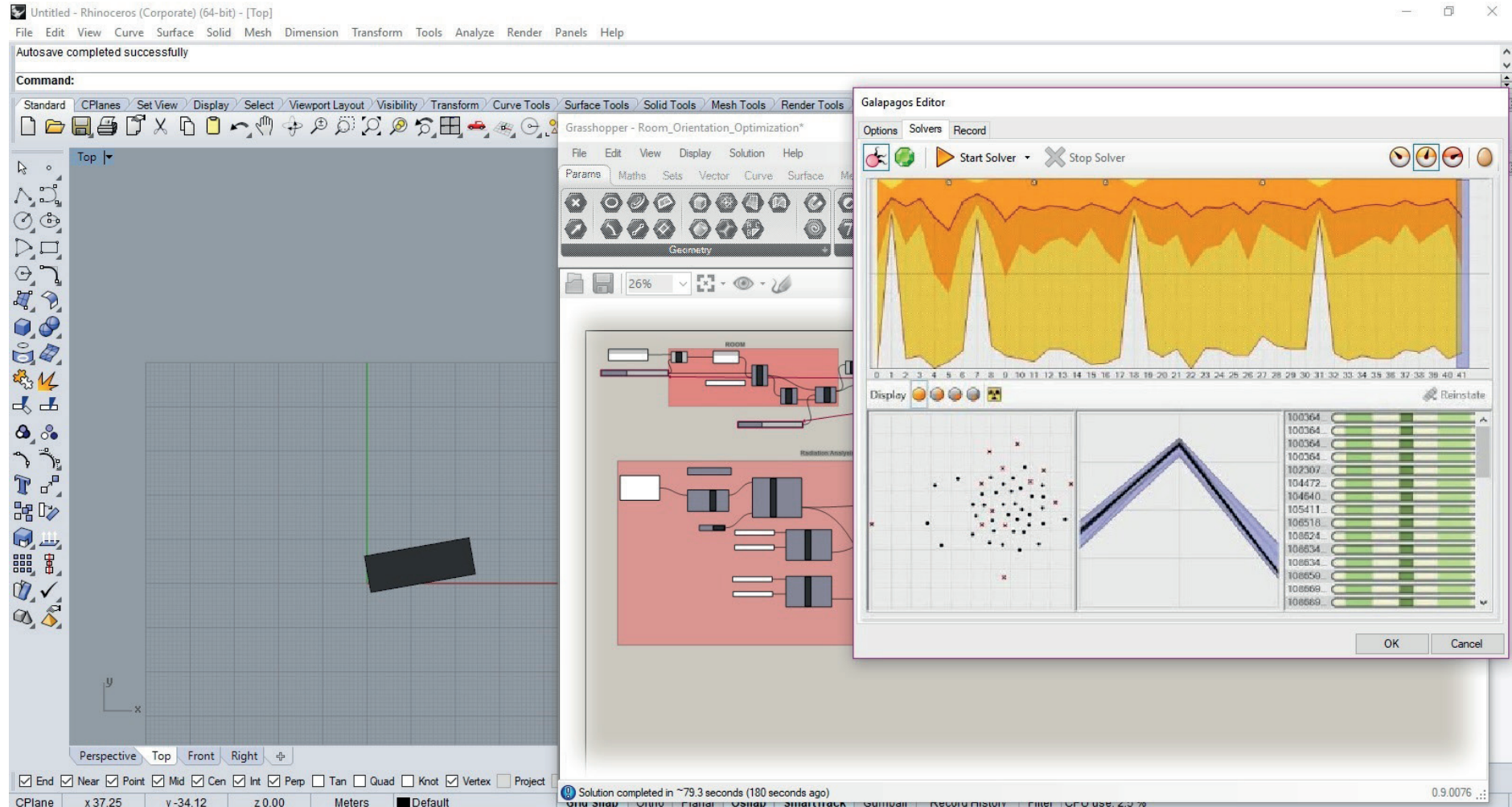


Imagen 75.  
Esquema del modelo de atrio 5P.  
Fuente:  
Reedición a partir de modelo revit  
basado en revisión de Roldán (2016)

Cabe señalar que en la investigación la docente, realiza una indagatoria considerando estas dimensiones para atrios de 3, 5 y 10 pisos de distinta materialidad, cuyo azimut corresponde a 10° y 100°. De éstos, los atrios de 5 y 10 pisos en 10° y 100° azimut, respectivamente, de cubierta vidriada fueron los casos más desfavorable en términos de UDI (*Useful Daylight Illuminance*), motivo por el cual, considerando los resultados previos de

la autora, se selecciona el modelo estudio (*Ver imagen 75*), comprobando mediante *Ladybug* y *Galapagos*, que el de 10° es el más desfavorable a la radiación solar que dicho sea de paso, es la que abunda en la mayoría de los casos del inventario, al maximizar y minimizar la función objetivo para los períodos de verano e invierno, respectivamente.

Imagen 76. Orientación más desfavorable a la radiación solar. Fuente: Elaboración propia a partir de *Ladybug* y *Galapagos*.



### 4.3. Configuración de materiales y parámetros de los modelos de estudio

En primer lugar, se emplearon los parámetros utilizados previamente por la docente en la investigación "Caracterización geométrica y lumínica de los atrios incorporados en los edificios de Santiago de Chile", respecto a las propiedades del hormigón armado y vidrio laminado y los indicados en el punto 3.5. del documento.

MATERIAL	ESPESOR	TRANSMITANCIA	REFLECTIVIDAD
VIDRIO	10,0 [mm]	0,85	0,08
HORMIGÓN ARMADO	200 [mm]	0,00	0,28

Imagen 77. Características de materiales modelo atrios públicos de Santiago. Fuente: Elaboración propia a partir de revisión Roldán (2016).

En segundo lugar, se indagó en distintos referentes de pieles paramétricas que utilizan el algoritmo seleccionado, exponiendo aquí aquellos que poseían información sobre los espesores de materiales:

CASO 1: CNC - Milled Screen Wall for IBM (San Francisco, EEUU).

CASO 2: Kayseri Ice Ring (Kayseri, Turquía).

CASO 3: Conrad Hotel (Beijing, República Popular China).

Cabe mencionar que éstos fueron sometidos a un proceso de corte por el proveedor en maquinaria CNC - *Computerized Numeric Control*, que consiste básicamente en un robot con láser de corte programado mediante el uso de un *software* que controla la posición de los ejes y la velocidad de los motores en sentido XYZ, lo que permite tener una mayor precisión en la elaboración de formas complejas. Se observa que para ello, los paneles o láminas, en general, fueron seccionados en módulos o en fragmentos de fachada hasta cubrir la totalidad de la piel o envoltente.

#### REFERENTE MATERIAL 01: CNC - Milled Screen Wall for IBM

Arquitectos: Synthesis Design + Architecture

Material: Acero

Espesor: 10 [mm].

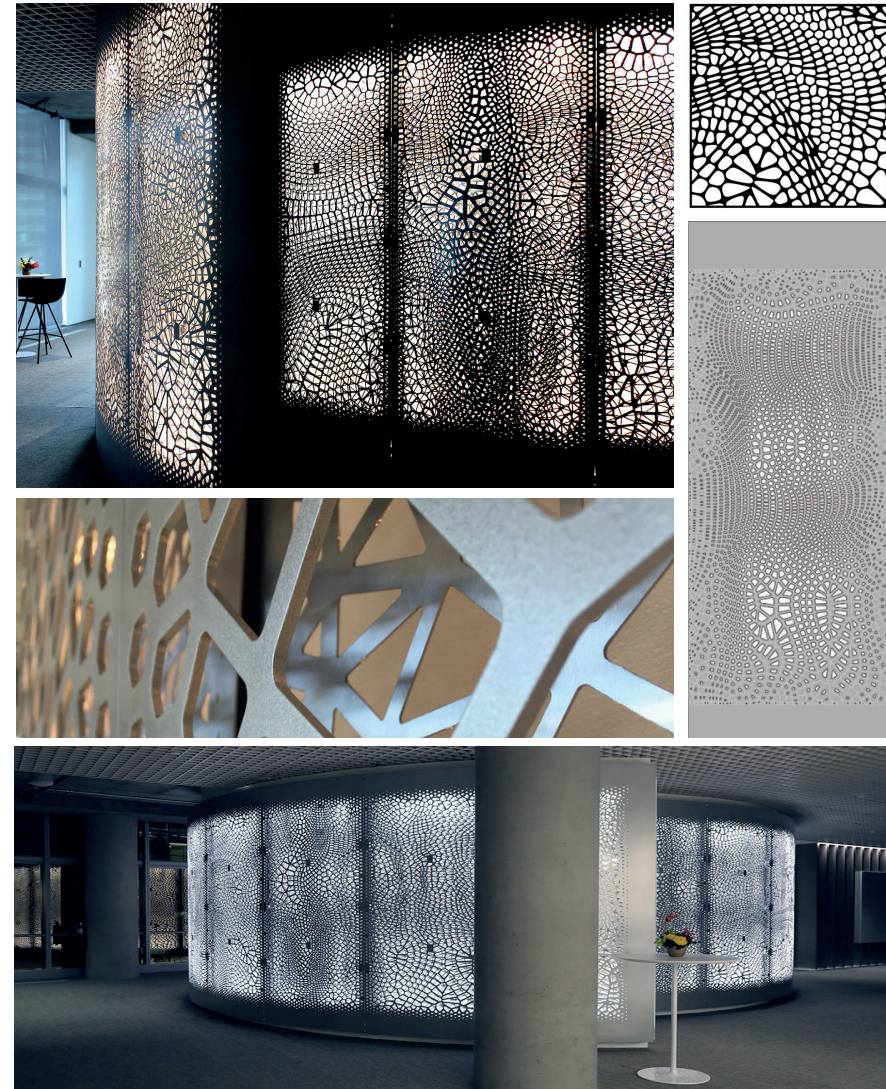


Imagen 78 - 82. CNC Milled Screen Wall for IBM, Synthesis Design + Architecture.

Fuente: <http://synthesis-dna.com/>

**REFERENTE MATERIAL 02: Kayseri Ice Ring**

Arquitectos: BKA - Bahadır Kul Architects

Material: Poliestireno alta densidad GFRP - *Glass fiber reinforced polymer*

Espesor: 200 [mm].



Imagen 83 - 85. Kayseri Ice Ring, BKA - Bahadır Kul Architects.

Fuente: <http://www.bahadirkul.com/>

**REFERENTE MATERIAL 03: Conrad Hotel**

Arquitectos: Mad Architects.

Material: Panel Fenólico HPL - *High Pressure Laminate* con uso de CNC.

Espesor: 12 [mm].



Imagen 86 - 89. Conrad Hotel, Mad Architects.

Fuente: <http://www.i-mad.com>

Una vez establecidos los parámetros del modelo estudio, teniendo en cuenta las dimensiones proporcionadas por la investigación de la arquitectura docente, se selecciona la materialidad de la intervención.

De los referentes, casos enumerados del 1 al 3 que utilizan acero, poliestireno de alta densidad y panel fenólico, se selecciona éste último considerando que posee las siguientes propiedades, indagadas en diferentes catálogos del mercado chileno:

- Se aplica tanto en fachadas interiores como en exteriores, debido a la capacidad de aislamiento térmico.
- Material rígido auto-portante, hidrófugo (resistencia a la humedad y precipitaciones) e ignífugo (resistencia a las altas temperaturas, bajo y sobre 80 [°C]).
- Baja porosidad y textura, ya que son compuestos de resinas prensadas a altas presiones, que le otorga características antisépticas, antibacterianas e higiénicas, razón por la cual, es de fácil limpieza y requiere poca mantención.
- Resistencia a diversas sustancias químicas, desinfectantes, tintes, disolventes, al igual que a daños por abrasión (o fricción) y otros desgastes provocados en el tiempo cuando están expuestos a la intemperie.
- Disponible en una amplia gama de colores en el mercado.
- Cuenta con variedad de canteados mecanizados. (bordes lisos, redondeados, contornos fresados, ranuras, entre otros).
- Posibilidad de mecanización de corte y perforación con láminas en CNC.
- Ideal para uniones con acero inoxidable.
- De fácil montaje y prefabricación.
- Ligero y transportable, pero resistente a los impactos.
- Distintas empresas ofrecen cortes y grabados específicos a pedido.

Tras seleccionar el material y teniendo en cuenta los parámetros y orientación del atrio, es de suma importancia establecer cuál será el tamaño de las celdas del voronoi y el número total de puntos a establecer para modelar paramétricamente la cubierta. Para ello, se indagó en distintos referentes con pieles paramétricas, realizadas exclusivamente con patrones voronoi, a partir de una revisión monográfica, las imágenes fueron escaladas en *AutoCAD*, cuyo inventario de casos se excluye del documento, con afán sintético.

Dicho estudio llevó a concluir que la mayoría de las obras que incluyen el algoritmo, cuentan con un diámetro o factor de escala que varía entre 0,75 [m] y 1,25 [m] aproximadamente; razón por la cual se usó 1,0 [m], el valor intermedio del rango, con el fin de ser utilizado como parámetro del voronoi aleatorio (caso 2, con algoritmo *Voronoi Surface*), esto, utilizando un componente en *Grasshopper* que establece una nube de puntos al azar definida sólo mediante 2 *inputs*: *seeds* y *counts*. Posteriormente, se realizó la optimización con *Galapagos* (caso 4) para obtener otro modelo de cubierta paramétrica, en función de los componentes de radiación de *Ladybug* que se explicarán más adelante en el punto 4.4 de este capítulo, para mayor entendimiento de ambos casos de estudio.

De ambos modelos, caso 2 y 4, se fusionaron ambas alternativas de diseño en forma manual utilizando *Revit* para generar una solución intermedia, considerando la curva delimitada por el área expuesta a radiación solar directa ante el análisis de cono y recorrido solar (*Ladybug Sunpath*).

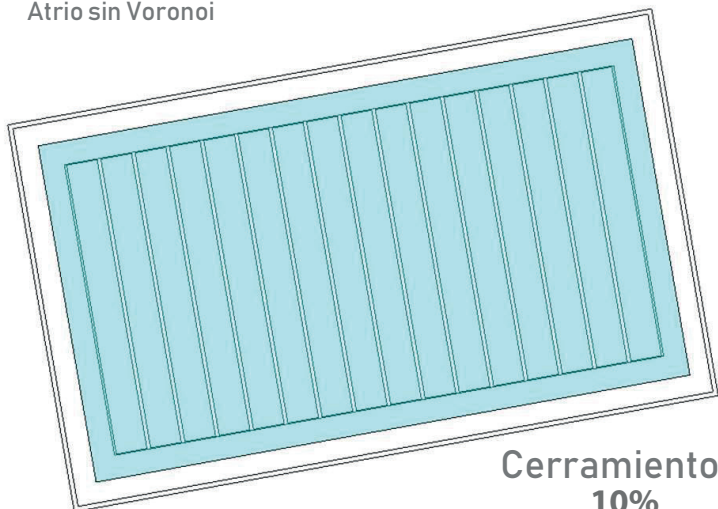
Los 4 modelos en conjunto, se enumeran de mayor a menor superficie vidriada, en la página contigua, señalando el porcentaje de cerramiento.

*Imagen 90. 4 modelos de cubiertas para evaluación de los atrios.  
Fuente: Elaboración propia a partir de Revit.*



### CASO 1

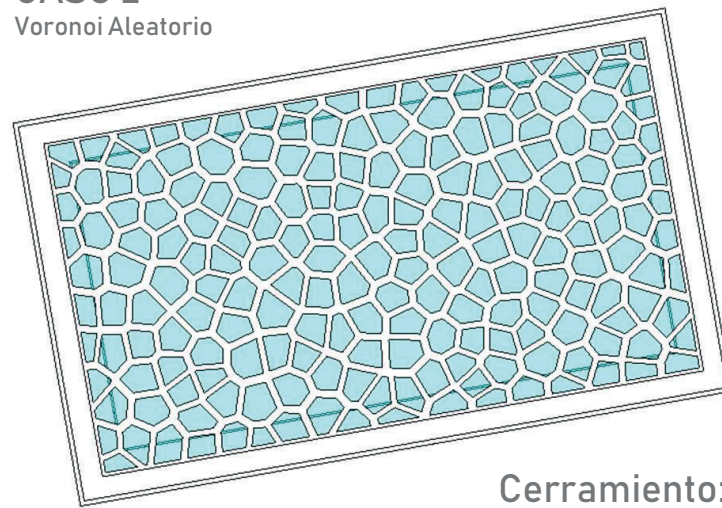
Atrio sin Voronoi



Cerramiento:  
10%

### CASO 2

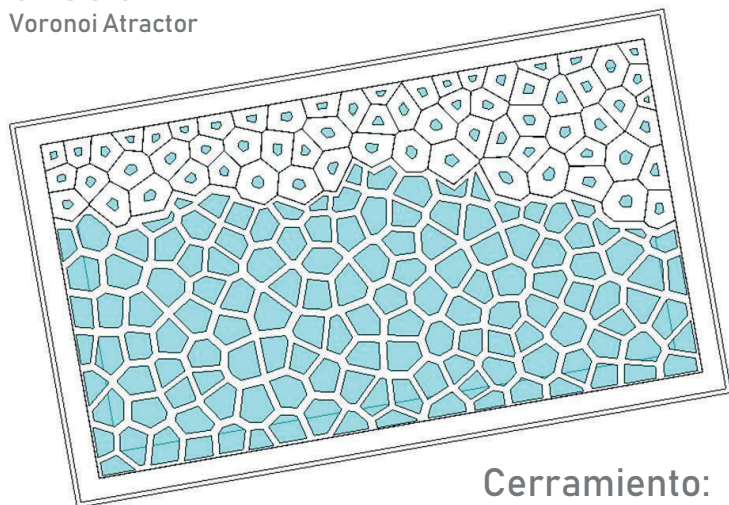
Voronoi Aleatorio



Cerramiento:  
17,5%

### CASO 3

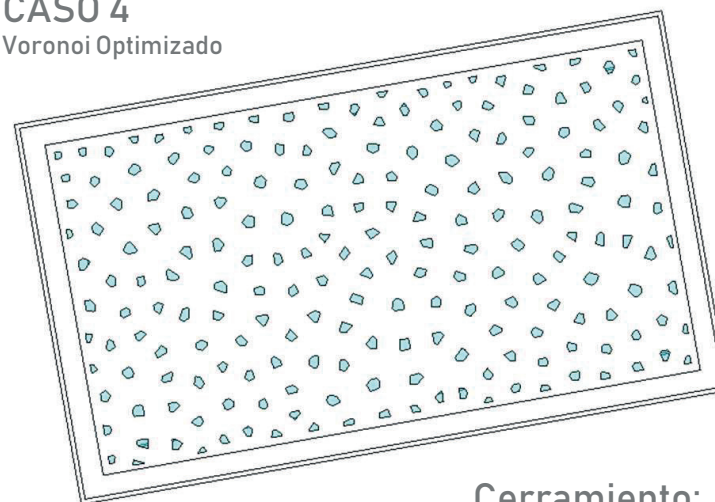
Voronoi Atractor



Cerramiento:  
42,5 %

### CASO 4

Voronoi Optimizado



Cerramiento:  
95 %

## 4.4. Herramientas y configuración de modelamiento y simulaciones.

En primer lugar es importante mencionar que tras esclarecer a grandes rasgos el proceso metódico aplicado en la presente tesis de investigación, se presentarán ciertas nociones básicas y configuraciones de las herramientas empleadas, para mayor entendimiento del proceso desarrollado:

- **Modelado :**  
Rhinoceros 5.0 y Revit 2019.
- **Parametrización :**  
Grasshopper 0.9.0076, *plugin* de Rhinoceros.
- **Inserción de data climática y radiación solar :**  
Ladybug, componente de Grasshopper.
- **Optimización :**  
Galápagos, componente de Grasshopper.
- **Evaluación :**  
LightStanza, *plugin* en Revit 2019.

Dadas las necesidades de modelamiento paramétrico del caso de estudio, éste fue realizado con el programa *Rhinoceros* (.3dm)\*, en combinación con su complemento gratuito *Grasshopper* (.gh)\*, con el que se parametrizó la cubierta. Éste último, permite tener una visualización gráfica y en tiempo real de las modificaciones formales efectuadas, tras programar secuencialmente las transformaciones geométricas que constituyen el algoritmo, ingresando los parámetros y componentes según corresponda.

El algoritmo Voronoi, fue desarrollado en la interfaz de Grasshopper que opera mediante nodos y conexiones entre éstos que se relacionan me-

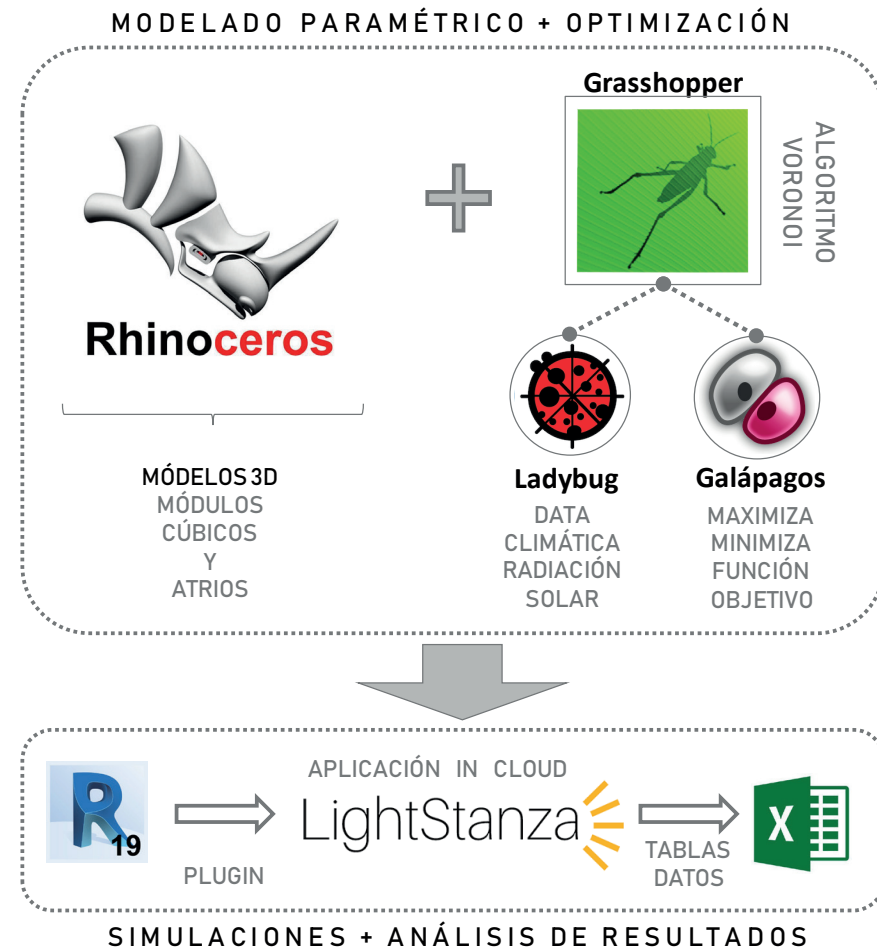


Imagen 91. Esquema de herramientas de cálculo y análisis.  
Fuente: Elaboración propia.

- (\*) : extensión de programa (software), complemento (plugin) y data climática.  
 [2] link: <https://energyplus.net/weather>  
 [3] link: <https://www.ladybug.tools/epwmap/>

dianter el sistema de entradas- *inputs* y salidas- *outputs*, que permiten el ingreso de datos y operaciones, que se detallarán posteriormente y en forma gráfica. Es importante mencionar que se escoge este *software* y *plugin* en particular, por tres motivos:

- a) En la revisión bibliográfica se constató la amplia validación de ambos ante el escenario de modelado paraétrico y uso posterior de otras herramientas combinadas para llevar a cabo procesos de optimización lumínico térmica de los modelos.
- b) La extensa difusión de múltiples tutoriales en *YouTube* y otras plataformas *on - line* en relación a ambas herramientas, lo que permite indagar ante inconvenientes posibles durante el proceso de investigación.
- c) Se tiene un manejo básico a intermedio de ambas herramientas, adquirido en el curso de Gráfica Computacional 2 del docente Camilo Guerrero del Río y en la asistencia a distintos *workshops* tanto en la facultad como en otras universidades.

Para llevar a cabo la parametrización del algoritmo en torno al análisis lumínico - térmico, se indagó previamente en el uso de *DIVA*, *plugin* de *Rhinoceros* de alto prestigio que tuvo que ser descartado tras inconvenientes de interoperabilidad de licencias, además de errores relacionados con la inserción de la data climática que no fueron posibles de resolver con la ayuda de tutoriales, manuales y consultas realizadas en el foro de la herramienta en el plazo estipulado; razón por la cual tuvo que ser descartado y se buscó otra herramienta que tuviese libre acceso que brindará opciones similares para desarrollar el proceso de optimización termo - lumínica.

Cabe mencionar que en un futuro puede ser posible resolver estos inconvenientes, al efectuar la compra de licencias comerciales o estudiantil en sincronía para ambos, ya que no fue posible operarlo con licencias distintas: comercial (*Rhinoceros*) y estudiantil (*DIVA*).

Es así como se seleccionó la aplicación medioambiental *Ladybug* como segunda alternativa para llevar a cabo el proceso de investigación por cinco motivos específicos:

- a) En la revisión bibliográfica se registra el uso de la herramienta, la cual es validada con simulaciones combinadas con mediciones realizadas a prototipos.
- b) Es de carácter gratuito y de fácil uso.
- c) Funciona como un componente más inserto dentro de la interfaz de *Grasshopper*, en el menú desplegable, para crear un diseño en torno a los parámetros ambientales importados en la herramienta mediante el enlace o ruta de archivos climáticos de las ciudades disponibles en la web. En este caso el modelo se contextualiza en Santiago de Chile y es posible su inserción en la herramienta.
- d) Permite tener una variedad de gráficos y métricas interactivas, similares a las que se visualizan en los tutoriales de *DIVA*, tales como trayectoria solar, radiación, estudio de sombras, entre otros análisis.
- e) En combinación con el componente *Galapagos*, permite maximizar o minimizar alguna de las variables bioclimáticas mencionadas anteriormente en el punto (d), con el fin de optimizar el diseño generativo y realizar las iteraciones necesarias para alcanzar el resultado deseado.

La data climática linkeada en *Ladybug* proviene de la web de *Energy Plus Weather* (.epw)\*. Los archivos EPW, son desarrollados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos que registra los datos climáticos de las ciudades más importantes del mundo. Cada uno de éstos contiene los datos almacenados de 8760 horas de un año de 365 días e incluyen la información de ubicación (latitud, longitud), temperaturas, humedad, viento, radiación solar y entalpía. Éstos archivos son descargables en un archivo comprimido, mediante el ingreso a las dos páginas webs de *Energy Plus Weather* <sup>[2]</sup> o en la web de herramientas de *Ladybug* <sup>[3]</sup>

[2] y [3] son señaladas en la página contigua.

Es importante tener en cuenta que en el foro de Ladybug se recomienda operar con la data *TMY3 -Typical Meteorological Year 3*, ya que ésta suele obtener mayor precisión en los resultados obtenidos a partir de la evaluación y análisis de las distintas variables, insertas en el plugin a modo de componentes. Particularmente ésta, no requiere que se realice la descarga, basta ingresar el link de ésta en la entrada o *input* "weatherFileURL" del componente "Ladybug\_OpenEPW and STAT weather file", para que la herramienta de cálculo geolocalice el modelo en un contexto determinado con los factores climáticos registrados en los archivos comprimidos (.zip)\* contenidos en la web que se inscribe.

Esta herramienta, *Ladybug*, permitió desarrollar una alternativa de diseño de cubierta parametrizada y optimizada en función de la radiación solar del período de primavera y verano, graduando el área de las aperturas de las células de la piel voronoi, que se mostrará posteriormente a una breve sinopsis de *Grasshopper*, con el fin de transparentar y comprender el proceso desarrollado en la investigación.

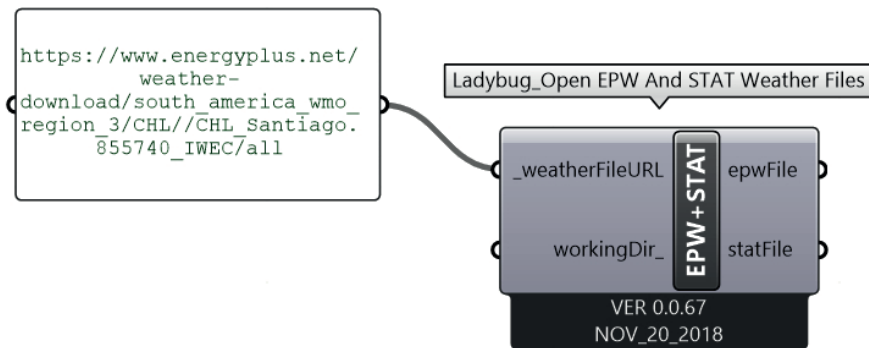


Imagen 92. Componente Ladybug\_OpenEPW and STAT weather file.  
Fuente: Extraído desde Ladybug.

## Principales elementos de la interfaz gráfica de Grasshopper

Con el fin de comprender la composición visual del algoritmo, se esclarecen a continuación algunos de los conceptos básicos que se deben tener en cuenta respecto a la interfaz del *plugin Grasshopper* con el cual se parametrizó la cubierta del atrio:

- 1.) **Barra de menú principal:** Menú con opciones desplegadas.
- 2.) **Paneles de componentes:** Esta área expone todas las categorías de componentes (funciones y parámetros). Aquí se encuentra *LADYBUG* y *GALÁPAGOS*, junto a otros descargables desde la *web Food4Rhino* <sup>[4]</sup>
- 3.) **Barra de herramientas del lienzo**  
Menú de acceso rápido a herramientas u opciones disponibles del menú, (de izquierda a derecha): abrir documento, guardar, zoom por defecto, zoom en extensión, nombrar vista, bosquejar, agrupación y configuraciones varias.
- 4.) **Lienzo:** Este es el editor que alberga los objetos que componen la definición o algoritmo, además de algunos dispositivos de interfaz de usuario.

### Lienzo versus componentes y parámetros

Los parámetros contienen datos, lo que significa que almacenan datos o información de geometría de *Rhinoceros*, mientras que los componentes contienen las acciones o funciones del algoritmo.

- A) **Parámetro con errores o carencia de datos:** En color naranja advierte errores.
- B) **Parámetro sin errores:** En color gris señala que está operativo.
- C) **Componente con errores:** En color naranja señala que contiene parámetros de entrada (*input*) y de salida (*output*), con alerta de error.
- D) **Componente sin errores:** Sin advertencias, en color gris.
- E) **Componente con errores:** Con al menos un error del componente en sí mismo o en los parámetros de entrada y salida.

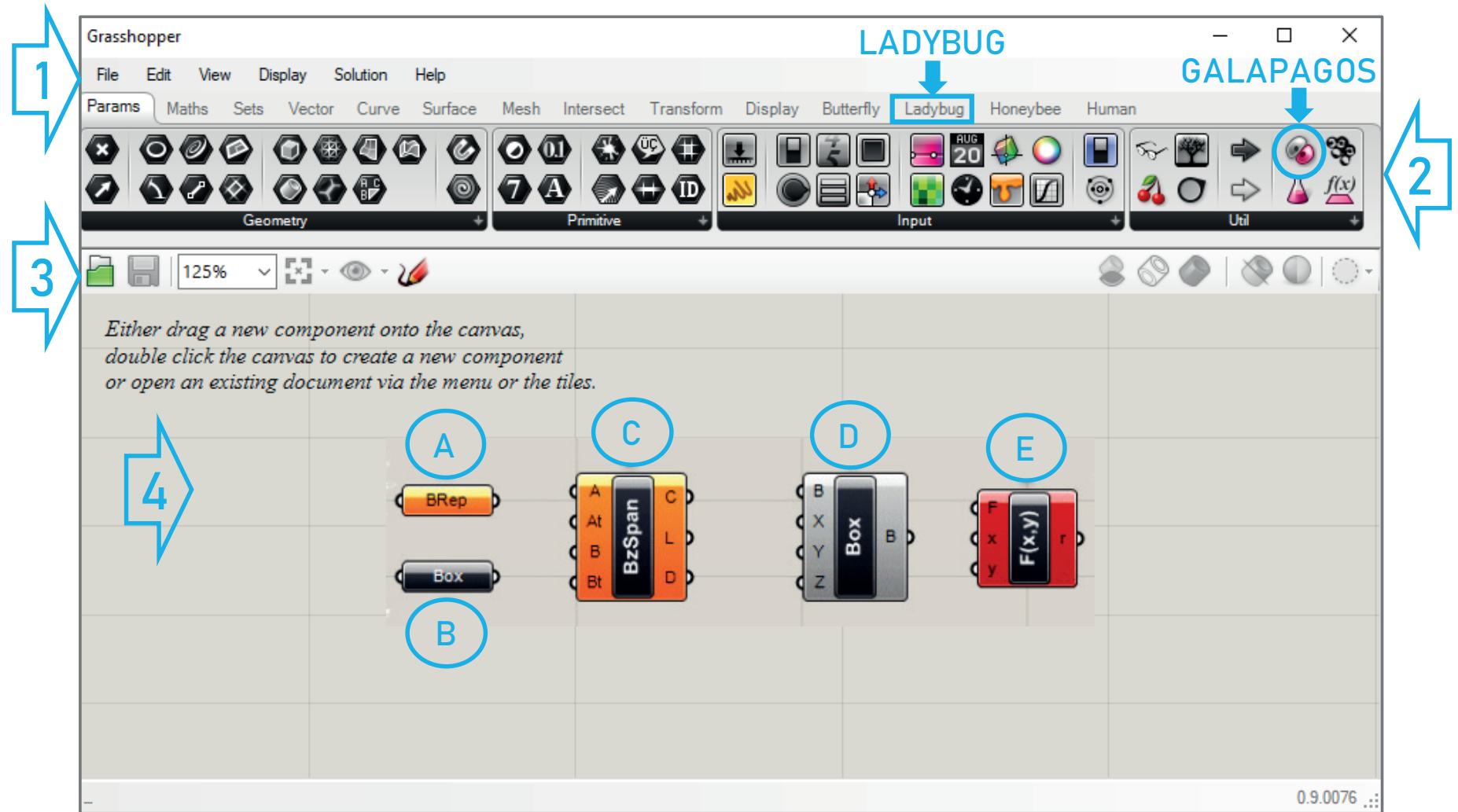


Imagen 93. Interfaz gráfica de Grasshopper  
Fuente: Extraído desde Rhinoceros + Grasshopper + Ladybug.

[4] link: <https://www.food4rhino.com/>

Food4Rhino es una página web de aplicaciones para Rhinoceros y Grasshopper.

Los archivos descargados que poseen compresión con extensión (.rar), se insertan en:

**Extensiones gha y dll:**

C:\Users\nombre pc\AppData\Roaming\Grasshopper\Libraries.

**Extensión ghuser:**

C:\Users\nombre pc\AppData\Roaming\Grasshopper\UserObjects.

## Geometría del Algoritmo Voronoi Point

El algoritmo Voronoi, como ya se mencionó a grandes rasgos en el capítulo 2, designa un área denominada celda a cada punto que exista en la superficie o volumen, según sea el caso., bidimensional o tridimensional.

Según Fischer (2011) geoméricamente, está definido mediante la distancia euclidiana en un plano entre dos puntos  $p$  y  $q$ , expresados según la posición o coordenadas que tengan en el plano  $d(p,q)$ , donde  $p = (p_x, p_y)$  y  $q = (q_x, q_y)$ , de manera que la distancia se calcula a partir de la fórmula  $dist(p,q) = \sqrt{(p_x-q_x)^2 + (p_y-q_y)^2}$ , aplicable según Pottman et al., (2007) a un conjunto  $n$  de puntos  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ , que descomponen el plano en celdas o regiones Voronoi referidas  $C_{(p1)}, C_{(p2)}, \dots, C_{(pn)}$ , cuyo borde común entre dos células adyacentes, se encuentra en la bisectriz de los puntos de definición ( $p_1$  y  $p_2$ ) y entre éstos y  $p_3$  existe un vértice común entre las celdillas con igual distancia entre los puntos  $p_1, p_2, p_3$  y, donde cada punto pertenecerá a la circunferencia que une dichos puntos.

Según la ubicación y densidad de los puntos ubicados en el plano o superficie, el algoritmo variará a nivel de complejidad, teniendo correspondencia con la distribución de éstos, es así como las tramas de puntos regulares en geometrías menos complejas e irregulares, con celdas que tendrán la forma de distintos tipos de polígonos.

La trama orgánica de puntos voronoi es visible en elementos de la naturaleza, tales como, la piel de las jirafas, las burbujas, los panales de abejas, las parénquimas o tejidos vegetales, grietas y huellas de erosión de los suelos en los desiertos, las cáscaras de las piñas, las cortezas de las palmeras, las alas de insectos, entre otros.

Es importante mencionar que la presente tesis de investigación considera un patrón orgánico, ya que poseen incidencias lumínico - visuales menos deducibles, de tal manera que sea posible crear celosías arquitectónicas complejas utilizando este algoritmo generativo que permite explorar diversas mutaciones (Omidfar, 2017).

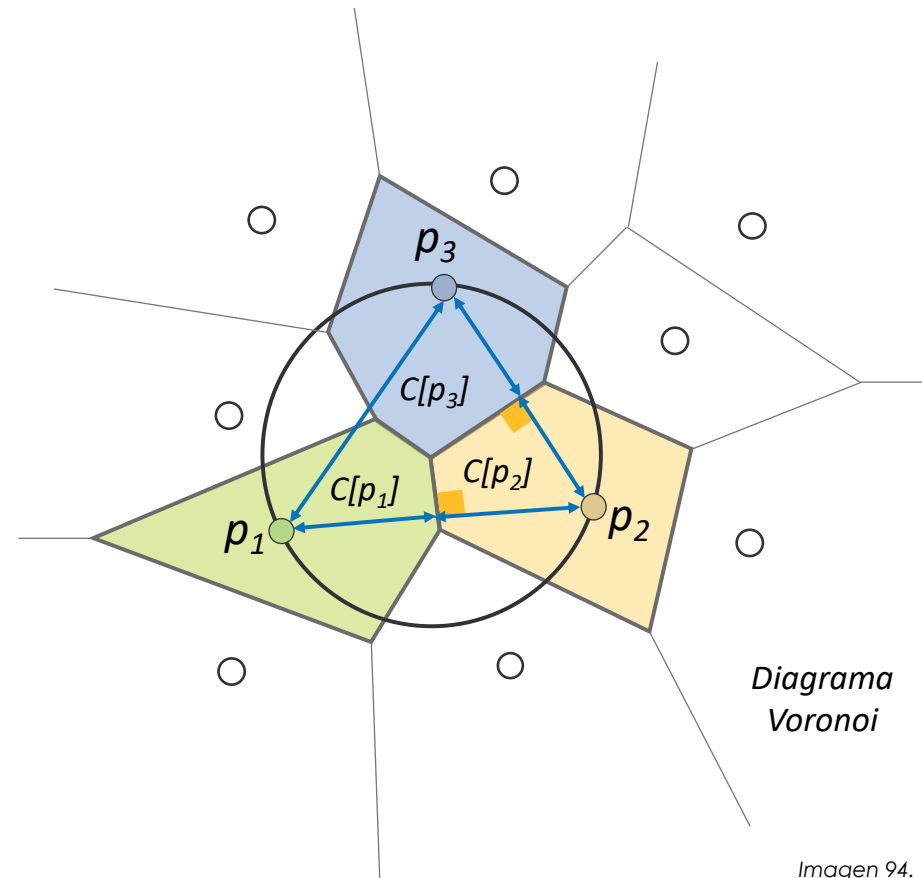


Diagrama Voronoi

Imagen 94. Diagrama Voronoi. Fuente: Reedición de esquema de Pottman et al. (2007)

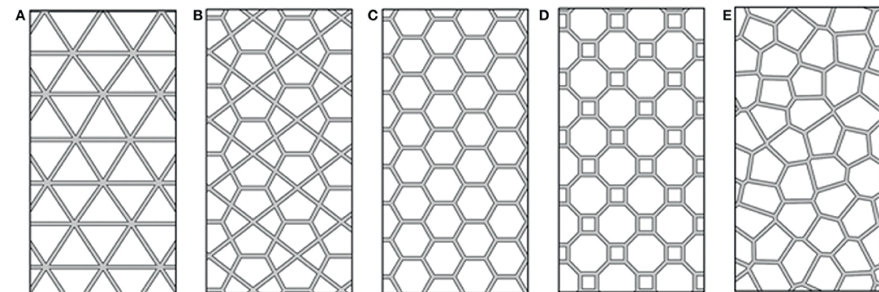
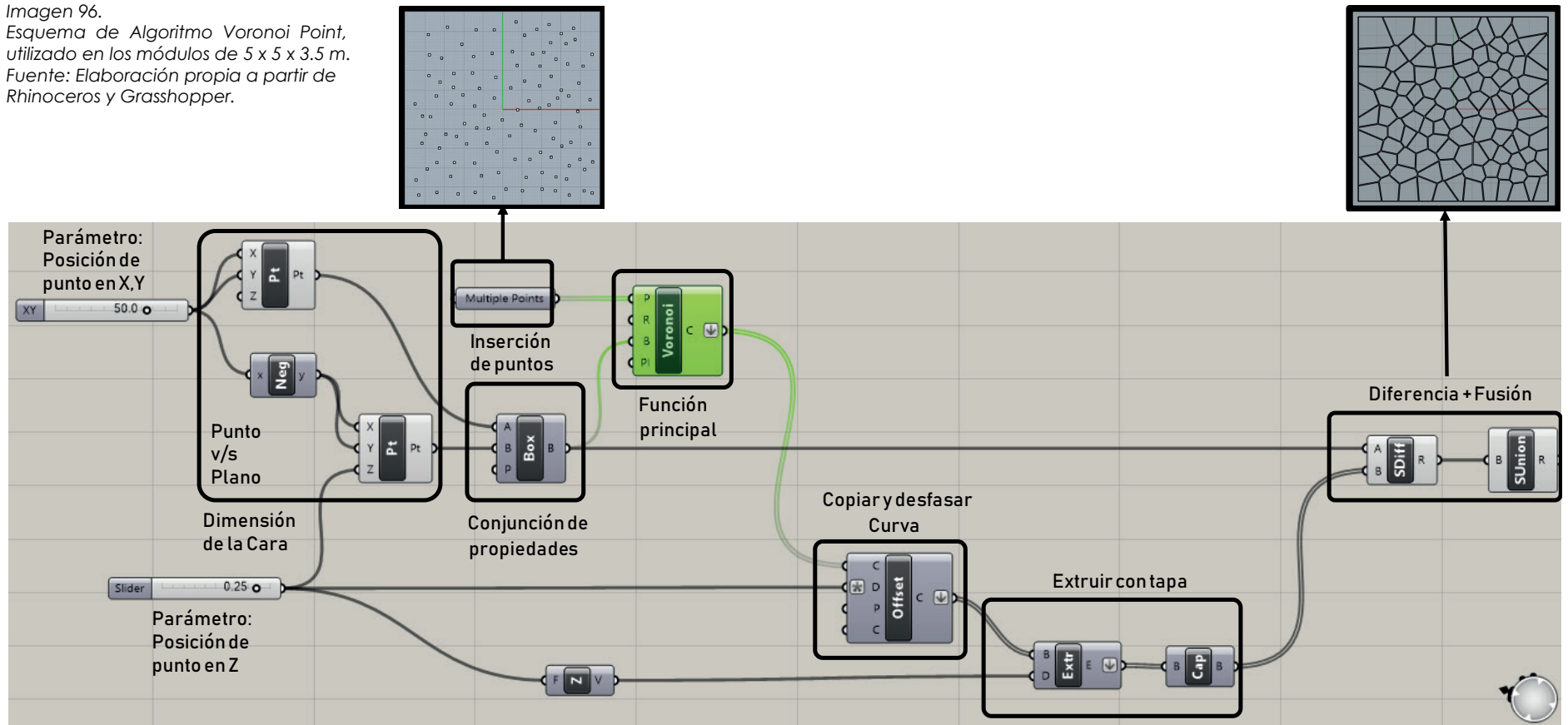


Imagen 95. Esquema de Delaunay (A) y Voronoi aplicado a tramas regulares de puntos (A-D) e irregular (E): (A) Delaunay (B) Pentagrid, (C) Hexagrid, (D) Octagrid, (E) Organic voronoi grid. Fuente: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2018.00078/full>

Imagen 96.  
Esquema de Algoritmo Voronoi Point,  
utilizado en los módulos de 5 x 5 x 3.5 m.  
Fuente: Elaboración propia a partir de  
Rhinceros y Grasshopper.



### Algoritmo Voronoi Point para ejecución del módulos iniciales de 5 x 5 x 3.5 [m]:

Para el modelado de cubierta se realizó un volumen a partir de una superficie modelada a partir de dos puntos con coordenadas (X, Y) y (X, Y, Z), utilizando ésta última para convertir dicha superficie en una caja, a la cual se le aplicó el componente voronoi, incluido en *Grasshopper*, para asignar celdas a un conjunto de puntos que, en este caso, fueron asignados desde *Rhinceros*, en forma irregular y al azar, con el fin de asignar éstos a la fórmula geométrica ya programada en el *plugin* y obtener las curvas que definen el área de las células de la piel paramétrica diseñada;

luego éstas, son desfasadas mediante la función *offset* que, básicamente genera paralelas a dichas curvas. Tras ésto, se extruye o se crea un volumen a partir de una sección determinada, en este caso las regiones del voronoi, cubriendo con un plano superior o tapa (*cap*), conectando dicho componente con las operaciones de diferencia y fusión para dar cabida al volumen compacto del espacio intercelular del voronoi. Cabe señalar que en la web abundan muchas definiciones similares pero la presentada aquí es sintética y de autoría propia.

# ALGORITMO: VORONOI SURFACE

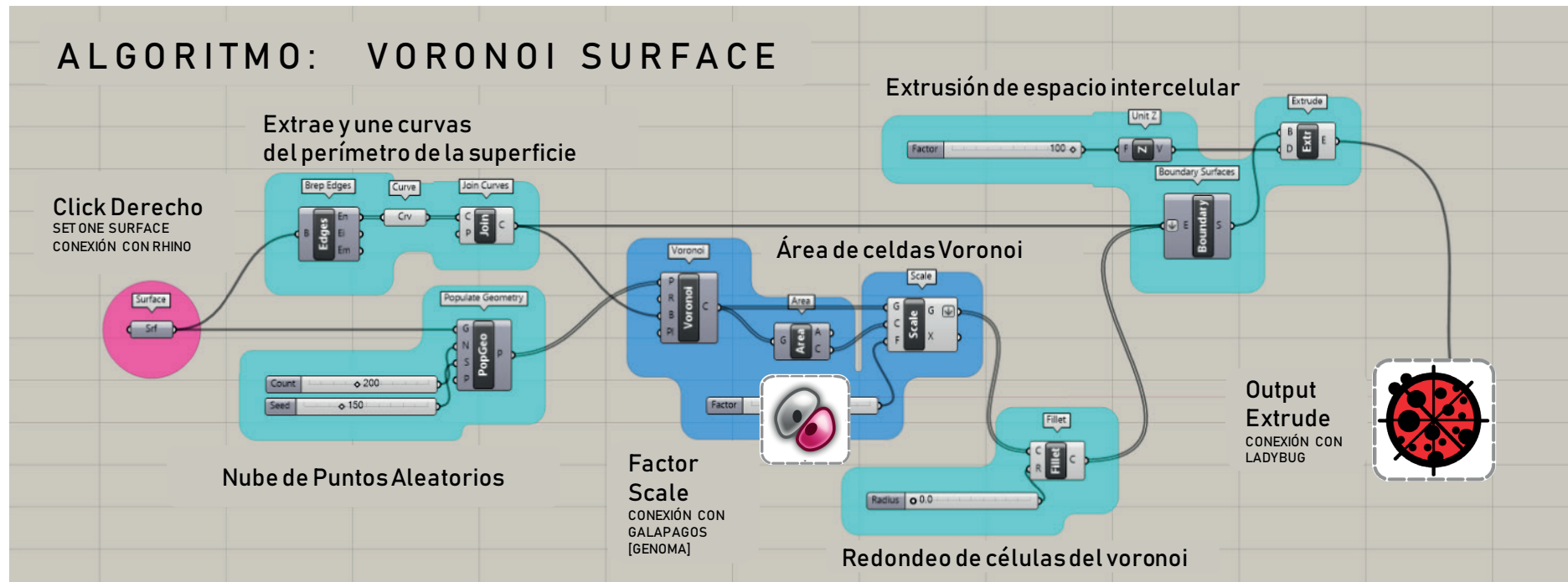
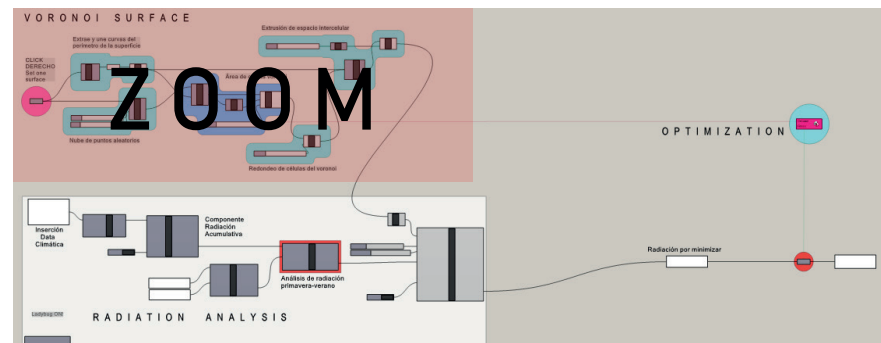


Imagen 97.  
 Fragmento del algoritmo visual en Grasshopper: VORONOI SURFACE (arriba).  
 Plataforma completa Grasshopper + Ladybug + Galápagos (abajo).  
 Fuente:  
 Elaboración propia, a partir del uso de software, plugin y componentes.  
 OBSERVACIÓN: Se modifica con fines explicativos.



## Algoritmo Voronoi Surface, aplicado a los atrios:

Su nombre se debe básicamente a que el elemento "seteado" (\*) desde la geometría de *Rhinoceros* es una superficie que puede ser modelada a partir de puntos, líneas o extraída desde un poliedro. Es importante mencionar que se desarrollaron versiones distintas del algoritmo, sin instalar *Voronax* como componente adicional en *Grasshopper*, con el fin de simplificar al máximo el proceso; teniendo en cuenta que la geometría desarrollada ya es compleja y se requiere que exista legibilidad en la secuencia de pasos o transformaciones para poder llevar a cabo sin problemas la lectura de variables a optimizar lúmicamente. Cabe señalar que para los módulos de 5 x 5 x 3,5 [m] se operó con otra definición: *Voronoi Point*, cuyos resultados están expuestos en el Punto 4.1 del capítulo; que a diferencia de ésta, "setea" un conjunto de puntos que son determinados por el usuario y no son aleatorios, es decir, no se emplea una "Populate Geometry" como se mostrará posteriormente.

(\*) setear: tecnicismo de grasshopper, a partir de "set one [element]".



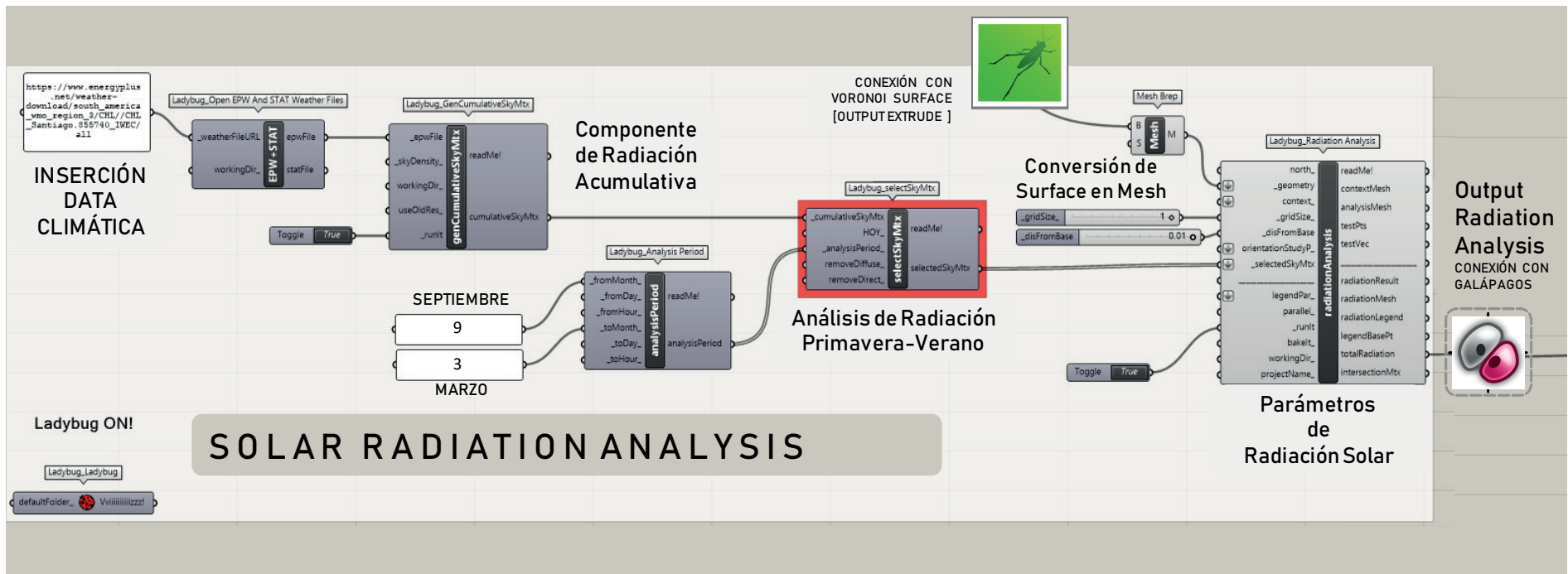
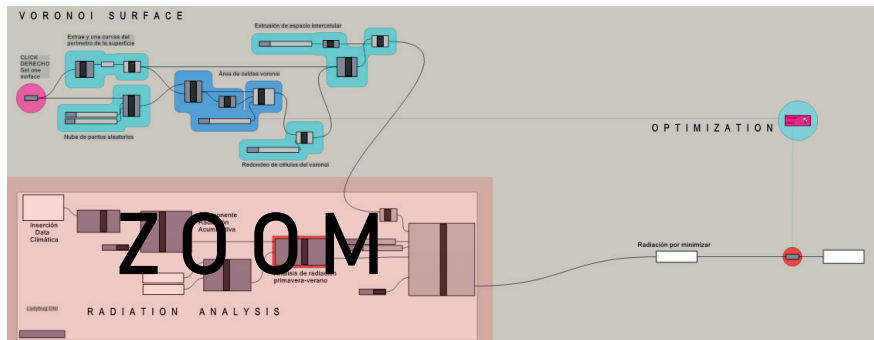


Imagen 98.  
 Fragmento de inserción de data climática y posterior configuración de variable solar con Ladybug en Grasshopper: SOLAR RADIATION ANALYSIS (arriba).  
 Plataforma completa Grasshopper + Ladybug + Galápagos (abajo).  
 Fuente:  
 Elaboración propia, a partir del uso de software, plugin y componentes.

OBSERVACIÓN: Se modifica con fines explicativos.



### Análisis de Radiación Solar, aplicado a los atrios:

La definición de *Voronoi Surface*, por sí sola, hasta *extrude* (extrusión o conversión de plano a volumen) no es operativa en *Ladybug*, es importante convertir la *surface* seteada en una *brep* (polisuperficie o colección de elementos de superficies - caras - conectadas que conforman una caja o *box*) o una *mesh* (mallado o conjunto de caras poligonales que definen una superficie en el espacio, compuesto también por vértices y aristas que en conjunto definen una *topos* o topología). Para poder llevar a cabo el análisis, éste fue el principal desafío paramétrico a desarrollar al momento de efectuar la lectura de la secuencia de pasos e ingreso de variable solar en el procedimiento, el cual fue posible a partir del componente *MESH to BREP*, para luego ingresar el período de análisis de radiación acumulativa en la polisuperficie, mediante el componente "LADYBUG ANALYSIS PERIOD" que en su *input* conecta los *number slider* o parámetros numéricos que señalan los meses de radiación: septiembre (9) y marzo (3), es decir, desde primavera hasta verano, para la reducción o minimización de ésta.

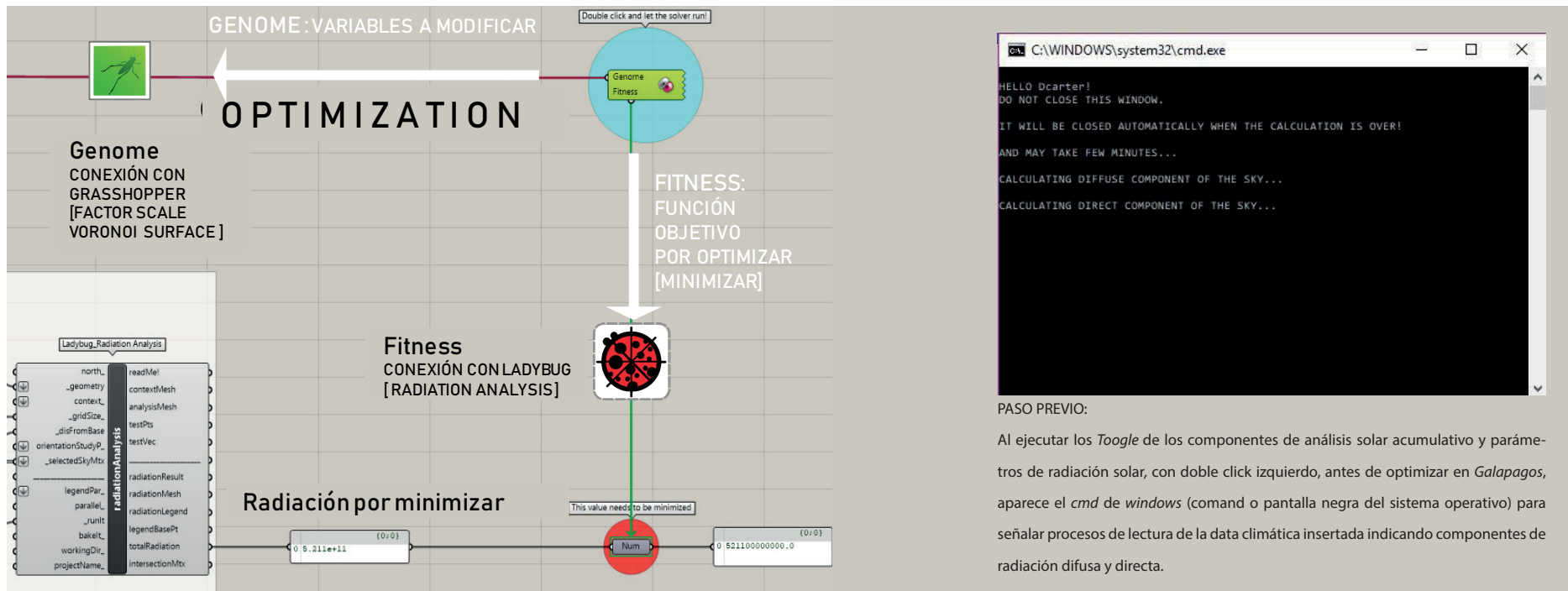
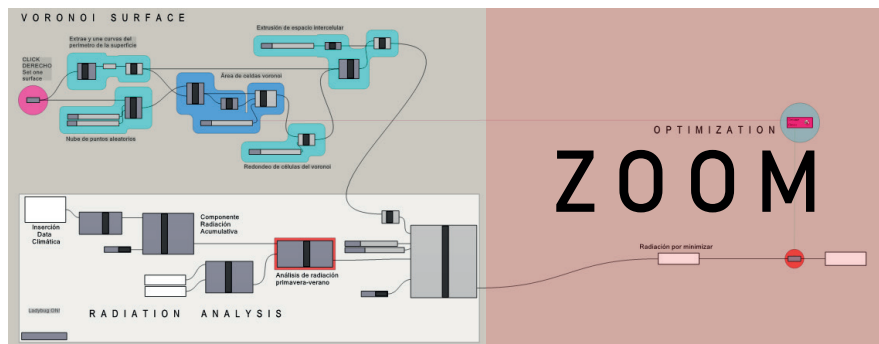


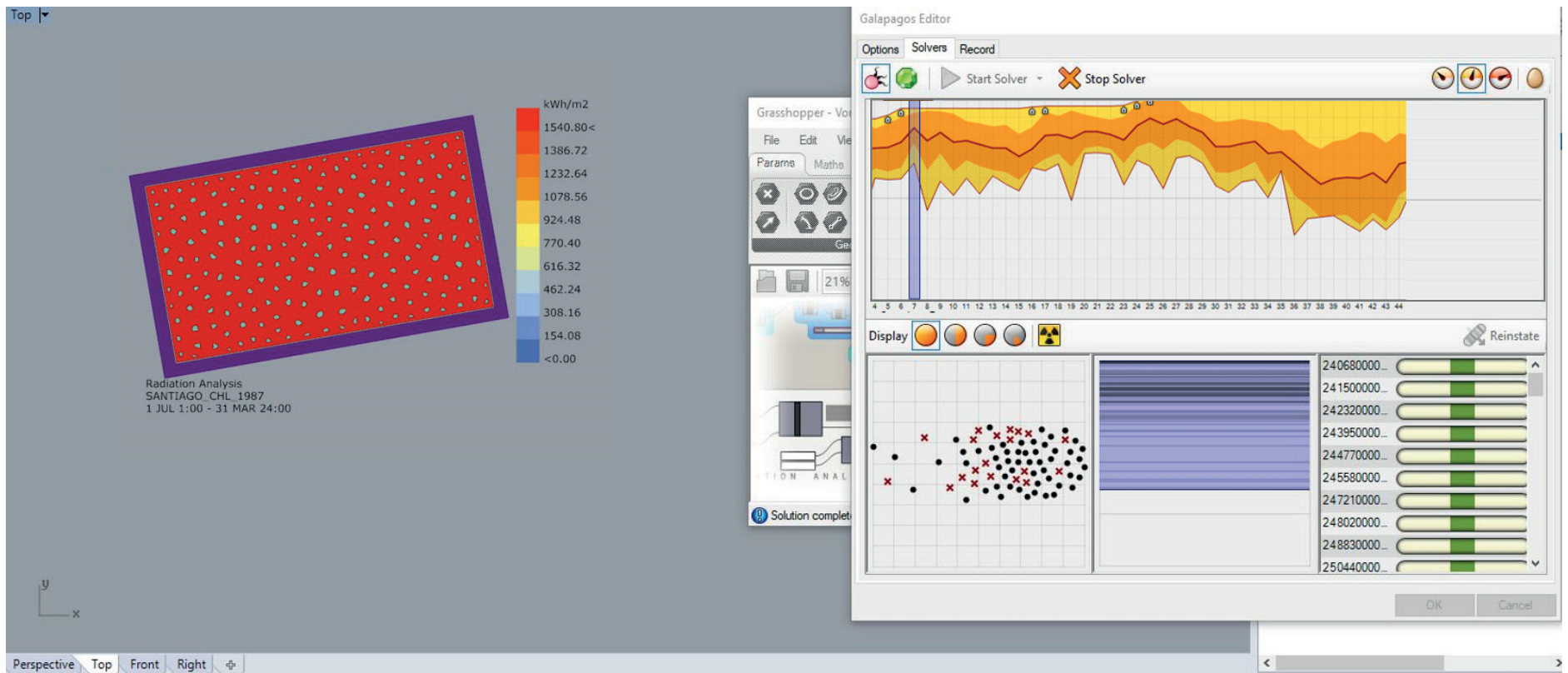
Imagen 99.  
 Fragmento de optimización a partir de minimización de variable solar: OPTIMIZATION, en torno a la radiación en la cubierta (arriba).  
 Plataforma completa Grasshopper + Ladybug + Galápagos (abajo).  
 Fuente:  
 Elaboración propia, a partir del uso de software, plugin y componentes.

OBSERVACIÓN: Se modifica con fines explicativos.



## Optimización de la radiación y área de las células Voronoi del modelo 4.

Se efectuó la alternativa optimizada [modelo 4] a partir de *Galapagos*, reducir al tamaño mínimo de las celdas o aperturas, con el fin de reducir al mínimo la radiación de la cubierta y el espacio interior, teniendo en cuenta el período con mayor exposición solar (primavera-verano), el cual ya fue ingresado como variable a través del componente *Ladybug*. Luego, al momento de utilizar *Galapagos* es importante saber que elementos de la definición serán el *Genome* y *Fitness* en nuestro proceso de optimización, es por ésto que es importante considerar la siguiente interrogante: ¿Qué es lo que se optimizará?, ya que ésto definirá las variables a iterar (*Genome*); en este caso el área de las celdas. Además de esclarecer el otro cuestionamiento: ¿En relación a que se optimizará?, que será el indicador matemático o "función objetivo" a maximizar o minimizar, en este caso, se minimizó (*Fitness*); en este caso el resultado de la radiación solar.



A modo de comentario personal, tras realizar la exploración por las distintas herramientas aquí empleadas es posible señalar, sin afán de concluir, que pese a que éstos son pasos secuenciados, metódicos y mecánicos, no son meramente intuitivos.

Se requiere gran claridad y nociones profundas en torno a los distintos conceptos y relaciones geométricas para poder llevar a cabo correctamente el algoritmo y no incurrir en pasos que pudiesen retardar los procesos de diseño a causa de prueba y error.

Además de los parámetros y variables lumínicas a tener en cuenta para el análisis solar, con el objetivo de no incurrir en errores o identificarlos

Imagen 100.  
 Proceso de optimización del Módulo 4, reduciendo el tamaño de las celdas Voronoi en función de la radiación solar.  
 Fuente: Elaboración propia, a partir del uso de software, plugin y componentes: Rhinoceros + Grasshopper + Ladybug + Galápagos.

OBSERVACIÓN: No se altera el screenshot para mayor transparencia del resultado.

rápidamente al producirse para dar una solución adecuada al inconveniente presentado y así, producir con el máximo potencial de éstas durante el ejercicio creativo. Finalmente, tras los pasos efectuados para la optimización lumínica, se obtiene la geometría de la cubierta del Módulo 4 la cual será sometida a análisis en *LightStanza*, plugin de Revit, con las respectivas configuración de simulaciones señaladas a continuación.

## Análisis de SunPath: Conos de luz versus recorrido solar para ejecución del Modelo 3

El modelo 3 considera la alternancia intuitiva de efectuar mayor cerramiento en el fragmento de fachada que posee mayor exposición a la luz solar directa, teniendo en cuenta el recorrido o *sunpath* realizado por el sol anualmente o en los distintos equinoccios de otoño (21 de marzo) y primavera (21 de septiembre), además de los solsticios de invierno (21 de junio) y verano (21 de diciembre).

El *plugin Grasshopper* en combinación con la herramienta de simulación *Ladybug*, permite realizar un estudio del recorrido solar en torno al cono de luz que recibe un espacio interior y su entorno, utilizando los principales parámetros y componentes que se señalan a continuación:

**Path:** Parámetro donde se ingresa la data climática en los valores de entrada o *input*, enlazando el archivo a partir de la búsqueda de la ruta de éste en nuestro computador.

**Import EPW:** Componente que contempla entre las salidas u *outputs* los distintos factores y variables climáticas que inciden en el estudio de calidad ambiental interior, algunos de éstos están relacionados con ubicación geográfica, orientación, temperatura, humedad, vientos, propiedades de luz e iluminación natural, radiación solar y presión. En este caso una vez ingresada la data climática en el *File Path*, sólo es necesario reconocer la orientación y latitud con el componente *Ladybug SunPath*.

**Ladybug\_Sunpath:** Componente que cuenta con valores de entrada (*input*) y valores de salida (*output*). Entre los primeros, se encuentran ingreso de datos o variables para realizar las simulaciones tales como la latitud, las horas, días, meses, años, períodos de análisis, escala, proyecciones, horas anuales; mientras que, en los segundos, encontramos vectores

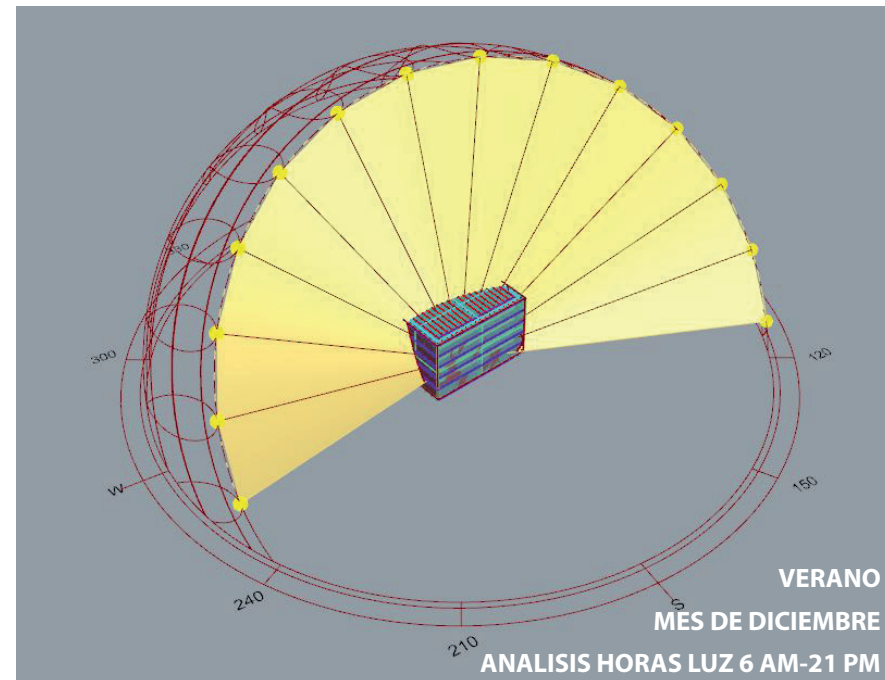
solares, altitudes, azimuts, posiciones solares, data por horas, entre otros.

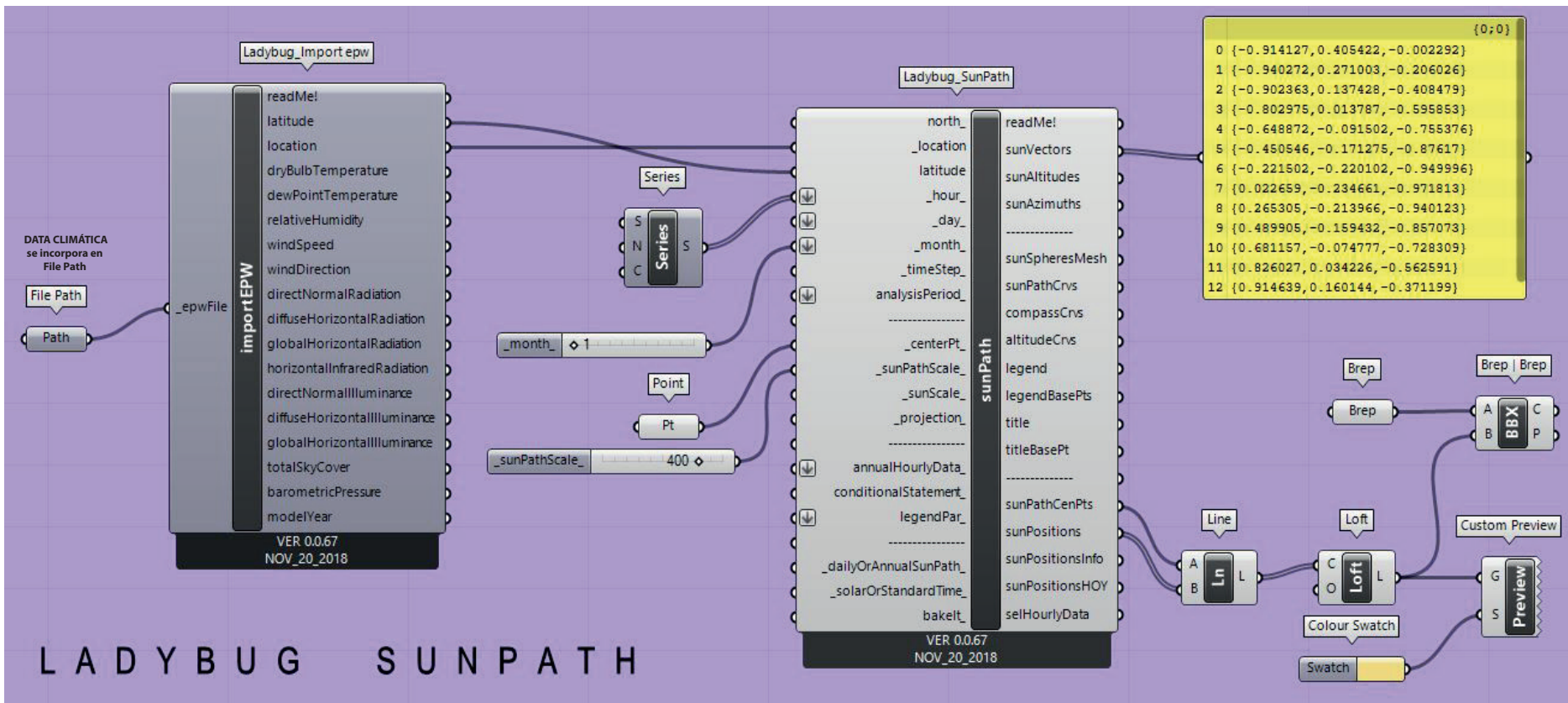
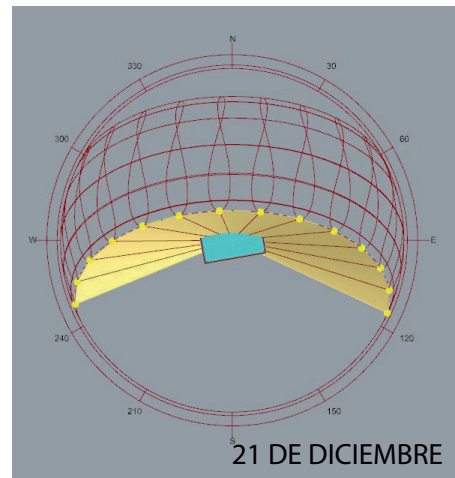
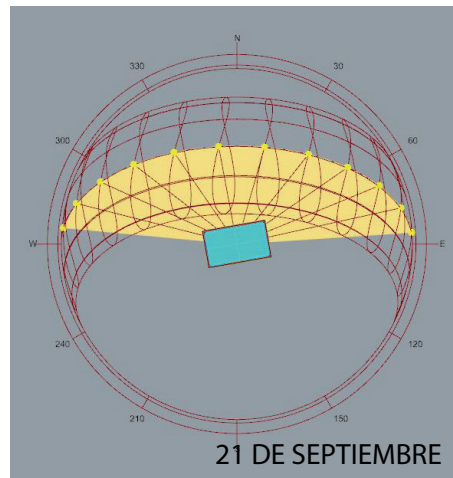
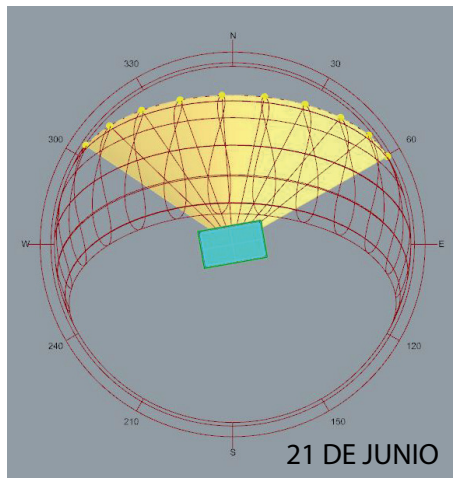
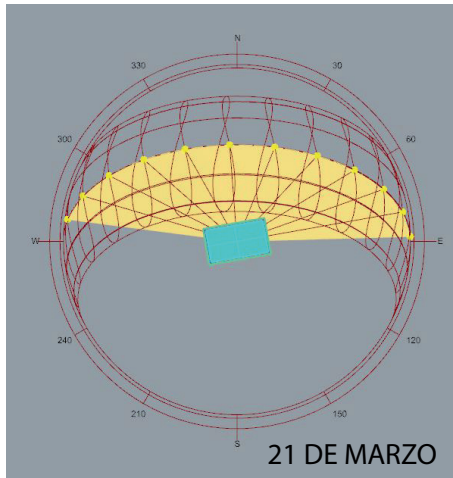
En la definición se añadió series como componente para ingresar un set de 24 horas (*hours*) en la entrada (*input*) del componente *sunpath* de *Ladybug*.

Además, se incorporó el parámetro *number slider*, con el que se ingresaron los meses del año que, son clave para el análisis de disponibilidad solar a tener en cuenta en el diseño de la celosía para definir las zonas de sombreado o cerramiento y las zonas expuestas o aperturas de celdas, considerando el cono de exposición solar.

Imagen 101.

Análisis de exposición del cono de luz solar a partir de Sunpath (abajo y a la derecha).  
Fuente: Elaboración propia con herramientas Rhinoceros + Grasshopper + Ladybug.





## Configuración de simulaciones en LightStanza

La aplicación seleccionada *LightStanza (versión 3.1.83.4)*, como ya se mencionó posee un *plugin* habilitado en las versiones 2018 y 2019 de *Revit*, el cual realiza la conexión con el servidor *In Cloud* (en la nube) en el cual es posible realizar las siguientes simulaciones, mediante el motor de cálculo *Radiance 5.2* en su versión *full*, con las configuraciones sugeridas en diversos documentos de certificaciones y estandarizaciones, tales como LM 83 - 12, CES, LEED v4 que, por motivos sintéticos no son detallados, pero se enuncian y sentencian a continuación:

- Data climática se ingresa a partir de la dirección del atrio más representativo que cumple con la orientación más desfavorable, contemplada en investigación de la docente.
- Grilla horizontal para cálculo de iluminancias de 600 [mm], a una altura de 0.76 [m] que corresponde al plano de trabajo estándar.
- Período de ocupación de 8 AM a 8 PM, considerando horarios de edificios públicos.
- Simulaciones anuales consideran período anual desde el 01 de Enero al 31 de Diciembre.
- Grilla para deslumbramiento y cálculo de brillo luminoso a la altura del observador: 1.50 [m]
- Escala de iluminancias considera como límite 3000 y 5000 luxes.

The screenshot shows the configuration interface for LightStanza. It includes sections for Sky Conditions, Grid Settings, Period, Occupancy, Sky Type, Climate Station, Day Interval, and Finder Settings. The interface is designed for setting up simulation parameters such as point spacing, scale, period, occupancy, and climate station.

This screenshot shows the 'Heat Maps' and 'Multiple Times' sections of the LightStanza settings. The 'Heat Maps' section has a color scale and a 'Use UDI Time Threshold' checkbox. The 'Multiple Times' section includes a 'Multiple Times' checkbox, a 'Preset' dropdown, and a calendar grid.

Imagen 102-103.  
Configuración LightStanza  
Fuente:  
Screenshots de la app.

## 4.5. Metodología de análisis del caso estudio y estandarizaciones

Es de suma importancia establecer los criterios de evaluación de los modelos de estudio, de modo que se establezcan cuáles serán las métricas o criterios de evaluación a considerar. Para ello, es de suma importancia señalar que existen relaciones respecto al confort lumínico y visual, las cuales se definen a continuación, en términos de rangos y límites a tener en cuenta:

**FLD - Factor Luz Día (Daylight Factor):** Aún cuando esta métrica es de carácter estático, los TDRe de la DA MOP (2011)\*, con los que operan la mayoría de las licitaciones públicas, señala que existe riesgo de incomodidad visual por deslumbramiento cuando es mayor a 10.

**% UDI - e (excedido) > 3000 lux:** (Useful Daylight Illuminance - exceeded) Esta corresponde a una métrica de carácter dinámico advierte que al superarse el umbral límite de los 3000 [lux] de iluminancia se produce disconfort lumínico visual, cuyo valor es contemplado en CES (2014)\* para zona central interior (CI)

**% de Brillo Anual y DGP - Probabilidad de Deslumbramiento:** Respecto al brillo luminoso, éste sera imperceptibles cuando sean inferior a 35%, perceptible de 35-40%, molesto al llegar al 45% e intolerable de 45-100% (Jakubiec y Reinhart,2010)

**% ASE - (Annual Solar Exposure):** Según LEED v4 (2018), debe encontrarse entre un rango que abarque del 4% al 20% para que no exista estrés térmico por ganancia solar.

(\*) páginas web de certificaciones y estandarizaciones consultadas en bibliografía

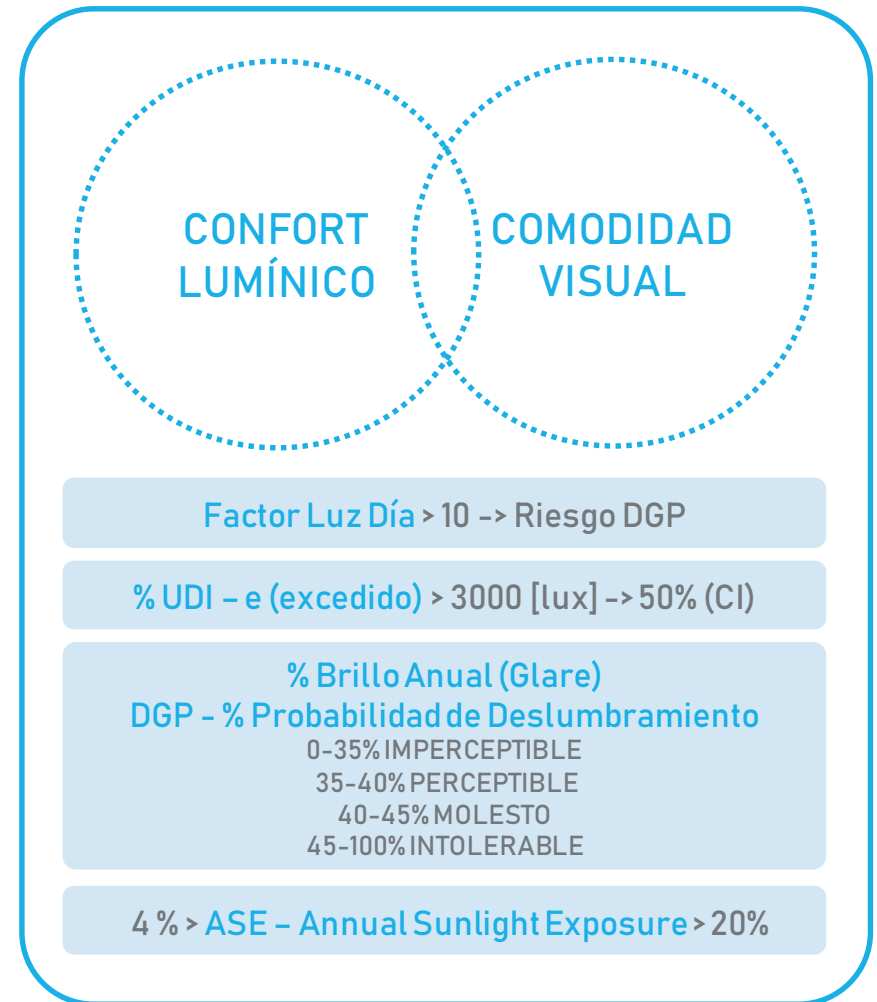


Imagen 104.  
Metodología de análisis aplicada.  
Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que no se consideran los cálculos de las magnitudes fotométricas iluminancias y luminancias, ya que están implícitas en los cálculos de UDI - e y DGP, respectivamente.

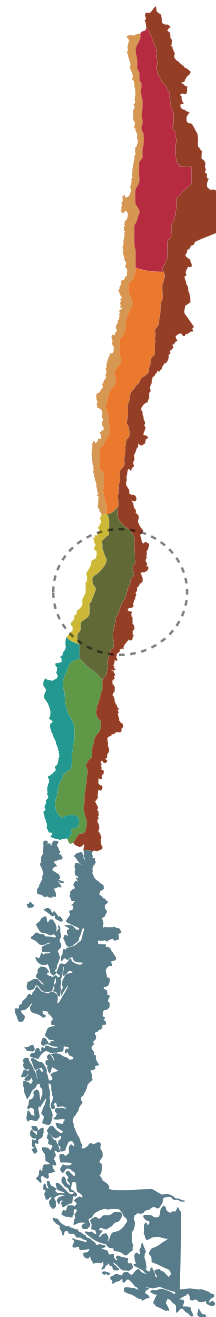
## 4.6. Parámetros climáticos e iluminancia de cielo de Santiago

<b>LATITUD:</b>	33,38° Sur.
<b>LONGITUD:</b>	70,78° Oeste.
<b>ELEVACIÓN:</b>	476,0 msnm.
<b>ZONIFICACIÓN:</b>	CI Centro Interior (NCh 1079 Of 2008).
<b>CLASIFICACIÓN:</b>	Csb (según Köpen - Geiger)
<b>(Climática)</b>	Clima mediterráneo de verano cálido.

Santiago de Chile se ubica en la Región Metropolitana. Geográficamente esta ciudad está situada en los 33.38° Latitud Sur y 70.78 ° Longitud Oeste. Posee un clima templado, del tipo mediterráneo de una estación seca y prolongada, de 4 a 5 meses aproximadamente.

Santiago, posee una temperatura media anual de 13,9 [ °C ]. En enero, el mes más cálido alcanza un promedio de temperaturas de 22,1 [ °C ], mientras que en julio, el mes más frío sólo 7,7 [ °C ] (bcn, 2019). La oscilación media mensual en verano bordea los 17 [ °C ] y los 11 [ °C ] en invierno, por lo que la fluctuación de temperatura diaria es moderada y aumenta hacia el este, mientras que las lluvias y heladas aumentan hacia el sur y poseen un carácter irregular que bordea los 100 - 500 [ mm ] y alcanza un promedio anual que bordea los 369,5 [ mm ] de precipitaciones (bcn, 2019).

Santiago posee una intensa insolación en verano, especialmente hacia el noreste (bcn, 2019). El promedio de radiación solar diaria en una superficie unitaria (m<sup>2</sup>), - considerando la global, directa y difusa -, alcanza los



### S I M B O L O G Í A

NORTE LITORAL	
NORTE DESERTICA	
NORTE VALLES TRANSVERSALES	
CENTRAL LITORAL	
CENTRAL INTERIOR	
SUR INTERIOR	
SUR LITORAL	
SUR EXTREMO	
ANDINA	

### REGIÓN METROPOLITANA

CL - CENTRAL LITORAL  
CI - CENTRAL INTERIOR  
A - ZONA ANDINA



Imagen 105. Mapa de Zonificación Climática de Chile  
Fuente: Guía de Diseño para la eficiencia energética de la vivienda social (2009).



6.067 y 1626,67 [kWh/m<sup>2</sup>], en los meses de enero y junio, respectivamente; mientras que la radiación solar máxima bordea los 863 y 506 [kWh/m<sup>2</sup>] correspondientes al mismo período, según los valores extraídos desde la Data Climática IVEC (*International Weather for Energy Calculations*), actualizada al año 2018 expuestos en la presente tesis de investigación (*Ver Tabla 1*). Según Baixas (2012), considerando los índices de radiación solar directa en climas templados como los de Santiago se debe hacer hincapié en la generación de sombra, especialmente en verano, donde se alcanzan los niveles más altos de insolación en las superficies de las envolventes de los edificios.

Rango de Radiación Directa, Global y Superficial [ kWh/m<sup>2</sup> ]

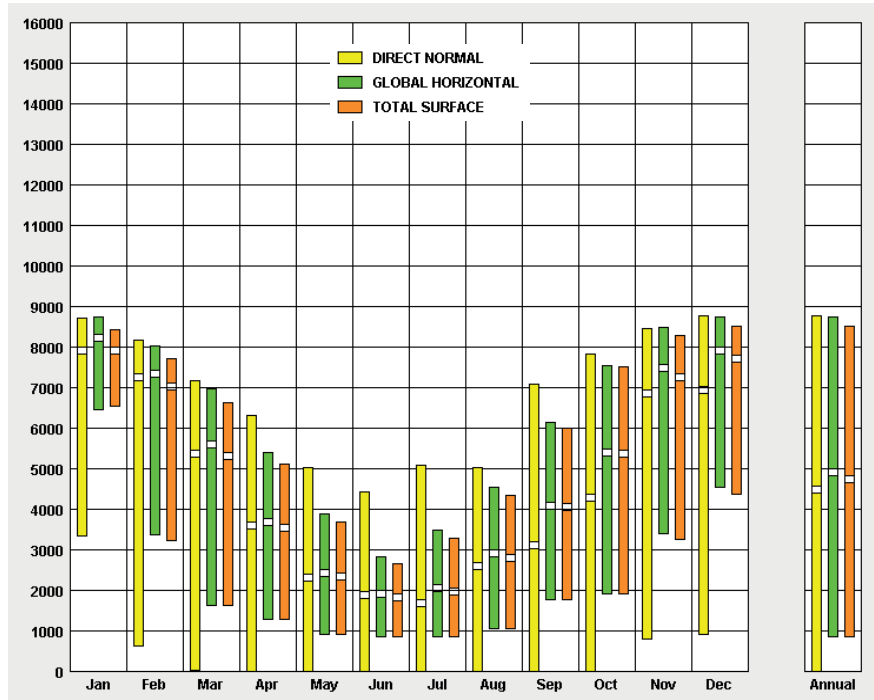


Imagen 106. Radiación, directa (amarillo), global (verde) y superficial (naranja) Extraído desde aplicación Climate Consultant con data climática IVEC actualizada al año 2018.

Teniendo en cuenta la data climática expuesta en los gráficos extraídos desde la *app Climate Consultant 6.0*, a nivel de superficie, las fachadas pueden alcanzar una radiación que bordea los 6500 a 8500 [kWh/m<sup>2</sup>] en el mes de enero, en el escenario más ideal, considerando la variabilidad de cobertura de cielo, propia de la latitud en la que se encuentra.

Sin embargo, según Piderit y Cauwerts (2014), la calidad de iluminación natural guarda estrecha relación con las condiciones de luminosidad del cielo que varían según la ubicación geográfica, recorrido solar, clima y nubosidad.

Rango de iluminación directa y global [ Lux ]

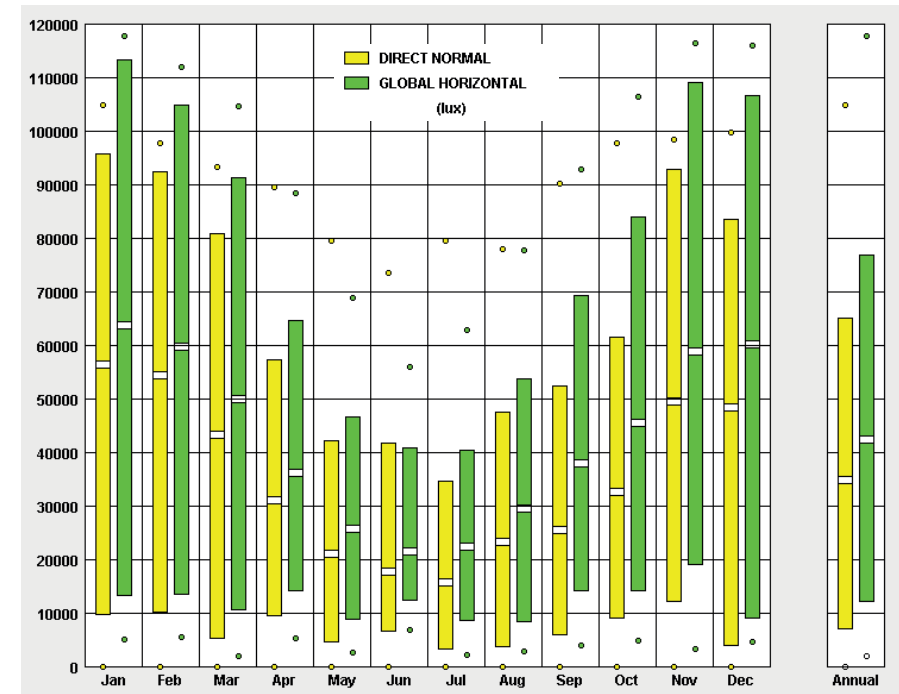


Imagen 107. Rango de iluminación en luxes, directa (amarillo) y global (verde). Extraído desde aplicación Climate Consultant con data climática IVEC actualizada al año 2018.

La CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) en el año 2003, definió 4 tipos de cielo *standard*: cielo despejado (*Clear Sky*), cielo despejado y turbio (*Clear Turbed Sky*), cielo parcialmente nublado (*Intermediate Sky*) y cielo nublado (*Overcast Sky*).

Éstos poseen una determinada frecuencia, distribución espacial y contribución real de iluminancia y son comúnmente utilizados para realizar simulaciones de carácter lumínico, señalando que éstos deben considerarse en la elección adecuada de las estrategias de diseño de control solar a aplicar, ya que determinarán la disponibilidad de luz solar e incidirán en la variabilidad de iluminancia o flujo luminoso de la bóveda celeste.

Según la investigación Fondecyt de Piderit y Cauwerts (2014), realizada con el desarrollo de fotografías de alto rango dinámico HDR, Santiago, es la ciudad de Chile que presenta mayores variaciones de cielos e iluminancias durante el año que, permitirán tener ciertos parámetros de comparación para el análisis. Mientras que en enero, febrero y noviembre predomina el cielo despejado; en septiembre y diciembre se tiene un cielo parcialmente nublado, desde abril a agosto se tiene un cielo mayormente nublado, al igual que en octubre y en marzo equitativamente los cielo despejado-turbio y parcialmente nublado.

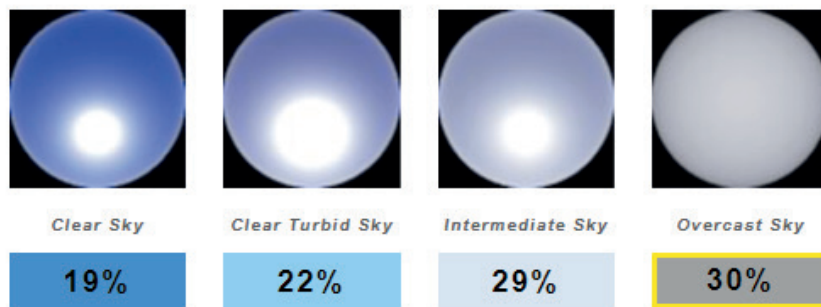


Imagen 108. Porcentaje anual de frecuencia de cielo standard CIE en Santiago. Fuente: <http://iluminachile.ubiobio.cl/freqsky.php?c=santiago>.

Frecuencia mensual de cielos standard CIE en Santiago [ % ]

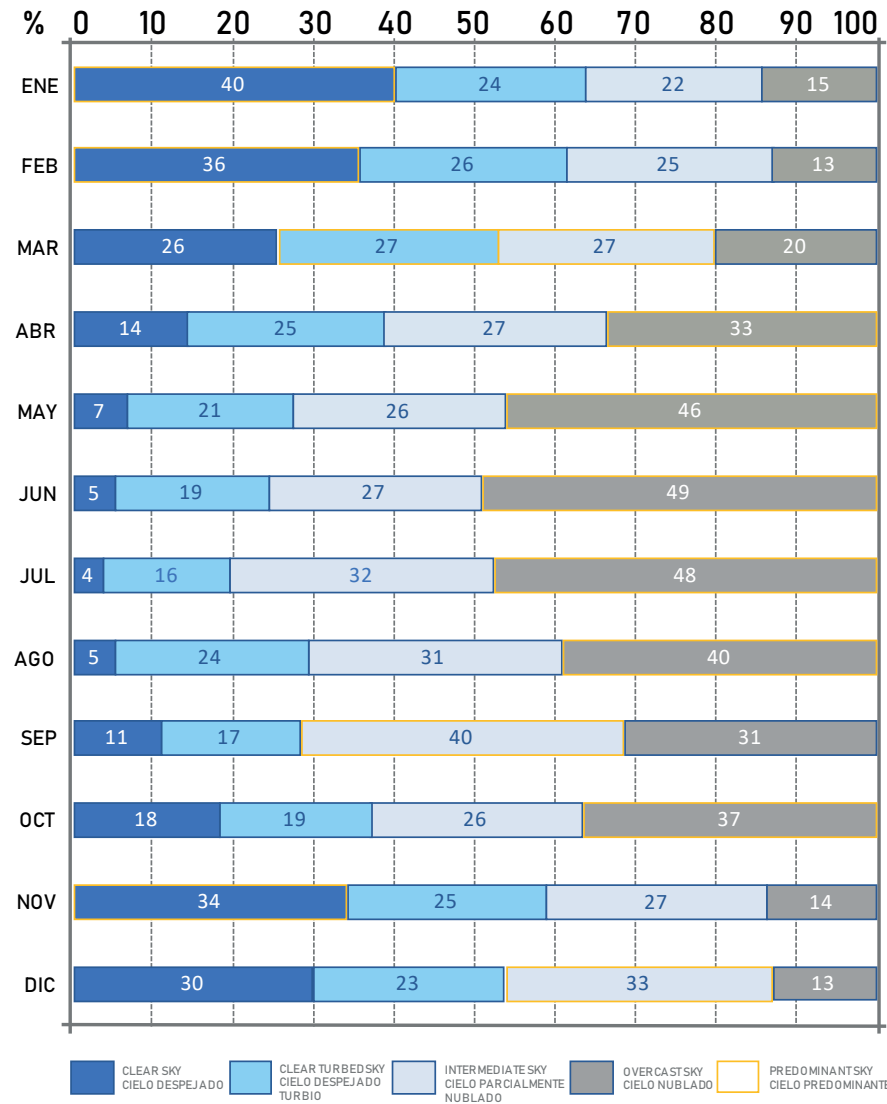


Imagen 109. Porcentajes de frecuencia de cielo standard CIE en Santiago. Fuente: <http://iluminachile.ubiobio.cl/freqsky.php?c=santiago>.

**Tabla 1. Radiación Solar Global, Directa y Difusa e Iluminancia Global y Directa por meses, según IWECC Data**

VARIABLE SOLAR CLIMÁTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	PROM
<b>9 AM</b> Radiación Global Horizontal (Promedio por Hora) [kWh / m <sup>2</sup> ]	589	553	459	329	235	196	203	269	346	417	544	557	391,4
Radiación Directa Normal (Promedio por Hora) [kWh / m <sup>2</sup> ]	567	548	440	322	223	192	168	241	263	331	499	489	356,9
Radiación Difusa (Promedio por Hora) [kWh / m <sup>2</sup> ]	147	143	151	136	120	108	123	134	176	175	158	177	145,7
<b>12 PM</b> Radiación Global Horizontal (Máximo por Hora) [kWh / m <sup>2</sup> ]	1094	1041	958	806	634	514	578	715	879	1011	1072	1097	866,6
Radiación Directa Normal (Máximo por Hora) [kWh / m <sup>2</sup> ]	996	958	904	863	786	737	783	768	882	957	958	973	880,4
Radiación Difusa (Máximo por Hora) [kWh / m <sup>2</sup> ]	499	487	441	373	373	267	345	346	446	545	592	593	442,3
<b>15 PM</b> Radiación Global Horizontal (Promedio diario) [kWh / m <sup>2</sup> ]	8227	7334	5613	3686	2420	1926	2048	2912	4090	5394	7482	7900	4919,3
Radiación Directa Normal (Promedio diario) [kWh / m <sup>2</sup> ]	7921	7257	5385	3608	2302	1891	1697	2594	3108	4283	6854	6944	4487
Radiación Difusa (Promedio diario) [kWh / m <sup>2</sup> ]	2053	1908	1839	1516	1236	1063	1237	1455	2092	2268	2171	2513	1179,3
<b>DÍA</b> Iluminancia Global Horizontal (Promedio por hora) [Lux]	63832	59674	50041	36149	25757	21525	22417	29586	38030	45580	58862	60309	42646,8
Iluminancia Directa Normal (Promedio por hora) [Lux]	56434	54347	43259	31131	21157	17835	15790	23232	25607	32724	49583	48452	34962,6

Tabla 1. Variables solares climáticas mensuales - Radiación e Iluminancia de Santiago de Chile, RM  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos desde aplicación Climate Consultant con data climática IWECC actualizada al año 2018.

## 4.7. Análisis y comparación de resultados

**FACTOR LUZ DÍA :** En primera instancia se simula la métrica estática anual Factor Luz Día (FLD) que posee la configuración de cielo nublado (*Overcast Sky*), según cielo estándar CIE (2003) y para la calificación se tiene en cuenta los TDR DA MOP (2011), que señalan que la insuficiencia lumínica existe cuando en estas condiciones se tienen valores menores al 1%, valor mínimo de 2%, aceptable desde 2% al 5%, ideal de 5% a 10% e inaceptable cuando estos son mayores a 10%, existiendo altas probabilidades de que exista deslumbramiento para este último rango (DGP). Se constata que esta relación de iluminancia horizontal (interior/exterior) disminuye para cada piso análogo, conforme disminuye la apertura del cerramiento de la cubierta y que en todos ellos los valores mayores corresponden al quinto y primer piso, en forma descendente.

Se deduce además que, los casos 1, 2, 3 serán los más desfavorables a DGP, ya que, estos casos: el atrio sin voronoi (1P, 3P, 4P, 5P), el atrio con voronoi aleatorio (1P, 4P, 5P) y el atrio con voronoi atractor (5P), respectivamente, superan el 10% para los pisos señalados en paréntesis para cada uno, como se visualiza en la tabla.

Analizando los promedios de FLD, se tiene que a nivel general el más desfavorable, sin lugar a dudas, es el caso 1, con un 13,48%, le siguen el caso 2 y caso 3, con un 11,30% y 7,62% como señala la imagen en la página contigua, en la cual se marca una notoria diferencia entre éstos, mayormente en amarillo y el caso 4 en el cual abunda los colores azules. Además, considerando estos valores totales, es posible delucidar que los casos 1 y 2 poseen alta probabilidad de deslumbramiento, el caso 3 es el más ideal y el caso 4 se excluye del rango de insuficiencia, pero no alcanza el valor mínimo de FLD.

Por otra parte, el único caso que posee insuficiencia lumínica es el caso 4 (2P, 3P), debiendo alternarse con energía eléctrica en los pisos acotados,

Imagen 110-111.  
Tabla de FLD para los casos atrios (derecha) y resultados de promedios en 3D. (página contigua)  
Fuente:  
Elaboración propia a partir de los cálculos con LightStanza y excell.

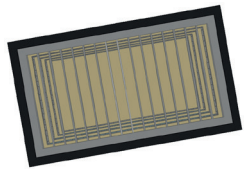
CASO / PISO	FLD
CASO 1/1° P	15,21
CASO 1/2° P	8,42
CASO 1/3° P	10,99
CASO 1/4° P	13,61
CASO 1/5° P	15,68
CASO 2/1° P	11,58
CASO 2/2° P	6,47
CASO 2/3° P	8,38
CASO 2/4° P	10,41
CASO 2/5° P	21,15
CASO 3/1° P	7,8
CASO 3/2° P	4,63
CASO 3/3° P	6
CASO 3/4° P	6,98
CASO 3/5° P	12,3
CASO 4/1° P	1,34
CASO 4/2° P	0,75
CASO 4/3° P	0,96
CASO 4/4° P	1,17
CASO 4/5° P	2,47

posiblemente en las temporadas de otoño e invierno, en las que suele utilizarse este tipo de iluminación.

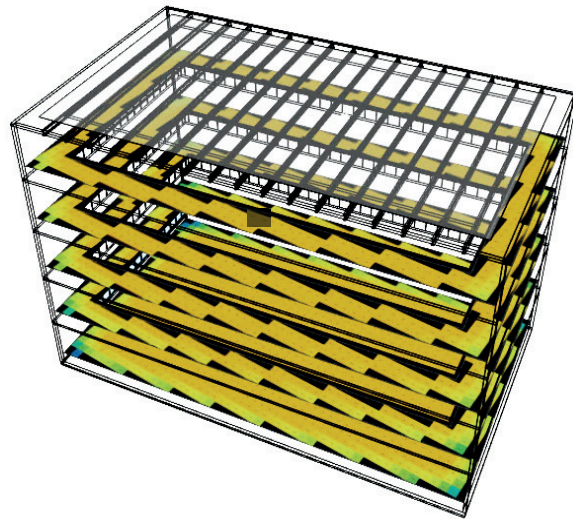
A partir de esto último, se deduce hipotéticamente que existen posibles ajustes a los modelos 3 y 4 para obtener una mejora, aumentando levemente el cerramiento del atrio con voronoi atractor o combinando la minimización en primavera - verano y maximización en otoño - invierno, respecto a la radiación solar en el optimizador *Galapagos*.

< ANÁLISIS DE LOS 4 CASOS DE ESTUDIO >

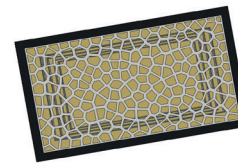
Factor luz día de las cubiertas paramétricas [grilla 600mm]



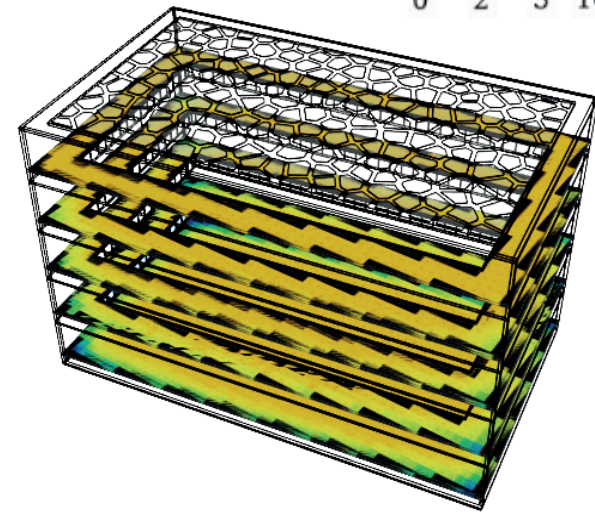
CASO 1  
Atrio sin Voronoi



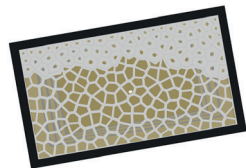
PROMEDIO:  
13,48 %



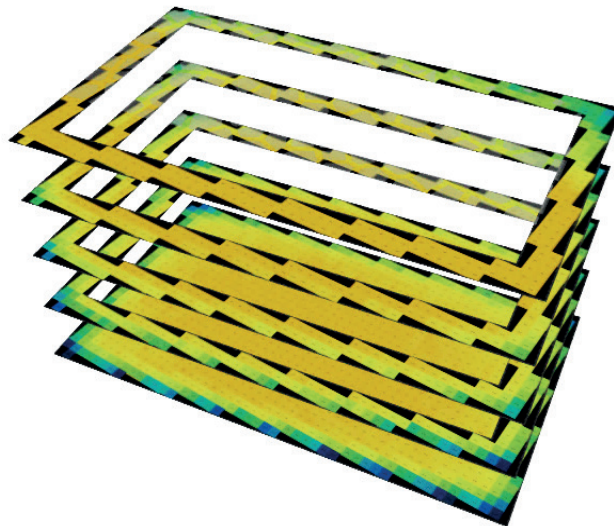
CASO 2  
Voronoi Aleatorio



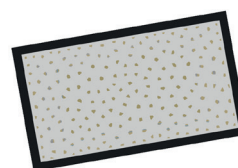
PROMEDIO:  
11,30 %



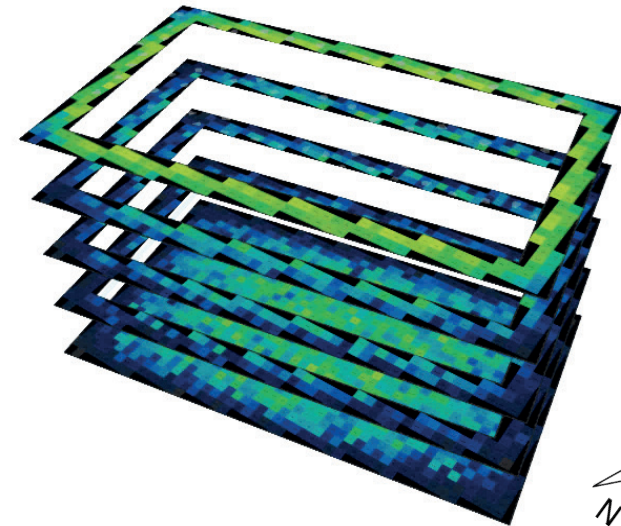
CASO 3  
Voronoi Atractor



PROMEDIO:  
7,62 %



CASO 4  
Voronoi Optimizado



PROMEDIO:  
1,34 %



## ANÁLISIS DE MAPAS DE RADIACIÓN DE LOS ATRIOS :

Para el análisis de radiación solar en la cubierta, se consideró que todas las escalas parten desde un mismo valor, por lo cual se analizó la correspondencia entre las modulaciones de éstas, comprendiendo que la lógica de subdivisión de tramos es proporcional a los valores obtenidos.

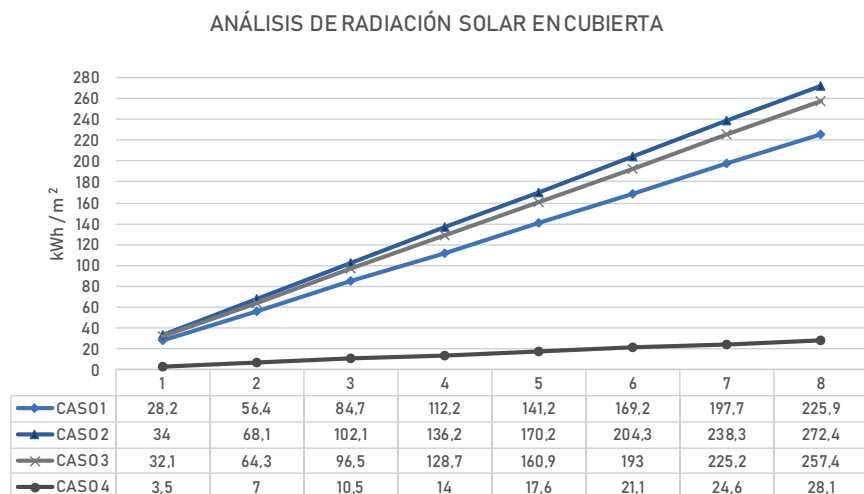


Imagen 112-113. Gráfico de análisis de radiación de cubiertas de los atrios (arriba) y Tabla de comparación entre casos (abajo)

Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightSTanza y excell.

INTERVALO	$\Delta Q$ CASO1 v/s CASO4	$\Delta \%$ CASO1 v/s CASO4	$\Delta Q$ CASO3 v/s CASO1	$\Delta \%$ CASO3 v/s CASO1	$\Delta Q$ CASO2 v/s CASO3	$\Delta \%$ CASO2 v/s CASO3
1	24,7	87,6%	3,9	12,1%	1,9	5,6%
2	49,4	87,6%	7,9	12,3%	3,8	5,6%
3	74,2	87,6%	11,8	12,2%	5,6	5,5%
4	98,2	87,5%	16,5	12,8%	7,5	5,5%
5	123,6	87,5%	19,7	12,2%	9,3	5,5%
6	148,1	87,5%	23,8	12,3%	11,3	5,5%
7	173,1	87,6%	27,5	12,2%	13,1	5,5%
8	197,8	87,6%	31,5	12,2%	15	5,5%
PROMEDIO	111,14	87,6%	17,83	12,3%	8,44	5,5%

En otras palabras, el "x%" estará posicionado en el mismo segmento de rango o recorrido, independiente que los valores sean distintos, para lo cual se genera una tabla, en base a los 8 intervalos resultantes para cada caso. Cabe mencionar que la inclinación de la pendiente de las rectas expresan la tendencia ascendente que tendrá cada una de las intervenciones de la cubierta del atrio.

Al analizar el área bajo la recta, la mayor, indica cual de éstas posee peor desempeño ante esta variable termolumínica; es así como el CASO 2 (atrio con voronoi aleatorio) es el más desfavorable, seguido por los CASOS 3 y 1 (atrio con Voronoi atractor y atrio sin voronoi). De los cuatro diseños, el más conveniente es el CASO 4, que corresponde al atrio optimizado a la radiación de primavera - verano. La mayor y menor diferencia porcentual se encuentra al comparar los CASOS 1-4 y 2-3, los cuales varían porcentualmente en un 87.6% y un 5.5%, respectivamente.

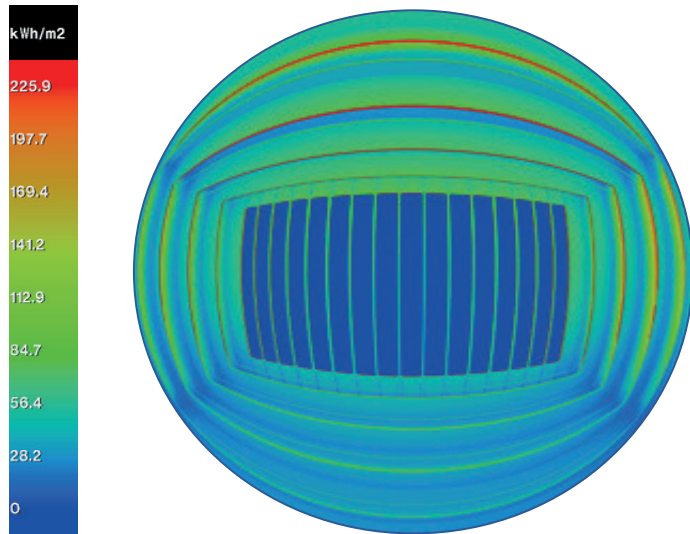
Finalmente, los mapas de radiación solar de la página contigua, muestran que los mayores índices de radiación (rojos) poseen una distribución distinta, para los CASOS 1, 2 y 4 en el este - norte - oeste, mientras que en el CASO 3 éstos se sitúan en el lado este - sur - oeste, debido a que el mayor cerramiento de la cubierta se sitúa al norte. Además los valores intermedios (verdes) posee mayor valor y representatividad en el CASO 1.

Imagen 112.

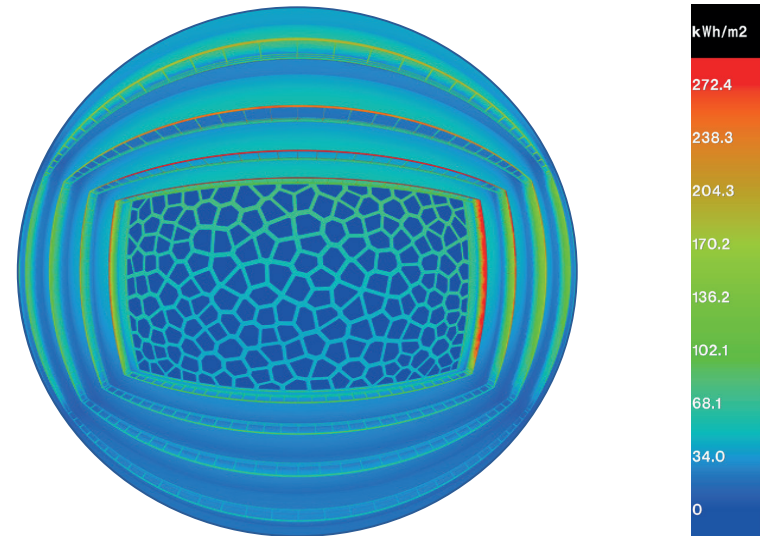
Mapas de radiación solar de casos. (a la derecha, en página contigua)

Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightSTanza y excell.

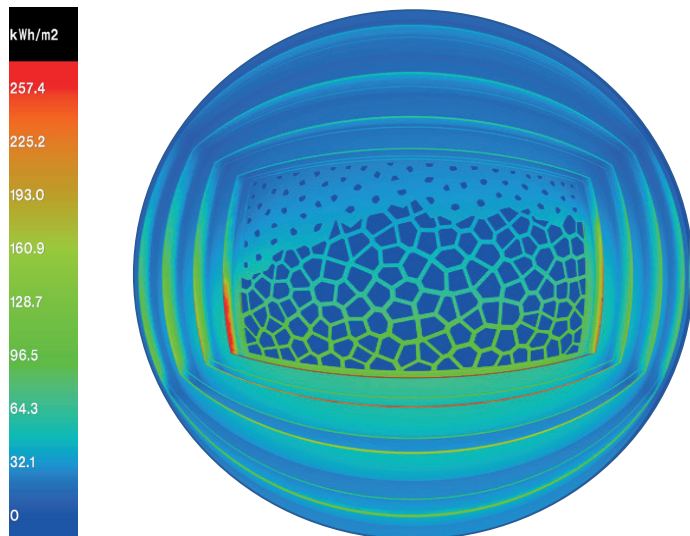
CASO1 < ATRIO SIN VORONOI >



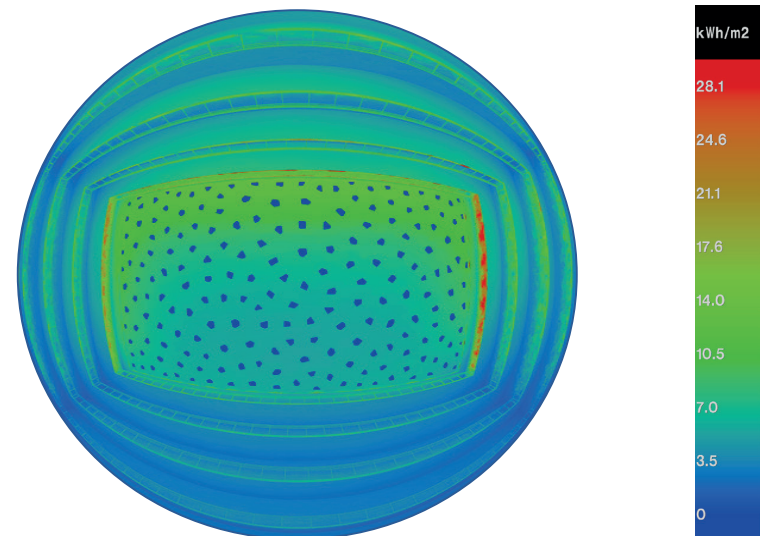
CASO2 < ATRIO CON VORONOI ALEATORIO >



CASO3 < ATRIO CON VORONOI ATRACTOR >



CASO4 < ATRIO CON VORONOI OPTIMIZADO >



## ASE - ANNUAL SOLAR EXPOSURE :

En el adenda de LEED v4 (2018) señala que existe un límite de 20% para los porcentajes de ASE. En tabla, se demuestra que sólo el CASO 4 cumple con el límite (atrio con voronoi optimizado para período primavera verano) y no excede el porcentaje de exposición solar anual o cantidad de luz solar acumulada en el espacio interior, promediando un 19.93 % por debajo de éste.

El porcentaje de ASE del primero al cuarto piso para el CASO 4, no supera los 1000 [luxes] en un período de ocupación superior a las 250 horas, obteniendo como valor un 0 %, debido al alto nivel de cerramiento, siendo insuficiente al no alcanzar el 4% mínimo.

Respecto a los otros 3 modelos, es posible señalar que los casos 2, 1 y 3, exceden lo permitido en un 36.13%, 35.54% y 3.38%, respectivamente, deduciéndose que el atrio con voronoi atractor es el segundo diseño más conveniente, pero sin lugar a dudas, requiere que se realicen ajustes

CASO / PISO	ASE ( $\geq 1000 \geq 250$ hrs.)	CUMPLE	$\Delta$ Sobre límite	$\Delta$ Bajo límite
CASO 1 - 1º Piso	58.35	NO	38.35	No aplica
CASO 1 - 2º Piso	46.84	NO	26.84	No aplica
CASO 1 - 3º Piso	52.75	NO	32.75	No aplica
CASO 1 - 4º Piso	57.51	NO	37.51	No aplica
CASO 1 - 5º Piso	62.27	NO	42.27	No aplica
CASO 2 - 1º Piso	58.11	NO	38.11	No aplica
CASO 2 - 2º Piso	39.03	NO	19.03	No aplica
CASO 2 - 3º Piso	53.48	NO	33.48	No aplica
CASO 2 - 4º Piso	60.07	NO	40.07	No aplica
CASO 2 - 5º Piso	69.96	NO	49.96	No aplica
CASO 3 - 1º Piso	30.48	NO	10.48	No aplica
CASO 3 - 2º Piso	17.47	SI	No aplica	-2.53
CASO 3 - 3º Piso	36.63	NO	16.63	No aplica
CASO 3 - 4º Piso	47.62	NO	27.62	No aplica
CASO 3 - 5º Piso	52.38	NO	32.38	No aplica
CASO 4 - 1º Piso	0	SI	No aplica	-20
CASO 4 - 2º Piso	0	SI	No aplica	-20
CASO 4 - 3º Piso	0	SI	No aplica	-20
CASO 4 - 4º Piso	0	SI	No aplica	-20
CASO 4 - 5º Piso	0.37	SI	No aplica	-19.63

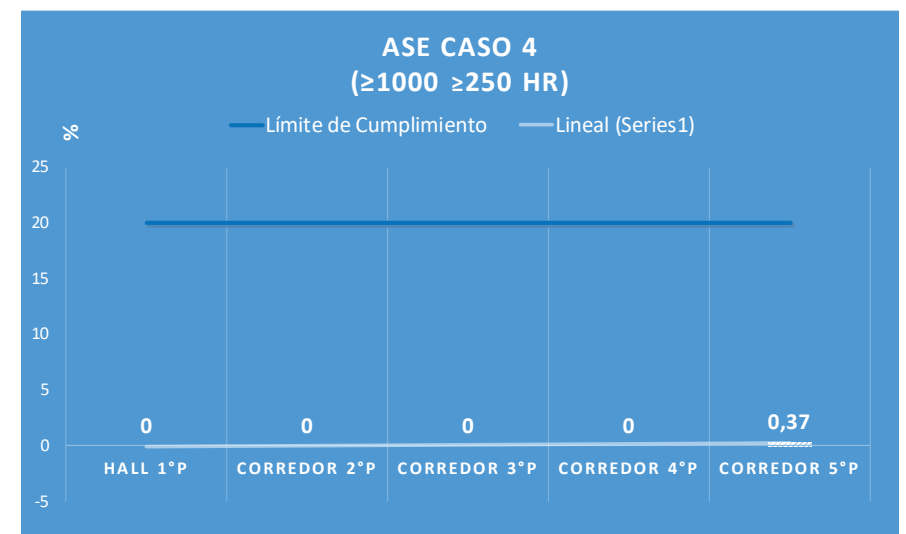
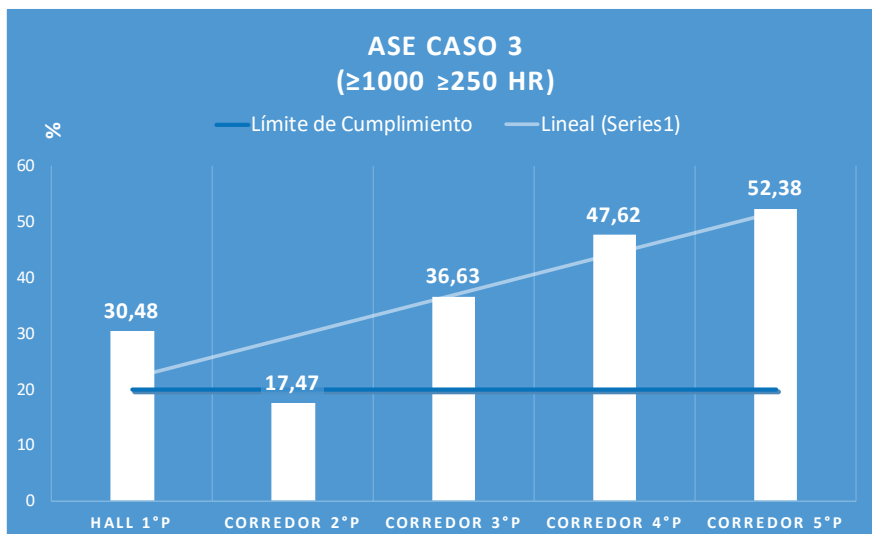
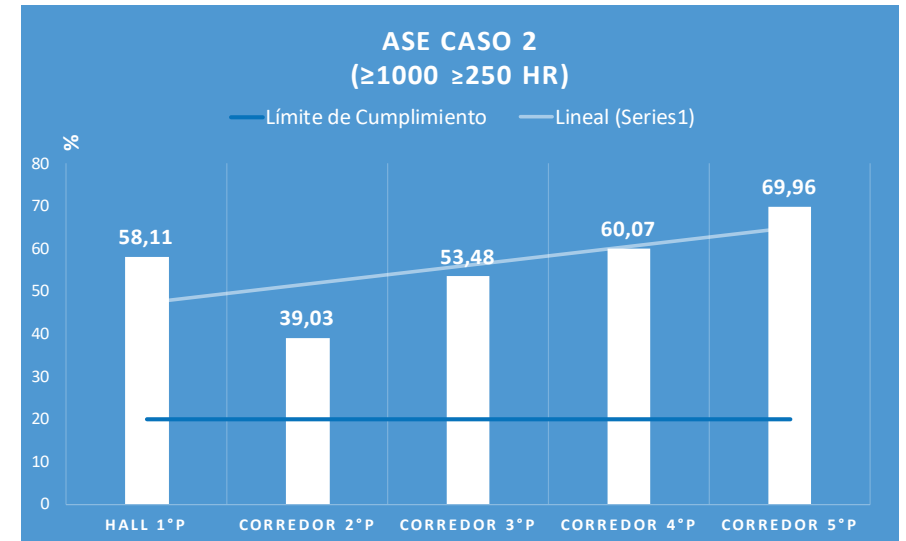
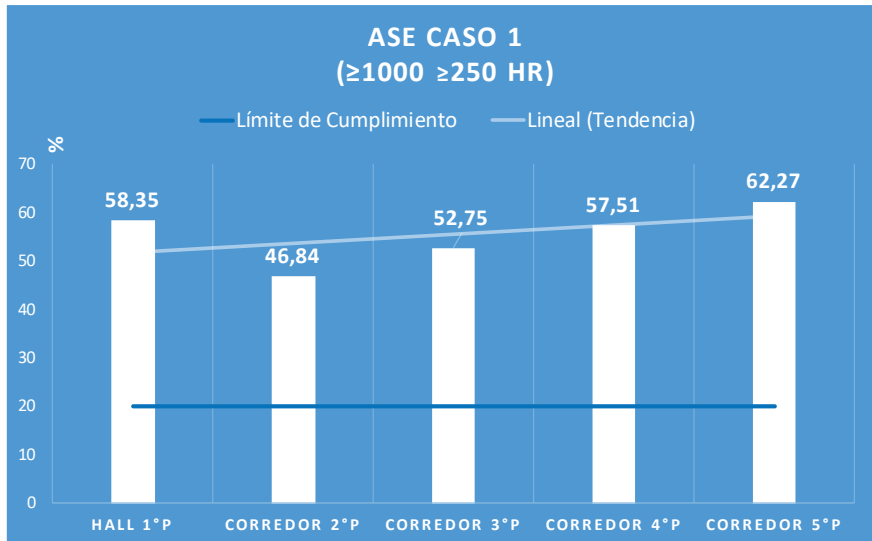
Imagen 113. (izquierda)  
Tabla de cumplimiento ASE  
( $\geq 1000$  luxes / 250 hrs)

Imagen 114-117. (derecha, página  
contigua). Gráficos de ASE por casos.  
Fuente: Elaboración propia a partir  
de cálculos con LightStanza.



en el área de las celdillas del lado sureste del modelo, disminuyendo el tamaño de éstas y aumentando así la superficie de cerramiento de la cubierta paramétrica. Cabe mencionar que este diseño, a diferencia de los CASOS 1 y 2, sólo en el segundo piso no supera el 20% de ASE, quedando 2.53% por debajo del límite (en azul).

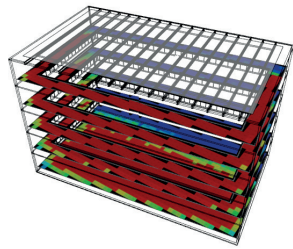
Es importante señalar que en todos ellos, el valor máximo y mínimo se alcanza en el quinto y segundo piso, respectivamente y que existe una clara tendencia al alza. Cabe mencionar además, que el mayor diferencial de ASE entre estos dos pisos, a nivel porcentual, es visible en la pendiente o inclinación pronunciada que posee la pendiente del CASO 3.



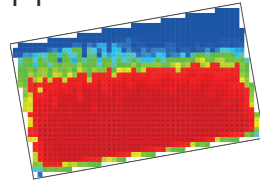
## CASO 1 y 2 < ATRIO SIN VORONOI y CONVORONOI ALEATORIO > Análisis Annual Solar Exposure [ASE]

### CASO 1

Atrio sin Voronoi

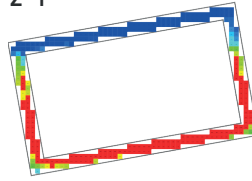


1°P



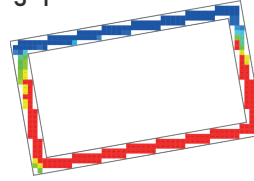
58,35 %

2°P



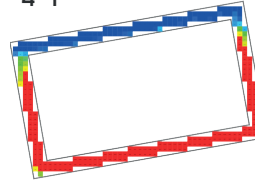
46,84 %

3°P



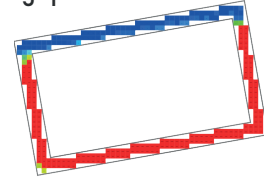
52,75 %

4°P



57,51 %

5°P



62,27 %

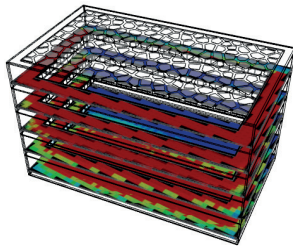
Promedio

56,72%

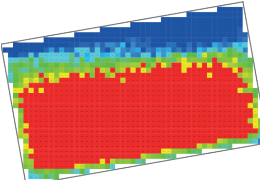
La distribución de ASE en planta, tanto para el caso 1, como para el caso 2 es similar, los porcentajes de los valores por sobre 1000 [luxes] (en rojo) se localizan mayormente en la zona sureste, ésto se debe al recorrido solar, durante las horas de ocupación evaluadas (8 a.m. - 8 p.m.) que penetra en el interior debido al gran porcentaje de apertura y con ello transparencia.

### CASO 2

Voronoi Aleatorio

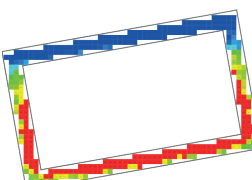


1°P



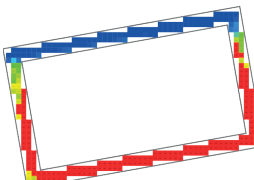
58,11 %

2°P



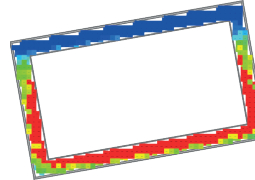
39,03 %

3°P



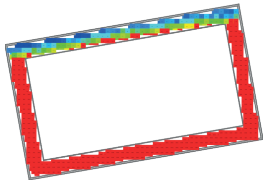
53,48 %

4°P



60,07%%

5°P

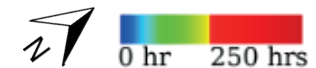


52,38 %

Promedio

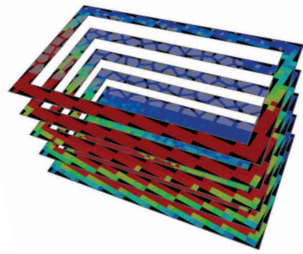
56,60%

Imagen 118. Esquema de Simulaciones ASE en casos 1 y 2 ( $\geq 1000$  luxes / 250 hrs.  
Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.

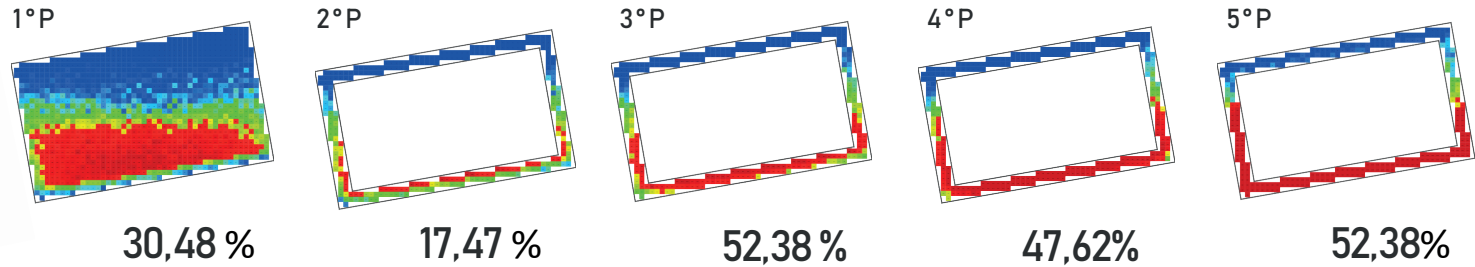


CASO 3 y 4 < ATRIO CON VORONOI ATRACTOR y CON VORONOI OPTIMIZADO > Análisis Annual Solar Exposure [ASE]

CASO 3



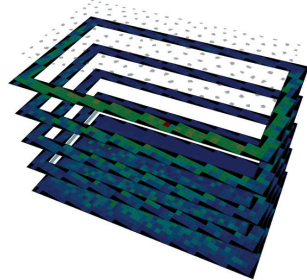
Promedio  
34,30%



La distribución de ASE en planta, para el caso 3, mantiene la lógica de los casos 1 y 2, en contraste con el caso 4, debido al aumento de cerramiento en la cubierta de este último, sin embargo, este último es insuficiente no alcanza el valor mínimo de 4%.

CASO 4

Voronoi Optimizado



Promedio  
34,30%

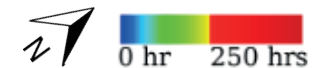
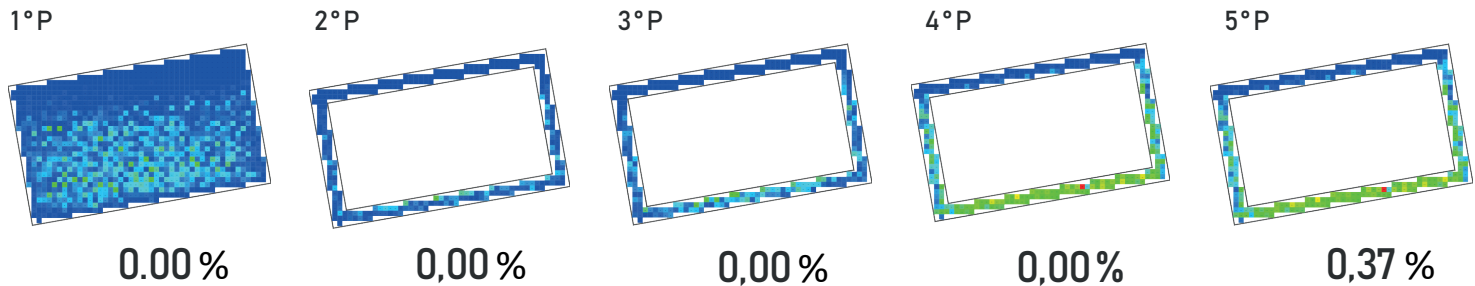


Imagen 119. Esquema de Simulaciones ASE en casos 3 y 4 ( ≥ 1000 luxes / 250 hrs).  
Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.

## USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE :

Los niveles de iluminancia excedida (UDI - e: Iluminancia Diurna Útil excedida) reflejan que los modelos más convenientes, son el CASO 4 y 3, éstos corresponden a los atrios con voronoi optimizado y atractor, ya que alcanzan los menores porcentajes; el primero bordea el 6.14% y 21.03% respectivamente. Teniendo en cuenta un período de ocupación evaluado que abarca de 8AM a 8PM, los porcentajes anteriormente enunciados señalan que de un total de 4380 horas en el año, sólo en 269 y 921 horas se superan los valores de 3000 [lux].

Si se considera que el límite máximo para UDI - e, consiste en que en el 50% de las horas de ocupación no debe sobrepasarse los 3000 [lux] ya que habría riesgo de existir deslumbramiento intolerable alto (>45% DGP- *Daylight Glare Probability*), implica que existe un grado de toleran-

cia a la sobreiluminación de los recintos y sobrecalentamiento en función del diseño que bordea los 43.86% y 28.97% para ambos casos, 4 y 3, respectivamente, esto último, expresado en horas representa un total de 1921 y 1269 horas. Si además se tiene en cuenta que ambos casos, tienen los porcentajes de UDI-s (Iluminancia Diurna Útil Suplementario <100 [lux]) más altos, significa que ambos diseños requieren iluminación artificial en al menos 1152 y 602 horas (26.29 y 13.74%, respectivamente). Además, teniendo en cuenta los valores de UDI-a (Iluminancia Diurna Autónoma), ambos casos poseen los valores más cercanos al umbral mínimo de 75%, con una diferencia de 7.44% y 9.77 % que representa la necesidad de iluminar los recintos unas 326 y 428 horas más para que ambos modelos sean considerados más eficientes en términos de iluminación natural, es decir, combinando las tres métricas se concluye que aún es factible aumentar el área de superficie vidriada, aumentando la apertura de las celdas del voronoi.

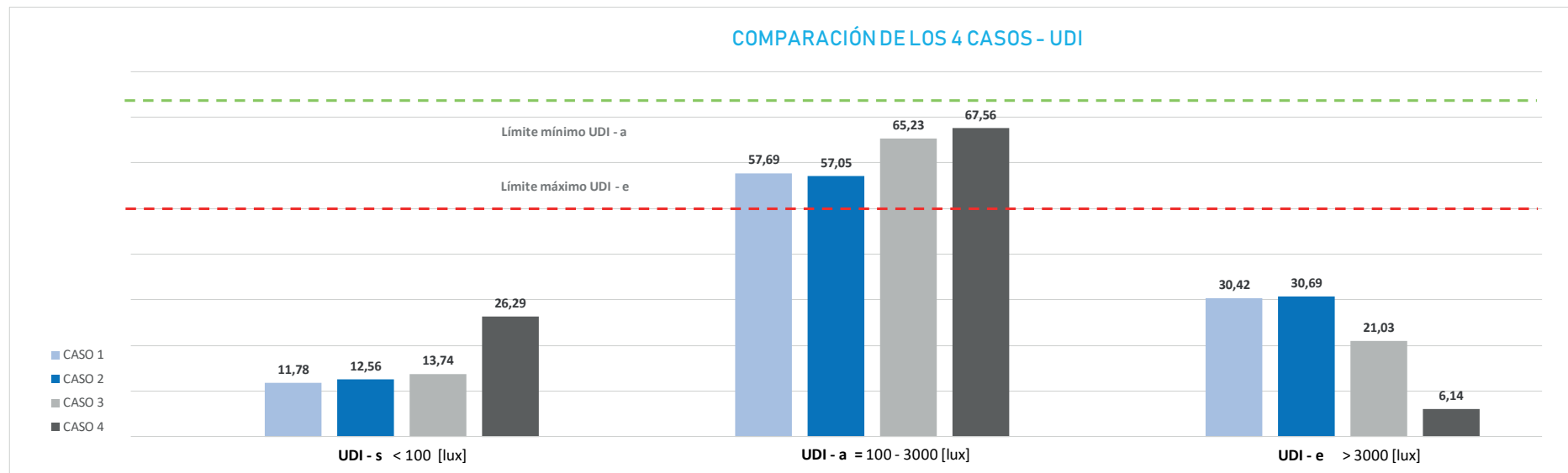


Imagen 120.  
Gráfico de cumplimiento UDI - e  
( $\geq 3000$  luxes / anual / 8 AM-8 PM)

Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.

Imagen 121.  
Gráfico de cumplimiento UDI caso 1.  
Porcentajes:  
UDI-s  $\leq 100$  [lux]  
UDI -a  $\geq 300$  [lux]  
UDI - e  $\leq 3000$  [lux]  
Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.

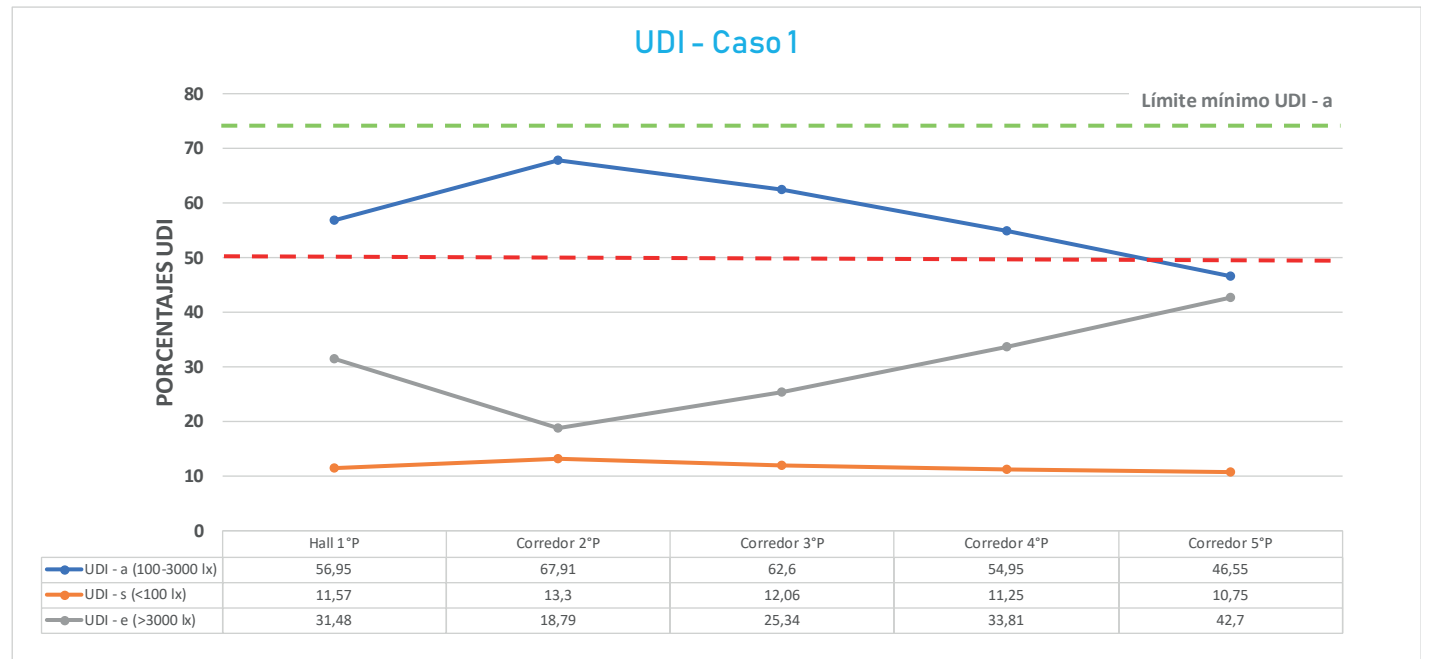


Imagen 122.  
Gráfico de cumplimiento UDI caso 2.  
Porcentajes:  
UDI-s  $\leq 100$  [lux]  
UDI -a  $\geq 300$  [lux]  
UDI - e  $\leq 3000$  [lux]  
Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.

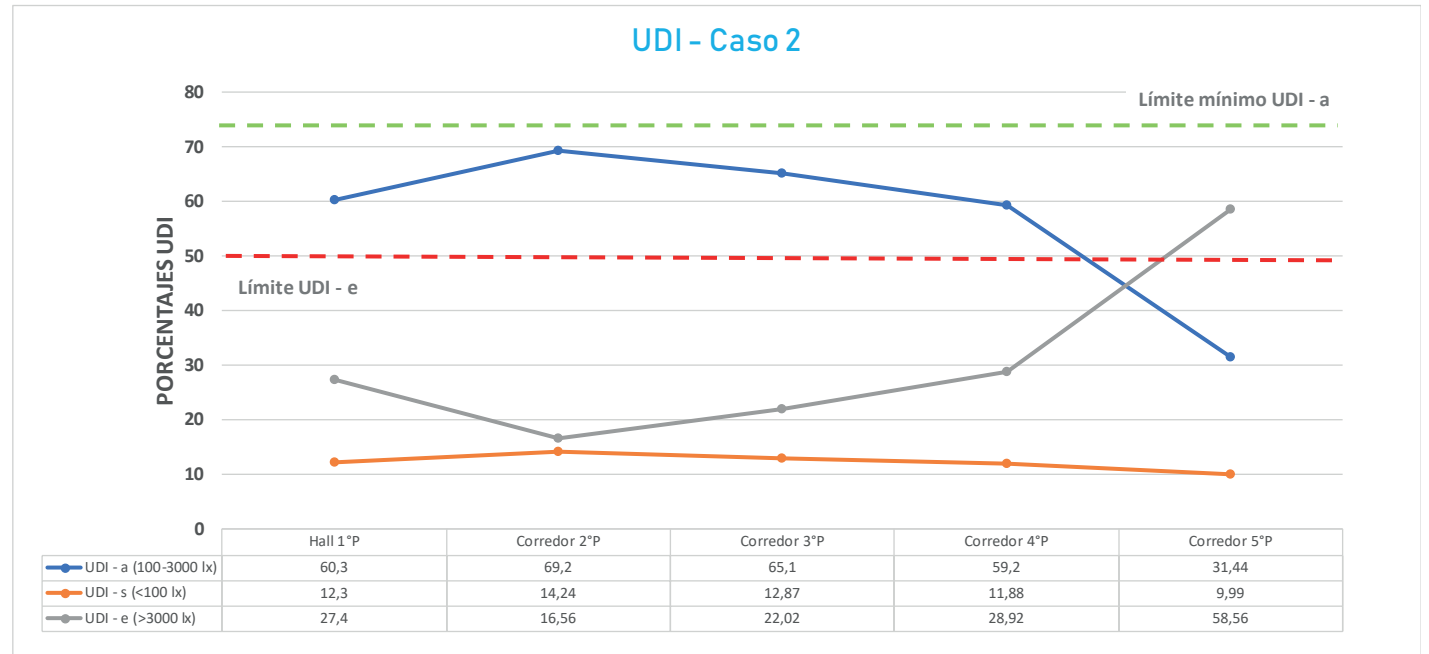


Imagen 123.  
Gráfico de cumplimiento UDI caso 3.  
Porcentajes:  
UDI - s  $\leq 100$  [lux]  
UDI - a  $\geq 300$  [lux]  
UDI - e  $\leq 3000$  [lux]  
Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.

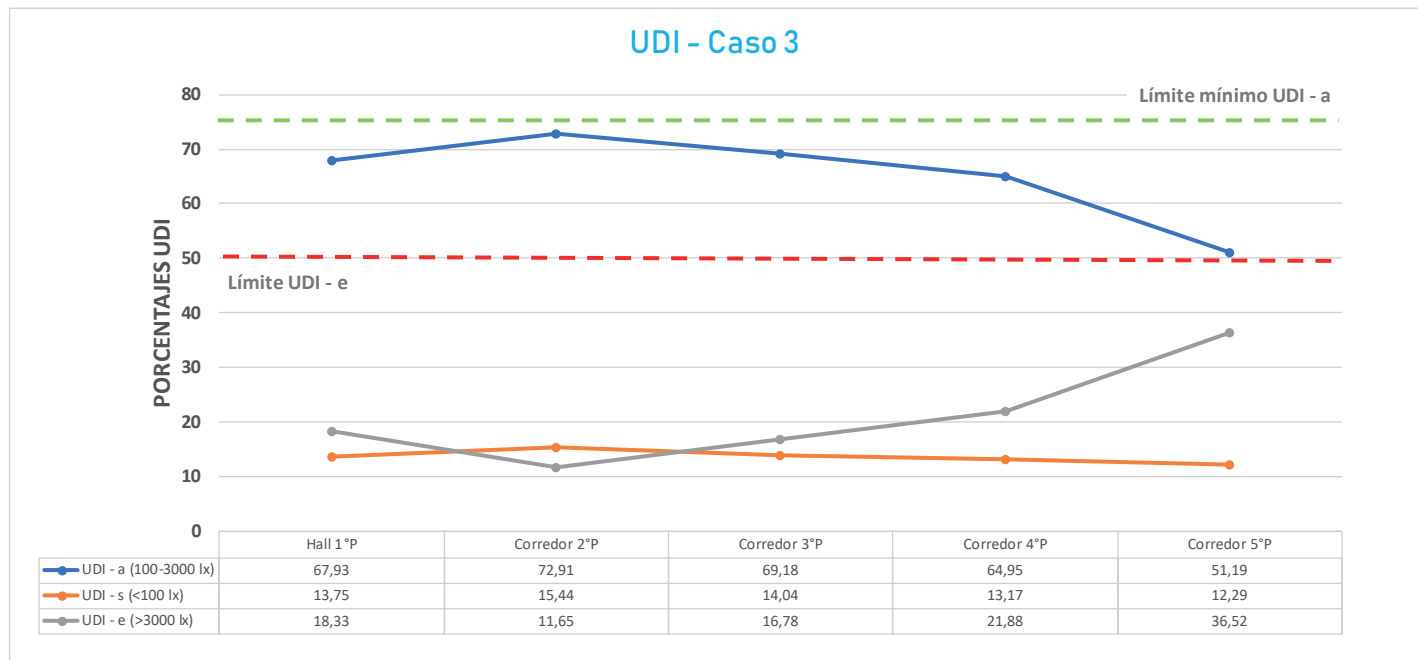
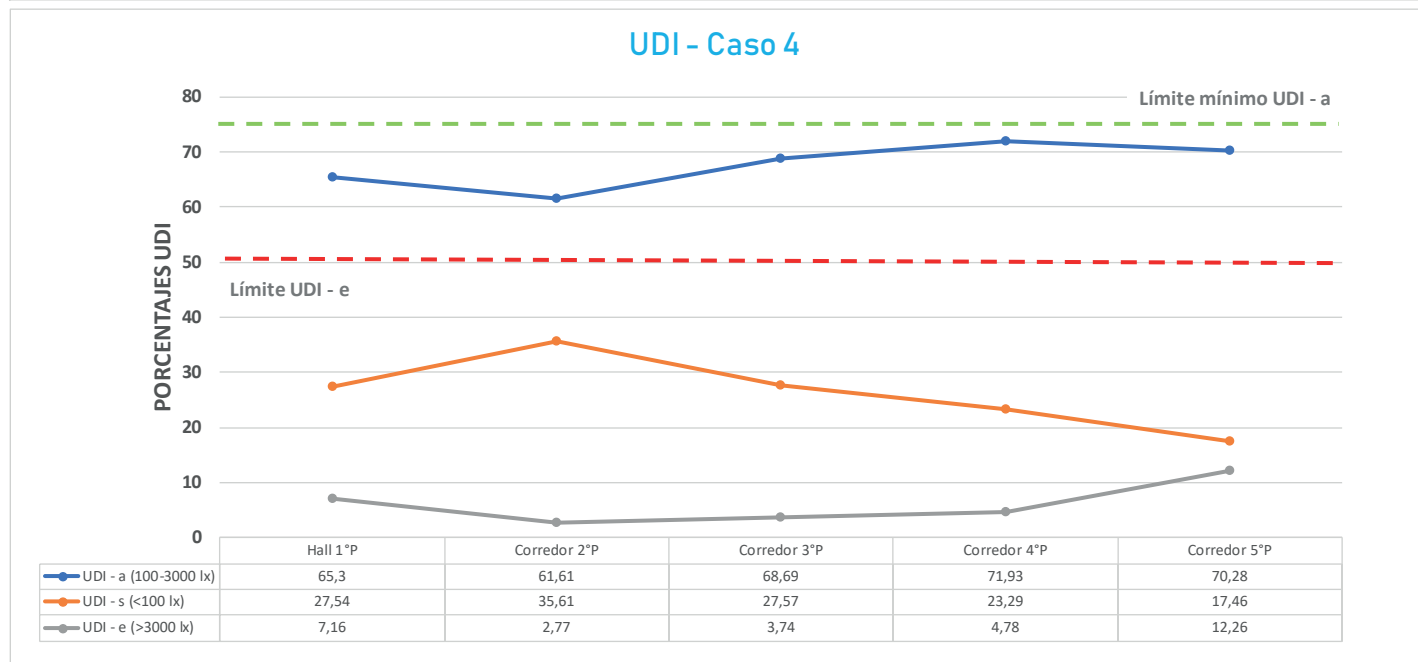


Imagen 124.  
Gráfico de cumplimiento UDI caso 4.  
Porcentajes:  
UDI - s  $\leq 100$  [lux]  
UDI - a  $\geq 300$  [lux]  
UDI - e  $\leq 3000$  [lux]  
Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.



## GLARE POR ESTACIONES:

A grandes rasgos, el brillo va reduciéndose en la medida que existe mayor cerramiento, eso es visible al analizar que los casos 1,2,3,4 que están ordenados según la reducción de aperturas en la cubierta, poseen mayor a menor brillo en todas las estaciones, salvo en septiembre a las 9AM, en que el aleatorio supera al atrio sin voronoi en un 9% aproximadamente. En particular, la intensidad del brillo luminoso alcanza el máximo valor

el 21 de diciembre, específicamente a mediodía, alcanzando límites intolerables (100%) en el caso 1 (atrio sin voronoi), seguido por los casos 2 y 3 (con voronoi aleatorio y atractor) que superan los niveles molestos, mientras que el caso 4 (atrio optimizado). Sólo el 21 de junio a las 9AM los cuatro casos no poseen inconvenientes. Mientras que el caso 4 posee una tendencia a la baja intensidad, salvo el 21 de diciembre a las 12 y 3 PM, llegando a valores imperceptibles.

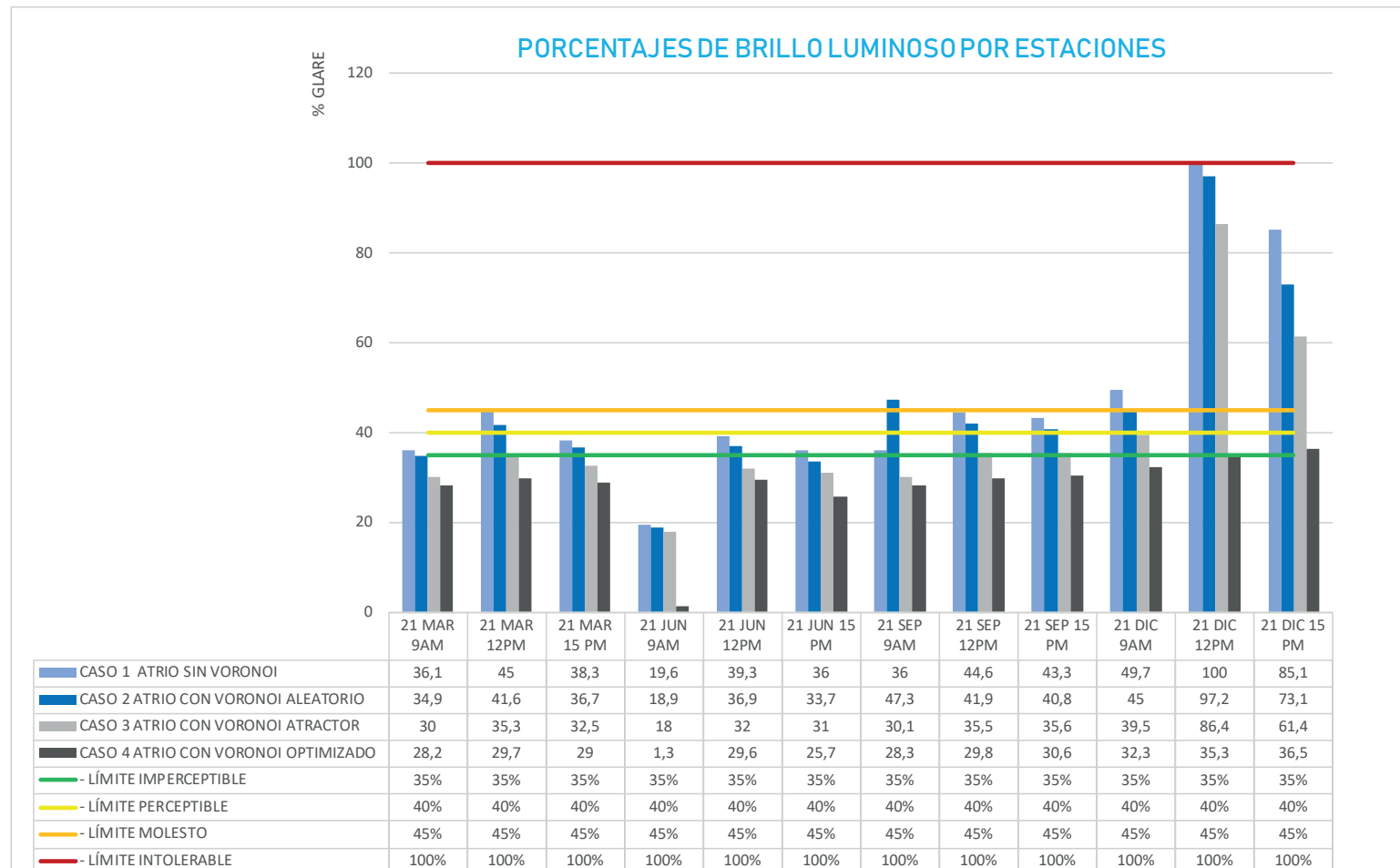


Imagen 125. Porcentajes de brillo luminoso por estaciones.

Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.

CASO 1 < ATRIO SIN VORONOI > Glare por estaciones

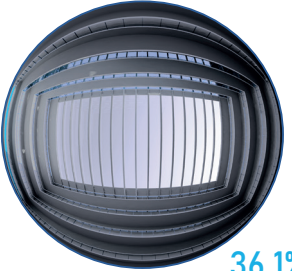
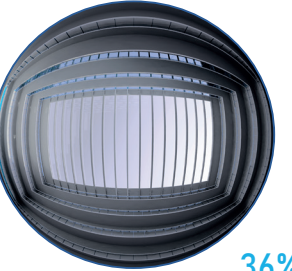
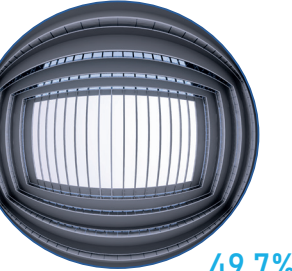
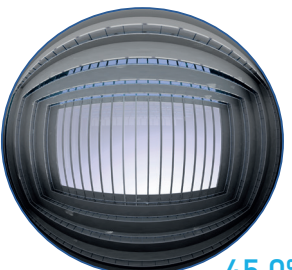
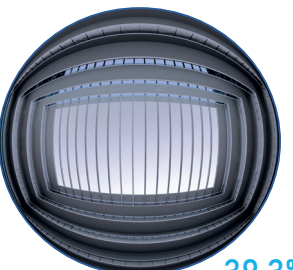
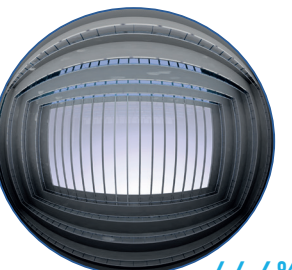
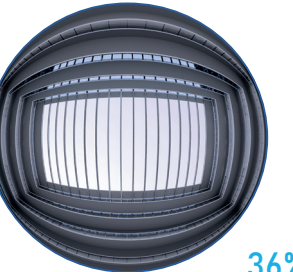
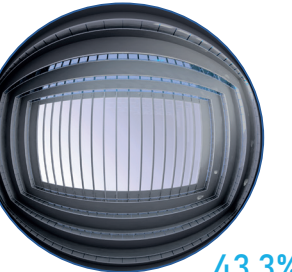
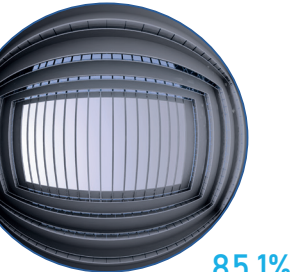
HORA	21 MARZO	21 JUNIO	21 SEPTIEMBRE	21 DICIEMBRE	PROMEDIO
9:00 AM	 36.1%	 19.6%	 36%	 49.7%	35,35 %
12:00 PM	 45.0%	 39.3%	 44,6%	 100%	57,23 %
15:00 PM	 38.3%	 36%	 43,3%	 85,1%	50,68 %
PROMEDIO	39,8%	31,63 %	41,3%	78,27%	≈ 47,75%

Imagen 126.  
Glare por estaciones CASO 1.  
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados en LightStanza.



CASO 2 < ATRIO CON VORONOI ALEATORIO > Glare por estaciones

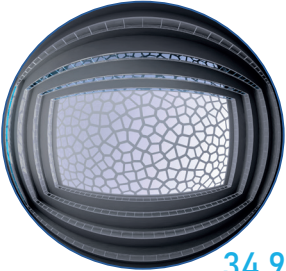
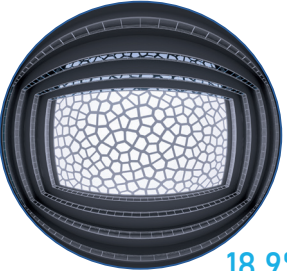
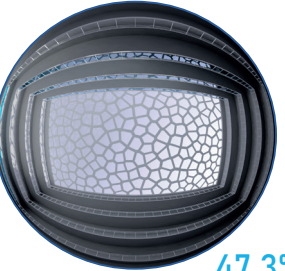
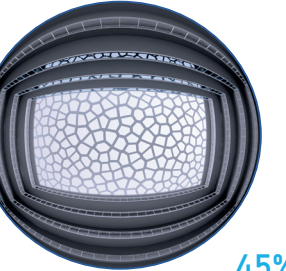
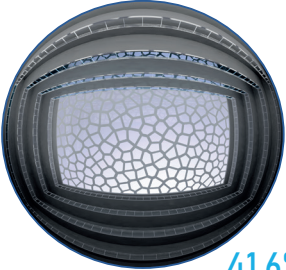
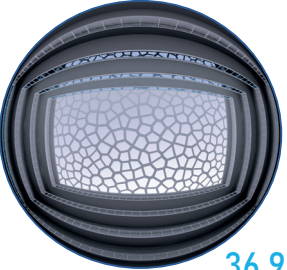
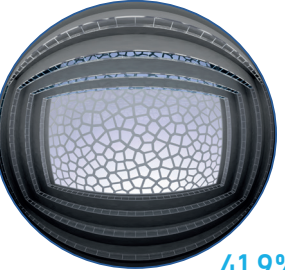
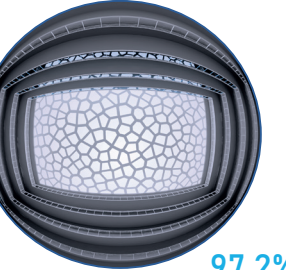
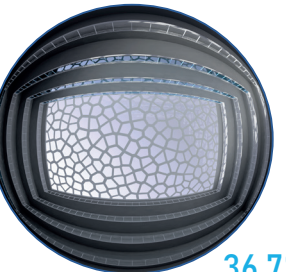
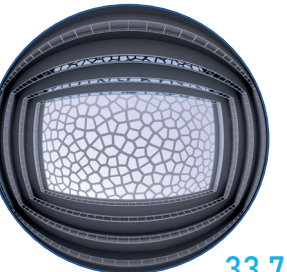
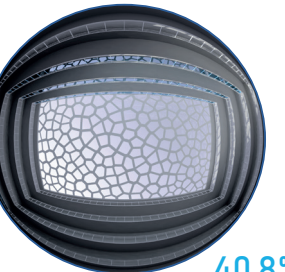
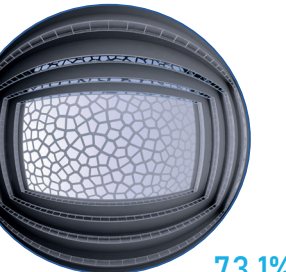
HORA	21 MARZO	21 JUNIO	21 SEPTIEMBRE	21 DICIEMBRE	PROMEDIO
9:00 AM	 34.9%	 18.9%	 47.3%	 45%	36,53 %
12:00 PM	 41.6%	 36.9%	 41,9%	 97,2%	54,4 %
15:00 PM	 36.7%	 33,7%	 40,8%	 73,1%	46,08 %
PROMEDIO	37,73 %	29,83 %	43,3 %	71,76 %	≈ 45,67 %

Imagen 127.  
Glare por estaciones CASO 2.  
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados en LightStanza.

CASO 3 < ATRIO CON VORONOI ATRACTOR > Glare por estaciones

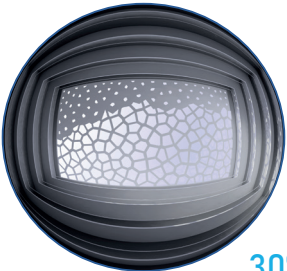
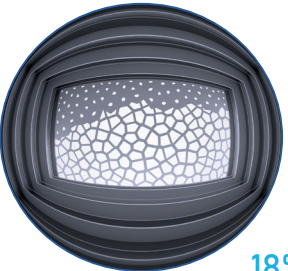
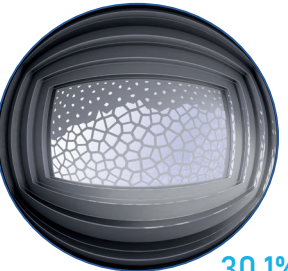
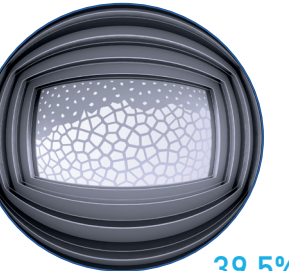
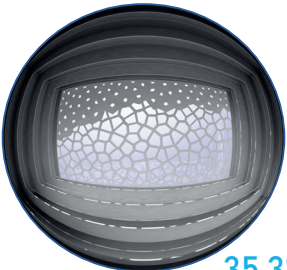
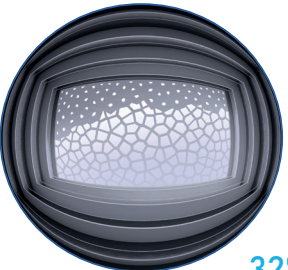
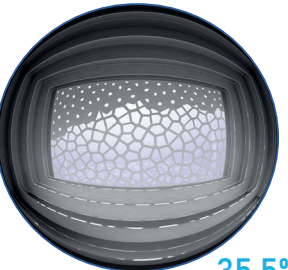
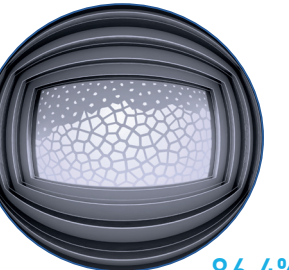
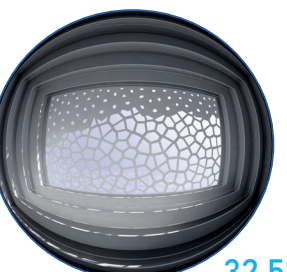
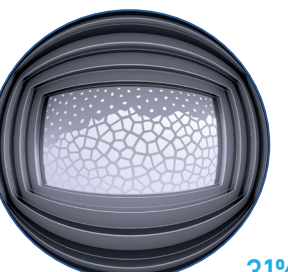
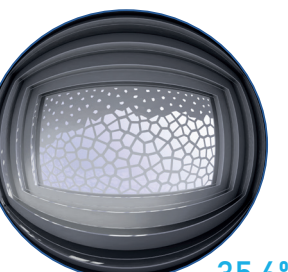
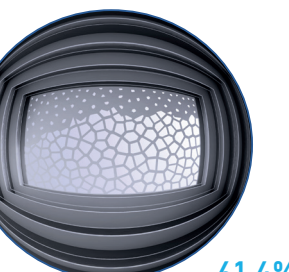
HORA	21 MARZO	21 JUNIO	21 SEPTIEMBRE	21 DICIEMBRE	PROMEDIO
9:00 AM	 30%	 18%	 30,1%	 39,5%	29,4%
12:00 PM	 35,3%	 32%	 35,5%	 86,4%	47,3%
15:00 PM	 32,5%	 31%	 35,6%	 61,4%	40,13%
PROMEDIO	32,6%	27%	33,73%	62,43%	≈ 38,94%

Imagen 128.  
Glare por estaciones CASO 3.  
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados en LightStanza.

CASO 4 < ATRIO CON VORONOI OPTIMIZADO > Glare por estaciones

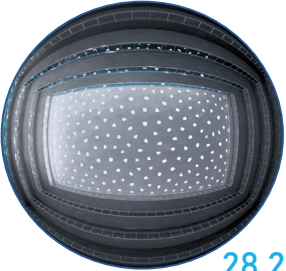
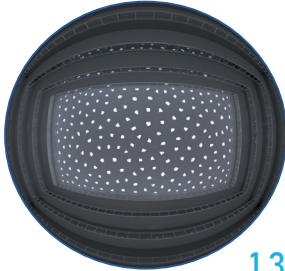
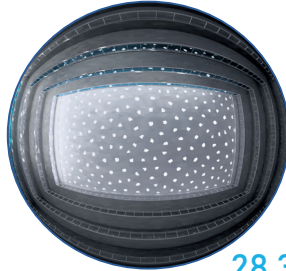
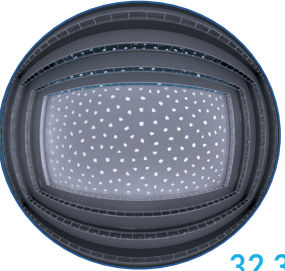
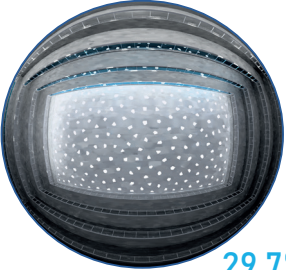
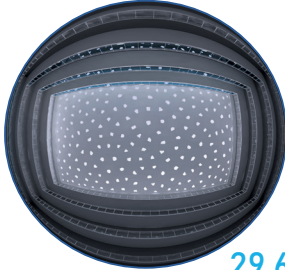
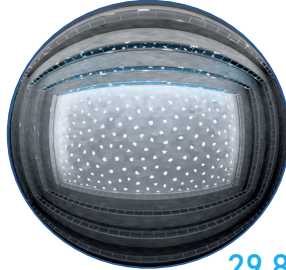
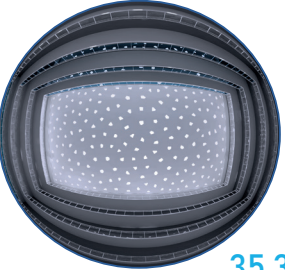
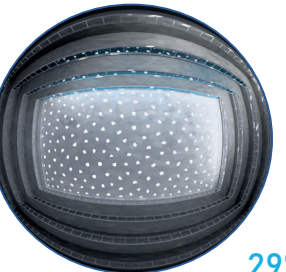
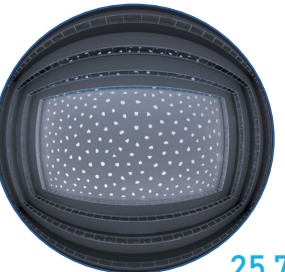
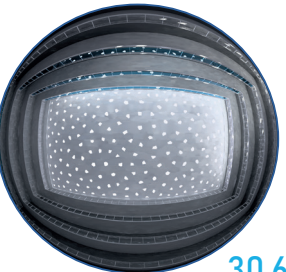
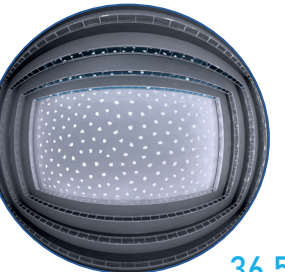
HORA	21 MARZO	21 JUNIO	21 SEPTIEMBRE	21 DICIEMBRE	PROMEDIO
9:00 AM	 28.2%	 1.3%	 28.3%	 32.3%	22,53 %
12:00 PM	 29.7%	 29.6%	 29.8%	 35.3%	31,1%
15:00 PM	 29%	 25.7%	 30.6%	 36.5%	30,45 %
PROMEDIO	28,97 %	18,87 %	29,57 %	34,7 %	≈ 28,03 %

Imagen 129.  
Glare por estaciones CASO 4.  
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados en LightStanza.

## DGP - DAYLIGHT GLARE PROBABILITY :

En un rango de ocupación de 12 horas que abarca de 8AM a 8 PM, se tienen 4380 horas de iluminación, en las que la probabilidad de deslumbramiento intolerable para el CASO 1 (atrio sin voronoi) es la mayor, alcanzando un 29.8% que representa un total de 1306 horas (109 días) de incomodidad visual, concentradas principalmente en los meses de noviembre y diciembre, seguido por el CASO 2 (atrio con voronoi aleatorio), que tiene un 23.2% de probabilidad de brillo intolerable, 1017 horas (85 días) de incomodidad visual distribuidas en los meses de octubre a febrero. En cambio, el CASO 3, tiene sólo un 10% de brillo intolerable que expresa 438 hora (37 días) distribuidas en los meses de noviembre

a enero y finalmente el CASO 4, tiene el porcentaje de probabilidad más bajo, con un 2% de probabilidad de que exista un brillo excesivo y alto contraste de luminancias, disperso en los meses de noviembre a febrero, lo que representa tan sólo un total de 88 horas (8 días) del año en el mismo período de ocupación.

Se puede deducir que conforme se reducen las aperturas los niveles de DGP disminuyen; sin embargo se debe hacer énfasis en que la distribución en torno a los meses variará, según la densidad de las celdas del voronoi y conforme al recorrido y exposición solar (ángulo solar en corte: verano-80°, equinoccios-56° e invierno-33°), lo que influye en la concentración de luminancias y contrastes luminosos.

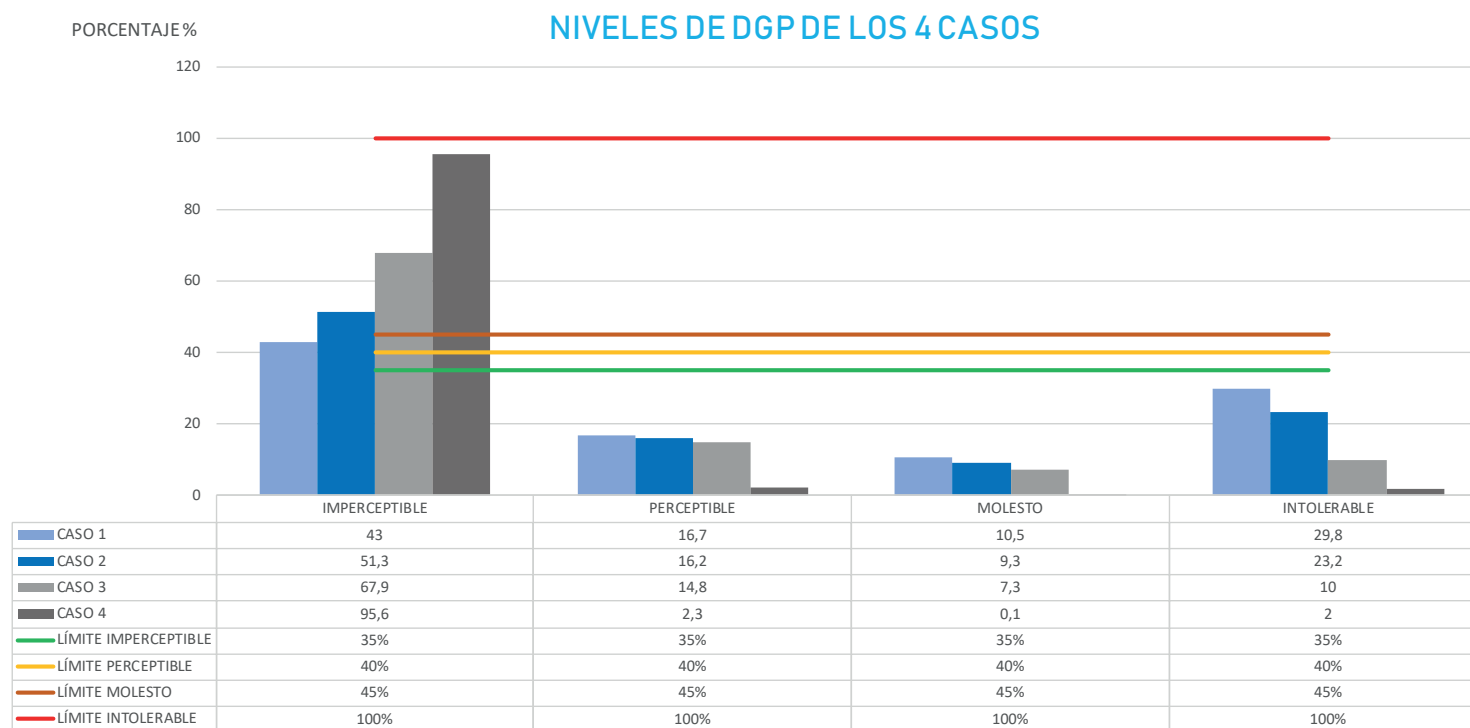
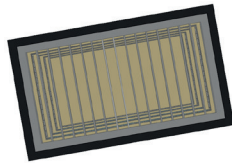


Imagen 130.  
Gráfico de niveles de DGP de los 4 casos.

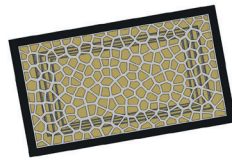
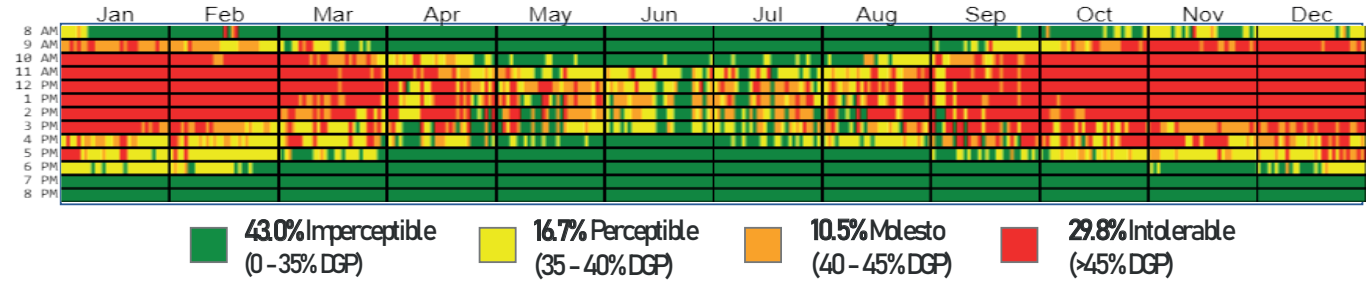
Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos con LightStanza.

< ANÁLISIS DE LOS 4 CASOS DE ESTUDIO >

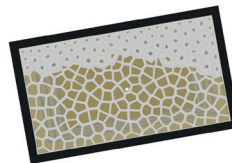
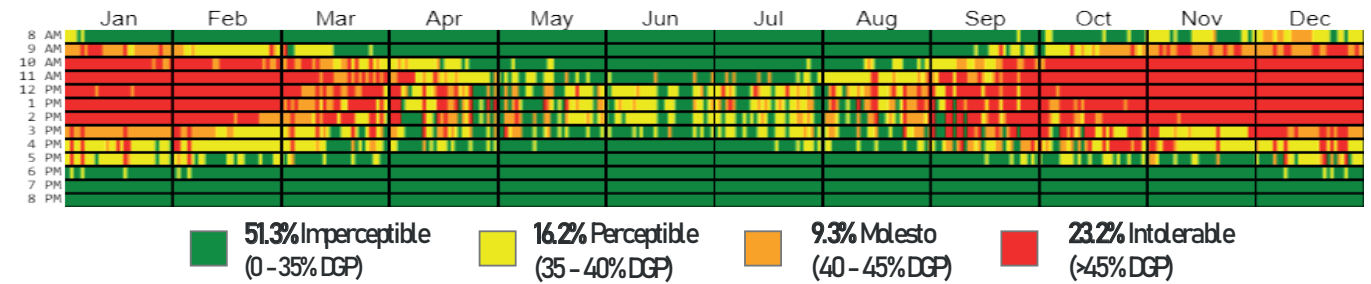
DGP- Probabilidad de Deslumbramiento [8am-8pm]



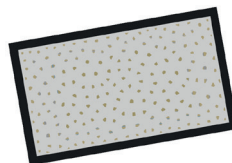
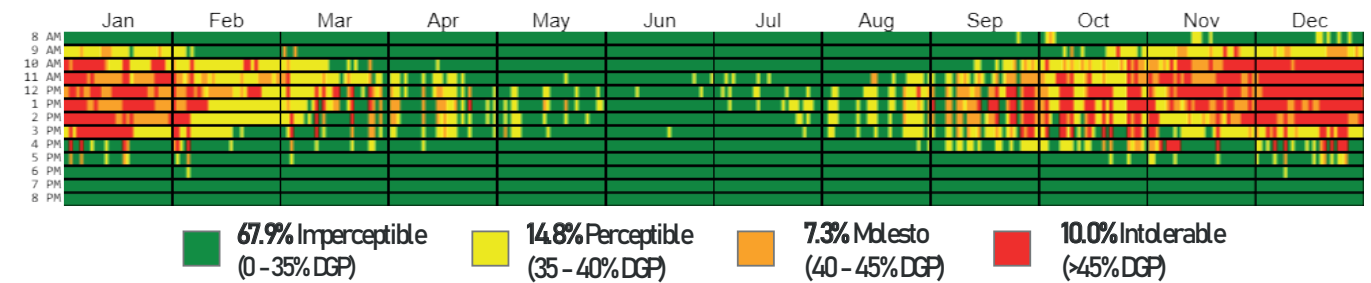
**CASO 1**  
Atrio sin Voronoi



**CASO 2**  
Voronoi Aleatorio



**CASO 3**  
Voronoi Atractor



**CASO 4**  
Voronoi Optimizado

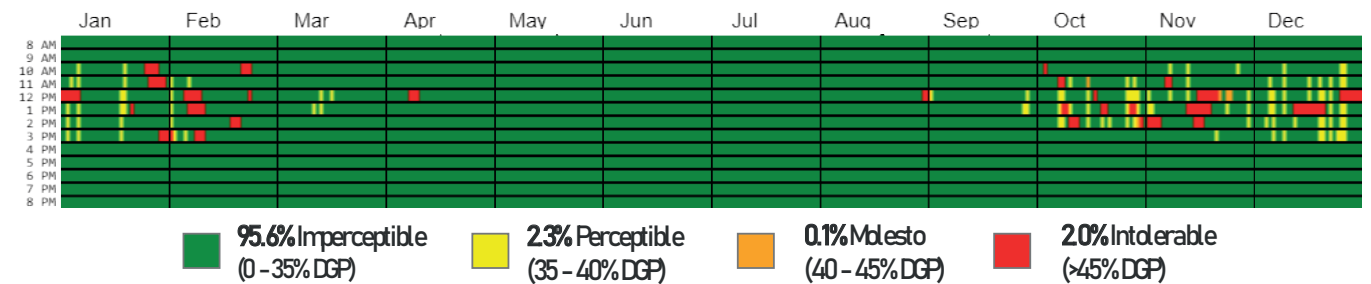


Imagen 131.  
DGP de los  
4 casos.

Fuente:  
Elaboración  
propia a partir  
de resultados en  
LightStanza

## 4.8. Conclusiones parciales y generales

### Respecto a la hipótesis de investigación:

**Los lineamientos arquitectónicos que permiten alcanzar el confort lumínico y visual, guardan estrecha relación con la optimización del tamaño de las aperturas o de las células que componen las pieles paramétricas.**

Los criterios solares lumínicos abordados, permitieron comprobar la hipótesis de investigación, tras evaluar cuatro modelos de estudio con distinto porcentaje de cerramiento, graduando el tamaño de las aperturas de celdas del algoritmo voronoi seleccionado.

Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados, es posible concluir que no es la única variable incidente a considerar, si se tiene en cuenta que la luz posee un carácter dinámico. En relación a esto último, habiendo indagado en las distintas estrategias de diseño, paramétrico, sería conveniente adentrarse en la temática de pieles cinéticas que incorporan el factor de movimiento en reacción a la exposición, recorrido solar y variaciones de luminancias de cielo, para dar una solución más óptima.

Para ello, es importante realizar un trabajo interdisciplinario para poder llevar a cabo este gran desafío, con el fin de monitorizar, programar y ajustar los mecanismos de sensores y actuadores, además de desarrollar los detalles constructivos, estructurales y otros aspectos de gestión, mantención y presupuesto de obra.

### Respecto al estado del arte de la temática abordada:

- Tras realizar una exhaustiva revisión bibliográfica, se constató la escasa información a nivel local en torno a la temática planteada: pieles paramétricas y confort lumínico - visual. La mayoría de los artículos analizados provienen del extranjero, quienes en su mayoría son de origen norteamericano, europeo o asiático. Si bien es cierto, en las fuentes consultadas, existe un enfoque transversal respecto a los dos ejes conductores de la presente tesis de investigación, éste es, diseño arquitectónico paramétrico e iluminación natural, sólo se reconocen evaluaciones de patrones y tramas regulares compuestas por figuras planas o polígonos, que escapan a la composición irregular y orgánica del algoritmo seleccionado para la intervención de modelos de estudio: voronoi.
- En dichos textos analizados, las metodologías de evaluación de confort lumínico - visual, aplicadas a pieles paramétricas sólo se restringen a mediciones de magnitudes fotométricas e índices de brillo luminoso, es decir, cálculos de luminancias e iluminancias y probabilidad de deslumbramiento, excluyendo el estudio de estas variables combinadas entre sí o con otras métricas de carácter dinámico.
- Los artículos analizados en su mayoría desarrollan metodologías de carácter exploratorio con *Rhinoceros* y *Grasshopper*, ya que permite articular la lógica de prueba y error, mediante iteraciones de los algoritmos en torno a los parámetros designados por el arquitecto. Tras realizar la indagatoria de las aplicaciones y componentes que se ofrece en la plataforma *Food4Rhino*, resulta bastante útil esta combinación entre *software* y *plugin* para el desarrollo de la arquitectura desde ámbitos interdisciplinarios para el diseño de geometrías complejas, considerando que ésta cuenta hasta el momento con X de diversa índole.

### Respecto a las herramientas de cálculo, evaluación y resultados:

- El modelamiento digital tridimensional, en torno a la parametrización de múltiples variables, combinado con herramientas de evaluación, demostró ser útil como instrumento de conocimiento empírico, al hacer posible la realización de iteraciones e intervenciones en los modelos de estudio. Sin embargo, se reconoce que se requiere tener un manejo y dominio en los *softwares* y *plugins* utilizados para efectuar dichos cambios, a partir de la lógica y comprensión de las variables, junto al ajuste de parámetros necesarios que conlleven a lograr los resultados esperados para que realmente el proceso de diseño resulte eficiente.
- El componente de *Galapagos* como optimizador, aplicando específicamente la definición de *Ladybug, Radiation Optimization*, no asegura necesariamente una solución arquitectónica al problema de sobreexposición solar totalmente conveniente. Ésto se deduce ante el escenario de resultados obtenidos en las pruebas de ASE (*Annual Solar Exposure*) aplicadas a la intervención designada como CASO 4 en la presente investigación; si bien es cierto, no excede el 20% de tolerancia a la luz solar directa señalado en el adenda de LEED v4, resulta insuficiente, al no alcanzar el 4% sugerido.
- Lo señalado anteriormente tiene relación con el grado de cerramiento que el *solver* de *Rhinoceros* y *Grasshopper* automatiza al designar como variable el tamaño de las células Voronoi. *Galapagos* minimiza radicalmente la variable, presentando insuficiencias al no considerar rangos y valores intermedios estipulados en las estandarizaciones y certificaciones que establecen métricas de evaluación, razón por la cual, para tener un diseño eficiente en términos de ASE, UDI-e, UDI-a, UDI-s y DGP, se requiere realizar ajustes en las aperturas de las celdas.
- Ante estos resultados, es conveniente, considerar en una futura investigación el desarrollo de otras pruebas que contemplen rangos mínimos y máximos, como parámetros, ingresados en el *input* de otro componente y a ello, sumar el período de otoño e invierno a la definición realizada, que sólo consideró el escenario lumínico más desfavorable, la radiación del período de primavera - verano. Cabe mencionar que la última sugerencia aquí señalada sería posible de realizar minimizando la radiación para primavera - verano y maximizando la de otoño e invierno en conjunto. No fue posible de realizar en esta tesis de investigación debido a la complejidad de la geometría versus los requerimientos del *hardware*.
- En relación a las metodologías de confort lumínico - visual abordadas, es importante señalar que éstas son líneas independientes de análisis que requieren ser combinadas para facilitar el estudio del comportamiento y desempeño de los espacios analizados en pos de la comodidad visual de los ocupantes. La luz es un único fenómeno, que consiste en la radiación electromagnética que se propaga en forma de onda visible cuando alcanza determinado rango del espectro electromagnético, pero existen métricas que descomponen sus atributos, complejizando la medición de distribución y calidad percibida por el usuario.
- Se requiere establecer una métrica que conjugue los diversos ámbitos, considerando las relaciones entre conceptos ya determinados a lo largo de la historia, evolucionando a un nuevo escenario en que se consideren aspectos relevantes como la adaptación del ojo humano al brillo luminoso, que dicho sea de paso posee un diámetro de 2.5 cms. en todos los seres humanos, por lo que es importante, seguir avanzando en la temática en pos de unificar y simplificar los cálculos.

## 4.9. Lineamientos de diseño y ruta de acciones vinculadas a la optimización de modelos paramétricos

El aporte principal de la investigación, apoyada en las herramientas digitales, consiste básicamente en construir lineamientos o pautas de diseño arquitectónico para la proyección de celosías paramétricas en cubiertas y otras envolventes, aplicando el algoritmo voronoi de composición irregular y orgánica, de tal modo que el proceso de construcción de estos modelos sea más eficiente considerando que la geometría de éste es compleja.

Entre éstos, tras realizar el aprendizaje exploratorio adquirido, se logran identificar los siguientes, como recomendaciones para la optimización paramétrica en función de la radiación, aplicable a modo general a distintos algoritmos:

- a) Determine las dimensiones generales de su proyecto, a modo de volumen genérico o masa.
- b) Realice la optimización de *Orientation Solar Radiation*, considerando el período anual.
- c) Configure el algoritmo visual, estableciendo la secuencia de transformaciones geométricas.
- d) Establezca la variable a optimizar en función de la radiación solar.
- e) Defina la función objetivo, vale decir, distinguir en el algoritmo el componente que representa la ecuación  $f_{(y)}$  que será optimizada.

f) Inserte de data climática en el componente medioambiental correspondiente.

g) Determine las restricciones y limitaciones en torno a las variables, vale decir, señalar los períodos que serán minimizados o maximizados, teniendo en cuenta que el período a minimizar es primavera - verano y a maximizar, otoño - invierno, para arquitectura en el hemisferio sur y al inverso, en caso de que el proyecto se geolocalice en el hemisferio norte.

h) Si realiza la maximización y minimización por separado en el *solver*, analice el estudio *SunPath* y establezca la curva que delimita el límite de exposición solar en la superficie que desea intervenir.

i) Combine ambos resultados en una definición del tipo *attractor curve*, con los parámetros obtenidos por separado.

j) Realice la simulación de ASE (*Annual Solar Exposure*).

k) Compruebe que su diseño alcanza y no supera el 4% y 20% recomendado como mínimo y máximo de exposición solar, respectivamente para el espacio o proyecto modelado y realice ajustes según resultados que sean desfavorables y vuelva a simular y mejorar, en caso de ser necesario.



## 4.10. Posibles Líneas de Investigación

### 1) En relación al algoritmo voronoi aplicados a los atrios:

Habiendo efectuado un análisis desde el ámbito de confort lumínico y visual del algoritmo voronoi en la cubierta de atrios públicos, mediante la elaboración de un modelo y posterior evaluación a través de simulaciones, sería interesante realizar a futuro pruebas de optimización de la celosía voronoi en:

- a) Otras caras del volumen del atrio.
- b) Modelos de distinta altura.
- c) Considerando distintas orientaciones.
- d) Cubierta, evaluando del aporte lumínico en los espacios adyacentes.
- e) Otras tipologías de atrios: lineales, adosados, semicerrados.
- f) Atrios de edificios existentes, abordándolo como alternativa de diseño hipotética.
- g) Las alternativas ya mencionadas, considerando otros materiales.
- h) Prototipo o modelos de estudio físico a escala, estableciendo cruces de resultados entre mediciones con luxómetro y fotometría de alto rango dinámico, usando Evalglare y/o Photosphere como herramientas.

### 2) En relación a otros algoritmos:

Análisis y comparación de resultados con los ya obtenidos en términos de evaluación del confort lumínico visual en pieles que utilizan:

- a) Voronoi atractor curve.
- b) Delaunay (Teselación de triángulos)
- c) Teselaciones con otras figuras regulares: cuadrado, pentágonos, hexágonos, heptágonos, octágonos, enégonos, decágonos, undecágonos, dodecágonos, entre otros.
- d) Teselaciones irregulares.
- d) Superposición de tramas de cada uno de los mencionados, con distintos ángulos u orientaciones.

### 3) En relación a otras estrategias de diseño de pieles paramétricas:

Realización de evaluaciones mediante simulaciones y pruebas de prototipos del confort lumínico-visual y otros criterios CAI (Calidad ambiental interior) en pieles adaptativas, cinéticas y biomiméticas.

### 4) En relación a los softwares de diseño y optimización de pieles paramétricas:

Comparación entre distintos softwares de diseño y evaluación lumínico-visual, comprobando la rigurosidad de los resultados, al realizar un cruce entre los obtenidos por simulaciones y la experimentación con prototipos o modelos físicos a escala, ya sea a nivel de mediciones con luxómetro o fotometría HDR (*High Dynamic Range*).

### 5) En relación a otros criterios CAI (Calidad Ambiental Interior) y temáticas de sustentabilidad:

Evaluaciones de la aplicación de pieles paramétricas en los espacios interiores, de espacios públicos, evaluando la incidencia de distintos materiales y parámetros, tales como espesores, porcentajes de lleno -vacío, considerando:

- a) Confort Térmico.
- b) Confort Acústico.
- c) Calidad de aire interior.
- d) Eficiencia Energética.
- e) Sostenibilidad económica.
- f) Sostenibilidad ambiental.

Ésto último, considerando la huella de carbono y energía incorporada implícita en el diseño y construcción de pieles, tomando en cuenta referentes ya existentes.



A

Imagen de Fondo:  
Stuttgart City Library, Alemania  
Yi Architects

# APÉNDICES GLOSARIO

## GLOSARIO PIELES PARAMÉTRICAS

**1. Algoritmo:** Conjunto prescrito de instrucciones o reglas definidas, ordenadas y finitas que permiten llevar a cabo un proceso mediante pasos sucesivos.

**2. AAD (Algorithms Aided Design):** Uso de algoritmos y patrones específicos para la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño para generar geometrías complejas que superan las limitaciones de los softwares de CAD tradicionales. Alguno de éstos son: RhinoScript®, Grasshopper®, MEL®, Python®. El término fue acuñado por primera vez en el año 2014 por Arturo Tedeschi.

**3. Back-End:** Capa de acceso de datos y programación logística de los softwares y sitios, que incluyen sistemas y las relaciones que están ocultas del usuario. Es la interfaz de las órdenes y procedimientos que está detrás del resultado final.

**4. BIM (Building Information Modeling):** Proceso de creación y gestión de datos del edificio durante el ciclo de vida del edificio, (diseño > construcción > operación) utilizando distintos softwares de modelado dinámico que ejecutan, visualizan y analizan los cambios efectuados en tiempo real, proporcionando información clave, referente a las dimensiones, geometría, relaciones espaciales, cantidades, propiedades y desempeño técnico de los componentes y/o totalidad del proyecto u obra, con el fin de incrementar la eficiencia y sostenibilidad en todo su ciclo de vida.

**5. Biomimetismo:** Tendencia a desarrollar patrones ligados a la naturaleza como fuente de inspiración, realizando abstracciones de las formas y articulación de órganos y funcionamientos de los sistemas, imitando las características de las envolventes, texturas, proporciones, pautas de distribución, articulación y organización, además del comportamiento mecánico y dinámico de las partes que conforman los sistemas.

**6. CAD (Computer Aided Design):** Uso de un herramientas computacionales que asisten el proceso de diseño. Se pueden dividir básicamente en programas de dibujo 2D , basado en entidades geométricas de carácter vectorial (puntos, líneas, arcos y polígonos) y modelado 3D que añade añade superficies y sólidos, dentro de una interfaz gráfica. El término fue acuñado por primera vez en el año 1966, por Pierre Bézier.

**7. CAM (Computer Aided Manufacturing):** Uso de computadores y tecnologías para la factura de un producto, incluyendo la planificación del proceso, producción, mecanización, calendarización, administración del material y control de calidad, con una cantidad mínima de operarios.

**8. Contouring:** Técnica del diseño paramétrico que cambia la forma de una superficie y crea un relieve tridimensional mediante la eliminación o sustracción de capas sucesivas de material, similar al proceso de tallado, se esculpe el material sistemáticamente con patrones regulares a partir de una serie de contornos o líneas que limitan el cuerpo volumétrico.

**9. Deforming:** Técnica del diseño paramétrico que consiste en la deformación de un objeto 3D, cambiando el tamaño y la forma

debido a una fuerza aplicada: empujar, doblar, estirar, girar, desplazar, derretir.

**10. Diseño algorítmico:** Diseño generativo que promueve la articulación de cambios y mutaciones en un modelo específico en base a programación y *scripting* en distintos softwares que permiten la aplicación de una secuencia de órdenes basadas en funciones o ecuaciones matemáticas y geométricas (algoritmos), que permiten la simplificación y automatización de formas complejas.

**11. Diseño generativo:** Proceso de diseño sistemático y de desarrollo autónomo que optimiza el tiempo en la medida que se realizan distintas configuraciones a partir del manejo de variables o condiciones para la visualización y modelación de volumetría compleja o no-euclidiana.

**12. Estructuras de grilla:** Son estructuras conformadas por cuadrículas formadas por polos o celosías. A menudo se abstraen de poliedros (sólido en tres dimensiones con caras planas y bordes rectos). Los polos de la estructura de la cuadrícula corresponden a los bordes del poliedro.

Hay dos tipos diferentes de estructuras de grillas básicas:

1. Estructura de rejilla orientada a la superficie
2. Estructuras de rejilla efectuada mediante modelo de espacio lleno o del tipo molecular.

**13. Free-form Modelling:** Técnica del diseño paramétrico que consiste en el modelado de formas libres usando dos métodos básicos para la creación de superficies:

a) Construcción de curvas (splines), a partir de las cuales se realiza un barrido a la superficie para generar formas o mallas 3D. En otras palabras se ejecuta barrido de una sección a lo largo de la spline (curva) que actúa como riel o guía para dar volumen al plano.

b) Manejo de puntos de control y polos de superficie, en la que a partir de las superficies.

A partir de estas superficies creadas inicialmente, se construyen otras superficies utilizando métodos derivados tales como extensiones desplazadas o ángulos de las superficies; mediante puentes y mezclas entre grupos de superficies.

**14. Folding:** Técnica del diseño paramétrico que consiste en el plegado de un plano o lámina, convirtiéndolo en una pliegue auto-soportante que adquiere una forma tridimensional y rigidez estructural, otorgando continuidad al material y al espacio.

**15. Form - Finding:** Técnica del diseño paramétrico que aborda el problema sobre la forma a través de sucesivos resultados que se obtienen a partir de la modificación de distintas variables, con el fin de seleccionar la opción más óptima de diseño.

**16. Iteración:** Repetición reiterada de un proceso o función para conseguir un resultado. En programación se refiere a la reiteración de códigos. A nivel de algoritmos el output de una función antecesora es el input de la función siguiente.

**17. Morphing:** Transformación de una forma a otra forma a través de una transición fluida, con la lógica de fotogramas de una animación.

**18. Piel:** Unión de elementos estructurales permeables que se relaciona con el interior y exterior asemejando una membrana orgánica. También conocida como envolvente.

**19. Plugin:** Complemento o aplicación relacionada a un *software* (programa) que incorpora nuevas funciones específicas ejecutada en éste e interactuando en la interfaz.

**20. Scripting:** Es un documento que contiene diversas instrucciones, escritas mediante códigos de programación para efectuar distintas funciones en un programa de computación.

**21. Sectioning:** Técnica de diseño paramétrico que realiza cortes a través de un objeto 3D formal, otorgando los datos necesarios para el fresado CNC y corte láser para la fabricación laminar de una serie de perfiles hasta componer su volumetría total.

**22. Substraction:** Técnica de diseño analógico y del diseño paramétrico que consiste en la resta de masa material o resta de objetos 3D, entre sí, con operaciones booleanas e intersecciones.

**23. Tessellation:** Técnica del diseño paramétrico que subdivide un plano o superficie en un mosaico de formas regulares o semi-regulares, sin superposiciones, ni espacios que generan patrones repetitivos.

## GLOSARIO DE ILUMINACIÓN

### CONCEPTOS BÁSICOS Y MÉTRICAS ESTÁTICAS

**1. Azimut:** Ángulo que forma con el sur (en hemisferio norte) o con el norte (en hemisferio sur), la proyección sobre el plano horizontal de la línea recta que une la posición del Sol con el punto de observación, medido en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido contrario en el sur, utilizando las proyecciones sobre el plano horizontal del punto de observación, y su valor es negativo durante la mañana (dirección Este),  $0^\circ$  ó  $180^\circ$  al mediodía (dependiendo de los valores relativos de la declinación solar y la latitud local), y positivo después del mediodía (dirección Oeste).

**2. Brillo Luminoso:** Cantidad de luz emitida o reflejada por un objeto de acuerdo a sus propiedades.

**3. Campo visual:** Extensión del espacio físico visibles desde una posición dada.

**4. Confort visual:** Manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción con las condiciones de iluminación interior, de forma tal que permitan cubrir las necesidades de trabajo y la salud de las personas. Debe estar acorde a la funcionalidad de cada recinto.

**5. Contraste:** Sensación subjetiva de la diferencia en apariencia de dos partes de un campo visual.

**6. Deslumbramiento:** Incomodidad de la visión producida cuando las partes del campo visual son muy brillantes en relación a las cercanías a las que el ojo está adaptado.

**7. Difracción de la luz:** Fenómeno ondulatorio que depende de la longitud de la onda y el diámetro de apertura de las ranuras o aberturas de la superficie en la cual la luz penetra.

**8. Eficacia luminosa:** Cantidad de lúmenes por watts (lm/w) que emite una fuente de luz, en el caso del sol, depende de la altitud y las condiciones atmosféricas.

**9. Entorno visual:** Espacio que puede ser visto desde una posición moviendo la cabeza y los ojos.

**10. Factor Luz Día (FLD):** Es el porcentaje de iluminación disponible a partir de la iluminancia horizontal proveniente desde la bóveda celeste, en un punto en el interior de un recinto y aquellas luminancias resultantes de las reflectancias del entorno inmediato, así como aquellas en el interior del recinto.

**11. Flujo Luminoso:** Potencia de luz entregada desde una fuente luminosa. Se mide en lumen (lm)

**12. Iluminación Directa:** Iluminación en la cual el rayo de luz se dirige desde la fuente (luminaria) hacia la superficie, sin mediar obstáculo alguno.

**13. Iluminación Indirecta:** Iluminación en la cual el rayo de luz se ve interrumpido por obstáculos, por lo que la luz que ilumina los objetos o superficie proviene de la reflexión de la luz en otros objetos o en los paramentos del recinto.

**14. Iluminancia:** Densidad de flujo luminoso sobre una superficie por unidad de área. Corresponde a la densidad de longitud de

onda, correlacionada con la percepción humana de brillo luminoso. Se mide en lux (lx) = 1 lumen/m<sup>2</sup>.

**15. Intensidad Luminosa:** Relación entre el flujo luminoso emitido en un ángulo infinitesimal, cuyo eje es la dirección en dicho ángulo. Se mide en candela (cd) = 12,56 lúmenes.

**16. Luminancia:** Medición física de la claridad o brillo fotométrico. Cantidad de luz que emite, transmite o refleja una superficie en dirección a los ojos. Se mide en candela por metro cuadrado de superficie (cd/m<sup>2</sup>).

**17. Luz:** Parte del espectro electromagnético visible o percibido por el ojo humano. Abarca la radiación infrarroja de onda corta y la radiación ultravioleta de longitud de onda entre 760 nm (rojo) y 380 nm (violeta). Posee longitud de onda variable, por ende, es de carácter dinámico.

**18. Reflexión de la luz:**

Es el cambio de dirección de una onda luminosa. Puede ser especular (ángulo de incidencia es igual al ángulo reflejado cuando la superficie es lisa) y dispersa o difusa (rayo incidente es reflejado en múltiples ángulos, debido a la textura o rugosidad de la superficie). Ésta última es la que corresponde a la mayoría de los materiales.

**19. Refracción de la luz:**

Es el efecto que ocurre entre materiales transparentes de diferentes densidades, por el cual varía la dirección de la onda luminosa, según el índice de refracción de los materiales, tales como: aire, vidrio, agua, entre otros.

## 20. Transmisión de la luz:

Absorción de la onda luminosa a través de materiales o superficies transparentes y translúcidas, que varía según la longitud de la onda y el espesor del filtro luminoso.

## MÉTRICAS DINÁMICAS

**1. Autonomía Lumínica - DA - (*Daylight Autonomy*):** Porcentaje de horas anuales en los recintos, con un determinado umbral de iluminancia, capaz de auto mantenerse con iluminación natural.

**2. Autonomía Lumínica Espacial - sDA - (*Spatial Daylight Autonomy*):** Porcentaje de área del piso que recibe suficiente luz natural del día, considerando como mínimo 300 lux durante al menos el 50% de las horas anuales de ocupación de un recinto.

**3. Exposición Solar Anual - ASE - (*Annual Sun Exposure*):** Porcentaje de área del piso que recibe luz solar directa y que puede causar incomodidad visual por concepto de deslumbramiento (brillo intenso), considerando como mínimo el 1000 lux durante al menos 250 horas anuales de ocupación de un recinto.

**4. Iluminancia Diurna Útil - UDI - (*Useful Daylight Illuminance*):** Frecuencia de iluminación en un determinado tiempo en las que el plano de trabajo posee un rango de iluminancia recomendada, según el tipo de uso del espacio y la tarea visual desarrollada en el interior.



B

Imagen de Fondo:  
Tianjin Binhai Library  
MVRDV Architects

APÉNDICES  
ANEXOS

OBRA	CIUDAD	USO	N° DE PISOS	TIPOLOGIA	AZIMUT	ALTURA
CENTRO DE EXTENSIÓN Y BIBLIOTECA CENTRAL UDP	SANTIAGO	EDUCACIONAL	5	CUATRO CARAS	350°	18,5
EDIFICIO TRANSOCÉANICA	VITACURA	OFICINAS	3	LINEAL	340°	12
CENTRO CÍVICO CULTRAL EL BOSQUE	EL BOSQUE	CULTURAL	2	LINEAL	19°	8
CLÍNICA SALUD UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO	LA FLORIDA	SALUD	5	LINEAL	0°	18,5
CAMPUS UNAB AIEP SEDE BELLAVISTA	PROVIDENCIA	EDUCACIONAL	5	CUATRO CARAS	342°	22,9
UNIVERSIDAD SAN SEBASTIÁN CAMPUS BELLAVISTA	RECOLETA	EDUCACIONAL	8	CUATRO CARAS	0°	27
EDIFICIO AIEP BARRIO UNIVERSITARIO DE SANTIAGO	SANTIAGO	EDUCACIONAL	6	CUATRO CARAS	348°	19
EDIFICIO VANGUARDIA	HUECHURABA	OFICINAS	6	DOS CARAS	339°	19
EDIFICIO LOS PRESIDENTES UNIVERSIDAD DE CHILE	PROVIDENCIA	EDUCACIONAL	5	TRES CARAS	352°	18,5
CENTRO CULTURAL PALACIO DE LA MONEDA	SANTIAGO	CULTURAL	3	CUATRO CARAS	355°	15
FACULTAD DE COMUNICACIÓN Y DISEÑO UNIVERSIDAD MAYOR	HUECHURABA	EDUCACIONAL	6	UNA CARA	12°	24
EDIFICIO AULAS FACEA UNIVERSIDAD DE CHILE	SANTIAGO	EDUCACIONAL	4	ENTRE EDIFICIOS	321°	14,6
CENTRO CÍVICO MUNICIPALIDAD DE VITACURA	VITACURA	GUBERNAMENTAL	5	UNA CARA	6°	24
EDIFICIO TVN	PROVIDENCIA	ESTUDIOSTV	5	UNA CARA	RADIAL	18,5
EDIFICIO K UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS	PROVIDENCIA	EDUCACIONAL	6	TRES CARAS	344°	21
EDIFICIO VICENTE KOVACEVIC II UNIVERSIDAD CENTRAL	SANTIAGO	EDUCACIONAL	6	TRES CARAS	344°	21
DUOC UC PLAZA VESPUCIO	SANTIAGO	EDUCACIONAL	5	DOS CARAS	330°	18,5
CENTRO DE LA CONSTRUCCIÓN DUOC UC	SANTIAGO	EDUCACIONAL	5	TRES CARAS	350°	18
EDIFICIO SONDA	SANTIAGO	OFICINAS	15	LINEAL	355°	45
EDIFICIO ATRIUM	SANTIAGO	OFICINAS	10	DOS CARAS	345,5°	32,6
EDIFICIO GASCO	LAS CONDES	OFICINAS	3	CUATRO CARAS	354°	10,2
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN UTEM	SANTIAGO	EDUCACIONAL	6	CUATRO CARAS	350°	18,5
TALLERES PROLAM	SANTIAGO	OFICINAS	3	LINEAL	350°	9
EDIFICIO DOCE JUZGADOS DE SANTIAGO	HUECHURABA	GUBERNAMENTAL	7	TRES CARAS	348°	22,5
EDIFICIO KOVACEVIC I UNIVERSIDAD CENTRAL	HUECHURABA	EDUCACIONAL	7	CUATRO CARAS	346,75°	23
HOTEL HYATT	LAS CONDES	TURISTICO	24	CUATRO CARAS	345°	110
EDIFICIO LA MERCED	SANTIAGO	COMERCIAL	8	CUATRO CARAS	0°	30

Tabla 3. Síntesis del catastro de edificios atrio en Santiago, RM, Chile. Fuente: Elaboración propia a partir de revisión de Tesis Doctoral, Roldán (2016)

**Tabla 4. Dimensión promedio del inventario de 27 atrios en Santiago de Chile por Roldán (2016)**

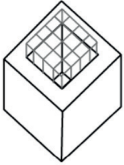
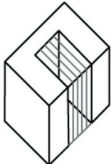

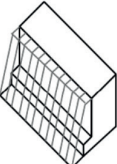
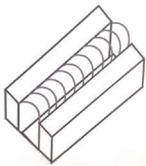
ATRIOS		DIMENSIONES			ÁREA [m <sup>2</sup> ]	VOLUMEN [m <sup>3</sup> ]
Tipo	N°	Largo	Ancho	Alto		
4 caras 	8	24,7	12,8	17,8	337,2	5887,1
3 caras 	7	17,9	15,8	32,7	331,7	10240,1
2 caras 	3	Irregular	Irregular	18,8	179,9	2813,0
1 cara 	3	Irregular	Irregular	14,6	442,4	9221,7
lineal 	6	35,7	11,3	16,9	317,2	5438,8

Tabla 4. Dimensión promedio de los 27 atrios catastrados por la docente en la ciudad de Santiago, RM, Chile.  
Fuente: Elaboración propia a partir de revisión de Tesis Doctoral, Roldán (2016)





Imagen de Fondo:  
Vennesla Library and Culture House  
Helen & Hard Architects



# APÉNDICES BIBLIOGRAFÍA



## BIBLIOGRAFÍA

**Ábalos, I. y Herreros, J.** (1988) *La piel inútil: sobre las nuevas fachadas*. Arquitectura Viva N° 2.

**Alexander, C.** (1964) *Notes on the synthesis of forms*. Harvard University Press, Cambridge, Estados Unidos.

**Alexander, C. ; Ishikawa, S. y Silverstein, M.** (1977) *A Pattern Language*. Harvard University Press, Cambridge, Estados Unidos.

**Andersen, P. y Salomon, D.** (2010). *The Architecture of the Patterns*. New York-London. W.W. Norton & Company.

**Ávila, D. y Arias, S.** (2015). *La envolvente arquitectónica y su influencia en la iluminación natural: The Building Envelope and its Influence on Natural Lighting*. Revista Hábitat Sustentable Vol. 5. Universidad del Bío-Bío, Chile. Link: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/download/1811/1755/>

**Azagra, D. y Bernabeu, A.** (2012) *The Structure of Free Forms*. Informes de la Construcción Vol. 64. Págs. 133-142. Link: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/download/1876/2076>

**Bacha, Ch. y Bourbia, F.** (2018) *Effect of kinetic facades on energy efficiency in office buildings - hot dry climates*. University of Constantine, Constantine, Argelia. Conferencia 11th Conference on Advanced Building Skins, At Bern, Switzerland, Suiza. Link: [https://www.researchgate.net/publication/310883656\\_Effect\\_of\\_kinetic\\_facades\\_on\\_energy\\_efficiency\\_in\\_office\\_buildings\\_-\\_hot\\_dry\\_climates](https://www.researchgate.net/publication/310883656_Effect_of_kinetic_facades_on_energy_efficiency_in_office_buildings_-_hot_dry_climates)

**Baixas, J.** (2012) *Envolventes: La piel de los edificios*. Revista ARQ, N° 82 "Fabricación y construcción". Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. Link: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-69962012000300016](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962012000300016)

**Benévolo, L.** (1984) *Historia de la arquitectura del Renacimiento. La arquitectura clásica (del siglo XV al siglo XVIII)*. Editorial GG, Barcelona, España

**Borja, J.** (1998) Ciudadanía y espacio público. Revista del CLAD Reforma y Democracia. N° 12. Caracas, Venezuela. Link: <http://old.clad.org/portal/publicaciones-del-clad/revista-clad-reforma-democracia/articulos/012-octubre-1998/ciudadania-y-espacio-publico-1>

**Brassard, G. y Bratley, P.** (1997). *Fundamentos de algoritmia*. Editorial Prentice Hall. Estados Unidos.

**Caldera, S.; Silva, G. y Loyola, M.** (2013) Uso de herramientas paramétricas de optimización evolutiva y simulación energética en el diseño basado en performance. Conferencia SiGraDi 2013. Link: [http://cuminca-des.scix.net/cgi-bin/works/Show?sigradi2013\\_285](http://cuminca-des.scix.net/cgi-bin/works/Show?sigradi2013_285)

**Casissa, D.** (2015). *Aplicaciones matemáticas en el arte y la arquitectura*. TRP21, N°02 Arte Digital. Modelos Paramétricos Digitales. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Buenos Aires, Argentina. Link: [https://www.academia.edu/19886157/Aplicaciones\\_matem%C3%A1ticas\\_en\\_el\\_arte\\_y\\_la\\_arquitectura](https://www.academia.edu/19886157/Aplicaciones_matem%C3%A1ticas_en_el_arte_y_la_arquitectura)

**Castilla, M.; Álvarez, J. D. ; Berenguel, M. ; Pérez, M. ; Rodríguez, F. y Guzmán, J. L.** (2010). *Técnicas de control del confort en los edificios*. Revista Iberoamericana del Comité Español de Automática (CEA), España. Link: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791210700388>

**Cavieres, A.** (2007) *Diseño paramétrico orientado a la performance*. Revista Digital de Arquitectura N° 13. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Link: <https://revistas.uchile.cl/index.php/RA/article/viewFile/28201/29900>

**Chávez, J.D.** (2010) *La piel de la arquitectura*. Facultad de Arquitectura, Medellín, Colombia. Link: <https://arquitectura.medellin.unal.edu.co/imagenes/imagenes/pdf/piel.pdf>

**Chen, X. ; Cohen, E. y Riesenfeld, R.** (2006) *Degree Reduction for NURBS Symbolic Computation on Curves*. School of Computing, University of Utah, EEUU. Link: <https://www.cs.utah.edu/gdc/publications/papers/chen-dr-2.pdf>

**Chiarella, M. ; Dalla Costa, M. ; Veizaga, M. y Gronda, L.** (2011) *Patrones generativos dinámicos (URDIR.Lab). Estrategias proyectuales paramétricas simples para el ejercicio profesional cotidiano*. Conferencia SiGraDi 2011. Santa Fe, Argentina. Link: [http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2011\\_423.content.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2011_423.content.pdf)

**Coexeter, H.S.M.** (1942) *Non-Euclidean Geometry*. Universidad de Toronto, Press. Re-editado en 1998 por la Mathematical Association of America Canadá.

**Coexeter, H.S.M.** (1971) *Fundamentos de la Geometría*. Editorial Limusa - Wiley, Noruega.

**D'Alençon, R.** (2008) *Acondicionamientos: Arquitectura y técnica*. Ediciones ARQ, Santiago, RM, Chile.

**Dalla, M.** (2015) *Sistemas generativos dinámicos: Estrategias proyectuales paramétricas simples para prácticas arquitectónicas locales*. Tesis de Magister, Arquitectura. Universidad Católica de Córdoba, Argentina. Link: [www.researchgate.net/publication/280493800](http://www.researchgate.net/publication/280493800)

**De Berg, M.; Cheong, O.; Van Kreveld, M. y Overmars, M.** (2008) *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Tercera edición. Springer-Verlag Berlín Heidelberg. Berlín, Alemania.

**De Landa, M.** (2000) *A thousand Years of Non-linear History*. Editorial Swerve, Nueva York, Estados Unidos. Link: [A Thousand Years of Non-linear History By Manuel De Landa New York Zone Books 1997 Pp 333 1600](http://www.zonebooks.com/1000-years-of-non-linear-history-by-manuel-de-landa-new-york-zone-books-1997-p-333-1600)

**De Landa, M.** (2011) *Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture*. Center for Digital Discourse and Culture. Virginia Polytechnic Institute and State University. Link: <http://www.cddc.vt.edu/host/delanda/pages/algorithm.html>

**Deleuze, G.** (1969) *Le Pli: Leibniz et le baroque*. Logique du Sens, Paris, Editions du Minuit. Link: <https://periodicals.narr.de>

**De Lucas, C.** (2017) *Instrumentos paramétricos en arquitectura y moda: Cuestiones de Escala*. Tutor de Tesis: Ángel Cordero. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. Link: [oa.upm.es/47022/1/TFG\\_Lucas\\_Fernandez\\_Cristinade.pdf](http://oa.upm.es/47022/1/TFG_Lucas_Fernandez_Cristinade.pdf)

**Desargües, G. y Boose, A.** (1643) *La pratique du trait a prevves. Pour la Coupe des Pierres en l'Architecture*. Impreso por Pierre Des Hayes, Rue de la Harpe a la Roze Rouge. Avec Privilige. París, Francia.

**Descartes, R.** (1886) *La géométrie*. Paris A. Hermann Librairie Scientifique. París, Francia. Link: <https://archive.org>

**DiLaura, D. L.; Houser, K. W.; Mistrick, R. G. y Steffy, G. R.** (2010) *The Lighting Handbook: Reference and application*. IESNA - Illuminating Engineering Society of North America. New York, Estados Unidos. Ref. IESNA (2000). Link: <https://www.slideshare.net/wienropinzon/iesna-lighting-handbook-62151168>

**Djunaedy, E.; Mahić, A. y Van Den Wymelenberg, K.** (2013) *Spatial Daylight Autonomy & Annual Sunlight Exposure: The LM - 83 Radiance Script (using phase method)*. International Radiance Workshop, Integrated Design Lab, University of Idaho, Washington, Estados Unidos. Link: [https://www.radiance-online.org/community/workshops/2013-golden-co/Djunaedy\\_vdw\\_mahic\\_lm83.pdf](https://www.radiance-online.org/community/workshops/2013-golden-co/Djunaedy_vdw_mahic_lm83.pdf)



**Dutra, G.** (2017) *Evaluation of Annual Sunlight Exposure (ASE) as a Proxy to Glare: A Field Study in a NZEB and LEED Certified Office in San Francisco*. University of California, Berkeley. California, Estados Unidos. Link: <https://escholarship.org/uc/item/3js1z0b8>

**Edmonson, A.** (2007) *A Fuller Explanation: The Synergetic Geometry of R. Buckminster Fuller*. Editorial Emergent World Press, El Colorado, Estados Unidos. Link: <https://buckyworld.files.wordpress.com/2015/11/afullerexplanation-by-amy-edmondson.pdf>

**Edwards, B.** (2006) *Guía Básica de la Sostenibilidad*. Editorial GG, Barcelona, España.

**Eltaweel, A. y Yuehong Su** (2016) *Parametric design and daylighting: A literature review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews N° 73. Páginas 1086-1103. Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering, University of Nottingham, UK, Reino Unido. Link: <http://eprints.nottingham.ac.uk/40921/>

**Emami, N. y Von Buelow, P.** (2014) *Interrelation of Geometry, Daylight and Structure in a Perforated Screen Wall*. DIVA Day student competition 2014 presented at DIVA Day, University of Michigan, Michigan, Estados Unidos. Link: <https://www.researchgate.net/publication/283275273>

**Erlendsson, O.** (2014) *Daylight Optimization: A Parametric Study of Atrium Design; Early Stage Design Guidelines of Atria for Optimization of Daylight Autonomy*. Master's Degree Project, , School of Architecture and the Built Environment, Division of Building Services and Energy Systems, Royal Institute of Technology. Stockholm , Sweden. Link: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:723644/FULLTEXT01.pdf>

**Farin, G.; Hoschek, J. y Kim, M.S.** (2002) *Handbook of Computer Aided Geometric Design*. Ed. North-Holland Elsevier. Amsterdam, Países Bajos. Link: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444511041/handbook-of-computer-aided-geometric-design>

**Fischer, J.** (2011) *Visualizing the Connection Among Convex Hull, Voronoi Diagram and Delaunay Triangulation*. Department of Computer Science, Michigan Technological University, Houghton, USA. Link: <https://wenku.baidu.com/view/e84d7f0d52ea551810a68753.html>

**Flores, M.L.** (2007) NET.LAB: ¿Algoritmo versus arquitectura? Diagrama Voronoi como herramienta de diseño. Revista DeArquitectura Volumen 13, N°16, Páginas 46-53. Link: <https://dearquitectura.uchile.cl/index.php/RA/article/view/28202/29901>

**Fraille, M.** (2012) *El Nuevo Paradigma Contemporáneo. Del Diseño Paramétrico a la Morfogénesis Digital*. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. Link: <http://uba.academia.edu/MarceloFraille>

**Galdames, O.** (2011) *Modelización con curvas y superficies de Bézier*. Universidad de Valencia. Revista online MSEL - Modelling in Science Education and Learning. Volume 4, N°14. Universidad Politécnica de Valencia, Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada. Valencia, España. Link: <https://www.researchgate.net/publication/257357261>

**Galasiu, A. y Reinhart, C.F.** (2008) *Current Daylighting Design Practice: A Survey*. Building Research and Information 36(2): 159-174. Link: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09613210701549748?journalCode=rbri20>

**Gardner, M.** (2001) *Geometría No-Euclidiana*, Cap. 4: El libro colosal de Matemáticas. Editorial W.W. Norton & Company, Nueva York, USA.

**Garretón, Y.; Villalba, A.; Monteoliva, J.M. y Pattini, A.** (2015) *Análisis de deslumbramiento anual - Annual glare analysis. Use of indoor shading systems*. Aplicación de sistemas de sombreado interior. Consejo Nacional de investigaciones científicas y técnicas CONICET. ORP Journal - Operations Research Perspectives. Mendoza, Argentina. Link: <https://www.researchgate.net/publication/287200115>

**Gehry, F.** (2014) *Museum Guggenheim Bilbao: Architect Frank O. Gehry's Most Original Work*. DosdeArte Ediciones. Barcelona, España.

**Goia, F. ; Haase, M. y Perino, M** (2013) *Optimizing the Configuration of a façade module for office buildings by means of the integrated thermal and lighting Simulations in a total energy perspective*. Applied Energy N° 108, páginas 515-527. Link: [https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2502322/Self\\_archive%2BAPEN%2B108%2B515-527.pdf](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2502322/Self_archive%2BAPEN%2B108%2B515-527.pdf)

**González - Boado, L.** (2015) *La piel, la membrana: The Skin, the Membrane*. Departamento de proyectos arquitectónicos. Universidad de Sevilla, España. Link: <https://www.researchgate.net/publication/275212734>

**Gomma, M. y Jabi, W.** (2016) *Evaluating Daylighting Analysis of Complex Parametric Façades*. Ponencia eCAADe - Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Oulú, Finlandia. Link: <https://orca.cf.ac.uk/92355/1/eCAADe2016.pdf>

**Goodmann, J.** (2004) *Handbook of Discrete and Computational Geometry*. Tercera Edición, CRC Press. Florida, Estados Unidos.

**Gray, J.** (1989) *Ideas of Space: Euclidean, Non-Euclidean, and Relativistic*. 2nd edition, Clarendon Press. Universidad de Oxford, Press. Reino Unido.

**Greenberg, J. M.** (1994), *Geometrías euclidiana y no euclidianas: Desarrollo e Historia*, 3ª edición de W. H. Freeman Company, Macmillan Publishers, Londres, Inglaterra.

**Hassaan, A.; Mahmoud, A. y Elghazi, Y.** (2015) *Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns*. Artículo en Solar Energy N° 126, Páginas 111-127, Editorial Elsevier, California, EEUU. Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15007124>

**Hattz T.; Saelzer G.; Hempel R. y Gerber A.** (2012) *Alto confort interior con mínimo consumo energético a partir de la implementación del estándar "Passivhaus" en Chile*. Revista y biblioteca digital Scielo (Scientific Electronic Library Online). Link: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-915X2012000200011](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2012000200011)

**Heath, T.** (2015) *Apollonius of Perga: Treatise on Conic Sections*. Editorial Dover Publications, New York, Estados Unidos. Link: <https://archive.org>

**Heath, T.** (2017) *The Thirteen Books of Euclid's Elements*. Editorial Dover Publications, New York, Estados Unidos. Link: <https://archive.org>

**Heschong, L. y Van Den Wymelenberg, K.G.** (2011) *Annual Daylight Performance Metrics*. Link: <https://www.researchgate.net/publication/310752409>

**Heschong, L.** (2012) *Daylight Metrics*. Heschong Mahone Group, California Energy Commission. California, EEUU. Link: <https://www.energy.ca.gov/2012publications/CEC-500-2012-053/CEC-500-2012-053.pdf>

**Farkas H. y Kra, I.** (1980) *Riemann Surfaces*. Graduate Text in Mathematics. 2ª Edición Springer-Verlag. New York, Estados Unidos.

**Hopkinson, R. G.; Petherbridge, P. y Longmore, J.** (1969) *Daylighting*. Editorial Heinemann. Londres, Inglaterra.

**Iwamoto, L.** (2007) *Digital Fabrications. Architectural and Material Techniques*. Architecture Briefs. Editorial Princeton Architectural Press, NY.

**Jahanara, A. y Fioravanti, A.** (2017). *Kinetic Shading System as a means for Optimizing Energy Load*. Ponencia eCAADe (Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe), Roma. Italia. Link: [http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2017\\_149.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2017_149.pdf)

**Jakubiec y Reinhart** (2010) *The Use of Glare Metrics in the Design of Daylit Spaces: Recommendations for Practice*. MIT, Harvard Design School. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos. Link: [http://web.mit.edu/tito/www/Projects/Glare/2010RadianceWorkshop\\_GlareIndices.pdf](http://web.mit.edu/tito/www/Projects/Glare/2010RadianceWorkshop_GlareIndices.pdf)

**Jakubiec, J. A. y Reinhart, C. F.** (2011) *Diva 2.0: Integrating Daylight and Thermal Simulations Using Rhinoceros 3D, Daysim & Energyplus*. Ponencia BS. Link: [http://ibpsa.org/proceedings/BS2011/P\\_1701.pdf](http://ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1701.pdf)

**Jakubiec, J.A. y Reinhart, C.F.** (2012) *The 'adaptive zone' – A concept for assessing discomfort glare throughout daylit spaces*. Lighting Research Technology, N° 44, Páginas 149–170. Cambridge, Estados Unidos. Link: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.902.1419&rep=rep1&type=pdf>

**Jakubiec, J.A.** (2018) *Validation of Simplified Visual Discomfort Calculations*. Conference: Building Simulation and Optimization 2018, At Cambridge, England, UK, Reino Unido. Link: <https://www.researchgate.net/publication/327823262>

**Jencks, Ch.** (2006) *The Volcano and the Tablet*. Theories and Manifestoes of Contemporary Architecture. Chichester, Wiley-Academy Editions. Manchester Metropolitan University, Inglaterra, Reino Unido.

**Johnsonbaugh, R.** (1997) *Matemáticas Discretas*. Cuarta Edición. De Paul University Chicago. Editorial Pearson/Prentice Hall. México.

**Joston, J.** (2002). *Compact Riemann Surfaces*. Springer-Verlag, New York, Estados Unidos.

**Kemp, M.** (2000) *La ciencia del arte: La óptica en el arte occidental de Brunelleschi a Seurat*. Yale, University Press. Editorial Akat S.A. Madrid, España. Link: [https://www.researchgate.net/publication/44478569\\_La\\_ciencia\\_dela\\_arte\\_la\\_optica\\_en\\_el\\_arte\\_occidental\\_de\\_Brunelleschi\\_a\\_Seurat\\_Martin\\_Kemp](https://www.researchgate.net/publication/44478569_La_ciencia_dela_arte_la_optica_en_el_arte_occidental_de_Brunelleschi_a_Seurat_Martin_Kemp)

**Kittler, R. y Darula, S.** (2002) *CIE general sky standard defining luminance distributions*. Ponencia eSim 2002. Slovak Academy of Sciences. Bratislava, Eslovaquia. Link: <https://www.researchgate.net/publication/238782731>

**Kleindienst, S. y Andersen, M.** (2009). *The adaptation of Daylight Glare Probability to Dynamic Metrics in a Computational Settings*. Link: <https://infoscience.epfl.ch/record/163871/files/The%20adaptation%20of%20daylight%20glare%20probability.pdf>

**Köhler, W.** (1959) *Lighting in architecture=Lichtarchitektur - Architecture in the Light: light and color as stereoplastic elements; pictorial narrative conceived and arranged by Wassili Luckhardt*. Trad. por Reinhold, NY, EEUU.

**Konstantzos, I. y Tzempelikos, A.** (2014) *Daylight Glare Probability Measurements And Correlation With Indoor Illuminances In A FullScale Office With Dynamic Shading Controls*. Conferencia International High Performance Buildings, Purdue University, West Lafayette, Indiana, Estados Unidos. Link: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1146&context=ihpbc>

**Kota, S. y Haberl, J.** (2009) *Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and Their Use in Energy Performance Simulations*. Proceedings of the Ninth International Conference for Enhanced Building Operations, Austin, Texas. Link: <https://pdfs.semanticscholar.org/e194/26b868a7352c440035741d980ffbd199320c.pdf>

**Lee, J.M.** (1950) *Riemannian Manifolds: an Introduction to Curvature*. Universidad de Washington. Editorial Springer, Estados Unidos. Link: <https://www.maths.ed.ac.uk/~v1ranick/papers/leeriem.pdf>

**Lee, D. y Leounis, B.** (2011) *Digital Origami: Modeling planar folding structures*. Clemson University, Carolina del Sur, Estados Unidos. Conferencia Internacional ACADIA 2011: Parametricism. Link: [https://cumincad.architecturez.net/system/files/pdf/acadiaregional2011\\_002.content.pdf](https://cumincad.architecturez.net/system/files/pdf/acadiaregional2011_002.content.pdf)

**Lehmann, C. H. y Sors, M. S.** (1953). *Geometría analítica*. Unión Tipográfica, Editorial Hispano-Americana, Barcelona, España. Link: [https://www.cimat.mx/ciencia\\_para\\_jovenes/bachillerato/libros/\[Lehmann\]GeometriaAnalitica.pdf](https://www.cimat.mx/ciencia_para_jovenes/bachillerato/libros/[Lehmann]GeometriaAnalitica.pdf)

**Leithold, L** (1998) *The Calculus [El Cálculo]*. Séptima Edición, Oxford University Press, Oxford, Estados Unidos. Traducido por Mata Fidencio. UNAM, México D.F. Link: <https://bibliotecavirtualmatematicasunicaes.files.wordpress.com/2011/11/leithold-louis-el-calculos-7ed-1380-pag.pdf>

**Lindelöf, D. y Morel, N.** (2006). *A field investigation of the intermediate light switching by users*. Energy and Buildings, Volume 38, Issue 7, Páginas 790-801. Editorial Elsevier, California, Estados Unidos. Link: <https://www.researchgate.net/publication/37436819>

**Lyche, T. y Mørken, K.** (2005) *Spline Methods Draft*. Clases y Bibliografía del Curso de Matemáticas: Spline Metoder, Universidad de Oslo, Noruega. Link: <https://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/nedlagte-emner/INF-MAT5340>

**López, M.; Rubio, R. y Bueno-Sánchez, A.** (2017) *Biomimética aplicada a la Arquitectura y Construcción*. Congreso INGEGRAF 2017. Nuevos modelos de Investigación y colaboración en Ingeniería Gráfica. Gijón, Asturias, España. Link: <https://www.researchgate.net/publication/318017789>

**Loyola, M. y Rossel, D.** (2012) *Tecnologías digitales de la arquitectura contemporánea y la ilusión de objetividad en los procesos de diseño*. Revista De Arquitectura, Volumen 18, N°26. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile. Santiago. Link: <https://dearquitectura.uchile.cl/index.php/RA/article/view/32542/34312>

**Loyola, M.; Caldera, S. y Silva, G.** (2013) *Uso de Herramientas Paramétricas de Optimización Evolutiva y Simulación Energética en el Diseño Basado en Performance*. Conference SIGraDi. Publicado en Blucher Design Proceedings vol. 1 num. 7. Link: <repositorio.uchile.cl/handle/2250/140346>

**Lupton, E.** (2002) *Skin, Surface, Substance + Design*. Princeton Architectural Press. New York, Estados Unidos.

**Mahić, A. y Nezamdoost, A** (2017) *Challenges and Opportunities of Incorporating LM-83 into Building Simulations*. International Radiance Workshop, University of Oregon, Eugene, EEUU. Link: [https://www.radiance-online.org/community/workshops/2017-portland-or/presentations/08\\_AMAN\\_LM83SimulationChallenges.pdf](https://www.radiance-online.org/community/workshops/2017-portland-or/presentations/08_AMAN_LM83SimulationChallenges.pdf)

**Mahmoud, A. y Elghazi, Y.** (2016) *Parametric-based design kinetics facades to optimize daylight performance. Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns*. Solar Energy Magazine N° 126, Páginas 111-127. Link: <https://www.researchgate.net/publication/290797300>

**Mardaljevic, J.** (2006) *Examples of Climate-Based Daylight Modelling*. CIBSE, National Conference: Engineering the Future 21-22, Oval Cricket Ground, London, UK. Link: <http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.573.3232&rep=rep1&type=pdf>

**Mardaljevic, J.** (2006) *Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance*. Lighting Research and Technology N° 32, Volumen 3, Páginas 111-118. CIBSE. Londres, Inglaterra. Link: <https://www.researchgate.net/publication/245385241>

**Mardaljevic, J.** (2013) *Rethinking daylighting and compliance*. Volume 1, Issue 3, Article 1, Magazine SDAR Journal of Sustainable Design & Applied Research. Loughborough University, Reino Unido, UK. Link: <https://arrow.dit.ie/sdar/vol1/iss3/1/>

**Mardaljevic, J.; Heschong, L. y Lee, E.S.** (2009) *Daylight metrics and energy savings*. Environmental Energy Technologies Division. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Publicación Lighting Research and Technology, SAGE Journals, CIBSE. Londres, Inglaterra. Link: <http://gaia.lbl.gov/btech/papers/4585.pdf>

**Mardaljevic, J.; Andersen, M.; Roy, N. y Christoffersen, J.** (2012) Daylight Metrics: Is There a Relation Between Useful Daylight Illuminance and Daylight Glare Probability?. Conference IBPSA, International Building Performance Simulation Association. Loughborough, UK, Reino Unido. Link: <https://www.researchgate.net/publication/267556994>

**Martínez, C.** (2016) *Geometría E4D: Geometría del Espacio Euclidiano cuadrimensional vista desde la óptica bidimensional*. Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo. Carabobo, Venezuela. Link: <https://www.researchgate.net/publication/295400551>

**Meredith, M.** (2008) *From Control to Design Parametric / Algorithmic Architecture*. Ediciones Actar Publishers. New York, Estados Unidos.

**Mondelo, P.; Gregori, E. y Barrau, P.** (2016) *Ergonomía: Fundamentos de diseño de puestos de trabajo*. Temas de Ergonomía y prevención. Editorial UPC Mutua Universal. Universidad Politécnica de Catalunya, España.

**Montaner, J.M.** (1997) *La modernidad superada: Arquitectura, arte y pensamiento del Siglo XX*. Editorial GG Gustavo Gili. Barcelona, España. Link: <https://www.researchgate.net/publication/44492777>

**Morales, L.** (2012) *Arquitectura paramétrica aplicada en envolventes complejas en base a modelos de experimentación en el diseño arquitectónico*. Revista de Arquitectura e Ingeniería N°6, Issue 3, Páginas 1-11. Matanzas, Cuba. Link: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193926410002>

**Mortenson, M.** (2006) *Geometric Modeling*. Hardcover Published, Industrial Press, Nueva York, Estados Unidos.

**Nagy, Z.; Svetozarevic, B.; Jayathissa, P; Begle, M.; Hofer, J.; Lydon, G.; Willmann, A. y Schlueter, A.** (2016) *The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes*. Frontiers of Architectural Research Volume 5, Issue 2. Southeast University of China. Nanjing, China. Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263516300048>

**Nabil, A. y Mardaljevic, J.** (2005) *Useful Daylight Illuminance: a new paradigm for assessing daylight in Buildings*. Artículo en Lighting Research Technology, CIBSE. Londres, Inglaterra. Link: <https://www.researchgate.net/publication/245385301>

**Narangerel, A.; Lee, J.H. y Stouffs, R.** (2016) *Daylighting Based Parametric Design Exploration of 3D Facade Patterns*. Conference 34th eCCAADe Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe At Oulu, Finland, Volume 2, Finlandia. Link: <https://www.researchgate.net/publication/307413682>

**Navarrete, S.** (2014) *Diseño Paramétrico: El gran desafío del siglo XXI*. Revista Información Científica Scielo. Biblioteca digital de países iberoamericanos. Link: <http://www.scielo.org.ar/pdf/ccedce/n49/n49a05.pdf>

**Nezamdoost, A. y Van Den Wymelenberg, K.** (2015) *A Comparative Study of Spatial Daylit Area Drawings with Annual Climate-Based Simulation Using Multiple Manual Blind Control Patterns, and Point in Time Simulation*. ASHRAE Energy Modeling Conference: Tools for Designing High Performance Buildings. Atlanta, Georgia, Estados Unidos. Link: <https://www.researchgate.net/publication/297259686>

**Oliva, R.** (2015) *Avances tecnológicos en representación gráfica y su influencia en el diseño arquitectónico*. Universidad Politécnica de Cataluña, España. Link: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/98088>

**Omidfar, A.** (2011) *Design Optimization of a Contemporary High Performance Shading Screen-Integration of Form and Simulation Tools*. Ponencia de Building Simulation 2011, Sydney, Australia. Link: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P\\_1779.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1779.pdf)

**Omidfar, A.** (2017) *Façade Photometrics Luminance Distribution Analysis Through Building Skins*. Ponencia de BS 2017 (Building Simulation). San Francisco, Estados Unidos. Link: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2017/BS2017\\_105.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2017/BS2017_105.pdf)

**O'Rourke, J.** (1997) *Computacional Geometry in C*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido. Link: <https://github.com/sarcilav/analysis-numerico/tree/master/doc>

**Parker - Manning, H.** (1963) *Introductory Non-Euclidean Geometry*. Editorial Dover Publications, New York, Estados Unidos. Link: <https://mayapdf.files.wordpress.com/2017/02/1537076817-non-euclidean-geometry-henry-parker-manning.pdf>

**Pelletier, M.** (2015) *Hardware paramétrico. Hormigón armado*. Tesis de arquitectura. Universidad de Tecnología en la Arquitectura. Barcelona, España. Link: [https://issuu.com/mariaalexandrapelletiernavarro/docs/tesina\\_muta-maria\\_pelletier-publica](https://issuu.com/mariaalexandrapelletiernavarro/docs/tesina_muta-maria_pelletier-publica)

**Pesenti, M.; Masera, G.; Fiorito, F. y Sauchelli, M.** (2015) *Kinetic solar skin: a responsive folding technique*. International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, SHC 2014. Energy Procedia 70; 661-672. Link: <https://core.ac.uk/download/pdf/55252340.pdf>

**Piderit, M.B.; Cauwerts, C. y Díaz, M.** (2014) *Definition of the CIE standard skies and application of high dynamic range imaging technique to characterize the spatial distribution of daylight in Chile*. Revista de la construcción N°13, Volumen 2, Páginas 22-30. Link: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-915X2014000200003](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2014000200003)

**Piegl, L.** (1991) *On NURBS: A Survey*. IEEE Computer Graphic & Applications, Volumen 11, Issue 1. University of South Florida. Tampa, EEUU. Link: [http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/docs/Piegl\\_NURBS.pdf](http://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/docs/Piegl_NURBS.pdf)

**Piegl, L.** (1998) *Computing offsets of NURBS curves and surfaces*. Department of Computer Science & Engineering, University of South Florida, Tampa, Estados Unidos. Link: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.360.2793&rep=rep1&type=pdf>

**Pierson, C. ; Wienold, J. y Bodart, M.** (2017) *Discomfort glare perception in daylighting: influencing factors*. Energy Procedia N°122, Páginas 331-336. Conferencia CISBAT Lausanne, Switzerland. Link: <https://www.researchgate.net/publication/319635724>

**Pierson, C. ; Wienold, J. y Bodart, M.** (2018) *Review of factors influencing discomfort glare perception from daylight*. LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America, Volume 14, Issue 3. Pennsylvania State University para IES, Estados Unidos. Link: <https://www.researchgate.net/publication/323350484>

**Pottmann, H.; Asperl, A.; Hofer, M.; Kilian, A.** (2007) *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press, Editorial Bentley Books, Estados Unidos.

**Reinhart, C.F. y Voss K.** (2003) *Monitoring Manual Control of Electric Lighting and Blinds*. Lighting Research and Technology, Volumen 35, Issue 3, Págs 243–260. Society of Light and Lighting, CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers). London, England. Link: <https://pdfs.semanticscholar.org/54bf/c238bef6b17ee250c1c628d497608641ff52.pdf>

**Reinhart, C.F.** (2018) *Daylighting Handbook II: Daylight Simulations and Dynamic Façades*. Edition for editor Ria Stein. Building Technology Press, Cambridge, MA, Massachusetts, Estados Unidos. Link: <http://www.buildingtechnologypress.com/Books.html>

**Reinhart, C.F.; Mardaljevic, J. y Rogers, Z.** (2006) *Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design*. Leukos Magazine, Vol 3, N°1, Pages 7–31. Journal Illuminating Engineering Society (IES). Pennsylvania State University, Estados Unidos Link: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.8133&rep=rep1&type=pdf>

**Rivero, F.** (2017) *Geometría Computacional*. Departamento Matemáticas, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Link: [http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/lico/geome\\_comp/geometria\\_computacional.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/lico/geome_comp/geometria_computacional.pdf)

**Rockcastle, S. y Andersen, M.** (2012) *Dynamic Annual Metrics for Contrast in Daylit Architecture*. Conference SimAUD (Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design), Orlando, EEUU. Link: <https://www.researchgate.net/publication/255682681>

**Rockcastle, S. y Andersen, M.** (2014) *Measuring the dynamics of contrast & daylight variability in architecture: A proof-of-concept methodology*. Building and Environment N° 81, Páginas 320–333. Editorial Elsevier, California. USA. Link: <https://www.researchgate.net/publication/264559293> *Measuring the Dynamics of Contrast Daylight Variability in Architecture A Proof of Concept Methodology*

**Rokicki, W. y Gawell, E.** (2016) *Voronoi Diagrams - Rod Structure Research Models in Architectural and Structural Optimization*. Mazowsze studia regionalne n°19, Analizy i Studia, Polonia. Link: <https://www.researchgate.net/publication/311521487> *Voronoi diagrams - architectural and structural rod structure research model optimization*

**Roger, D.** (2001) *An Introduction to NURBS with Historical Perspective*. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics, Morgan Kaufmann Publishers. Massachusetts, Estados Unidos. Link: <https://www.sciencedirect.com/book/9781558606692/an-introduction-to-nurbs>

**Rogers, Z.** (2006) *Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations In the Sensor Placement Optimization Tool, Development Report and Case Studies*. Architectural Energy Corporation, Daylighting Forum, NWEA (Northwest Energy Efficiency Alliance) Boulder, Colorado, EEUU. Link: <http://www.archenergy.com/SPOT/download.html>

**Rogers, Z. y Goldman, D.** (2006) *Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations*. Sensor Placement Optimization Tool. Architectural Energy Corporation. Boulder, Colorado, Estados Unidos. Link: [http://www.daylightinginnovations.com/system/public\\_assets/original/SPOT\\_Daylight%20Autonomy%20Report.pdf](http://www.daylightinginnovations.com/system/public_assets/original/SPOT_Daylight%20Autonomy%20Report.pdf)

**Roldán, J.** (2016) *Caracterización Geométrica y Lumínica de los Atrios Incorporados en los Edificios de Santiago de Chile*. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas. Madrid, España. Link: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=114655>

**Roldán, J.** (2017) *Daylight performance depending on the atrium geometry conditions within buildings in Santiago de Chile*. Conferencia PLEA -Passive and Low Energy Architecture, Edinburgh, Scotland. Link: [https://plea2017.net/wp-content/themes/plea2017/docs/PLEA2017\\_proceedings\\_volume\\_II.pdf](https://plea2017.net/wp-content/themes/plea2017/docs/PLEA2017_proceedings_volume_II.pdf)

**Ross, D.** (1958) *Papers on Automatic Programming for Numerically Controlled Machine Tools*. Massachusetts Institute of Technology. Department of Electrical Engineering. MIT, Massachusetts, Estados Unidos. Link: [http://bitsavers.informatik.uni-stuttgart.de/pdf/mit/whirlwind/apt/APT\\_Reports\\_Jan58.pdf](http://bitsavers.informatik.uni-stuttgart.de/pdf/mit/whirlwind/apt/APT_Reports_Jan58.pdf)

**Rossi, Z.; Nagy, A. y Schlueter, A.** (2012) *Adaptive distributed robotics for environmental performance, occupant comfort and architectural expression*. International Journal of Architectural Computing, Volumen 10. Gran Bretaña, Reino Unido. Link: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1260/1478-0771.10.3.341>

**Rousari, M.; Pak, M.; Smith, A. y Gill G.** (2013) *Ladybug: A parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design*. Conference Building Simulation. Chicago, USA Link: [http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2013/p\\_2499.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2013/p_2499.pdf)

**Sanchis, F.** (2012) *Metodología de análisis de la geometría métrica espacial: Estudio de las superficies arquitectónicas singulares*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. Link: <https://riUNET.upv.es/handle/10251/34476>

**San Román, F.** (2014) *Arquitectura paramétrico-generativa: La relación entre la metodología proyectual y los resultados formales*. Universidad de Belgrano y Politécnico de Torino, Buenos Aires, Argentina. Link: [https://is-suu.com/facundosanroman/docs/arquitectura\\_parametrico-generativa](https://is-suu.com/facundosanroman/docs/arquitectura_parametrico-generativa)

**Sawyer, A. O.** (2017) *Facade Photometrics: Luminance Distribution Analysis Through Building Skins*. Conference BS (Buildind Simulation). Michigan, Estados Unidos. Link: [www.ibpsa.org/proceedings/BS2017/BS2017\\_105.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2017/BS2017_105.pdf)

**Schumacher, P.** (2008) *Parametricism as Style - Parametricist Manifesto*. Presentado en el Dark Side Club, 11° Bienal de Venecia, Italia. Link: <https://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>

**Schumacher, P.** (2014) *Design Parameters to Parametric Design*. The Routledge Companion for Architecture Design and Practice. Nueva York, EEUU. Link: <https://www.patrikschumacher.com/Texts/Design%20Parameters%20to%20Parametric%20Design.html>

**Schumacher, P.** (2015) *In Defense of Parametricism*. Publicado por Machine Books. Editado por Austin William, New York, Estados Unidos. Link: <https://www.patrikschumacher.com/Texts/In%20Defense%20of%20Parametricism.html>

**Segovia, O. y Dascal, G.** (2000) *Espacio público, participación y ciudadanía*. Ediciones Sur, Santiago de Chile, Chile. Link: [http://www.sitiosur.cl/publicaciones/Coleccion\\_Estudios\\_Sociales/Espacio/espacio.pdf](http://www.sitiosur.cl/publicaciones/Coleccion_Estudios_Sociales/Espacio/espacio.pdf)

**Segura, R.** (2012) *Pieles arquitectónicas: De la fachada a la envolvente*. Revista de Urbanismo y Arquitectura. Red Universitaria de Aprendizaje, RUA N° 7, Universidad Autónoma de México (UNAM), Distrito Federal, México. Link: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/38970/RUA7p28.pdf>

**Shamos, M.** (1978) *Computational Geometry*. Tesis Doctoral, Universidad de Yale, Connecticut, Estados Unidos. Link: <http://euro.ecom.cmu.edu/people/faculty/mshamos/1978ShamosThesis.pdf>

**Skiba, Y.** (2005) *Métodos y Esquemas Numéricos : Un Analisis Computacional*. UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

**Solsona, V.** (2014) *Geometries no euclidianes*. Facultad de Ciencias y Matemáticas. Universidad de Barcelona, España. Link: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/61905>

**Soto, P.** (2017) *Lineamientos sostenibles de iluminación natural aplicados a espacios de estudio de bibliotecas universitarias*. Seminario de Investigación de Arquitectura, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

**Suk, J.Y.; Schiler, M. y Kensek, K.** (2016) *Discomfort Glare Metrics: Investigating their accuracy and consistency in daylight glare evaluation by using human subject study data*. Conference Facade Tectonics World Congress. Los Angeles, Estados Unidos. Link: <https://www.researchgate.net/publication/309350795>

**Suk, J.Y. y Schiler, M.** (2013) *Investigation of Evalglare Software, Daylight Glare Probability and High Dynamic Range Imaging for Daylight Glare Analysis*. Lighting Research and Technology, Vol 45, Issue 4. CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers). London, England. Link: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1477153512458671>

**Tedeschi, A.** (2014) *AAD\_Algorithms-Aided Design. Parametric Strategies Using Grasshopper*. Editorial Le Penseur, Brienza, Italia.

**Tedeschi, A.** (2011) *Parametric Architecture with Grasshopper*. Editorial Le Penseur, Brienza, Italia.

**Terzidis, K.** (2006) *Algorithmic Architecture*. Ediciones Architectural Press, Princeton, Nueva York, Estados Unidos.



**Terzidis, K.** (2003). *Expressive Form*. Ediciones Spon Press, Londres, UK.

**Titchmarsh, E. C.** (1986). *The Theory of the Riemann Zeta Function*. Second revised (Heath-Brown) edition. Oxford University Press. Oxford, Reino Unido, UK.

**Trovato, G.** (2004) *La fachada como lugar en la arquitectura contemporánea*. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

**Turrin, M; Von Buelow, P. y Stouffs, R.** (2011) *Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms*. Advanced Engineering Informatics N° 25. Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034611000577>

**Van Den Wymelenberg, K. y Inanici, M.** (2014). *A critical investigation of common lighting design metrics for predicting human visual comfort in offices with daylight*. Artículo en Revista Leukos N° 10, Volumen 3, páginas 145–164. Link: <https://faculty.washington.edu/inanici/wymelenbergInanici2014.pdf>

**Veas, I.** (2009) *Uso de Herramientas Paramétricas en el Diseño Arquitectónico Responsivo*. Tesis de Investigación para optar al Título de Arquitecto. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile.

**Velasco, R. y Robles, D.** (2011) *Diseño de ecoenvolventes: Modelo para la exploración del diseño y la evaluación de envolventes arquitectónicas para climas tropicales*. Rev. de Arq. 13. 92-105. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Link: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=125121298011>

**Wald, R.** (1984) *General Relativity*. Universidad de Chicago. University Press. Estados Unidos.

**Ward, G.J.** (1994) *The Radiance Lighting Simulation and Rendering System*. Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques, Orlando, Estados Unidos. Link: <http://radsite.lbl.gov/radiance/papers/sg94.1/Siggraph1994a.pdf>

**Wassim, J.** (2013) *Parametric Design for Architecture*. Editorial Laurence King Publishing. Londres, Inglaterra.

**Wienold, J.** (2009) *Dynamic Daylight Glare Evaluation*. IBPSA Conference Building Simulation, Glasgow, Scotland. Link: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09\\_0944\\_951.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0944_951.pdf)

**Wienold, J.** (2009) *Glare analysis and metrics*. Presentación para Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE. Link: [https://www.radiance-online.org/community/workshops/2013-golden-co/wienold\\_glare\\_rad\\_ws2013.pdf](https://www.radiance-online.org/community/workshops/2013-golden-co/wienold_glare_rad_ws2013.pdf)

**Wienold, J. y Christoffersen, J.** (2006) *Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras*. Artículo en Energy and Buildings N° 38, páginas 743–757. Editorial Journal Elsevier. California, Estados Unidos. Link: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.560.2093&rep=rep1&type=pdf>

**Wurtman, R.** (1975) *The effects of the light on the human body*. Scientific American. Link: [https://www.researchgate.net/publication/22010814\\_The\\_Effects\\_of\\_Light\\_on\\_the\\_Human\\_Body](https://www.researchgate.net/publication/22010814_The_Effects_of_Light_on_the_Human_Body)

**Yamin, J.; Rodríguez, R.; Ruiz, A. y Pattini, A.** (2014) *Degree of eye opening: A new discomfort glare indicator*. Building and Environment N° 88, Páginas 142-150 Link: <https://www.researchgate.net/publication/276096836>

**Zomorodian, Z. y Tahsildoost, M.** (2019) *Assessing the effectiveness of dynamic metrics in predicting daylight availability and visual comfort in classrooms.* Magazine Renewable Energy, Elsevier, vol. 134, páginas 669-680. Link: <https://www.researchgate.net/publication/329114442>

## CONFERENCIAS CONSULTADAS

- **ACADIA** (Association for Computer-Aided Design in Architecture in North America).
- **ASCAAD** (Arab Society for Computer Aided Architectural Design).
- **Building Simulation** (International Building Performance Simulation Association).
- **CAADRIA** (Computer Aided Architecture Design Research In Asia).
- **eCAADe** (Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe).
- **IMProVe** (International conference on Innovative Methods in Product Design).
- **PLEA** (Passive and Low Energy Architecture).
- **SIGraDi** (Iberoamerican Society of Digital Graphics).
- **ABS** (Advanced Building Skins).

## CERTIFICACIONES CONSULTADAS

**CES** (2014)

*Certificación de Edificio Sustentable.*

Link: <http://www.certificacionsustentable.cl/>

**LEED** (2014)

*LEED v4 para diseño y construcción de interiores.*

Link: <http://www.spaingb.org/files/LEED%20v4%20ID+C%20ESP.pdf>

**TDRé DA MOP** (2015)

*Términos de Referencia Estandarizados de Control Ambiental y Eficiencia Energética para la Edificación Pública.*

Link: [http://arquitectura.mop.cl/centrodocumental/Documents/TDRé\\_MOP-DA\\_Parte1.pdf](http://arquitectura.mop.cl/centrodocumental/Documents/TDRé_MOP-DA_Parte1.pdf)

## PÁGINAS WEB CONSULTADAS

**Energy Plus Weather** (2019)

*Weather Data Sources.*

Department of Energy's (DOE)

Building Technologies Office (BTO)

National Renewable Energy Laboratory (NREL)

Estados Unidos.

Link: <https://energyplus.net/weather/sources>

**Energy Plus Weather** (2019)

*Tools & Weather Files Sources.*

Ladybug Tools LLC

Estados Unidos.

Link: <https://www.ladybug.tools>

Link: <https://www.ladybug.tools/epwmap/>





FACULTAD DE  
ARQUITECTURA  
Y URBANISMO

UNIVERSIDAD DE CHILE



TESIS DE  
INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE ARQUITECTURA  
Y URBANISMO

UNIVERSIDAD  
DE CHILE

OTOÑO  
2019