

UNIVERSIDAD  
DE CHILE

# Accesibilidad solar en Planificación urbana y Automatización

Propuesta de innovación de instrumentos de planificación urbana  
por medio de diseño algorítmico

Tesis para optar  
al título de Arquitecto

José Ignacio Vilches Maraboli

Profesor guía  
Rodrigo Iván Caimanque Leverone

2021



La conceptualización y realización de este trabajo, no pudo ser posible sin el apoyo de todos quienes formaron parte de esta experiencia.

A mi profesor guía Rodrigo Caimanque por su apoyo y voluntad de guiar esta investigación, a los profesores Palavecino, Jiménez y Fernández por orientar el desarrollo de mi formación como arquitecto.

A mi familia y amigos por representar sólido y permanente apoyo durante todo este largo y a veces tortuoso proceso.

A todos ustedes, gracias.

## Resumen

La relación entre las técnicas de proyección y construcción espaciales, que reconozca la existencia de modelos urbanos condicionados por paradigmas relacionados a la conceptualización del proceso de planificación urbana, el desarrollo histórico como evidencia de las directrices con las que se ha transformado al imagen objetivo del espacio urbano, nos provee de evidencias y conceptos para plantear alternativas a los problemas que aquejan el crecimiento y renovación de nuestras ciudades. Por una parte, se identifican problemáticas espaciales como consecuencia de la pérdida de control por parte de la planificación urbana en la ciudad de Santiago a manos del mercado inmobiliario y carencia en la calidad de los espacios asociados a la participación ciudadana, el cambio climático y la necesidad de reducir el consumo de energía no solo en la construcción del espacio urbano, sino que también los efectos a largo plazo en los que la morfología urbana, establecen la base de la búsqueda de nuevas formas de proyectar en la ciudad, lo que constituye la base de esta investigación.

La presente Tesis corresponde a una propuesta experimental de innovación para los instrumentos de planificación urbana en la definición de la morfología de las edificaciones nuevas emplazadas en contextos urbanizados, mediante una aproximación metodológica que integra procesos de automatización a instrumentos de planificación urbana. Se busca definir un marco teórico y metodológico que permita la implementación de los diseños algorítmicos para proyectar la morfología urbana en áreas sujetas a cambio, integrando el análisis volumétrico de la accesibilidad solar. Por medio de un análisis histórico de la planificación urbana en Chilo, junto con las potencialidades que brindan los alcances actuales de la aplicación de las ciencias de la computación en arquitectura y urbanismo, se evidencian potencialidades de intervención orientadas a un proceso de incremento urbano que cuente con la capacidad potencial de satisfacer diferentes intereses y objetivos de agentes que toman participación en los procesos de planificación.

## Motivaciones

El punto de origen de esta investigación es el resultado de la experimentación de los últimos cuatro talleres de diseño arquitectónico del programa de licenciatura en arquitectura. Estos, los cuales orientaron la búsqueda por dar respuesta a problemas espaciales a la optimización del espacio mínimo necesario, la renovación urbana en contextos de conservación patrimonial y la búsqueda de dar respuesta al problema del aumento demográfico proyectado para las próximas décadas en contextos centralizados y altamente densificados.

Junto con esto, la experiencia de las problemáticas espaciales presentes en la ciudad de Santiago y cómo la forma en la que se estructura, la ciudad condiciona la calidad de vida urbana ha sido tema de interés muy marcado dentro de mi carrera. El control por parte del mercado en procesos que no son de origen económico como la planificación urbana extrapolada por parte del sector administrativo hacia manos de agentes privados formó parte constante como temática durante la formación en FAU, lo que significó no solamente un costo económico y de accesibilidad desequilibrado a la ciudad, sino que también la conceptualización de cómo la forma en la que se configura influye en la realización individual de las personas en zonas urbanas.

El proceso que converge en esta propuesta de innovación involucra el cuestionamiento de cómo se experimenta el quehacer arquitectónico dentro del mercado. Sin la experiencia práctica tanto dentro como fuera del país, el espacio mental para cuestionar los instrumentos que rigen por sobre las libertades creativas de quienes proyectan no hubiese tenido lugar.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>8</b>
1.1	Problema de Investigación	
1.2	Preguntas de Investigación	
1.3	Hipótesis	
1.4	Objetivos	11
<b>2</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>12</b>
2.1	Debates sobre la planificación urbana	13
2.2	Relación entre instrumentos de planificación, técnicas de proyección y accesibilidad Solar	18
2.3	Procesos de automatización en arquitectura y urbanismo	23
2.3.1	Computación y arquitectura	
2.3.2	Procesos de automatización	25
2.3.3	Algoritmos generativos, definiciones y contribuciones a la planificación urbana.	26
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>32</b>
3.1	Planificación con automatización en un caso de estudio	
3.1.1	Caso de estudio	
3.1.2	Antecedentes normativos	34
3.2	Conceptos por utilizar para la programación	35
3.2.1	Matemática de Vectores	35
3.2.2	Algoritmos y lenguajes de programación	38
3.2.3	Licencias de código abierto	39
3.2.4	Blender	
3.2.5	Python	40
<b>4</b>	<b>Propuesta experimental</b>	<b>42</b>
4.1	Definición del escenario a evaluar	43
4.2	Etapas de ejecución	45
4.2.1	Recolección de información	
4.2.2	Proceso de modelado	49
<b>5</b>	<b>Análisis y resultados</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>70</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>
	<b>Anexo</b>	<b>78</b>

# Introducción

## Introducción

En Chile, el desarrollo inmobiliario y crecimiento urbano del último tiempo trajo como consecuencia que la construcción en altura genere áreas de sombras que afectan no solo el valor de los predios vecinos, sino que también el confort térmico y lumínico de las edificaciones afectadas. Esto implica la necesidad de construir morfologías urbanas con las consideraciones adecuadas de acceso solar para lograr el aprovechamiento de las oportunidades que ofrece el captar la energía solar (Daher, 2013; Hacherm, Athienitis & Fazio, 2014; Okeil, 2010).

Para el año 2018, se estimaba que alrededor del 55% de la población mundial habitaba en áreas urbanas, esperando que esta cifra aumente a 68% para el 2050 (Organización de las Naciones Unidas, 2018), mientras tanto, en Chile, el Censo de 2017 catastró un 87,8% de habitantes viviendo en zonas urbanas (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018). Históricamente la planificación ha sido la herramienta para controlar las condiciones que definen la construcción del espacio. El, dentro de la manera en la que se ha transformado la planificación del crecimiento y renovación urbana evidencia cómo las voluntades presentes en los diferentes momentos históricos no han dado respuesta a las problemáticas propias del desarrollo de las ciudades. El conflicto presente entre la forma orgánica en que crece la ciudad, condicionada por la interacción e influencia de las voluntades de los agentes participantes y la proyección del espacio que definen los instrumentos de planificación, condicionados por las voluntades de quienes planifican la ciudad se interpreta como una paradoja dentro de la planificación urbana (Sabatini y Soler, 1995).

El planteamiento de un conflicto entre la imagen de la ciudad compacta y la implementación de una planificación urbana centralizada en las restricciones morfológicas orientadas bajo lógicas de mercado se plantea como una forma deficiente de implementar planificación urbana. Esta forma de abandono por parte de los instrumentos y el sistema administrativo del país se evidencia de diferentes maneras dentro de los debates sobre la planificación urbana.

Tanto la creación como modificación de leyes y normativas se realiza de manera permanente durante el desarrollo de la ciudad. La reciente Ley de Aportes al financiamiento e implementación de Espacios Públicos constituye un marco para avanzar hacia un desarrollo urbano equilibrado, sin embargo, carece de instrumentos complementarios a los instrumentos de planificación actuales para poder transformarse en un real aporte a la planificación, ya que permitir reemplazar la cesión de terrenos para espacios públicos por pagos relacionados a impactos proporcionales a la densidad en función del avalúo fiscal y la superficie predial es insuficiente (Vicuña, Pumarino y Urbina, 2020). Esto evidencia la perpetuación de un sistema de búsqueda constante por mejorar los elementos que conforman la planificación urbana sin contar con la presencia de mecanismos que respondan a la complejidad del desarrollo y crecimiento urbano.

El análisis crítico entre los cambios normativos y la planificación urbana desde la perspectiva de sistemas de proyección espacial automatizados podría significar una serie de potencialidades que beneficien la construcción del espacio público y la vida urbana. Entendiendo la relación entre el ritmo vertiginoso en el que se desarrolla la sociedad y la calidad del espacio público condicionan la calidad de vida, hace necesarios cambios importantes en el concepto, producción y gestión de las ciudades (Parraguez, Rodríguez y Santander, 2006).

Es posible identificar cómo el reducir las capacidades restrictivas de la planificación urbana da lugar a la aparición de externalidades negativas en la forma urbana construida. Es posible encontrar evidencias del proceso que reduce las capacidades restrictivas dentro de los instrumentos normativos, el segundo capítulo de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones define la manera en la que se relacionan las edificaciones nuevas con su contexto inmediato, donde la intención de preservación de la condición histórica de la ciudad queda sujeta al criterio de la Dirección de Obras, lo que representa un potencial espacio para conflictos de interés. Por otro lado, entrega libertad en caso de no contar con elementos de planificación territorial vigentes, lo que representa otra potencialidad para la formación de externalidades negativas consecuencia de un crecimiento urbano desmedido.

El valor sobre el avance en metodologías de automatización a lo largo del desarrollo de las técnicas de proyección permite la simulación del espacio en tres dimensiones. Esto otorga la accesibilidad en términos de interpretación de la normativa a través de la matemática de vectores, lo que permitiría describir la relación entre elementos espaciales por medio de modelos paramétricos por asociaciones del contexto local, los cuales, una vez ensamblados, pueden utilizarse para obtener alternativas de diseño en espacios temporales relativamente cortos (Schneider, Koltsova y Schmitt, 2011).

Dentro de la relación entre las dimensiones que definen el espacio urbano, la capacidad de abstraer de los elementos presentes ajenos a la dimensión física del espacio de manera cuantificable permitiría integrarlos en el proceso de planificación, previniendo la aparición de externalidades negativas. De esta manera la implementación de diseño algorítmico dentro del proceso de planificación permitiría explorar diversos escenarios de crecimiento urbano, otorgando transversalidad y transparencia de la imagen objetivo del espacio urbano.

Esta técnica de proyección permite plantear la posibilidad de potenciales escenarios en los que la definición de criterios se podría determinar por diferentes agentes de la construcción del espacio, canalizados y materializados por el quehacer de los arquitectos. Esto podría representar una personalización de la planificación urbana, donde la escala de intervención de planificadores urbano podría trascender los alcances actuales y dar respuesta a los problemas relacionados a la densificación y compacidad de la ciudad.

El propósito de la presente investigación consiste en una propuesta metodológica, la cual considera elementos presentes en el análisis e interpretación de la planificación urbana, junto con elementos normativos presentes en los instrumentos de planificación actuales y metodologías de proyección automatizadas. De esta manera, por medio de la búsqueda de optimización de la interacción de los diferentes agentes interesados en la formación del espacio, se espera presentar una alternativa política y experimental de innovación para los instrumentos de planificación que logre proyectar alternativas óptimas de diseño.

## 1.1 Problema de investigación

Se sostiene que existe una falta de control sobre el espacio construido condicionado por la planificación urbana, lo que impide la realización de los objetivos hacia los que se orientan los ideales del desarrollo, de los cuales, la calidad de vida y el desarrollo individual se perjudican a partir de la mercantilización del desarrollo urbano, a través del aprovechamiento de la normativa existente.

## 1.2 Preguntas de investigación

Para lograr conceptualizar la implementación de una técnica alternativa que permita innovar parte de los instrumentos de planificación urbana es necesario plantear en primera instancia, cual es la posibilidad de automatizar estos instrumentos.

Mientras que en segundo lugar es necesario cuestionar de que manera relacionar el análisis, diseño y planificación de la morfología urbana por medio de instrumentos automatizados representa una ventaja para el proceso de planificación urbana.

## 1.3 Hipótesis

La implementación de técnicas de proyección contemporáneas de automatización y análisis espacial como alternativa a instrumentos vigentes en el proceso de planificación urbana, permitiría integrar dimensiones que forman parte de la proyección de un espacio más allá de los alcances actuales, logrando definiciones morfológicas dinámicas y óptimas que permitan visualizar y transparentar posibilidades de crecimiento dentro del proceso de desarrollo urbano.

## 1.4 Objetivos

El primer objetivo de esta investigación es establecer la manera en la que se integra la arquitectura y automatización, buscando potencialidades de innovación que permitan prevenir la existencia de externalidades negativas en el espacio urbano, basado en el análisis sobre el debate de la planificación urbana en Chile.

El segundo objetivo de esta investigación consiste en analizar el potencial de crecimiento morfológico en un contexto de renovación urbana orientado para optimizar la accesibilidad solar del contexto inmediato, para de esta manera plantear potencialidades de la implementación de técnicas automatizadas en el proceso de planificación.

# Marco Teórico

# Marco Teórico

## 2.1 Debates sobre la planificación urbana

El desarrollo de la planificación urbana previo a la definición los instrumentos de planificación que conocemos hasta hoy tuvo como hito la contratación de Karl Brünner por parte del Estado, desde este momento se definirán los cimientos de un proceso de pensamiento crítico respecto al desarrollo de la ciudad de Santiago la cual contaba con alrededor de 600.000 habitantes (Fig. 1). De acuerdo con Gross (2006) es posible definir cuatro períodos en los que la planificación urbana tomó forma hasta la promulgación de la actual Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

Durante el primer periodo (1925 – 1938), con la fundación del Instituto Nacional de Urbanismo, el cual tomo parte en la creación de la Ley General de Construcciones y Urbanización, posterior al terremoto de Talca de 1928. Este período está, marcado por los Congresos Panamericanos de Arquitectura y Urbanismo junto con los Congresos Internaciones de Arquitectura Moderna, los cuales buscaron dar solución a los problemas de higiene ambiental en los que las ciudades se encontraban envueltos. De esta manera el urbanismo se entendía por parte de Brünner como una ciencia que abarcaba sistemáticamente todos los problemas, influencias y relaciones entre los diferentes agentes urbanos, por lo que era necesario que los proyectos de urbanismo aparezcan como una creación compacta y orgánica, respaldados por la intervención pública para imponer restricciones al individualismo económico y asegurar la cohesión social.

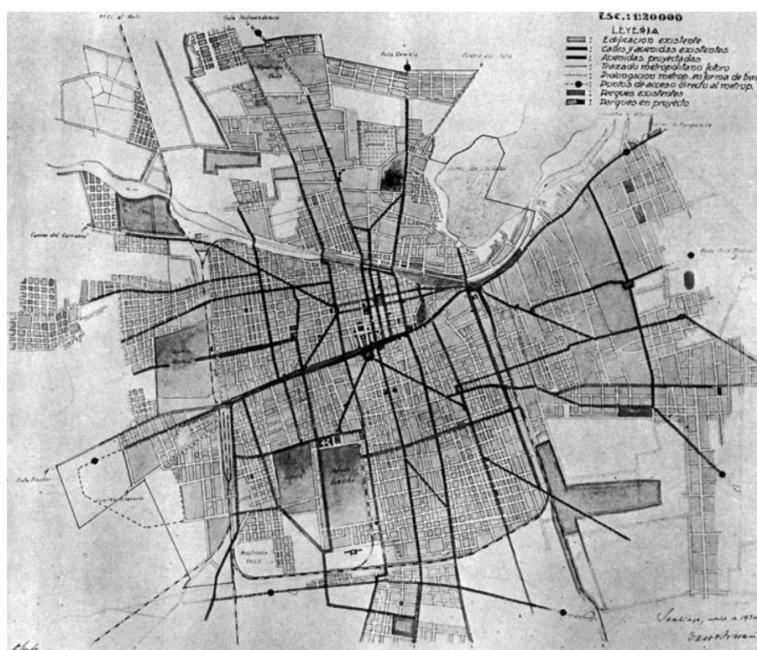


Fig. 1: Área urbana Santiago 1930  
Fuente: Gross, 2008

Un segundo período corresponde al proyecto de la ciudad funcional (1938 – 1964), donde el crecimiento urbano conserva la perspectiva funcionalista del momento histórico anterior, pero buscando urbanizar con sistemas de organización jerárquicos que integraran la dimensión ambiental de manera funcional considerando iluminación, visibilidad, aislamiento, ventilación como un conjunto de factores bioclimáticos imprescindibles en el crecimiento urbano. Fue durante este período donde se formuló el Plan Regulador Intercomunal de Santiago (P.R.I.S. 1960), con esto el paradigma funcionalista entendía que el adecuado manejo del proceso de metropolización del Gran Santiago sería decisivo en el desarrollo social y económico del país (Parrocha y Pavez, 2016). Sin embargo, la utilización de terrenos rurales para los programas de vivienda social evidenció la poca efectividad en el establecimiento de los límites urbanos, considerada una falla fundamental en la planificación de este momento histórico.

Durante el siguiente período histórico (1964 – 1973), el Estado asume por medio de medidas redistributivas y la readecuación de la propiedad, la tarea de la modernización durante un período económico en auge. Los modelos de base científica pasaron a segundo plano en función a dar solución a los problemas de vivienda, dado a que el crecimiento demográfico que superó los 2.500.000 habitantes. Esta situación llevó a la creación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, el cual tenía como principal tarea evitar el crecimiento urbano desmedido, dando paso a la edificación en altura tanto en áreas centrales como periféricas.



Fig. 2: Modelo Remodelación San Borja  
Fuente: Gross, 2008

El período del crecimiento urbano mercantilista (1973 – 1990) estuvo marcado por no tener la capacidad para responder a las demandas sociales, lo que se tradujo en un aumento de los problemas derivados del crecimiento urbano sin restricciones como la contaminación hídrica y atmosférica. El Estado se reservó el derecho de invertir en tareas fuera de dotar de infraestructura, dejando en manos de particulares la edificación de vivienda y equipamiento. Durante este período se implementa el Plan Intercomunal de Santiago, basado en la Política Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU, 1979), la cual estableció que la falta de suelo urbano es consecuencia de la falta de concordancia entre las normas técnicas y jurídicas vigentes, junto con la condición de oferta y demanda del mercado, por lo que sería necesario un sistema flexible con mínima intervención estatal, apoyado en normas técnicas genéricas.



Fig. 3: Eje cívico Paseo Bulnes 1967  
Fuente: Gross, 2008



Fig. 4: Eje cívico Paseo Bulnes 2015  
Fuente: Elaboración propia

Posterior a este período, en 1992 el D.S. 47 reemplazó por completo la Ordenanza General de Construcciones y Urbanización por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, la cual continúa en vigencia. A pesar de los esfuerzos por pensar y ordenar la ciudad, existe una relación entre los cambios sociales y la necesidad de contener el desarrollo de estos cambios. Históricamente la planificación ha sido la herramienta para controlar las condiciones que definen el espacio urbano, reconocer períodos dentro de la manera en la que se ha desarrollado la planificación y el crecimiento urbanos, entendiéndose como líneas independientes dentro del proceso de desarrollo urbano.

La mercantilización del desarrollo urbano sumado a la ausencia de normas urbanísticas dio paso permitió desde la década de 1990 que el Área Metropolitana de Santiago experimentara diferentes procesos de densificación con diferentes densidades, escalas e impactos, comunas como Estación Central y Santiago, las densificaciones residenciales pueden alcanzar hasta 15.000 hab/ha y 10.000 hab/ha respectivamente, (Vicuña M, 2017).

El planteamiento de un conflicto entre la imagen de ciudad compacta que se proyectaba por parte de los instrumentos de planificación en contraposición a las lógicas orgánicas condicionadas por las económicas en las que se basa el desarrollo urbano con una mirada mercantilista, demuestra que el desarrollo urbano mirado únicamente desde la dimensión relativa al orden morfológico no tuvo la capacidad para responder ante las eventualidad que no pertenecen a los objetivos propios de la planificación. (Sabatini y Soler, 1995).

El crecimiento urbano evidencia por diversos escenarios la presencia de rasgos estructurales negativos, la densificación residencial y la alta densidad del parque automotriz representan su tendencia principal. Lo que se encuentra orientado por lógicas privadas o sectoriales traen como consecuencia la degradación de la habitabilidad urbana, centralismo en las actividades, crecimiento en baja densidad en la periferia, precariedad y baja calidad de los espacios públicos. Considerando que la densificación residencial correctamente ejecutada brinda espacios públicos de calidad, con la capacidad de promover la peatonalidad y la proximidad de personas y actividades, resulta cuestionable no considerar que la falta de control por parte de los instrumentos de planificación que ha dado paso a la existencia de estas externalidades negativas. Durante el proceso de desarrollo de la planificación urbana en Chile, el control sobre los procesos urbanos se limitó a nivel de barrios y sectores, el control se centró en la microforma urbana. Lo que no otorga la capacidad de control sobre la evolución de la ciudad como conjunto (Sabatino y soler, 1995; Vicuña, Pumarino y Urbina, 2020).

La intensidad con la que las sociedades contemporáneas se transforman, desbordadas por la evolución constante tiene como consecuencia la mala interpretación de cómo cambian los objetos que utilizamos, la manera de habitar los espacios y ciudades que habitamos. Esta dificultad para percibir los cambios que experimenta el desarrollo urbano evidencia la necesidad de contar con cambios en la manera en la que se planifican las ciudades, donde es necesaria la búsqueda de caminos que permitan compatibilizar los objetivos de competitividad con los de mejoramiento de calidad de vida de los habitantes. Caminos que permitan negociar constructivamente con las empresas para alcanzar acuerdos de interés común, equilibrando sus intereses económicos con los intereses socioculturales de los distintos grupos de población que cohabitan un espacio. (Parraguez L, Rodríguez G y Santander M, 2006).

El mecanismo por el cual se buscaba dar respuesta a los impactos generados por la densificación residencial fue la cesión gratuita de suelo para espacio público, implementado exclusivamente en urbanizaciones para extensión urbana mediante exigencia de superficies para circulaciones, áreas verdes y equipamientos. El vacío que evidenciaba la disponibilidad únicamente de un mecanismo dio paso a la Ley de Aportes al Espacio Público (LAEP, ley 20.958, Diario Oficial 15 de octubre 2016), la cual tiene como objetivo que los proyectos de densificación aporten al espacio público y mitiguen los impactos de movilidad urbana, esto evidencia la constante evaluación y cambio de los procesos de planificación urbana. La búsqueda por contar con mecanismos que aporten a las construcciones de ciudades equilibradas subyace sobre la función social de la propiedad inmueble, en respuesta a la interrogante de cuánto tiene que hacerse cargo el privado sobre los impactos que genera. Sin embargo los porcentajes de aportes no son suficientes para financiar los proyectos de mitigación, evidenciando la necesidad de mecanismos complementarios al proceso de planificación urbana, los cuales tienden a ser reactivos en lugar de propositivos (Vicuña M, 2020).

Interpretar el desarrollo del urbanismo por medio del análisis científico, analizando las características que configuran el espacio a través de la cuantificación de conceptos se ha planteado desde la dimensión que considera el cambio climático como factor perteneciente a la planificación urbana. Entendiendo que la importancia y necesidad de considerar el cambio climático como elemento determinante del desarrollo de las ciudades no es un paradigma contemporáneo, sino que es un elemento perteneciente a la planificación urbana en su totalidad. Es por esto que la Política Energética de Chile 2050 (Ministerio de Energía, 2015) establece como metas la incorporación de estándares OCDE de construcción eficiente, junto con la Estrategia Nacional de Construcción Sustentable (MINVU, 2018), la cual tiene como objetivo establecer estándares y buenas prácticas de diseño, construcción y operación de viviendas, buscando mejorar el desempeño ambiental por medio de la implementación de criterios de sustentabilidad. Para el sector residencial, la eficiencia en el uso de la energía depende principalmente de cuatro factores: diseño de las edificaciones, eficiencia de los sistemas de calefacción, comportamiento del usuario y geometría urbana, siendo esta última el objeto de estudio de la presente investigación, al impactar directamente sobre el acceso solar de una edificación, influyendo en la disponibilidad de energía y luz natural en fachadas. (Barton e Irrázabal, 2016; Baker & Steemers, 2000).

El reconocimiento de las condiciones climáticas locales de un territorio permite abordar la cuestión energética en la planificación urbana y ambiental, particularmente las demandas y ofertas energéticas necesarias para el condicionamiento climático de las ciudades (Cárdenas y Morales, 2019). La accesibilidad solar es la capacidad de un bien inmueble para recibir los rayos de luz solar directa de manera continua, sin obstrucciones de otra propiedad, ya sean estas edificaciones, vegetación u otros objetos, es por esto necesario controlar el grado de fenestración y aperturas presentes en las

edificaciones para evitar sobrecalentamiento y molestia visual en verano, junto con reducir el requerimiento energético para calefacción e iluminación en invierno (Ratti, Baker y Steemers, 2005; Capeluto y Ocha, 2017).

La complejidad del dotar de un acceso solar adecuado no depende únicamente de regulaciones que establezcan zonas con una densidad de edificación proporcional al sistema de actividades en las que se encuentran, definan alturas máximas de construcción, distanciamientos mínimos entre tipos de edificaciones con la misma agrupación, restricciones de vegetación o compensaciones a propietarios que se vean afectados por sombreamientos. Puesto que la interacción de diferentes variables en un instante dado condiciona cada caso particular, complejizando el proceso aún más si el objetivo es asegurar un mínimo estándar cuantificable, tal como una mínima cantidad de horas de exposición solar o garantizar la incidencia solar mínima en fachadas (Merino, Hernández, Vermeulen y García, 2021).

Es posible entonces, entender a la planificación urbana como un elemento reactivo con diferentes grados de control frente a los eventos y requerimientos experimentados a lo largo de los períodos históricos-urbanos, la cual, actualmente dirigida por lógicas de mercado debido a la falta de control de los instrumentos que la definen, otorga espacio a una serie de problemas relacionados al crecimiento y renovación urbana. Es por tanto necesario fortalecer el rol de los instrumentos del proceso de planificación urbana para establecer los límites de la geometría urbana, en función de lograr los objetivos de las políticas energéticas, la eficiencia de los recursos energéticos y evitar la disminución de la calidad de vida urbana durante los procesos de renovación urbana.

## **2.2 Relación entre instrumentos de planificación, técnicas de proyección y accesibilidad solar.**

Garantizar el acceso solar es tarea de planificadores urbanos, quienes dejan de lado los costos asociados a calefacción e iluminación de las edificaciones al determinar las regulaciones y disposiciones geométricas de los edificios (Knowles, 2003). Al ignorar las condiciones favorables de disponibilidad solar le dan valor al crecimiento por sobre el mantenimiento (ibid). Es posible entender una relación entre la técnica de proyección por la cual se implementan los instrumentos de planificación y la capacidad de regulación que estos cuentan para el desarrollo de la morfología urbana. Dentro del proceso de planificación urbana, los Planes Reguladores Comunes junto con la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones determinan normas urbanísticas unidimensionales que contribuyen a la definición de las restricciones morfológicas, tal es el caso del coeficiente de constructibilidad, la altura máxima o los distanciamientos a los deslindes, las cuales no aseguran el resguardo solar adecuado para los edificios (Saldías, 2016).

Del mismo modo el instrumento normativo restringe la morfología basada en la proyección bidimensional, como es el caso de la rasante. Al momento de pensar en las posibilidades volumétricas urbanísticas, podemos destacar al arquitecto Hugh Ferriss, quien realiza estas teorizaciones por medio de una serie de dibujos volumétricos en 1922 durante la investigación “Study for a maximum mass permitted by the 1916 New York Zoning Law” (Fig. 5, Koolhaas, 2004). Estas formas de visualización son implementadas en Chile durante 1979, para determinar el volumen teórico máximo por medio de la proyección de una recta inclinada imaginaria que define la envolvente teórica dentro de la cual puede desarrollarse un proyecto de edificación. La rasante se origina desde nivel de suelo u otro punto estipulado en el Plan Regulador, proyectándose hacia el centro del predio con un ángulo que depende del lugar de emplazamiento del proyecto de construcción. Actualmente existen tres valores para el ángulo de la rasante, los cuales dependen del emplazamiento geográfico del proyecto: zona norte, 80 grados sexagesimales; zona centro, 70 grados; y zona sur 60 grados (MINVU, 2018).

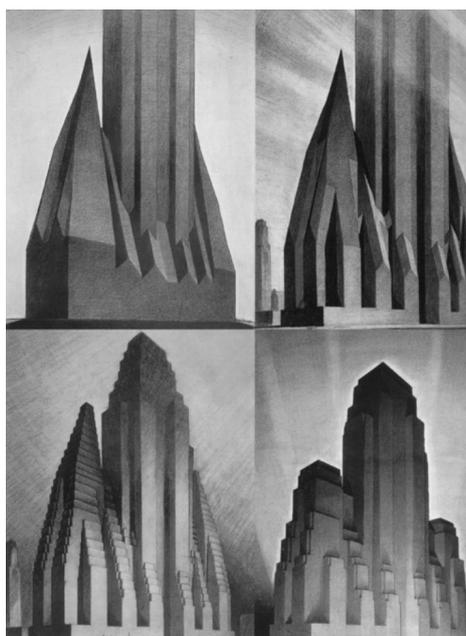


Fig. 5: Study for a maximum mass permitted by the 1916 New York Zoning Law  
Fuente: Koolhaas, 2004

La búsqueda por identificar la morfología urbana que condicionan las rasantes, la accesibilidad solar consecuencia de la implementación de este instrumento de planificación y la imagen ciudad que se proyecta a partir de la maximización de la construcción permitida por los volúmenes teóricos se identifica en un estudio similar al realizado por Ferriss, en 1999, las ventajas que otorgó trabajar por medio del dibujo asistido por computadoras, la investigación “Consecuencias de la espacialización en modeladores digitales, de la información de normas y usos del área de influencia de la Vega Central de Santiago” (Fig. 6) donde se exploró un área mayor y en simultáneo como estudio de morfologías urbanas consecuencia de la implementación de las rasantes.

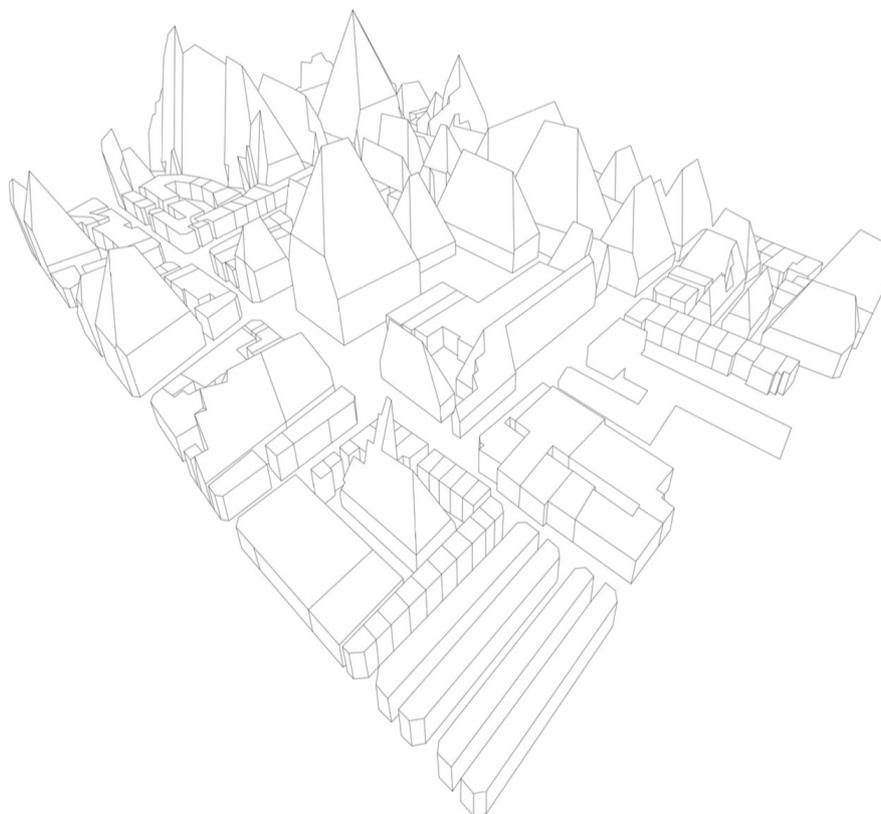


Fig. 6: Volumetría máxima en área de estudio  
Fuente: Brugnoli, 1999

La inclinación condicionada por la localización geográfica representa el intento por lograr un aprovechamiento del acceso solar, ya que, al alejarse de la línea del Ecuador, disminuye la altura angular del sol medida con respecto del ángulo horizontal. Esto tuvo como consecuencia que el desarrollo urbano por parte de los proyectistas que buscaban maximizar el volumen al generar superficies paralelas a los planos proyectados por las rasantes en los pisos superiores. Este proceso tuvo lugar a lo largo de todo el país, lo que generó un conflicto con la imagen de ciudad que buscaban los planificadores urbanos, por lo que en 2001 se incorporó el artículo 2.6.11 en la OGUC, el que entrega la posibilidad de presentar un estudio comparativo de la sombra que proyecta el edificio, el cual permite sobrepasar el límite previamente impuesto por la rasante por medio de fachadas verticales, pero sin sobrepasar la altura generada por el volumen teórico que proyectan las rasantes. La implementación de las rasantes y posteriormente los estudios de sombra, al no considerar desde su implementación las consecuencias morfológicas urbanas puede ser interpretada como un síntoma de las profundas contradicciones de un sistema teorizado en aulas de economía sin la validación en la realidad, transformando una normativa de carácter arquitectónico y urbano bajo una mirada completamente condicionada por un criterio económico, la maximización de la rentabilidad (Carrasco, 2020).

Los métodos para garantizar la accesibilidad a la luz solar se dividen en dos grupos: el primero corresponde al enfoque en el desempeño, donde se le da importancia a algún requerimiento, ya sean horas mínimas de asoleamiento, cantidad de radiación solar, entre otros. El segundo grupo corresponde a un enfoque descriptivo, donde la geometría de los edificios se define por regular su altura. En Chile, de manera complementaria a lo establecido por la OGUC, existen recomendaciones de asoleamiento para proyectos de vivienda, con la finalidad de obtener un mayor porcentaje de asoleamiento en viviendas y mejorarlas condiciones de confort, mientras que es posible encontrar distintos grados de requerimientos de accesibilidad solar en otros países. En Buenos Aires, Argentina, está el mínimo garantizar dos horas de luz directa durante el solsticio de invierno, mientras que en el Reino Unido el “Building Research Establishment” define necesario contar con al menos dos horas de sol el 21 de marzo (Equinoccio de primavera). En Canadá las regulaciones consideran también los espacios públicos (parques, pasajes, calles, etc), y en Holanda el “Ducht Building Code” exige 3 hora de asoleamiento directo en la fachada principal de las edificaciones entre el 21 de marzo y 21 de septiembre. En Australia, Sidney la exigencia es de dos horas entre las 09:00 y 15:00 hrs el 21 de diciembre, y en China, Changchung requiere mínimo dos horas de asoleamiento en invierno (Merino, Hernández, Vermeulen y García, 2021; Darmon, 2018).

Merino, Hernández, Vermeulen y García (2001) proponen la implementación de la metodología de “líneas de sección” la cual, teorizada en 2005 por Capeluto, Yezioro, Bleiberg y Shaviv (2005) basada en el concepto de envolvente solar, permite obtener hasta diez veces más energía solar en fachadas norte durante el período invernal, esta metodología, proyecta la línea definida por el ángulo de inclinación del sol sobre el horizonte para un espacio de tiempo requerido, definiendo en concepto de “Ángulo de Horizonte Urbano” (Fig. 8, UHA, por sus siglas en inglés). Donde el UHA es el ángulo obtenido desde una altura  $h$ , hasta la cima de los edificios contrarios ( $H$ ) separados por una calle de ancho  $W$ . Esto define la línea de sección que corresponde al UHA que permite el acceso directo de la luz en el punto  $P$ . por lo que corresponde a una versión alternativa, en principio similar al concepto de rasante.

Este instrumento de planificación alternativo evidencia la falta de adaptabilidad del criterio de inclinación de las rasantes, ya que las longitudes geográficas que abarcan resultan ser demasiado extensas, por lo que este criterio no se adapta a las características de la trayectoria solar a lo largo del país, por lo que esta herramienta cuenta con el potencial de aportar a la planificación de ciudades más equilibradas, sin embargo, la técnica por la cual se implementa, al ser un procedimiento genérico tiene como resultado la formación de envolventes solares similares en áreas urbanas (Fig. 9).

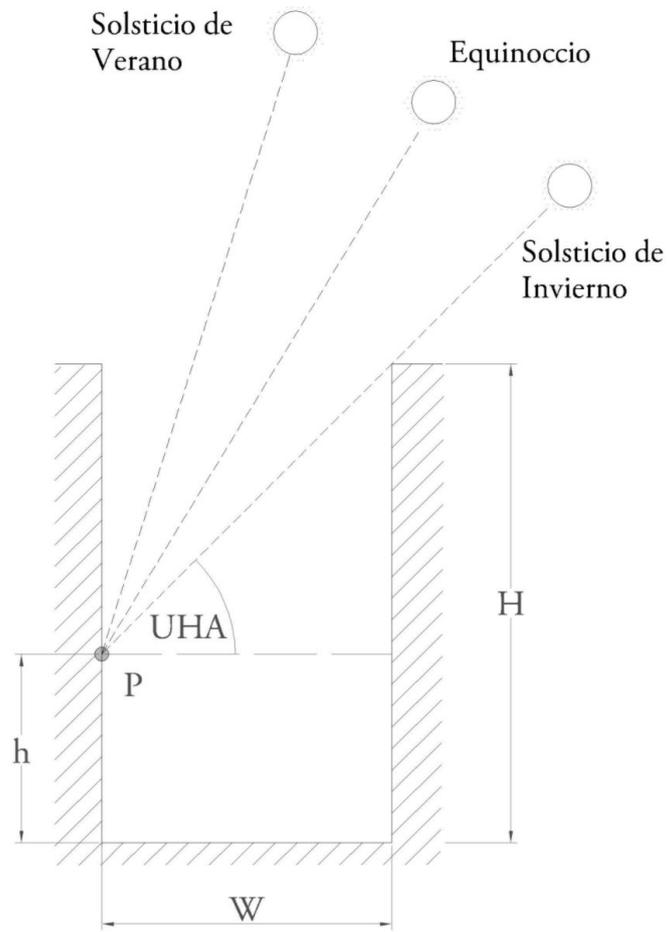


Fig. 7: Volumetría máxima en área de estudio  
Fuente: Brugnoli, 1999

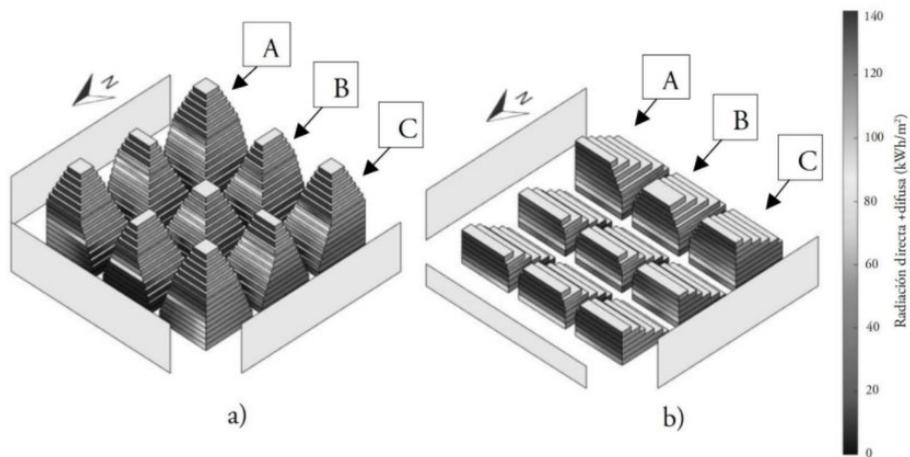


Fig. 8: Volumetría máxima en área de estudio  
Fuente: Brugnoli, 1999

## 2.3 Procesos de automatización en arquitectura y urbanismo

### 2.3.1 Computación y arquitectura

En paralelo a los cambios experimentados durante el desarrollo de la planificación urbana en Chile se desarrollaron las herramientas que condicionarían la forma en la que se define el quehacer de quienes planifican. Con la aplicación de las ciencias de la computación en función del diseño desde la aparición de los computadores programables a finales de la primera mitad de Siglo XX, arquitectos y diseñadores han buscado maneras de mejorar el proceso de diseño, las primeras aproximaciones se realizaron con la aparición del dibujo asistido por computadoras (Fig. 10, CAD por sus siglas en inglés).



Fig. 9: Desarrollo del software CAD en MIT  
Fuente: Winsberg, 2008

Poco después de inicio de la década de 1970, el flujo del desarrollo de la búsqueda por mejorar el proceso de diseño reorientó el enfoque hacia al potencial generativo de los computadores para analizar y resolver ecuaciones complejas. Estas investigaciones se enfocaron en la distribución de programas en planta a través de diagramas de burbujas y generadores espaciales. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones sobre alternativas de diseño disminuyeron posterior a la aparición de AutoCAD (Weisberg, 2008).

Durante la década posterior los programas de modelamiento tridimensional, producción gráfica y BIM reorientaron el enfoque del desarrollo de las herramientas digitales como soporte a procesos de diseño. Durante la última década, con la problemática del cambio climático y la existencia de ciudades altamente densificadas, aproximaciones al diseño generativo aparecen como alternativa con el potencial para dar respuesta a las preguntas resultantes del desarrollo urbano. Las aproximaciones en diseño arquitectónico generativo proponen la automatización de la orientación de

plantas predefinidas en función de la accesibilidad visual y la proximidad a nodos de circulación determinados por los encuentros entre transporte público y circulación peatonal. Del mismo modo es posible ver la aplicación de procesos automatizados de diseño en etapas tempranas de proyectos de densificación residencial (Fig. 10) con el objetivo de optimizar la distribución de volúmenes en función de la circulación (Holland N,2011; Singh, Devadutt y Pallavi, 2015).

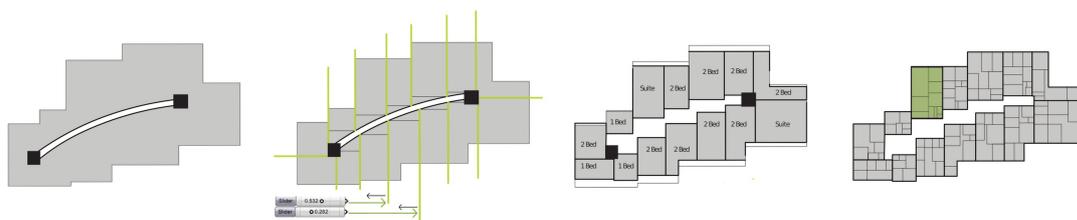


Fig. 10: Generación de orientación espacial en planta  
Fuente: Holland, 2011

Aproximaciones más recientes plantean la implementación de algoritmos de múltiples objetivos “Multiple Objective Generative Algorithm”, una metodología de automatización inspirada en la evolución de las especies para simular procesos morfológicos evolutivos. Este proceso de diseño permite evaluar y diseñar en base a grandes cantidades de información bioclimática para dar solución a la pregunta sobre cuál es el volumen máximo edificable en función de la accesibilidad solar (Fig. 11). Comienza con la definición del predio y delimita limitaciones morfológicas como distanciamiento y proximidad entre células volumétricas (Voxel) que representan el volumen mínimo necesario para construir un espacio habitable, para posteriormente realizar un análisis a modo de barrido por parte de la accesibilidad solar calculando la cantidad de luz directa en ventanas de su contexto inmediato.

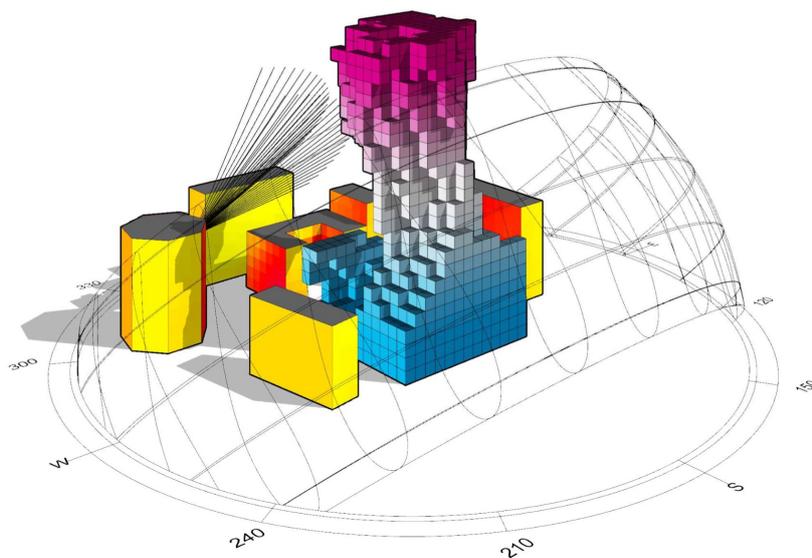


Fig. 11: Generación morfológica por medio de voxeles  
Fuente: Darmon, 2018

### 2.3.2 Procesos de automatización

Desde la perspectiva que buscaba el potencial generativo de los computadores, se gestó otra metodología de proyección espacial, la que posteriormente se definió como diseño paramétrico, el que permite un desarrollo recursivo del proceso de diseño (Fig. 12). Esta aproximación al proceso de diseño permite a quienes proyectan no solamente encontrar soluciones geométricas, sino que definir el sistema que subyace y define la manera en que el proceso de diseño toma lugar. Debido a la capacidad de análisis de las técnicas contemporáneas de los actuales procesos de diseño, estos necesitan una mayor carga de trabajo inicial para lograr una optimización de los resultados y la maximización de alternativas en etapas tempranas de proyecto (Darmon, 2018).

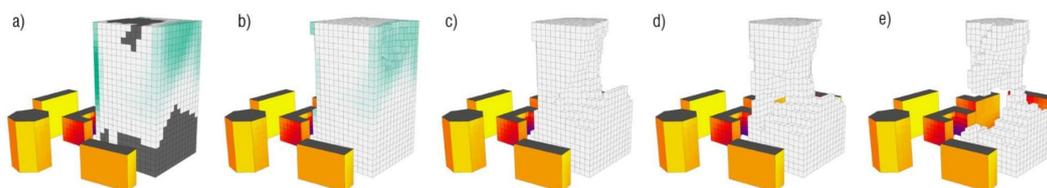


Fig. 12: Alternativas de diseño a partir de metodologías sustractivas  
Fuente: Darmon, 2018

En lugar de diseñar, las alternativas de diseño se generan a partir de la definición de variables, parámetros y funciones. La versatilidad que entrega esta técnica de trabajo comienza con la posibilidad de redefinir estos criterios. Durante el proceso de diseño de las técnicas tradicionales, de desarrollo lineal, desde la conceptualización del problema hasta la creación de soluciones han estado basadas en la experiencia y los criterios de quienes diseñan. Sin embargo, las metodologías de diseño basadas en la definición de parámetros permiten generar alternativas de diseño independiente del alcance que puede brindar la experiencia y percepción personal de quien diseña (Fig. 13). Esta aproximación, sin ser un reemplazo de los procesos mencionados, podría generar un complemento potencial de alto valor al momento de tomar decisiones de planificación.

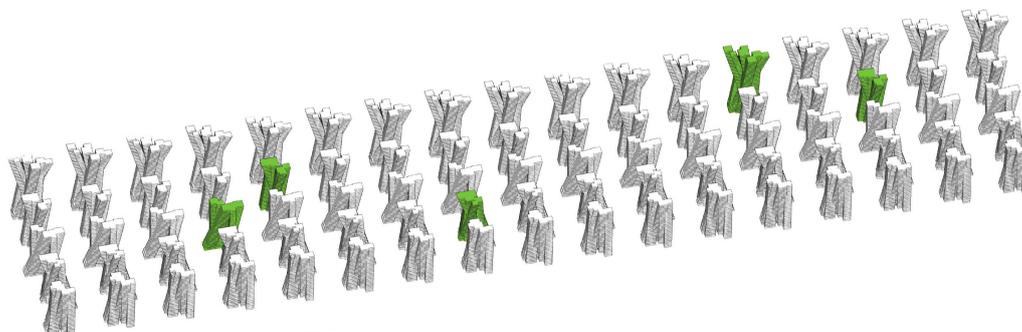


Fig. 13: Alternativas de diseño a partir de algoritmos generativos  
Fuente: Holand, 2011

### 2.3.3 Algoritmos generativos, definiciones y contribuciones a la planificación urbana

El siguiente paso en cuanto a metodologías de automatización, ha sido denominado Diseño Generativo, Diseño Algorítmico o Diseño Evolutivo, el cual implementa algoritmos para realizar optimización de múltiples objetivos. Es un mecanismo optimizador por medio de ecuaciones complejas donde “El proceso es más importante que el resultado. Cuando el resultado oriente el proceso solo podemos ir donde ya hemos estado. Si el proceso orienta al resultado, es posible que no sepamos para donde vamos, pero sabemos que queremos llegar a él” (Mau, 1998). Esta frase define la esencia del diseño algorítmico, el potencial para generar y controlar complejidades de diseño por sobre las capacidades humanas. Un conjunto de reglas y restricciones asociativas pueden llevar a la generación de geometrías impredecibles pero coherentes con los parámetros establecidos (Tadeschi, 2014).

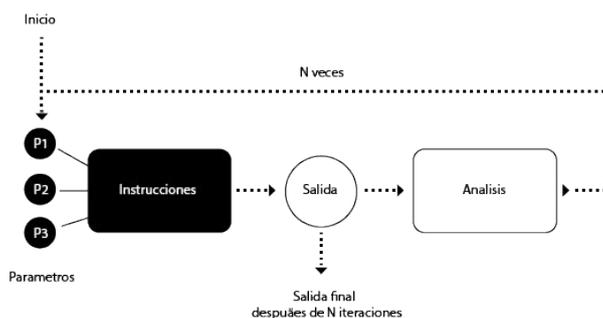


Fig. 14: Lógica de diseño orientado por algoritmos  
Fuente: Tadeschi, 2014

La modificación de parámetros, variables y funciones se realiza de manera automática, inspirada en la manera en la que evolucionan las especies. Considerando un punto inicial, el cual contiene los criterios que interactúan durante el proceso de diseño (Fig. 15). Parámetros, Variables y funciones trabajan en conjunto como lineamientos para definir diferentes generaciones de alternativas de diseño. De esta manera, una vez definidos los integrantes de la generación inicial, los algoritmos de optimización de múltiples objetivos producen nuevas generaciones a partir de la cruce, evaluación y selección de manera cíclica hasta encontrar variables de diseño que cumplan con las metas establecidas en un principio (Darmon I, 2018).

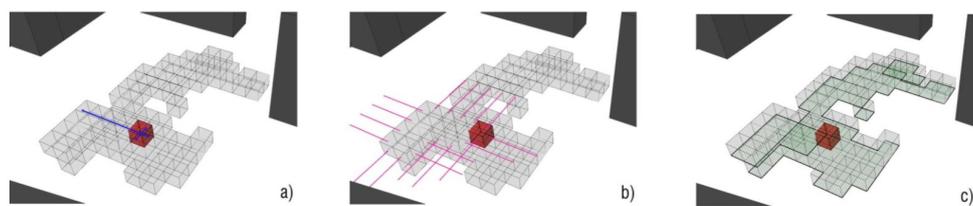


Fig. 15: Análisis espaciales de diseño algorítmico de optimización de múltiples objetivos  
Fuente: Tadeschi, 2014

El algoritmo propuesto en “Voxel Computational Morphogenesis in urban Context” (Fig. 16) propone la utilización de algoritmos de optimización de múltiples objetivos, define la metodología consiste de ocho etapas, donde se definen los elementos preexistentes en el primer paso, para luego proceder a los bloques iterativos de eliminación o agregación de voxeles, la evaluación de las condiciones determina el paso a una nueva generación de muestras, la que, al ser evaluada de manera positiva da término al proceso evolutivo.



Fig. 16: Esquema de algoritmo de optimización de múltiples objetivos  
 Fuente: Darmon, 2018

De manera alternativa, un proceso por el cual es posible implementar diseño algorítmico es el de la envolvente solar inversa. Para determinar la envolvente solar es necesario conocer el valor del azimut y la elevación solar en horas determinadas, la distancia entre los límites y las fachadas que rodean el predio. Este proceso resulta tedioso y sujeto a errores, desde la aparición de software CAD se han desarrollado herramientas que generan envolventes solares en dos categorías, las que utilizan puntos discretos y los que definen geometría. Estos métodos computacionales se basan en cuatro categorías: Planos de corte, Planos de intersección, intersección de volúmenes y sustracción de volúmenes. La metodología por implementar durante este estudio corresponde a la cuarta categoría, de eliminación de volúmenes en función de puntos de interés específicos para determinar la accesibilidad a la luz solar (De Luca, Dogan y Sepúlveda, 2021).

De esta manera en “Reverse Solar Envelope Method” se plantea una metodología en principio similar a la anterior (Fig. 17), centrando el foco de análisis únicamente en las ventanas presentes en las edificaciones que rodean al predio de estudio, con un algoritmo de desarrollo lineal para determinar la morfología óptima. Determinada en cinco etapas, desde la definición de las fachadas que deberían recibir iluminación natural, generación de rayos de sol, selección de los rayos de sol, análisis y generación de la envolvente solar.

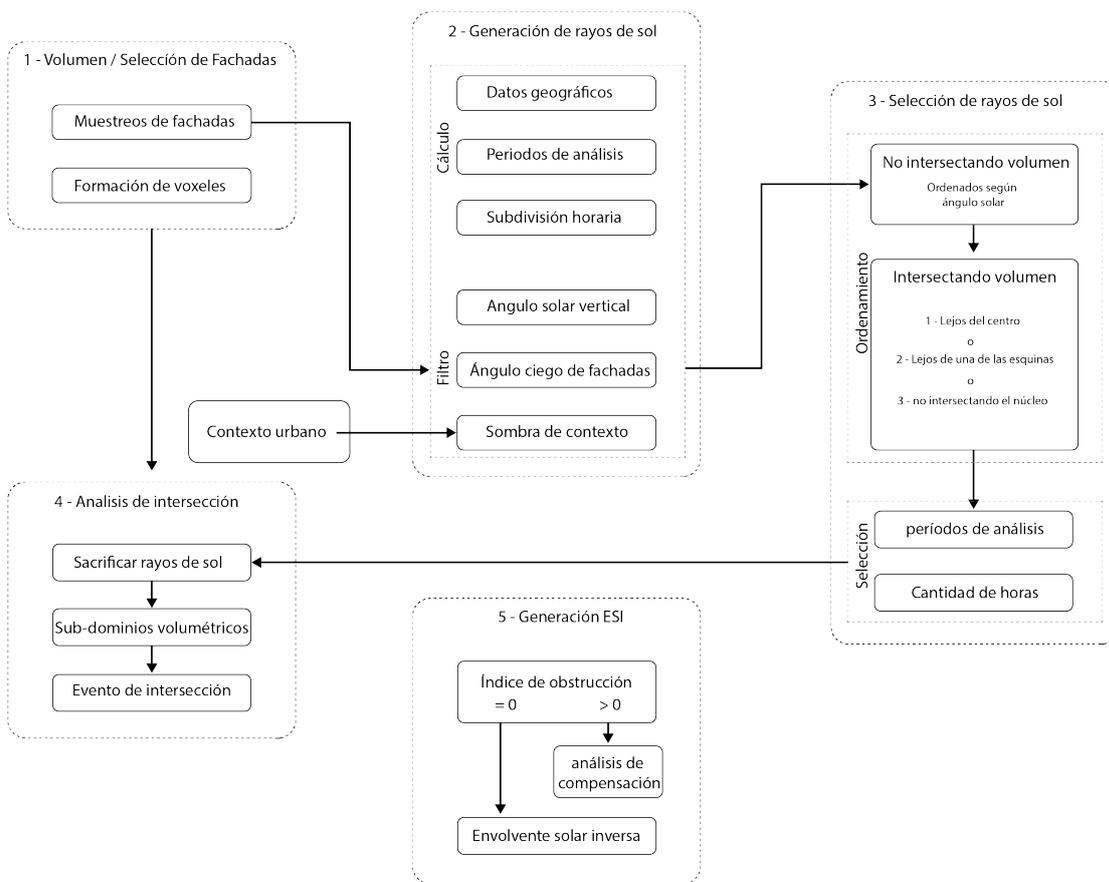


Fig. 17: Esquema de algoritmo de Envolvente solar inversa  
Fuente: De Luca, 2020

Esta metodología permite de manera alternativa una aproximación morfológica que no considera la accesibilidad solar de los voxees, sino que se enfoca en la accesibilidad en el contexto, lo que no representa una restricción tan ajustada sobre las libertades creativas de quienes proyectan, sin embargo la investigación de De Luca, Dogan y Sepúlveda (2021) propone la implementación de núcleos de conexión vertical dentro de los predios simulados (Fig. 18), lo que deriva en morfologías complejas pero no factibles de construir en un contexto con la actividad sísmica que existe en Chile.

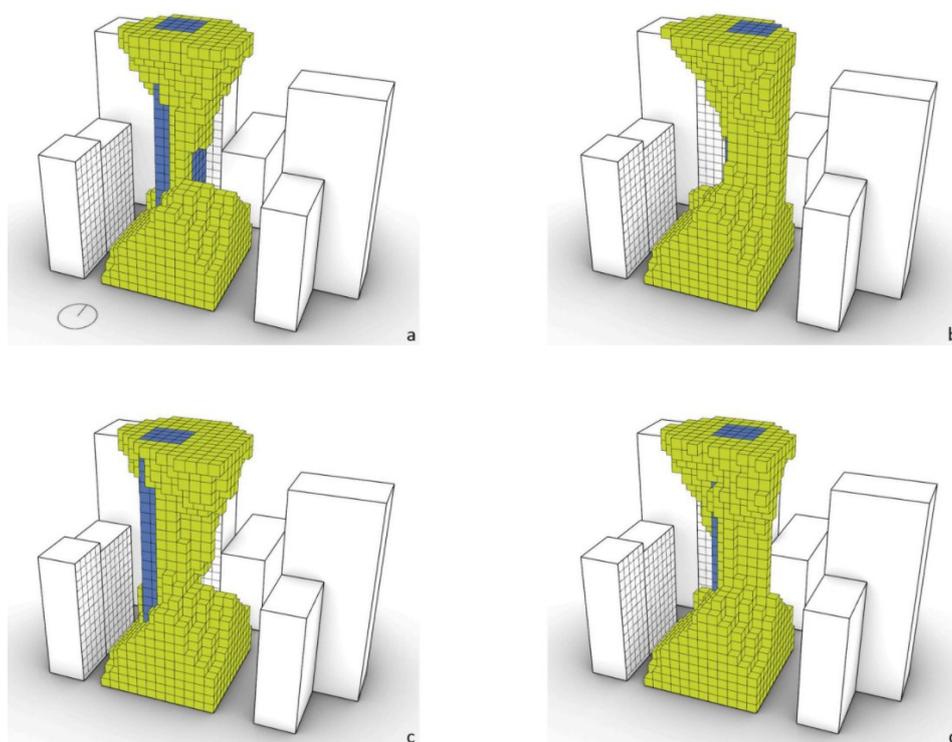


Fig. 18: Morfogénesis condicionada por ejes de circulación vertical  
Fuente: De Luca, 2020

De esta manera, es posible entender que durante el desarrollo y crecimiento urbano en Chile las problemáticas asociadas al crecimiento demográfico y dotación de vivienda sobrepasaron los alcances restrictivos de los instrumentos de planificación urbana, lo que desencadenó en una serie de externalidades negativas producto del crecimiento urbano vertiginoso. Junto con esto es posible entender que las medidas implementadas y propuestas para mejorar los instrumentos encargados de complementar y compensar estas externalidades siguen formulándose basadas en la misma técnica de producción geométrica, lo que sumado a los avances en técnicas de proyección asistidas por computadoras representa un potencial de innovación en función de la accesibilidad solar, de generar un instrumento alternativo que permita restringir el crecimiento urbano desmedido y garantizar el acceso a la luz natural en los contextos que rodean los predios a construir.

La metodología por implementar durante este estudio corresponde a la cuarta categoría, de eliminación de volúmenes en función de puntos de interés específicos para determinar la accesibilidad a la luz solar por medio de la generación de envolventes solares inversas. Esto permitiría dar enfoque a puntos de interés, los que a diferencia de las metodologías teorizadas que se enfocan en garantizar la accesibilidad solar en ventanas, permitiría enfocar la accesibilidad solar en el espacio público. Esta aproximación, sin representar un potencial reemplazo de alguno de los instrumentos de planificación actuales, podría generar un complemento potencial de alto valor al momento de tomar decisiones de planificación.

Es posible entender entonces que la planificación urbana como proceso, al experimentar enfrentar las necesidades contemporáneas de los diferentes períodos históricos perdió el control a manos del mercado, gestor principal del crecimiento urbano. La densificación desmedida dio paso a la generación de externalidades negativas, degradación del espacio público y condiciones de habitabilidad de los inmuebles afectados por el crecimiento en altura, en parte, consecuencia de los cambios experimentados con fines estéticos posterior a la improvisada implementación de la normativa de rasantes, y al permitir sobrepasar los límites determinados por esta. De esta manera, entender la planificación urbana como un proceso de desarrollo permanente, con potencialidades de mejoramiento constante queda evidenciado en la aparición cíclica de modificaciones que buscan mejorar las condiciones en que se determina el crecimiento urbano. Sin embargo, la naturaleza reactiva de estas medidas y la dificultad para comprender prever sus consecuencias de manera clara por parte de la ciudadanía, implica avanzar en técnicas que modifiquen la lentitud de los procesos de modificación, así como avanzar en transparencia respecto a los potenciales escenarios de cambio urbano. Junto con esto, frente a las evidentes demandas relacionadas al crecimiento demográfico y cambio climático, se hace evidente la necesidad de contar con instrumentos de planificación propositivos con herramientas de visualización dinámicas, tema del cual toma parte la presente investigación. Las potencialidades que entrega las metodologías que buscan la correcta integración de la accesibilidad solar junto con las oportunidades que otorgan la producción de material técnico y gráfico por parte del diseño algorítmico determinan los parámetros en los que se plantea el desarrollo del ejercicio propuesto para dar respuesta a las preguntas de investigación.

# Metodología

## Metodología

Para responder a las preguntas planteadas durante esta investigación se propuso experimentar la implementación de diseño algorítmico para lograr una alternativa a instrumentos de planificación. De esta manera este capítulo se divide en tres etapas, en primer lugar, se definen el caso de estudio, seguido de las definiciones de programación utilizadas para el desarrollo del experimento, finalmente se describe el experimento y sus bloques de ejecución.

### 3.1 Planificación con automatización en un caso de estudio

#### 3.1.1 Caso de estudio

Para lograr definir una alternativa a instrumentos de planificación con la capacidad de dar respuesta a los cuestionamientos planteados por la crítica a la planificación urbana, se definió como caso de estudio la intersección de las avenidas Lira y Diez de Julio Huamachuco en la zona sur de la comuna de Santiago, sector con interesantes condiciones urbanas: presión inmobiliaria desde el centro de la comuna; diversidad normativa y programática al contar con manzanas de uso residencial, comercial y educacional (Fig. 19).

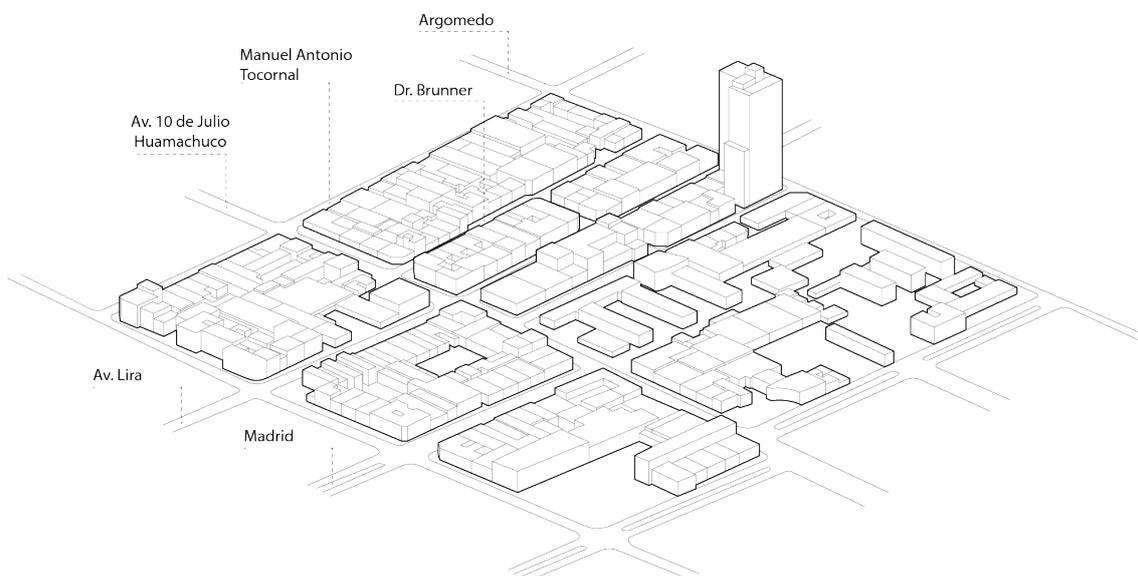


Fig. 19: Área de estudio  
Fuente: elaboración propia

Durante el último proceso de modificación al Plan Regulador Comunal de Santiago, en junio de 2021 la Ilustre Municipalidad de Santiago tomó la determinación de suspender el proceso debido a urgencia sanitaria consecuencia de la pandemia de Sars-COVID-19. Sin embargo, el momento en el que se detuvo el proceso fue posterior a la consulta ciudadana, lo que implica que la propuesta de modificación realizada se considerará como el escenario base normativo para simular la implementación de un instrumento alternativo para la interpretación y modificación de las normativas del plan regulador.

De esta manera, el escenario corresponde al de renovación urbana por medio de densificación residencial, ubicado en el sector que rodea la intersección de la calle Lira y Av. 10 de Julio. Este sector de la comuna se encuentra contenido en dos zonas del plan regulador, edificaciones que no están declaradas inmuebles de conservación histórica, con alturas entre 7 y 65 metros. El programa predominante en Av. 10 de Julio y Lira es el comercial, por lo que la cantidad de población flotante durante horas hábiles es otro factor necesario para considerar. En paralelo, la calle Doctor Brunner tiene como programa principal vivienda de fachada continua, del mismo modo la relación de lleno y vacío en los predios relacionados al uso comercial es predominantemente lleno, mientras que la relación en los predios con programa de vivienda cuenta con patios interiores de mayor proporción. Estas condiciones corresponden a las características morfológicas a considerar en la propuesta.

Dentro de esta simulación de condiciones se considerarán junto con las morfológicas en relación con el programa existente, un conjunto de intenciones que representan los intereses en conflicto durante el proceso de renovación urbana abstraídos del marco teórico representados en tres grupos. El primero corresponde a los propietarios de los locales comerciales, quienes se oponen a la pérdida de la accesibilidad solar en la calzada sur de la avenida 10 de Julio, los residentes de la manzana ubicada entre las calles Manuel Antonio Tocornal y Doctor Brunner, quienes se oponen a la aparición de edificación en altura como el edificio ubicado en la intersección de Lira con Argomedo, por último se encuentran los intereses de los agentes inmobiliarios, quienes buscan la maximización de la superficie construible dentro del sector por medio de edificación en altura con agrupamiento aislado.

El caso a evaluar corresponderá a la fusión de los cuatro predios ubicados al norte de la manzana ubicada entre Lira y Doctor Brunner, al norte de Av. 10 de Julio (Fig. 20).

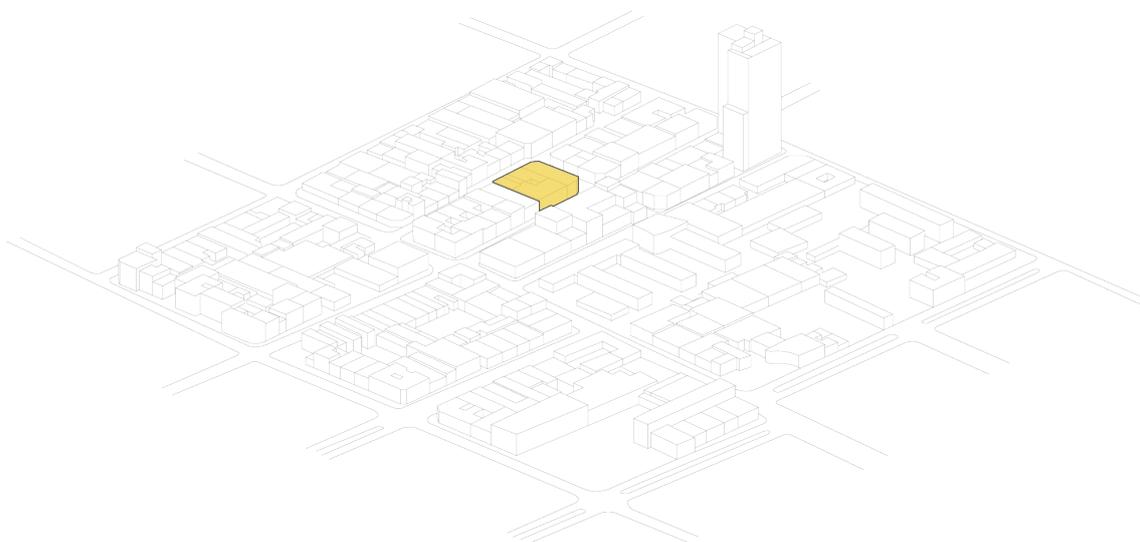


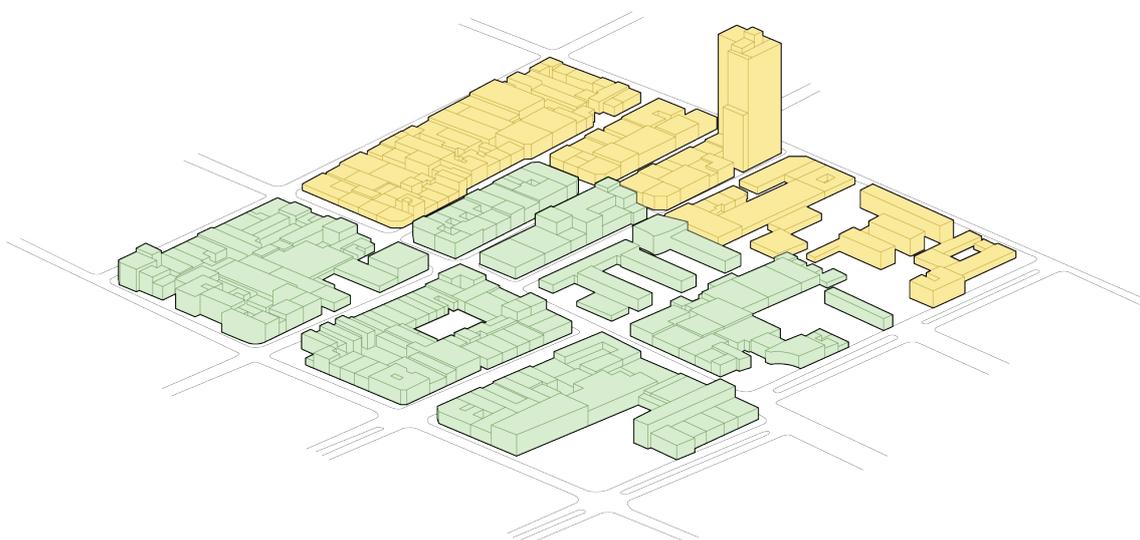
Fig. 20: Predios seleccionados para la simulación  
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2 Antecedentes normativos

De esta manera, en función de la accesibilidad solar, el caso de estudio para este experimento se consideró dentro de la zonificación que restringe la altura de mayor manera, para de esta manera, definir alternativas morfológicas que respondan de manera orgánica a las condiciones morfológicas y geográficas particulares, considerando que la definición de altura máxima con la técnica actual implica una proyección paralela al plano en el que se puede definir la ocupación de suelo una vez aplicados los distanciamientos previamente definidos, los cuales se consideraron para la simulación, ya que responden a lógicas de privacidad entre edificaciones (Fig. 21).

#### Zona B

1	Superficie subdivisión predial mínima		150	
2	Coeficiente de ocupación de suelo	Vivienda y/o educación	0,7	
		Otros usos	1,0	
3	Coeficiente de ocupación de pisos superiores	Vivienda y/o educación	0,7	
		Otros usos	Hasta 7m	1,0
			sobre 7m	0,7
4	Coeficiente máximo de constructibilidad	Vivienda	3,6	
		Otros usos	5,5	
5	Densidad máxima (Hab/Há)		-	
6	Sistema de agrupamiento		Continuo	
7	Altura máxima (m)		22,5	
8	Distanciamientos	Línea oficial y/o edificación (m)	-	
		Deslinde posterior y laterales (m)	-	



#### Zona E9

1	Superficie subdivisión predial mínima		150	
2	Coeficiente de ocupación de suelo	Vivienda y/o educación	0,7	
		Otros usos	1,0	
3	Coeficiente de ocupación de pisos superiores	Vivienda y/o educación	0,7	
		Otros usos	Hasta 7m	1,0
			sobre 7m	0,7
4	Coeficiente máximo de constructibilidad	Vivienda	3,6	
		Otros usos	5,5	
5	Densidad máxima (Hab/Há)		1.140	
6	Sistema de agrupamiento		Aislado Pareado Continuo	
7	Altura máxima (m)		14	
8	Distanciamientos	Línea oficial y/o edificación (m)	5	
		Deslinde posterior y laterales (m)	5	

Fig. 21: Zonificación y cuadro normativo según PRC de Santiago  
Fuente: Elaboración propia

## 3.2 Conceptos por utilizar para la programación

### 3.2.1 Matemática de vectores

Aproximarse a la tipología por medio de matemática de vectores implicó trabajar con su descripción y como su relación permite definir elementos espaciales en diferentes dimensiones (Rajaa I, 2008). Un vector representa cantidad dirección y longitud, sin embargo, en un sistema de coordenadas tridimensionales los vectores se representan por un conjunto de tres números reales de la siguiente manera:

$$v = \langle a_1, a_2, a_3 \rangle$$

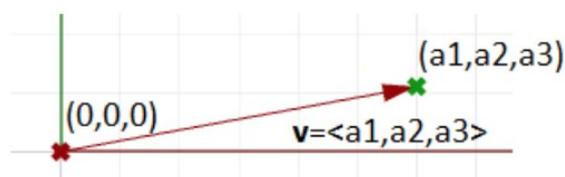


Fig. 22: Representación de vectores en un plano de dos dimensiones  
Fuente: Rajaa, 2008

De manera tal que entendiendo un vector  $v = \langle a_1, a_1, a_3 \rangle$  donde todos los segmentos de líneas desde un punto A  $(x, y, z)$ , hasta un punto B  $(x+a_1, y+a_2, z+a_3)$  son representaciones del vector v.

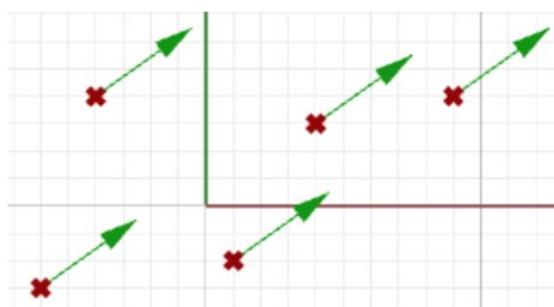


Fig. 23: Vector v representado en un espacio de dos dimensiones  
Fuente: Rajaa, 2008

Puntos y vectores son conceptos diferentes en programación, mientras que los vectores representan cantidad, dirección y longitud, un punto es la representación de la localización dentro del sistema de coordenadas, la diferencia entre estos conceptos se puede representar con la diferencia ente el norte como dirección (vector) y el polo norte como ubicación (punto). La versatilidad de los vectores radica en las operaciones que se pueden realizar con ellos, es posible escalar, sumar, extraer, multiplicar y por ende,

formular ecuaciones que definan su relación. Esta metodología de representación permite la definición de líneas, planos y volúmenes en el espacio.

La manera de determinar una línea en el espacio tridimensional es posible si se conoce el vector que define la dirección de la línea y un punto perteneciente a esta, entonces es posible determinar otro punto en la línea utilizando vectores de la siguiente manera:

L: línea

$$V = \langle a, b, c \rangle$$

Q = (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) Punto posicionado en la línea

P = (x, y, z) Cualquier punto contenido en la línea

Conociendo que

$$P = Q + a \quad -(1)$$

$$A = t * v \quad -(2)$$

A partir de 1 y 2:

$$P = Q + t * v \quad -(3)$$

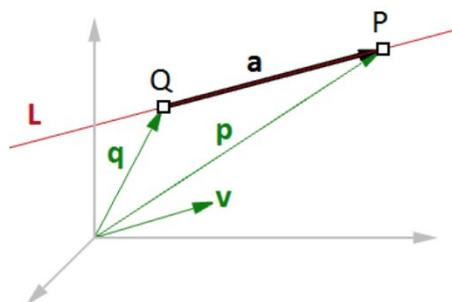


Fig. 24: Representación de una línea a partir de dos puntos  
Fuente: Rajaa, 2008

Sin embargo, es posible escribir (3) de la siguiente manera:

$$\langle x, y, z \rangle = \langle x_0, y_0, z_0 \rangle + \langle t * a, t * b, t * c \rangle$$

$$\langle x, y, z \rangle \Rightarrow \langle x_0 + t * a, y_0 + t * b, z_0 + t * c \rangle$$

Entonces:

$$x = x_0 + t * a$$

$$y = y_0 + t * b$$

$$z = z_0 + t * c$$

Lo que es equivalente a:

$$P = Q + t * v$$

Dado un punto  $Q$  y una dirección  $v$  en una línea, cualquier punto  $P$  perteneciente a la línea puede ser calculado usando la ecuación de vectores de la línea  $P = Q + t \cdot v$  donde  $t$  es un número dado:

De manera similar es posible determinar planos a partir de tres puntos, normales a partir de la definición de un vector perpendicular a un plano y volúmenes a partir de la relación entre planos. Del mismo modo es posible determinar curvas y superficies paramétricas, suponiendo que, dado un recorrido determinado, el cual se recorre por completo durante una hora, si se registra la posición en cada minuto, entonces es posible mapear el recorrido conectando la posición de los 60 puntos registrados.

En general es posible representar la posición  $x,y,z$  de una curva paramétrica en términos de un parámetro  $t$  de la siguiente manera:

$$x = x(t)$$

$$y = y(t)$$

$$z = z(t)$$

Donde  $t$  es un rango de números reales.

Un parámetro en una curva representa la posición de un punto en la curva, dentro de un dominio determinado por dos puntos, normalmente referidos como  $t_0$  y  $t_1$ , de manera tal que una curva (1) puede existir en un espacio tridimensional dentro del dominio que la define.

Existe una manera para determinar líneas en base a polinomios, los cuales consisten en colecciones de puntos, NURBS o Non-Uniform Rational Basis Splines son una representación de curvas con una capacidad de edición altamente intuitiva, esta metodología de representación permite definir valores de peso a los puntos de control, lo que permite modificar la geometría de la curva a voluntad. Esta metodología de análisis numérico permite representar superficies simples, compuestas por la intersección de planos y también la representación de superficies complejas compuestas por la interpolación de splines, del mismo modo que permite generar geometrías complejas a partir de puntos de control (Rajaa, 2008).

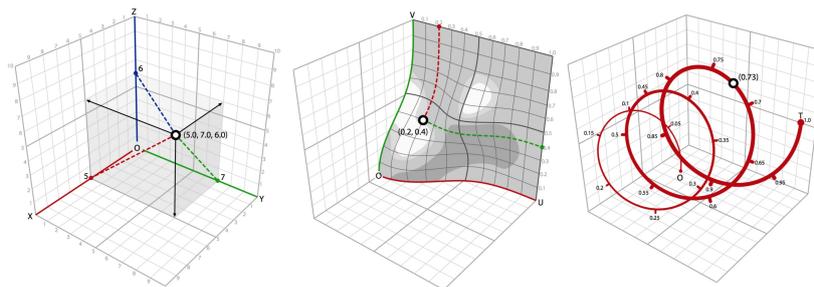


Fig. 25: Representaciones geométricas en un espacio de tres dimensiones  
Fuente: Rajaa, 2008

### 3.2.2 Algoritmos y lenguajes de programación

Los algoritmos son procedimientos usados para obtener una respuesta a una pregunta, o para producir tareas particulares por medio de un listado finito de instrucciones básicas y bien definidas. Siguiendo la lógica de dividir problemas en conjuntos de pasos simples los cuales pueden ser fácilmente calculados. Sin embargo, es necesaria la correcta descripción de las instrucciones a ejecutar y la definición de conjunto de elementos iniciales que se pueden diferenciar por tipos y cantidades. Proveer de las condiciones iniciales de manera correcta da paso a la generación de resultados apropiados.

La ejecución de algoritmos se realiza a través de editores, los cuales pueden ser programas independientes o formar parte de programas como Rhinoceros 3D, Maya, 3DsMax o AutoCAD, los algoritmos consisten en diferentes clases, los algoritmos que resultan en números se denominan procesos computacionales, mientras que un algoritmo que generan “sí o no” se denominan procesos de decisión. Es posible que los algoritmos resulten en geometrías, de esta manera es posible representar modelos geométricos no solo por medio del dibujo, sino que por la definición de algoritmos escritos en lenguajes de programación específicos tales como AutoListp en AutoCAD, Rhinoscript en Rhinoceros. MEL en Maya o ser ejecutados por medio de lenguajes trans-plataforma como Python. Lo que implica que el diseño algorítmico necesita un editor y un medio de representación tradicional (Tadeschi, 2018).

La metodología seleccionada para el desarrollo de esta investigación consideró el uso de Python como lenguaje y Blender como herramienta de proyección y modelado en tres dimensiones, ambas alternativas cuentan con licencias de código abierto, lo que me permitió plantear una alternativa de innovación que no requiera una inversión mayor en cuanto a las herramientas para el cálculo y proyección.

### Lenguajes de programación y software de proyección 3D

Para poder implementar la propuesta de innovación al instrumento que define el volumen teórico máximo por medio de rasantes es necesario contar con un lenguaje de programación por el cual escribir el algoritmo y un programa en el cual ejecutarlo. Dentro de la oferta de software es posible diferenciar dos grandes ramas, programas de licencia propietaria, en los cuales es necesario adquirir o suscribir una licencia y los programas de licencia de uso público o software libre, los que ofrecen acceso a la información que configura el programa independiente si es necesario adquirir el programa. En ambas categorías existe la posibilidad de acceder a la información que construye el programa por medio de la documentación.

### 3.2.3 Licencias de código abierto

En programación, el término Open Source o Código Abierto refiere a códigos que ofrecen la posibilidad de ser modificados y redistribuidos, a diferencia de las licencias propietarias, los sistemas basados en código abierto son modelos descentralizados que fomentan la colaboración abierta (Reymon E, 2001). Este tipo de licencia no solamente permite trabajar con herramientas gratuitas para el desarrollo de nuevos instrumentos que innoven parte del proceso de planificación urbana, sino que también cuenta con el potencial para crear software especializado o la posibilidad de transparentar la herramienta por la cual se realizan los cálculos.

### 3.2.4 Blender y Blender API

Blender (Fig. 26) es un programa de modelado y creación gráfica, cuenta con herramientas integradas para el cálculo y simulaciones físicas, renderizado y edición de medios. Publicado en 1994, mantenido por Blender Foundation, encargada de asegurar que el código se mantenga bajo la licencia GLP-2, lo que permite la modificación y publicación modificada para fines personales y/o comerciales. Está escrito con los lenguajes C++ y Python, al igual que programas de licencias propietarias como Rhinoceros 3D, cuenta con un espacio de trabajo para la edición y la interpretación de programas escritos en Python (Blender.org).

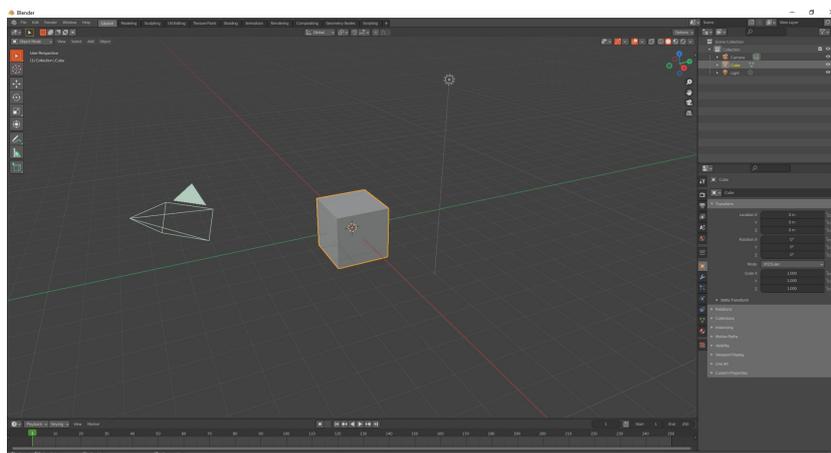


Fig. 26: Interfas gráfica Blender  
Fuente: Elaboración propia

La principal potencialidad de este software es el completo acceso a la API o “Application Programming Interface”, una metodología de trabajo con software que no depende de interfaz gráfica, otra de las ventajas para el aprendizaje y utilización de este software es que cada módulo presente en la interfaz gráfica muestra el código que lo ejecuta, de manera tal que escribir programas personalizados no depende únicamente de leer la documentación oficial.

### 3.2.5 Python

Python es un lenguaje de programación interpretativo de alto nivel, lo que significa que los procesos que designan unidades de memoria e interpretación de estructuras de datos, tales como datos alfanuméricos se ejecutan una instrucción a la vez de manera automatizada y cada bloque de datos después del anterior, lo que facilita la implementación de programas en cualquier software que cuente con la capacidad de interpretar este lenguaje (Lee, 2014; Kneusel 2021).

Para el desarrollo de este trabajo, el almacenamiento de datos y las estructuras de control de flujo necesarias de mencionar corresponden a las siguientes:

#### Almacenamiento de datos

##### Variables

Las variables proveen un lugar útil para almacenar información que se puede reutilizar. Declarar una variable es el proceso que genera el espacio en la memoria destinado para alojar la información, el cual puede variar durante el desarrollo del programa a ejecutar. Una variable puede alojar un valor numérico o una cadena de caracteres.

##### Listas

Las cadenas y números representan información primitiva, lo que significa que no es posible agrupar conjuntos de datos, es posible imaginarlos como átomos, donde es posible combinarlos en estructuras de datos complejas por medio de listas. Una lista es un conjunto de información ordenada. Lo que puede ser información primitiva o cualquier otro tipo de dato, de manera tal que una lista  $L = [a,b,c]$  corresponde a una lista de tres elementos, donde el orden de los elementos corresponde a  $a=0$ ,  $b=1$  y  $c=2$ . Las listas pueden alojar otras listas, esto se denomina comprensión de listas, de manera tal que  $CL = [[L1],[L2],[L3]]$  es una lista que anida tres listas  $L1$ ,  $L2$  y  $L3$ .

#### Estructuras de control de flujo

##### Declaraciones condicionales

Las declaraciones condicionales o “if Statements” en inglés evalúan si se cumplen condiciones. Se les entrega una condición que se tiene que resolver por medio de valores booleanos (verdadero o falso), si el resultado es positivo, el bloque de datos contenido dentro de la declaración se ejecuta, en caso de ser negativo, el bloque no se considera para la ejecución del código a menos que se declare un segundo bloque de excepción “else” en inglés, del mismo modo es posible evaluar diferentes condiciones al integrar mas bloques de condición “elif” en inglés. De esta manera, un código que evalúa el discriminante de un polinomio cuadrático  $ax^2 + bx + c$ , evaluando el valor en caso de

ser menor, igual o mayor a cero se determina de la siguiente manera:

```
Disc = b**2 -4*a*c
    if (disc<0):
        print("Imaginario")
    elif (disc==0):
        print("Real simple")
    else:
        print("Real doble")
```

### Ciclos definidos

Los ciclos son estructuras de control presentes en todos los lenguajes de programación estructurados, los que tienen ciclos para repetir bloques de código, los ciclos se caracterizan por repetir bloques desde un valor inicial hasta un valor final, el cual se incrementa de manera constante, es necesario que los ciclos operen sobre bloques de código que puedan iterar, de esta manera, in ciclo definido o "for" en inglés, que imprima los valores de una variable i en un rango de 0 a 6 se define de la siguiente manera:

```
For i in range(6):
    Print(i)
```

Lo que resulta en el programa entregando los siguientes valores:

```
0          - primera iteración
1
2
3
4
5          - sexta iteración
```

# Propuesta Experimental

## 4.1 Formulación del escenario a evaluar

Durante el último proceso de modificación al Plan Regulador Comunal de Santiago, en junio de 2021 la Ilustre Municipalidad de Santiago tomó la determinación de suspender el proceso debido a urgencia sanitaria consecuencia de la pandemia de Sars-COVID-19 se determinó la suspensión del proceso. Sin embargo, el momento en el que se detuvo el proceso fue posterior a la instancia de consulta ciudadana, este escenario de propuesta de modificación se considerará como la base normativa para simular la implementación de un instrumento alternativo para la interpretación y modificación de las normativas del plan regulador, considerando que la instancia de consulta ciudadana permitiría implementar esta metodología alternativa para discutir entre los agentes que participen del proceso en búsqueda de acuerdos.

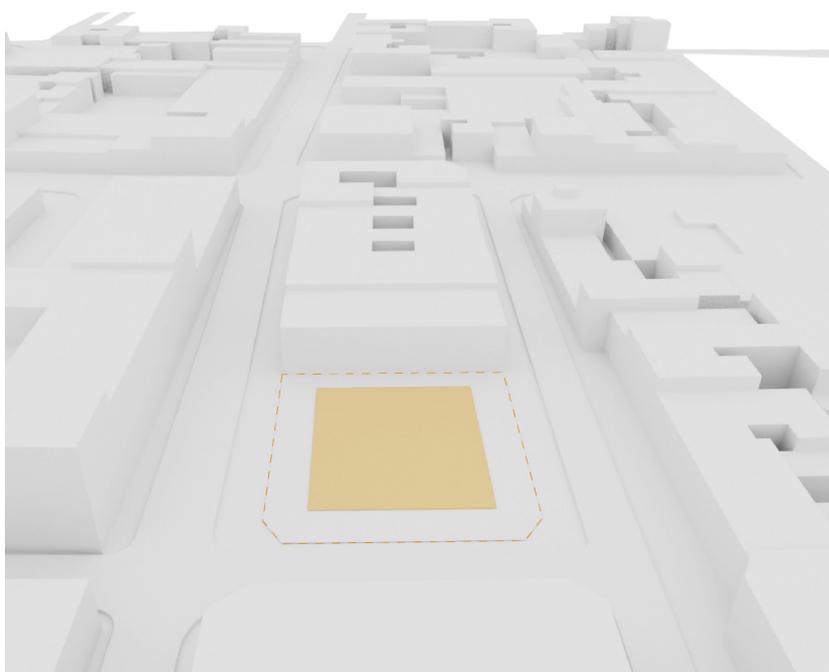


Fig. 27: Área edificable posterior a la aplicación de distanciamientos  
Fuente: Elaboración propia

De esta manera, el escenario planteado correspondió al de renovación urbana por medio de densificación residencial, ubicado en el sector que rodea la intersección de la calle Lira y Av. 10 de Julio. Este sector de la comuna se encuentra contenido en dos zonas del plan regulador, edificaciones que no están declaradas inmuebles de conservación histórica, con alturas entre 7 y 65 metros. El programa predominante en Av. 10 de Julio y Lira es el comercial, por lo que la cantidad de población flotante durante horas hábiles es otro factor necesario para considerar. En paralelo, la calle Doctor Brunner tiene como programa principal vivienda de fachada continua, del

mismo modo la relación de lleno y vacío en los predios relacionados al uso comercial es predominantemente lleno, mientras que la relación en los predios con programa de vivienda cuenta con patios interiores de mayor proporción. Estas condiciones corresponden a las características morfológicas a considerar en la propuesta.

Dentro de esta simulación de condiciones se considerarán junto con las morfológicas en relación con el programa existente, un conjunto de voluntades que representan los intereses en conflicto durante el proceso de renovación urbana abstraídos del marco teórico representados en tres dimensiones. La primera voluntad corresponde a los propietarios de los locales comerciales, quienes se oponen a la pérdida de la accesibilidad solar en la calzada sur de la avenida 10 de Julio, los residentes de la manzana ubicada entre las calles Manuel Antonio Tocornal y Doctor Brunner, quienes cuestionan la aparición de edificación en altura como el edificio ubicado en la intersección de Lira con Argomedo, por último se encuentran los intereses de los agentes inmobiliarios, quienes buscan la maximización de la superficie construible dentro del sector por medio de edificación en altura con agrupamiento aislado. Esto determina las superficies de interés de la siguiente manera:

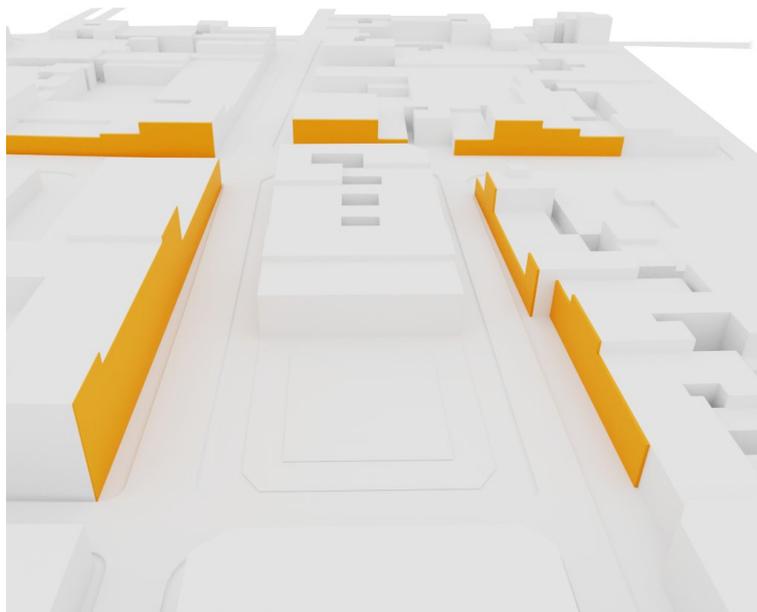


Fig. 28: Superficies de interés para la accesibilidad solar  
Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Etapas de ejecución

La ejecución de este ejercicio se realizó en dos etapas, la primera, inmediatamente posterior a la simulación del caso de estudio, del que se abstraen las condiciones normativas y restricciones relacionada a a modelar, consiste en el levantamiento tridimensional de las condiciones morfológicas del contexto urbano. La segunda etapa se encarga de simular el escenario y generar las variantes de diseño de volumen teórico máximo por medio de la implementación de diseño algorítmico.

### 4.2.1 Proceso de modelado

Esta etapa comienza con la recolección de información geométrica y normativa, donde la información correspondiente al marco normativo proviene del Plan Regulador Comunal de Santiago. Al ser un escenario teórico, la información correspondiente a las geometrías urbanas, geolocalización y alturas de edificación fueron obtenidas por medio de la plataforma Google Earth.

El proceso de modelado se desarrolla en bloques, para lograr determinar el volumen teórico máximo edificable se planteó la implementación de la metodología de envolventes solares inversas por medio de la sustracción de volúmenes. De esta manera el desarrollo de esta etapa se divide en tres partes:

La primera se encarga de la definición de preexistencias, ya que corresponde al levantamiento volumétrico de las edificaciones y condiciones urbanas en las que se emplaza el predio a simular. Durante esta etapa se define dentro de Blender la posición geográfica y se determina zona horaria para posteriormente orientar el objeto que representa el sol.

La segunda define el período temporal para la evaluación, para garantizar el acceso a iluminación natural se evaluará el día con menor duración de luz natural, correspondiente al 21 de junio, donde el amanecer ocurre a las 08:42 hrs y la puesta de sol a las 18:41 hrs. El rango para cada evaluación se determinará según las condiciones lumínicas consecuencia de la morfología del contexto, donde para el escenario a simular, la iluminación nutual en las fachadas orientadas hacia el oriente (calle Dr. Brunner) se hace efectiva a las 11:00 hrs, mientras que en las fachadas orientadas hacia el poniente (Av. Lira) la sombra que produce el contexto ocurre cerca de las 18:00 hrs. Estas dos condiciones determinan el rango horario general a evaluar.

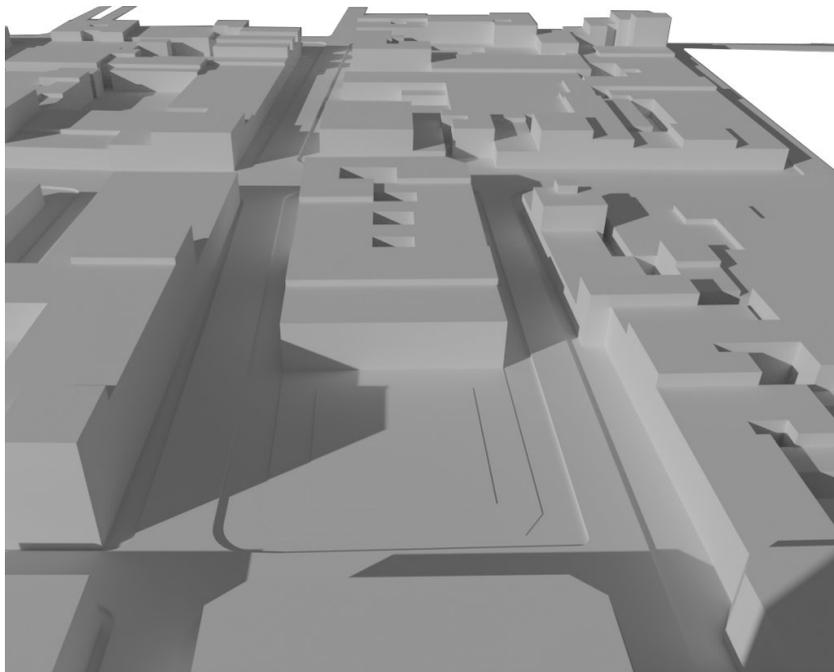


Fig. 29: Sombra generada por edificaciones del contexto, 11:00 hrs.  
Fuente: Elaboración propia

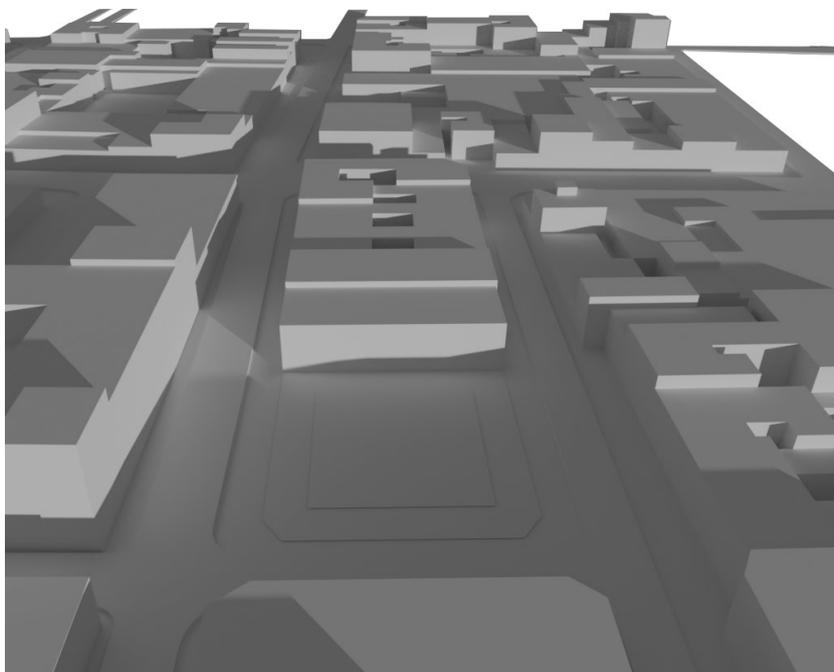


Fig. 30: Sombra generada por edificaciones del contexto, 18:00 hrs.  
Fuente: Elaboración propia

Durante el tercer paso se determina la cantidad de superficie edificable en planta aplicados los distanciamientos establecidos para edificaciones con tipo de agrupamiento aislado, posteriormente se subdivide en una grilla, la cual se convertirá en el primer nivel de vóxeles.

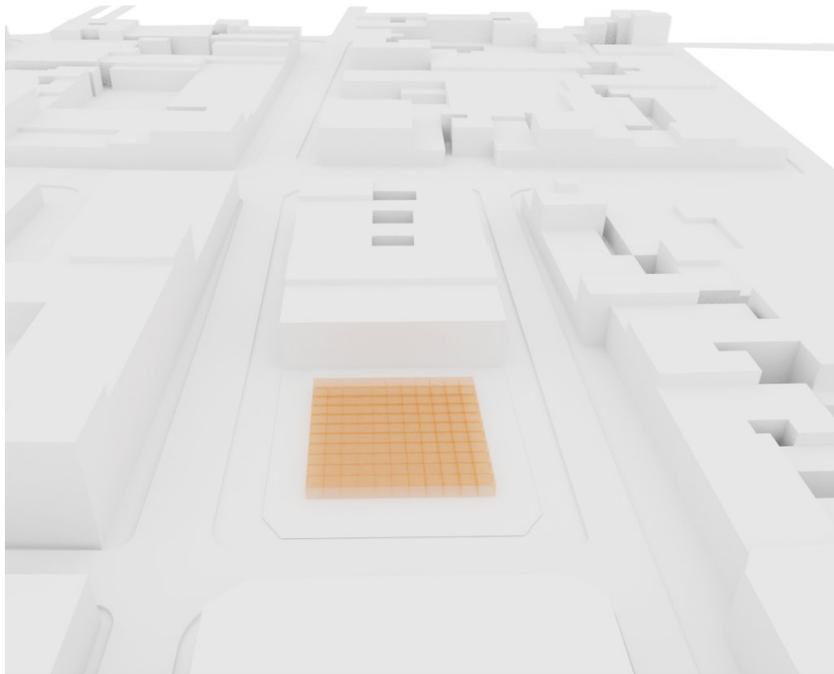


Fig. 31: Área edificable con primera capa de voxels  
Fuente: Elaboración propia

Para la definición de la geometría absoluta, se aplican las restricciones relacionadas al tipo de agrupamiento aislado para posteriormente rellenar el polígono con vóxeles cúbicos de 2 metros de distancia, hasta una altura de 65 metros, similar al edificio de mayor altura del sector.

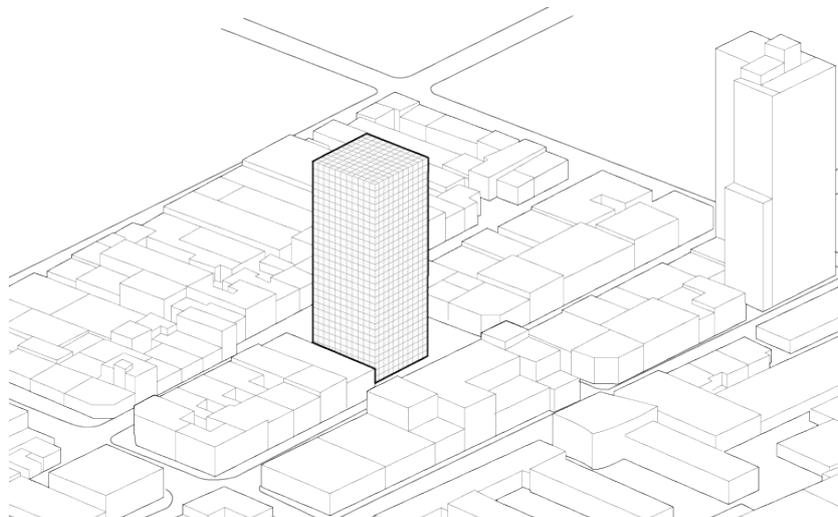


Fig. 32: Volumen absoluto de voxels a evaluar.  
Fuente: Elaboración propia

Para el caso de estudio, donde el objetivo de dotar de iluminación natural corresponde a la superficie en fachada oriente de las edificaciones ubicadas en la calle Doctor Brunner, las fachadas ponientes de las edificaciones en calle Lira y la superficie en fachada norte de las edificaciones en Av. 10 de Julio. Por lo que se determinará una secuencia de puntos a analizar con una distancia de 3 metros al este, sur y oeste de las avenidas que rodean el pedio a evaluar.

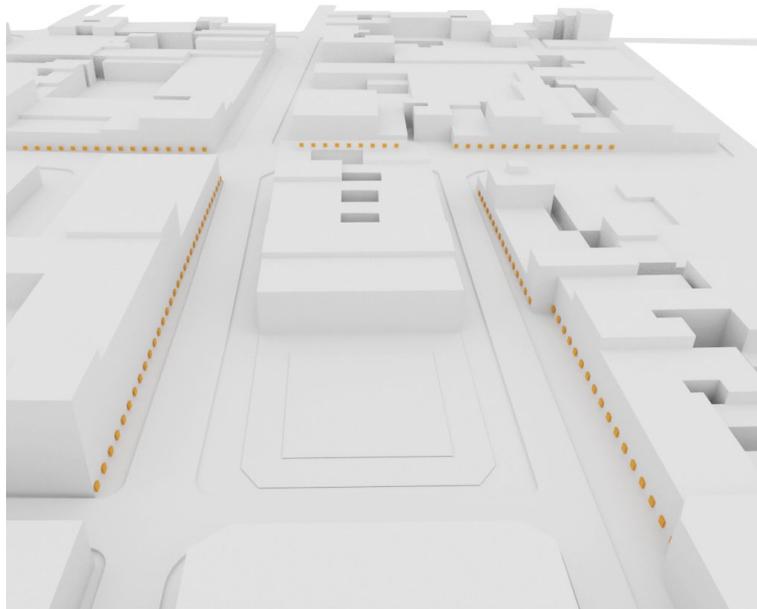


Fig. 33: Polígonos que determinan la secuencia de puntos de interés.  
Fuente: Elaboración propia

### 4.2.2 Proceso de simulación

Posterior a este punto, una vez determinados y modelados todos los requerimientos necesarios, se da paso a la evaluación por medio del diseño algorítmico, esta segunda etapa consiste de seis partes, la primera corresponde a la ejecución del algoritmo de la siguiente manera:

En primer lugar, se definen las variables que contienen los elementos que definen a los voxeles, para el caso de estudio, cada voxel se construye de ocho vértices, de los cuales, combinaciones específicas construyen los planos y el volumen completo.

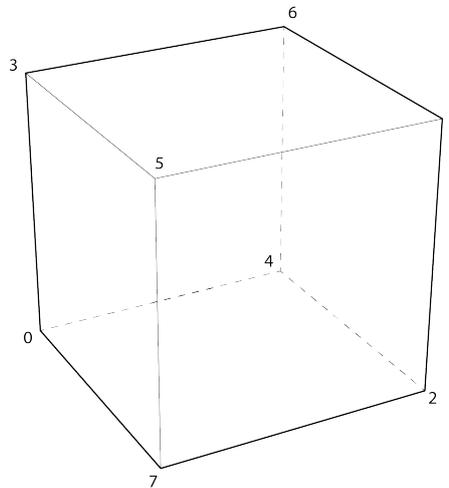


Fig. 34: Construcción de voxel por medio de vértices  
Fuente: Elaboración propia

De esta manera el plano sur, por el cual se evaluarán los puntos de interés ubicados en Av. 10 de Julio se construyen con los vértices 0, 3, 7 y 5.

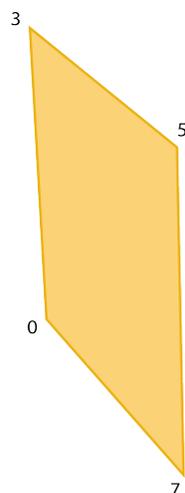


Fig. 35: Definición de un polígono por medio de sus vértices  
Fuente: Elaboración propia

El siguiente elemento por definir es el vector que representa la posición del sol en cada instante del rango horario, para el caso de estudio, con sub-rangos horarios de tres horas, divididos cada 5 minutos, por cada rango horario existen 36 instantes temporales, los que definen 36 posiciones solares.

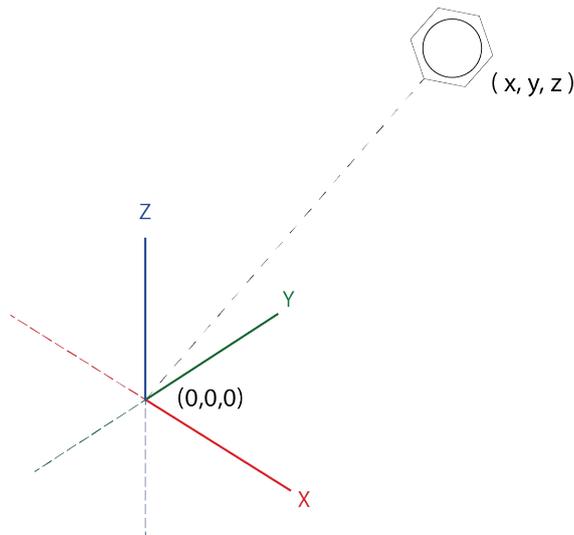


Fig. 36: Definición de vector posición del sol en un sistema de coordenadas 3D  
Fuente: Elaboración propia

Luego se proyecta este vector desde el centro de cada polígono que define los puntos de interés, con esto se obtiene el vector para evaluar la intersección con los planos de cada voxel.

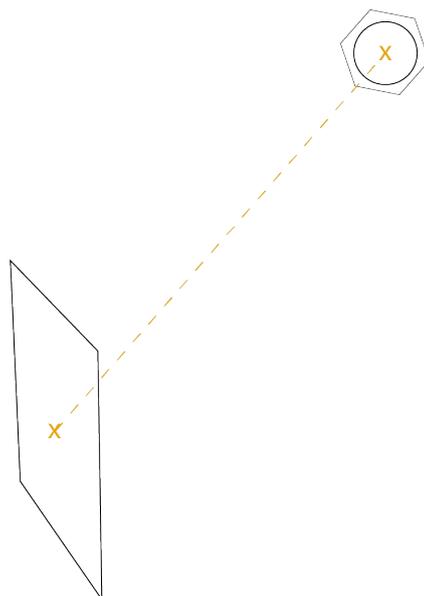


Fig. 37: Línea definida entre punto de interés y posición solar  
Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso consiste en determinar el punto de intersección entre la línea definida entre un punto de interés y la posición del sol, con el plano infinito proyectado por el polígono paralelo de cada voxel.

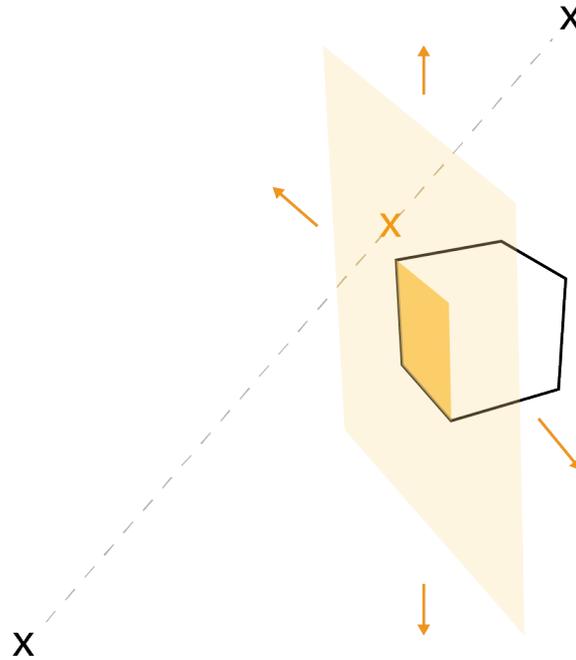


Fig. 38: Intersección con plano generado por polígono a evaluar  
Fuente: Elaboración propia

Una vez conseguido este punto de intersección temporal, se evalúa si la posición del punto se encuentra contenida en el polígono que define el plano. En caso de estar contenido, el voxel y todos los que se encuentren por sobre él se eliminan del volumen absoluto.

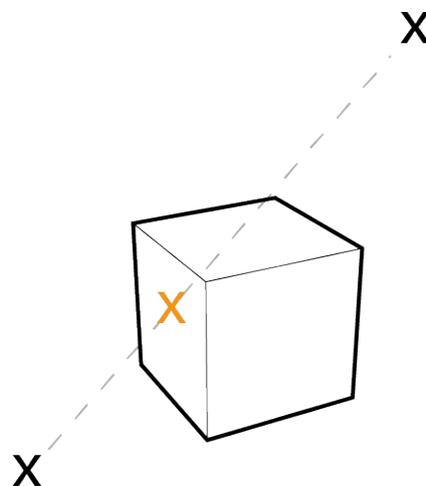


Fig. 39: Evaluación de intersección contenida dentro del polígono evaluado  
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, este proceso se repite de manera iterativa, por cada punto de interés se evalúan todas las posiciones solares, por cada evaluación de estas posiciones se evalúa la intersección con cada voxel. De esta manera se obtiene el volumen teórico máximo de cada sub-rango horario.

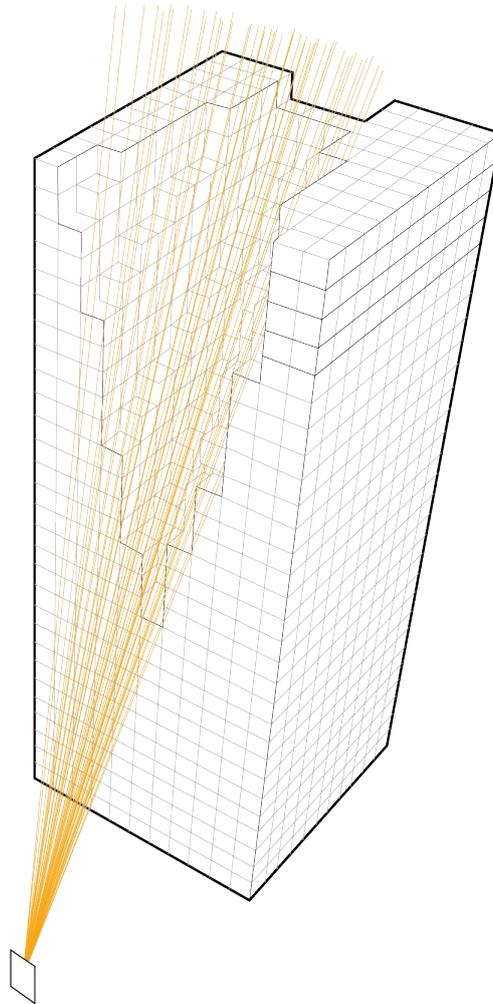


Fig. 40: Esquema de sustracción de volúmenes posterior a evaluación de intersección.  
Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizada la simulación en cada sub-rango contamos con un conjunto de volúmenes teóricos máximos en función de garantizar un mínimo de tres horas de acceso a la iluminación solar directa en el espacio público directo a las fachadas definidas. La explicación del código bloque por bloque se encuentra anexada al final del documento.

Análisis  
y  
Resultados

# Análisis y Resultados

Previo al análisis de los volúmenes resultantes de la ejecución del algoritmo desarrollado, es necesario visualizar las posibilidades volumétricas resultantes de los instrumentos de planificación actuales, lo que permite contrastar y evaluar las potencialidades de los resultados obtenidos.

## 1.- Volumen teórico definido por los distanciamientos y altura máxima

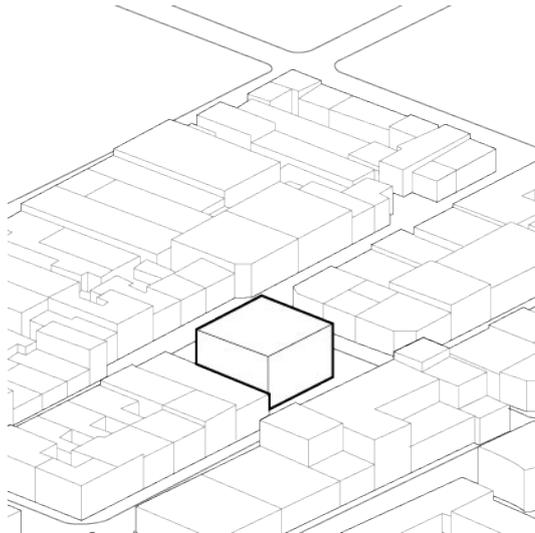


Fig. 41: Volumen generado por distanciamientos y altura máxima.  
Fuente: Elaboración propia



Fig. 42: Relación de escala - Elevación Sur.  
Fuente: Elaboración propia

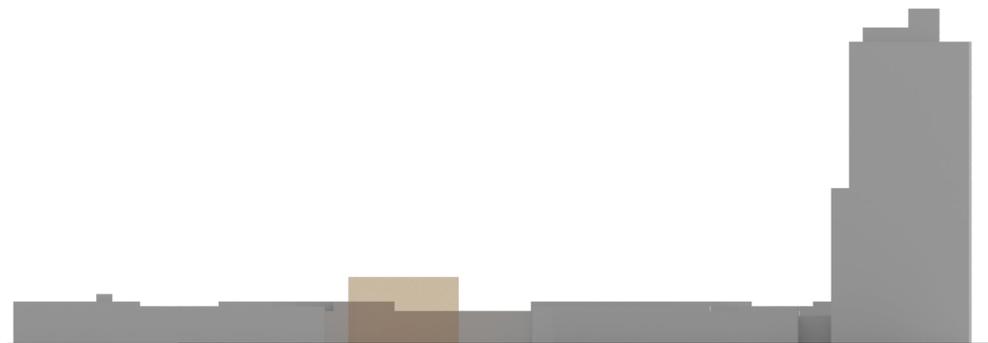
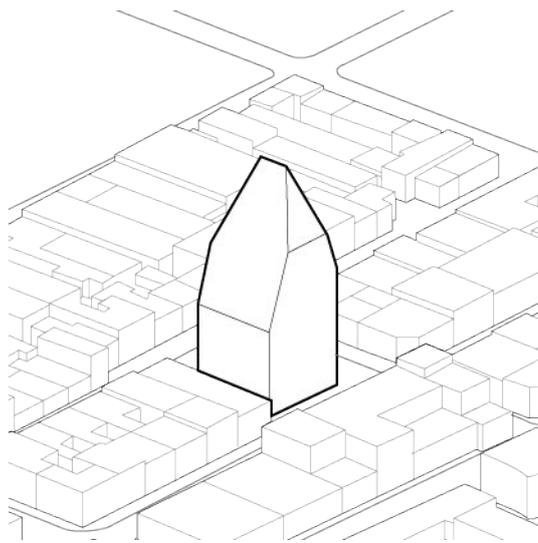


Fig. 43: Relación de escala - Elevación Oriente.  
Fuente: Elaboración propia

2.- Rasantes aplicadas desde los puntos medios entre líneas oficiales y deslinde permitirían aumentar el volumen a siguiente forma:



Altura máxima: 57m  
 Volumen total: 19.274 m<sup>3</sup>

Fig. 44: Volumen definido por distanciamiento rasantes.  
 Fuente: Elaboración propia

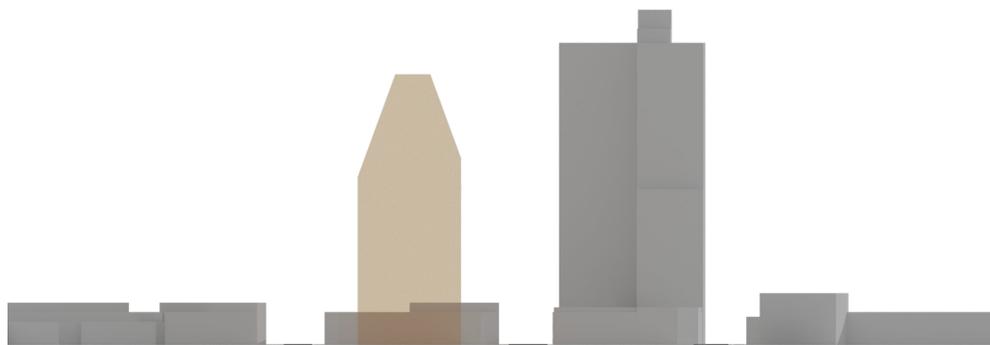


Fig. 45: Relación de escala - Elevación Sur.  
 Fuente: Elaboración propia

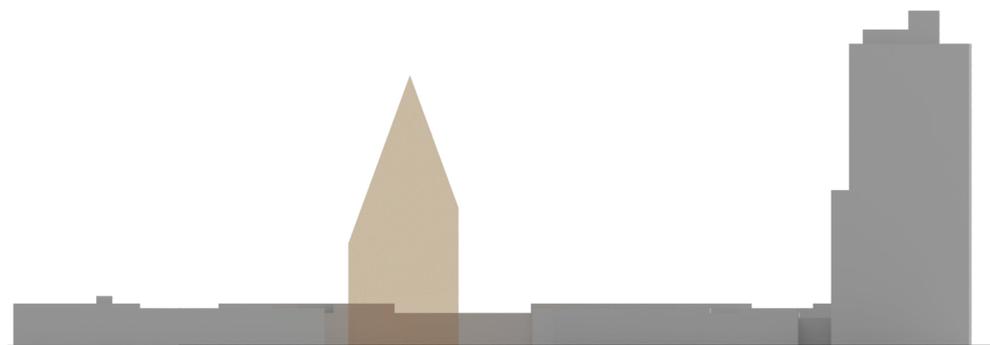
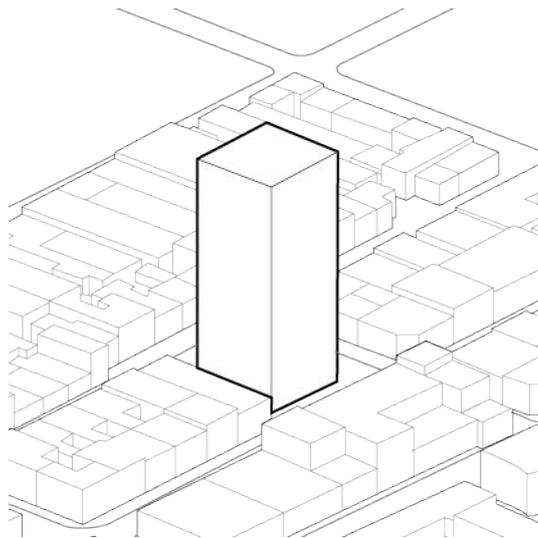


Fig. 46: Relación de escala - Elevación Oriente.  
 Fuente: Elaboración propia

3.- Siguiendo la lógica que define la implementación del artículo 2.6.11, el volumen teórico podría superar la altura máxima determinada por la rasante, definido de la siguiente manera:



Altura máxima: 57m  
 Volumen total: 27.453 m<sup>3</sup>

Fig. 47: Volumen definido por distanciamientos y altura máxima según rasantes.  
 Fuente: Elaboración propia

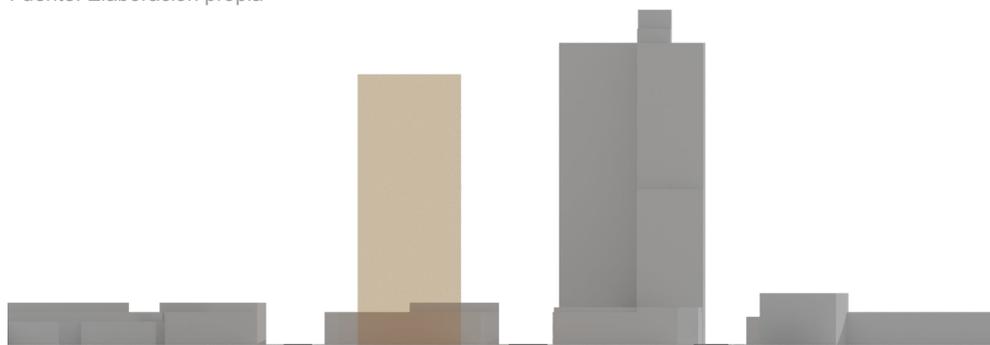


Fig. 48: Relación de escala - Elevación Sur.  
 Fuente: Elaboración propia

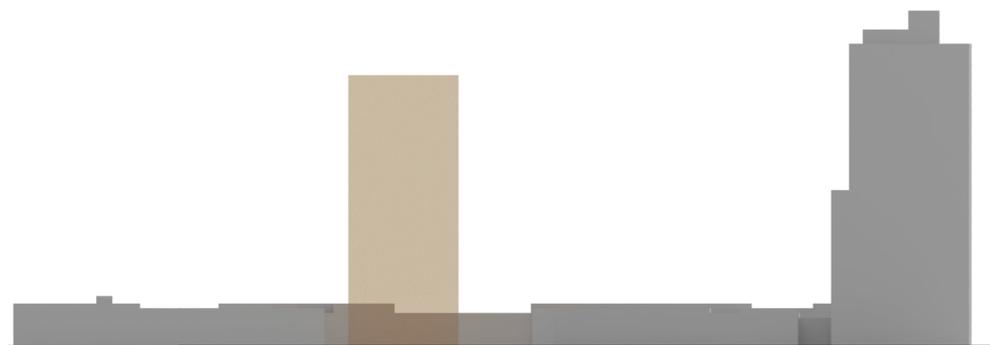


Fig. 49: Relación de escala - Elevación Oriente.  
 Fuente: Elaboración propia

Es posible entender cómo el instrumento de estudios de sombra se contrapone a la intención de proteger el acceso solar de las rasantes, de manera alternativa, los resultados de las simulaciones con sub-rangos horarios de tres horas son los siguientes:

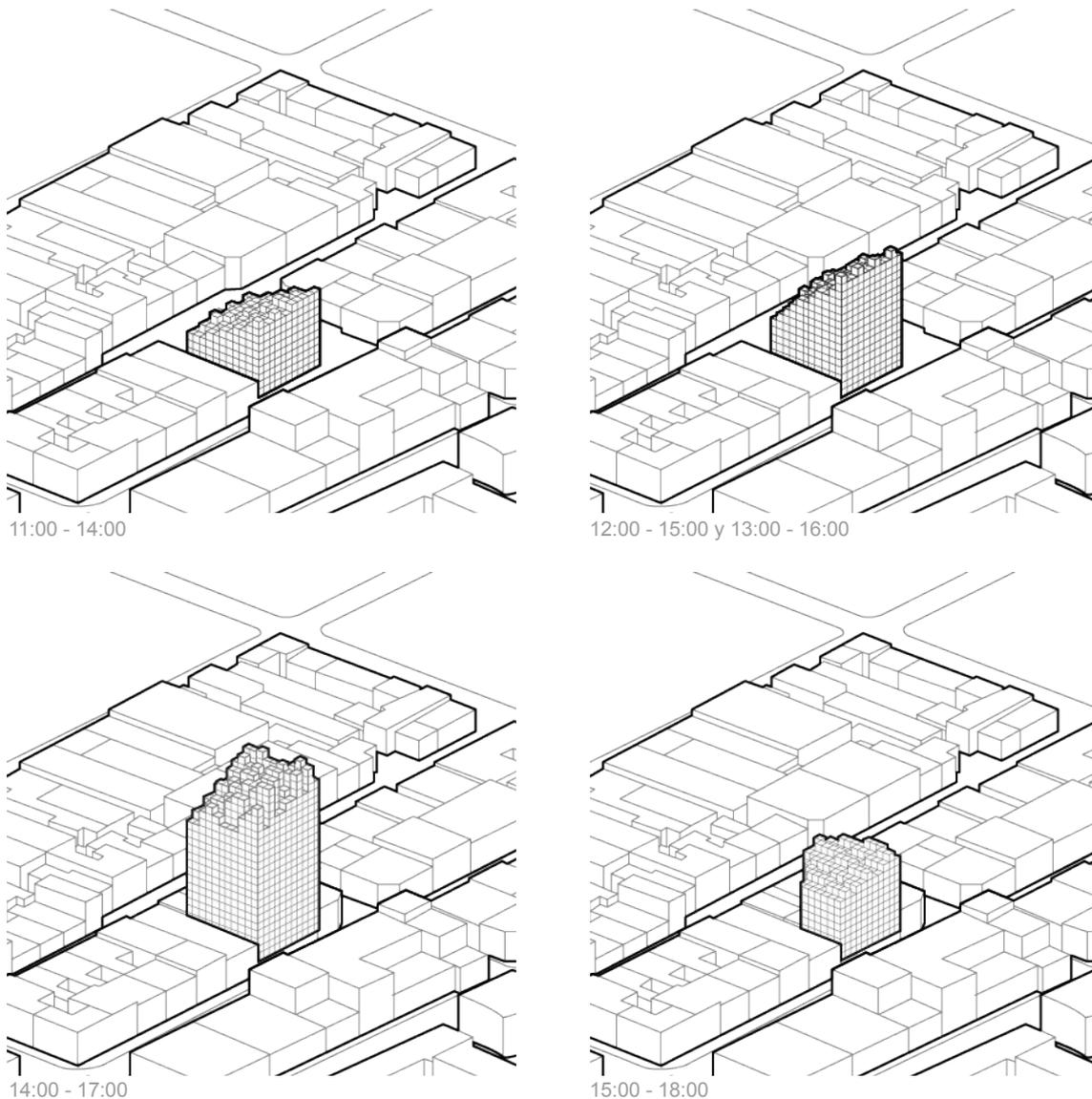
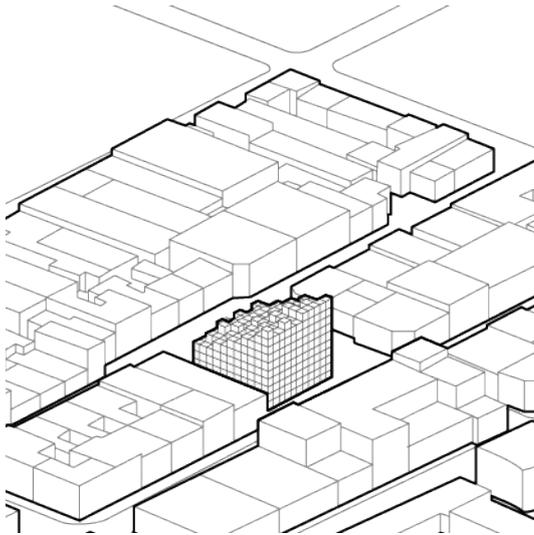


Fig. 50: Variables de diseño obtenidas por algoritmos generativos.  
Fuente: Elaboración propia

Para el caso de estudio, el que considera que el escenario es el de debate sobre la posibilidad de desarrollar densificación en altura, lo que implica buscar alternativas de diseño que permitan debatir sobre las posibilidades de modificar definiciones dentro de los cuadros normativos, para el caso de estudio se consideró la modificación de la altura, ya que garantizar la accesibilidad solar no depende de los coeficientes de ocupación y constructibilidad.

Sub-rango 1 [11 - 14]



La inclinación de altura hacia el oriente, el volumen resultante en esta iteración varía desde los 14 hasta 20m de altura en su punto mas alto. Esto se determina ya que, en este rango horario, el volumen se ve condicionado únicamente desde el oriente.

Altura máxima: 20 m  
 Voxels totales: 899  
 Volumen total: 7.192 m<sup>3</sup>

Fig. 51: Volúmen definido por Sub-rango entre 11 y 14 hrs.  
 Fuente: Elaboración propia

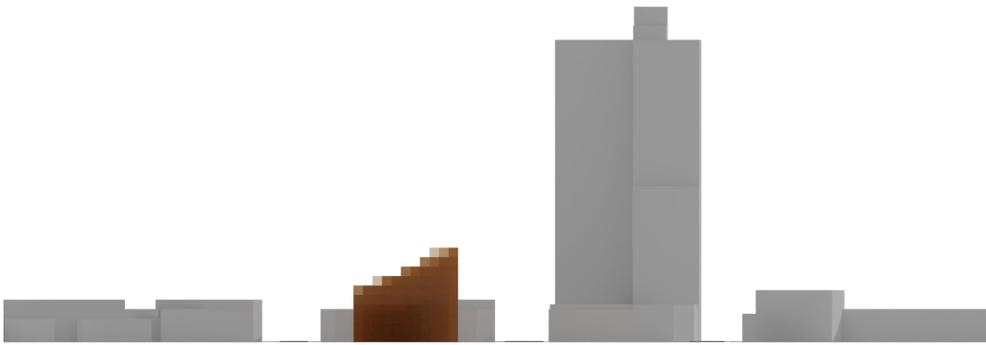


Fig. 52: Relación de escala - Elevación Sur.  
 Fuente: Elaboración propia

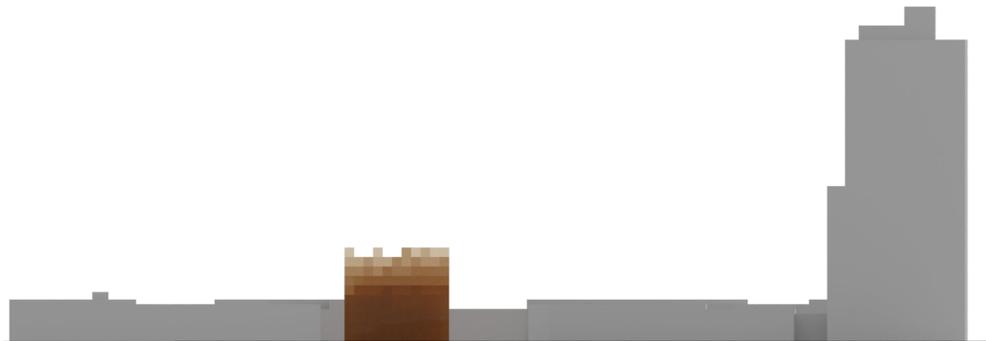
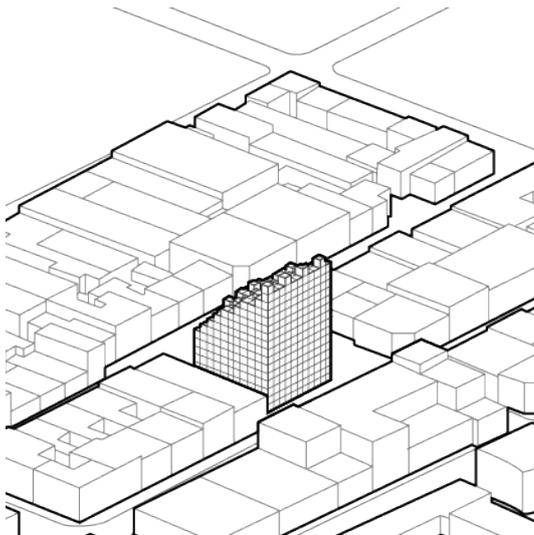


Fig. 53: Relación de escala - Elevación Oriente.  
 Fuente: Elaboración propia

Sub-rango 2 y 3 [12 - 15] y [13 - 16]



En ambos sub-rangos horarios el volumen resultante contiene la misma cantidad y posición de vóxeles. Sin embargo, los volúmenes se concentran ligeramente hacia el norte en comparación al primer sub-rango (Fig. 56).

Altura máxima: 32m  
 Voxels totales: 1.390  
 Volumen total: 11.120 m<sup>3</sup>

Fig. 54: Volumen definido por sub-rangos entre 12 y 15 hrs y entre 13 y 16 hrs.  
 Fuente: Elaboración propia

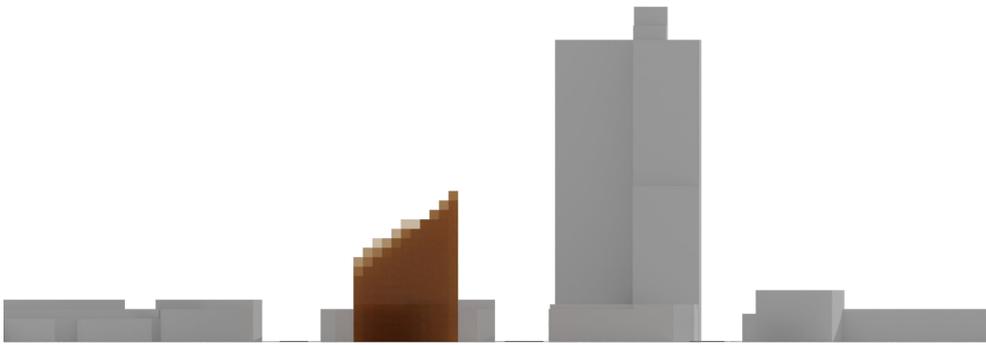


Fig. 55: Relación de escala - Elevación Sur.  
 Fuente: Elaboración propia

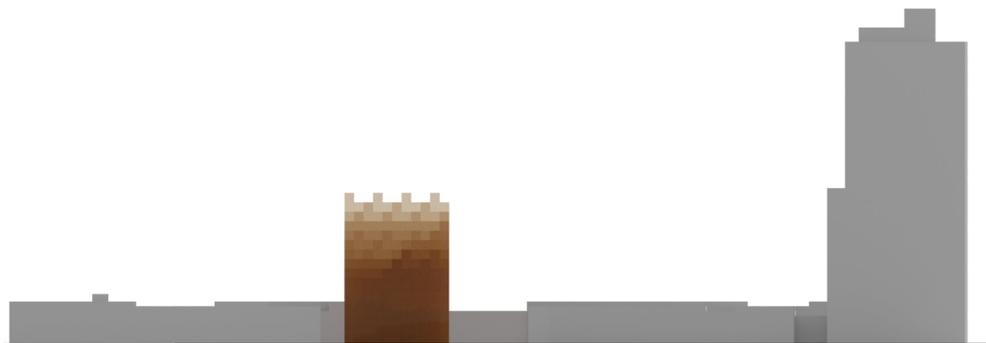
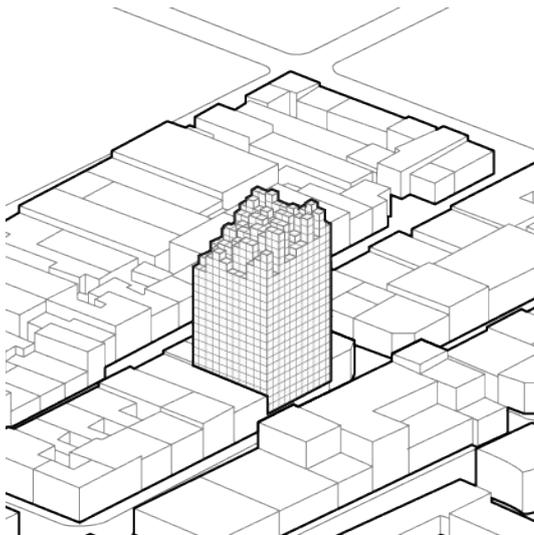


Fig. 56: Relación de escala- Elevación Oriente.  
 Fuente: Elaboración propia

Sub-rango 4 [14 - 17]



Esta variable alcanza la mayor altura y concentra los vóxeles de mayor altura hacia el norte. Del mismo modo, la diferencia entre la menor y mayor altura máxima se reduce en comparación a los resultados anteriores, consecuencia de la evaluación positiva desde los puntos de interés ubicados en Av. 10 de Julio.

Altura máxima: 44m  
 Voxels totales: 2.288  
 Volumen total: 18.304 m<sup>3</sup>

Fig. 57: Volumen definido por sub-rango entre 14 y 17 hrs.  
 Fuente: Elaboración propia

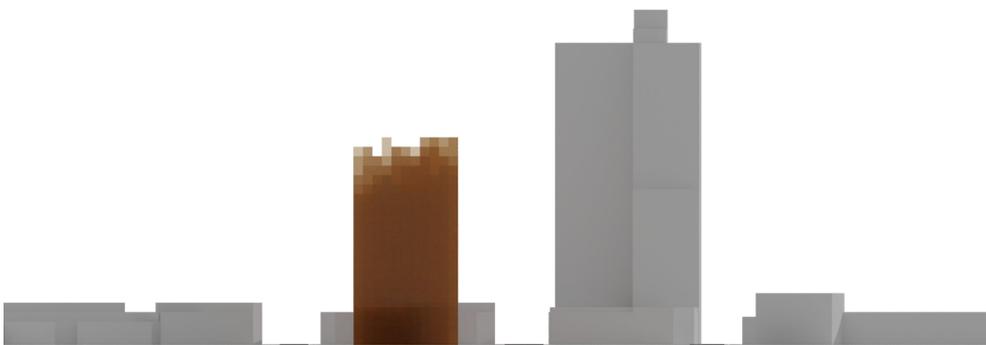
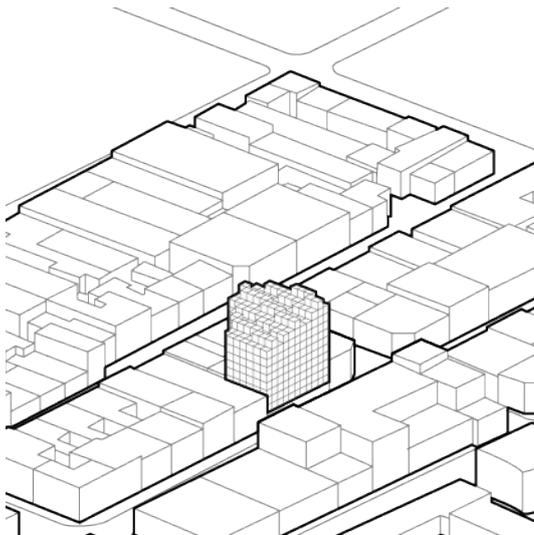


Fig. 58: Relación de escala - Elevación sur.  
 Fuente: Elaboración propia



Fig. 59: Relación de escala - Elevación Oriente.  
 Fuente: Elaboración propia

Sub-rango 5 [15 - 18]



Finalmente, la resultante del sub-rango final alcanza una altura similar al primer sub-rango. Sin embargo, los puntos de interés en Av. 10 de Julio hacia el oriente, originalmente pensados para controlar la altura máxima en los rangos horarios cercanos a mediodía, afectan la esquina surponiendo del conjunto de vóxeles.

Altura máxima: 22m

Voxels totales: 929

Volumen total: 7.432 m3

Fig. 60: Volumen definido por sub-rango entre 15 y 18 hrs..  
Fuente: Elaboración propia

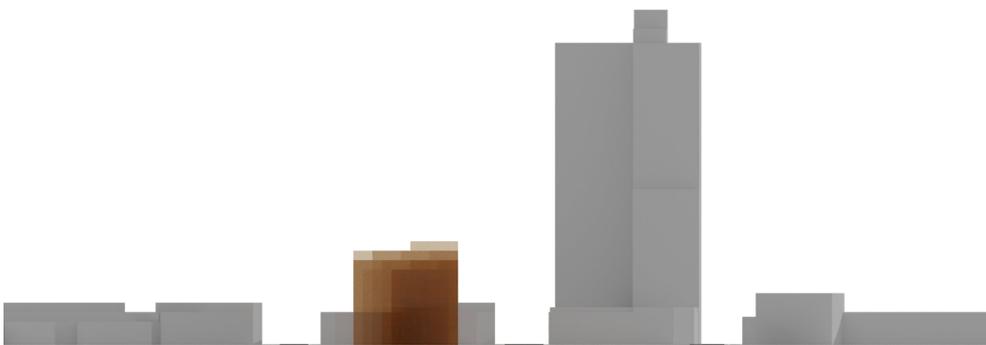


Fig. 61: Relación de escala - Elevación Sur.  
Fuente: Elaboración propia

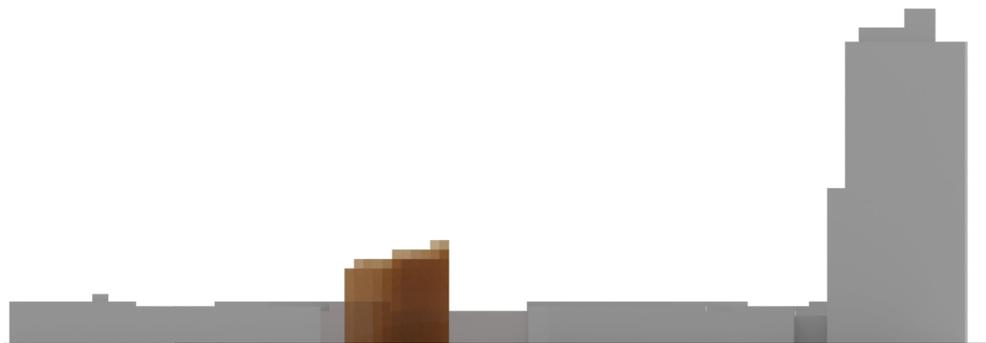


Fig. 62: Relación de escala - Elevación Oriente.  
Fuente: Elaboración propia

La volumetría, determinada por la incidencia solar presenta contrastantes niveles de altura y capacidad volumétrica entre las variantes resultantes, es posible entender este fenómeno por la marcada presencia y proximidad de puntos de interés posicionados al poniente del conjunto de voxeles., del mismo modo, es posible entender la razón por la que durante los sub-rangos horarios 2 y 3 la morfología es idéntica, debido al ángulo que presentan las posiciones solares sumado a la lejanía de los puntos de interés ubicados en Av. 10 de Julio. Es posible entender, cómo estos puntos ubicados al sur ejercen influencia sobre los voxeles durante el sub-rango 4, al identificar en esta variante de diseño un incremento en altura predominante hacia el norte del conjunto de voxeles. Finalmente, la altura de la última simulación, ligeramente superior hacia el centro del conjunto, se entiende debido a la inclinación del ángulo solar respecto del norte geográfico.

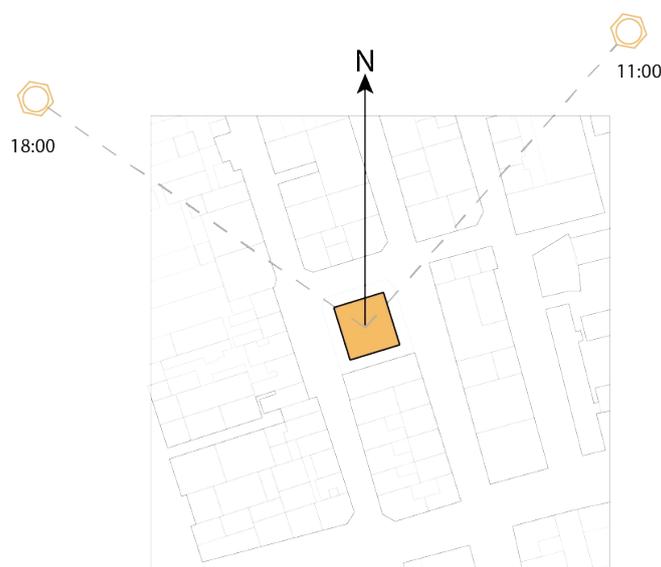


Fig. 63: Ángulo de incidencia respecto al norte geográfico.  
Fuente: Elaboración propia

La incidencia solar y la diferencia de ángulos respecto al norte geográfico,  $30^\circ$  a las 11:00 hrs. y  $60^\circ$  a las 18:00 hrs. condiciona la morfología y la influencia que tienen los puntos de interés sobre el proceso de evaluación de intersecciones. Esto demuestra la importancia de considerar la implementación de metodologías de cálculo específicas en comparación a normas genéricas, las que no necesariamente responden a las lógicas de los contextos urbanos, en este caso, si la búsqueda por lograr un acuerdo entre las partes que participan del proceso de planificación no considerara la inclinación del predio por sobre el norte geográfico no podría conseguirse un aprovechamiento de las condiciones naturales. En cambio, con esta herramienta es posible entender que, si la resolución es lograr la mayor altura posible, esta no debe ser paralela a los ejes de calzada, sino que con la inclinación hacia el noreste, consecuencia de las condiciones y criterios con los que se evalúo el ejercicio.

Para el caso de estudio se garantiza la accesibilidad mínima de tres horas de accesibilidad solar por cada variante, es posible ver cómo al reducir este criterio a dos horas mínimas, el volumen final incrementa en altura.

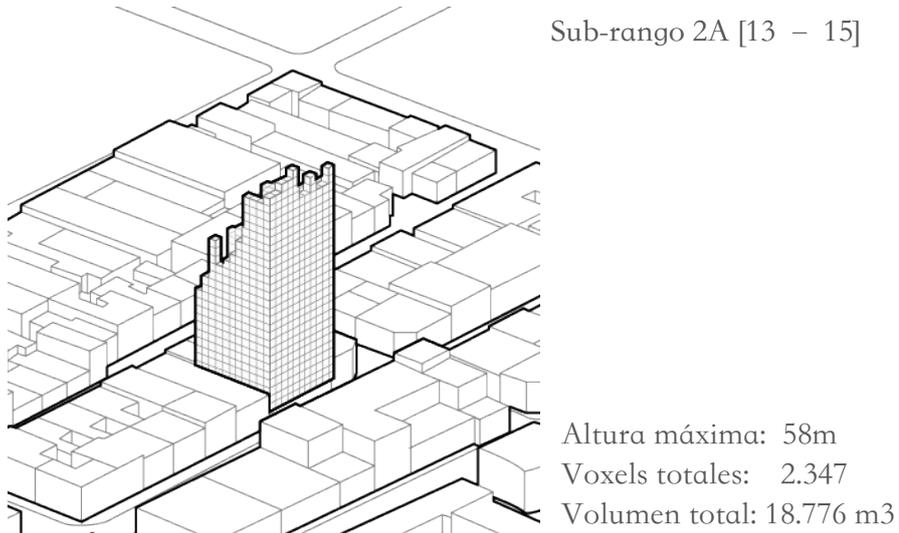


Fig. 64: Volumen definido por rango entre 13 y 15 hrs..  
 Fuente: Elaboración propia

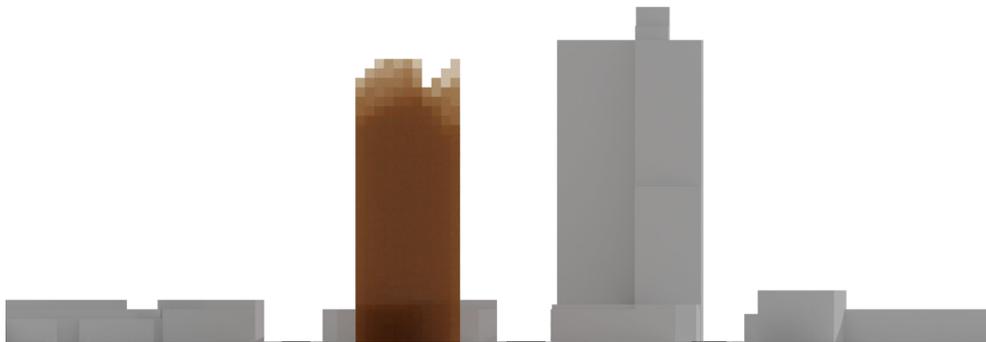


Fig. 65: Relación de escala - Elevación Sur.  
 Fuente: Elaboración propia

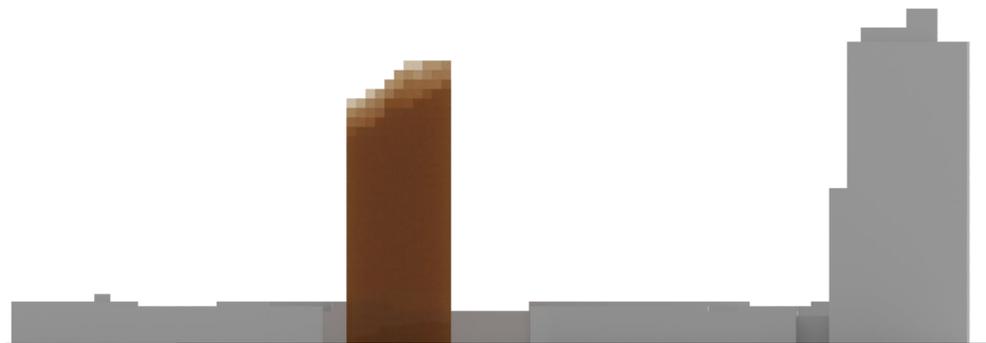
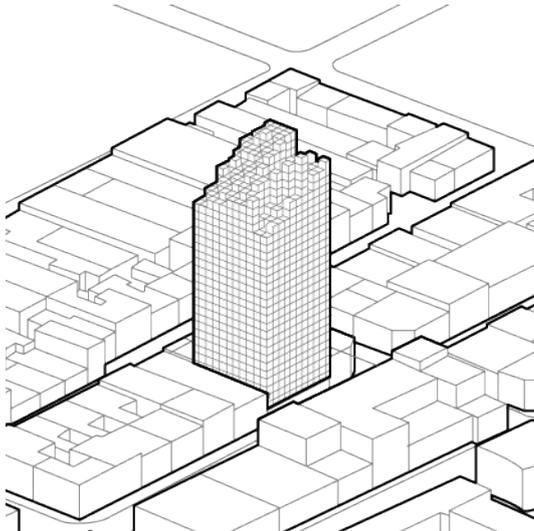


Fig. 66: Relación de escala - Elevación Oriente.  
 Fuente: Elaboración propia

Sub-rango 2B [14 - 16]



Altura máxima: 60m  
Voxels totales: 3.189  
Volumen total: 25.512 m<sup>3</sup>

Fig. 67: Volumen definido por sub-rango entre 14 y 16 hrs..  
Fuente: Elaboración propia

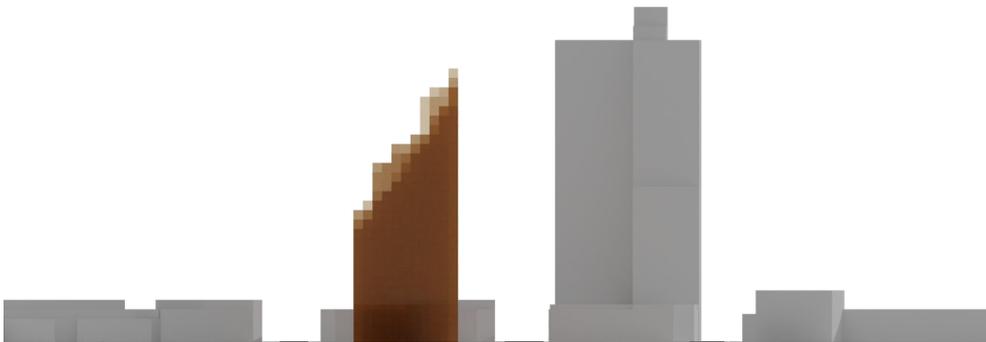


Fig. 68: Relación de escala - Elevación Sur.  
Fuente: Elaboración propia

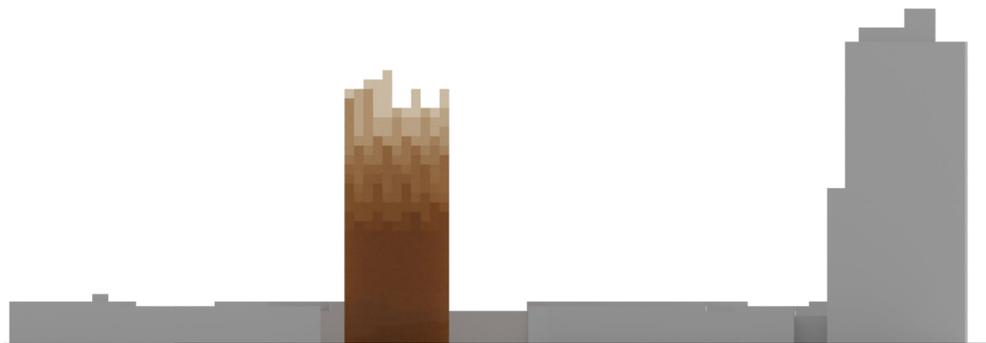


Fig. 69: Relación de escala - Elevación Oriente.  
Fuente: Elaboración propia

Esto se entiende ya que al reducir la cantidad de horas de cada sub-rango horario, el abanico que generan los cambios de posición del sol se reduce proporcionalmente, con esto, menos puntos de interés tienen influencia sobre el conjunto de voxeles, esto tiene como consecuencia la aparición de columnas de voxeles, lo que también está condicionado por la resolución en la que define el conjunto absoluto de voxeles, es decir, la precisión del volumen teórico depende proporcionalmente de tres factores:

- 1.- La división temporal de cada sub-rango horario, que condiciona el ángulo de influencia del sol sobre el conjunto de voxeles.
- 2.- El tamaño de cada voxel, lo que condiciona la definición del volumen teórico resultante.
- 3.- La distancia que separa los puntos de interés, a mayor distancia aumenta la probabilidad de la aparición de columnas en el volumen resultante.

Sin embargo, es posible contrastar y analizar los resultados obtenidos en comparación con los volúmenes definidos por la rasante y el potencial aumento según la definición de los estudios de sombra.

Las figuras 70 y 71 muestran de mejor manera la inclinación definida hacia el nororiente, lo que permite entender los efectos que podría tener en la morfología potencial de edificaciones en caso de seleccionar este sub-rango como el que defina las restricciones morfológicas específicas para este conjunto de predios, situación similar ocurre en el sub-rango de dos horas entre (Fig. 74 y 75), el que aumenta considerablemente la altura máxima pero la inclinación del volumen restringiría considerablemente la morfología potencial de una edificación.

Es posible ver que tanto en rangos de tres y dos horas, la volumetría definida por el diseño algorítmico permite superar los planos inclinados por medio de las rasantes, para el caso de tres horas (Fig. 72 y 73), el cual no alcanza la altura máxima del volumen definido únicamente por rasantes. Mientras que el volumen de dos horas (Fig. 76 y 77) superan la altura máxima hacia el norponiente, pero queda contenido considerablemente hacia el sur oriente.

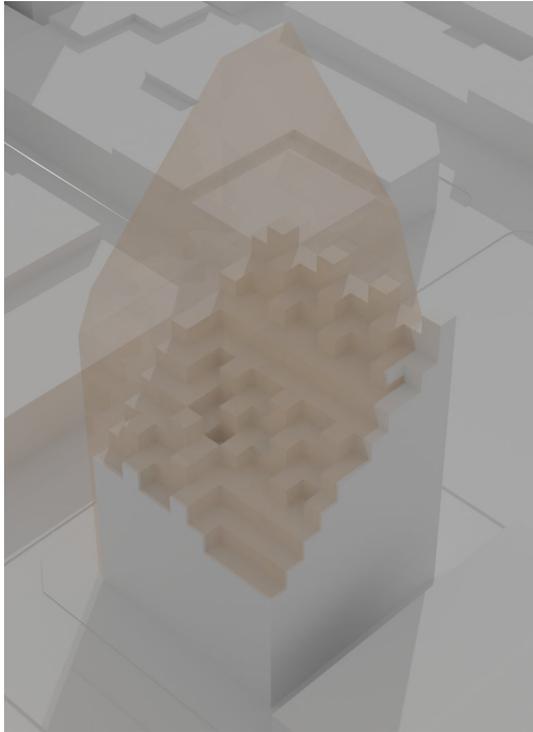


Fig. 70: Relación entre volumen generado por rasante y volumen definido por sub-rango 2 y 3.  
Fuente: Elaboración propia

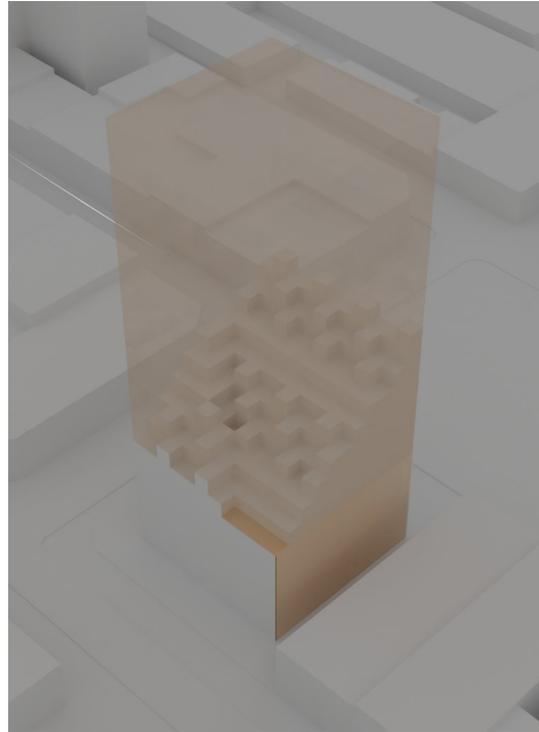


Fig. 71: Relación entre volumen generado por estudios de sombra y sub-rangos 2 y 3.  
Fuente: Elaboración propia

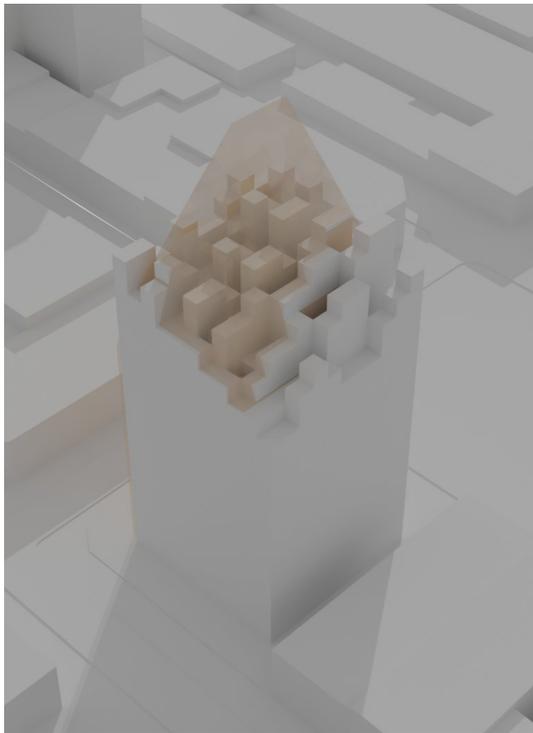


Fig. 72: Relación entre volumen generado por rasante y volumen definido por sub-rango 4.  
Fuente: Elaboración propia

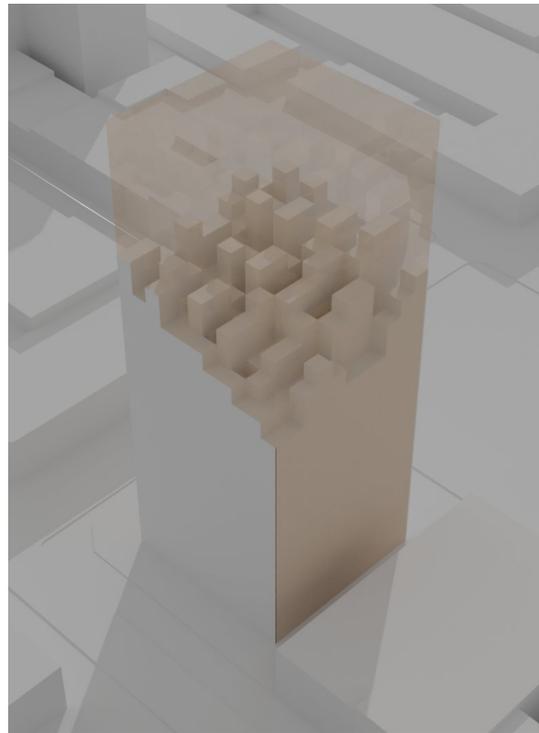


Fig. 73: Relación entre volumen generado por estudios de sombra y sub-rango 4.  
Fuente: Elaboración propia

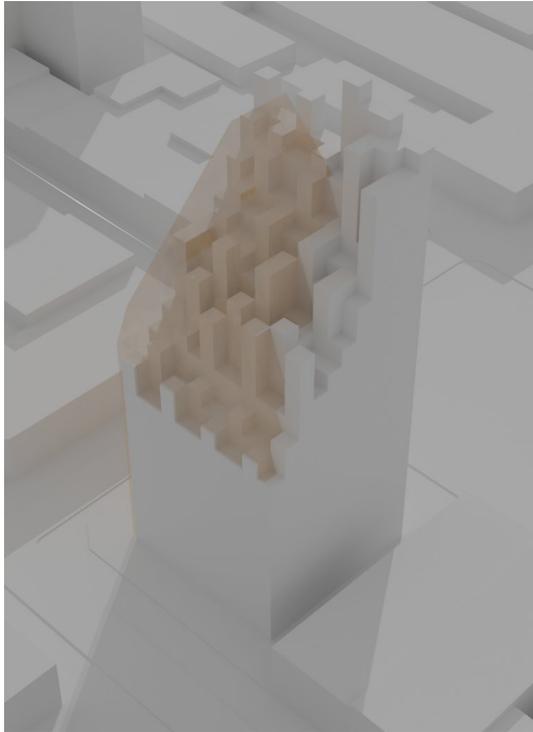


Fig. 74: Relación entre volumen generado por rasante y volumen definido por sub-rango entre 13 y 15 hrs.  
Fuente: Elaboración propia

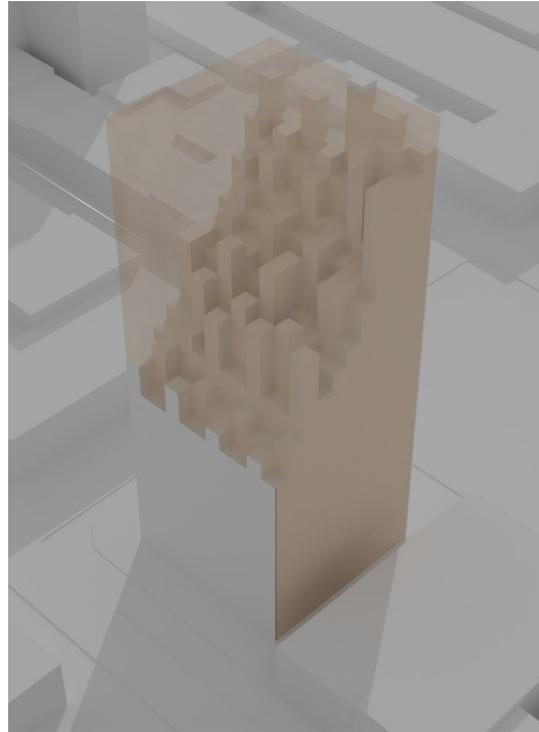


Fig. 75: Relación entre volumen generado por estudios de sombra y sub-rango entre 13 y 15 hrs.  
Fuente: Elaboración propia

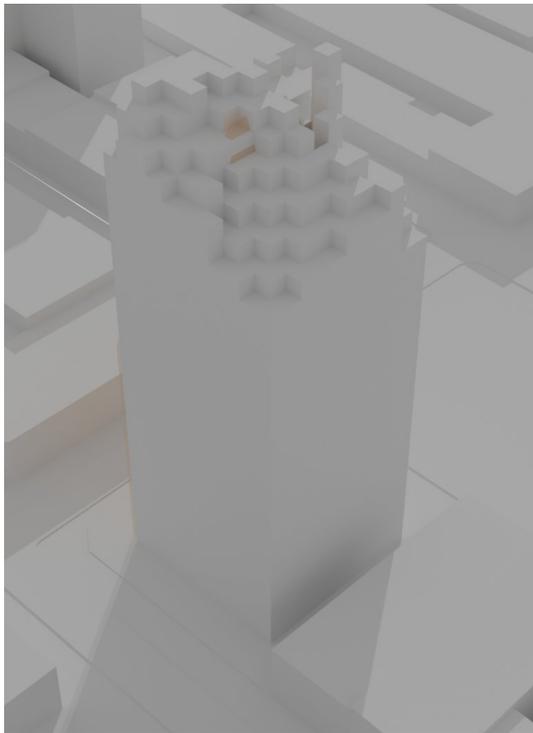


Fig. 76: Relación entre volumen generado por rasante y volumen definido por sub-horario entre 14 y 16 hrs.  
Fuente: Elaboración propia

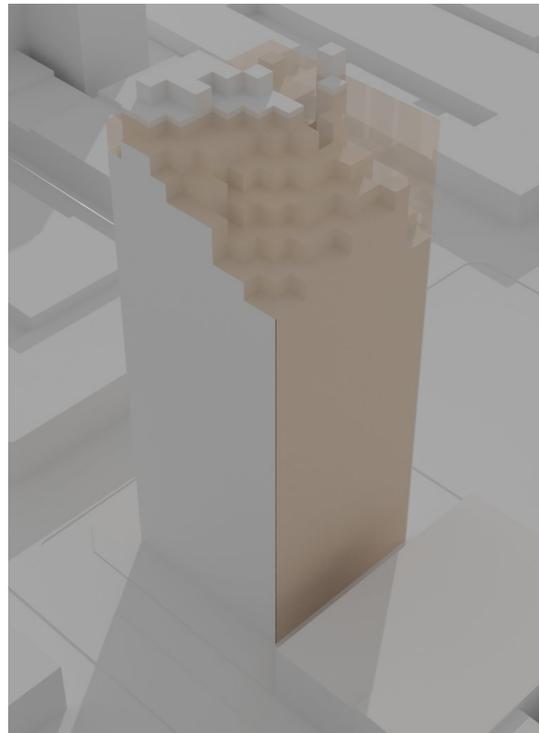


Fig. 77: Relación entre volumen generado por estudios de sombra y sub-rango entre 14 y 16.  
Fuente: Elaboración propia

Es posible comprender cómo el potencial de aumento en altura sobre los límites definidos por las rasantes que permite la definición de los estudios de sombra, no implica que el volumen teórico garantice la accesibilidad solar para los rangos horarios establecidos, para ninguno de los casos simulados, con dos y tres horas de asoleamiento directo mínimo durante el día con menos luz natural.

Frente a la posibilidad de plantear la implantación de esta metodología para definir la morfología urbana surgen los cuestionamientos sobre cómo podría interactuar con otros instrumentos normativos que tienen influencia sobre la construcción del espacio, tanto en relación con el coeficiente de ocupación de suelo, el cual, para el caso de estudio no se consideró, ya que el volumen absoluto comprende la utilización de todo el área posterior a la definición de los distanciamientos, cómo en para el coeficiente de constructibilidad y las modificaciones de permitidas por fusiones prediales. Estos instrumentos quedaron fuera de consideración para la investigación puesto que el objetivo no es restringir las libertades de diseño de quienes proyectan, sino resguardar el derecho a la accesibilidad solar de los espacios existentes.

Este contraste entre la propuesta de esta investigación y las metodologías mencionadas durante el marco teórico recae en la búsqueda por definir morfologías que no restrinjan la que aporten al dialogo y debate durante procesos participativos como las audiencia ciudadana planteada para este caso particular, mientras que Darmon (2018) y De Luca (2020) plantean la búsqueda optimizada de morfologías que permitan la accesibilidad solar condicionada tanto por habitáculos como por núcleos de circulación, lo que potencialmente limitaría los debates sobre qué criterios serán seleccionados para plantear modificaciones y excepciones normativas.

Al continuar la búsqueda de explotar las potencialidades que tiene trabajar con elementos en espacios tridimensionales en lugar de la proyección bidimensional, el potencial gráfico y la facilidad de interpretar la aplicación de las restricciones normativas que entrega esta metodología (Fig. 78 - 80), permitiría dotar de transparencia en los debates dentro del espacio de consulta ciudadana que experimentan los procesos de modificación de los instrumentos normativos municipales.

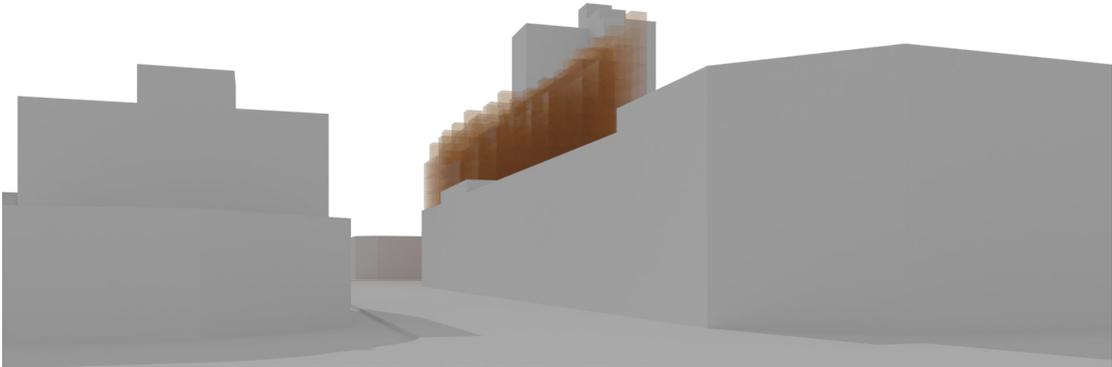


Fig. 78: Vista desde intersección entre calle Dr. Brunner y Av. 10 de Julio.  
Fuente: Elaboración propia

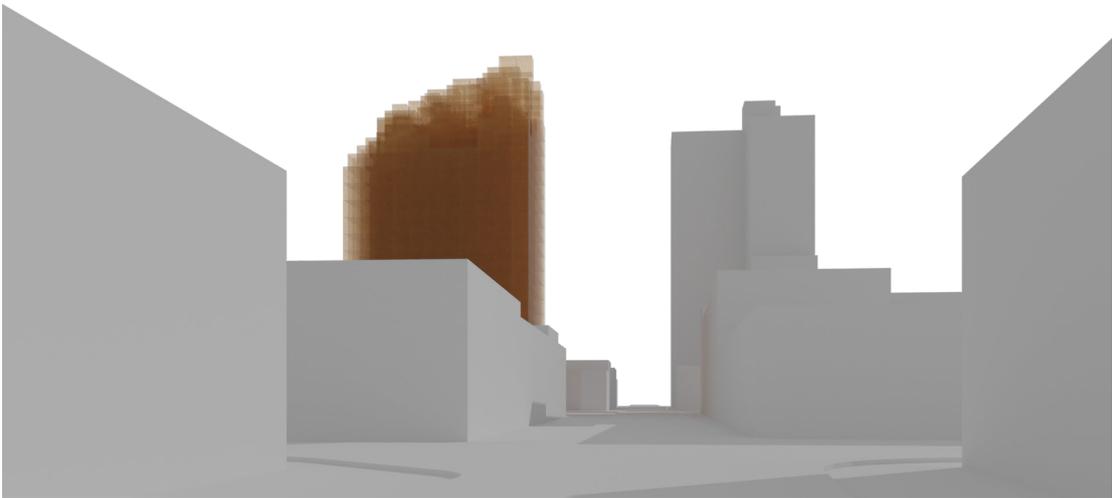


Fig. 79: Vista desde intersección enter Av. Lira y AV. 10 de Julio.  
Fuente: Elaboración propia

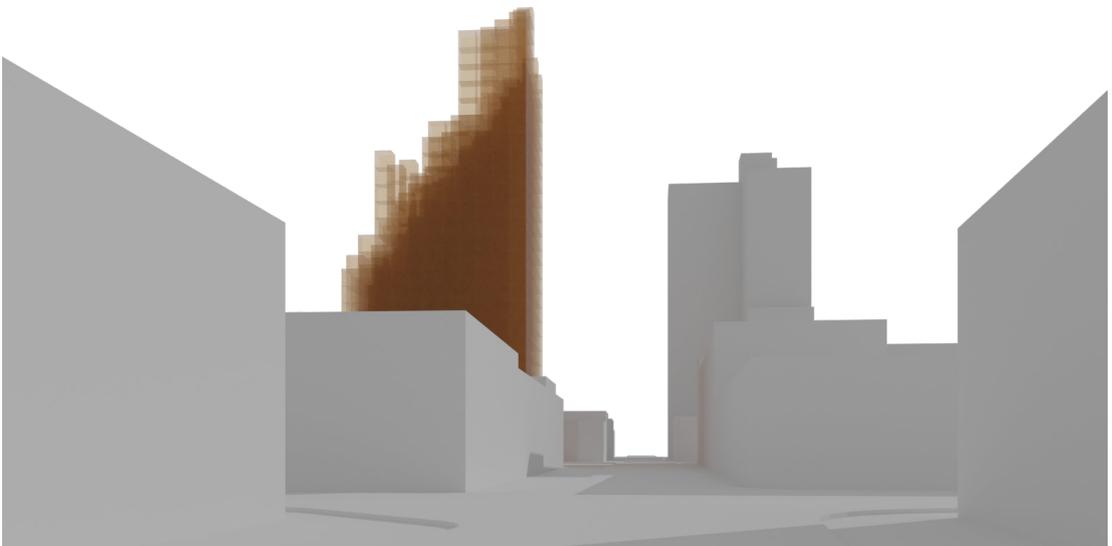


Fig. 80: Vista desde intersección enter Av. Lira y AV. 10 de Julio.  
Fuente: Elaboración propia

# Conclusiones

En este trabajo se presentó una herramienta para complementar los instrumentos de planificación urbana, la cual integra al diseño algorítmico como motor gráfico y de cálculo para determinar formas alternativas de volúmenes teóricos en contextos urbanizados con el fin de asegurar el acceso a la iluminación natural condicionado por rangos horarios. Esta herramienta se inspira en la morfogénesis por medio de eliminación de voxels y la generación de envolventes solares inversas. Resultando en una alternativa con la capacidad de adaptarse a las complejidades tanto del contexto urbano como de las voluntades de quienes participan en la construcción del espacio. Buscando generar un aporte al desarrollo de ciudades equilibradas y prevenir la aparición de externalidades negativas relacionadas a la accesibilidad solar durante el crecimiento y renovación urbana.

La problemática del crecimiento urbano ha sido una constante a la que se ha tenido que enfrentar los planificadores urbanos durante los períodos históricos experimentados e identificados en el debate sobre la planificación urbana. Las proyecciones de crecimiento demográfico urbano permiten plantear que continuará siendo una problemática durante las próximas décadas. Junto con esto, es posible ver cómo las herramientas actuales y las teorizadas tanto para complementar y mitigar las consecuencias de la renovación urbana por medio de densificación residencial, como las que buscan integrar accesibilidad solar dentro del proceso de planificación urbana carecen de mecanismos que permitan prevenir la aparición de estas externalidades.

Frente a este escenario, la metodología propuesta durante esta investigación permitiría desligar la planificación de normas genéricas, dando espacio a la personalización de la evaluación de las potencialidades morfológicas que garanticen la accesibilidad solar en contextos urbanos complejos. Este potencial de responder de manera específica a las condiciones del contexto urbano permitiría integrar la evaluación conjunta de edificaciones y espacios donde los habitantes temporales del espacio realizan sus actividades, espacios tales como circulaciones, áreas verdes u otros contenidos dentro de la trama urbana, considerando la correcta implementación de las condiciones relacionadas a la posición geográfica del contexto donde se realicen las evaluaciones.

Considerando que el alcance de este experimento contiene únicamente la accesibilidad solar como variable, la implementación de diseño algorítmico podría posicionarse dentro del proceso de planificación urbana como alternativa a los estudios de sombra, permitiendo garantizar no solamente el resguardo del derecho a la iluminación natural tanto en fachadas como en espacio públicos, sino que también resguardando y optimizando los límites donde el mercado puede ejercer, convirtiéndose así en un potencial elemento fortificador del control de los instrumentos de planificación sobre el crecimiento urbano.

En paralelo, el potencial que representa la conceptualización y posterior ejecución por medio de algoritmos, permite plantear la integración diferentes criterios de diseño en un algoritmo con la capacidad de realizar cálculos simultáneos, tanto por medio de algoritmos de optimización de múltiples objetivos, a través de los cuales sería posible evaluar diferentes escenarios en simultáneo. Esto podría materializarse como la generación de volúmenes teóricos de diferentes predios o considerar otras variables bioclimáticas. Del mismo modo, es posible plantear la potencialidad de integrar otras ramas del desarrollo de las ciencias de la computación, como la línea que desarrolla la inteligencia artificial, la cual, a diferencia de la propuesta metodológica planteada en esta investigación, no ejecuta criterios determinados, sino que evalúa y desarrolla sistemas de evaluación basados en el análisis en bases de datos, las cuales definen los criterios por los que el diseño algorítmico tomaría parte en el proceso de proyección de los volúmenes teóricos. Considerar las potencialidades de integrar algoritmos que evalúen criterios de diseño y su aporte a la buena densidad (Vicuña y Torres 2020) permitiría contar con herramientas que aporten de manera automatizada a las condiciones urbanas en escalas menores y más detalladas, como por ejemplo, seccionales.

El potencial gráfico y representativo de trabajar con técnicas de proyección en tres dimensiones podría aportar a la construcción de ciudades más equilibradas, ya que la facilidad de interpretación de los instrumentos normativos por medio de imágenes podría integrar a quienes no cuentan con conocimientos y formación técnica respecto a normativas y planes reguladores, transformando la herramienta de planificación en un agente democratizador del procesos, al contribuir en el debate durante las consultas ciudadanas y otros procesos participativos, integrando el concepto de planificación a través del debate (Healey, 1992) a los agentes y sus voluntades en búsqueda de acuerdos que permitan equilibrar intereses económicos y socioculturales (Parraguez, Rodríguez y Santander, 2006).

De manera complementaria, el desarrollo y ejecución por medio de software de licencias públicas y de código abierto tiene como principal potencialidad la producción de software especializado para complementar los instrumentos de planificación urbana, ya que la herramienta y el lenguaje seleccionados no cumplen únicamente la función de transparentar los procesos que materializan los criterios de diseño, sino que integran la posibilidad de generar contenido, mejoras por sobre todo abren las herramientas para debatir sobre los criterios con los que se proyecta el espacio, situando el quehacer arquitectónico como un agente articulador entre quienes buscan participar de la planificación urbana. Es posible plantear entonces, para trabajos e investigaciones posteriores la posibilidad de crear un software especializado de acceso gratuito construido en base Blender, siendo una redistribución que permita acceder de manera transversal a la herramienta por la cual se visualiza la imagen objetivo de la

ciudad.

Es importante reconocer que el problema planteado durante esta investigación, el cual reconoce como principal vulnerabilidad dentro del proceso de planificación urbana la falta de control por parte de los instrumentos de planificación a manos del mercado, opera a través de diversas variables y no es posible dar una respuesta concreta únicamente considerando la accesibilidad solar. Sin embargo, los alcances obtenidos durante el desarrollo de esta investigación permiten plantear la posibilidad de implementar esta técnica proyectual como un elemento innovador dentro del proceso de planificación urbana, quedando abierta la posibilidad de desarrollar herramientas que consideren otras variables para investigaciones posteriores. Del mismo modo, es posible concluir esta investigación de manera positiva respecto a las preguntas de investigación planteadas, el desarrollo del ejercicio permite plantear la implementación dentro del proceso y detalla la metodología por la cual se desarrolló esta implementación.

Resulta interesante considerar que, durante el desarrollo de este trabajo, las herramientas y condiciones tanto académicas como profesionales permiten considerar que la automatización, ya presente en nuestro quehacer a través de las tecnologías BIM, formará parte del trabajo y la colaboración interdisciplinaria, en las cuales nuestra responsabilidad como planificadores urbanos será la de conjugar las voluntades e intereses de los habitantes en función de lograr una ciudad y espacio urbano equilibrado.

# Bibliografía

## Bibliografía

- Baerm, Steve, Tibbitsm, Skylar y Van der Harten, Arthur. (2011). Python for Rhinoceros 5. Robert McNeel & Associates, pp 4-9
- Barton, Jonathan. Irarrázabal Felipe. (2016), Adaptación al cambio climático y gestión de riesgos naturales: buscando síntesis en la planificación urbana. Rev. geogr. Norte Gd. no.63 Santiago mayo 2016
- Blender. <https://www.blender.org/about>
- Capeluto, I. G. & Ochoa, C. (2017). Intelligent envelopes for high-performance buildings: Design and strategy. Cham, Suiza: Springer.
- Capeluto, I., Yezioro, A., Bleiberg, T. & Shaviv, E. (2005). From computer models to simple design tools: Solar rights in the design of urban streets. Ninth International ibpsa Conference (pp. 131-138). Montreal, Canadá, agosto 15-18. <https://pdfs.semanticscholar.org/386e/ac6e4e8c99262f4bd4cb4efe9feae3980a6c.pdf>
- Cárdenas, Luz y Morales, Luis. (2019), Urbanismo bioclimático en Chile: propuestas de bizonas para la planificación urbana y ambiental. EURE 45(136), pp. 135 – 162
- Carrasco, Gonzalo. (2020) 1979 Año cero. La normativa de rasantes, el modelo japonés y la formación de la ciudad neoliberal. ARQ, 104 <https://www.scielo.cl/pdf/arq/n104/0717-6996-arq-104-52.pdf>
- Daher, A. (2013). El sector inmobiliario y las crisis económicas. EURE, 39(118), 47-76. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612013000300003>.
- Darmon, Ilona. (2018) Voxel computational morphogenesis in urban context: proposition and analysis of rules-based generative algorithms considering solar access. <https://www.researchgate.net/publication/329738763>
- De Luca, Francesco; Dogan Timur y Sepúlveda Abel. (2021). Reverse solar envelope method. A new building form-finding method that can take regulatory frameworks into account. Automation in Construction <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103518>
- Gross Patricio. (1991). Santiago de Chile (1925-1990): Planificación Urbana y Modelos Políticos. EURE (Vol. XVII, N<sup>o</sup> 52/53), pp. 27-52, Santiago de Chile.
- Healey, Patsy. (1992). Planning through Debate: The communicative turn in planning theory. The Town Planning Review, Vol. 63, No. 2 (Apr., 1992), pp. 143-162
- Holland, Nathaniel. (2011). Inform Form Perform. Theses from the Architecture Program 120. <http://digitalcommons.unl.edu/archthesis/120>
- Instituto Nacional de Estadísticas (ine), Chile. (2018). Síntesis de resultados. Censo 2017. Santiago, Chile: ine. <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf>
- Lee, Kent. (2014) Python programming fundamentals. Springer, ISBN 978-1-4471-6641-2, London.
- Municipalidad de Buenos Aires. (2017). Código de Planeamiento Urbano de la Ciudad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

- Merino, Luis; Hernández, Ángel; Vermeulen, Thibaut y García Claudia (2021). Incorporación del acceso solar en la planificación urbana de las ciudades chilenas. *EURE*, 47(142), pp. 185 – 205
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (minvu), Chile. (2018). Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. Santiago, Chile: minvu.  
<https://csustentable.minvu.cl/estandares-cs/>
- Ilustre Municipalidad de Santiago. (2021) Decreto 3831  
<https://www.munistgo.cl/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-3831que-suspende-proyecto-de-modificacion-al-PRCS.pdf>
- Kneusel, Ronald. (2021). *Practical Deep Learning: a Python-based introduction*. First Edition. ISBN 9781718500747, San Francisco
- Knowles, R. (2003). The solar envelope: Its meaning for urban growth and form. *Energy and Buildings*, 35(1), 15-25. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00076-2)
- Koolhaas, Rem. (2004). *Delirio de Nueva York : Un manifiesto retroactivo para Manhattan*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Organización de las Naciones Unidas (onu). (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Key Facts*.  
<https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018- KeyFacts.pdf>.
- Parraguez, Leslie. Rodríguez Gisel y Santander Marcela (2006) ¿Cómo se piensa la ciudad? Análisis crítico de un siglo de gestión y planificación urbana. *EURE*, 32(96), pp 135 – 140, Santiago de Chile
- Parrocha Beguin, Juan; Pavez Reyes, María Isabel. (2016). *Los primeros planes intercomunales Metropolitanos de Chile*. (Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento de Urbanismo, 2016-08)
- Rajaa Issa (2008) *Essential Mathematics for computational design - Third edition*. Robert McNeel & Associates.  
<https://www.rhino3d.com/download/rhino/6/essentialmathematics>.
- Ratti, C., Baker, N. & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), 762-776. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>
- Raymon, Erik. (2001). *The Cathedral and the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary, Revised Edition*. O'Reilly & Associates, Inc
- Sabatini, F., Soler F. (1995). Paradoja de la planificación urbana en Chile. *EURE* (Vol. XXI, N°62), pp 61-73, Santiago de Chile.
- Saldías, M. (2016). *Acceso solar en áreas urbanas de Chile y su impacto en el balance energético residencial*. Memoria de título. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Schneider, Christian & Koltsova, Anastasia & Schmitt, Gerhard. (2011). Components for parametric urban design in Grasshopper from street network to building geometry. pp.68-75.

- Singh Priyamwada, Devadutt, Soumitree, Pallavi, Manta. (2015). Early Stage Building Environmental analysis case study of a large residential community in India. 14th Conference of International Building Performance Simulation Association. Hyderabad, India. Dec 7-9, 2015
- Tadeschi A., Lombardi D. (2014) The Algorithms-Aided Design (AAD). In: Hemmerling M., Cocchiarella L. (eds) *Informed Architecture*. Springer, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-53135-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53135-9_4)
- Vicuña, Magdalena. Impacto de la densificación residencial intensiva en la segmentación del tejido urbano de Santiago: un enfoque cuantitativo. *Revista 180 40* (2017).
- Vicuña, Magdalena. Pumarino, Nicole. Urbina, Andrea. (2020). Pago por impactos en proyectos de densificación residencial intensiva del Área Metropolitana de Santiago: análisis crítico de los aportes al espacio público en la nueva legislación chilena. *EURE* (Vol. XLVI, N<sup>o</sup> 139, pp 47-71, Santiago de Chile.
- Weisberg, David. (2008). *The Engineering Design Revolution: CAD History*. Englewood, <http://www.cadhistory.net>

# Anexo

## Anexo

De manera complementaria a los contenidos presentes en el capítulo tres, este anexo contiene la explicación detallada del código desarrollado durante esta investigación.

```
1 import bpy
2 import mathutils
3 import numpy
```

Previo al primer bloque determina el contexto en el cual se desarrollará el algoritmo, cada módulo aporta de manera diferente, bpy (Blender Python) es el módulo principal para poder utilizar los scripts propios de Blender escritos en Python. mathutils es otro módulo perteneciente a Blender con el cual es posible determinar la intersección entre una línea y un plano. numpy es un módulo perteneciente a Python, otorga herramientas matemáticas para facilitar el cálculo de los sub-rangos horarios, para el caso de estudio, simplifica el cálculo de los sub-rangos horarios.

El primer bloque determina la posición de los puntos de interés, los cuales, en el proceso de producción del código representan las ventanas de las edificaciones ubicadas al este, sur y oeste del predio a simular, sin embargo, debido a las condiciones particulares de este escenario, la evaluación en ventanas de edificaciones vecinas no representa el escenario menos favorable, ya que garantizar la accesibilidad a la luz natural en las calzadas determinadas previamente es el foco de esta simulación, esto significa que utilizar puntos de interés distanciados cada tres metros permite la correcta evaluación, este proceso es paralelo para cada grupo de puntos de interés.

```
4 PuntosConjunto = []
5 PuntosSur = bpy.data.collections['Puntos_S']
6 VentanasConjuntoSur = []
7 for q in PuntosSur.objects:
8     PuntosConjuntoSur.append(q)
9 PuntosConjunto.append(PuntosConjuntoSur)
10 PuntosEste = bpy.data.collections['Puntos_E']
11 PuntosConjuntoEste = []
12 for s in PuntosEste.objects:
13     PuntosConjuntoEste.append(s)
14 PuntosConjunto.append(PuntosConjuntoEste)
15 PuntosOeste = bpy.data.collections['Puntos_O']
16 PuntosConjuntoOeste = []
17 for r in PuntosOeste.objects:
18     PuntosConjuntoOeste.append(r)
19 PuntosConjunto.append(PuntosConjuntoOeste)
```

En primera instancia, en la línea 4 del código se declara una lista vacía que contendrá tres listas, según la orientación en la que los puntos de interés se encuentren ubicados respecto del volumen absoluto, la líneas 5, 10 y 15 inician los sub-bloques que determinan variables temporales que contienen los objetos presentes en las colecciones Puntos\_S, Puntos\_E y Puntos\_O. posteriormente, las líneas 6, 11 y 16 declaran las listas a ser contenidas dentro de PuntosConjunto, finalmente las líneas 7, 12 y 17 inician los ciclos que iteran agregando cada elemento presente en las variables declaradas al principio del sub-bloque a las listas declaradas en las líneas anteriores. Finalmente, cada sub-bloque termina agregando la lista con todos los puntos de interés a la lista principal.

Una vez terminado el primer bloque el resultado es la lista anidada de la siguiente manera:

```
PuntosConjunto = [ [Punto Sur 1, Punto Sur 2, ...], [Puntos Este 1, Punto Este 2, ...],
                  [ Punto Oeste 1, Punto Oeste 2,...] ]
```

El segundo bloque, contenido en una línea de código, tiene como funcionalidad declarar la variable que contiene el listado con los voxeles a evaluar.

```
20 ConjuntoVoxels = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects
```

El tercer bloque determina el rango horario general y los sub-rangos horarios.

```
21 HoraInicio = 11
22 HoraTermino = 18
23 SubRango = 3
24 RangoHorarioBruto = []
25 for h in range(HoraInicio, HoraTermino+1, 1):
26     RangoHorarioBruto.append(h)
27 SubDominios = []
28 for i in range(len(RangoHorarioBruto)):
29     SubDominio = RangoHorarioBruto[i]+SubRango
30     if SubDominio <= RangoHorarioBruto[-1]:
31         SubDominios.append([ RangoHorarioBruto[i], SubDominio])
```

Una vez determinados los valores para el dominio y la duración de cada sub-rango se declara una lista para que contenga el rango horario bruto, separados por hora (líneas 21 - 24). De esta manera, durante la línea 25 se declara el inicio de un ciclo que itera entre ambos extremos del dominio, por lo que la lista queda determinada por la operación en la línea 26 de la siguiente manera:

```
RangoHorarioBruto = [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]
```

La línea 27 declara una lista vacía para contener listas con los sub-dominios, estos se determina en las líneas 28 y 29 iterando a partir del primer valor sumado a la variable SubRango, determinando por medio de una declaración condicional if la longitud del sub-rango siempre y cuando no supere al último valor contenido en la lista RangoHorarioBruto (línea 30). Una vez terminado este bloque (línea 31), la lista SubDominios contiene los rangos:

```
[ [11,14], [12,15], [13,16], [14,17], [15,18] ]
```

Para el caso de estudio, el alcance obtenido es el de un proceso semi-automatizado, lo que implica que las iteraciones entre sub-rangos horarios se ejecuta de manera manual, editando los valores HoraInicio y HoraTermino para cada iteración con los valores obtenidos en cada sub-rango.

El cuarto bloque del código determina los vectores con las posiciones del sol dentro del sub-domino.

```
32 VectoresSol = []
33 for j in range(len(SubDominios)):
34     RangoHorarioSolar = []
35     SubDominioInicio = SubDominios[j][0]
36     SubDominioTermino = SubDominios[j][1]
37     for i in numpy.arange(SubDominioInicio, SubDominioTermino, .08).round(1):
38         RangoHorarioSolar.append(i)
39     VecSol = []
40     for t in RangoHorarioSolar:
41         bpy.context.scene.sun_pos_properties.time = 0
42         bpy.context.scene.sun_pos_properties.time = 1*t
43         PosSolX = bpy.data.objects['Sun'].location[0]
44         PosSolY = bpy.data.objects['Sun'].location[1]
45         PosSolZ = bpy.data.objects['Sun'].location[2]
46         VecSol.append([PosSolX, PosSolY, PosSolZ])
47     VectoresSol.append(VecSol)
```

La organización de las posiciones solares se configura a partir de una lista anidada, comienza con declarar la lista vacía VectoresSol. La línea 33 declara el primer ciclo iterativo, el cual se encarga de generar las instancias temporales dentro de los límites de cada sub-rango. El primer movimiento necesario es declarar una lista vacía dentro del ciclo permite agregar información temporal durante el proceso que calcula las posiciones solares. Durante las líneas 35 y 36, el valor de la variable temporal declarada j representa cada uno de los sub-rangos, donde los valores 0 y 1 representan el valor de su primer y ultimo elemento. En la línea 37, se declara el ciclo que determina un rango

contenido entre las variables previamente declaradas `SubDominioInicio` y `SubDominioTemrino`, divididos cada 5 minutos o 0.08 hrs, el argumento `round`, perteneciente al módulo `numpy`, permite redondear el valor en 1 decimal, simplificando el calculo y la lectura de datos. Una vez completado el ciclo, la lista temporal `RangoHorarioSolar` contiene 36 elementos, para el primer sub-rango horario [11,14] la lista contiene los valores [11.00, 11.05, 11.10, 11.15, ...]

Una vez calculadas todas las Instancias dentro del rango, se declara otra lista temporal para contener la información de las posiciones en cada elemento de la lista `RangoHorarioSolar` (línea 39). Una vez iniciado el ciclo que itera por cada elemento presente en la lista (línea 40), el primer movimiento corresponde a posicionar el sol en la instancia temporal correspondiente a la hora 0 (línea 41), esto es necesario para evitar problemas relacionados a la lectura de la última posición declarada durante la iteración actual para iteraciones posteriores.

La siguiente línea del código posiciona el objeto sol en la posición que corresponde al momento temporal  $t$ . Una vez posicionado el sol en la posición correspondiente (línea 42), es necesario crear tres variables temporales que contengan la información del vector posición temporal del objeto sol separado por cada eje cartesiano, donde  $\langle(x,y,z)\rangle_0$  corresponde al valor del elemento en  $x$ , 1 corresponde al valor del elemento en  $y$ , mientras que 3 corresponde al valor del elemento en  $z$ , esto es necesario debido a que la forma en la que esta escrito el programa “Sun Position” que posiciona el sol en el espacio tridimensional entrega el valor de salida en un formato unitario, lo que complejiza el proceso posterior para calcular la intersección, por lo que separar cada valor por el eje en que pertenece permite dar el formato en el que trabaja el módulo `mathutils`.

Para poder utilizar estos valores en los bloques posteriores es necesario agregar a la lista temporal `VecSol`, los valores de la posición actual en una lista de tres elementos. De esta manera una vez terminado el ciclo declarado entre las líneas 40 y 46, la lista `VecSol` contiene los valores en el siguiente formato [  $[x_1, y_1, z_1]$ ,  $[x_2, y_2, z_2]$ ,  $[x_3, y_3, z_3]$ , ...].

Finalmente, una vez conseguidos todas las posiciones del sub-rango, se agrega la lista `VecSol` a la lista `VectoresSol` (línea 47).

El quinto bloque del código corresponde al que determina la posición de los puntos de interés.

```

48 VectoresPuntosSol = []
49 for v in range(len(PuntosConjunto)):
50     VectoresPuntosSolTemporal = []
51     for s in range(len(SubDominios)):

```

```

52  VectoresSolSubdominio = []
53  for e in range(len(PuntosConjunto[v])):
54      VectoresPuntosSolSubdominio = []
55      SubrangoIteracion=len(VectoresSol[s])
56      for d in range(SubrangoIteracion):
57          VectorSolPuntos = (
58              VectoresSol[s][d][0] + PuntosConjunto[v][e].data.polygons[0].center[0],
59              VectoresSol[s][d][1] + PuntosConjunto[v][e].data.polygons[0].center[1],
60              VectoresSol[s][d][2] + PuntosConjunto[v][e].data.polygons[0].center[2]
61          )
62          VectoresPuntosSolSubdominio.append(VectorSolPuntos)
63      VectoresSolSubdominio.append(VectoresPuntosSolSubdominio)
64      VectoresPuntosSolTemporal.append(VectoresSolSubdominio)
65  VectoresPuntosSol.append(VectoresPuntosSolTemporal)

```

Debido a que la posición del sol en cada instancia de los sub-rangos se determina desde el origen del modelo, de coordenadas (0,0,0), es necesario realizar una suma de vectores para poder determinar el vector que representa la línea producida entre los puntos de interés y la posición del sol. De esta manera la metodología de almacenamiento de información seguirá el patrón realizado durante el bloque que organiza las ventanas que rodean al conjunto de volúmenes a evaluar, es por esto necesario declarar una lista vacía para almacenar la información (línea 48), similar al proceso del segundo bloque, el ciclo declarado en la línea 49 itera entre los 3 elementos presentes en la lista PuntosConjunto, donde 0 corresponde a los puntos ubicados al sur del predio a evaluar, 1 corresponde a los elementos ubicados al este y 2 a los elementos ubicados al oeste del predio. Una vez iniciado el ciclo, dentro de cada grupo de puntos, se declara una lista para contener los puntos generados a partir de cada punto con la ubicación del sol por cada instancia temporal contenida en la lista PuntosConjunto[v] donde cada variante v contiene las 36 instancias de puntos conjunto (líneas 50 -53), dentro de este ciclo se declara la lista que contendrá de manera temporal la suma de vectores VectoresPuntosSolSubdominio y la variable con el largo de la lista VectoresSol[s], donde s itera por cada subdominio (líneas 54 - 55).

Finalmente, el tercer nivel de sub-iteración realiza la suma de vectores por separado según cada eje, donde VectoresSol[s][d][0] corresponde al elemento del eje x de la posición del sol, mientras que PuntosConjunto[v][e].data.polygons[0].center[0] corresponde a la posición en el eje x del punto de interés e contenido en el sub-domino v de la lista PuntosConjuto, perteneciente a cada subdominio dentro de cada orientación. Una vez calculados todos los puntos, se agregan de manera retrocediendo en cada nivel de iteración (líneas 62 - 65), donde el resultado de la información contenida en VectoresPuntosSol se ordena de la siguiente manera:

$$\text{VectoresPuntosSol} = [ [\text{sur}], [\text{este}], [\text{oeste}] ]$$

$$\begin{aligned} [\text{sur}] &= [ [\text{SubDominio1}], [\text{SubDominio2}], \dots ], \\ [\text{este}] &= [ [\text{SubDominio1}], [\text{SubDominio2}], \dots ], \\ [\text{oeste}] &= [ [\text{SubDominio1}], [\text{SubDominio2}], \dots ] \end{aligned}$$

$$[\text{SubDominio1}] = [ [\text{Punto1}], [\text{Punto2}], \dots ], [\text{SubDominio2}] = [ [\text{Punto1}], [\text{Punto2}], \dots ], \dots$$

$$[\text{Punto1}] = [\text{Pos1}, \text{Pos2}, \text{Pos3}, \dots ], [\text{Punto2}] = [\text{Pos1}, \text{Pos2}, \text{Pos3}, \dots ], [\text{Punto3}] = [\text{Pos1}, \text{Pos2}, \text{Pos3}, \dots ], \dots$$

Una vez completados los cinco primeros bloques del código, contamos con la información necesaria para proceder al bloque que evalúa la intersección entre los voxeles y las líneas producidas entre los puntos de interés y la posición del sol en cada instancia de cada subdominio. Este proceso se desarrolla por medio de un ciclo que itera por cada subdominio, conteniendo tres sub-iteraciones que determinan la intersección línea-voxel, para lo cual es necesario conocer la información contenida en cada voxel. Los cuales se construyen a partir de 8 vértices, la información perteneciente a estos vértices es accesible por medio del módulo `bpy.data.collections.objects.data.vertices`, mientras que la información correspondiente a las caras, de las cuales es necesario conocer el centro y la dirección de la normal se obtiene mediante el módulo `bpy.data.collections.objects.data.polygons`.

```
66 for sd in range(len(VectoresPuntosSol)):
67     for i in range(len(ConjuntoVoxels)):
68         ConjuntoVoxels[i].hide_set(False)
```

De esta manera, el primer nivel de iteración se determina según el largo de la lista `VectoresPuntosSol`, el cual contiene las listas `[Sur]`, `[Este]` y `[Oeste]`, donde previo a la evaluación de las intersecciones se declara un ciclo que itera por cada elemento presente en la lista que contiene los voxeles, confirmando que la visibilidad se encuentre habilitada, requisito necesario para poder ejecutar la evaluación sin errores.

```
69     for ssd in range(len(VectoresPuntosSol[sd])):
70         for vs in range(len(VectoresPuntosSol[sd][ssd])):
71             for pos in range(len(VectoresPuntosSol[sd][ssd][vs])):
72                 for vox in range(len(ConjuntoVoxels)):
73                     if ConjuntoVoxels[vox].hide_get() == False:
```

Una vez que todos los voxeles se encuentran visibles en el espacio de modelado, se

declara el ciclo que itera dentro de cada una de las listas con las orientaciones (línea 69), dentro de esta lista se declara un tercer sub-nivel iterativo por medio de un ciclo que evalúa dentro de cada subdominio perteneciente a cada orientación (línea 70), dentro de este ciclo se declara un cuarto ciclo, que itera por cada punto de interés, donde la variable pos corresponde al vector posición del sol respecto del punto de interés vs del nivel previo de iteración. El quinto sub-nivel iterativo (línea 73) se declara por cada voxel, donde la condición de evaluación depende del valor ssd (Sur, Este u Oeste).

```

74         if sd==0:
75             PolSurCentro = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.polygons[0].center
76             PolSurNormal = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.polygons[0].normal
77             PolSurVertA = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[0].co
78             PolSurVertB = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[3].co
79             PolSurVertC = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[4].co
80             PolSurVertD = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[6].co
81             ParametrosTempSur = [
82             PolSurCentro,
83             PolSurNormal,
84             PolSurVertA,
85             PolSurVertB,
86             PolSurVertC,
87             PolSurVertD,
88             PuntosConjunto[sd][vs].data.polygons[0].center,
89             VectoresPuntosSol[sd][ssd][vs][pos]
90         ]

```

La primera condición evalúa si el punto de interés pertenece al grupo ubicado al sur del predio, de esta manera, aloja las coordenadas de los elementos necesarios para evaluar la intersección entre la línea que se produce entre el punto y la posición del sol, la normal y el centro del polígono orientado hacia el sur, del mismo modo aloja dentro de la lista ParametrosTempSur la información de los cuatro vértices que construyen dicho polígono.

```

91             InterseccionTemporalSur = (mathutils.geometry.intersect_line_plane(
92             ParametrosTempSur[6],
93             ParametrosTempSur[7],
94             ParametrosTempSur[0],
95             ParametrosTempSur[1]))
96             if ParametrosTempSur[4][0] <= InterseccionTemporalSur[0] <=
ParametrosTempSur[2][0] and ParametrosTempSur[4][1] <= InterseccionTemporalSur[1] <=

```

```

ParametrosTempSur[2][1] and ParametrosTempSur[5][2] >= InterseccionTemporalSur[2];
97         ConjuntoVoxels[vox].hide_set(True)

```

Una vez recolectados todos los elementos necesarios, se evalúa la intersección entre el plano que produce la normal PolSurNormal aplicada en el punto PolSurCentro, de esta manera, la línea producida entre PuntosConjunto[sd][vs].data.polygons[0].center y VectoresPosicionSol[sd][ssd][vs][pos], posterior a la obtención de este vector, se evalúa la condición de intersección, de manera tal que si el punto resultante InterseccionTemporalSur tiene su primer valor contenido dentro de los valores extremos en el eje x PolSurVertC[0] y PolSurVectA[0], junto con el valor de la coordenada perteneciente al eje y perteneciente al rango PolSurVertC[1] y PolSurVectA[1], significa que la intersección evaluada anteriormente se encuentra contenida dentro de la línea proyectada en el eje z por el plano paralelo a la orientación sur, de esta manera la tercera condición evalúa si el punto de intersección se encuentra por sobre del punto mas bajo del voxel evaluado. De esa manera, este nivel de iteración elimina el voxel evaluado, junto con todos los que le siguen por encima.

Este procedimiento se realiza de manera similar en los otros dos grupos de puntos de interés, de manera tal que la definición del centro, normal y vértices están condicionadas por la orientación en la que se encuentran.

```

98         if sd==1:
99             PolSurCentro = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.polygons[2].center
100            PolSurNormal = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.polygons[2].normal
101            PolSurVertA = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[0].co
102            PolSurVertB = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[3].co
103            PolSurVertC = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[7].co
104            PolSurVertD = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[5].co

105            ParametrosTempEste=[
106            PolSurCentro,
107            PolSurNormal,
108            PolSurVertA,
109            PolSurVertB,
110            PolSurVertC,
111            PolSurVertD,
112            PuntosConjunto[sd][vs].data.polygons[0].center,
113            VectoresPuntosSol[sd][ssd][vs][pos]
114            ]
115            InterseccionTemporalEste = (mathutils.geometry.intersect_line_plane(
            ParametrosTempEste[6],

```

```

116         ParametrosTempEste[7],
117         ParametrosTempEste[0],
118         ParametrosTempEste[1]))

119             if ParametrosTempEste[4][0] <= InterseccionTemporalEste[0] <=
ParametrosTempEste[2][0] and ParametrosTempEste[4][1] >= InterseccionTemporalEste[1] >=
ParametrosTempEste[2][1] and ParametrosTempEste[5][2] >= InterseccionTemporalEste[2]:
120                 ConjuntoVoxels[vox].hide_set(True)

121     if sd==2:
122         PolSurCentro = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.polygons[3].center
123         PolSurNormal = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.polygons[3].normal
124         PolSurVertA = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[4].co
125         PolSurVertB = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[6].co
126         PolSurVertC = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[2].co
127         PolSurVertD = bpy.data.collections['Voxels_65m'].objects[vox].data.vertices[1].co

128         ParametrosTempOeste=[
129         PolSurCentro,
130         PolSurNormal,
131         PolSurVertA,
132         PolSurVertB,
133         PolSurVertC,
134         PolSurVertD,
135         PuntosConjunto[sd][vs].data.polygons[0].center,
136         VectoresPuntosSol[sd][ssd][vs][pos]
137     ]

138         InterseccionTemporalOeste = (mathutils.geometry.intersect_line_plane(
139             ParametrosTempOeste[6],
140             ParametrosTempOeste[7],
141             ParametrosTempOeste[0],
142             ParametrosTempOeste[1]))

143             if ParametrosTempOeste[4][0] <= InterseccionTemporalOeste[0] <=
ParametrosTempOeste[2][0] and ParametrosTempOeste[4][1] >= InterseccionTemporalOeste[1] >=
ParametrosTempOeste[2][1] and ParametrosTempOeste[5][2] >= InterseccionTemporalOeste[2] :
144                 ConjuntoVoxels[vox].hide_set(True)

```

Una vez terminados todos los niveles iterativos, el resultado entrega el conjunto final de voxeles que representan el volumen máximo optimizado para el rango horario.

Gracias.



