

# ACCESO SOLAR EN ESPACIO URBANO: SIMULACIONES ENERGÉTICAS PARA SU MITIGACIÓN EN ALTA DENSIDAD INMOBILIARIA RESIDENCIAL. SANTIAGO CENTRO SUR<sup>1,2</sup>

SOLAR ACCESS IN THE URBAN SPACE: ENERGY SIMULATIONS FOR ITS MITIGATION IN RESIDENTIAL HIGH-RISE BUILDINGS. SANTIAGO CENTRO SUR

Luz Alicia Cárdenas-Jirón<sup>3</sup>  
Universidad de Chile  
Santiago, Chile

Jing Chang Lou<sup>4</sup>  
Universidad de Chile  
Santiago, Chile

## Resumen

La alta densidad con edificios inmobiliarios de gran altura bloquea el acceso solar al espacio urbano y con ello limita las condiciones térmicas y lumínicas necesarias para la vida del ser humano. La renovación urbanística es parte de la transformación de las ciudades, pero la sobreocupación del suelo debe regularse por los problemas ambientales urbanos generados por el negocio inmobiliario *per se*. El objetivo del artículo es explorar alternativas de ocupación predial considerando algunos parámetros normativos del plan regulador y los efectos energéticos de proyectos inmobiliarios sobre el espacio urbano, mediante el concepto de acceso solar. La metodología considera simulaciones energéticas de forma urbana para obtener como resultado un método de análisis que relacione normativa urbanística con una cuantificación energética solar. Compara pérdidas y/o ganancias solares para el espacio urbano (calle y fachadas) en distintos escenarios morfológicos. Con este método, se exploran preliminarmente parámetros tales como altura y distanciamientos en una tipología edificatoria residencial (torres) que mitigan las externalidades solares en vecinos. Se concluye que es factible mitigar el acceso solar en espacio urbano; mediante un ensanche del perfil de calle, y el correspondiente aumento de altura edificada; lo que indica que la relación altura/ancho H/W es más relevante que la altura *per se* del edificio. Con ello, se pretende avanzar con propuestas conducentes hacia una contribución a la Ley de Aportes al Espacio Público.

## Palabras clave

acceso solar; Ley de Aportes; normativa urbanística; simulación energética urbana

## Abstract

*Real estate high-rise and high-density buildings block solar access and limit thermal and lighting conditions for human life in cities. Urban renewal is part of the transformation of cities, but high plot occupation should be regulated due to urban environmental problems derived from business as usual. The objective of this paper is to explore some alternatives of site occupation considering regulatory parameters of Regulatory Plans and its solar access effects on the urban space. The methodology takes into account energy simulations of the urban form to get as a result a method that relates regulations and solar energy assessment. It compares solar gains and losses for the urban space (street and facades) in different morphology scenarios. The method explores parameters such as height and distance between buildings in high-rise residential quarters to mitigate solar externalities on neighbours. Conclusions show that it is feasible to mitigate solar access through changes on street width (W) and building height (H). In other words, the relation H/W is more relevant than height per se. Thus, this study aims to contribute with proposals to the new Chilean Law of Contributions to Public Space.*

## Keywords

*Law of Contributions; solar access; urban energy simulation; urbanism regulation*

LUZ ALICIA CÁRDENAS-JIRÓN · JING CHANG LOU

Cómo citar este artículo: Cárdenas-Jirón, L. y Chang Lou, J. (2019). Acceso solar en espacio urbano: simulaciones energéticas para su mitigación en alta densidad inmobiliaria residencial. Santiago Centro Sur. *Revista 180*, 44 (95-109). [http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-44.\(2019\).art-630](http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-44.(2019).art-630)

DOI: [http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-44.\(2019\).art-630](http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-44.(2019).art-630)

## Introducción

La metrópolis de Santiago se caracteriza por presentar claramente dos modelos urbanos de crecimiento: por extensión y por densificación o *in filling* (De Mattos et al., 2014; Santa Cruz, Poduje, Martínez y Jobet, 2015). El presente estudio se centra en esta última tendencia y sus efectos energéticos sobre el acceso solar. La densidad inmobiliaria con edificios de gran altura determina el acceso solar de manera diferenciada, según sea la latitud, altitud, geografía y estación climática en la ciudad estudiada, encontrando variaciones significativas en la irradiación para ciudades del centro sur de Chile (Cárdenas Jirón y Vásquez, 2015). La luz solar e insolación suelen ser bloqueadas por modelos de desarrollo inmobiliario de alta densidad y altura, sin embargo, se piensa que se podría optimizar su uso mediante una regulación de forma urbana (Cárdenas Jirón, Vásquez, Zamorano y Acevedo, 2016; Cheng, 2010; Košir, Capeluto, Krainer & Kristl, 2014). Las obstrucciones solares son perjudiciales en invierno porque se busca el calor y luz solar, mientras que en verano se busca evitar la sobreexposición a esta fuente energética, más aún, si se trata de ciudades del norte chileno con un predominio de días despejados y gran insolación. Lo mismo ocurre cuando se dispone de una orientación cardinal en la fachada con sobrecalentamiento es contraproducente incentivar el acceso solar (Lai & Hokoi, 2015). Lo anterior, relativiza la captación irrestricta de acceso solar en la arquitectura urbana.

Frente a la problemática planteada, surgen algunas interrogantes:

- ¿Quién asume los costos de la pérdida lumínica y térmica en las viviendas vecinas a proyectos inmobiliarios, cuando se produce obstrucción solar?
- ¿Cómo cuantificar las externalidades energéticas solares sobre el espacio público y fachadas urbanas?
- ¿Cómo mitigar estos efectos mediante una regulación normativa urbanística orientada a la nueva Ley de Aportes?

Considerando que el Estado tiene las atribuciones legales para priorizar el bien común sobre el bien individual, entonces los instrumentos de planificación territorial (IPT) representarían un medio para mitigar efectos adversos, siendo esta tarea materia de política pública. El objetivo del artículo es explorar algunas alternativas de ocupación predial considerando parámetros normativos del plan regulador y los efectos energéticos de proyectos inmobiliarios sobre el espacio urbano, mediante

el concepto de acceso solar. La renovación urbanística es parte de la transformación de las ciudades, pero la sobreocupación del suelo debe regularse por los problemas ambientales urbanos generados por el negocio inmobiliario *per se*.

El resultado esperado es presentar un método de análisis que relacione algunos parámetros de la normativa urbanística, referidos a la forma urbana, con efectos energéticos en el espacio urbano, cuantificando la energía solar (pérdidas y/o ganancias) en suelos y fachadas. Con este método, se pretende explorar preliminarmente parámetros tales como altura y los distanciamientos en una tipología edificatoria residencial (torres) que mitiguen las externalidades solares en vecinos.

El artículo se estructura en cinco partes: la primera corresponde al planteamiento del problema de investigación en relación con las externalidades producidas por alta densidad residencial de proyectos inmobiliarios en gran altura. Allí, se presentan las preguntas de investigación, el objetivo y el resultado esperado. La segunda parte corresponde a la descripción del método, el área de estudio y caso referencial. La tercera parte presenta una reflexión teórica conceptual respecto de las externalidades urbanísticas solares en el entorno urbano. La cuarta parte consiste en la propuesta de un método de cálculo energético del espacio urbano y modelaciones de parámetros normativos urbanísticos para mitigar las externalidades solares en tejidos urbanos. La proporción del espacio urbano es materia sustancial del método. Se finaliza con un análisis de resultados y conclusiones respecto de efectos de proyectos inmobiliarios sobre el acceso solar y las posibilidades de compensación mediante el espíritu de la Ley de Aportes al Espacio Público (N°20.958 D.O.15/10/2016).

## Metodología

La metodología para cumplir el objetivo consistió en los siguientes pasos:

- 1) Selección del área de estudio según criterio de máxima densidad en área de renovación urbana afectada por las obstrucciones solares.
- 2) Construcción de una modelación tridimensional del caso referencial mediante el software SKETCHUP que sirva de base para análisis solar ulterior.
- 3) Análisis energético del espacio urbano mediante

superposición de carta solar y el factor de cielo visible para determinar hora y mes del año que dispone de radiación solar y luz natural según sea la obstrucción solar del ambiente construido.

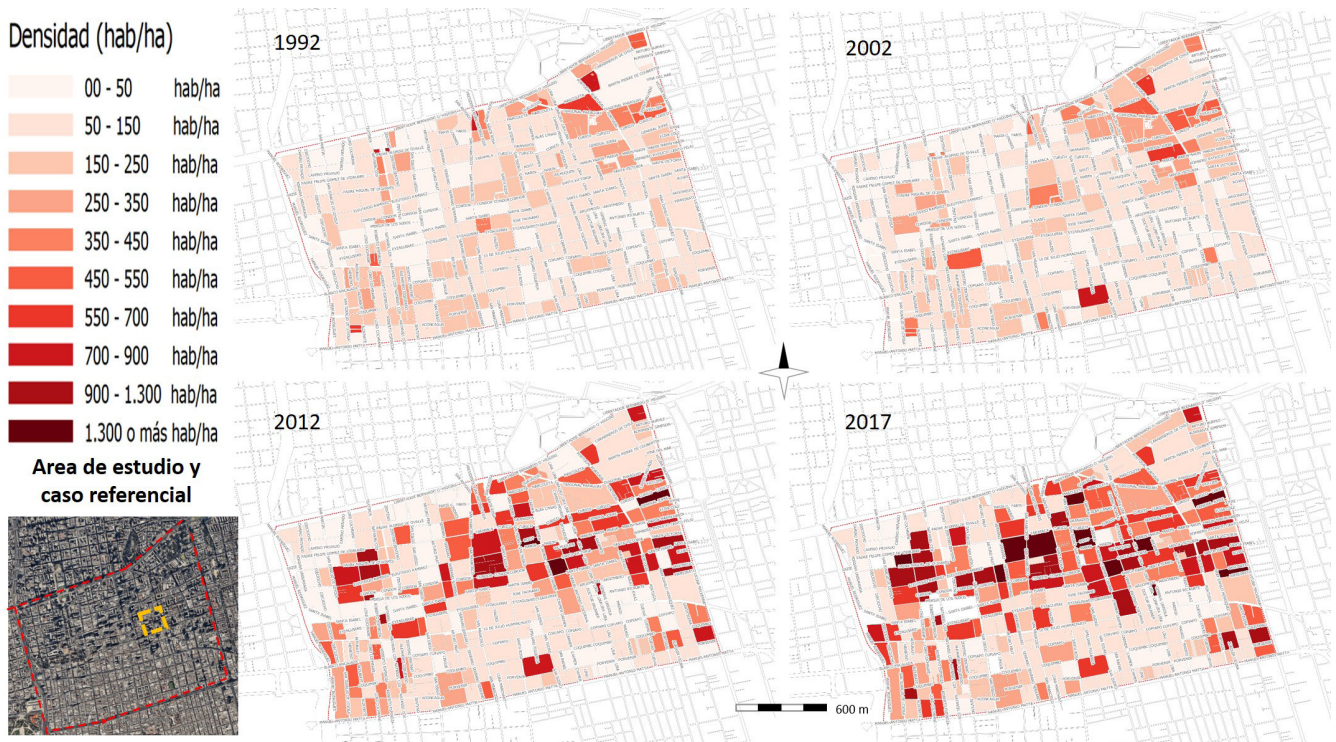
- 4) Cuantificación de energía solar incidente sobre superficies del espacio urbano (suelos y fachadas) para determinar el acceso solar.
- 5) Exploración de escenario morfológico alternativo, modificando parámetros normativos de la edificación y ocupación de suelo, para reevaluar acceso solar (energía disponible).
- 6) Confección de una tabla con los valores comparativos entre el escenario actual y el escenario alternativo (otro perfil de calle y altura edificada), para estimar ganancias y pérdidas en suelos y fachadas de la edificación. Con ello, optimizar el acceso solar en nuevos escenarios respecto del preexistente y sentar una base para elaborar propuestas futuras de compensación en el marco de la Ley de Aportes.

### El área de estudio y caso referencial

El área de estudio corresponde a un polígono de Santiago Centro Sur definido entre las calles av. Matta al Sur;

Alameda al Norte; Vicuña Mackenna al Este y la av. Norte Sur al Oeste, ubicado en la comuna de Santiago (Figura 1). Esta definición corresponde a la identificación de un proceso de consolidación de proyectos inmobiliarios residenciales de alta densidad poblacional y gran altura que alcanzan los 30 pisos (Lou, Pallarés, Cárdenas y Gallardo, 2018). El caso referencial señalado en la Figura 1, abajo izquierda, corresponde a dos de las manzanas con mayor densidad demográfica, entre 900 hab/ha y sobre 1.300 hab/ha al año 2017, lo cual lo hace relevante para un análisis. Cabe agregar que los años seleccionados corresponden a los censos de población y vivienda en los últimos 25 años, para ver la evolución de la dinámica inmobiliaria. En las zonas de renovación urbana de Santiago Centro se observa un incremento sustantivo de la densidad inmobiliaria, lo cual evidencia que es la normativa urbanística la que promueve una actividad edilicia en gran altura.

En la Figura 2 se observa una sobreocupación predial inserta en un tejido urbano preexistente de baja altura, 1 a 2 pisos (Fotografías 3 y 5). En la imagen inferior a la izquierda de la Figura 2, se muestra la planimetría con los predios de cada manzana y la selección del caso referencial en calle Sta. Victoria al llegar a calle Carmen. Allí, se señala un espacio urbano de análisis delimitado



**Figura 1.** Gradientes de densidad en área de estudio localizada en zona de renovación urbanística con alta densidad residencial, Santiago Centro Sur. Años 1992, 2002, 2012 y 2017. Fuente: Lou et al., 2018, pp. 32 y 33.



**Figura 2.** Caso de referencia de alta densidad residencial en zona de renovación urbanística, Santiago Centro Sur.  
Fuente: Fotografía Jing Chang Lou.

por los edificios de borde, como caso de estudio para la simulación energética, a modo de acupuntura urbana de intervención. En la Tabla 1 se señala la densidad de población de cada una de las cuatro manzanas escogidas como entorno urbano y que corresponden a las más altas densidades, según el Censo del año 2017 (Instituto Nacional de Estadísticas, INE, 2017).

**Tabla 1**

*Densidad de población en muestra de estudio intencionada con proyectos inmobiliarios residenciales de renovación*

Manzana	Población (cantidad de habitantes)	Superficie (ha)	Densidad (hab/ha)
Manzana 1	1.473	1,14	1.294
Manzana 2	1.375	1,56	878
Manzana 3	2.560	1,38	1.857
Manzana 4	1.280	1,39	918

**Fuente:** Elaboración propia sobre la base de los datos del Censo 2017.

## Reflexiones teórico conceptuales del acceso solar

### El acceso solar, algunos alcances

El concepto de acceso solar está intrínsecamente asociado a la arquitectura y al urbanismo, y puede definirse como la captación de la energía solar en la morfología urbana para fines energéticos. Sean estos, sistemas pasivos o sistemas activos, vale decir, con mediación de equipos para generación de energía calorífica o fotovoltaica, usados en fachadas y techos tradicionalmente. Sin embargo, la provisión de luminarias solares en el espacio público es una tendencia creciente en las ciudades (Cárdenas Jirón y Uribe, 2012; Knowles & Villeco, 1980; Sarralde, Quinn, Wiesmann & Steemers, 2015; Szokolay, 2014; Yezioro, Capeluto, Shaviv, 2006).

Desde la perspectiva de la planificación urbana, existe la figura de “envolvente solar” que corresponde a un manto imaginario del arco de trayectoria solar aplicado a los edificios de una manzana para resguardar el acceso al sol en las edificaciones vecinas. Esta figura legal se emplea en el Estado de California, Estados Unidos, y en

Tel Aviv, Israel, en forma discriminada, estimando un número de horas mínimas para un período crítico del año, invierno (Knowles, 2003), lo cual implica una aplicación medida que no necesariamente prohíbe los edificios de gran altura, sino que más bien promueve escalarlos mediante terrazas en los modelos físicos de crecimiento urbano (Stasinopoulos, 2018). De esta forma, se puede orientar el desarrollo urbano velando por intereses públicos ambientales, sin vetar las necesarias inversiones inmobiliarias en las zonas de renovación urbanística. La articulación espacial entre la tipología edificatoria, el predio y la manzana es necesaria estudiarla incorporando la orientación cardinal de la calle y el factor de cielo visible (Redweik, Catita & Brito, 2013).

Los efectos de sombra provocados por edificios “torres” en los predios vecinos y espacios públicos es aún tema de discusión porque la norma lo aborda de manera parcial e incompleta, debido a:

- 1) La trayectoria solar representa la temporalidad, dinámica que prevalece por sobre un estudio estático, como ocurre con la actual normativa de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), que considera las sombras ortogonales al edificio, desconociendo los arcos reales de la trayectoria solar.
- 2) La OGUC estima una estación climática media (equinoccio) y no el solsticio de invierno, fecha más demandante de energía solar en los espacios habitables (Cárdenas Jirón, & Uribe, 2012)

El acceso solar es considerado como un factor de sustentabilidad de la forma urbana en modelos de ciudad compacta (Beckers, 2012; Capeluto, 2012; Mohajeri, Upadhyay, Gudmundsson, Assouline & Scartezzi, 2016; Ng, 2010; Vartholomaios, 2015). La importancia de este alcance se centra en las personas, quienes habitan los edificios y espacios públicos, por tanto quienes se sienten afectadas en su confort térmico y demandas energéticas de su vivienda (Givoni et al., 2003; Olgyay, 2015). Ng (2010) señala que condiciones ambientales de ventilación e iluminación natural en altas densidades son necesidades humanas difíciles de alcanzar en diseño residenciales de gran altura y densidad, por tanto, un cambio de paradigma es requerido en el diseño de la arquitectura y planificación urbana.

### **Derechos solares: de la utopía ideológica a la praxis ética en los desarrollos inmobiliarios**

El fenómeno de densificación no es nuevo, es parte de la transformación del centro de las ciudades, desde la

época colonial hispánica: solares de un piso aumentaron a dos pisos y así sucesivamente hasta hoy (Martínez Lemoine, 2007). La alta densidad urbana es congénita al urbanismo y necesaria por las economías de escala y aglomeración que entrega la urbanización. El desafío en esta materia es ¿cómo mejorar condiciones de habitabilidad en la ciudad con estos desarrollos? Hoy en día, se aboga por principios de sostenibilidad, en particular, por el uso de energías renovables no convencionales ERNC, como es la energía solar y su empleo en la célula misma de la ciudad: el barrio (Cárdenas Jirón e Higuera García, 2015). Por ello, resulta relevante presentar una discusión del acceso solar para los ciudadanos, según sean las condiciones locales del ambiente construido y clima urbano.

Al respecto, los derechos solares en la ciudad representan una postura aún teórica, pues involucran una convergencia de intereses divergentes que requieren acuerdos políticos previos para plasmarlos en la planificación urbana. Lo importante es comprender la factibilidad de alcanzar densidades urbanas altas, pero con altura media y, simultáneamente, acceso solar cuando corresponda.

Los intereses de los actores del desarrollo urbano: sector privado, sector público y sociedad civil suelen ser divergentes y ello conlleva a visiones antagónicas y de confrontación sobre el espacio urbano, representado como espacio de conflicto. Al respecto, surgen aporías como el derecho a la ciudad, como una reivindicación donde prima el interés de algunos ciudadanos por sobre el interés de otros (Harvey, 1990, citado en Molano Camargo, 2016). Los derechos a la ciudad, presentados por Lefebvre (1968, citado en Molano Camargo, 2016) en su clásica obra *Le droit a la ville*, tampoco son nada nuevo, más bien una reivindicación de medio siglo atrás que cobra relevancia actual por el empoderamiento de los ciudadanos en el debate político actual (Molano Camargo, 2016). Para Lefebvre la ciudad es vista como mercancía, donde predomina el valor de cambio por sobre el valor de uso, y promueve el derecho a la vida urbana como creación colectiva de espacio. El cuestionamiento de las transformaciones bruscas en la forma urbana y degradación ambiental es otro argumento contrario a la hiperdensidad en tipologías edificatorias de torres residenciales. La gradualidad es una característica usual en el crecimiento de las ciudades que se ve perturbada por intervenciones radicales en barrios hiperdensos, produciendo segmentaciones en el tejido urbano muy cuestionadas por la verticalización del espacio urbano y alteraciones en el campo térmico (Vicuña del Río, 2017).

La planificación del espacio urbano contemporáneo definida por la arquitectura urbana es un desafío frente al espacio residual actual, la calle. Parámetros empleados por los instrumentos de planificación territorial (IPT) como el coeficiente de constructibilidad, el coeficiente de ocupación de suelo y el ratio altura-ancho (H/W) de la calle, pueden ser una oportunidad creativa para una regulación de los efectos adversos expuestos.

El uso indiscriminado del concepto de acceso solar en las ciudades chilenas puede ser perjudicial e inoficioso si no se vincula con el clima, la geografía, el tejido urbano adyacente y rol urbano del área intervenida en la ciudad. La dinámica de la trayectoria solar y el control de sombras definen límites a los volúmenes construidos; siendo mayor la restricción si se pretende regular cerca del mediodía o al final del ocaso y principio del amanecer. El envolvente solar considera el llamado *cut-off times* (tiempos de corte), para ajustarse precisamente a los cambios horarios y a la estación climática (Capeluto & Ochoa, 2014; Knowles, 2003; Košir et al., 2014).

Algunos autores presentan el concepto de acceso solar como: “derecho urbano para la calidad de vida vulnerado desde la gentrificación contemporánea” (Inzulza, Vargas y Wolff, 2017, p. 1). Esta postura aísla uno de los elementos de análisis con una visión reduccionista del sol, desconociendo los efectos laterales y beneficiosos de las obstrucciones solares en las edificaciones y también en el espacio de la ciudad. Las sombras, brisas y humedad, activados precisamente por el libre juego de luz solar y termodinámica, crean características bioclimáticas urbanas a considerar positivamente en la planificación ambiental urbana.

En efecto, entender y evaluar las condiciones bioclimáticas del espacio urbano en la escala del barrio es fundamental para poder intervenir adecuadamente sobre la calle. Las fachadas soleadas y en sombra generan diferencias de presión producidas por simples diferencias de la temperatura del aire: más cálido o más frío, generando movimientos del mismo en el cañón urbano o calle, necesario para ventilar, secar y mitigar efectos térmicos sol-aire (Olofsson, Anders Ohlsson & Ostin, 2017).

Conocer el orden de magnitud de la insolación por sobre la cantidad de horas de luz solar relativiza el derecho de acceso solar en las edificaciones, porque puede actuar en contra del confort térmico deseado. En efecto, el acceso solar por la tarde en un departamento orientado al poniente en estación estival genera un serio problema para el residente, el sobrecalentamiento. La geometría solar, intensidad de la radiación y orientación de la calle

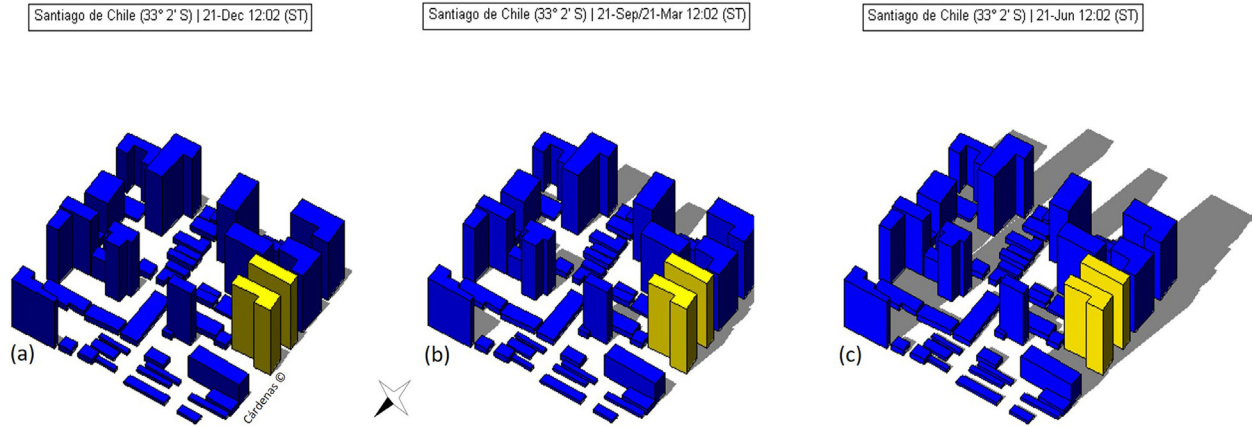
son aspectos relevantes a considerar antes de bogar indiscriminadamente por derechos solares. Normalmente, se describen las sombras arrojadas unilateralmente por cada edificio, lo cual es una aproximación básica que no considera la energía real disponible, sino que asume tácitamente una intensidad equivalente, lo cual no se ajusta a la variabilidad de la dinámica solar (Morello & Ratti, 2009). En la Figura 3 se muestra una modelación tradicional de sombras al mediodía, por estación climática, solsticios y equinoccios, para el polígono de estudio. Con este método se muestra solamente la extensión superficial de la sombra sobre los edificios vecinos y espacios, siendo de mayor longitud en solsticio de invierno respecto del solsticio de verano y el equinoccio. Corresponde a una visión básica de análisis espacial que no alcanza a precisar cantidad de energía solar obstruida.

## Método propuesto para mitigar las externalidades urbanísticas solares sobre el espacio urbano

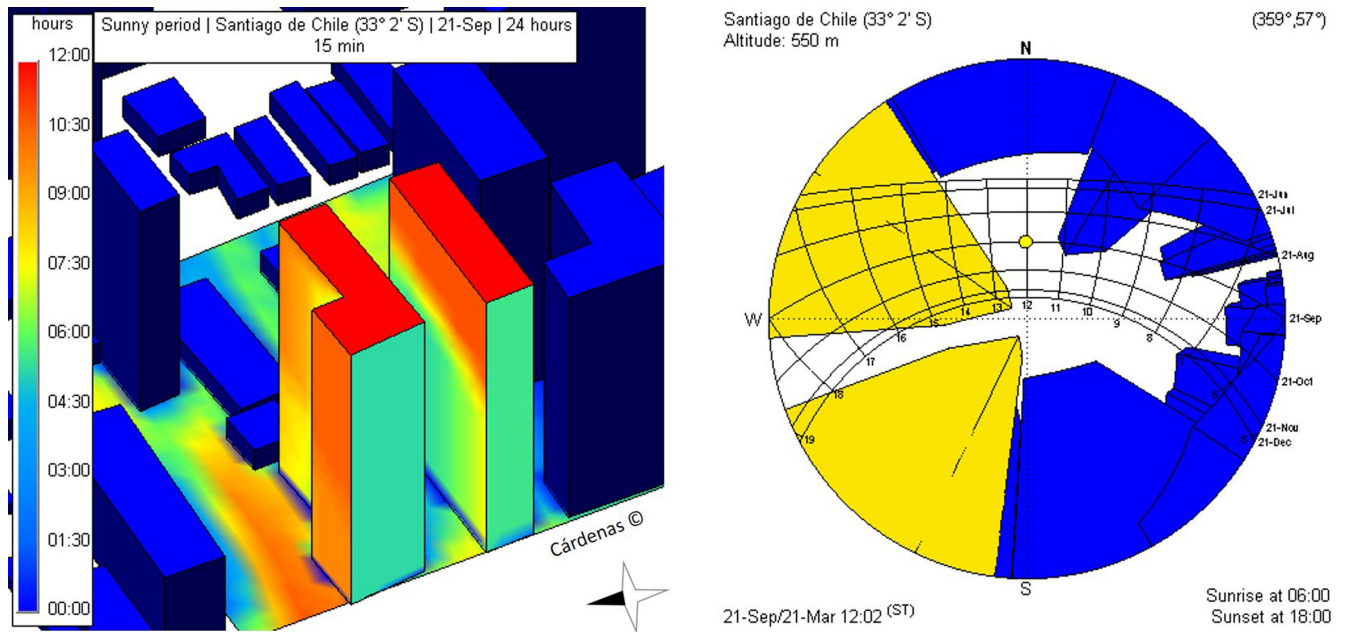
### Línea base

Mitigación consiste en una atenuación de un efecto, reconociendo el problema y tratando de aliviarlo sin eliminarlo totalmente, en este caso optimizar la calidad térmica y lumínica de un espacio urbano.

En la Figura 4 se señala una simulación de las horas de luz solar para el día del equinoccio (21 de marzo/ 21 de septiembre), junto con las herramientas de análisis solar espacio-temporal. La carta solar sobrepuesta a la proyección estereográfica del espacio urbano muestra el factor de cielo visible (*sky view factor*), SVF por sus siglas en inglés. Estas herramientas son útiles para analizar los intercambios de radiación solar, la línea de horizonte urbano, las máscaras de sombra y la fracción de cielo visible horario y estacional. Por ejemplo, esta imagen indica que solo los últimos 10 pisos del edificio situado en la vereda sur de la calle, recibirán luz solar durante 12 horas el día del equinoccio. Los pisos inferiores recibirán unas 6 horas de luz solar aproximadamente. Mientras que el espacio urbano (calle) verá el cielo durante el año como sigue: 3,15 horas cercanas al mediodía en junio; 4 horas en marzo/septiembre cercano al mediodía y durante la mañana, y 5 horas en diciembre antes del mediodía y un par de horas al final del atardecer. Este análisis sirve para proyectar el uso del espacio urbano por el ciudadano. Una conclusión preliminar es la utilidad de estas herramientas para proyectar las fechas y horas de disponibilidad solar, según sea la configuración espacial urbana. Así evaluar *ex antes* la propuesta de un proyecto



**Figura 3.** Modelación tradicional de sombras arrojadas por las edificaciones para a) solsticios de verano; b) equinoccio de primavera/otoño; y c) solsticio de invierno en muestra intencionada.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.** Horas de luz solar en espacio público para el día del equinoccio, con carta solar sobrepuesta al factor de cielo visible en caso de estudio referencial.  
Fuente: Elaboración propia.

inmobiliario y sus implicancias energética solares sobre las fachadas de los edificios y sobre el espacio urbano.

### **Alternativas de mitigación del efecto obstrucción solar sobre el espacio público: calles y fachadas urbanas**

Las condiciones morfológicas actuales del polígono de estudio generan obstrucciones solares que afectan directamente la calle como espacio público, materia no tratada en Chile desde un enfoque del tejido urbano. Dichas obstrucciones producen sombras que influyen sobre las condiciones bioclimáticas y, por ende, en el bienestar térmico humano (Lou et al., 2018; Sad De Assis & Barros Frota, 1999; Stocco, Cantón y Correa, 2018). El estudio de sombras está regulado en la normativa chilena, dado que el Artículo 2.6.12 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, OGUC (2018) establece que:

para los efectos de calcular la sombra proyectada sobre los predios vecinos bastará con medir la superficie de ésta. Las áreas adyacentes con uso espacio público no se contabilizarán en dicho cálculo, a pesar de que el volumen teórico planteado les proyecte sombra (s.p.).

Lo anterior refleja la exclusión del efecto de obstrucción sobre el espacio público, a pesar de su importancia para el uso urbano en la ciudad, sea para los residentes o ciudadanos; una materia por estudiar frente a los desafíos que plantea la nueva Ley de Aportes, ya que queda un eslabón pendiente en la normativa de urbanismo (Cárdenas Jirón y Uribe, 2012). Se plantea que este método de análisis energético de forma urbana en escenarios alternativos podría dar luces para poder compensar cuantitativa y cualitativamente algunos efectos adversos del desarrollo inmobiliario sobre el acceso solar al espacio público.

A modo de exploración inicial de regulación morfológica y energética se presentan distintos escenarios que modifican la forma de ocupación predial y altura en el caso referencial. Estos parámetros se modelan para establecer una franja de protección que permita el acceso solar al espacio público y fachadas urbanas orientadas al Norte. Dado que no es factible exigir acceso solar en todo horario, orientación y estación climática del año, en las áreas centrales estudiadas, se debe fijar algún criterio lógico de tipo normativo. Por ejemplo, una restricción horaria en el mes más desfavorable, invierno, 21 de junio, un par de horas cercanas al mediodía; entre las 10:00 h y las 14:00 h. A partir de ello, definir la geometría

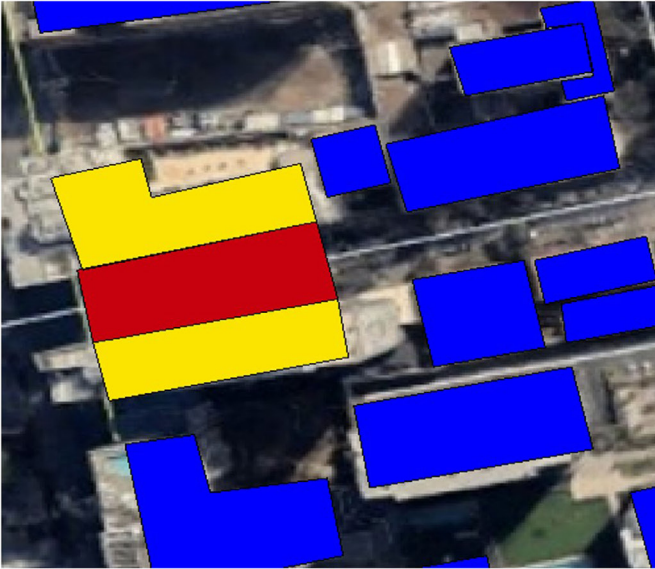
para fijar alturas máximas en función del ancho de la calle y sus efectos sobre la vereda opuesta, orientada hacia el Norte.

La Figura 5 muestra el caso de referencia en planimetría 2D (a) y en perspectiva 3D (b, c, y d). El plano (a) muestra la entidad formada por los edificios y la calle, lo que en su conjunto conforma el espacio urbano. El resto de las imágenes muestra una simulación energética solar de esta única entidad para tres días representativos: equinoccio (b) y solsticio de verano (c) y solsticio de invierno (d). La finalidad es conocer cuánta energía solar está disponible en cada día simulado por fachada y suelo urbano. Se observa que el máximo de energía captada en invierno es de 3,63 kWh, mientras que en verano es de 7,42 kWh, lo que equivale a la mitad prácticamente con acceso solar. A su vez, la fachada norte ubicada en la vereda sur recibe en los últimos pisos más intensidad de energía que la misma fachada en solsticio de verano, 3,6 kWh contra 2,78 kWh, debido a que el ángulo de incidencia solar es mayor en verano respecto del invierno. Es interesante observar que estos valores disminuyen drásticamente en los pisos inferiores y suelo público, lo cual en invierno se torna crítico debido a su necesidad para la vida cotidiana. En efecto, la radiación solar determina la condición lumínica y térmica del espacio público y fachadas, y con ello la habitabilidad. Es importante mencionar que esta cualidad está condicionada por el grado de confort térmico, el cual promueve el uso peatonal de la calle, aspecto relevante dada la necesidad de disponer de espacios públicos en tejidos urbanos con altas densidades. Conocer cuánta energía está disponible para alcanzar una zona de confort en el espacio público o cuántos departamentos están siendo afectados por la reducción energética induce a buscar escenarios alternativos que mitiguen esta externalidad negativa. Una forma tradicional de mitigación a través de la forma urbana ha sido establecer un mínimo de dos horas al día de acceso solar, durante el período de invierno. No obstante, la sola consideración horaria como criterio regulatorio no es suficiente porque asume una intensidad homogénea de radiación solar y, en realidad, esta varía según la orientación cardinal. La intensidad de luz solar y calor es distinta al oriente respecto del Norte o del poniente; por tanto, se sugiere incorporar la orientación cardinal como otro factor contribuyente, para mitigar los efectos adversos de la obstrucción solar.

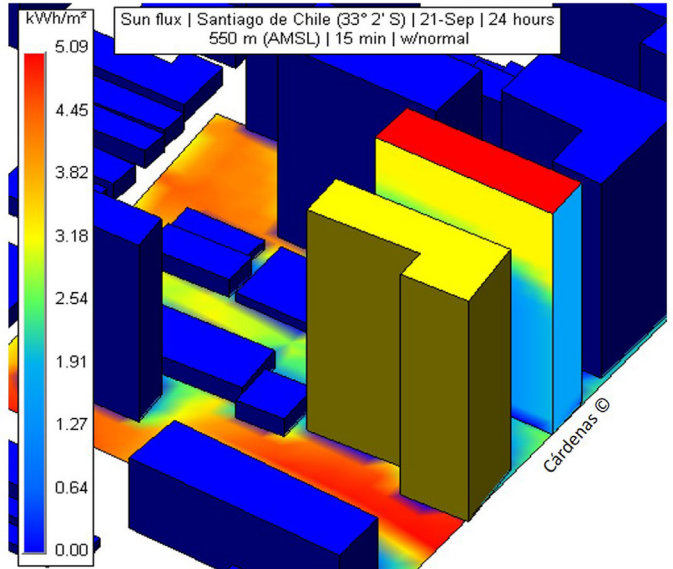
Otra conclusión es la necesidad de considerar en el análisis la cantidad de energía disponible o potencial solar junto con la energía solar incidente o captación solar real, según sea el grado de enmascaramiento determinado



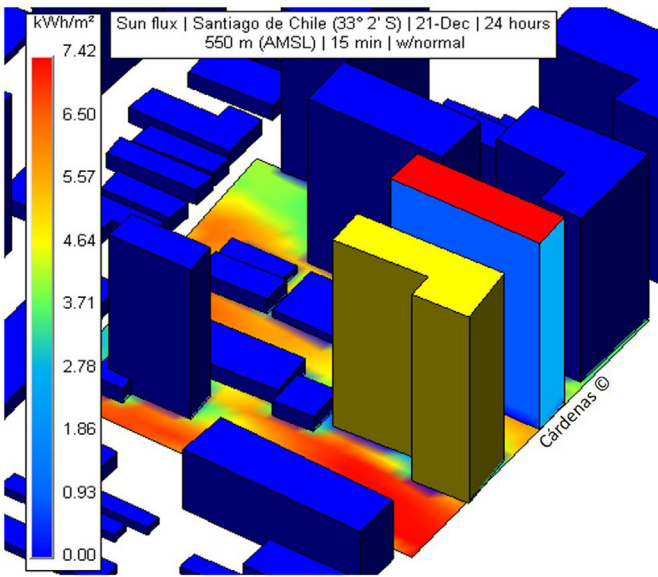
a.



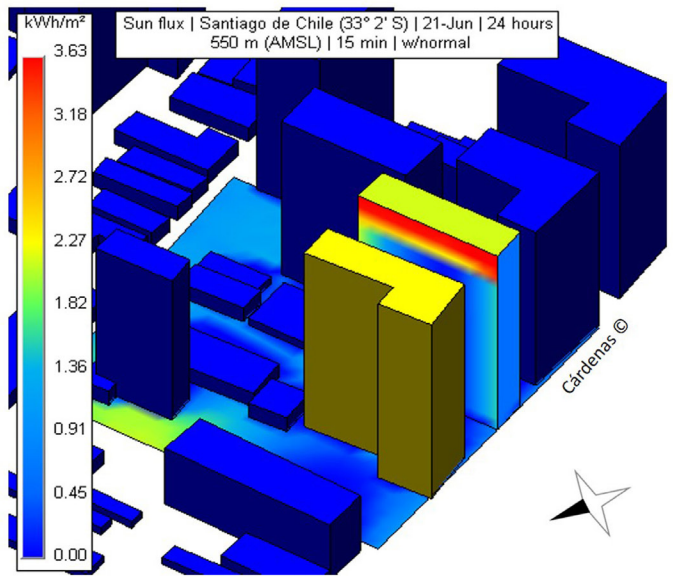
b.



c.

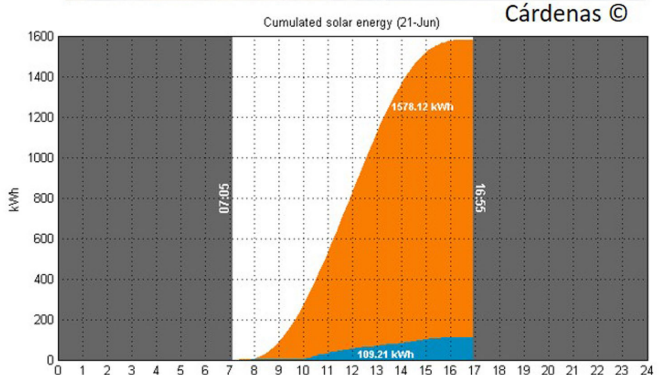
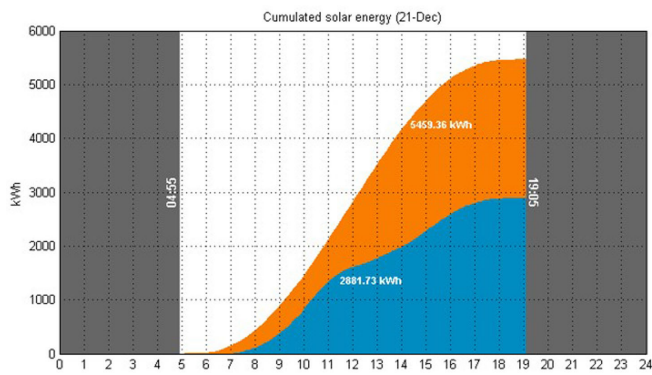
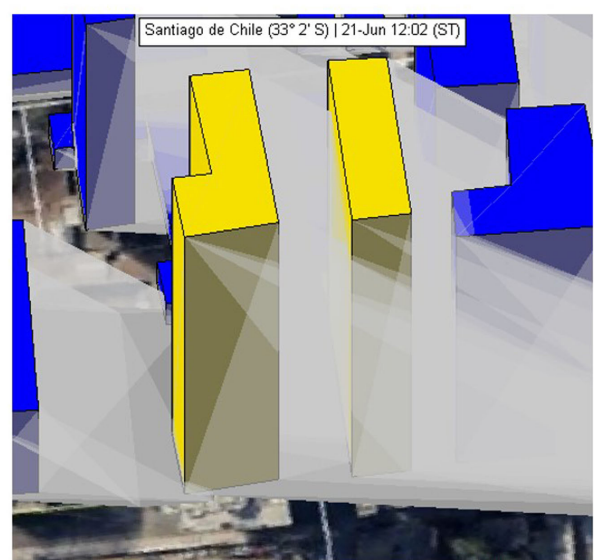
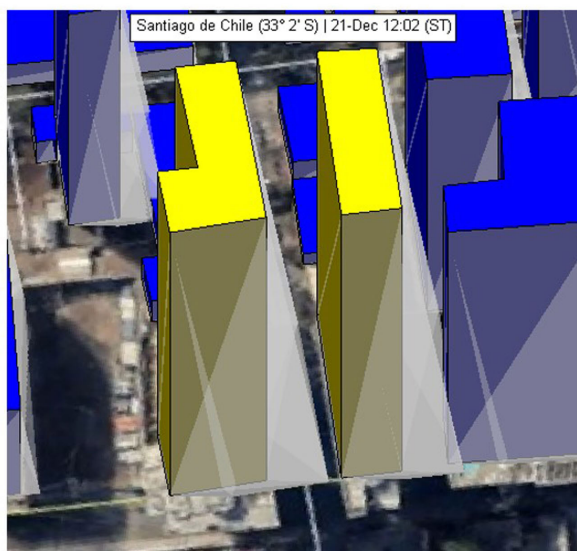
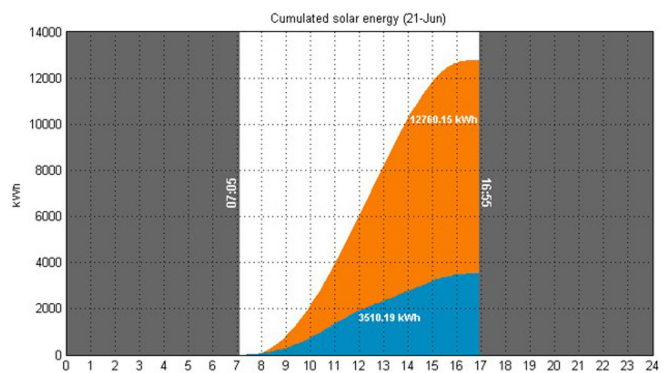
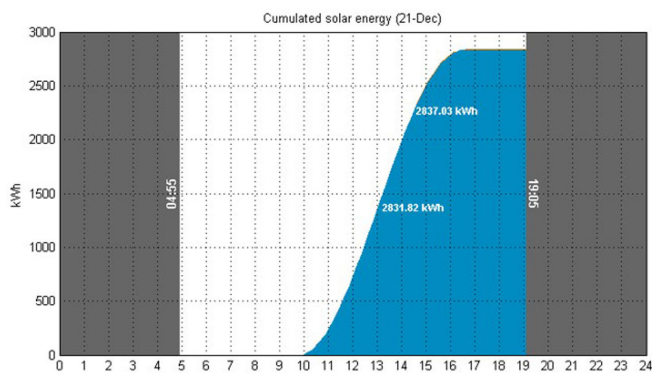


d.



**Figura 5.** Simulación solar en caso de referencia. a) Plano 2D; b) perspectiva para un día de equinoccio; c) solsticio verano; y d) solsticio de invierno.

Fuente: Elaboración propia.



Cárdenas ©

**Figura 6.** Potencial solar y radiación incidente luego de enmascaramientos en espacios urbanos (fachadas y calle), para solsticio de verano (izquierda) e invierno (derecha), en el caso de referencia. Fuente: Elaboración propia.

por la forma urbana, pues el simple criterio de horas se ha visto que no es suficiente. Algunas aplicaciones solares fotovoltaica y termales miden este aspecto en las edificaciones (Li, Liu & Liao, 2015). No obstante, la simulación evidencia también diferentes intensidades de energía solar en suelos, lo que representa a uno de los factores relevantes para el confort térmico urbano en el espacio público, entre otros. En la Figura 6 se muestra la energía solar acumulada en superficie de fachadas (imagen superior) y calle (imagen inferior) para dos días críticos: solsticio de verano y solsticio de invierno. El color naranja representa la energía solar total disponible ese día mientras que el color azul la energía solar captada, que llega a la superficie considerando el enmascaramiento u obstrucción solar de los edificios vecinos. El valor de esta última suele ser menor debido a las sombras arrojadas, tanto en suelos como en fachadas, salvo el 21 de diciembre que ambos valores son similares debido al elevado ángulo de altura solar que alcanza a toda la fachada al mediodía. En la imagen central se visualiza el alcance del cono de sombra arrojado sobre el entorno, al mediodía, en ambos solsticios. La finalidad de esta simulación energética solar es establecer una línea base sobre la cual se puedan explorar nuevos escenarios que mejoren estas condiciones energéticas.

## Resultados

En la Tabla 2 se indica la cantidad de energía solar disponible (potencial) y la efectiva (exposición) que llega sobre las superficies de la fachada y calle del espacio público seleccionado. En la tabla se incorporan valores absolutos y relativos de energía solar, estos últimos expresados en porcentaje de ganancia o pérdida, para comparar valores reales alcanzados respecto del total teórico disponible. A este último valor se le denomina potencial solar y al valor real de incidencia, exposición solar. Ambos están expresados en kWh, pues corresponde a la unidad de energía. Las obstrucciones solares determinan el valor de exposición. Esta tabla tiene por finalidad cuantificar la ganancia energética del total disponible; o bien a la inversa, cuánto se pierde del total disponible debido a la obstrucción solar en un espacio urbano. Para efecto del análisis energético, el espacio público se desagrega en dos parámetros: fachada de edificio (vertical) y calle (horizontal). La posibilidad de cuantificar pérdidas y ganancias permitirá a futuro estimar costos y, por ahora, modificar parámetros normativos, tales como la altura y el perfil de la calle para disponer de acceso solar en un periodo de tiempo.

El resultado de la Tabla 2 indica que hay una mayor captación solar (exposición) en fachada que en la calle para el solsticio de invierno; mientras que una captación similar en fachada y calle para el 21 de diciembre. Este desempeño se explica por el ángulo de inclinación solar: más bajo en invierno que en verano, junto con las obstrucciones derivadas de la morfología urbana. En términos porcentuales, las mayores ganancias energéticas ocurren en solsticio de verano y las mayores pérdidas en solsticio de invierno, como es de esperar. Sin embargo, se postula que mediante una modificación de algunos parámetros normativos de los instrumentos de planificación urbana, léase plan regulador, podría mejorar esta situación (protección o captación urbana).

En virtud de este supuesto, se generan escenarios alternativos hipotéticos que modifican el modelo de referencia, cambiando su altura o bien la línea de edificación para garantizar acceso solar al espacio urbano (fachada y calle). Para ello, se emplea una simulación en la cual se asume una tipología edificatoria de muy alta intensidad de ocupación de suelo, con un espacio foyer situado en el primer piso, que alcanza una altura de nueve metros como atrio del edificio y una altura media de tres metros por cada departamento. El criterio angular simple (Cárdenas y Vásquez, 2015) es aplicado con un ángulo de  $33^\circ$  (solsticio de invierno) para la ciudad de Santiago, en vez del ángulo de  $57^\circ$  (equinoccio) hacia la dirección sur, correspondiente a la normativa actual OGUC (2018). Los escenarios de simulación mantienen constante el ángulo propuesto de  $33^\circ$ , y cambian las alturas edificadas en la medida en que aumenta el ancho del espacio urbano. Esto es modelar con la proporción del espacio público, vale decir la relación altura/ancho. En la Tabla 3 se determinan algunas configuraciones distintas, sin ser exhaustivos, pues la creatividad puede producir otras diversas combinaciones posibles. Cabe precisar que el espacio urbano resultante puede ser de dominio público, dominio privado o ambos (propiedad legal) y así constituirse en una posible cesión de suelo de dominio privado para el uso público, como una posibilidad concreta a la futura Ley de Aportes al Espacio Público.

La Figura 7 presenta una visualización de escenarios posibles, solo algunos, pero se deben estudiar muchas otras alternativas considerando un parámetro de coeficientes de constructibilidad y de ocupación de suelo. Esta propuesta pretende iniciar la discusión y modificación normativa futura del Art. 2.6.13 Ordenanza General de Urbanización y Construcción, considerando las eventuales contribuciones a la Ley de Aportes.

**Tabla 2**

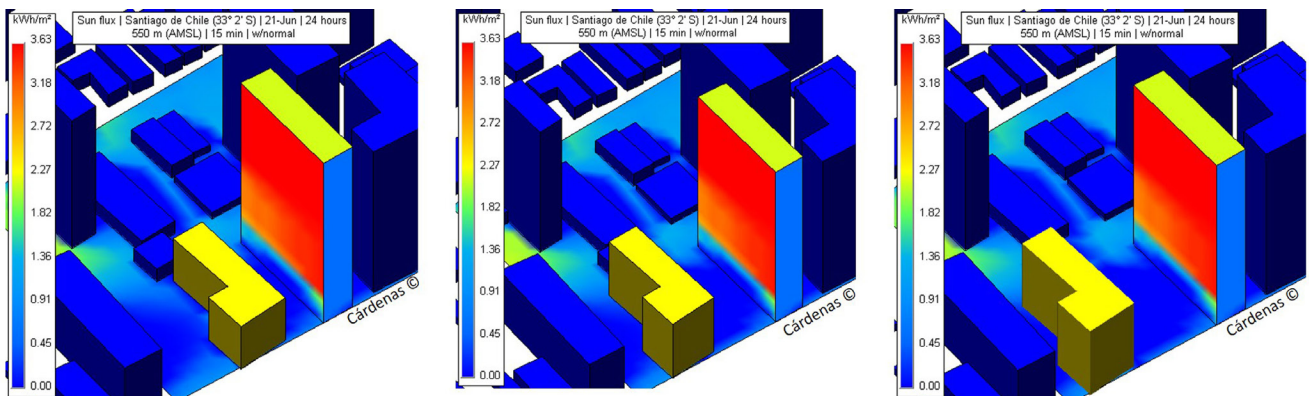
Cantidad de energía solar acumulada diaria en el espacio público (fachada más calle), para el solsticio de verano e invierno y porcentaje de ganancia o pérdida respecto del potencial observado

Espacio urbano	Estación climática	Potencial solar (kWh)	Exposición solar (kWh)	Porcentaje de ganancia de energía solar	Porcentaje de pérdida de energía solar
<b>Fachada norte</b>					
	Solsticio verano 21 dic	2.837	2.831	99	0,1
	Solsticio invierno 21 jun	12.760	3.510	27	73
<b>Calle</b>					
	Solsticio verano 21 dic	5.459	2.881	52	48
	Solsticio invierno 21 jun	1.578	109	7	93

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra una simulación energética con un ensanche del perfil de la calle mediante retranqueos en el edificio situado en acera norte, aumentando gradualmente su altura edificada y manteniendo constante el acceso solar del edificio vecino, situado en la acera sur. Este último edificio recibe energía solar a partir del piso

4, empleando el supuesto de que 9 m de altura tiene el foyer del edificio y sobre eso se sitúa un departamento. Así, sería posible disponer de flujos térmicos y lumínicos en espacios habitados durante el invierno, en su fachada norte, al menos las horas de mayor intensidad energética, cercanas al mediodía.



Altura edificio 20m y ancho calle 15 m  
H/W: 1.3

Altura edificio 27m y ancho calle 27 m  
H/W: 1

Altura edificio 30m y ancho calle 33 m  
H/W: 0.9

**Figura 7.** Propuestas alternativas básicas de mitigación al efecto de obstrucción solar considerando ratio H/W del espacio urbano, mediante cesión al uso público parte del dominio privado.

Fuente: Elaboración propia.

Dicha figura presenta tres casos hipotéticos que varían la proporción del espacio público, expresado geométricamente mediante el ratio H/W que significa altura edificio/ancho de calle, por sus siglas en inglés *height/width*. Este set de alternativas demuestra que es posible incrementar la altura edificada en la medida en que se aumente también el perfil del espacio público, teniendo como un criterio constante, mantener el acceso solar en solsticio de invierno.

La Tabla 3 presenta una propuesta de mitigación a la obstrucción solar actual en el espacio público con diversas alternativas de ocupación predial. Estas se resumen en dos tipos: 1) simular que el acceso solar llega al nivel de piso (cota 0,0); y 2) simular que el acceso solar llega a partir de una altura de 9 m, ambos en la fachada norte del edificio vecino, situado en la manzana sur, para el solsticio de invierno. A medida que se aumenta el perfil de calle, se puede incrementar también la altura edificada, resguardando simultáneamente el acceso solar al espacio público (fachada + calle). Para realizar

este ensanche en la calle, se propone un retranqueo en la línea de edificación de 6 m, 12 m y 18 m como un juego de simulación, lo cual implica una altura edificada de 7, 8 y 10 pisos respectivamente. El retranqueo en la línea de edificación libera espacio abierto de dominio privado, el cual podría cederse al uso público como un modo de compensación por la alta densidad habitacional y necesidad de incrementar espacio público para los residentes vecinos.

### Conclusiones

Una simulación energética se ha realizado en predio vecinos de un proyecto inmobiliario de alta densidad y gran altura en Santiago Centro Sur, situado en zona de renovación urbanística, con la finalidad de explorar algunos parámetros de regulaciones urbanísticas alternativas a las actuales. Así considerar un aspecto de la calidad ambiental del espacio público, conformado por las fachadas de los edificios y la calle. Se advierte que un estudio normativo de acceso solar con alcance

**Tabla 3**

*Propuestas alternativas de mitigación para acceso solar en espacio público (fachada más calle)*

Altura de edificación (m)	Perfil del espacio urbano (ancho en m)	Configuración del espacio urbano	Nº de pisos propuesto en la acera norte (supuesto de 3 m altura cada piso)
9,6 (Considera aplicación ángulo invierno desde cota 0,0, nivel calle).	15	Entre LO (línea oficial) de la calle, siendo LO = LE (línea de edificación).	3
18,6 (Considera aplicación de ángulo invierno a partir de foyer, desde 9 m).	15	Entre LO (línea oficial) de la calle, siendo LO = LE (línea de edificación).	6
22,4	21	Con retranqueo de 6 m en fachada de manzana norte, cediendo el dominio privado de la franja al espacio público.	7
26,28	27	Con retranqueo de 12 m en fachada de manzana norte, cediendo el dominio privado de la franja al espacio público.	8
30,12	33	Con retranqueo de 18 m en fachada de manzana norte, cediendo el dominio privado de la franja al espacio público.	10

**Fuente:** Elaboración propia.

para el territorio nacional chileno requiere de estudios adicionales respecto del clima, geografía, contaminación atmosférica y bases de datos locales para ajustar valores de energía solar en las simulaciones aquí empleadas.

Es importante observar que en la medida que crece el ancho del perfil de calle, se puede aumentar la altura; lo que indica que la relación altura/ancho H/W, es más relevante que la altura per se del edificio para velar por la calidad del espacio público. En términos relativos, prácticamente toda la energía disponible se podría captar en fachada norte de vereda sur en solsticio de verano; mientras que en la calle ocurre a la inversa en solsticio de invierno, una pérdida prácticamente total del potencial solar disponible. Considerando que la fachada es dominio privado y la calle es dominio público, si se desea mejorar la calidad del espacio público priorizando el bien común por sobre el bien privado, se deberían estudiar alternativas de ocupación volumétrica orientadas a ello mediante algunos parámetros normativos urbanísticos.

En esta propuesta, la concepción del espacio público prevalece sobre la mera concepción del espacio privado, donde cobra relevancia el espacio urbano en su totalidad. Esta última puede tener dos naturalezas legales: dominio público y dominio privado, posible de ceder para el uso público en el marco de la nueva Ley de Aportes.

Las propuestas presentadas tienen algunas proyecciones normativas:

- Reducir el coeficiente de constructibilidad de forma radical mediante la simple reducción de alturas y consecuente reducción de superficies.
- Mantener constante el coeficiente de constructibilidad que incentive la inversión inmobiliaria, pero aumentando la ocupación de suelo en planta baja con nuevas tipologías edificatorias.
- Producir retranqueos en las plantas superiores, evitando la forma de "lustrines". Así, buscar alternativas creativas de forma urbana con otras tipologías edificatorias que prioricen intereses públicos de tipo energético.

Se han explorado metodológicamente alternativas de mitigación a externalidades de proyectos inmobiliarios en el entorno urbano, en este caso las solares. Esto representa un punto de partida para realizar otras múltiples prospecciones normativas energéticas y económicas, para investigaciones futuras.

## Referencias bibliográficas

- Beckers, B. (Ed.) (2012). *Solar energy at urban scale*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Capeluto, I. G. (2012). Dense cities in temperate climates: Solar and daylight rights. En B. Beckers (Ed.), *Solar energy at urban scale* (pp. 291-310). Londres: Wiley.
- Capeluto, I. G. & Ochoa, C. E. (2014). Simulation-based method to determine climatic energy strategies of an adaptable building retrofit façade system. *Energy*, 76, 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.028>
- Cárdenas Jirón, L.A. e Higuera García, E. (2015). *El barrio solar*. Madrid: Mairea.
- Cárdenas Jirón, L.A. y Uribe, P. (2012). Acceso solar a las edificaciones. El eslabón pendiente en la norma urbanística chilena sobre la actividad proyectual.pdf. *Urbanismo*, 26, 21-42. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2012.20922>
- Cárdenas Jirón, L. A. y Vásquez, J. P. (2015). Potencial solar en fachadas integrando la densidad urbana: Una mirada crítica a la norma urbanística chilena. *Aus*, 18, 58-63. <https://doi.org/10.4206/aus.2015.n18-10>
- Cárdenas Jirón, L.A., Vásquez, J.P., Zamorano, J.C. y Acevedo, C. (2016). Explorando luz solar en modelos de desarrollo inmobiliario. Aplicaciones en cinco ciudades chilenas. *Urbanismo*, 34, 158-173. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2016.40394>
- Cheng, V. (2010). Understanding densities and high densities. En E. Ng (Ed.), *Designing high-densities Cities for social & environmental sustainability* (pp. 3-17). Londres: Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849774444>
- De Mattos, C., Fuentes, L. y Link, F. (2014). Tendencias recientes del crecimiento metropolitano en Santiago de Chile. ¿Hacia una geografía urbana? *INVI*, 29(81), 193-219. <https://doi.org/10.4067/s0718-83582014000200006>
- Decreto Supremo 47/92, 426 Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Pub. L. No. del Ministerio de la Vivienda y Urbanismo. *Diario Oficial de la República de Chile*, 5 de junio de 1992.
- Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaakov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77-86. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00082-8)
- Instituto Nacional de Estadísticas, INE (2018). *Síntesis resultados Censo 2017*. Recuperado de <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf>
- Inzulza, J., Vargas, K. y Wolff, C. (2017). Acceso solar: un derecho urbano para la calidad de vida vulnerado desde la gentrificación contemporánea. El caso de la comuna de Estación Central, Chile. *Revista 180*, 39, 1-15. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/149636/Acceso-solar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Knowles, R. (2003). The solar envelope. It's meaning for energy and buildings. *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)

- Knowles, R. & Villoco, M. (1980). Solar access and urban form. *AIA*, 42-49 y 70.
- Košir, M., Capeluto, I. G., Krainer, A., & Kristl, Ž. (2014). Solar potential in existing urban layouts-critical overview of the existing building stock in Slovenian context. *Energy Policy*, 69, 443-456. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.045>
- Lai, C. & Hokoi, S. (2015). Solar façades: A review. *Building and Environment*, 91, 152-165. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.007>
- Ley N° 20.958 Establece un Sistema de Aportes al Espacio Público del Ministerio de la Vivienda y Urbanismo. *Diario Oficial de la República de Chile*, 15 de octubre de 2016. Recuperada de <https://www.leychile.cl/N?i=1095541&f=2016-10-15&p=>
- Li, D., Liu, G., & Liao, S. (2015). Solar potential in urban residential buildings. *Solar Energy*, 111, 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.045>
- Martínez Lemoine, R. (2007). *Santiago de Chile. Los planos de su historia. Siglos XVI a XX. De Aldea a Metrópolis*. Santiago de Chile: Municipalidad de Santiago.
- Molano Camargo, (2016). El derecho a la ciudad: de Henri Lefebvre a los análisis sobre la ciudad capitalista contemporánea. *Folios*, 4, 3-19
- Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., & Scartezzini, J. (2016). Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93, 469-482. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.053>
- Morello, E. & Ratti, C. (2009). Sunscapes: "Solar envelopes" and the analysis of urban DEMs. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1), 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.005>
- Ng, E. (Ed.) (2010). *Designing high-densities Cities for social & environmental sustainability*. Londres: Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849774444>
- Olgay, V. (2015). *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton: Princeton University Press. doi: 10.2307/j.ctvc77kqb
- Olofsson, T., Anders Ohlsson, K.E., & Ostin, R. (2017). Measurement of the environmental temperature using the sol-air temperature using the sol-air thermometer. *Energy Procedia*, 132, 357-362. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.108>
- Pallares, M.E., Lou, J.Ch., Pallares, M., Cárdenas, L.A. y Gallardo, F. (2018). *Identificación de alternativas y estrategias de mitigación al impacto de la densificación residencial en altura*. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Redweik, P., Catita, C., & Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97, 332-341. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>
- Sad De Assis, E. & Barros Frota, A. (1999). Urban bioclimatic design strategies for a tropical city. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 4135-4142. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00155-7)
- Santa Cruz, J.D., Poduje, I., Martínez, J.P., y Jobet, N. (2015). *Infilling. Cómo cambió Santiago y nuestra forma de vivir la ciudad*. Santiago de Chile: Hueders.
- Sarralde, J. J., Quinn, D. J., Wiesmann, D., & Steemers, K. (2015). Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. *Renewable Energy*, 73, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.028>
- Stasinopoulos, T. (2018). A survey of solar envelope properties using solid modelling. *Journal of Green Building*, 13(1), 3-30. <https://doi.org/doi-org.uchile.idm.oclc.org/10.3992/1943-4618.13.1.3>
- Stocco, S., Cantón, M.A. y Correa, E. (2018). Incidencia de las plazas urbanas sobre el comportamiento térmico del entorno en alta densidad edilicia. El caso de la ciudad de Mendoza - Argentina. *Revista Urbano*, 37, 94-106. <https://doi.org/http://doi.org/10.22320/07183607.2018.21.37.08>
- Szokolay, S. (Ed.) (2014). *Introduction to architectural science. The basis for Sustainable Design*. Nueva York: Routledge.
- Vartholomaios, A. (2015). The residential solar block envelope : A method for enabling the development of compact urban blocks with high passive solar potential. *Energy and Buildings*, 99, 303-312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.046>
- Vicuña del Río, M. (2017). Impacto de la densificación residencial intensiva en la segmentación del tejido urbano de Santiago: un enfoque cuantitativo. *Revista 180*, 40, 16.
- Yeziro, A., Capeluto, I. G., & Shaviv, E. (2006). Design guidelines for appropriate insulation of urban squares. *Renewable Energy*, 31, 1011-1023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.05.015>

## Notas

- 1 Se agradece el financiamiento de los proyectos de investigación Fondecyt N°1130139, y el proyecto MINVU - FAU N° 120 106 019 102 062
- 2 Recibido: 25 de febrero de 2019. Aceptado: 10 de noviembre de 2019.
- 3 Contacto: lcardena@uchilefau.cl
- 4 Contacto: jchang@uchile.cl