

PREFERENCIAS DE LOCALIZACIÓN Y SEGMENTACIÓN DE AGENTES LOGÍSTICOS EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO, CHILE

Gerardo Ureta^{1*}, Ricardo Hurtubia¹²³, Ricardo Giesen¹

¹ Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

² Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

³ Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Chile

*Autor para correspondencia:
geureta@uc.cl

RESUMEN

Los agentes de logística urbana toman decisiones de localización respecto de sus instalaciones logísticas (IL), lo que tiene un impacto relevante en la forma urbana. A partir de datos públicos y privados, se analiza el fenómeno de expansión de las IL en Santiago de Chile y se estiman modelos de elección de localización para distintos tipos de IL, según segmentaciones exógenas basadas en superficie construida y calidad de la construcción. Los resultados muestran que durante los últimos 20 años se ha producido una expansión logística considerable en Santiago, tanto en términos del destino de uso de suelo predial, como en superficie construida. Los resultados de los modelos de localización muestran que los distintos segmentos de IL tienen patrones de localización claramente diferentes.

Palabras clave expansión logística, uso de suelo logístico, modelo de elección de localización

ABSTRACT

Urban logistics agents make location decisions regarding their logistics facilities; these may have an impact on urban form. The phenomenon of logistics sprawl in Santiago de Chile is analysed using public and private data. Location choice models are estimated for different types of facilities, following an exogenous segmentation based on built surface and construction quality. Results show that during the last 20 years there has been a considerable logistic sprawl in Santiago, both in terms of the land use destination of parcels and in-built surface. Our location choice model results indicate that different types of logistic facilities have clearly different location patterns.

Keywords logistics sprawl, logistics land use, location choice model

1. INTRODUCCIÓN

La logística urbana (LU), encargada de la distribución de bienes, es vital para el funcionamiento de las ciudades y su economía, generando potenciales impactos en la calidad del entorno urbano y el bienestar social (Aljohani y Thompson, 2016; Bektaş et al., 2019). A pesar de ello, a la LU no se le ha prestado suficiente atención en el proceso de diseño de políticas públicas y planificación del uso de suelo urbano (Browne et al., 2012; Holguin-Veras et al., 2021; Marcucci et al., 2017).

Podemos dividir las partes interesadas en la LU entre públicas y privadas. En las primeras, se encuentran las autoridades, operadores de transporte público y residentes, y en las segundas, despachadores, transportistas de carga y receptores (Arrieta-Prieto et al., 2020; De Oliveira y De Oliveira, 2016). Cada uno de ellos presenta necesidades, objetivos y problemas diferentes. A las empresas privadas que hacen LU las llamaremos agentes de logística urbana (ALU).

Dentro de los ALU, los transportistas de carga suelen aspirar a tener recorridos de recogida y entrega eficientes, que maximicen sus ganancias netas y satisfagan los intereses de los despachadores de carga (Quak et al., 2016). Tanto despachadores como receptores, buscan brindar servicios eficientes (Carbone et al., 2017), donde ambos pueden actuar como puntos de demanda. Tanto despachadores como receptores requieren de instalaciones logísticas (IL) para sus actividades. Para los agentes públicos los objetivos son diferentes (Rześny-Cieplińska y Szmelter-Jarosz, 2021). Las autoridades buscan maximizar el bienestar social mediante la reducción de costos sociales a través de políticas públicas, que incluyen los costos privados y la cuantificación de las externalidades. Los operadores de transporte público utilizan la infraestructura vial, debiendo compartirlas con los transportistas de carga. Por último, los residentes de las ciudades se benefician, pero también pueden experimentar molestias producto de la LU.

Las decisiones de localización que toman los ALU respecto de sus instalaciones son importantes para conseguir sus fines, pues combinan la disponibilidad del producto con los pedidos de los clientes al almacenar el inventario a lo largo del tiempo, actuando como amortiguador entre la oferta y la demanda (Lim y Park, 2020). La configuración actual de localización de los ALU genera diversas externalidades, ya que muchas instalaciones logísticas se ubican en zonas alejadas de los centros de consumo y clientes finales, provocando un aumento de externalidades como emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación, ruido, congestión y consumo de combustible (Aljohani y Thompson, 2016; Dablanc, 2011). También se han descrito impactos en la calidad de vida de las personas (Oliveira et al., 2019) y justicia ambiental urbana (Yuan, 2018), producto de que las instalaciones logísticas se localizan en zonas donde viven los grupos socioeconómicos más vulnerables. Un estudio de escenarios realizado por Wagner (2010) confirma que en un escenario con uso de suelo logístico disperso, efectivamente hay más externalidades que en uno con suelo logístico concentrado. Los camiones de carga tienen que viajar distancias más largas hacia las áreas urbanas y la distancia total recorrida aumenta a medida que los envíos se mueven de camiones grandes a vehículos de reparto más pequeños (Crainic et al., 2004).

Para diseñar políticas públicas efectivas para mitigar las externalidades de la LU producto de la expansión logística, es necesario comprender las características regionales de la relación entre oferta y demanda de instalaciones logísticas en áreas metropolitanas (Lim y Park, 2020). Pese a que el fenómeno de expansión logística está bien documentado en ciudades de países desarrollados,

faltan estudios sobre la localización logística en áreas metropolitanas del sur global, con la excepción de Brasil (Guerin et al., 2021).

Diversos autores reconocen la existencia de heterogeneidad en los patrones de localización de los ALU y sus instalaciones en los mercados inmobiliarios logísticos. El precio de suelo, políticas de uso de suelo, accesibilidad a lugares de consumo y accesibilidad a infraestructura vial, aeroportuaria y marítima, pueden variar de acuerdo con la función a realizar dentro de las instalaciones logísticas (Heitz et al., 2019; Onstein et al., 2021; Sakai et al., 2020). Esas características funcionales permitirían segmentar de mejor manera el mercado inmobiliario logístico, pero no se ha reportado una estructura clara de cómo segmentarlos. Estudios previos asumieron submercados de manera exógena (Clark y Pennington-Cross, 2016). Otros utilizaron análisis de conglomerados para delinear submercados basados en similitudes de precios inmobiliarios (Helbich et al., 2013) y otros han utilizado métodos estadísticos (Lim y Park, 2020).

Para entender mejor la relación entre el uso de suelo y la elección de localización que toman los ALU sobre sus instalaciones logísticas, este artículo tiene un doble objetivo. Primero, mediante un análisis centro-gráfico (Dablanc et al., 2014; Dablanc y Rakotonarivo, 2010) buscamos comprender el fenómeno de expansión logística de las IL en la Región Metropolitana de Santiago de Chile entre los años 1990 y 2020. Segundo, a partir de medidas de accesibilidad como variables explicativas de la localización, se proponen modelos de elección de localización (McFadden, 1978) de las instalaciones logísticas, de acuerdo a una segmentación exógena de ellas. Estimamos nuestro modelo considerando a todos los ALU y sus instalaciones logísticas localizadas en la Región Metropolitana de Santiago de Chile entre los años 2016 y 2020, a partir de los datos del catastro de bienes raíces del Servicio de Impuestos Internos (SII, 2021).

El resto de este documento está organizado como sigue. En la sección 2, se describe la metodología para medir la expansión logística, calcular medidas de accesibilidad y estimar el modelo de elección de localización. En la sección 3 se describen los datos utilizados. En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos a partir de las metodologías descritas en la sección 2, utilizando los datos de la sección 3. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones y extensiones de esta investigación.

2. METODOLOGÍA

2.1 Medidas de Expansión Logística

La expansión logística describe el fenómeno de concentración de las instalaciones logísticas en las regiones periféricas de áreas metropolitanas a lo largo del tiempo (Dablanc y Rakotonarivo, 2010). Esta puede ser causada por el aumento de la densidad de población (Yuan y Zhu, 2019), el aumento del precio del suelo en zonas centrales y/o la mayor disponibilidad de espacio en las zonas periféricas (Combes, 2019). La identificación del fenómeno de expansión logística conduce a la comprensión de las tendencias agregadas en el transporte urbano de mercancías y la anticipación de sus impactos a nivel regional (Dubie et al., 2020).

Dablanc y Rakotonarivo (2010) fueron los primeros en medir la expansión logística identificando como un ALU, en este caso las empresas de transporte de paquetería, se distanciaron del núcleo

urbano de la ciudad de París durante el periodo 1974-2008. Luego, diversos estudios han medido la expansión logística (Dubie et al., 2020; Guerin et al., 2021; He et al., 2018; Li et al., 2018; Yuan y Zhu, 2019). Kang (2020) sintetizó el trabajo existente y enfatizó dos términos: *centralidad* y *concentración*, en la comprensión de la dinámica espacial del desarrollo de instalaciones logísticas. Según Kang, el patrón de reorganización espacial de las IL puede incluir las siguientes dimensiones: (i) descentralización, las IL se distancian del núcleo urbano; (ii) concentración, se desplazan cerca de otras instalaciones logísticas; (iii) descentralización relativa, esto es, aumento de la distancia desde el distrito comercial central; y (iv) concentración relativa, dicha concentración es en dirección hacia zonas con mayor densidad de empleo/población.

En el caso de medir la descentralización o descentralización relativa, se ha utilizado la distancia media de las instalaciones logísticas a los empleos o la población (Dablanc et al., 2014; Dablanc y Ross, 2012). Para medir la desconcentración se utiliza el coeficiente de Gini (Kang, 2020; van den Heuvel et al., 2014). Así, un coeficiente de Gini alto sugiere un patrón de distribución desigual: una gran proporción de las instalaciones de almacenamiento se concentran en una pequeña proporción de unidades geográficas.

En la ecuación (1) se presenta la medida centro-gráfica definida por Dablanc y Ross (2012), que calcula la distancia promedio a todas las IL desde su centroide geográfico (baricentro) en un área metropolitana:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (IL_i \times d_i)}{IL} \quad (1)$$

donde, IL_i es la cantidad de m^2 de construcción logística en la zona i , IL es la suma de los IL_i , d_i es la distancia euclidiana a la zona i desde el baricentro de todas las instalaciones logísticas. El baricentro se calcula como la media de las coordenadas XY ponderadas por el tamaño (m^2) de construcciones logísticas.

En nuestro estudio, se mide la expansión logística hacia el centro geográfico de las instalaciones comerciales, dada la relación que existe entre el sector logístico y comercial. Además, se incluye una medición de expansión logística de las IL hacia el centro histórico de la ciudad de Santiago, a fin de compararla con la medida de expansión comercial.

2.2 Medidas de Accesibilidad

La accesibilidad es un concepto clave en política de transporte; se define como la facilidad con la que un sistema de transporte puede hacer frente a las necesidades de movilidad de personas y mercancías, debido a la distribución espacial de las actividades económicas y sociales (Geurs y van Wee, 2004; Khalili et al., 2020).

Para la logística urbana se han utilizados diversas medidas de accesibilidad, especialmente las basadas en el modelo gravitacional (González-Feliu, 2018). El indicador de accesibilidad más utilizado es la *accesibilidad potencial*, equivalente al total de todos los destinos de interés ponderados por una función inversa del esfuerzo para llegar a ellos, medido en tiempo, costo o una combinación de ambos, como el costo generalizado (Wegener, 2019), como en la ecuación (2):

$$Acc_i = \sum_{j=1} O_j * e^{-\phi d_{ij}} \quad (2)$$

donde Acc_i es la accesibilidad potencial de la zona i , O_j representa los m^2 de suelo o edificios (comercial, habitacional, industrial, logístico y oficina) en la zona j , $e^{-\beta d_{ij}}$ es una función de impedancia exponencial negativa y d_{ij} es la distancia entre los centroides de las zonas i y j .

Como no se contaba con datos de flujos precisos para calibrar la función de impedancia, usamos una especificación del modelo de vida media de disminución de la distancia (Östh et al., 2016), para seleccionar el parámetro ϕ , según la ecuación (3), en que m es la distancia media entre zonas.

$$\phi = -\frac{\ln(0,5)}{m} \quad (3)$$

2.3. Modelo de Elección de Localización

El modelamiento para la elección de localización considera un agente h que evalúa un conjunto de alternativas de localización I , cada una de las cuales le reporta una utilidad que depende de los atributos Z_i de la alternativa i (incluido el precio o renta de la unidad), las características X_h del agente y un vector β_h de parámetros de valoración de los atributos y características. El agente enfrenta el problema de elegir la alternativa de localización i que maximiza su utilidad (4):

$$\max_i U_{hi}(X_h, Z_i, \beta_h) \quad (4)$$

La utilidad U_{hi} tiene un término aleatorio de error que puede deberse a variables no observadas y otros aspectos no capturados por el modelador, por lo que la utilidad se puede reescribir como:

$$U_{hi} = V_{hi} + \varepsilon_{hi} \quad (5)$$

donde V_{hi} es la componente observable o determinística (Ortúzar y Willumsen, 2011, Capítulo 7). Esto hace que la alternativa elegida no sea determinística, sino que se defina por una probabilidad que depende de la distribución del error, ε_{hi} . Si este sigue una distribución valor extremo tipo I, independiente e idéntica (IID), la probabilidad que un agente h seleccione la localización i se puede escribir como un modelo Logit multinomial (MNL):

$$P_h(i) = \frac{\exp(\mu V_{hi})}{\sum_{j \in S} \exp(\mu V_{hj})} \quad (6)$$

donde S es un subconjunto de alternativas de localización, que se selecciona aleatoriamente desde el universo de localizaciones posibles y μ es un factor de escala, inversamente proporcional a la desviación estándar del término error. El modelo MNL típicamente asume que V_{hi} es una función lineal y aditivamente separable (esto es, $V_{hi} = \sum_k \beta_k X_{ki}$) y μ es típicamente normalizado a uno al no ser identificable (Ben-Akiva y Lerman, 1985).

El modelo se puede estimar en la librería Biogeme (Bierlaire, 2003) de *Python*, mediante máxima verosimilitud, entregando los parámetros beta β_n que proporcionan el mejor ajuste. Las variables independientes X_n , asociadas con esos parámetros, se explican a continuación.

3. DATOS

Usamos tres conjuntos de datos. El primero, proviene del catastro de bienes raíces del Servicio de Impuestos Internos de Chile (SII, 2021), que contiene información sobre la superficie de suelo, la cantidad de m² construidos en el suelo, el año de localización, calidad de las construcciones y el destino o actividad económica (comercial, habitacional, industrial, logística y de transporte). El segundo, proviene del Censo 2017 (INE, 2018). El tercer conjunto de datos proviene de empresas de consultoría inmobiliaria (TocToc.com y Pablo Trivelli y Cia); con estos se construyó el banco de datos para conocer el precio del suelo en el área estudiada.

3.1 Periodos de Medición

Se consideraron periodos de 5 años a partir del año 1981 hasta el año 2020. Las medidas de accesibilidad utilizadas como variables explicativas para estas decisiones de localización fueron calculadas con los datos de localización obtenidos hasta el año 2015. Para estimar los modelos se consideró el periodo a partir del año 2016 hasta información del año 2020.

3.2 Clasificación de Instalaciones Logísticas

Actualmente, las instalaciones logísticas se segmentan de acuerdo a normativas regionales, de países o han sido generadas por consultoras inmobiliarias (Heitz et al., 2019; Kang, 2018). Con la información disponible no es posible realizar fácilmente una segmentación de ALU y sus instalaciones logísticas. Por ejemplo, un ALU puede haber localizado unas instalaciones logísticas en un suelo logístico, comercial, industrial u otros usos. Además, sobre un uso de suelo logístico pueden existir construcciones con destinos distintos al logístico. De esta forma, generar una segmentación de ALU e instalaciones logísticas resulta complejo, pero necesario.

A partir de los datos públicos del SII (2021), se buscó generar diversas segmentaciones de las instalaciones logísticas en base a algunos criterios. En una primera categoría se consideraron las instalaciones logísticas que cuentan con menos de 10 m². El supuesto es que ellas están localizadas junto a edificaciones habitacionales, por lo que su prestación es para satisfacer necesidades distintas a las comerciales.

El SII cataloga además a las construcciones con calidad entre 1 a 5, donde 1 es categoría superior y 5 inferior. La calidad permite diferenciar las construcciones de una misma clase de acuerdo con sus especificaciones técnicas y costos de edificación. Luego de múltiples estimaciones, donde se agruparon las distintas calidades consideradas por el SII para estimar de mejor manera los modelos de elección de localización, se concluye que la calidad 1 por si sola presentaba mejores resultados. Por otro lado, se agruparon las calidades 2 y 3 en un segmento, y las calidades 4 y 5 en otro segmento.

En la Tabla 1 se muestra la distribución de m² construidos de instalaciones logísticas en el periodo 2016-2020. Como se aprecia, las IL pueden estar en suelo con categorización distinta al uso logístico según el SII. Las construcciones de IL sobre suelo con destino logístico representan el 77,17%.

Tabla 1 Distribución Superficie Construida IL, Periodo 2016-2020

Segmento	Rango superficie	Calidad de la construcción	Superficie construida total (m ²)	Superficie promedio por unidad (m ²)	Superficie construida total sobre suelo logístico (m ²)	% superficie sobre suelo logístico
1	< 10 m ²	Todas	159.254	3,70	120.867	75,90
2	≥ 10 m ²	1	402.884	1068,66	351.725	87,30
3	≥ 10 m ²	2,3	1.000.906	827,80	778.596	77,97
4	≥ 10 m ²	4,5	227.678	64,15	59.461	26,12

3.3 Variables Independientes

Como se discutió en la sección introductoria, el acceso a las infraestructuras juega un papel fundamental en la decisión de elección de localización. Por lo tanto, se espera que algunas de las variables sean significativas, como la proximidad a los puertos de la Región de Valparaíso (RV), aeropuerto de Santiago y entrada más cercana a una autopista.

Las medidas de accesibilidad se calculan, según las ecuaciones (2) y (3), para los distintos usos de suelo y destino de las construcciones. como suelos y construcciones comerciales, habitacionales, industriales, logísticos, oficinas, salud, sector público y hoteles. Para el caso de las construcciones con destino comercial, se generaron dos segmentaciones, a fin de entender si las dimensiones de las construcciones tenían un impacto en el modelo de localización. Como criterio de segmentación en este caso, se consideró en una categoría aquellas que estaban sobre los 400 m² y otra bajo los 399 m², siguiendo la clasificación de *strip center* realizada por la empresa de consultoría inmobiliaria *GPS Property Chile*^{*}. Además, se calculó la accesibilidad a la población, de acuerdo con los datos del Censo 2017 (INE, 2018). Finalmente, se midió la accesibilidad según el criterio de segmentación de la sección 3.2. para instalaciones logísticas; es decir, para IL menores y mayores que 10 m².

4. RESULTADOS

El enfoque metodológico, presentado en la sección 2, con los datos de la sección 3, se aplicó a la Región Metropolitana (RM) de Santiago de Chile. Producto de la importancia que tienen los

* <https://gpsproperty.cl/estudios>

puertos localizados en la Región de Valparaíso (RV), se amplió la zona original considerando la distancia desde la RM a los puertos de la RV.

El área de estudio (ver Figura 1), representa más de 2.600 millones de m². La RM cuenta con 52 comunas, de las cuales 32 pertenecen al Área Metropolitana de Santiago (AMS). De acuerdo con la normativa urbanística chilena vigente, no es posible construir sobre los 1.000 metros de altura sobre el nivel del mar, por lo cual, se eliminaron celdas donde el 100% de ellas estaba sujeta a esta restricción. Además, no se consideraron como zonas de localización, celdas donde el 100% de ellas contenía áreas protegidas, según declaración del Ministerio del Medio Ambiente de Chile.

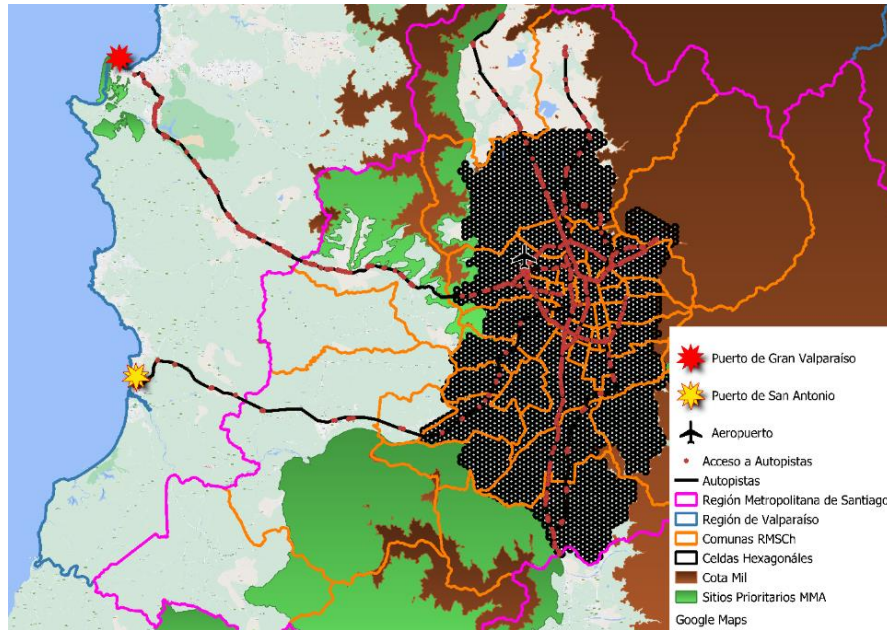


Figura 1 Área de Estudio

Para lograr una división del espacio que permitiera no repetir información y obtener una buena aproximación del área de estudio, se definió hexágonos regulares para mejorar la modelación. Así, el área de estudio se subdividió en más de 3.300 celdas hexagonales (Sahr et al., 2003); cada una con un lado de casi 550 metros, y formando un área de más de 785 mil m² (ver Figura 2).



Figura 2 Ejemplo de Celda Hexagonal

A cada celda hexagonal, se le incorporó información proveniente del catastro de bienes raíces del SII (2021), tal como precios de suelo, distancias desde su centroide hacia alguna infraestructura (aeropuerto, puerto y autopista) y los resultados de las medidas de accesibilidad para los diferentes usos de suelo considerados.

Las Figuras 3 y 4 muestran la distribución espacial de m² de construcciones y suelo logístico en el año 2020, respectivamente. En el caso de construcciones logísticas, se puede ver una fuerte concentración de IL en el centro de la ciudad. También se observan localizaciones en las salidas norte y poniente de la RM, explicadas por la importancia que tiene el Puerto de Valparaíso.

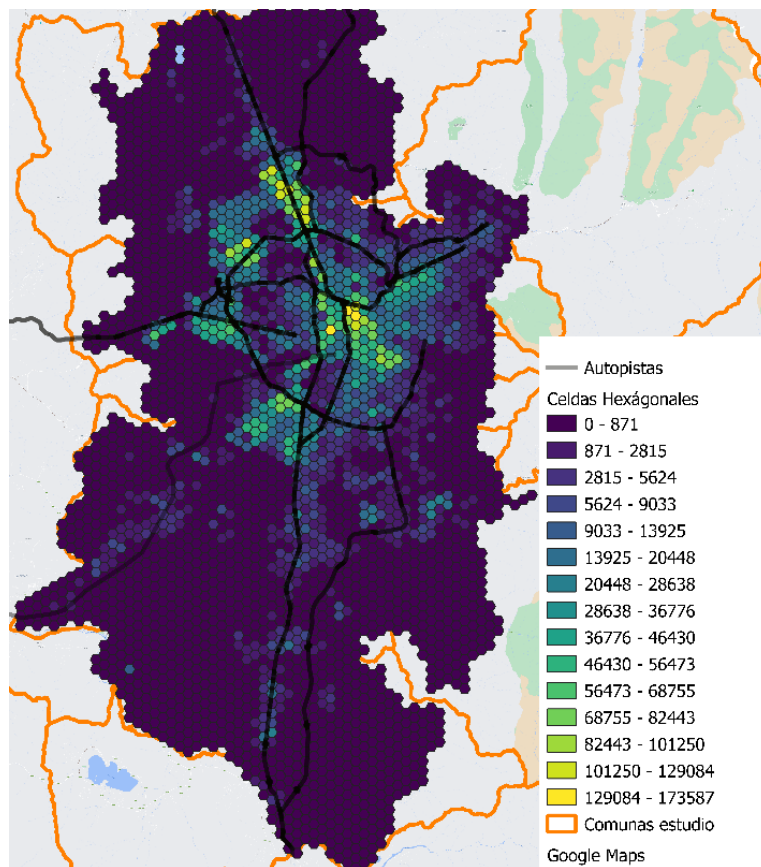


Figura 3 Distribución Metros Cuadrados Construidos de IL (año 2020)

También se observa que el suelo con destino de uso logístico se localiza hacia las salidas en dirección a los puertos de la RV; en cambio, las construcciones logísticas aún tienen una fuerte presencia en las zonas centrales de la ciudad de Santiago.

4.1. Expansión Logística

El análisis se dividió en dos partes. La primera, estudió la expansión del uso de suelo categorizado como logístico por el SII (2021). La segunda, considera las construcciones que tengan destino logístico, independiente del destino del uso de suelo. La Tabla 2 analiza la evolución de la expansión del suelo logístico, calculada con el análisis centro-gráfico de la ecuación (1), respecto al baricentro comercial y al centro histórico. Se verifica la expansión del suelo con destino logístico

a partir del año 2000. A partir de fines de la década del 90, el suelo logístico se comenzó a localizar tendencialmente en dirección al Aeropuerto de Santiago y el Puerto de Valparaíso. El mismo fenómeno se aprecia en la Figuras 5 y 6 en el caso de la expansión logística respecto de la distancia hacia el centro histórico de la ciudad de Santiago.

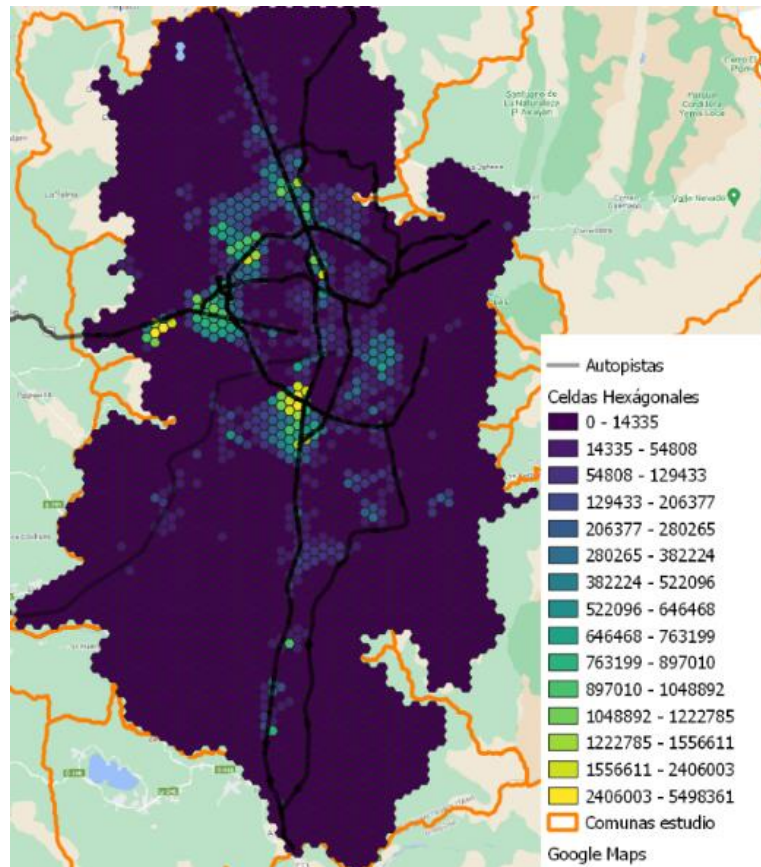


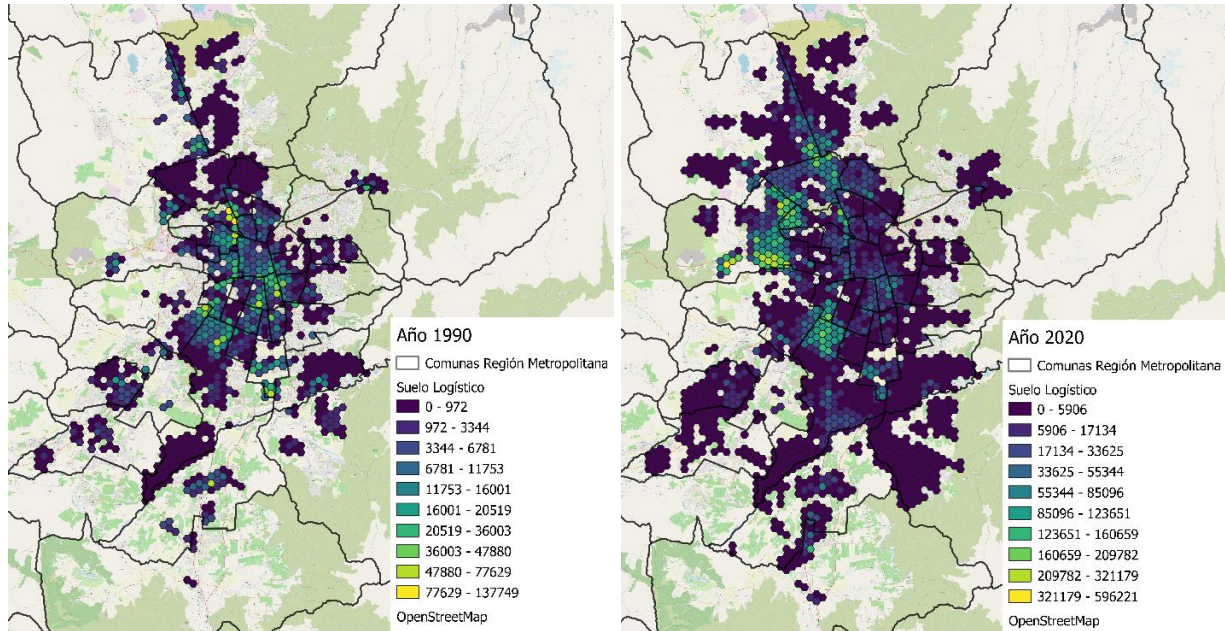
Figura 4 Distribución Metros Cuadrados de Suelo de IL (año 2020)

Tabla 2 Expansión del Suelo Logístico

Periodo	Distancia a Baricentro Comercial (km)	Variación respecto a Periodo Anterior (%)	Distancia a Centro Histórico (km)	Variación respecto a Periodo Anterior (%)
2020	9,81	11,99	8,64	9,64
2015	8,76	15,11	7,88	15,54
2010	7,61	-1,30	6,82	13,86
2005	7,71	9,05	5,99	1,53
2000	7,07	24,69	5,90	-3,75
1995	5,67	-5,66	6,13	-8,92
1990	6,01	-3,69	6,73	1,97
1985	6,24		6,60	

A su vez, la Tabla 3 analiza la expansión logística para las superficies construidas de IL, también respecto al baricentro comercial y el centro geográfico de la ciudad. Para este análisis se excluyen

aquellas instalaciones con superficie inferior a 10 m², que corresponden principalmente a bodegas residenciales. Al igual que en el caso del suelo destinado a IL, se verifica una expansión a partir de año 2000.

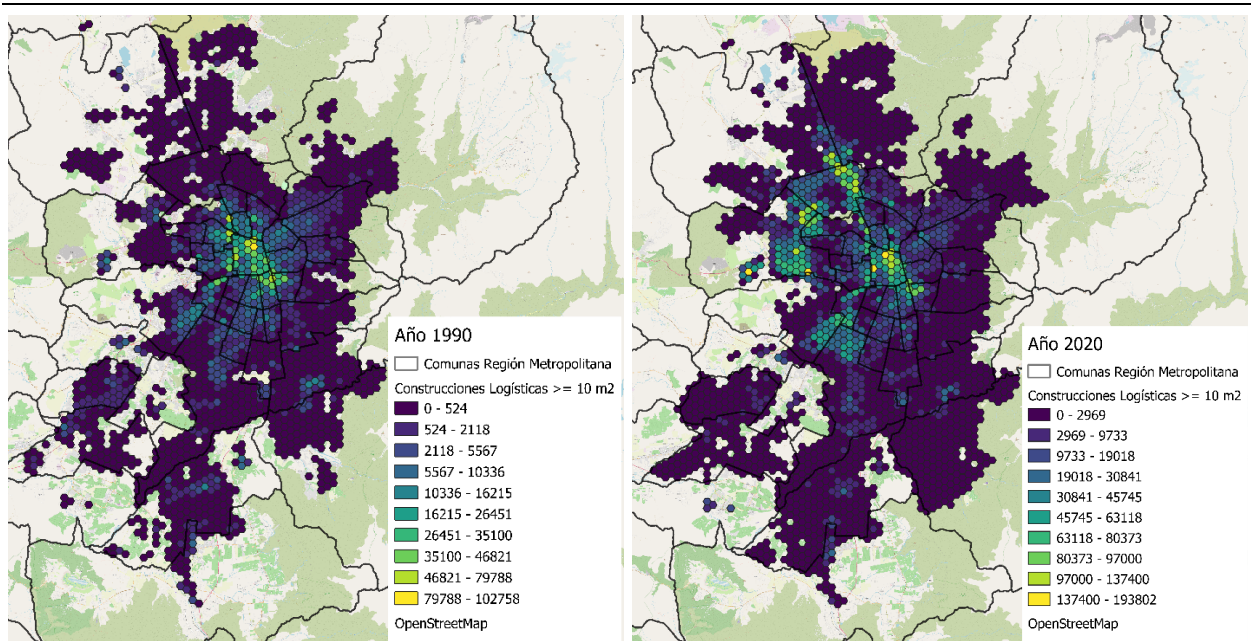


Figuras 5 (izq.) y 6 (der.) Distribución Espacial del Suelo Logístico, años 1990 – 2020

Tabla 3 Expansión de Construcciones Logísticas

Periodo	Distancia a Baricentro Comercial (km)	Variación respecto a Periodo Anterior (%)	Distancia a Centro Histórico (km)	Variación respecto a Periodo Anterior (%)
2020	6,19	9,17	5,68	15,92
2015	5,67	21,41	4,90	25,32
2010	4,67	21,61	3,91	14,33
2005	3,84	28,43	3,42	-5,79
2000	2,99	13,26	3,63	-13,57
1995	2,64	-8,01	4,20	-9,87
1990	2,87	2,14	4,66	4,02
1985	2,81		4,48	

Las Figuras 7 y 8 muestran la evolución de la distribución espacial de la superficie construida dedicada a IL. En ellas se puede apreciar como entre los años 1990 y 2020 existe un desplazamiento hacia el sector norponiente de la RM.



Figuras 7 (izq.) y 8 (der.) Distribución Espacial de la Superficie Construida de IL de 10 o más m², años 1990 – 2020

4.2. Accesibilidad

Las medidas de accesibilidad se calculan según las ecuaciones (2) y (3) y son utilizadas principalmente como variables explicativas del modelo de localización (atributos de cada alternativa). La Figura 9 muestra cómo cae el nivel de accesibilidad en función de la distancia, dado el parámetro ϕ utilizado.

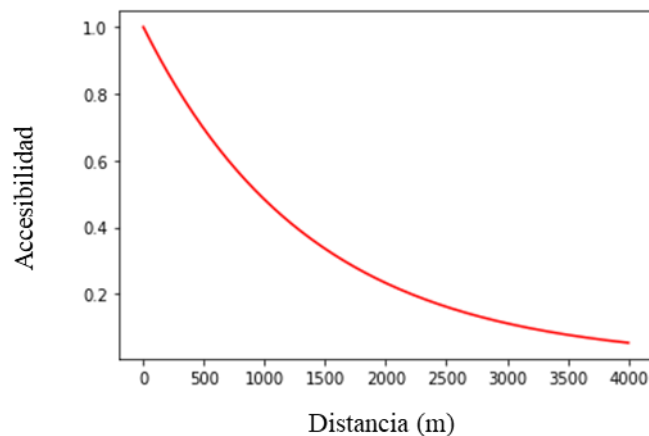


Figura 9 Decaimiento de la Accesibilidad con la Distancia

Para tener una mejor comprensión del problema, estimamos y analizamos también la accesibilidad a construcciones logísticas. Para esto, las separamos en dos grupos según su superficie construida: menor a 10 m² y superior o igual a 10 m². Es relevante tener en cuenta que las instalaciones de menor superficie están localizadas, en su mayoría, en sitios donde existen viviendas y oficinas, y en particular, edificaciones de gran altura. Esto se debe a que el mercado inmobiliario de vivienda

en altura se caracteriza por ofrecer a sus clientes un departamento u oficina más un estacionamiento y una bodega. También las oficinas, en muchos casos, cuentan con bodegas en sus edificaciones.

Tal como se ve en la Figura 10, la accesibilidad a construcciones logísticas de superficie menor a 10 m^2 es alta en la zona nororiente de la RM, puesto que en esa zona se concentra la mayor cantidad de m^2 de vivienda y oficinas en altura. Además, de acuerdo con las normativas regulatorias de la ley general de urbanismo y construcción, y su correspondiente ordenanza, para utilizar las instalaciones logísticas construidas en edificios habitacionales, los comités de propietarios de las viviendas del edificio deben autorizar un uso distinto al residencial para ellas, por lo que es raro encontrar que esas IL tengan un uso común de almacenamiento para fines comerciales.

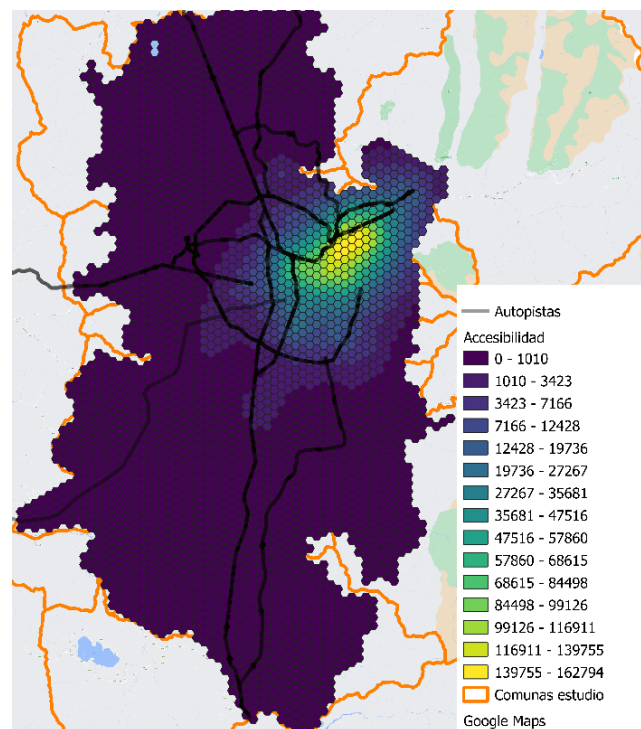


Figura 10 Accesibilidad a IL $<10 \text{ m}^2$. Año 2015

La Figura 11 muestra la accesibilidad a instalaciones logísticas con superficies de 10 m^2 o más. Se visualiza que la mayor accesibilidad está en el centro de la RM. Como se demostró en la sección de expansión logística, los usos de suelo logístico, tanto en suelo como en construcciones, se están desplazando hacia las zonas suburbanas y ex-urbanas, existiendo un fuerte incremento de suelo y construcciones de instalaciones logísticas en zonas con menor distancia a los puertos de la RV.

4.3. Modelo elección de localización

De acuerdo con la metodología presentada en la sección 2.3, se estimaron modelos para la elección de localización de los ALU sobre sus instalaciones logísticas, de acuerdo con la segmentación presentada en la sección 3.2. para localizaciones de IL observadas en el periodo 2016-2020.

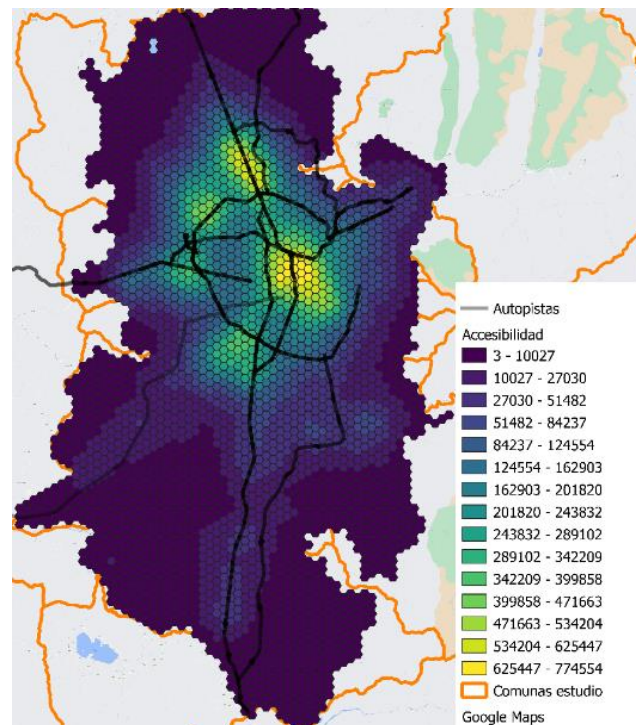


Figura 11 Accesibilidad a IL ≥ 10 m². Año 2015

Los modelos se estimaron con 19 alternativas de localización posibles para cada observación (obtenidas de un muestreo aleatorio de zonas del área de estudio) de acuerdo con la segmentación descrita en 3.2. Los resultados, que se muestran en la Tabla 4, contienen cuatro de cinco variables basadas en la proximidad a la infraestructura de transporte y logística. Si bien inicialmente se consideró al Puerto del Gran Valparaíso, ubicado en la RV, esta variable no se mantuvo en los modelos finales, pues su signo era contrario a las expectativas y presentaba una alta correlación con la distancia al aeropuerto. Esto se debe a que el Aeropuerto de Santiago, como la salida de la RM hacia el Puerto del Gran de Valparaíso, quedan en una zona geográfica similar. Distinta es la posición geográfica de la salida desde Santiago hacia el Puerto de San Antonio, que está ubicada en la zona sur de la capital y cuyo parámetro sí resultó significativo en uno de los modelos.

La variable Precio del suelo tiene el signo negativo esperado en todos los modelos, indicando que, *ceteris paribus*, localizaciones de menor precio son más atractivas para localizarse. Para el segmento 1, las variables Distancia a la estación de Metro más cercana, Accesibilidad a construcciones habitacionales y Valor del suelo, son relevantes en la decisión de localización. Los signos tienen sentido, verificando el supuesto inicial que instalaciones logísticas en este segmento, se localizan habitualmente junto a construcciones habitacionales. Para el segmento 2, la Distancia al Puerto de San Antonio en la RV, la Accesibilidad a construcciones comerciales sobre 400 m², la Accesibilidad a instalaciones logísticas sobre 10 m² y la Accesibilidad a suelo con destino estacionamiento, resultaron variables importantes en la decisión de localización. Estos resultados son aparentemente concordantes con el supuesto que la calidad catalogada como 1 por el SII, puede ser un atractivo para almacenar bienes que requieran de muy buenas instalaciones logísticas; estas se ubican directamente del puerto hacia la RM, requiriendo de espacio o suelo para estacionar vehículos, para luego de ser almacenadas en instalaciones logísticas, donde posteriormente los bienes son distribuidos hacia centros comerciales sobre 400 m².

Tabla 4 Resultados Modelos de Localización de Construcciones Logísticas

Variable	Segmento 1		Segmento 2		Segmento 3		Segmento 4	
	IL <10 m ²		IL >10 m ² , calidad 1		IL > 10 m ² , calidad 2 y 3		IL > 10 m ² , calidad 4 y 5	
	Coefficiente	Estadístico-t	Coefficiente	Estadístico-t	Coefficiente	Estadístico-t	Coefficiente	Estadístico-t
Distancia al Aeropuerto	-	-	-	-	-5,72E-05	-14,1	-	-
Distancia a entrada más cercana a Autopista	-	-	-	-	-	-	-0,000129	-9,05
Distancia a estación de Metro más cercana	0,000239	-48,1	-	-	-	-	-0,0000967	-13,7
Distancia a Puerto de San Antonio	-	-	-9,02E-05	-4,36	-	-	-	-
Accesibilidad a construcciones habitacionales	2,30E-07	4,73E-09	-	-	-	-	0,00000053	25,1
Accesibilidad a construcciones comerciales	-	-	-	-	-	-	0,000000965	11,1
Accesibilidad a construcciones comerciales ≥ 400 m ²	-	-	9,43E-06	5,10	-	-	-	-
Accesibilidad a IL ≥ 10 m ²	-	-	2,82E-06	2,09	-	-	-	-
Accesibilidad a suelo con destino estacionamiento	-	-	1,73E-05	20,7	-	-	-	-
Accesibilidad a suelo logístico	-	-	-	-	7,57E-08	5,00	-	-
Accesibilidad a población	-	-	-	-	-6,26E+06	-9,69	-0,0000228	28,2
Precio de suelo	-0,000319	-52,4	-3,05E-06	-20,7	-2,37E-07	-2,78	-0,00000535	-9,13
Verosimilitud Inicial	-128.999,20		-1.129,39		-3.621,84		-10.538,99	
Verosimilitud Final	-112.179,30		-413,33		-3.333,02		-9.292,80	
ρ^2	0,13		0,63		0,08		0,12	
Número de Observaciones	43.061		377		1.209		3.518	

Para el segmento 3 resultaron significativas la Distancia al aeropuerto, la Accesibilidad a suelo con destino logístico, la Accesibilidad a la población y el Precio del suelo. Para este segmento, la localización está influenciada por las regulaciones existentes, que no incentivan la localización en zonas con buena accesibilidad hacia donde viven las personas, por lo que buscan zonas periféricas.

Para el segmento 4 son relevantes la cercanía a las entradas de autopistas, la cercanía a estaciones del Metro de Santiago, y la accesibilidad a construcciones habitacionales y comerciales. Este segmento busca localizarse en lugares con baja accesibilidad para la población, lo que se podría explicar porque las IL pertenecientes a este segmento priorizan lugares donde compiten menos con otros usos alternativos, al tener baja calidad de construcción.

5. CONCLUSIONES

Se propone una metodología para evaluar y explicar las decisiones de localización de los agentes de logística urbana respecto a sus instalaciones logísticas. Para ello, primero se analizó y midió la expansión logística, tanto desde la perspectiva del uso del suelo como de la superficie construida, y se estimó modelos de localización para instalaciones logísticas separadas en cuatro segmentos.

Nuestros resultados confirman la existencia de expansión logística en la Región Metropolitana de Santiago, mostrando un cambio de orientación en el centro de gravedad de las instalaciones logísticas, tanto en tamaño de suelo como en tamaño de las construcciones. En un comienzo, estas se localizaban hacia el sur de la Región Metropolitana, para luego, a partir del periodo 1991-1995, dar un giro en baricentro hacia la zona norponiente, donde se ubican el Aeropuerto de Santiago y la salida hacia el Puerto del Gran Valparaíso. Esto provocó que la medida de expansión disminuyera, pero a partir de la primera década del año 2000, el fenómeno de expansión se acentuó hacia la periferia, particularmente entre los años 2011-2015.

Al estimar modelos de localización para el periodo 2016-2020, se observa que las grandes instalaciones logísticas, segmento 2 (alta calidad de la construcción), buscan cercanía al Puerto de San Antonio. Los segmentos 3 y 4 (calidad media y baja) no muestran esta tendencia. En el caso del segmento 4 se observa como los patrones de localización están orientados a la cercanía a autopistas, estaciones de Metro y construcciones habitacionales y comerciales. En los resultados se observa que no existe una clara correlación entre la ubicación de instalaciones logísticas y puntos de consumo (población), generando patrones de localización que pueden implicar un aumento de las externalidades generadas por las actividades de la logística urbana.

Una limitación importante de este estudio fue la falta de datos públicos para caracterizar y segmentar los agentes de logística urbana y sus instalaciones. Es posible que estas requieran de diferentes localizaciones y espacios logísticos. Por ejemplo, no todas las instalaciones logísticas están localizadas sobre un uso de suelo *ad-hoc*, existiendo construcciones logísticas sobre suelo comercial, habitacional e industrial. Abordar este desafío, permitiría reconocer la heterogeneidad de los agentes de logística urbana y como toman sus decisiones de localización, para así poder integrarlos en los planes de desarrollo urbano. Lo anterior requiere desarrollar una investigación acabada sobre quiénes son los agentes de logística urbana, a fin de clasificarlos y proponer una reorganización del espacio geográfico.

Esta investigación es relevante para el planificador urbano que busque incorporar el comportamiento de los agentes de logística urbana en el diseño de instrumentos de planificación, dado que contribuyen a diversas externalidades negativas, minimizan la eficiencia en el uso de suelo, y finalmente impactan en la calidad de vida de las personas. Un próximo paso podría ser evaluar el impacto que generaría el desarrollo de un tren de carga y de pasajeros, entre los puertos de la Región de Valparaíso y la Región Metropolitana, como también considerar la influencia que podría tener el Puerto Terrestre de Los Andes, ubicado a unos 90 km de Santiago.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer el apoyo del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, ISICI (PIA/BASAL AFB220003), para esta investigación.

REFERENCIAS

Aljohani, K. y Thompson, R.G. (2016) Impacts of logistics sprawl on the urban environment and logistics: taxonomy and review of literature. *Journal of Transport Geography* **57**, 255-263.

Arrieta-Prieto, M., Abdelrahman, I., Rivera-Gonzalez, C. y Mitchell, J.E. (2020) Location of urban micro-consolidation centers to reduce social cost of last-mile deliveries of cargo: a heuristic approach. *Networks* **79**, 292-313.

Bektaş, T., Ehmke, J.F., Psaraftis, H.N. y Puchinger, J. (2019) The role of operational research in green freight transportation. *European Journal of Operational Research* **274**, 807–823.

Ben-Akiva, M. y Lerman, S.R. (1985) *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press, Cambridge, Mass.

Bierlaire, M. (2003) BIOGEME: a free package for the estimation of discrete choice models *Proceedings of the 3rd Swiss Transportation Research Conference*. Marzo 2003, Ascona, Suiza.

Browne, M., Allen, J., Nemoto, T., Patier, D. y Visser, J. (2012) Reducing social and environmental impacts of urban freight transport: a review of some major cities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **39**, 19–33.

Carbone, V., Rouquet, A. y Roussat, C. (2017) The rise of crowd logistics: a new way to co-create logistics value. *Journal of Business Logistics* **38**, 238–252.

Clark, D. y Pennington-Cross, A. (2016) Determinants of industrial property rents in the Chicago metropolitan area. *Regional Science and Urban Economics* **56**, 34–45.

Combes, F. (2019) Equilibrium and optimal location of warehouses in urban areas: a theoretical analysis with implications for urban logistics. *Transportation Research Record* **2673**, 262-271.

Cox, T. y Hurtubia, R. (2020) Subdividing the sprawl: endogenous segmentation of housing submarkets in expansion areas of Santiago, Chile. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* **48**, 1770–1786.

Crainic, T.G., Ricciardi, N. y Storchi, G. (2004) Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **12**, 119–137.

Dablanc, L. (2011) City distribution, a key element of the urban economy: guidelines for practitioners. En Macharis, C. y Melo, S. (eds.), *City Distribution and Urban Freight Transport*. Edward Elgar, Cheltenham.

Dablanc, L., Ogilvie, S. y Goodchild, A. (2014) Logistics sprawl: differential warehousing development patterns in Los Angeles, California and Seattle, Washington. *Transportation Research Record* **2410**, 105-112.

Dablanc, L. y Rakotonarivo, D. (2010) The impacts of logistics sprawl: how does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we do about it? *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **2**, 6087-6096.

Dablanc, L. y Ross, C. (2012) Atlanta: a mega logistics center in the Piedmont Atlantic Megaregion (PAM). *Journal of Transport Geography* **24**, 432–442.

De Oliveira, G.F. y de Oliveira, L.K. (2016) Stakeholder's perceptions of city logistics: an exploratory study in Brazil. *Transportation Research Procedia* **12**, 339-347.

De Oliveira, L.K., de Araújo, G.G.F. y de Oliveira, I.K. (2019) How to explain the location of logistics warehouses from the urban quality-of-life index and the local supply index? *WSB Journal of Business and Finance* **53**, 15–21.

Dubie, M., Kuo, K.C., Giron-Valderrama, G. y Goodchild, A. (2020) An evaluation of logistics sprawl in Chicago and Phoenix. *Journal of Transport Geography* **88**, 102298.

Geurs, K.T. y van Wee, B. (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography* **12**, 127–140.

González-Feliu, J. (2018) Urban logistics and spatial territorial intelligence indicators: state-of-the-art, typology and implications for Latin American cities. *Interfases* **11**, 135-176.

Guerin, L., Vieira, J.G.V., de Oliveira, R.L.M., de Oliveira, L.K., de Miranda Vieira, H.E. y Dablanc, L. (2021) The geography of warehouses in the São Paulo Metropolitan Region and contributing factors to this spatial distribution. *Journal of Transport Geography*, **91**, 102976.

He, M., Shen, J., Wu, X. y Luo, J. (2018) Logistics space: a literature review from the sustainability perspective. *Sustainability* **10**, 2815.

Heitz, A., Launay, P. y Beziat, A. (2019) Heterogeneity of logistics facilities: an issue for a better understanding and planning of the location of logistics facilities. *European Transport Research Review* **11**, 5.

Helbich, M., Brunauer, W., Hagenauer, J. y Leitner, M. (2013) Data-driven regionalization of housing markets. *Annals of the Association of American Geographers* **103**, 871–889.

Holguin-Veras, J., Ramirez-Rios, D., Ng, J., Wojtowicz, J., Haake, D., Lawson, C.T., Calderón, O., Caron, B. y Wang, C. (2021) Freight-efficient land uses: methodology, strategies, and tools. *Sustainability* **13**, 3059.

INE (2018) Censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas, Chile.

Kang, S. (2018) Warehouse location choice: a case study in Los Angeles, CA. *Journal of Transport Geography* **88**, 102297.

Kang, S. (2020) Relative logistics sprawl: measuring changes in the relative distribution from warehouses to logistics businesses and the general population. *Journal of Transport Geography*, **83**, 102636.

Khalili, F.B., Antunes, A.P. y Mohaymany, A.S. (2020) Evaluating interregional freight accessibility conditions through the combination of centrality and reliability measures. *Journal of Transport Geography* **83**, 102665.

Li, S., Wei, Z. y Huang, A. (2018) Location selection of urban distribution center with a mathematical modeling approach based on the total cost. *IEEE Access* **6**, 61833-61842.

Lim, H. y Park, M. (2020) Modeling the spatial dimensions of warehouse rent determinants: a case study of Seoul metropolitan area, South Korea. *Sustainability* **12**, 259.

Marcucci, E., Gatta, V., Marciani, M. y Cossu, P. (2017) Measuring the effects of an urban freight policy package defined via a collaborative governance model. *Research in Transportation Economics* **65**, 3-9.

McFadden, D. (1978) Modelling the choice of residential location. En Karlquist, A., Lundquist, L., Snickars, F. y Weibull, J.W. (eds.), *Spatial Interaction Theory and Planning Models*. North-Holland, Amsterdam.

Onstein, A.T.C., Bharadwaj, I., Tavasszy, L.A., van Damme, D.A. y El Makhoulfi, A. (2021) From XXS to XXL: towards a typology of distribution centre facilities. *Journal of Transport Geography* **94**, 103128.

Ortúzar, J. de D. y Willumsen, L.G. (2011) *Modelling Transport*. John Wiley and Sons, Chichester.

Östh, J., Lyhagen, J. y Reggiani, A. (2016) A new way of determining distance decay parameters in spatial interaction models with application to job accessibility analysis in Sweden. *European Journal of Transport and Infrastructure Research* **16**, 344–363.

Quak, H., Lindholm, M., Tavasszy, L. y Browne, M. (2016) From freight partnerships to city logistics living labs – giving meaning to the elusive concept of living labs. *Transportation Research Procedia* **12**, 461–473.

Revelt, D. y Train, K. (1998) Mixed logit with repeated choices: households' choices of appliance efficiency level. *The Review of Economics and Statistics* **80**, 647–657.

Rzeźny-Cieplińska, J. y Szmelter-Jarosz, A. (2021) Stakeholders' analysis of environmental sustainability in urban logistics: a case study of Tricity, Poland. *Energies* **14**, 1274.

Sahr, K., White, D. y Kimerling, A.J. (2003) Geodesic discrete global grid systems. *Cartography and Geographic Information Science* **30**, 121–134.

Sakai, T., Beziat, A. y Heitz, A. (2020) Location factors for logistics facilities: location choice modeling considering activity categories. *Journal of Transport Geography* **85**, 102710.

SII (2021) Catastro Bienes Raíces. Servicio de Impuestos Internos, Chile

Van den Heuvel, F.P., Rivera, L., van Donselaar, K.H., de Jong, A., Sheffi, Y., de Langen, P.W. y Fransoo, J.C. (2014) Relationship between freight accessibility and logistics employment in US counties. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **59**, 91–105.

Wagner, T. (2010) Regional traffic impacts of logistics-related land use. *Transport Policy* **17**, 224-229.

Wegener, M. (2019) Land-use transport interaction models. En M.M. Fischer y P. Nijkamp (eds.), *Handbook of Regional Science*. Springer Berlin, Heidelberg.

Yuan, Q. (2018) Environmental justice in warehousing location: state of the art. *Journal of Planning Literature* **33**, 287-298.

Yuan, Q. y Zhu, J. (2019) Logistics sprawl in Chinese metropolises: evidence from Wuhan. *Journal of Transport Geography* **74**, 242–252.