



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DESARROLLO DE UN MODELO DE PROYECCIÓN DE DEMANDA ENERGÉTICA A ESCALA DE CIUDAD

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ALEXANDRO GUSTAVO MORENO REYES

PROFESOR GUÍA:
Carlos Benavides Farías

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Rodrigo Palma Behnke
Sebastián Gwinner Silva

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: ALEXANDRO GUSTAVO MORENO REYES
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: Carlos Benavides Farías

DESARROLLO DE UN MODELO DE PROYECCIÓN DE DEMANDA ENERGÉTICA A ESCALA DE CIUDAD

En este trabajo se desarrolla un modelo de proyección de demanda energética con un nivel de desagregación espacial detallado a nivel de manzana. La proyección se realiza para los sectores residencial, comercial, industrial y público. Como caso de estudio, el modelo se aplica a la Región Metropolitana con un horizonte de evaluación entre 2017 y 2042.

Para caracterizar la demanda del año base del sector residencial, se obtienen los parámetros de población y vivienda por manzana del Censo 2017, los porcentajes de uso de combustibles por comuna de la encuesta Casen 2017, la superficie construida por manzana del Catastro de Bienes Raíces, la demanda del Balance Nacional de Energía y la intensidad energética por uso final de estudios previos. La demanda de los sectores comercial, industrial y público se calcula a partir de la superficie construida en cada manzana y la intensidad de consumo de cada energético. Luego de calibrar el modelo para reproducir la demanda de cada sector durante el año base, se realizan proyecciones de demanda de energía a partir de las proyecciones de los distintos datos de entrada del modelo.

La estructura computacional del modelo se basa en el objeto *GeoDataFrame* en el cual los datos se representan a través de una tabla donde cada fila corresponde a una manzana y cada columna corresponde a un parámetro de la manzana, como su comuna, código de identificación, población, viviendas, superficie construida por sector, las demandas de energía que calcula el modelo, entre otros atributos. Además, se incluye una columna que contiene polígonos en un sistema de coordenadas, identificando la geometría y la ubicación espacial de la manzana.

Como resultado de la aplicación del modelo, se obtiene la demanda de cada manzana para el horizonte de evaluación, dividida por sector, uso final y energético. Los resultados se presentan a través de una aplicación gráfica que muestra la demanda distribuida espacialmente a nivel de manzana. Se analiza la distribución espacial de las demandas calculadas y se comparan los consumos totales con el Balance Nacional de Energía y la Planificación Energética de Largo Plazo. Se concluye sobre los aportes al estado del arte, los aprendizajes obtenidos, las dificultades encontradas y se exploran posibles pasos a seguir.

A lesson without pain is meaningless. That's because no one can gain without sacrificing something. But by enduring that pain and overcoming it, he shall obtain a powerful, unmatched heart. A fullmetal heart.

Hiromu Arakawa

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Violeta por criarme y cuidarme toda la vida. Gracias a mis hermanitas Violeta, Gabriela y Fernanda, por inspirarme a ser una mejor versión de mí mismo. Además, quiero agradecer a mi tío el Pelao por todas las oportunidades que me ha conseguido y por mantenerse pendiente de mi carrera y bienestar. En especial, le agradezco a mi profesor guía Carlos, quien estuvo siempre dispuesto a reunirse conmigo y resolver mis dudas, sin quien esta memoria no sería posible. Le agradezco a mi padre Alberto por pagarme el arancel de la universidad. También le agradezco a mis amigos por su apoyo durante todo este proceso. En particular, gracias a la Javi, mi mejor amiga, por sacarme de la casa y distraerme de la memoria, gracias al Chauto, quien hizo su memoria al mismo tiempo que yo y escuchó todas mis quejas, gracias al Tomás por apoyarme en los juegos y en la vida real, gracias al Kuky por comentar mangas y la Ingeniería Eléctrica conmigo, gracias al Simón por ser un debate lord y darme excusas para perder tiempo, gracias al David por jugar el aclamado MMORPG Final Fantasy XIV conmigo, gracias al Yangzi, mi amigo más antiguo, por darme [redacted] y gracias al Mati por ser nuestro DM. Por último, gracias a mi gata Yuno por despertarme a las 5 de la mañana, botar cosas de mi escritorio y darme oxitocina.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
2. Marco Teórico	2
2.1. Balance Nacional de Energía	2
2.2. Proyección espacial de demanda	3
2.3. Métodos de proyección de demanda	5
3. Estado del arte	6
3.1. Recopilación de antecedentes	6
3.1.1. Modelos híbridos	6
3.1.2. Modelos basados en autómatas celulares	6
3.1.3. Modelos basados en agentes	8
3.1.4. Modelos basados en inteligencia artificial	8
3.1.5. Modelos de tendencia	9
3.1.6. Otros	10
3.2. Modelos de proyección utilizados en Chile	10
3.2.1. Planificación Energética de Largo Plazo	10
4. Metodología	13
4.1. Metodología general	13
4.2. Implementación computacional	14
4.3. Sector residencial	15
4.3.1. Caracterización del año base	16
4.3.1.1. Población y vivienda	16
4.3.1.2. Participación de energéticos	19
4.3.1.3. Intensidad energética por uso final	21
4.3.2. Metodología de proyección	22
4.3.2.1. Proyección de población y viviendas en la Región Metropolitana	22
4.3.2.2. Criterio para la distribución espacial de población y viviendas	25
4.3.2.3. Aumento en el confort térmico y uso de artefactos eléctricos	31
4.3.2.4. Cambios en la participación de energéticos	34
4.4. Sector comercial	38
4.4.1. Caracterización del año base	38
4.4.1.1. Superficie construida	38
4.4.1.2. Intensidad energética	43
4.4.2. Metodología de proyección	43
4.4.2.1. Cambios en el uso de energéticos	43

4.4.2.2.	Proyección de la superficie del sector comercial	44
4.4.2.3.	Criterio para la distribución espacial de la superficie del sector comercial	46
4.5.	Sector industrial	47
4.5.1.	Caracterización del año base	48
4.5.1.1.	Superficie construida	48
4.5.1.2.	Intensidad energética	49
4.5.2.	Metodología de proyección	49
4.5.2.1.	Cambios en los niveles de producción	49
4.6.	Sector público	50
4.6.1.	Caracterización del año base	50
4.6.1.1.	Superficie construida	51
4.6.1.2.	Intensidad de consumo	51
4.6.2.	Metodología de proyección	52
4.6.2.1.	Proyección de la superficie del sector público	52
5.	Resultados	54
5.1.	Caracterización de la demanda del año base	54
5.1.1.	Sector residencial	54
5.1.2.	Sector comercial	63
5.1.3.	Sector industrial	64
5.1.4.	Sector público	65
5.1.5.	Región Metropolitana	67
5.2.	Comparación con Balance Regional de Energía 2020	70
5.3.	Proyección de la demanda energética de la Región Metropolitana	71
5.3.1.	Sector residencial	71
5.3.2.	Sector comercial	80
5.3.3.	Sector industrial	82
5.3.4.	Sector público	83
5.3.5.	Región Metropolitana	84
6.	Conclusiones	87
6.1.	Conclusiones generales de la metodología desarrollada	87
6.2.	Comentarios generales sobre la experiencia de este trabajo de memoria . . .	88
6.3.	Pasos a seguir	89
	Bibliografía	92
	Anexos	94
A.	Resultados encuesta CASEN 2017	94
B.	Artefactos eléctricos	98
C.	Proyección de participación de energéticos	99

Índice de Tablas

2.1.	Balance Regional de Energía para la Región Metropolitana en el año 2017	3
3.1.	Demanda de la Región Metropolitana año 2042 según Modelo PELP	12
4.1.	Población y viviendas totales en la Región Metropolitana 2017	18
4.2.	Ejemplo de participación por calefacción. Fuente: Elaboración propia a partir de encuesta CASEN 2017	20
4.3.	Intensidad de consumo de energéticos por uso final	21
4.4.	Intensidad de consumo por artefactos eléctricos	22
4.5.	Proyección de intensidad por calefacción año 2042	32
4.6.	Proyección de intensidad por artefactos eléctricos año 2042	33
4.7.	Utilización de combustibles por uso final en la Región Metropolitana 2050 . . .	34
4.8.	Ejemplo de proyección de participación por calefacción	37
4.9.	Información de roles	39
4.10.	Información de terrenos y construcciones	39
4.11.	Diccionario de destinos	40
4.12.	Intensidad de consumo sector comercial	43
4.13.	Intensidad de consumo sector industrial	49
4.14.	Intensidad de consumo sector público	52
5.1.	Demanda del sector residencial año 2017	54
5.2.	Estimación de la demanda de la Región Metropolitana en el año 2017 utilizando modelo desarrollado	67
5.3.	Error relativo demanda Región Metropolitana 2017	67
5.4.	Balance Regional de Energía para la Región Metropolitana 2020	70
5.5.	Estimación de la demanda de la Región Metropolitana en el año 2020 utilizando modelo desarrollado	70
5.6.	Proyección de la demanda del sector residencial en el año 2042 utilizando el modelo desarrollado	71
5.7.	Demanda de la Región Metropolitana año 2042	84
5.8.	Diferencia demanda Región Metropolitana 2042	84
A.1.	Participación Cocción	95
A.2.	Participación Agua Caliente Sanitaria	97
A.3.	Participación Calefacción	98
B.1.	Detalle artefactos eléctricos casas	99
B.2.	Detalle artefactos eléctricos departamentos	99
C.1.	Proyección participación cocción	101
C.2.	Proyección participación agua caliente sanitaria	102
C.3.	Proyección participación calefacción casas	104
C.4.	Proyección participación calefacción departamentos	105

Índice de Ilustraciones

2.1.	Diagrama de flujos energéticos del país para el año 2017 en Tcal [1]	3
2.2.	Ejemplo de una proyección espacial de demanda [3]	4
2.3.	División del área de servicio en áreas pequeñas [2]	4
3.1.	Esquema utilizado en la PELP [21]	11
3.2.	Proyección de Demanda Energética de la PELP [22]	11
4.1.	Ejemplo de GeoDataFrame	14
4.2.	Mapa de resultados Censo 2017 [23]	16
4.3.	Código único de manzanas censales [23]	17
4.4.	Distribución espacial de habitantes en Santiago 2017	18
4.5.	Distribución espacial de viviendas en Santiago 2017	19
4.6.	Pregunta V36 Encuesta CASEN 2017	20
4.7.	Proyección de habitantes en la Región Metropolitana	23
4.8.	Proyección de viviendas en la Región Metropolitana	24
4.9.	Proyección de casas y departamentos en la Región Metropolitana	25
4.10.	Ejemplo de curva “S” [4]	26
4.11.	Distribución espacial de casas en Santiago Centro	27
4.12.	Vista satelital de edificios en Santiago Centro	28
4.13.	Distribución espacial de viviendas en Santiago en 2042	30
4.14.	Distribución espacial de habitantes en Santiago en 2042	31
4.15.	Proyección de intensidad por calefacción en casas entre 2017 y 2042	32
4.16.	Proyección de intensidad por calefacción en departamentos entre 2017 y 2042	33
4.17.	Proyección de intensidad por artefactos eléctricos entre 2017 y 2042	34
4.18.	Proyección del uso de energéticos por cocción entre 2017 y 2050	35
4.19.	Proyección del uso de energéticos por calefacción en casas entre 2017 y 2050	35
4.20.	Proyección del uso de energéticos por calefacción en departamentos entre 2017 y 2050	36
4.21.	Proyección del uso de energéticos por agua caliente sanitaria entre 2017 y 2050	36
4.22.	Extracto de direcciones del Catastro de Bienes Raíces	40
4.23.	Corrección de direcciones del Catastro de Bienes Raíces	41
4.24.	Distribución espacial de superficie construida para el sector Comercial	42
4.25.	Proyección del uso de energéticos en el sector comercial entre 2017 y 2042	44
4.26.	Estimación de la demanda eléctrica del sector comercial	44
4.27.	Proyección de superficie del sector Comercial hasta 2042	45
4.28.	Distribución espacial de superficie del sector Comercial en 2042	47
4.29.	Distribución espacial de superficie del sector Industrial	48
4.30.	Proyección de intensidad del sector industrial entre 2017 y 2042	50
4.31.	Distribución espacial de superficie construida para el sector Público	51
4.32.	Proyección de superficie del sector publico entre 2017 y 2042	52

5.1.	Distribución de la demanda del sector residencial de la Región Metropolitana en el año 2017	55
5.2.	Distribución de la demanda del sector residencial el 2017	56
5.3.	Distribución de la demanda eléctrica del sector residencial en 2017	57
5.4.	Distribución de la demanda de gas natural del sector residencial en 2017	58
5.5.	Distribución de la demanda de gas licuado del sector residencial en 2017	59
5.6.	Distribución de la demanda de kerosene del sector residencial en 2017	60
5.7.	Distribución de la demanda de leña del sector residencial en 2017	61
5.8.	Distribución de la demanda de leña del sector residencial en 2017	62
5.9.	Distribución de la demanda del sector comercial en 2017	63
5.10.	Distribución de la demanda del sector industrial en 2017	64
5.11.	Distribución de la demanda del sector público en 2017	65
5.12.	Distribución de la demanda de la Región Metropolitana en 2017	68
5.13.	Distribución de la demanda de la Región Metropolitana en 2017	69
5.14.	Distribución de la demanda del sector residencial el 2042	72
5.15.	Distribución de la demanda del sector residencial el 2042	73
5.16.	Distribución de la demanda eléctrica del sector residencial en 2042	74
5.17.	Distribución de la demanda de gas natural del sector residencial en 2042	75
5.18.	Distribución de la demanda de gas licuado del sector residencial en 2042	76
5.19.	Distribución de la demanda de kerosene del sector residencial en 2042	77
5.20.	Distribución de la demanda de leña del sector residencial en 2042	78
5.21.	Distribución de la demanda de leña del sector residencial en 2042	79
5.22.	Distribución de la demanda del sector comercial en 2042	80
5.23.	Distribución de la demanda del sector industrial en 2042	82
5.24.	Distribución de la demanda del sector público en 2042	83
5.25.	Distribución de la demanda de la Región Metropolitana en 2042	85
5.26.	Distribución de la demanda de la Región Metropolitana en 2042	86

Capítulo 1

Introducción

Actualmente, en Chile la caracterización de la demanda energética se realiza en el Balance Nacional de Energía con una desagregación espacial a nivel nacional, más detalles se pueden encontrar en el Balance Regional de Energía que tiene una desagregación a nivel regional. Por otra parte, la proyección de la demanda energética que realiza el Ministerio de Energía en la Planificación Energética de Largo Plazo tiene una desagregación espacial a nivel de región. Es decir, no existen fuentes públicas de información con una caracterización más detallada de la demanda energética o de su proyección, por ejemplo, no es posible encontrar datos de la demanda energética a nivel de comuna o dentro de las ciudades.

Poder caracterizar la demanda energética con una mayor resolución espacial puede tener distintos usos. Por ejemplo, planificación de redes de distribución eléctrica, planificación de cadenas de suministro de gas y derivados del petróleo y la planificación energética comunal. Adicionalmente, conocer la distribución espacial y temporal de las proyecciones de demanda energética al interior de las ciudades puede apoyar en el análisis de los beneficios de la aplicación de medidas de mitigación de gases de efecto invernadero, así como el impacto que tienen en las limitaciones técnicas de la red de distribución.

Esta memoria desarrollará una herramienta computacional que permite estimar esta distribución espacial, a partir de distintas fuentes de información pública. El modelo considera los sectores energéticos residencial, comercial, industrial y público, y se aplicará para proyectar la distribución espacial de la demanda energética de la Región Metropolitana, con un horizonte de evaluación entre 2017 y 2042.

1.1. Objetivos

El objetivo general de la memoria es desarrollar un modelo de proyección de demanda de energía desagregada a escala de ciudad. Para cumplir el objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos: determinar las variables que afectan la demanda de energía de los distintos sectores y su relación cuantitativa, implementar el modelo para estimar la distribución espacial de la demanda energética, caracterizar la demanda energética del año base de la Región Metropolitana y aplicar el modelo para obtener una proyección de la demanda energética de la Región Metropolitana para los sectores residencial, comercial, industrial y público, considerando una desagregación espacial detallada.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Balance Nacional de Energía

La demanda energética se puede caracterizar por sector y tipo de energético. Una de las principales fuentes de información es el Balance Nacional de Energía que elabora el Ministerio de Energía. El balance es un informe estadístico, que recopila todas las transacciones de energía ocurridas en el país dentro de un año, con el fin de caracterizar el balance entre oferta y demanda de energía en el país. Contabiliza distintos tipos de energía (petróleo crudo, gas natural, carbón, gasolinas, diésel, electricidad, etc.) y los sectores económicos que la consumen (industria, minería, transporte, comercio, hogares, etc.). También identifica los distintos subsectores de estos consumos finales de energía, los cuales corresponden a los módulos necesarios para desarrollar una proyección de demanda energética [1].

Además del Balance Nacional, también desde el año 2014 se publica el Balance Regional de Energía. Este informe tiene una desagregación espacial a nivel regional y se utiliza como insumo directo para la proyección de demanda energética del proceso de Planificación Energética de Largo Plazo, conforma uno de los principales insumos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del país y es un elemento esencial en la formulación de una estrategia nacional de neutralidad de emisiones de Gases de Efecto Invernadero [1].

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de flujos del Balance Nacional de Energía 2017, que resume las transacciones involucradas en la cadena energética nacional, pasando desde su adquisición o generación hasta sus transformaciones y consumos finales [1].

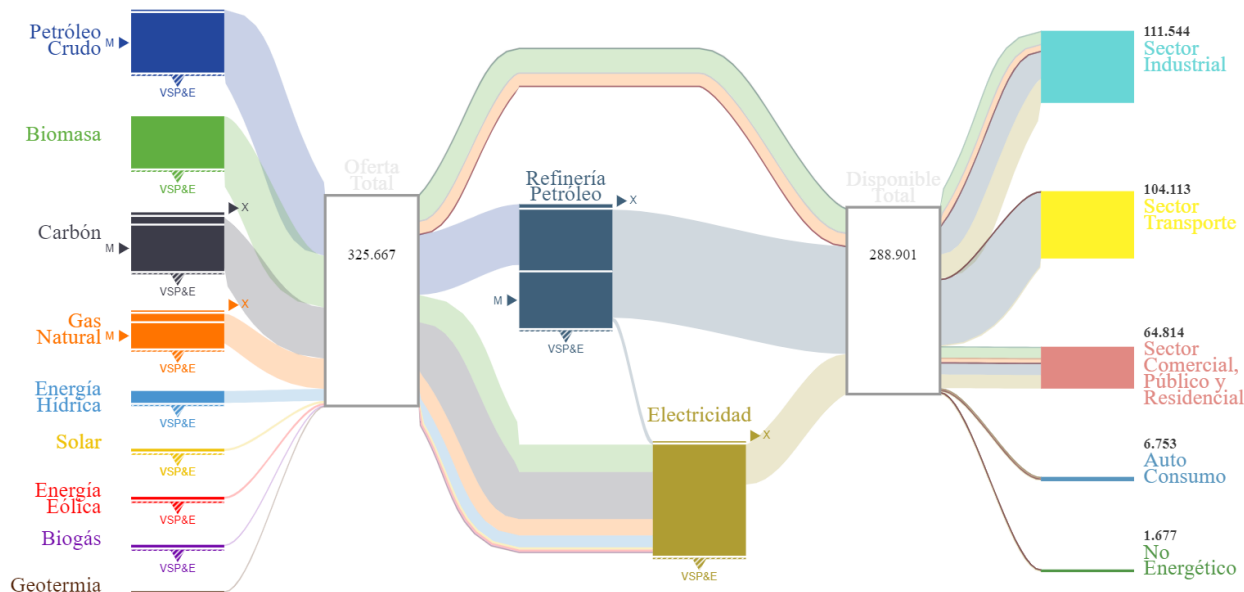


Figura 2.1: Diagrama de flujos energéticos del país para el año 2017 en Tcal [1]

En la Tabla 2.1 se muestra la demanda de energía del sector residencial de la Región Metropolitana durante el año base 2017. El modelo debe ser capaz de replicar estos valores al agregar la demanda del año base a través de la Región Metropolitana.

Tabla 2.1: Balance Regional de Energía para la Región Metropolitana en el año 2017

Energético	Residencial [GWh]	Comercial [GWh]	Industrial [GWh]	Publico [GWh]	Total [GWh]
Electricidad	5.925	5.141	8.513	1.072	20.652
Gas licuado	5.519	743	2.492	98	8.854
Kerosene	886	0	0	1	887
Gas natural	3.458	766	5.525	130	9.880
Biomasa	825	24	14	0	864
Biogás	9	40	0	0	49
Diésel	0	2.339	3.020	32	5.391
Carbón	0	0	215	0	215
Coque	0	0	728	0	728
Total	16.625	9.055	20.514	1.335	47.531

2.2. Proyección espacial de demanda

Una proyección espacial de demanda es un tipo de predicción de demanda de energía que incluye la distribución espacial de futuras cargas como uno de sus elementos principales, además de su magnitud y características temporales [2]. En la Figura 2.2 se muestra el resultado de un ejemplo de una proyección de este tipo, aplicada a una ciudad de tamaño medio en Brasil. La ciudad se divide en celdas cuadradas de $0,12 \text{ km}^2$ y la demanda eléctrica de cada celda se expresa en MVA/km^2 .

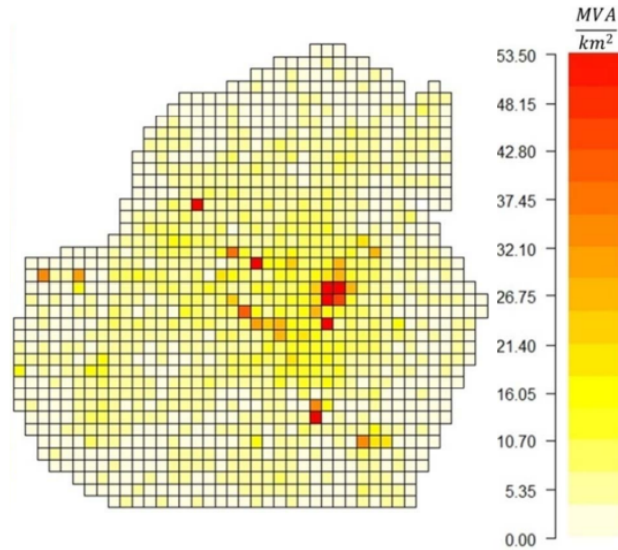


Figura 2.2: Ejemplo de una proyección espacial de demanda [3]

A medida que una ciudad crece y se desarrolla, el crecimiento de la demanda no es uniforme geográficamente. Existen áreas donde se espera que aumente la demanda, áreas donde no se espera un aumento considerable e incluso áreas donde se espera que la demanda disminuya. Adicionalmente, es posible que la ciudad se expanda a zonas previamente desocupadas, creando nuevas demandas de energía. En respuesta a cada uno de estos casos, el operador de la red de distribución debe tomar distintas medidas, por lo que es esencial que cuente con una predicción de demanda con suficiente desagregación espacial para distinguir entre los distintos casos [2].

Debido a lo anterior, estos modelos se utilizan típicamente en la planificación de redes de distribución y transmisión. Para redes de distribución, la proyección es principalmente afectada por el cambio en el uso de suelo, mientras que para redes de transmisión el factor más importante es el crecimiento económico [4].

Como se muestra en la Figura 2.3, para lograr una proyección con dimensión espacial se debe dividir el área de servicio en una cierta cantidad de subregiones, conocidas como áreas pequeñas en la literatura. Estas pueden ser áreas con forma y tamaño irregular, por ejemplo, las áreas alimentadas por los transformadores de distribución en el sistema, o pueden ser áreas con forma cuadrada definidas por una grilla [2].

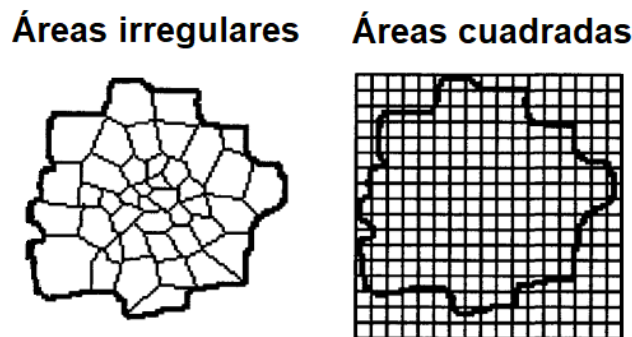


Figura 2.3: División del área de servicio en áreas pequeñas [2]

El tamaño de estas pequeñas áreas es uno de los parámetros más relevantes en el diseño de un modelo de proyección espacial; se debe escoger un tamaño adecuado para el nivel de planificación que se desea realizar. Además, el tamaño de las pequeñas áreas define la cantidad de información necesaria para implementar el modelo, por lo que existe un intercambio entre precisión y complejidad computacional [5].

2.3. Métodos de proyección de demanda

En general, los métodos de proyección de demanda se pueden dividir en las siguientes categorías [4]:

- Métodos de simulación: estos métodos se basan en modelar el proceso de crecimiento de la demanda para lograr reproducir los datos históricos de demanda. Luego, se utiliza el modelo para determinar la fecha, ubicación y magnitud de futuras cargas en el territorio de servicio. Estos métodos son más complejos y requieren grandes bases de datos, pero permiten obtener resultados con alta resolución espacial y de largo plazo. Generalmente, se basan en inteligencia artificial, teoría de autómatas celulares, sistemas multi-agente, y algoritmos evolutivos.
- Métodos de tendencia: estos métodos se basan en el ajuste de datos históricos de demanda a una función adecuada, la cual se puede usar para luego extrapolar una serie de tiempo hacia el futuro. Estos métodos son menos complejos, pero solo dan resultados satisfactorios en proyecciones con baja resolución espacial o de corto plazo. Generalmente, se emplean algoritmos de regresión lineal o con polinomios.
- Métodos híbridos: estos métodos combinan características de ambas categorías.

Capítulo 3

Estado del arte

3.1. Recopilación de antecedentes

En esta sección se revisan alternativas de solución al problema de proyección de demanda de energía con desagregación espacial.

Uno de los principales desafíos al momento de desarrollar un modelo de proyección espacial de demanda es la disponibilidad de la información requerida. La mayoría de los métodos revisados solo proyectan la demanda eléctrica y, si proyectan la demanda completa de energía, asumen la existencia de un sistema de información geográfica con mapas de los niveles de distintos tipos de uso de suelo y su densidad de carga, o mapas con las probabilidades de desarrollo dentro de una ciudad. Estas fuentes de información requieren estudios previos que aún no se realizan en Chile, así que las soluciones propuestas en esta sección no logran resolver el problema planteado en esta memoria.

3.1.1. Modelos híbridos

En [6] se desarrolla un modelo híbrido donde el crecimiento de la demanda eléctrica del sector comercial y residencial se calculan como en un método de tendencia, mientras que la distribución espacial se calcula como en un método de simulación. En primer lugar, el crecimiento total de la población en el área de estudio se estima basándose en una curva S. Para distribuir este crecimiento de población, se define un índice de recepción, el cual se calcula para cada área pequeña a partir de factores como: distancia a rutas de transporte público, distancia al centro, uso de suelo e inclinación del suelo. El crecimiento comercial en cada área pequeña se estima con una regresión lineal que predice la demanda de energía a partir de la demanda de años anteriores. Finalmente, la demanda residencial de cada área se calcula como la demanda actual, ponderada por la proporción entre la población futura y la población actual. La demanda comercial se calcula análogamente. Se utiliza una base de datos que contiene el consumo mensual de todos los consumidores, separado por tipo comercial, residencial o industrial. También se usan datos del censo y la cartografía de la zona, que incluye calles, cuadras, ríos, parroquias y la ubicación de los clientes.

3.1.2. Modelos basados en autómatas celulares

En [7] se emplea un modelo de autómatas celulares para la ubicación espacio temporal de nuevas cargas eléctricas en la zona de servicio. Un modelo de autómatas celulares es un modelo

matemático y computacional para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. En este estudio, cada área en la zona de estudio se expresa como una célula, una entidad independiente que puede presentar diferentes estados. El estado de cada célula corresponde a su densidad de demanda de consumo residencial, industrial y comercial, discretizada en 5 niveles: 0 = sin carga, 1 = baja, 2 = media, 3 = alta, 4 = muy alta. A base de un mapa de uso de suelo, se distingue entre áreas desarrolladas (que tienen demanda actualmente) y zonas sin desarrollar (zonas desocupadas). La probabilidad de desarrollo de zonas desocupadas se calcula utilizando un algoritmo de heurística evolutiva, donde se calcula la carga esperada de una célula a partir de reglas lingüísticas que incluyen la distancia al hospital, escuela y avenida más cercana, distancia al centro y la densidad de demanda eléctrica en la vecindad. Por otro lado, la probabilidad de redesarrollo de zonas ya desarrolladas se calcula en función de las preferencias de uso de suelo en la zona, las cuales consideran factores como cercanía a servicios, cercanía a medios de transporte, distancia de zonas peligrosas para la salud y nivel de ingresos.

Para simular la evolución de la distribución espacial de la demanda, se establecen las siguientes reglas de actualización para determinar cuándo una célula evoluciona:

1. Una célula solo puede moverse a un estado superior o mantenerse en su estado actual, pero no a un estado inferior.
2. La densidad de demanda eléctrica en una célula solo puede aumentar de un nivel al siguiente en cada paso de la simulación (sin saltarse estados).
3. Una célula sin desarrollar solo puede aumentar su estado si hay 3 células desarrolladas en la vecindad de 3x3 células alrededor suyo.
4. Si una célula no desarrollada cambia su estado de 0 a 1, se le asigna una alta probabilidad de redesarrollo.
5. Si una célula desarrollada con estado 1 evoluciona a 2, se le asigna una probabilidad media de redesarrollo.
6. Si una célula desarrollada pasa de 2 a 3, se le asigna una baja probabilidad de redesarrollo.

Las últimas 3 reglas se establecen para simular un crecimiento con forma de curva S. La simulación se detiene cuando el crecimiento de la demanda en toda el área de estudio alcance una proyección global de demanda calculada previamente. El modelo requiere conocer la distribución geográfica de las estructuras eléctricas y edificios importantes en el área de servicio, el consumo de energía de los clientes en los últimos 3 años y un mapa de clasificación de uso de suelo en la zona.

En [8] se realiza un análisis de factores de riesgo para determinar los factores que afectan la densidad energética de cargas o demanda eléctrica del sector residencial (población, ingreso familiar, espacio habitable por persona, electrodomésticos), sector comercial (PIB, situación de la economía internacional, velocidad de desarrollo urbano, ciclos económicos), sector industrial (progreso tecnológico, políticas de ahorro de energía) y sector agroindustrial (áreas de cultivo, progreso tecnológico), así como los factores que afectan el cambio en el uso de

suelo. Luego se utiliza un modelo basado en autómatas celulares para proyectar el crecimiento de la demanda en cada pequeña zona, con reglas de actualización definidas a partir de un sistema de información geográfica y considerando los factores detectados.

3.1.3. Modelos basados en agentes

En [9] se utiliza un esquema multi-agente para modelar la ubicación espacio temporal de nuevas cargas eléctricas en el área de estudio. Cada área pequeña se modela como un agente estático, una entidad autónoma que puede tomar decisiones de acuerdo a su estado y un conjunto de reglas básicas. Al igual que en [7], el estado de un área pequeña corresponde a su consumo residencial, comercial e industrial. En este caso, la probabilidad de desarrollo se calcula comparando las similitudes entre cada agente y el centro de la ciudad, ya que se asume que la densidad de carga en el centro de la ciudad es una consecuencia de la densidad de carga en toda la ciudad. Para simular la distribución espacial de nuevas cargas, se define un agente móvil que representa las preferencias de la ciudad. A diferencia de los agentes que representan las áreas pequeñas, el agente móvil no tiene una posición determinada, sino que puede tomar demanda desde el centro de la ciudad y desplegarla en otras zonas, de acuerdo a un camino determinado por la probabilidad de desarrollo calculada. Si el agente llega al borde de la ciudad sin haber entregado toda su carga, se crea una nueva zona considerando la probabilidad de desarrollo de los agentes en la zona. Al igual que en [7], la probabilidad de desarrollo de zonas que cambian su estado se asigna simulando una curva S. Para esto, se utiliza una base de datos de la demanda histórica de los consumidores y un inventario de las estructuras eléctricas en la red de distribución, que incluye ubicación, especificaciones y un mapa de las áreas de servicio.

En [10] se propone una variación del método anterior, donde se utilizan agentes reactivos y proactivos en un esquema de propagación de demanda. En este caso, el crecimiento de demanda determinado por una proyección global se le asigna a un agente proactivo, el cual crea ondas de propagación de demanda a su alrededor. Se supone que la demanda a propagar tiene un cierto factor de atracción para ciertos clientes y de repulsión para otros. Luego, los agentes reactivos toman esta demanda dependiendo de su probabilidad de desarrollo y de si atraen o repelen la carga.

Posteriormente, en [11] se comparan los resultados de estos dos métodos, destacando su baja carga computacional. En [12] se expande en los trabajos anteriores discutiendo cómo se pueden integrar las interacciones entre las distintas áreas de una ciudad en modelos de proyección espacial de demanda con la introducción de cargas atractivas y repulsivas. En [13] se presenta una mejora a los métodos anteriores combinando todos los tipos de cargas y agentes en una única simulación.

3.1.4. Modelos basados en inteligencia artificial

En [14] se entrenan redes neuronales para calcular la demanda eléctrica horaria de tipo residencial, comercial e industrial en cada área pequeña a partir de sus atributos de: intensidad (densidad de población, superficie), desarrollo (IPC, ingreso por kWh, población), clima (temperatura máxima, mínima y promedio), ubicación (distancia a avenidas, centros comerciales y oficinas de gobierno) y uso de suelo (residencial, comercial, industrial), toman-

do como dato de entrada información histórica de la demanda horaria de cada zona pequeña. Los perfiles típicos de demanda eléctrica horaria de cada uso de suelo se determinan usando algoritmos de agrupamiento. Los atributos listados anteriormente para cada zona se proyectan considerando planes de desarrollo de industria, transporte y suelo. Luego el modelo entrenado se aplica sobre los atributos proyectados para obtener la proyección de demanda desagregada. Finalmente, se suman las demandas de áreas vecinas para obtener la demanda de áreas más grandes en distintos niveles de agregación. Como caso de estudio se proyecta la demanda eléctrica de un nuevo distrito en China oriental. Sus fuentes de información son infraestructura de medición avanzada, un sistema de información geográfica, un sistema de información del servicio meteorológico y una base de datos de desarrollo socioeconómico, complementadas por conocimiento de la oficina de planificación.

3.1.5. Modelos de tendencia

En [4] se realiza una proyección de demanda eléctrica espacial estocástica con intervalos de proyección. La magnitud de las futuras cargas eléctricas se predice por medio de un método de tendencia jerárquico en el cual la demanda eléctrica se va agregando en zonas de tamaño creciente, que se complementa con conocimiento del operador para mejorar la asignación espacial de las futuras cargas, así como definir su año de introducción. Los intervalos de predicción de la proyección estocástica se construyen basándose en el error de la predicción a través del territorio de servicio. Como dato de entrada se utiliza la ubicación, capacidad y demanda máxima anual de las subestaciones en la zona. Adicionalmente, se usan mapas con el porcentaje de distintos tipos de uso de suelo y su respectiva densidad energética, así como sus proyecciones.

En [15] se distribuye espacialmente una proyección ya existente de la demanda eléctrica agregada de la ciudad en celdas de una cuadrícula por medio de un enfoque basado en geometría fractal. El crecimiento de la densidad de carga en cada celda se estima por medio de la dimensión fractal de la ciudad, dependiendo de factores como crecimiento natural que sigue patrones, aparición de cargas espontáneas sin patrones predefinidos y polos de crecimiento urbano que atraen o repelen nuevos clientes. Para esto se necesita la demanda actual de cada celda y su probabilidad de desarrollo, la distribución espacial de transformadores y mapas de la infraestructura urbana actual y futura, incluyendo ubicación, radio de área de servicio, consumo eléctrico y crecimiento esperado. Como caso de estudio se aplica el modelo en el sistema de distribución de una ciudad de tamaño medio en Brasil.

Similarmente, en [16] se distribuye una proyección global de la demanda eléctrica de la zona de estudio, combinando la observación de imágenes aéreas para identificar áreas saturadas con el empleo de procesos estadísticos para construir las curvas de Gompertz de las áreas no saturadas. Este método requiere un mapa de la ciudad detallando los distintos tipos de consumo eléctrico.

En [17] se analiza la demanda histórica de pequeñas áreas alimentadas por un transformador de distribución, para descomponerla en sus componentes regulares y aleatorios. Los componentes aleatorios de alta frecuencia se eliminan para obtener el valor máximo razonable, el cual se usa para calcular un índice de densidad de demanda. Finalmente, se utilizan métodos de tendencia para predecir la demanda en el año objetivo. Para calcular las densidades energéticas por uso de suelo se usa un sistema de información geográfica que contiene

el área y los porcentajes de uso de suelo de cada celda. Las densidades futuras se proyectan por extrapolación.

En [18] se utiliza información de un censo de población para proyectar la distribución espacial de la futura adopción de cargadores de vehículos eléctricos y módulos fotovoltaicos a escala residencial. La base de datos del censo incluye 120 parámetros socioeconómicos, por lo que se realiza selección de características con información mutua para caracterizar los factores que impulsan la adopción de generación distribuida. También se consideran las áreas de servicio de subestaciones de media y baja tensión, así como un mapa de las zonas del censo.

3.1.6. Otros

En [19] se emplea análisis espacial de puntos para construir un mapa de preferencias de nuevos consumidores, donde cada área pequeña tiene un valor de preferencia que se puede interpretar como la probabilidad de un aumento de demanda, la que puede luego ser utilizada como la entrada de modelos como el propuesto en [13]. Se define la ubicación de transformadores de distribución como tierra ocupada y se generan aleatoriamente puntos en el área de estudio que se consideran área desocupada. Luego, se utiliza un modelo aditivo generalizado para calcular la probabilidad de que área desocupada se transforme en área ocupada, basándose en la distancia a: un transformador, área prohibida, escuela, hospital, tienda, avenida principal y al distrito central de negocios.

En [5] se presenta un modelo de aglomeración que permite determinar la adecuada resolución para la visualización y análisis de los resultados de proyecciones espaciales de demanda. El método se basa en la ubicación y capacidad de los transformadores de distribución, que se agrupan en celdas cuyo tamaño va disminuyendo hasta obtener alta homogeneidad dentro de las celdas y alta heterogeneidad de cada celda con respecto a sus vecinos. De esta forma se logra disminuir errores de inferencia.

En [3] se revisan las fuentes de información utilizadas en los distintos métodos de proyección espacial de demanda desarrollados en las últimas décadas. También, se comentan desafíos para futuros estudios en el tema, tales como la introducción de redes inteligentes, generación distribuida, restricciones en el acceso a la información y la forma de interpretar los resultados obtenidos.

3.2. Modelos de proyección utilizados en Chile

3.2.1. Planificación Energética de Largo Plazo

De acuerdo con el artículo 83° de la Ley General de Servicios Eléctricos, la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) es un proceso desarrollado por el Ministerio de Energía, con el objetivo de proyectar la oferta y la demanda de energía del país en un horizonte de 30 años, considerando distintos escenarios energéticos. Esta proyección será luego considerada como un insumo en la planificación de los sistemas de transmisión eléctrica que llevará a cabo la Comisión Nacional de Energía [20].

Para llevar a cabo la proyección de la oferta y la demanda de energía, se utilizan modelos para caracterizar los sectores industria y minería (y sus subsectores), comercial (y sus subsectores), público y residencial y transporte. En [21] el Centro de Energía de la Universidad de Chile actualizó estos modelos, los cuales posteriormente fueron utilizados por el Ministerio de Energía en la PELP. Como se muestra en la Figura 3.1, estos modelos permiten a un usuario ingresar información de entrada a una planilla Excel que alimenta el modelo de demanda energética del software *LEAP* y este a su vez al sistema de modelamiento energético *OSeMOSYS* que entrega la proyección de la oferta energética.



Figura 3.1: Esquema utilizado en la PELP [21]

Los distintos modelos creados permiten proyectar todos los sectores de consumo final representados en el Balance Nacional de Energía. Sin embargo, los modelos sectoriales no representan las dinámicas de crecimiento de las ciudades y la representación espacial solo es a nivel regional [21].

En la Figura 3.2 se muestra el resultado de la proyección de demanda energética obtenida en la PELP 2020-2050.

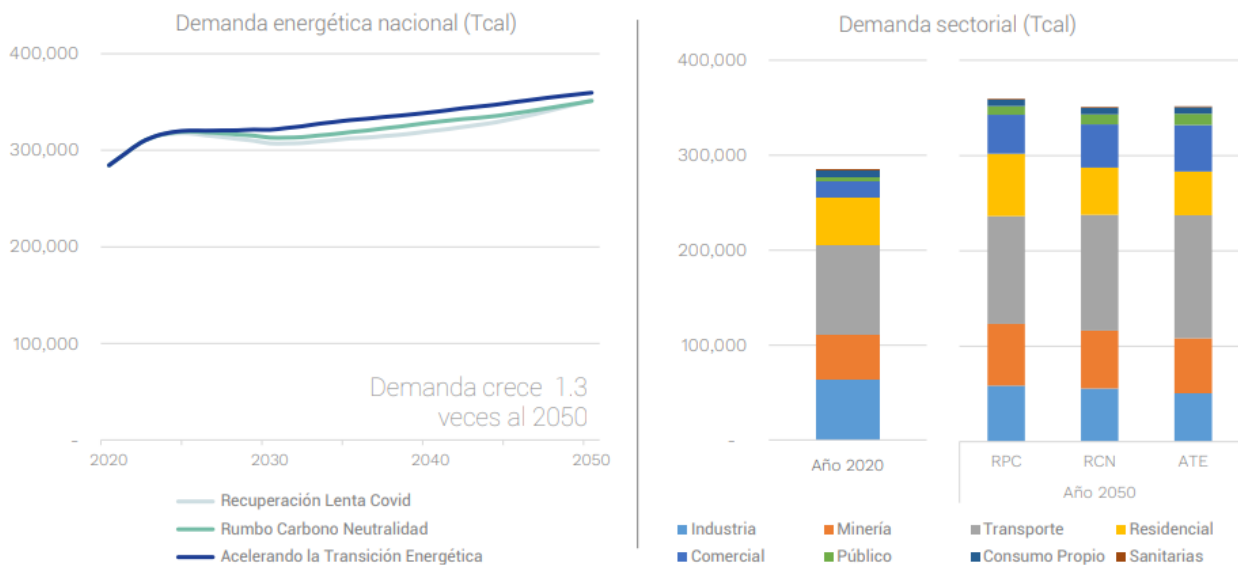


Figura 3.2: Proyección de Demanda Energética de la PELP [22]

Las proyecciones de demanda de energía de la PELP se realizan con resolución espacial a nivel de región y resolución temporal anual. En la Tabla 3.1 se muestra la proyección de la demanda de la Región Metropolitana en el año objetivo 2042, incluyendo los sectores y energéticos considerados en esta memoria. El sector Industrial se encuentra dividido en varios módulos de industrias específicas, por lo que solo se alcanzó a extraer su consumo total.

Tabla 3.1: Demanda de la Región Metropolitana año 2042 según Modelo PELP

Energético	Residencial [GWh]	Comercial [GWh]	Industrial [GWh]	Público [GWh]
Electricidad	14.625	17.706	11.168	1.436
Gas licuado	9.223	1.692	2.464	167
Kerosene	4.177	0	32	0
Gas natural	6.600	1.742	5.053	689
Leña	1.015	0	14	0
Petróleo diésel	0	5.320	3.001	43
Coque	0	0	936	0
Carbón	0	0	84	0
Total	35.641	26.462	22.757	2.336

Capítulo 4

Metodología

4.1. Metodología general

La demanda energética se distribuye espacialmente tomando como unidad básica espacial la manzana. Se denomina manzana a un espacio urbano delimitado por calles por todos sus lados. Para efectuar los cálculos de demanda de energía, cada manzana tiene parámetros relacionados con el consumo de energía de cada sector. Para el sector residencial, estos parámetros son: el número de personas, el número de viviendas, el número de casas y el número de departamentos. Para el sector comercial, industrial y público, los parámetros son el total de metros cuadrados construidos para el respectivo sector.

Para cada sector energético, el modelo también requiere otras fuentes de información auxiliar, tales como intensidad de consumo o porcentajes de utilización de energéticos. A partir de estos parámetros y otras fuentes de información auxiliar, el modelo puede calcular la demanda de energía de cada manzana. El modelo utiliza [kWh] como unidad de energía.

En general, las fórmulas para el cálculo de la demanda de combustible se basan en el modelo de la Planificación Energética de Largo Plazo, en adelante Modelo PELP. El Modelo PELP calcula la demanda agregada por región. La metodología fue modificada para calcular la demanda de cada manzana.

Luego, para obtener la proyección de la distribución de la demanda energética de la Región Metropolitana, se realiza una proyección de los parámetros de cada manzana y de las fuentes de información auxiliar que toma el modelo como entradas. Luego, el modelo se aplica directamente sobre los datos proyectados, obteniéndose la distribución de la demanda energética en el año objetivo.

Ya que las manzanas tienen distinto tamaño, los consumos calculados se dividen por la superficie (en metros cuadrados) de cada manzana, para obtener una densidad de consumo energético, lo que permite comparar manzanas de distinto tamaño durante el análisis de resultados. Si se compararan los consumos directamente, el consumo de una manzana grande podría parecer mayor al de una manzana de menor tamaño, mientras que si la manzana grande se dividiera en manzanas del mismo tamaño que la pequeña, su consumo individual podría ser el mismo o incluso menor al de la manzana pequeña. Es por esto que, para poder reconocer cuáles son las zonas de la ciudad donde hay mayor demanda, es necesario comparar

la densidad de consumo de las manzanas.

4.2. Implementación computacional

El modelo se implementó utilizando el lenguaje de programación *Python* y su estructura computacional se basa en el objeto *GeoDataFrame* de la librería *GeoPandas*. Como se muestra en la Figura 4.1, un *GeoDataFrame* contiene registros caracterizados por distintos atributos en cada columna. La columna “geometry” contiene puntos en un sistema de coordenadas o polígonos definidos por varios puntos. Gracias a esto, un *GeoDataFrame* es capaz de almacenar una base de datos, incluyendo su distribución espacial.

	CUT	MANZENT	TOTAL_PERS	TOTAL_VIVI	VIV_TIPO_C	VIV_TIPO_D	geometry
0	13101	13101211002011	189	100	4	89	POLYGON ((-7864555.526 -3958306.396, -7864550....
1	13102	13102031005035	80	20	20	0	POLYGON ((-7874017.656 -3961673.093, -7874033....
2	13102	13102031003007	29	9	9	0	POLYGON ((-7872556.447 -3961731.648, -7872556....
3	13101	13101211002010	146	49	0	49	POLYGON ((-7864678.733 -3958313.812, -7864661....
4	13102	13102021003001	74	27	27	0	POLYGON ((-7871985.351 -3961757.367, -7872011....
...
2469	13603	2205	17	6	6	0	POLYGON ((-7885043.841 -3996348.305, -7884562....
2470	13603	2206	17	7	4	0	POLYGON ((-7884407.217 -3997078.672, -7884562....
2471	13603	2207	65	40	38	0	POLYGON ((-7901158.447 -3992563.227, -7901376....
2472	13603	2208	71	28	28	0	POLYGON ((-7896738.386 -3992601.133, -7896724....
2473	13603	2209	48	14	14	0	POLYGON ((-7896404.488 -3992899.801, -7896453....

Figura 4.1: Ejemplo de GeoDataFrame

La unidad básica del modelo desarrollado es una manzana, es decir, cada fila del *GeoDataFrame* representa una manzana, cada columna es uno de sus parámetros y su “geometría” es un polígono en un sistema de coordenadas, que indica su forma, ubicación y superficie en metros cuadrados. Esto también implica que la desagregación espacial del modelo es entre manzanas.

Cada manzana se identifica por un código único (MANZENT) y también posee un código que indica la comuna a la cual pertenece (CUT). Para efectuar los cálculos de demanda de energía, cada manzana tiene parámetros relacionados con el consumo de energía de cada sector. Para el sector residencial, estos parámetros son: el número de personas, el número de viviendas, el número de casas y el número de departamentos. Para el sector comercial, industrial y público, los parámetros son el total de metros cuadrados construidos para el respectivo sector. Los valores calculados de demanda de cada combustible y sector se agregan al *GeoDataFrame* como nuevas columnas. Luego, como se conoce la geometría y ubicación de las manzanas, se conoce la distribución espacial de la demanda calculada y se pueden visualizar los resultados en un mapa.

A continuación se detalla como se implementó cada sector del modelo, incluyendo las fuentes de información utilizadas para caracterizar el año base y la metodología propuesta para proyectar las variables necesarias.

4.3. Sector residencial

El consumo de energía del sector residencial se calcula para cada manzana. Este consumo depende de la población, viviendas y el tipo de vivienda (casas y/o departamentos) de cada manzana. En el sector residencial se reconocen distintos usos finales de la energía, cada uno de los cuales depende de distintas variables y utiliza distintos energéticos, como se lista a continuación:

- Cocción: Se calcula en función del número de viviendas en cada manzana y se utiliza leña, gas natural, gas licuado de petróleo y electricidad.
- Calefacción: Se calcula en función del número de casas y departamentos (por separado), se usa leña, gas natural, gas licuado, kerosene y electricidad.
- Agua caliente sanitaria: Se calcula en función del número de habitantes, se consume leña, gas natural, gas licuado y electricidad.
- Artefactos eléctricos: Se calcula en función del número de casas y departamentos, se utiliza electricidad.

En la Tabla 2.1 se puede notar que en el sector residencial también se consume biogás; sin embargo, se decidió descartar este combustible, ya que representa únicamente un 0.06 % del consumo total. Adicionalmente, se asume que en cada vivienda se utiliza un único energético para cada uso final, por lo que el modelo requiere conocer una intensidad de consumo por uso final. Esta intensidad es una cantidad que se calcula para cada energético y uso final, y representa el consumo anual de energía de una vivienda proveniente del respectivo energético, por efectos del respectivo uso final.

Actualmente, no existe información pública que permita conocer cuáles son los energéticos que utiliza cada vivienda. Para aproximar esto, se considera la proporción del uso de energéticos por uso final de cada comuna. Esta información indica el porcentaje de las viviendas o los habitantes de cada comuna que utilizan un cierto energético para cada uso final. Se asume que la distribución de uso de energéticos por uso final dentro de la manzana es la misma que en la comuna a la cual pertenece la manzana. El tipo de energético utilizado por comuna se obtuvo de la encuesta CASEN del año 2017.

A continuación se presentan las fórmulas para calcular los consumos de energía por cada uso final del sector residencial, a partir de la información mencionada anteriormente. Para cada energético y uso final, I_C es la intensidad de consumo y P_C es su porcentaje de participación. Por ejemplo, $D_{E, \text{Cocción}}$ es la demanda del energético “E”, por efectos de cocción. Para la demanda de calefacción se utilizan intensidades diferenciadas por tipo de vivienda.

$$\begin{aligned}
 D_{E, \text{Cocción}} &= \text{Viviendas} \cdot I_{E, \text{Cocción}} \cdot P_{E, \text{Cocción}} \\
 D_{E, \text{Calefacción}} &= \text{Casas} \cdot I_{E, \text{Calef.}}^{\text{casas}} \cdot P_{E, \text{Calef.}}^{\text{casas}} + \text{Departamentos} \cdot I_{E, \text{Calef.}}^{\text{dptos}} \cdot P_{E, \text{Calef.}}^{\text{dptos}} \\
 D_{E, \text{Agua caliente sanitaria}} &= \text{Habitantes} \cdot I_{E, \text{Agua caliente}} \cdot P_{E, \text{Agua caliente}} \\
 D_{\text{Artefactos eléctricos}} &= \text{Casas} \cdot I_{\text{Artefactos}} + \text{Departamentos} \cdot I_{\text{Artefactos}}
 \end{aligned}$$

Por último, se divide por la superficie de cada manzana para calcular la densidad de consumo de cada energético por cada uso final.

4.3.1. Caracterización del año base

En esta sección se describen las fuentes de información, los supuestos y la metodología utilizada para obtener los parámetros de entrada del modelo y calcular la demanda del sector residencial durante el año base 2017. Se utiliza el año 2017 como año base debido a la información disponible del último CENSO.

4.3.1.1. Población y vivienda

La mejor fuente de información georreferenciada relevante a este trabajo que existe actualmente son los microdatos del Censo 2017. Esta es una base de datos publicada en formato *shapefile*, el cual se puede abrir como un objeto *GeoDataFrame* al usar la librería *GeoPandas* en un programa de *Python*. Como el último censo se realizó el 2017, este se escoge como el año base del modelo.

El censo de población y vivienda es elaborado por el Instituto Nacional de Estadísticas, que consiste en el recuento y caracterización de todas las personas, hogares y viviendas que se encuentran en el territorio nacional, durante un período determinado [23]. Como se muestra en la Figura 4.2, los resultados de microdatos del Censo 2017 contienen los parámetros de población y vivienda de cada manzana, así como su geometría y las coordenadas de su ubicación espacial.

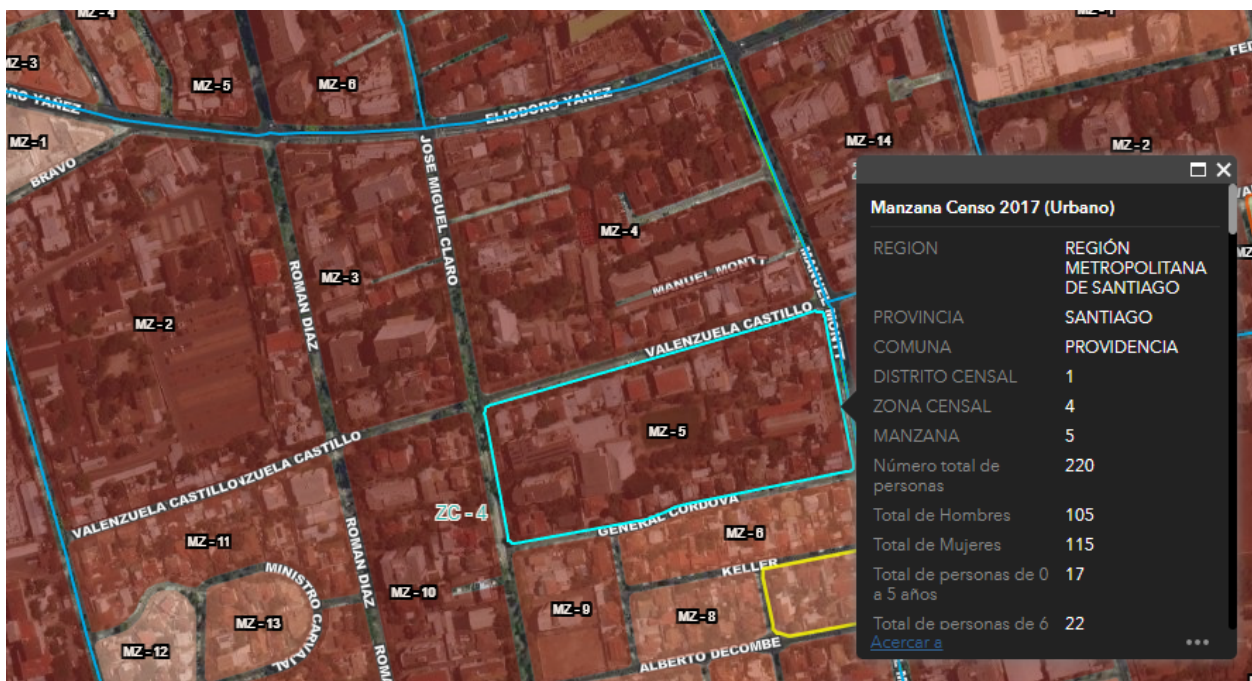


Figura 4.2: Mapa de resultados Censo 2017 [23]

Aunque la base de datos incluye más de 50 variables sobre la población y viviendas de cada manzana, para efectos de este trabajo solo se extraen:

- CUT: Código único de comuna.
- REGION: Nombre de región, solo se toman las manzanas de la región metropolitana.
- MANZENT: Código único de manzana/entidad. Se usa para distinguir entre las manzanas.
- TOTAL_PERS: Número total de personas.
- TOTAL_VIVI: Total de viviendas.
- VIV_TIPO_C: Cantidad de viviendas tipo casa.
- VIV_TIPO_D: Cantidad de viviendas tipo departamento.

En algunas manzanas, la cantidad de viviendas no es igual a la suma de la cantidad de casas y departamentos, esto se debe a que los microdatos del censo incluyen otros tipos de vivienda como mediagua, casa rodante, ruka, etc. El modelo solo considera casas y departamentos, por lo que, para conseguir que la suma sea igual, la cantidad de casas y departamentos de cada manzana se multiplica por el siguiente factor de ajuste:

$$\text{Factor} = \frac{\text{viviendas}}{\text{casas} + \text{departamentos}}$$

Para codificar las áreas geográficas, el INE define un código de 14 caracteres que identifica cada una de las manzanas censales. Como se muestra en la Figura 4.3, el MANZENT es la unión de los códigos de las distintas áreas geográficas: región, provincia y comuna; distrito censal; código de área (1, si es urbano y 2, si es rural); código de localidad, si es rural o zona, si es urbano; finalmente, los últimos dígitos identifican la entidad en el área rural o la manzana en el área urbana.



Figura 4.3: Código único de manzanas censales [23]

El *GeoDataFrame* obtenido al extraer estas variables se utiliza como punto de partida para construir el resto del modelo. A medida que se van calculando otros parámetros de cada manzana, tales como consumo de combustibles, se van agregando como columnas de este *GeoDataFrame*. Como se tomó la geometría y la distribución espacial de las manzanas de la base de datos del censo, esto define la resolución espacial del modelo, con datos desagregados a nivel de manzana.

En la Tabla 4.1 se muestra el total de habitantes, viviendas, casas y departamentos de la Región Metropolitana para el año base 2017.

Tabla 4.1: Población y viviendas totales en la Región Metropolitana 2017

Dato	Cantidad
Habitantes	7.087.300
Viviendas	2.373.268
Casas	1.649.464
Departamentos	723.804

En la Figura 4.4 se muestra la distribución espacial de los habitantes en la zona urbana de la Región Metropolitana para el año base 2017. Como se comentó anteriormente, se muestran los datos divididos por la superficie de cada manzana, para poder hacer comparaciones sin importar el tamaño.

Distribución Espacial de Habitantes

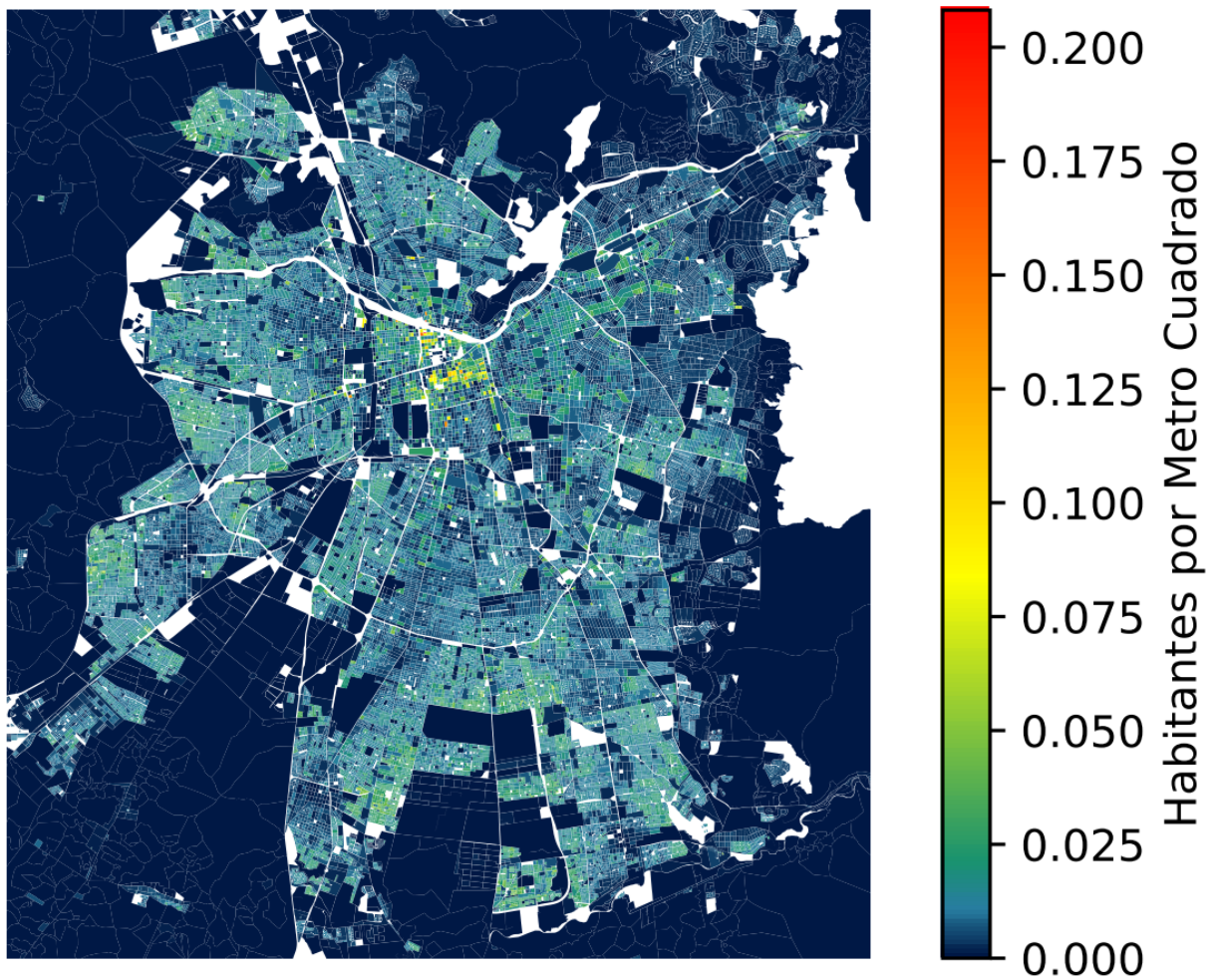


Figura 4.4: Distribución espacial de habitantes en Santiago 2017

En la Figura 4.5 se muestra la distribución espacial de las viviendas en la ciudad de Santiago durante el año 2017.

Distribución Espacial de Viviendas

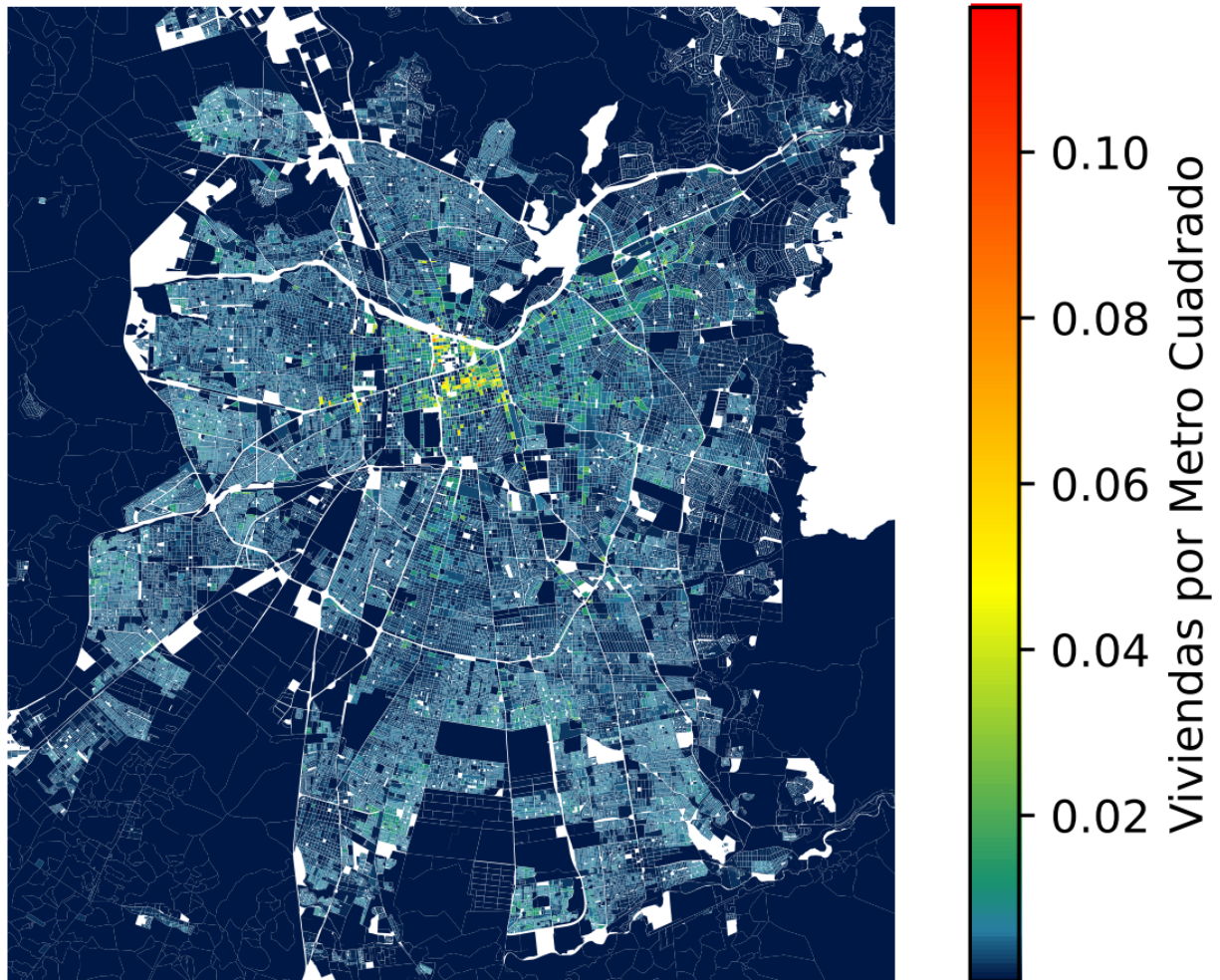


Figura 4.5: Distribución espacial de viviendas en Santiago 2017


4.3.1.2. Participación de energéticos

Para este trabajo, la distribución del uso de energéticos por comuna se obtiene de los resultados de la encuesta CASEN 2017. Esta es una encuesta realizada por el Ministerio de Desarrollo Social, con el objetivo de obtener información que permita conocer la situación de los hogares y la población, y evaluar el impacto de la política social.

En la Figura 4.6 se muestra la pregunta V36 del formulario de la encuesta CASEN 2017, en la cual se consulta por el tipo de combustible o fuente de energía utilizada por cada familia para cocinar, por calefacción y en su sistema de agua caliente.

v36. ¿Qué combustible o fuente de energía usa habitualmente para...?

MOSTRAR TARJETA V36  **"TIPO DE COMBUSTIBLE O FUENTE DE ENERGÍA"**

 *Registre principal combustible o fuente de energía*

1. Gas licuado (cilindro)
2. Gas por red (de cañería)
3. Parafina o petróleo
4. Leña o derivados (pellets, astillas o briquetas)
5. Carbón
6. Electricidad
7. Energía solar
8. No usa combustible o fuente de energía
9. No tiene sistema

	Combustible
v36a. Cocinar...	<input type="checkbox"/>
v36b. Calefacción...	<input type="checkbox"/>
v36c. Sistema de agua caliente...	<input type="checkbox"/>

Figura 4.6: Pregunta V36 Encuesta CASEN 2017

La base de datos de los resultados de la encuesta incluye la comuna en la que vive la familia que dio cada respuesta. El porcentaje de utilización se calcula como sigue:

- En primer lugar, las respuestas correspondientes a cada uso final se agrupan según la comuna de procedencia.
- Luego, se cuenta la cantidad de familias que utilizan cada energético. Solo se consideran aquellos energéticos listados en la Sección 4.2 para cada uso final.
- Finalmente, el recuento de respuestas se divide por el total de cada comuna, obteniéndose el porcentaje de utilización de cada energético para los distintos usos finales.
- Para calcular la distribución de toda la Región Metropolitana, los porcentajes de cada comuna se multiplican por sus respectivas viviendas, luego se suma a través de todas las comunas y se divide por el total de viviendas de la región.

A modo de ejemplo, en la Tabla 4.2 se muestran los porcentajes de participación correspondientes a calefacción, de algunas comunas de la Región Metropolitana.

Tabla 4.2: Ejemplo de participación por calefacción. Fuente: Elaboración propia a partir de encuesta CASEN 2017

Comuna	Tipo de energético				
	GLP	GN	Kerosene	Leña	Electricidad
Santiago	33,08 %	9,22 %	10,73 %	0,69 %	46,29 %
Lo Prado	71,99 %	0,00 %	22,92 %	0,00 %	5,09 %
Vitacura	12,64 %	32,64 %	28,74 %	0,00 %	25,98 %
Lo Espejo	45,87 %	1,24 %	45,25 %	1,24 %	6,40 %

Por razones de espacio, el resto de los porcentajes calculados se adjuntan en las Tablas A.1, A.3, A.2 del Anexo.

4.3.1.3. Intensidad energética por uso final

En el Modelo PELP, las intensidades energéticas para los usos finales de cocción, calefacción y agua caliente sanitaria se calculan a base de la cantidad total de habitantes y viviendas, la participación de cada energético (en toda la Región Metropolitana) y el consumo total de energía de la región. En el Modelo PELP, estos valores de entrada se obtienen de encuestas, informes o a partir de criterio experto.

Algunas fuentes de información utilizadas en este trabajo, entregan valores distintos a los utilizados en el Modelo PELP, por lo que no se pueden tomar directamente las intensidades calculadas por ese modelo. Por ejemplo, los porcentajes de participación de energéticos en la región se determinaron arbitrariamente por expertos, pero son distintos a los porcentajes totales calculados a partir de la Encuesta CASEN, como los de la Tabla 4.2.

Sin embargo, la hoja de cálculo que contiene el Modelo PELP también incluye las fórmulas para calcular la intensidad de consumo de los distintos energéticos, por lo que simplemente se reemplazaron en esta hoja de cálculo los valores correspondientes a la nueva información obtenida y se utilizaron las fórmulas originales para calcular los valores de intensidad.

La demanda total de la Región Metropolitana se calcula como la sumatoria de la demanda de energía de cada manzana. Luego de realizar un cálculo de la demanda total de la Región Metropolitana utilizando las nuevas intensidades calculadas, se comparó el resultado con la demanda reportada en el Balance Nacional de Energía. Se aplicaron pequeños factores de corrección para calibrar el modelo y lograr que la demanda calculada fuera igual a la demanda reportada por el balance, manteniendo las proporciones entre los usos finales.

En la Tabla 4.3 se listan las intensidades calculadas y corregidas para el sector residencial en la Región Metropolitana. Se supuso que el consumo por cocción depende de la cantidad de viviendas, mientras que el consumo por agua caliente sanitaria depende de la cantidad de habitantes. Como simplificación heredada del Modelo PELP, la intensidad por calefacción de casas y departamentos en el año base es la misma, por lo que este consumo depende de la cantidad de viviendas.

Tabla 4.3: Intensidad de consumo de energéticos por uso final

Energético	Cocción	Calefacción	Agua caliente sanitaria
Unidad	$\frac{kWh}{Vivienda}$	$\frac{kWh}{Vivienda}$	$\frac{kWh}{Habitante}$
Leña	1.194	6.312	826
Gas natural	1.278	8.652	1.721
Gas licuado	690	850	540
Kerosene	0	1.391	0
Electricidad	960	378	865

Por otro lado, en el Modelo PELP la intensidad de artefactos eléctricos se calcula a partir de una lista de electrodomésticos, de los cuales se conoce su consumo promedio anual por

equipo y la tenencia promedio por vivienda de cada equipo. Al multiplicar el consumo por equipo, por la cantidad de equipos por vivienda, se obtiene un consumo anual por vivienda de cada electrodoméstico. Luego se suma el consumo de todos los electrodomésticos y se obtiene el consumo anual por vivienda de artefactos eléctricos. Esta información distingue entre casas y departamentos, por lo que se obtienen intensidades distintas. Adicionalmente, el Modelo PELP considera 1,437 Tcal de consumo por concepto de “Otros”, el cual no está cuantificado por vivienda, sino que corresponde a toda la región. Para incluir este consumo adicional, se dividió por la cantidad de viviendas en la región y el resultado se agregó a las intensidades originales. Al igual que para los otros usos finales, la intensidad se corrigió luego de ejecutar un cálculo de la demanda total y comparar con el Balance Nacional de Energía.

En la Tabla 4.4 se muestran las intensidades calculadas para el uso de artefactos eléctricos. El detalle del cálculo de la intensidad por artefactos eléctricos se adjunta en las Tablas B.1 y B.2 del Anexo.

Tabla 4.4: Intensidad de consumo por artefactos eléctricos

Tipo de Vivienda	Casa	Departamento
Unidad	$\frac{kWh}{Vivienda}$	$\frac{kWh}{Vivienda}$
Electricidad	2.128	2.922

Una vez recopilada toda esta información, se aplica el modelo para obtener la distribución espacial del consumo del sector Residencial en la Región Metropolitana. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 5.

4.3.2. Metodología de proyección

Para calcular el consumo de años posteriores al año base, es necesario obtener proyecciones de los parámetros de entrada del modelo. Esto incluye la cantidad de habitantes y viviendas en cada manzana, las intensidades de consumo de energéticos y los porcentajes de utilización de energéticos por comuna.

A continuación se describen las fuentes de información utilizadas, los supuestos tomados y la metodología propuesta para obtener una proyección de la demanda del sector residencial en la Región Metropolitana.

4.3.2.1. Proyección de población y viviendas en la Región Metropolitana

Como primera fuente de información, se utilizó una proyección de la población y viviendas por comuna elaborada por el Centro de Energía en el contexto de un estudio que se encontraba en desarrollo al momento de escribir este trabajo de memoria. Esta proyección tiene una resolución anual hasta el año 2042, por lo que este se escogió este año de término del horizonte de evaluación.

La cantidad de viviendas por comuna se calcula dividiendo el número de habitantes proyectado por la proporción de habitantes por vivienda. Esta proporción se calcula en función del PIB, la cual asume que el número de personas por vivienda decrece a medida que crece el PIB. Esta proporción se calcula para la Región Metropolitana, pero de acuerdo a los datos observados en el Censo 2017 el número de habitantes promedio por vivienda varía por comu-

na. Por ejemplo, en el año base hay en promedio 3,16 habitantes por vivienda en la Región Metropolitana, pero existen comunas como Providencia con 2,08 hab/vivienda y Lo Espejo con 3,86 hab/viv, con valores bien alejados del promedio. Si se utilizara la misma proporción para calcular todas las viviendas, se subestimarían las viviendas de comunas como Providencia y se sobrestimarían las viviendas de comunas como Lo Espejo. Para intentar mejorar este aspecto de la proyección y evitar saltos entre las viviendas de 2017 y 2018, se multiplicó la cantidad de viviendas de cada comuna en todos los años por un factor de corrección, de forma que la proporción de viviendas coincidiera con el año base y no se afectara la cantidad total de viviendas por año. Para cada comuna, el factor de corrección se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Viviendas según Censo}}{\text{Viviendas según Centro de Energía}}$$

En la Figura 4.7 se muestra la proyección agregada de habitantes en la Región Metropolitana hasta el año 2042.

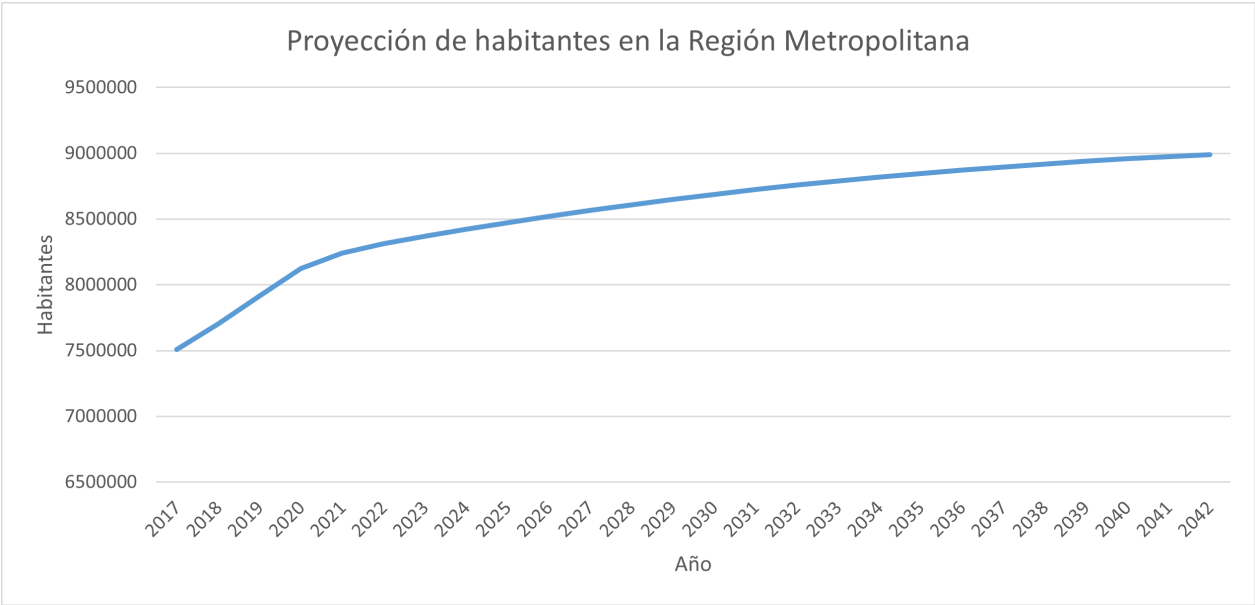


Figura 4.7: Proyección de habitantes en la Región Metropolitana

En la Figura 4.8 se muestra la proyección agregada de viviendas en la región.

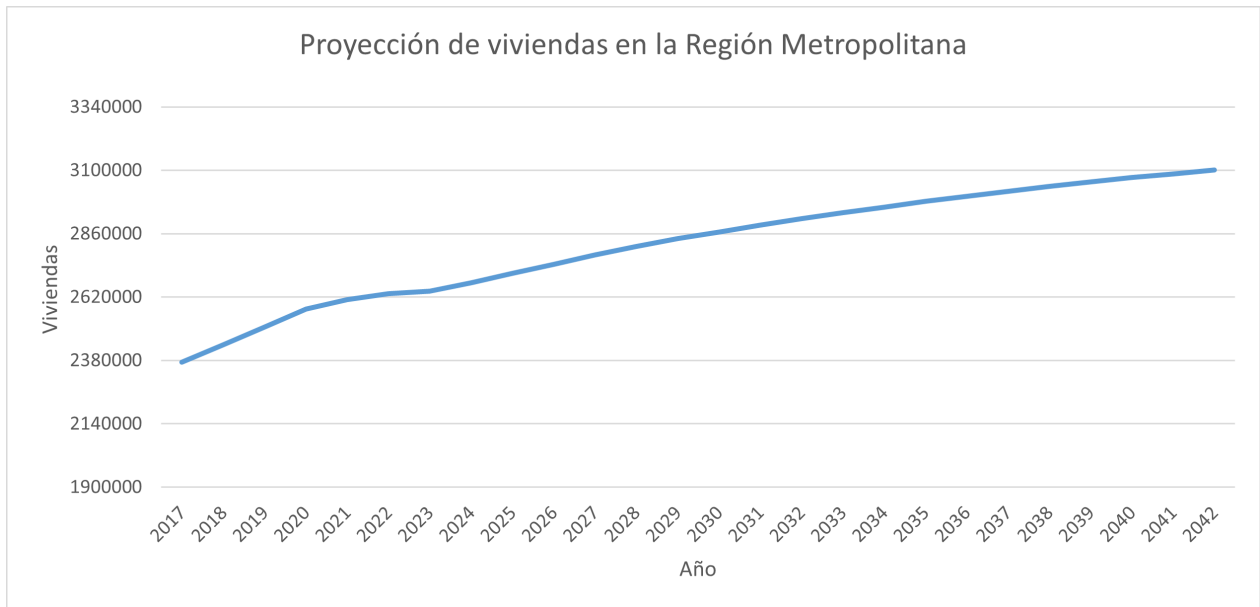


Figura 4.8: Proyección de viviendas en la Región Metropolitana

La intensidad de consumo por artefactos eléctricos y por agua caliente sanitaria es distinta entre casas y departamentos, por lo que además de las viviendas de cada comuna, también es necesario proyectar su cantidad de casas y departamentos.

Para aproximar esta proyección, se implementó la metodología utilizada en el modelo PELP para realizar la proyección de las casas y departamentos de la Región Metropolitana, la cual consiste en calcular el porcentaje de casas y edificios con respecto al total de viviendas en los años 2002 y 2017, a partir de los resultados de los respectivos censos. Luego se calcula la recta entre estos porcentajes y se extiende hasta el año 2042. Finalmente, la cantidad de casas y departamentos se calcula multiplicando los porcentajes por la cantidad de viviendas en cada comuna y año.

En la Figura 4.9 se muestra la proyección agregada de las casas y departamentos en la región.

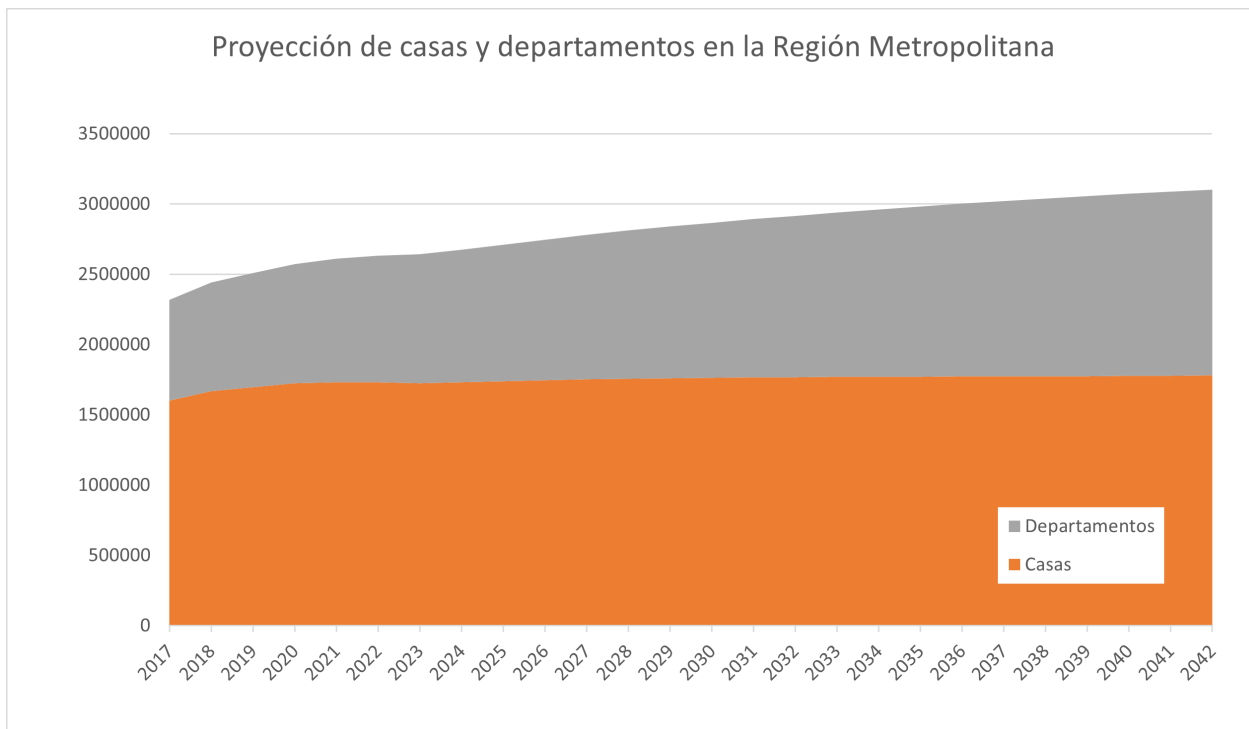


Figura 4.9: Proyección de casas y departamentos en la Región Metropolitana

4.3.2.2. Criterio para la distribución espacial de población y viviendas

El modelo requiere conocer las viviendas y habitantes por manzana en el año objetivo, por lo que luego de obtener la proyección de la cantidad de viviendas y habitantes por comuna, es necesario definir un criterio para distribuir espacialmente las nuevas viviendas y habitantes entre las manzanas de cada comuna.

En este paso se realiza el supuesto de que la arquitectura de la ciudad se mantiene, es decir, no se crean nuevas manzanas ni se modifican las ya existentes. En realidad, la ciudad se expande constantemente, ocupando territorios vacíos y construyendo nuevas manzanas y viviendas para alojar a los nuevos habitantes. Sin embargo, este proceso escapa al alcance de esta memoria, ya que requiere un análisis mucho más complejo y conocimientos de disciplinas ajenas a la ingeniería eléctrica, tales como urbanismo y planificación.

El desarrollo de la población y las viviendas en una manzana tiene distintas etapas, las cuales se caracterizan por seguir una curva “S”. Como se muestra en la Figura 4.10, durante los primeros años la población y las viviendas crecen gradualmente, a medida que se van construyendo nuevas casas donde hay terreno disponible. Luego ocurre una explosión en la cantidad de habitantes y viviendas, cuando se comienza a demoler casas para reemplazarlas por edificios. Finalmente, cuando los departamentos ya ocupan todo el espacio disponible, el terreno se satura y ya no es posible aumentar los habitantes y viviendas en la manzana, con lo que se alcanza una máxima densidad de habitantes y viviendas por metro cuadrado. La pendiente de esta curva depende del tamaño del área considerada, con las áreas más pequeñas

teniendo una explosión de población mucho más rápida [4].

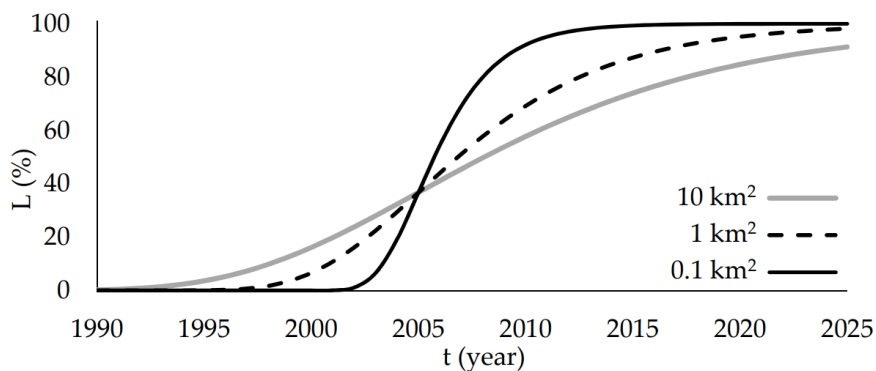


Figura 4.10: Ejemplo de curva “S” [4]

Según la proyección mostrada en la Figura 4.9, la mayoría de las nuevas viviendas corresponden a departamentos, mientras que la cantidad de casas aumenta ligeramente y luego se mantiene. Por lo tanto, la metodología propuesta en este trabajo se enfoca en simular la distribución espacial de nuevos departamentos y pone menos prioridad en el proceso de construcción de nuevas casas.

En primer lugar, se debe determinar en cuáles manzanas es probable que se construyan nuevos departamentos. En la mayoría de las comunas de Santiago, no quedan terrenos sin ocupar, por lo que el proceso de construcción de un edificio comienza por la demolición de casas en una zona donde se determine que existe una alta demanda por viviendas. Como criterio para reconocer estas zonas, se utiliza la cantidad de casas por metro cuadrado en cada vivienda, tomando los siguientes supuestos:

- Si una manzana tiene una alta densidad de casas en comparación con las otras manzanas de la comuna, es una zona con alta demanda por viviendas y existe una alta probabilidad de que se construyan edificios.
- Si una manzana tiene una densidad baja, es posible que esté parcialmente ocupada por departamentos, pequeño comercio, oficinas, etc. También es posible que corresponda a una manzana con grandes casas individuales, con patios espaciosos y harto espacio entre sí. Por lo tanto, existe una probabilidad baja de que se construyan nuevos edificios.
- Si una manzana tiene una densidad de casas casi nula, esto indica que ya se ocupó todo el espacio disponible, ya sea con departamentos u otro tipo de establecimientos, como centros comerciales, parques, colegios, hospitales, etc. En este tipo de manzanas no se pueden construir nuevos departamentos.

Para determinar que valores corresponden a una densidad de casas “alta”, “media” o “baja”, se compararon mapas de la densidad de casas con mapas 3D de *Google Maps*, que muestran las casas y edificios en cada manzana.

En la Figura 4.11 se muestra la distribución espacial de casas en la comuna de Santiago. Se pueden reconocer manzanas con un número elevado de casas por metro cuadrado, coloreadas en verde y amarillo; manzanas con baja densidad, coloreadas en celeste; y manzanas con

densidad nula, coloreadas en azul oscuro. También hay una única manzana con un valor atípico de densidad, coloreada en rojo.

Distribución Espacial de Casas

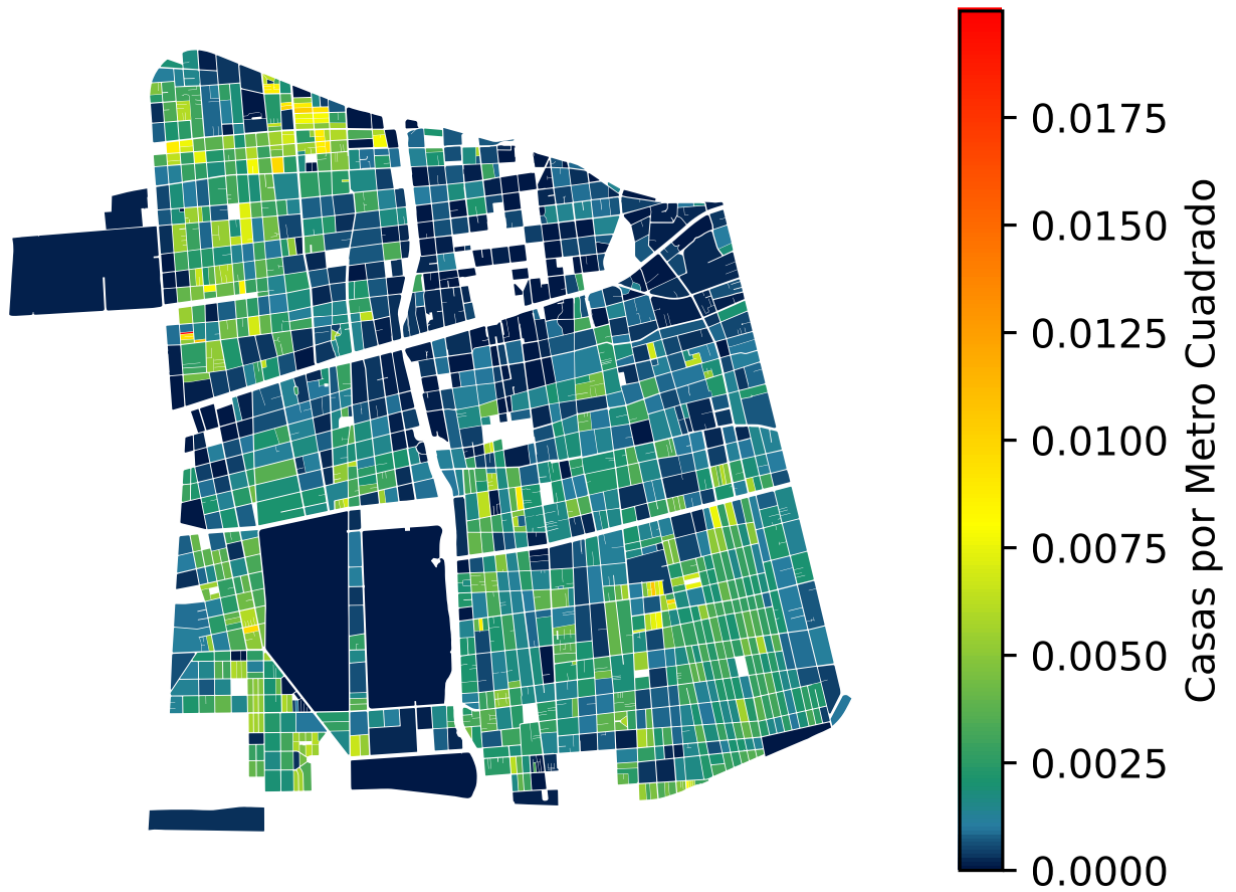


Figura 4.11: Distribución espacial de casas en Santiago Centro

Luego, en la Figura 4.12 se muestra una imagen satelital de la misma zona, con relieve indicando los edificios construidos. Se ve claramente que las zonas con alta densidad mencionadas en el párrafo anterior corresponden a zonas llenas de casas, mientras que las zonas con densidad baja corresponden a las zonas donde ya hay edificios construidos y, por último, las zonas con densidad nula corresponden a zonas sin casas, como el Parque O'Higgins y el Club Hípico.



Figura 4.12: Vista satelital de edificios en Santiago Centro

Este mismo análisis se realizó para distintas comunas de la Región Metropolitana, con lo que se llegó a las siguientes conclusiones:

- Las manzanas con menos de 12 casas por hectárea son manzanas sin espacio disponible para construir nuevos departamentos.
- La mayoría de las manzanas donde se observan hartas casas se encuentra alrededor de 100 casas por hectárea.
- Por sobre 150 casas por hectárea, las manzanas se pueden considerar como datos atípicos, ya que tienen muy poca superficie para ubicar un edificio.

Basándose en estas observaciones, se decide utilizar una función normal con media 100 y desviación estándar 75 para calcular la probabilidad de que en una manzana se construyan

nuevos departamentos, en función de su cantidad de casas por hectárea. Bajo 12 casas por hectárea, la probabilidad es igual a 0. Además, se espera que la cantidad de departamentos construidos sea proporcional al tamaño de la manzana, por lo que también se considera su superficie en metros cuadrados.

Para considerar al mismo tiempo la probabilidad calculada para cada manzana y su superficie, estos valores se normalizan por comuna, dividiendo el valor de cada manzana por su suma a través de todas las manzanas de su respectiva comuna. Luego estos valores normalizados se multiplican y el resultado se vuelve a normalizar por comuna. De esta forma, se obtiene un número que indica cuantos departamentos se deben asignar a cada manzana, de acuerdo a su tamaño y a su densidad de casas. Además, como este número suma 1 entre todas las manzanas de una comuna, se puede multiplicar directamente por su cantidad de departamentos nuevos. Gracias a esto, se logró llegar a una fórmula que se puede aplicar simultáneamente a todas las manzanas del modelo, con lo que se consigue que el cálculo se pueda realizar en un tiempo razonable con el computador personal utilizado para ejecutar el modelo computacional.

Por último, la cantidad de departamentos agregados a cada manzana se multiplica por un real aleatorio entre 0 y 2. De esta forma se puede simular que:

- Los nuevos edificios pueden tener distinto tamaño entre sí.
- Los nuevos departamentos no se distribuyen equitativamente en todas las manzanas, sino en bloques a medida que se construyen edificios.

Entonces, para cada manzana, la fórmula de la cantidad de departamentos en el año objetivo es:

$$\text{Dptos}_{\text{año obj}}^{\text{Manzana}} = \text{Dptos}_{\text{año base}}^{\text{Manzana}} + (\text{Dptos}_{\text{año obj}}^{\text{Comuna}} - \text{Dptos}_{\text{año base}}^{\text{Comuna}}) \cdot \text{factor}$$

Con respecto al aumento de casas, como se mencionó anteriormente, no se va a considerar la expansión horizontal de la ciudad, por lo que no es posible simular el principal mecanismo por el cual se construyen nuevas casas. Considerando esto, junto al hecho de que el aumento en la cantidad de casas es muy bajo en comparación al aumento de departamentos, se escogió aproximar de manera simplificada el aumento en la cantidad de casas de cada vivienda, multiplicando la cantidad inicial de casas por el cociente entre las viviendas proyectadas y las viviendas iniciales de la comuna. De esta forma se alcanzan las viviendas proyectadas por comuna, sin afectar la distribución espacial con supuestos incorrectos.

En la Figura 4.13 se muestra el resultado de la proyección de la distribución espacial de las viviendas de la Región Metropolitana en el año objetivo 2042.

Distribución Espacial de Viviendas

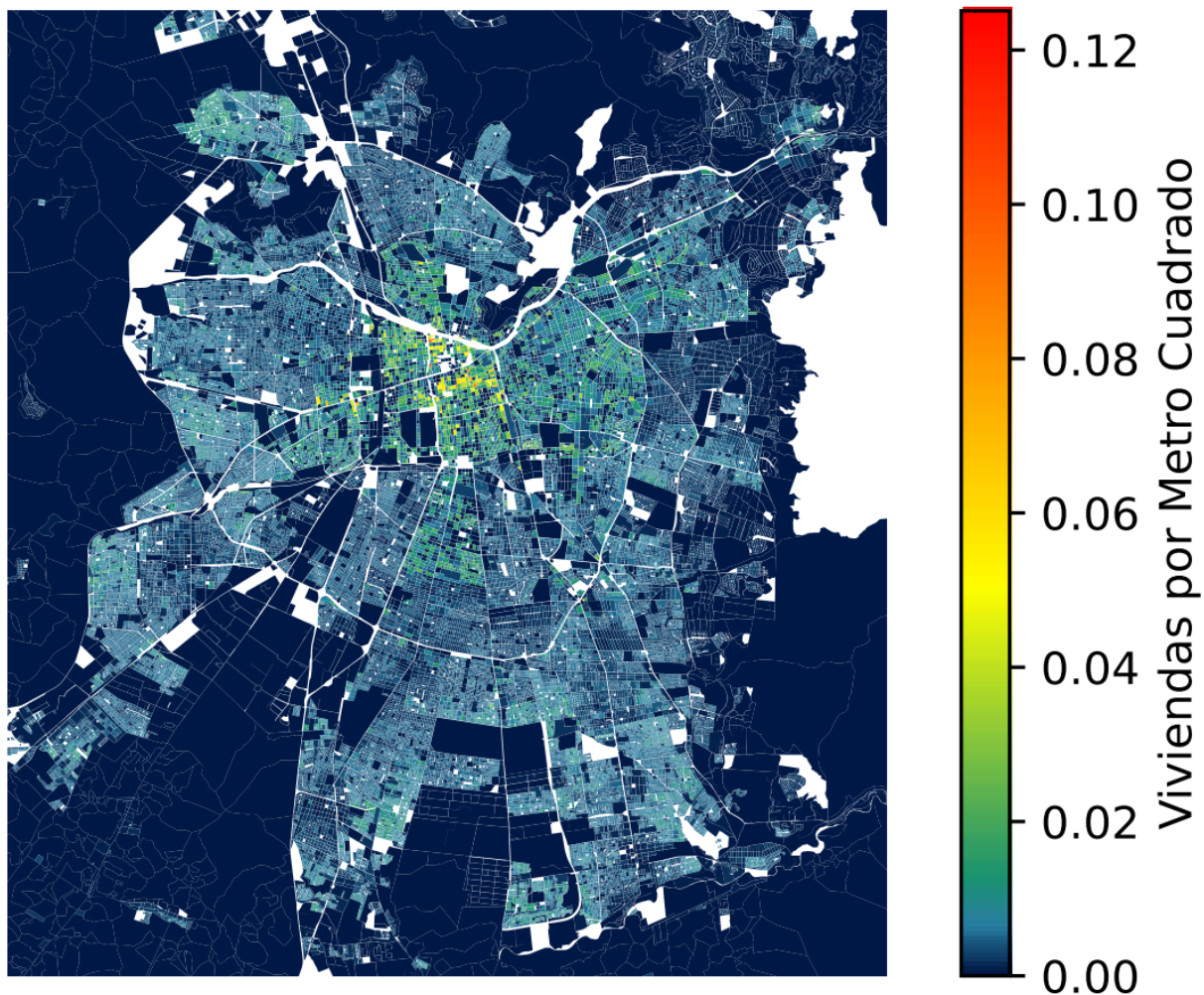


Figura 4.13: Distribución espacial de viviendas en Santiago en 2042

Por último, el aumento en la población se distribuye proporcionalmente al aumento de viviendas en cada manzana, con respecto al aumento de viviendas en su respectiva comuna.

En la Figura 4.13 se muestra el resultado de la proyección de la distribución espacial de los habitantes de la Región Metropolitana en el año objetivo 2042.

Distribución Espacial de Población

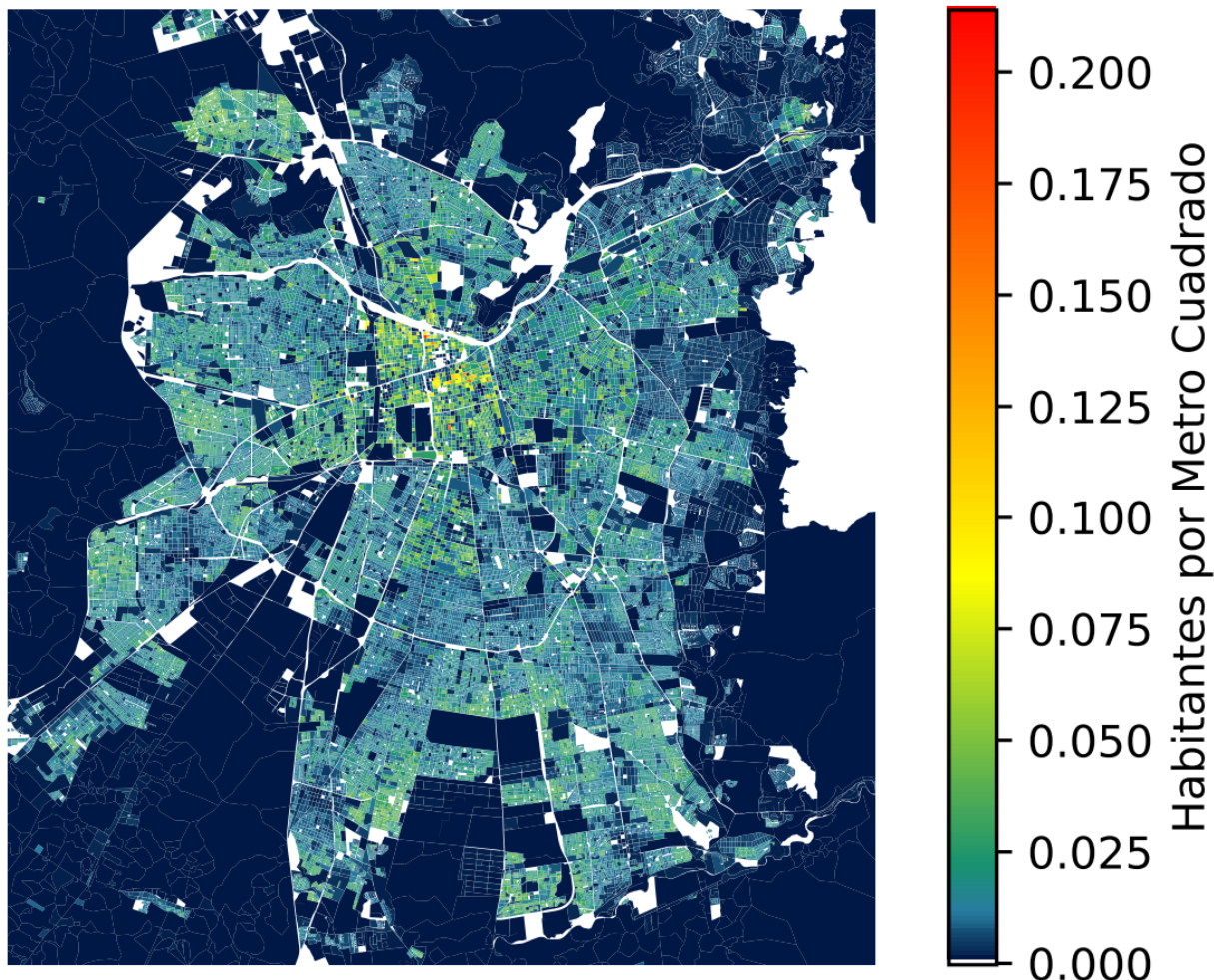


Figura 4.14: Distribución espacial de habitantes en Santiago en 2042

4.3.2.3. Aumento en el confort térmico y uso de artefactos eléctricos

Otro mecanismo por el cual puede cambiar el consumo del sector residencial es un aumento en las intensidades de consumo. Para los usos finales de cocción y agua caliente sanitaria, se asume que la intensidad se mantiene constante, ya que corresponden a actividades básicas cuya frecuencia no se debería afectar significativamente por factores externos. En otras palabras, las personas deberían a seguir bañándose y cocinando en la misma cantidad.

Por otro lado, en el uso final de calefacción si existe un margen de mejora, ya que es común que familias no posean sistemas de calefacción o que lo utilicen a una intensidad menor a la ideal, sacrificando confort térmico para disminuir el gasto en energía. En el futuro, a medida que mejora la situación económica de las familias, debería aumentar su confort térmico y su gasto en calefacción y, por lo tanto, debería aumentar la intensidad de consumo por calefacción.

En el Modelo PELP, se calculan factores que cuantifican estos aumentos en la intensidad de consumo, considerando una envolvente térmica, la eficiencia de calefactores, el confort térmico y el índice GINI. Se utilizaron estos mismos factores para proyectar la intensidad de consumo por calefacción, reemplazando la intensidad calculada para el año base en las fórmulas de la hoja de cálculo del Modelo PELP.

En la Tabla 4.5 se muestra el detalle de la intensidad de consumo por calefacción proyectada para el año objetivo 2042.

Tabla 4.5: Proyección de intensidad por calefacción año 2042

Tipo de vivienda	Casa	Departamento
Unidad	$\frac{kWh}{Vivienda}$	$\frac{kWh}{Vivienda}$
Leña	9.707	5.871
Gas natural	9.779	7.241
Gas licuado	7.003	3.645
Kerosene	7.195	3.837
Electricidad	4.322	2.223

En la Figura 4.15 se muestra como cambia la intensidad de consumo de los distintos energéticos utilizados por calefacción en casas, desde 2017 hasta 2042.

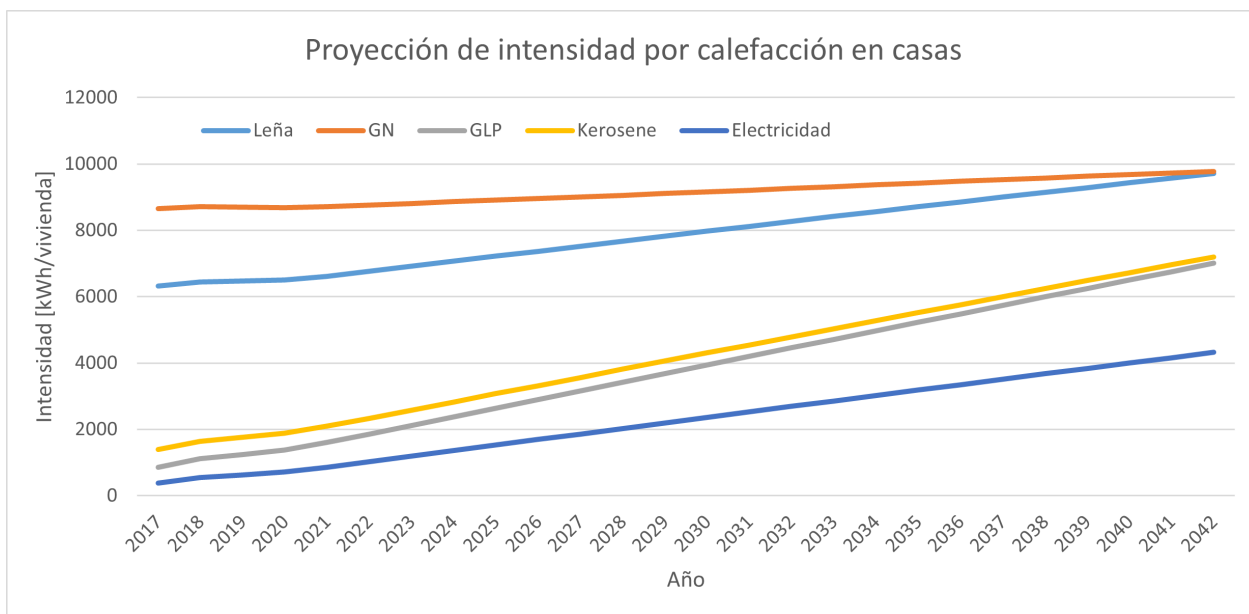


Figura 4.15: Proyección de intensidad por calefacción en casas entre 2017 y 2042

En la Figura 4.16 se muestra como cambia la intensidad de consumo de los distintos energéticos utilizados por calefacción en departamentos, desde 2017 hasta 2042.

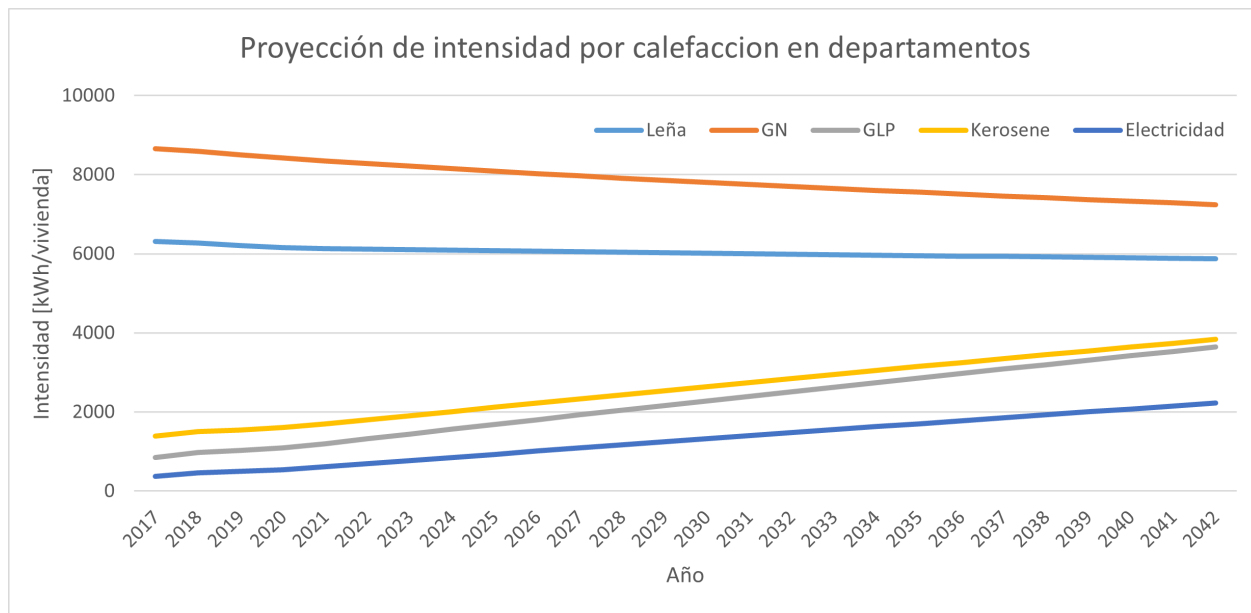


Figura 4.16: Proyección de intensidad por calefacción en departamentos entre 2017 y 2042

Similarmente, se realiza el supuesto de que al mejorar la situación económica de las familias, estas van a comprar y usar más electrodomésticos. El Modelo PELP incluye una proyección del consumo promedio de distintos equipos, junto a su tenencia promedio por vivienda entre 2017 y 2050. A partir de esta proyección, se ejecutó el mismo cálculo que durante la caracterización del año base, al multiplicar el consumo por equipo por la cantidad de equipos por vivienda, se obtiene el consumo anual por vivienda de cada electrodoméstico. Luego se suma el consumo de todos los electrodomésticos y se obtiene el consumo anual por artefactos eléctricos. También se agrega al consumo de cada año el consumo por concepto de “Otros”, suponiendo que se mantiene constante.

En la Tabla 4.6 se muestra el detalle de la intensidad de consumo por artefactos eléctricos proyectada para el año objetivo 2042.

Tabla 4.6: Proyección de intensidad por artefactos eléctricos año 2042

Tipo de vivienda	Casa	Departamento
Unidad	$\frac{kWh}{Vivienda}$	$\frac{kWh}{Vivienda}$
Electricidad	2.494	3.130

En la Figura 4.17 se muestra como aumenta la intensidad de consumo por artefactos eléctricos entre los años 2017 y 2042.

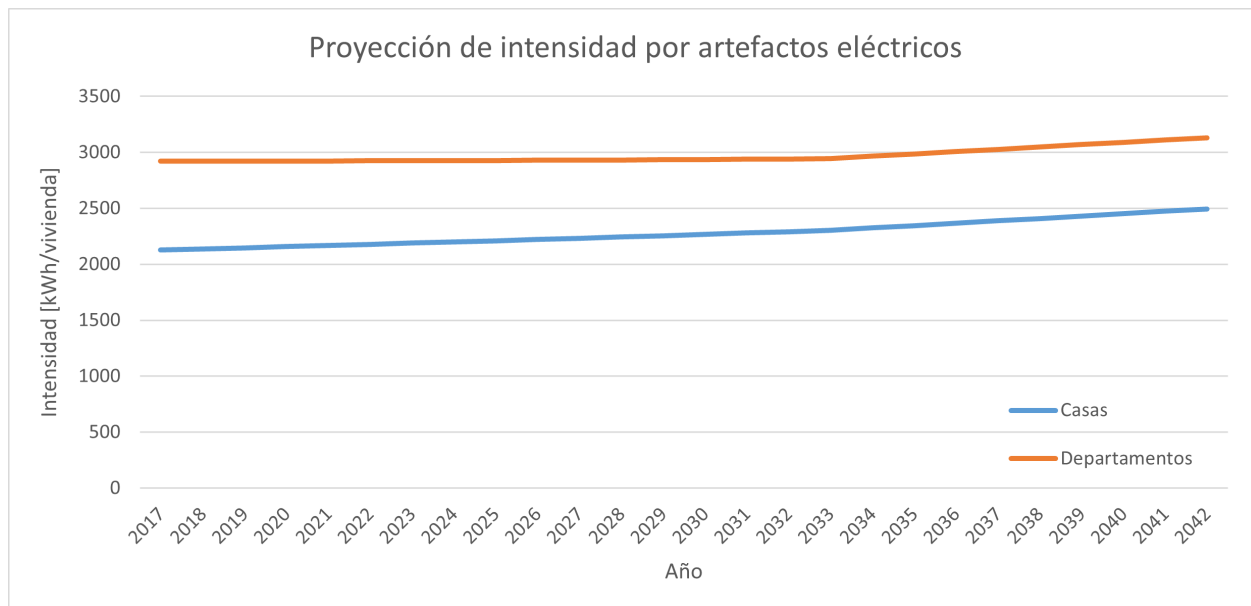


Figura 4.17: Proyección de intensidad por artefactos eléctricos entre 2017 y 2042

4.3.2.4. Cambios en la participación de energéticos

Por último, se debe proyectar como van a evolucionar los porcentajes de utilización de energéticos en cada comuna. En el Modelo PELP, se incluyen porcentajes de uso de energéticos agregados para toda la Región Metropolitana para el año 2050, basados en las metas de gases de efecto invernadero de la Planificación Energética de Largo Plazo.

En la Tabla 4.7 se muestran los porcentajes objetivos, correspondientes al escenario base del Modelo PELP.

Tabla 4.7: Utilización de combustibles por uso final en la Región Metropolitana 2050

Uso final	Tipo de energético				
	GLP	GN	Kerosene	Leña	Electricidad
Cocción	40 %	40 %	0 %	0 %	20.00 %
Calefacción casas	33 %	12 %	20 %	5 %	30.00 %
Calefacción Dptos.	27 %	12 %	21 %	0 %	40.00 %
Agua caliente	30 %	50 %	0 %	0 %	20.00 %

Para proyectar la evolución de los porcentajes de participación entre el año base y el año objetivo, se aplicó la metodología del Modelo PELP:

- Se asume que leña, kerosene y gas natural progresan como una recta entre el porcentaje inicial y final. El uso de gas natural por cocción alcanza la meta el año 2037, mientras que el resto de los energéticos alcanzan la meta el año 2050.

- Se asume que el uso de electricidad se adopta como una exponencial. Se adopta rápidamente y luego se mantiene como una asíntota.
- Se asume que gas licuado se adapta al resto de los energéticos. Su participación es igual a 1 menos el porcentaje de otros energéticos.

En la Figura 4.18 se muestra como evolucionan por porcentajes de utilización de cada energético por cocción entre los años 2017 y 2050. El modelo supone que aumentará la participación de cocinas eléctricas en el futuro.

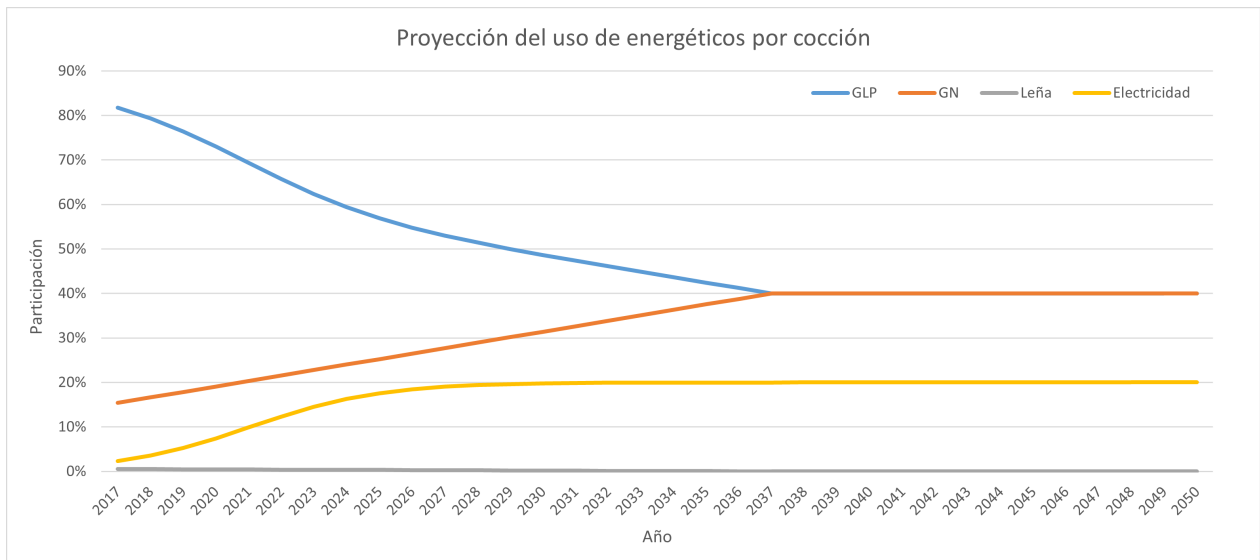


Figura 4.18: Proyección del uso de energéticos por cocción entre 2017 y 2050

En la Figura 4.19 se muestra como evolucionan por porcentajes de utilización de cada energético por calefacción en casas entre los años 2017 y 2050. El modelo supone que aumentará la participación de la calefacción eléctrica, como resultado de las políticas de mitigación de gases de efecto invernadero.

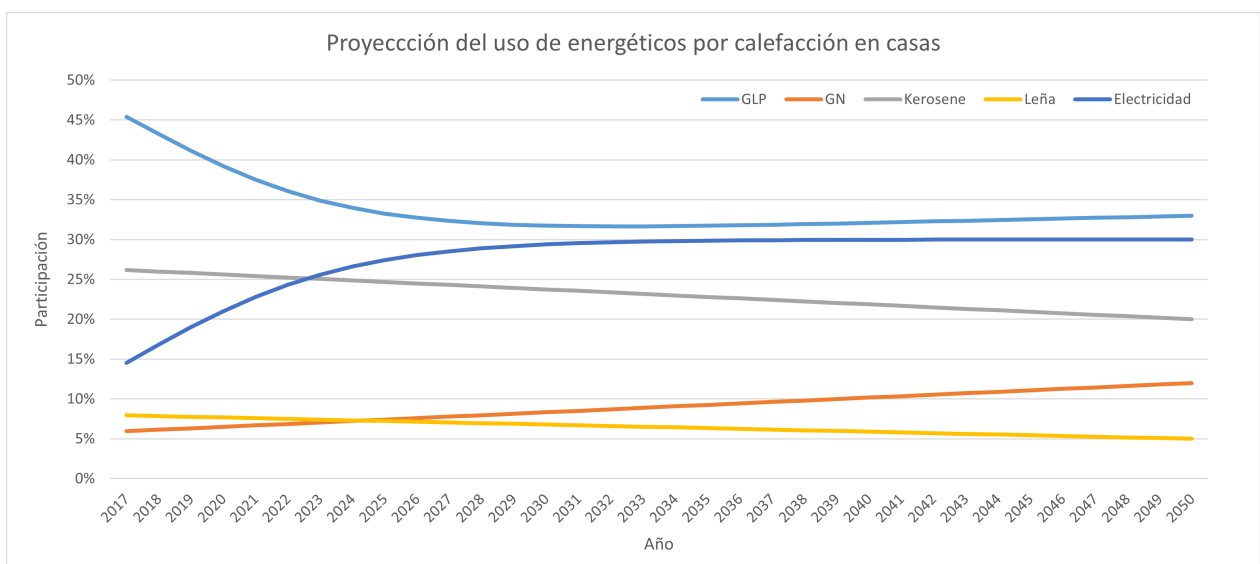


Figura 4.19: Proyección del uso de energéticos por calefacción en casas entre 2017 y 2050

En la Figura 4.18 se muestra como evolucionan por porcentajes de utilización de cada energético por calefacción en departamentos entre los años 2017 y 2050.

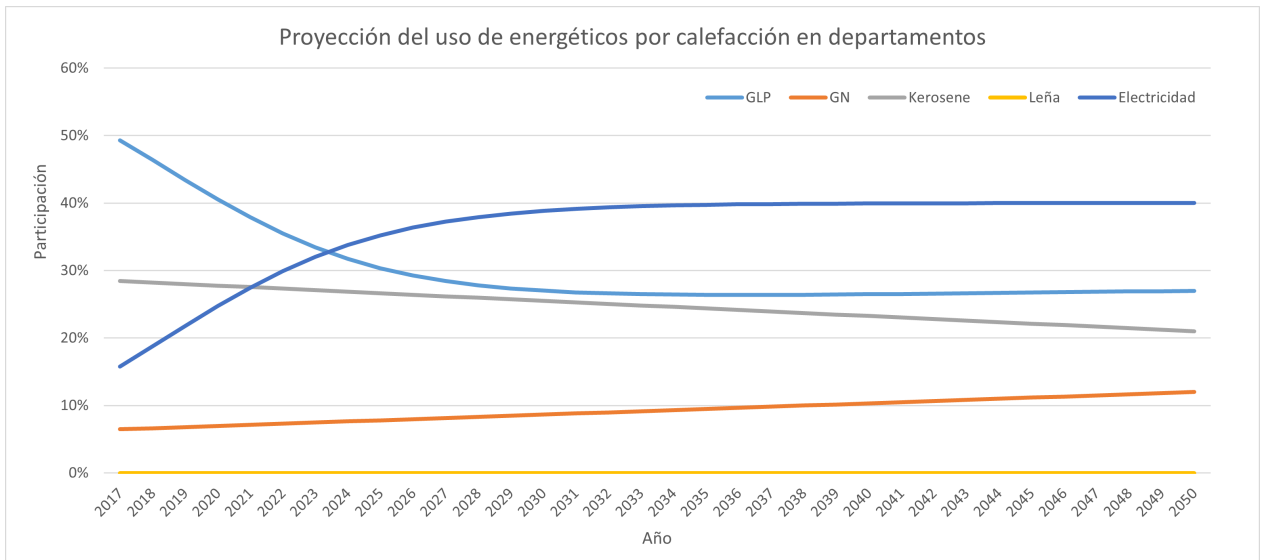


Figura 4.20: Proyección del uso de energéticos por calefacción en departamentos entre 2017 y 2050

En la Figura 4.18 se muestra como evolucionan por porcentajes de utilización de cada energético por agua caliente sanitaria entre los años 2017 y 2050.

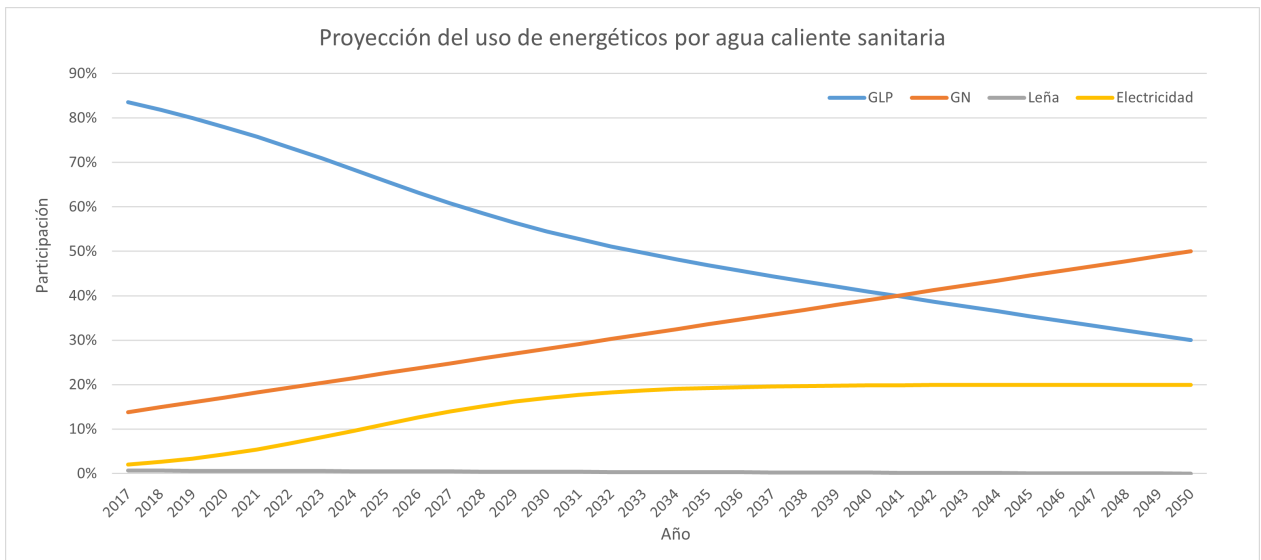


Figura 4.21: Proyección del uso de energéticos por agua caliente sanitaria entre 2017 y 2050

Teniendo los porcentajes agregados de cada año, energético y uso final, se debe definir una metodología para calcular los porcentajes de cada comuna, que es la información de entrada del modelo.

Se comienza por calcular la cantidad de viviendas y habitantes que utilizan cada energético por uso final en la Región Metropolitana, para el año base y para el año objetivo, multiplicando los porcentajes de participación por la población o cantidad de viviendas correspondiente. Al restar las cantidades del año objetivo y las del año base, se obtiene la cantidad de habitantes o viviendas que adoptan o dejan de utilizar cada energético por uso final en la región, las cuales luego se deben distribuir entre las comunas.

Luego se calcula la cantidad de viviendas y habitantes que utilizan cada energético por uso final en cada comuna en el año base, multiplicando los porcentajes y la población o viviendas. Los usuarios que adoptan o dejan de emplear cada energético se distribuyen entre las comunas sumando o restando a los valores calculados para cada comuna. Para esto, se toman distintos supuestos dependiendo de si los usuarios de un combustible aumentan o disminuyen:

- Si la utilización de un energético disminuye, se asume que todos los usuarios originales del energético tienen la misma probabilidad de adoptar otro energético. Es decir, la cantidad de usuarios del energético en todas las comunas se disminuye multiplicando por una constante, igual al cociente entre los usuarios totales del año objetivo y los usuarios totales del año base.
- No se consideran los cambios en la población y viviendas de las comunas. Por lo tanto, la cantidad de usuarios que adoptan energéticos en una comuna debe ser igual a la cantidad de usuarios que dejan de utilizar otros energéticos. Además, la forma en la que se distribuyen los usuarios que cambiaron su energético debe ser tal que se alcance la proporción agregada. Entonces, la cantidad de usuarios de un energético que aumenta su uso en una comuna, es igual a la cantidad original, más la cantidad de usuarios que dejaron de usar otros energéticos, multiplicada por la cantidad de usuarios que adoptaron el combustible en toda la región, dividido por la cantidad de usuarios que adoptaron cualquier nuevo combustible en la región.

A modo de ejemplo, en la Tabla 4.8 se muestran los nuevos porcentajes de utilización de energéticos por calefacción de las mismas comunas presentadas en la Tabla 4.2. El resto de los porcentajes proyectados se adjuntan en las Tablas C.1, C.3, C.4 y C.2 del Anexo.

Tabla 4.8: Ejemplo de proyección de participación por calefacción

Comuna	GLP	GN	Kerosene	Leña	Electricidad
Santiago	17,82 %	11,89 %	8,60 %	0,00 %	61,69 %
Lo Prado	38,79 %	5,58 %	18,38 %	0,00 %	37,26 %
Vitacura	6,81 %	34,35 %	23,04 %	0,00 %	35,80 %
Lo Espejo	24,71 %	5,88 %	36,28 %	0,00 %	33,13 %

Una vez proyectadas todas las variables de entrada, se aplica el modelo para obtener la proyección de la distribución espacial del consumo del sector residencial en la Región Metropolitana. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 5.

4.4. Sector comercial

Como se mencionó anteriormente, la metodología propuesta para estimar el consumo del sector comercial depende de la superficie de edificios construidos para el sector en cada manzana, en metros cuadrados. Como parte del sector comercial, se consideran edificios de salud, comercio, oficinas, hoteles y bodegas.

De acuerdo al Balance Nacional de Energía, en este sector se consumen los siguientes energéticos: gas natural, gas licuado de petróleo, electricidad y petróleo diésel.

A diferencia del sector residencial, la información disponible no permite diferenciar entre los distintos subsectores o tipos de comercio (salud, hoteles, etc.) que se comportan de la misma forma. En otras palabras, se calcula una única intensidad del sector comercial.

Tampoco fue posible caracterizar la participación de energéticos de distintas comunas, por lo que se asume que los porcentajes de utilización de energéticos de todas las manzanas son iguales a los de la Región Metropolitana completa.

En este caso, la intensidad tiene un significado distinto al del sector residencial. La intensidad indica la cantidad anual de cada energético que se consume en promedio en un metro cuadrado construido para el sector comercial.

Por lo tanto, el cálculo del consumo de energéticos es mucho más simple. A continuación se presenta la fórmula para calcular la demanda de un energético “E” del sector comercial. $I_{E, \text{Comercial}}$ corresponde a la intensidad de consumo del energético.

$$D_{E, \text{Comercial}} = \text{Superficie}_{\text{Comercial}} \cdot I_{E, \text{Comercial}}$$

4.4.1. Caracterización del año base

En esta sección se describen las fuentes de información, los supuestos y la metodología utilizada para obtener los parámetros de entrada del modelo y calcular la demanda del sector comercial durante el año base 2017.

4.4.1.1. Superficie construida

Lamentablemente, no existe ninguna base de datos con información georreferenciada tan completa y detallada relevante para el sector comercial, como lo es el Censo 2017 para el sector residencial. La mejor fuente de información existente es el Catastro de Bienes Raíces del Servicio de Impuestos Internos.

La base de datos Detalle Catastral contiene 4 archivos:

- Roles agrícolas.
- Suelos y construcciones agrícolas.
- Roles no agrícolas.
- Suelos y construcciones no agrícolas.

Como muestra la Figura 4.9, los archivos de roles agrícolas y no agrícolas contienen las direcciones de los predios de la Región Metropolitana, así como su información fiscal.

Tabla 4.9: Información de roles

Información roles agrícolas	
1	Código SII de la Comuna
2	Número de Manzana
3	Número de Predial
4	Dirección o nombre del predio
5	Avalúo fiscal total
6	Contribución semestral
7	Código de destino principal
8	Avalúo exento de la propiedad

Por otro lado, según la Figura 4.10 los archivos de suelos y construcciones contienen la información sobre los edificios construidos en estos predios, incluyendo su destino y superficie construida. Por destino se entiende la categoría del edificio construido, como se detalla en la Figura 4.11.

Tabla 4.10: Información de terrenos y construcciones

Información de terrenos y construcciones no agrícolas	
1	Código SII de la Comuna
2	Número de Manzana
3	Número de Predial
4	Número correlativo de la línea de construcción
5	Código del material estructural de la línea de construcción
6	Código de calidad de la línea de construcción
7	Año de la línea de construcción
8	Superficie de la línea de construcción
9	Código de destino de la línea de construcción
10	Código de condición especial de la línea de construcción

Por último, en la Figura 4.11 se muestran los destinos en los cuales se categorizan los distintos edificios construidos.

Tabla 4.11: Diccionario de destinos

Tabla de destinos			
Campo	Descripción	Campo	Descripción
A	Agrícola	M	Mínería
B	Agroindustrial	O	Ofinica
C	Comercio	P	Administración pública
D	Deporte y recreación	Q	Culto
E	Educación y cultura	S	Salud
F	Forestal	T	Transporte y telecomunicaciones
G	Hotel, motel	V	Otros no considerados
H	Habitacional	W	Sitio eriazo
I	Industria	Y	Gallineros, chancheras y otros
L	Bodega y almacenaje	Z	Estacionamiento

Como se mencionó anteriormente, los edificios considerados en el sector comercial son comercio (C), hotel (G), bodega (L), oficina (O) y salud (S). De acuerdo a la base de datos de terrenos y construcciones, la superficie de estos edificios asciende a 54,752,314 [m²].

Al combinar estas bases de datos, es posible obtener cuál es la cantidad de metros cuadrados de cada destino construidos en cada predio. Sin embargo, la codificación utilizada por el Servicio de Impuestos Internos para distinguir cada manzana es distinta al código MANZENT utilizado por el Instituto Nacional de Estadísticas, que se muestra en la Figura 4.3. Peor aún, en vez de incluir información sobre la geometría y ubicación de cada manzana, los archivos de roles solo incluyen la dirección escrita de cada predio, lo cual hace que sea imposible agregar la nueva información a los datos de entrada del modelo desarrollado.

Para intentar llevar la base de datos del Catastro del SII a un formato compatible con el *DataFrame* en el cual se basa el resto del modelo, se utiliza *Nominatim*, la API de *OpenStreetMaps*, para obtener las coordenadas de la ubicación espacial de la dirección de cada rol.

Sin embargo, las direcciones del Catastro no estaban escritas en un formato apropiado para ser procesados por la API. Como se muestra en la Figura 4.22, las direcciones contienen abreviaciones, errores ortográficos, códigos, caracteres adicionales y números dobles que impedían que la API los reconociera correctamente. Al intentar procesar la base de datos original sin modificaciones, se logró identificar menos del 30 % de las direcciones y muchas ubicaciones estaban incorrectas, ya sea en otra comuna, en otra ciudad o incluso en otro país.

13101	275	4 BANDERA 960 A 962 BALMACEDA 1108 A 1142
13101	281	167 GMACKENNA1457 MENDOZA 1460 BD 06 BX 417
13101	282	456 MAPOCHO 1432 1450 1458 BD B 138 BX E 91
13101	401	155 ALAMEDA LIB.B.OHIGGINS 1884 LC 5
14602	5	590 PC 8 B LT 1
14602	5	236 PARCELA 19 EL LUCHADOR LT B 1 LAS MERCE
13101	78	536 MATIAS CAUSINO 150 OF 830
13159	4717	516 DIAG. JOSE M. CARO 3005 BD 74

Figura 4.22: Extracto de direcciones del Catastro de Bienes Raíces

Para mejorar este aspecto, se tuvo que pre procesar la base de datos de direcciones. Debido a la cantidad de direcciones (más de 200.000), no es posible corregirlas a mano individualmente, pero se utilizó la herramienta de buscar y reemplazar de *Excel*, para reemplazar abreviaciones y eliminar aquella porción de las direcciones que interfieren con la API. Gracias a esto, se logró ubicar un 91 % de las direcciones y se mejoró la precisión de las ubicaciones obtenidas.

En la Figura 4.23 se muestra como quedan las direcciones luego de la corrección.

13101	275	4 BANDERA 960
13101	281	167 GENERAL MACKENNA 1457
13101	282	456 MAPOCHO 1432
13101	401	155 AVENIDA LIBERTADOR BERNARDO OHIGGINS 1884
14602	5	590 -
14602	5	236 EL LUCHADOR, PARCELA 19
13101	78	536 MATIAS COUSINO 150
13159	4717	516 DIAGONAL JOSE MARIA CARO 3005

Figura 4.23: Corrección de direcciones del Catastro de Bienes Raíces

Luego de unir las bases de datos de series Agrícola y No Agrícola, se termina con dos bases de datos, una con la dirección y ubicación de los predios y otra con la superficie, destino y predio de las construcciones.

El último paso para incorporar la información del Catastro al resto del modelo, es emplear funciones de la librería *GeoPandas* para encontrar la manzana a la cual pertenece la ubicación de cada predio. Luego, en la base de datos de construcciones se busca la superficie del sector comercial construida en este predio y se le asigna a la manzana como un nuevo parámetro. De esta forma, además de contener la información de población y vivienda, cada manzana también contiene los metros cuadrados construidos para el sector comercial.

Un porcentaje importante de la superficie se perdió durante este proceso por las direcciones que no se pudieron ubicar (45%). Adicionalmente, algunos predios de la base de datos de construcciones no aparecían en la base de datos de roles. Como explicará más adelante, la intensidad de consumo se calcula en función a la superficie del sector, así que la superficie de todas las manzanas se multiplicó por el cociente entre la superficie real y la superficie encontrada, para obtener un valor de intensidad más realista.

En la Figura 4.24 se muestra la distribución espacial de la superficie de los edificios construidos para el sector Comercial, obtenida a partir del Catastro de Bienes Raíces. Al igual que con los mapas del sector residencial, los datos se dividen por la superficie de cada manzana. En las zonas de Santiago Centro e Isidora Goyenechea se puede observar una alta densidad de superficie del sector comercial.

Distribución Espacial Sector Comercial

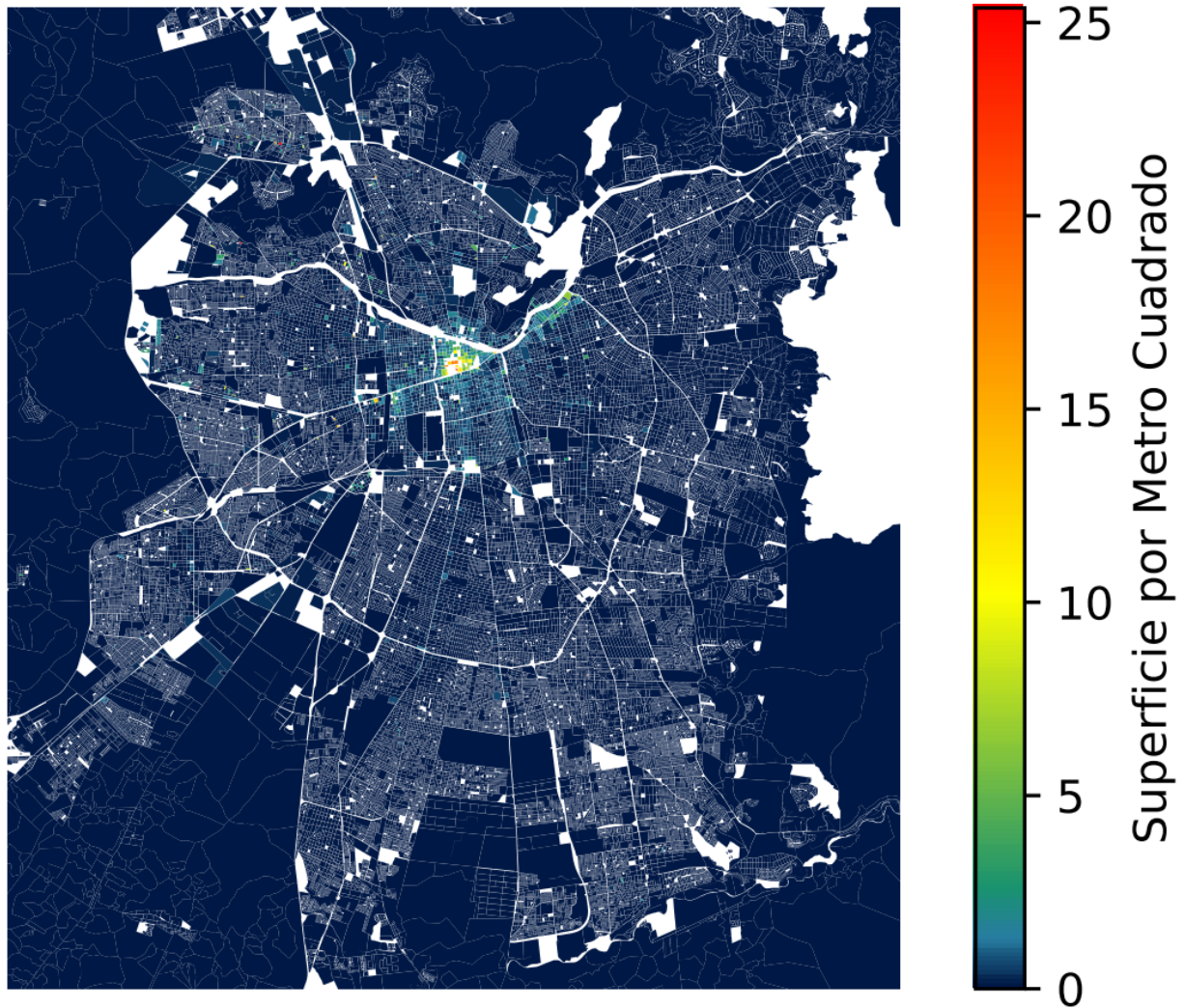


Figura 4.24: Distribución espacial de superficie construida para el sector Comercial

4.4.1.2. Intensidad energética

La intensidad del sector comercial se calcula dividiendo el consumo total de cada combustible en la región, de acuerdo al Balance Nacional de Energía del 2017, por la superficie total 54,752,314 [m²], según el Catastro de Bienes Raíces. En la Tabla 4.12 se muestra la intensidad calculada para el sector comercial en la Región Metropolitana durante el año base.

Tabla 4.12: Intensidad de consumo sector comercial

Energético	[GWh]	[$\frac{kWh}{m^2}$]
Electricidad	5.141	93,91
Gas natural	766	13,99
Diesel	2.339	42,72
Gas licuado	743	13,59

En [24] se provee un análisis detallado del consumo energético en china. Según este reporte, las intensidades de consumo del sector comercial se encuentran en el rango de 10 a 100 kWh por metro cuadrado, lo que confirma que los valores obtenidos al menos están en el orden de magnitud correcto. Este documento es un reporte que provee un análisis detallado del consumo energético en China

Finalmente, en cada manzana el consumo de cada energético por el sector comercial se calcula multiplicando su intensidad por la superficie en metros cuadrados. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 5.

4.4.2. Metodología de proyección

Para calcular el consumo de años posteriores al año base, se deben obtener proyecciones de los parámetros de entrada del modelo. En el caso del sector comercial, esto incluye la superficie construida en cada manzana y la intensidad de consumo de cada energético.

A continuación se describen las fuentes de información consideradas, los supuestos tomados y la metodología propuesta para obtener una proyección de la demanda del sector comercial.

4.4.2.1. Cambios en el uso de energéticos

En primer lugar, se asume que la magnitud de la intensidad de consumo es constante, ya que los aumentos en el consumo solo deberían ser producto de la construcción de nuevos establecimientos del sector comercial.

Aun así, si se considera un cambio en los porcentajes de utilización de cada energético, con un aumento en la electrificación del consumo y una reducción en el uso de combustibles fósiles. Estos porcentajes de participación anuales, se toman directamente de la hoja de cálculo del Modelo PELP. En la Figura 4.25 se muestra como evoluciona el porcentaje de utilización de cada energético para el sector comercial en la Región Metropolitana, entre 2017 y 2042.

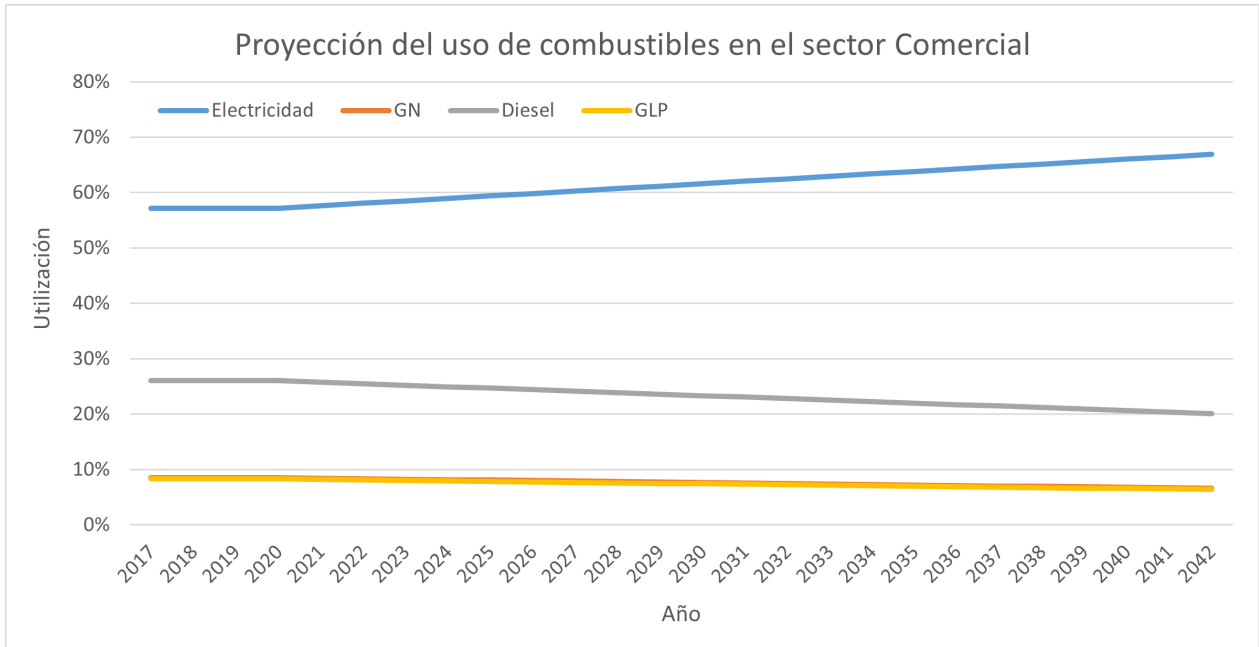


Figura 4.25: Proyección del uso de energéticos en el sector comercial entre 2017 y 2042

4.4.2.2. Proyección de la superficie del sector comercial

Durante el desarrollo del Modelo PELP, se encontró que se puede predecir el consumo del sector comercial en función del Producto Interno Bruto, con una fórmula del tipo $y = m \cdot x^b$. En la Figura 4.26 se muestra la estimación de la demanda eléctrica del sector comercial entre 2000 y 2017.

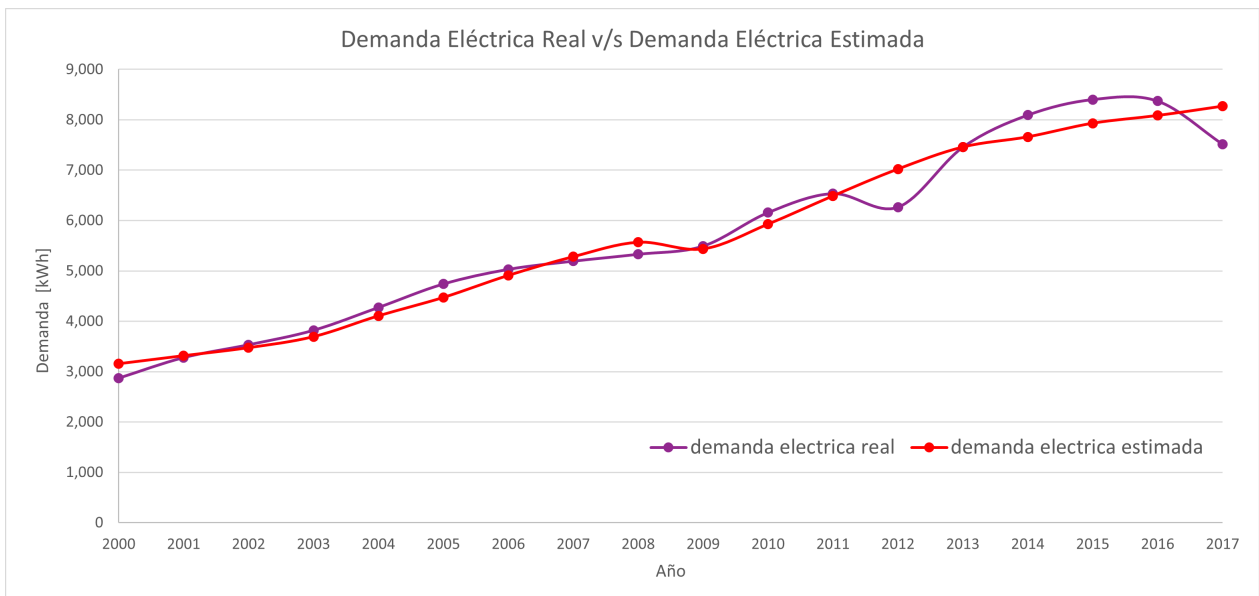


Figura 4.26: Estimación de la demanda eléctrica del sector comercial

De acuerdo al supuesto tomado al caracterizar la intensidad de consumo del año base, la superficie construida del sector comercial es proporcional a su demanda. Por lo tanto, la superficie construida del sector comercial también se puede predecir en función del PIB:

- Se asume que $\text{Superficie} = m \cdot \text{PIB}^b$.
- Al aplicar logaritmo natural a ambos lados, se llega a $\ln(\text{Superficie}) = \ln(m) \cdot \text{PIB}^b$.
- En la expresión anterior, $\ln(\text{Superficie})$ y $\ln(\text{PIB})$ están en la ecuación de una recta.
- A partir del Balance Nacional de Energía de los años 2000 a 2019, se obtiene el consumo del sector Comercial de estos años.
- Dividiendo el consumo del sector Comercial, por la suma de las intensidades de consumo, se calcula la superficie del sector comercial durante estos años.
- Se toma logaritmo natural del PIB y de la superficie calculada.
- Usando la herramienta de análisis de datos de *Excel*, se realiza una regresión lineal con los logaritmos naturales para obtener las constantes m y b .
- Se proyecta la superficie como $m \cdot \text{PIB}^b$, en base a una proyección del PIB hasta 2042.

Para evaluar si la superficie proyectada es razonable, se toma la proyección del consumo total del sector comercial según el Modelo PELP y se divide por la intensidad total de consumo, para calcular cuál sería la superficie que produciría este consumo.

En la Figura 4.27 se muestra la comparación entre la superficie calculada con base en el Balance Nacional de Energía, la proyección de superficie estimada en función del PIB y la proyección de superficie calculada de manera indirecta a partir de la proyección de demanda de energía del Modelo PELP y el indicador de intensidad.

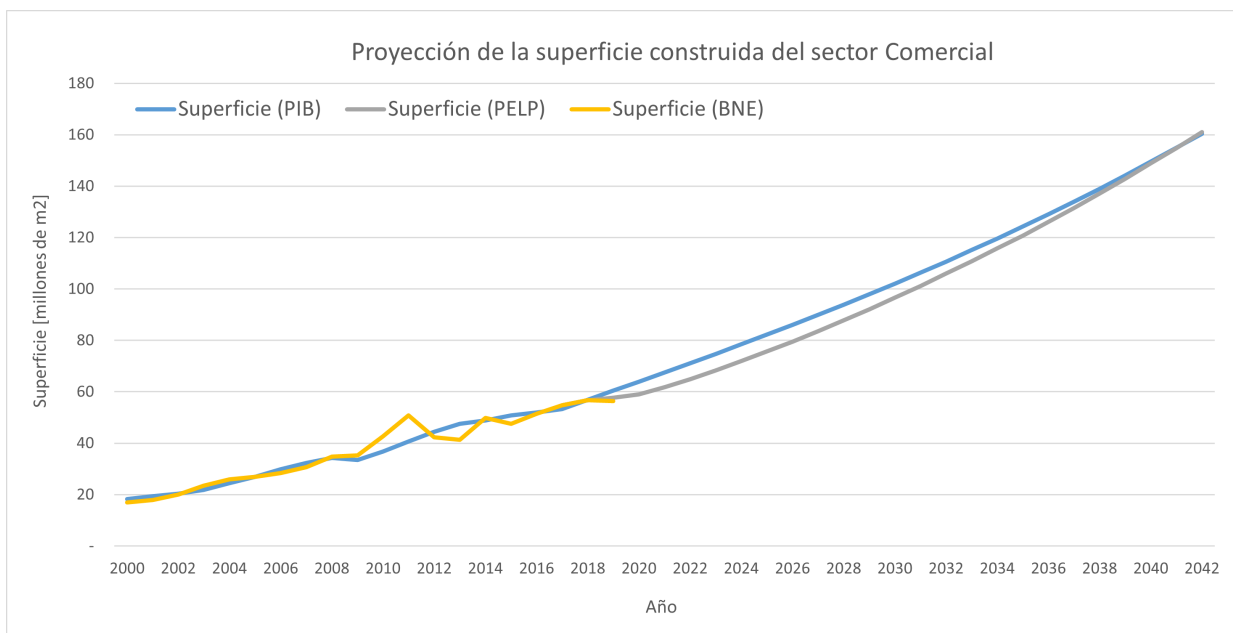


Figura 4.27: Proyección de superficie del sector Comercial hasta 2042

A la fecha de elaboración de este documento, los datos del Catastro del SII se han publicado hasta el 2021, pero por falta de tiempo no fue posible agregar esta información para comparar con los resultados de estimación de superficie.

4.4.2.3. Criterio para la distribución espacial de la superficie del sector comercial

El modelo requiere conocer la superficie del sector comercial de cada manzana en el año objetivo, por lo que luego de obtener la proyección de la superficie del sector, es necesario definir un criterio para distribuir espacialmente la superficie adicional.

En primer lugar, se calcula la diferencia entre la superficie en el año objetivo y en el año base, que es la cantidad que se debe repartir entre las manzanas de la región.

En la Figura 4.24 se pueden observar dos patrones en la distribución espacial del sector comercial. Primero, se nota que existen barrios con grandes grupos de manzanas con presencia del sector comercial, tales como Santiago Centro, Patronato o Barrio Suecia, que corresponden a pequeños comercios. Por otro lado, existen algunas manzanas aisladas con alta presencia del sector comercial, las cuales corresponden a grandes centros comerciales o clínicas y se encuentran repartidas a través de toda la ciudad.

La metodología propuesta supone que el desarrollo del pequeño comercio sigue al crecimiento del sector Residencial. Si en una zona aumenta la población, deberían crearse negocios y tiendas para satisfacer la nueva demanda. Por lo tanto, este tipo de comercio se desarrolla proporcionalmente al aumento de viviendas en una manzana. Específicamente, la fórmula para calcular la superficie de comercio en una manzana en el año objetivo es:

$$\text{Superficie}_{\text{año base}}^{\text{Manzana}} + (\text{Superficie}_{\text{año obj}}^{\text{Región}} - \text{Superficie}_{\text{año base}}^{\text{Región}}) \cdot \frac{\text{Habitantes}_{\text{año obj}}^{\text{Manzana}} - \text{Habitantes}_{\text{año base}}^{\text{Manzana}}}{\text{Habitantes}_{\text{año obj}}^{\text{Región}} - \text{Habitantes}_{\text{año base}}^{\text{Región}}}$$

Por otro lado, con la información disponible no es posible predecir donde se van a construir grandes centros comerciales en el futuro. A simple vista, estas manzanas con alta concentración se encuentran repartidas al azar dentro de la ciudad. Para simular que se mantiene esta distribución a medida que se desarrolla el sector comercial, se agregó un factor aleatorio a la fórmula descrita anteriormente.

- En 1 de cada 101 manzanas, la cantidad de superficie agregada según la fórmula se aumenta, multiplicándola por un real entre 3 y 5. De esta forma, se simula que en la manzana se construyó un centro comercial o algún establecimiento de tamaño parecido.
- En el resto de las 100 manzanas, la cantidad de superficie agregada según la fórmula se disminuye, multiplicándola por $\frac{97}{100}$. De esta forma se mantiene la superficie total.
- La proporción entre el tamaño del gran y pequeño comercio (4 veces) y la proporción entre su presencia (1 a 100) fueron escogidas a prueba y error, intentando imitar la distribución inicial del sector comercial. En el futuro, estos factores se podrían corregir si se encuentra información relevante.

En la Figura 4.28 se muestra el resultado de la proyección de la distribución espacial de la superficie del sector comercial de la Región Metropolitana para el año 2042.

Distribución Espacial Sector Comercial

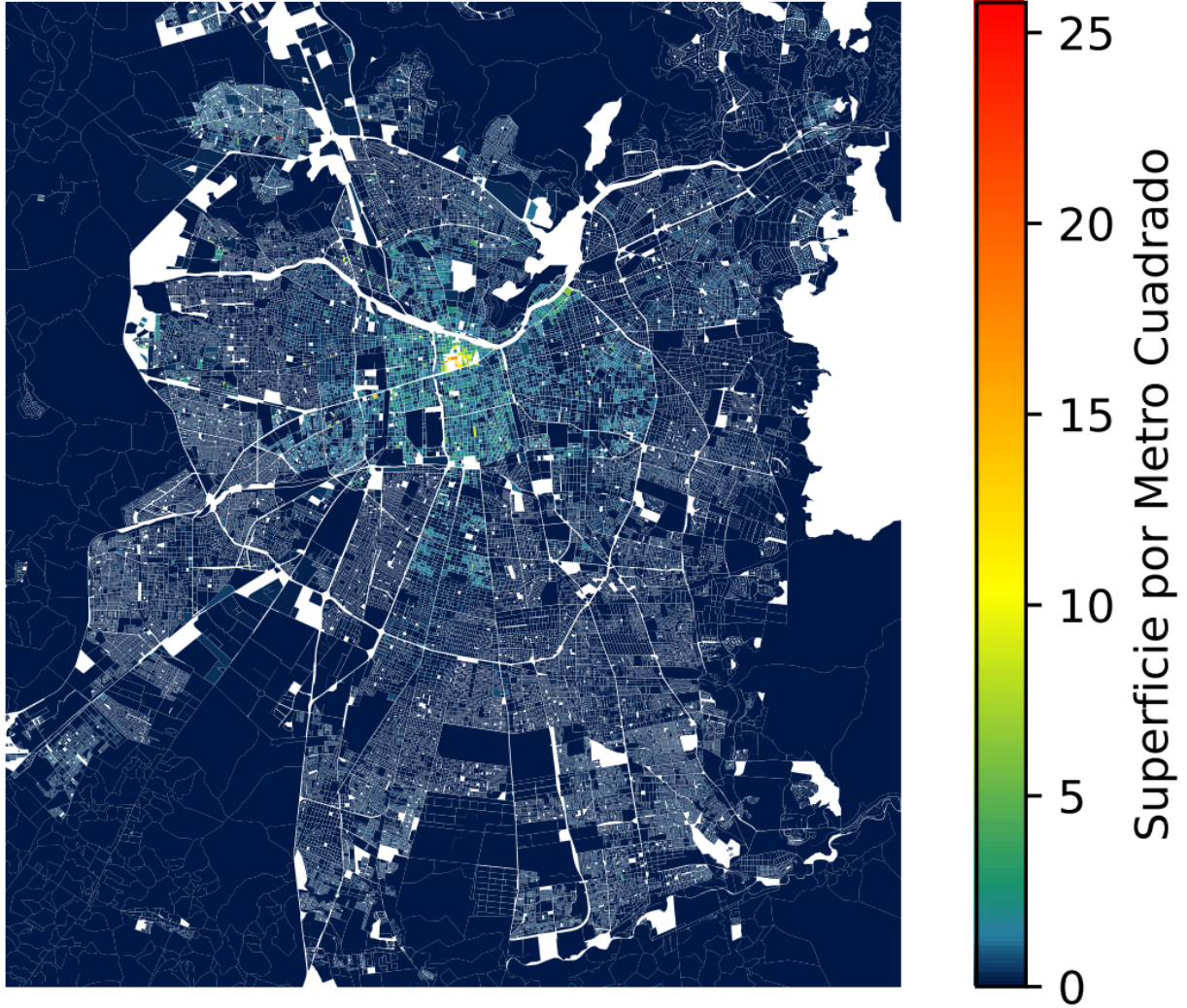


Figura 4.28: Distribución espacial de superficie del sector Comercial en 2042

4.5. Sector industrial

En el modelo de la Planificación Energética de Largo Plazo, el consumo del sector industrial se proyecta en función de los niveles de producción de cada industria [21]. Sin embargo, no existen fuentes de información pública que permitan distribuir espacialmente los niveles de producción de cada industrial. Debido a esto, la metodología propuesta supone que el consumo del sector industrial depende de la superficie de los edificios construidos para el sector, al igual que el consumo del sector comercial. Dentro del sector industrial se consideran minería, agroindustria e industria.

En el sector industrial se consumen los siguientes energéticos: electricidad, gas natural, petróleo diésel, gas licuado de petróleo, coque de petróleo y carbón. Al igual que en el sector comercial, la intensidad indica el consumo anual de cada energético de un metro cuadrado construido para el sector industrial. El consumo de cada energético se calcula multiplicando

la superficie por su intensidad.

4.5.1. Caracterización del año base

En esta sección se describen las fuentes de información, los supuestos y la metodología utilizada para obtener los parámetros de entrada del modelo y calcular la demanda del sector industrial durante el año base 2017.

4.5.1.1. Superficie construida

Al igual que en el sector comercial, se usan las bases de datos del Catastro de Bienes Raíces para obtener la superficie del sector industrial en cada manzana. Los destinos considerados para el sector industrial son minería (M), agroindustrial (B) e industria (I), según la tabla de destinos de la Figura 4.11. De acuerdo a la base de datos de terrenos y construcciones, la superficie del sector industrial asciende a 13.525.433 $[m^2]$.

En la Figura 4.29 se muestra la distribución espacial de la superficie de los edificios construidos para el sector industrial, obtenida a partir del Catastro de Bienes Raíces.

Distribución Espacial Sector Industrial

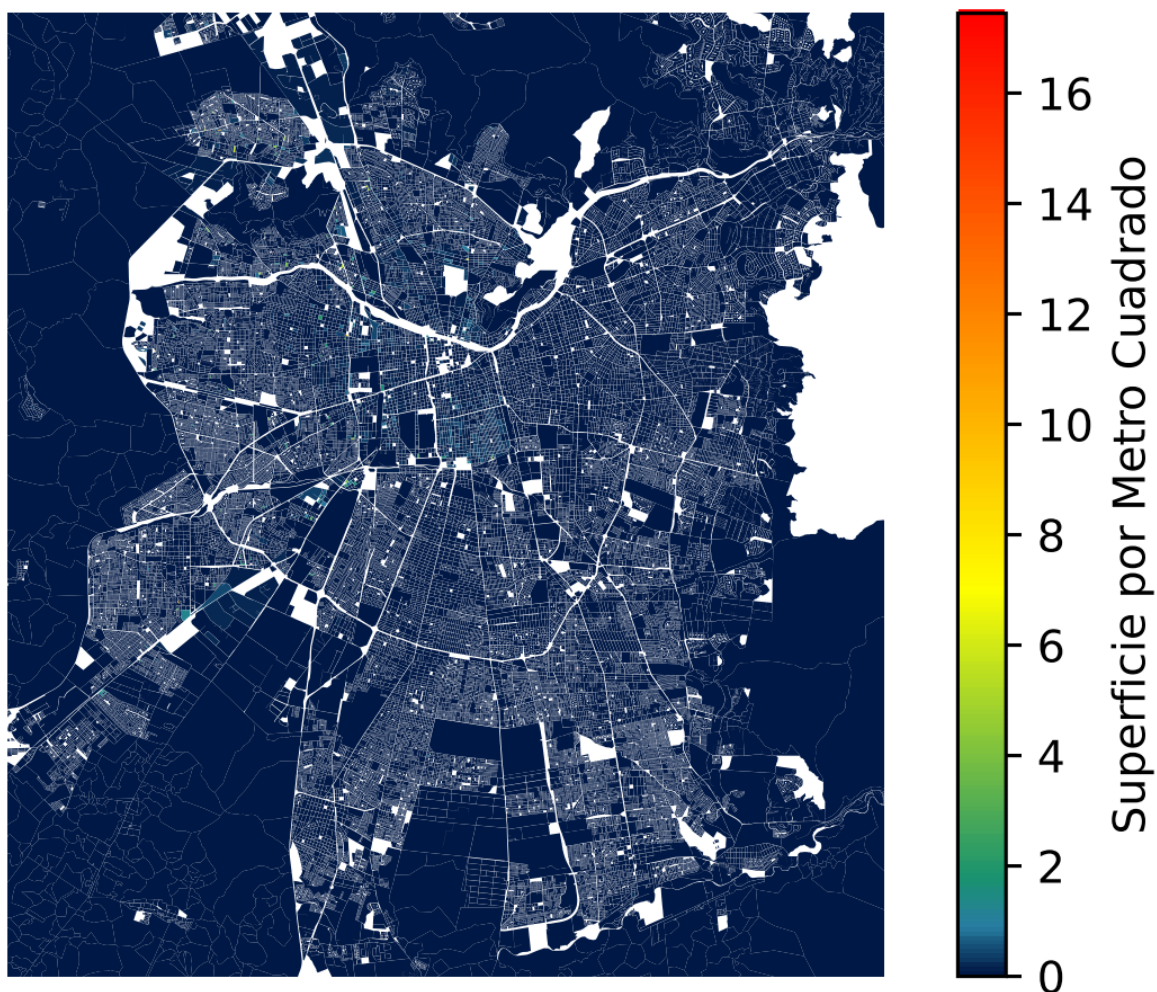


Figura 4.29: Distribución espacial de superficie del sector Industrial

4.5.1.2. Intensidad energética

La intensidad del sector industrial se calcula dividiendo el consumo total de cada combustible en la región, de acuerdo al Balance Nacional de Energía del 2017, por la superficie total 13.525.433 [m²], según el Catastro de Bienes Raíces. En la Tabla 4.13 se muestra la intensidad calculada para el sector industrial en la Región Metropolitana durante el año base.

Tabla 4.13: Intensidad de consumo sector industrial

Energético	Demanda [GWh]	Intensidad [$\frac{kWh}{m^2}$]
Electricidad	8.513	629,86
Gas natural	5.525	408,76
Petróleo diésel	3.020	223,44
Gas licuado	2.492	184,44
Coque	728	53,90
Carbón	220	16,30

En cada manzana el consumo de cada energético por el sector industrial se calcula multiplicando su intensidad por la superficie en metros cuadrados. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 5.

4.5.2. Metodología de proyección

A continuación se describen las fuentes de información utilizadas, los supuestos tomados y la metodología propuesta para obtener una proyección de la demanda del sector industrial.

4.5.2.1. Cambios en los niveles de producción

A diferencia del sector comercial, la relación entre el consumo del sector industrial y el PIB no es polinomial. Al intentar aplicar la misma metodología para proyectar la superficie en función del PIB por medio de una regresión lineal, se obtiene una demanda del año objetivo mucho mayor a la proyectada por el Modelo PELP.

El consumo del sector industrial en el futuro debería evolucionar de acuerdo a cambios en los niveles de producción. Además, al observar la distribución espacial de los edificios del sector industrial en la Figura 4.29 no se logró apreciar un patrón predecible. En el futuro se deberían construir nuevas industrias, pero con la información disponible es imposible predecir donde se van a ubicar.

Para evitar afectar la distribución espacial con supuestos infundados e incorporar la idea de que el consumo del sector industrial depende de los niveles de producción, se decidió dejar constante la superficie del sector industrial y su distribución espacial y aumentar el consumo de energía en función de aumentos en los niveles de producción.

Para calcular la proyección de los niveles de producción del sector industrial, se tomaron las proyecciones del consumo total del sector industrial proyectadas por el Modelo PELP. Esto incluye los módulos de: azúcar, cemento, cobre, hierro, industrias varias, minas varias, papel y celulosa, pesca, salitre y siderurgia.

Luego, en cada año el nivel de producción del sector industrial es igual a la intensidad del año base, multiplicada por el cociente entre el consumo total del sector industrial en ese año y su consumo total en el año base. Se asume que la proporción entre los distintos combustibles se mantiene.

En la Figura 4.30 se muestra como aumenta el nivel de producción total del sector industrial entre 2017 y 2042.

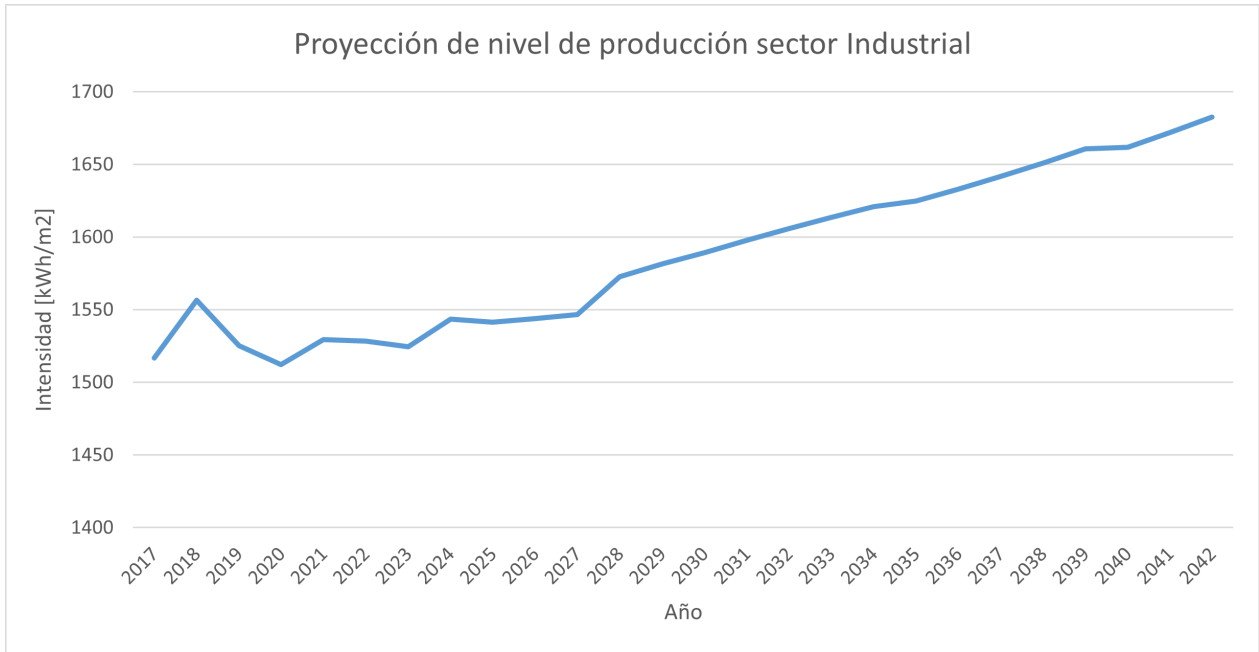


Figura 4.30: Proyección de intensidad del sector industrial entre 2017 y 2042

Una vez proyectadas las variables de entrada, se aplica el modelo para obtener la proyección de la distribución espacial del consumo del sector industrial en la Región Metropolitana. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 5.

4.6. Sector público

Por último, se supone que el consumo del sector público depende de la superficie de los edificios construidos para el sector, incluyendo deporte, educación, culto y administración pública.

En el sector público se consumen los siguientes energéticos: electricidad, gas natural, gas licuado de petróleo y petróleo diésel.

Nuevamente, la intensidad indica el consumo anual de cada energético de un metro cuadrado construido para el sector. El consumo de cada energético se calcula multiplicando la superficie por su intensidad.

4.6.1. Caracterización del año base

4.6.1.1. Superficie construida

Al igual que en los sectores comercial e industrial, se utilizan las bases de datos del Catastro de Bienes Raíces para obtener la superficie de cada manzana. Los destinos considerados para el sector público son deporte (D), educación (E), administración pública (P) y culto (Q). De acuerdo a la base de datos de terrenos y construcciones, la superficie del sector público asciende a 12.647.356 [m²].

En la Figura 4.31 se muestra la distribución espacial de la superficie de los edificios construidos para el sector público, obtenida a partir del Catastro de Bienes Raíces.

Distribución Espacial Sector Público

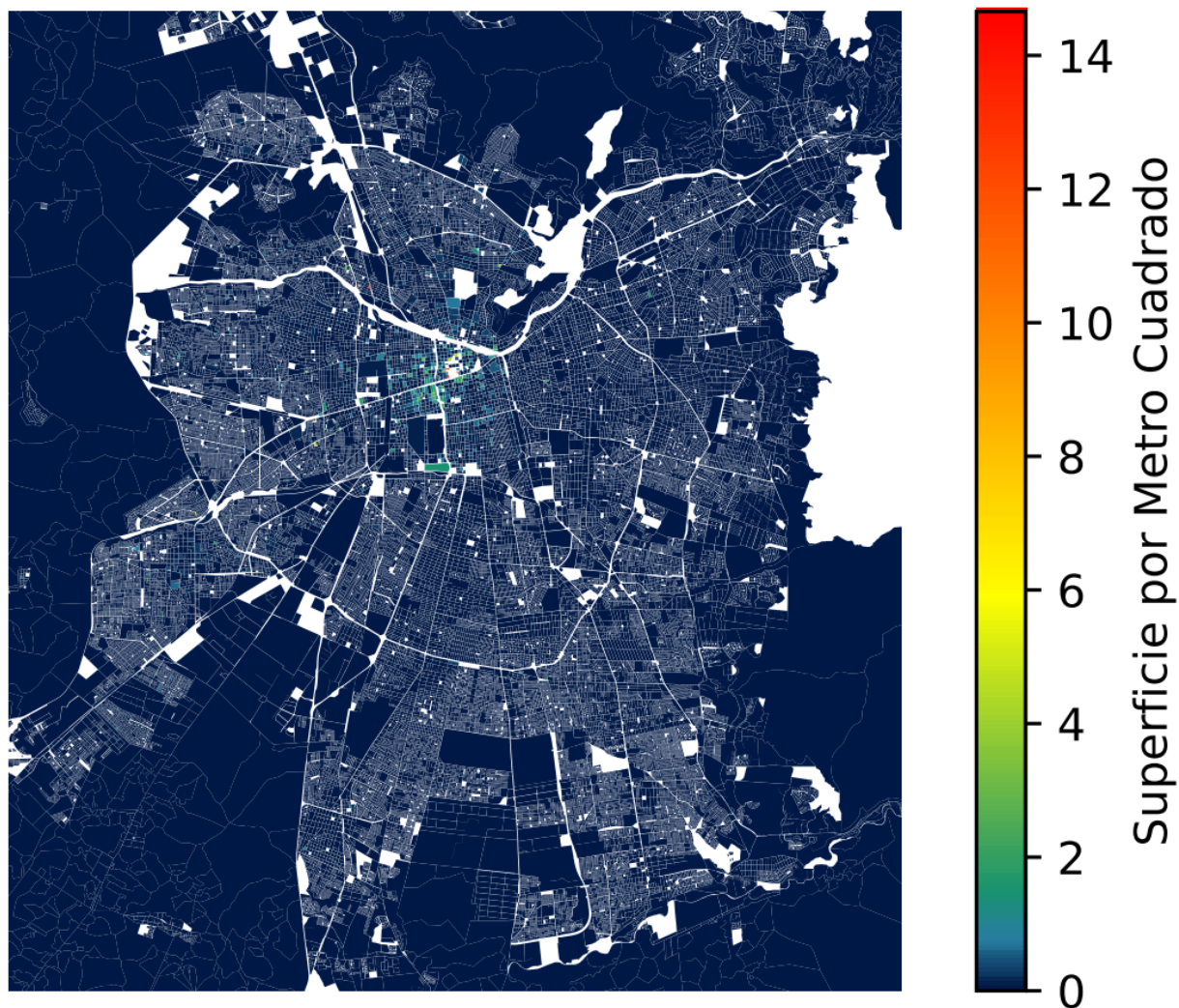


Figura 4.31: Distribución espacial de superficie construida para el sector Público

4.6.1.2. Intensidad de consumo

La intensidad del sector público se calcula dividiendo el consumo total de cada combustible en la Región, de acuerdo al Balance Nacional de Energía del 2017, por la superficie total 12.647.356 [m²], según el Catastro de Bienes Raíces. En la Tabla 4.14 se muestra la intensidad

calculada para el sector público en la Región Metropolitana durante el año base.

Tabla 4.14: Intensidad de consumo sector público

Energético	[GWh]	$[\frac{kWh}{m^2}]$
Electricidad	1.072	84.83
Gas natural	130	10.36
Gas licuado	98	7.77
Diésel	32	2.55

En cada manzana, el consumo de cada energético por el sector público se calcula multiplicando su intensidad por la superficie en metros cuadrados.

4.6.2. Metodología de proyección

4.6.2.1. Proyección de la superficie del sector público

En primer lugar, se supone que la intensidad de consumo del sector Público se mantiene constante, por las mismas razones que la intensidad del sector comercial. Sin embargo, el consumo del sector público no está relacionado con el PIB, por lo que se debe utilizar otra metodología para proyectar la superficie del sector.

Para proyectar la superficie total, se toma la proyección del consumo del sector público del modelo PELP y se divide por la suma de la intensidad de consumo del sector público, con lo que se obtiene la superficie en cada año que produciría el mismo consumo que el proyectado por el Modelo PELP. En la Figura 4.32 se muestra como aumenta la superficie construida del sector público entre 2017 y 2042.

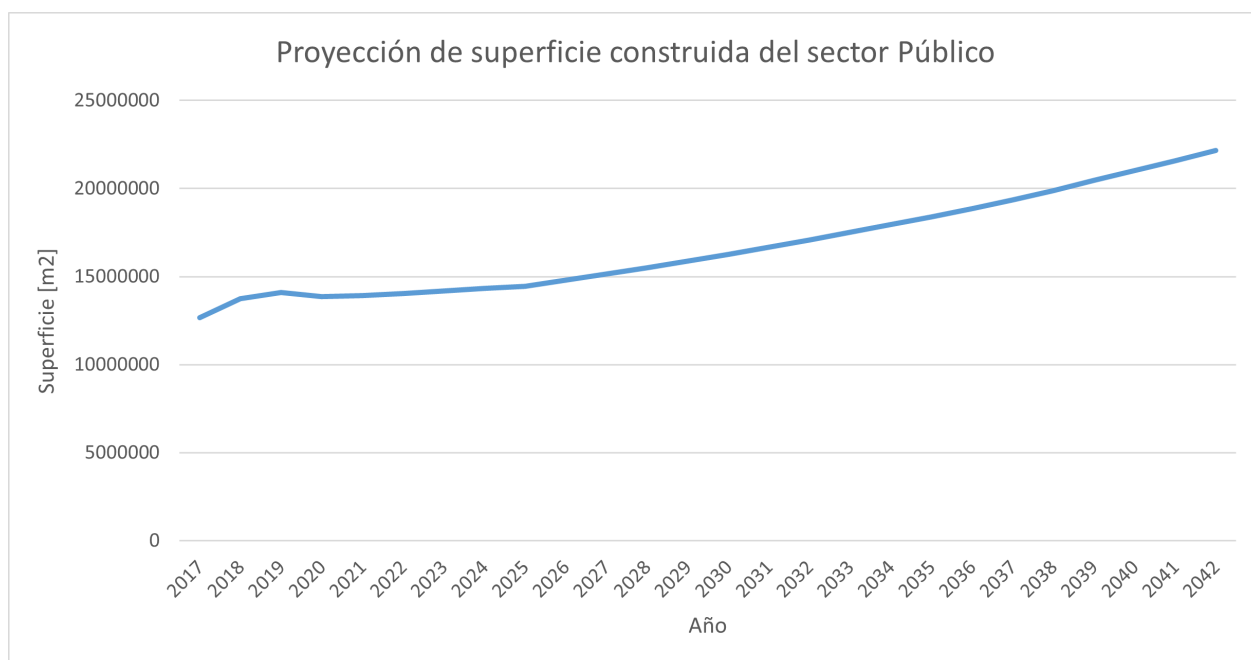


Figura 4.32: Proyección de superficie del sector publico entre 2017 y 2042

Al observar la distribución espacial de construcciones del sector público en la Figura 4.31, se nota que la mayoría de la superficie de este sector está concentrada en el centro de Santiago, donde se ubican los edificios de gobierno y administración pública. Esto sugiere que al expandirse, el sector público se debería mantener alrededor de esta zona. Existen otros edificios del sector repartidos en la ciudad, como colegios e iglesias, pero representan un menor porcentaje del total. Por último, el consumo de todo el sector público solo representa menos de 3% del consumo de los sectores considerados en el resto del modelo.

Debido a estas razones, se escogió simplificar el desarrollo del sector público, simplemente aumentando la superficie de forma proporcional a la superficie del año base, manteniendo su distribución espacial. Por lo tanto, La distribución espacial es igual a la del año base, presentada en la Figura 4.31.

Una vez proyectadas las variables de entrada, se aplica el modelo para obtener la proyección de la distribución espacial del consumo del sector público en la Región Metropolitana. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 5.

Capítulo 5

Resultados

El modelo permite calcular la demanda de energía por manzana y realizar proyecciones para todo el horizonte de evaluación. En esta sección se presentan los resultados de los años 2017 y 2042 para ejemplificar el funcionamiento del modelo.

5.1. Caracterización de la demanda del año base

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de la magnitud y distribución espacial de la demanda en la Región Metropolitana para el año 2017.

5.1.1. Sector residencial

En la Tabla 5.1 se muestra la demanda del sector residencial por energético y uso final, agregada para toda la Región Metropolitana. La demanda a nivel regional se obtiene de la suma de las demandas energéticas por manzana.

Tabla 5.1: Demanda del sector residencial año 2017

Energético	Cocción [GWh]	Calefacción [GWh]	Agua caliente [GWh]	Artefactos [GWh]	Total [GWh]
Electricidad	52	133	120	5.625	5.932
Gas licuado	1.340	940	3.199	0	5.480
Kerosene	0	886	0	0	886
Gas natural	466	1.252	1.685	0	3.405
Leña	14	772	39	0	826
Total	1.875	3.986	5.044	5.625	16.532

Se puede notar que la mayor parte de la demanda de energía del sector residencial ocurre por el uso de artefactos eléctricos y agua caliente sanitaria. También se observa que los principales energéticos que se utilizan son electricidad y gas licuado de petróleo, seguido por gas natural. Al comparar con la demanda del sector residencial según el Balance Regional de Energía en la Tabla 2.1, se nota que el modelo logra predecir la demanda del sector residencial con un error menor a 1 %.

En la Figura 5.1 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía del sector residencial, para toda la Región Metropolitana. Lamentablemente, el tamaño de las manzanas es muy pequeño en comparación al resto de la región y no se alcanzan a apreciar en este formato.

Demanda Total Sector Residencial

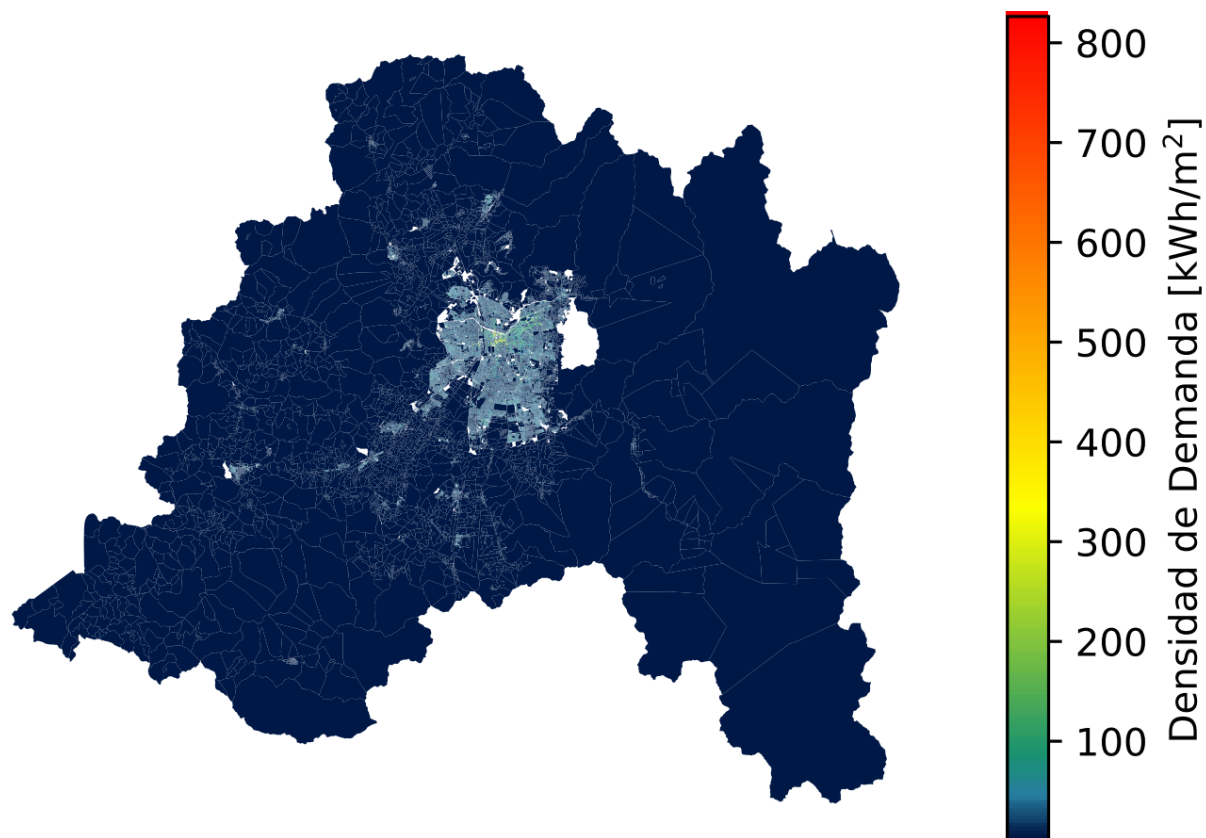


Figura 5.1: Distribución de la demanda del sector residencial de la Región Metropolitana en el año 2017

En la Figura 5.2 se muestra la distribución espacial de la demanda completa del sector residencial, recortada a la zona urbana de Santiago. Como es de esperar, a esta escala se puede observar que la distribución espacial de la demanda del sector residencial es bastante parecida a la distribución espacial de viviendas de la Figura 4.5, concentrada en Santiago centro y en el sector oriente, pero presente en toda la ciudad.

Demanda Total Sector Residencial

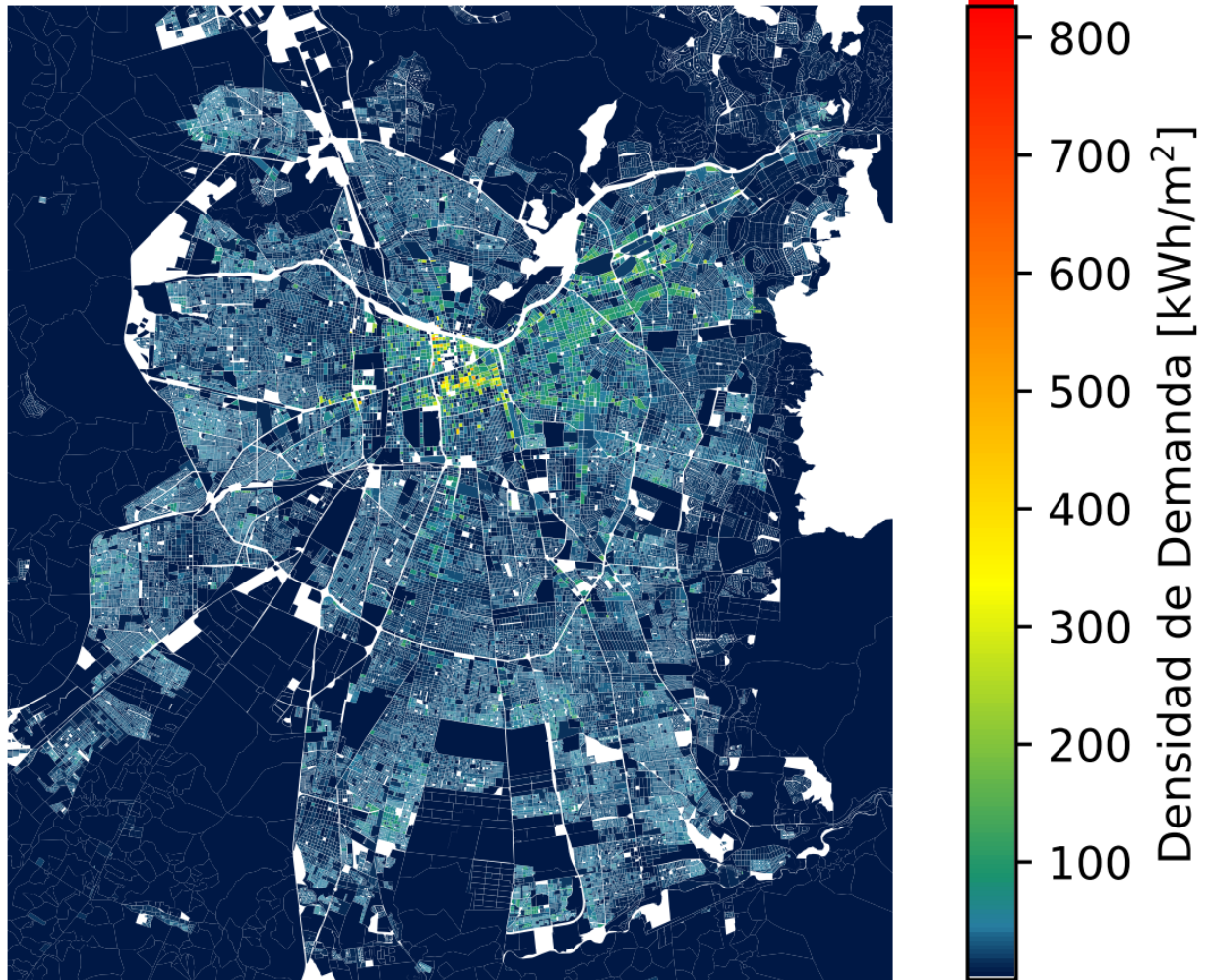


Figura 5.2: Distribución de la demanda del sector residencial el 2017

En la Figura 5.3 se muestra la distribución espacial de la demanda de electricidad del sector residencial. Nuevamente, se observa que las zonas con mayor demanda de electricidad son aquellas con mayor concentración de viviendas. El uso de artefactos eléctricos, que representa la mayor parte del consumo de electricidad del sector residencial, depende de la cantidad de casas y departamentos en una manzana, por lo que es esperable que su distribución espacial imite a la de las viviendas.

Demanda de Electricidad Sector Residencial

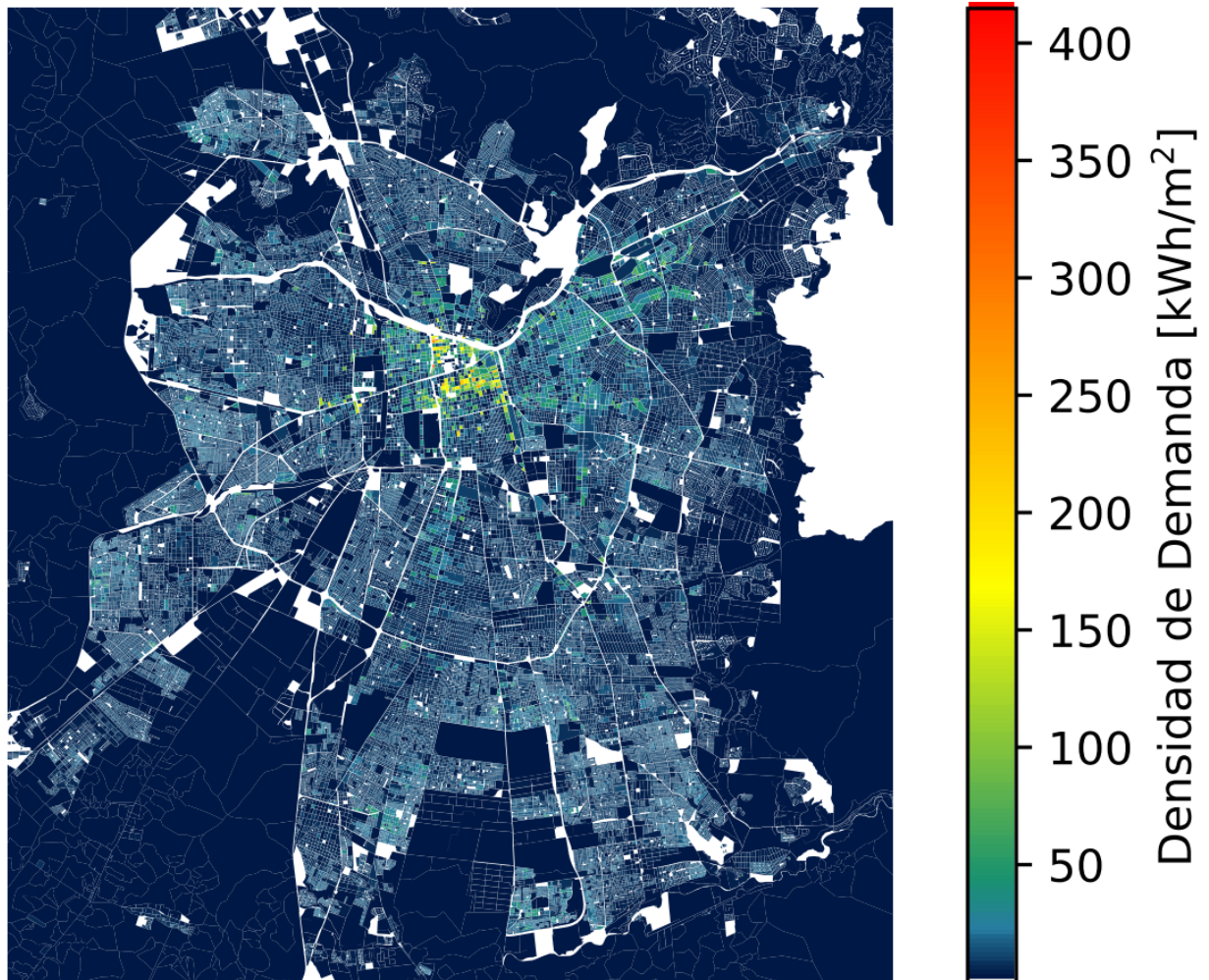


Figura 5.3: Distribución de la demanda eléctrica del sector residencial en 2017

En la Figura 5.4 se muestra la distribución espacial de la demanda de gas natural del sector residencial. A diferencia de los otros combustibles, las viviendas no pueden acceder libremente a la utilización de gas natural, sino que se suministra por una red de cañerías. En el mapa se observa que el consumo de gas natural se concentra significativamente en las comunas del sector oriente y en Santiago centro, que es donde existe la infraestructura necesaria para suministrarlo.

Demanda de Gas Natural Sector Residencial

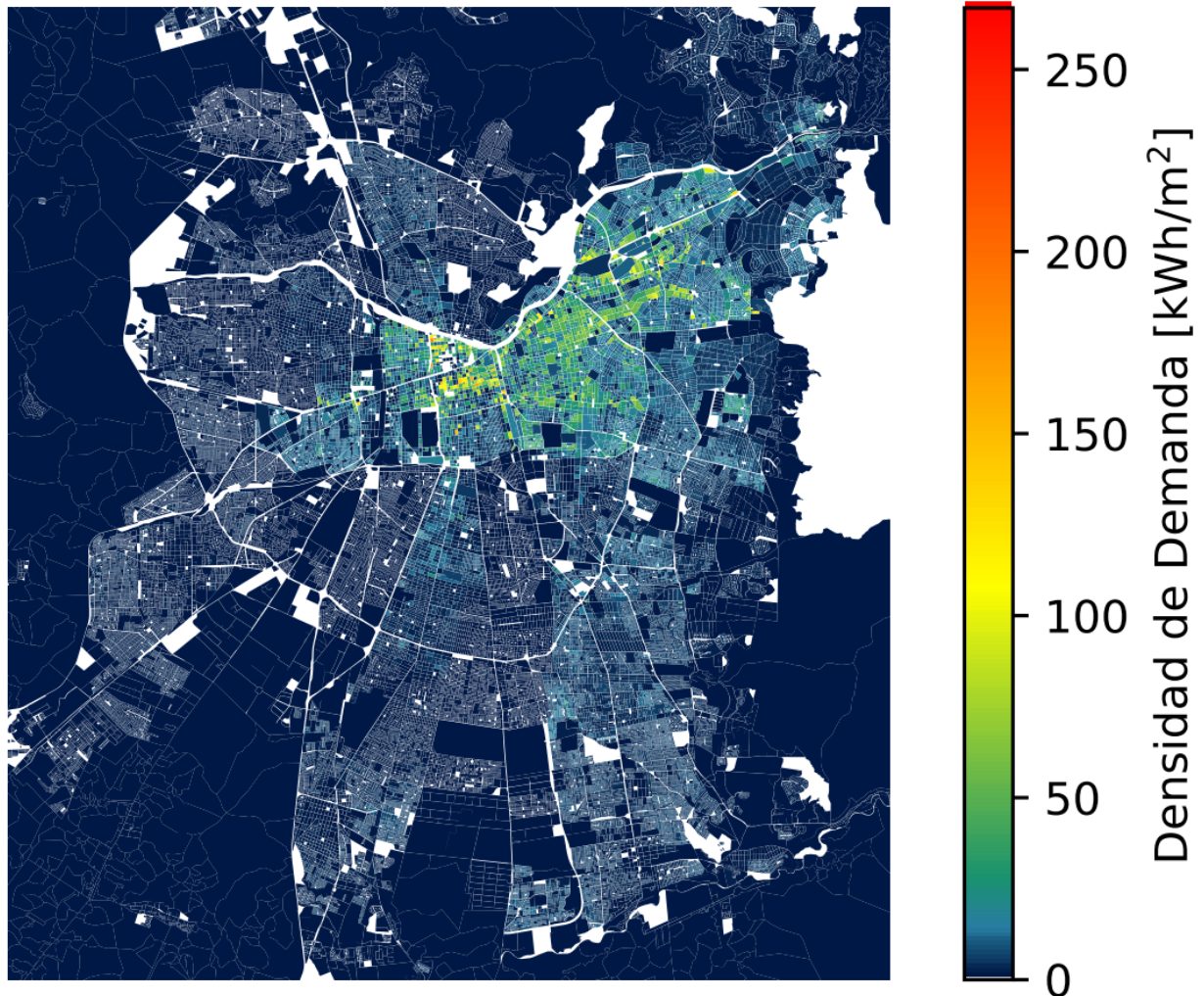


Figura 5.4: Distribución de la demanda de gas natural del sector residencial en 2017

En la Figura 5.5 se muestra la distribución espacial de la demanda de gas licuado del sector residencial. Se observa que su distribución espacial es complementaria a la distribución de gas natural. Esto muestra que en las comunas donde no existe la infraestructura necesaria para utilizar gas natural, las viviendas lo reemplazan por gas licuado.

Demanda de Gas Licuado Sector Residencial

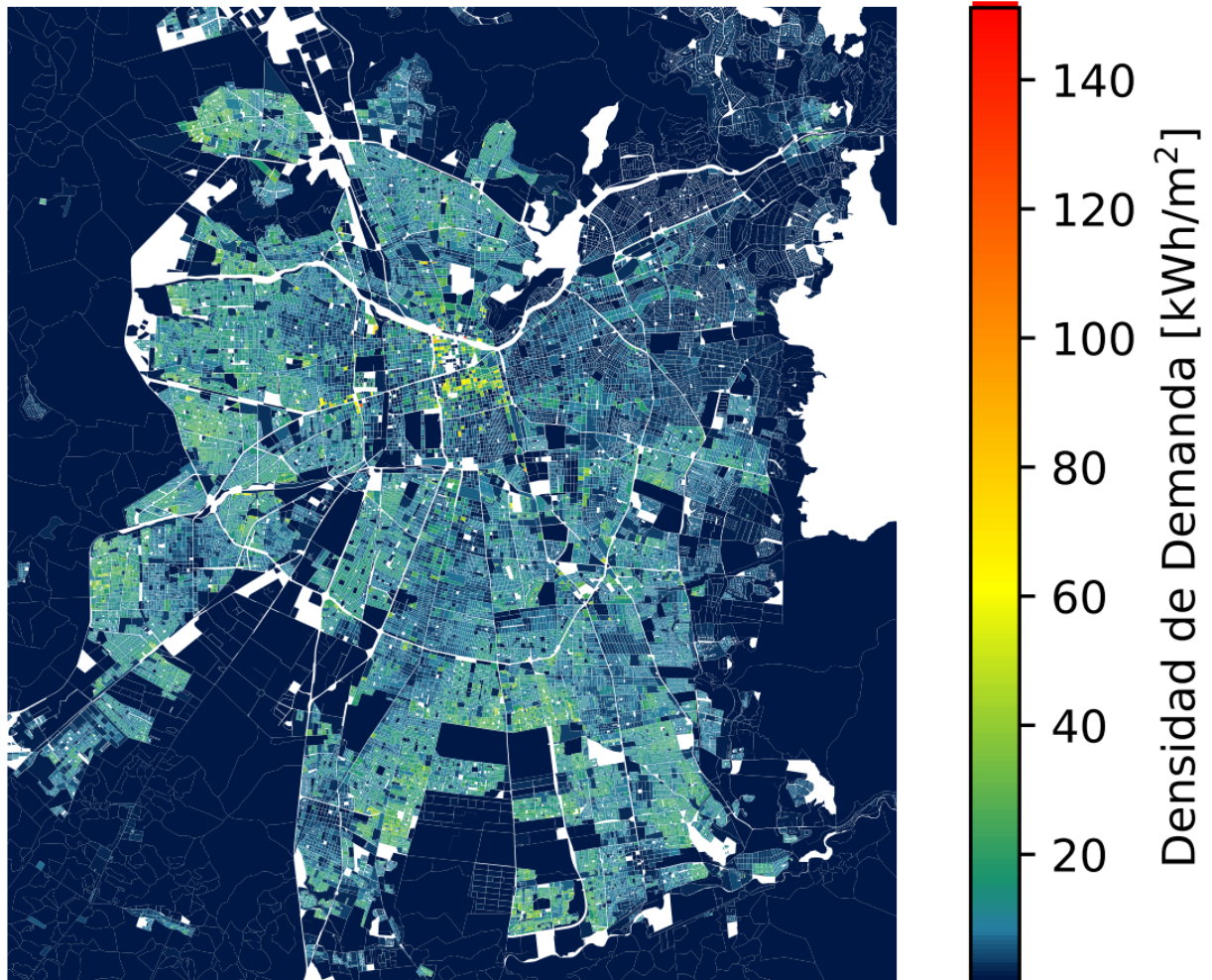


Figura 5.5: Distribución de la demanda de gas licuado del sector residencial en 2017

En la Figura 5.6 se muestra la distribución espacial de la demanda de kerosene del sector residencial. Se observa que la demanda se reparte equitativamente a través de toda la ciudad y su distribución espacial se parece más a la distribución espacial de habitantes de la Figura 4.4.

Demanda de Kerosene Sector Residencial

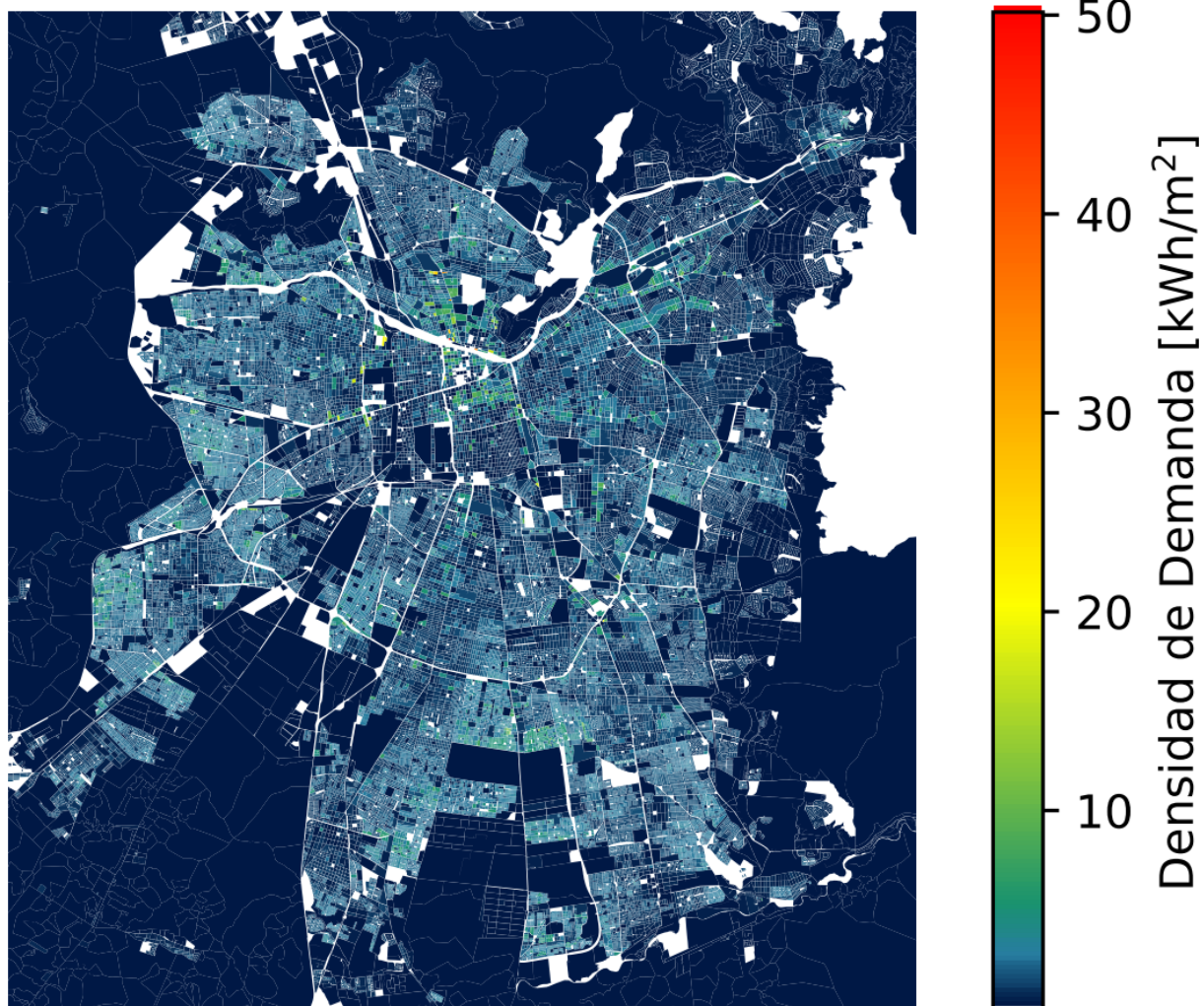


Figura 5.6: Distribución de la demanda de kerosene del sector residencial en 2017

En la Figura 5.7 se muestra la distribución espacial de la demanda de leña del sector residencial. Se observa que la demanda es casi nula en la zona urbana de Santiago, lo cual es esperable, pues está prohibido su uso en esta zona. Sin embargo, se nota que su consumo se concentra a las afueras de Santiago.

Demanda de Leña Sector Residencial

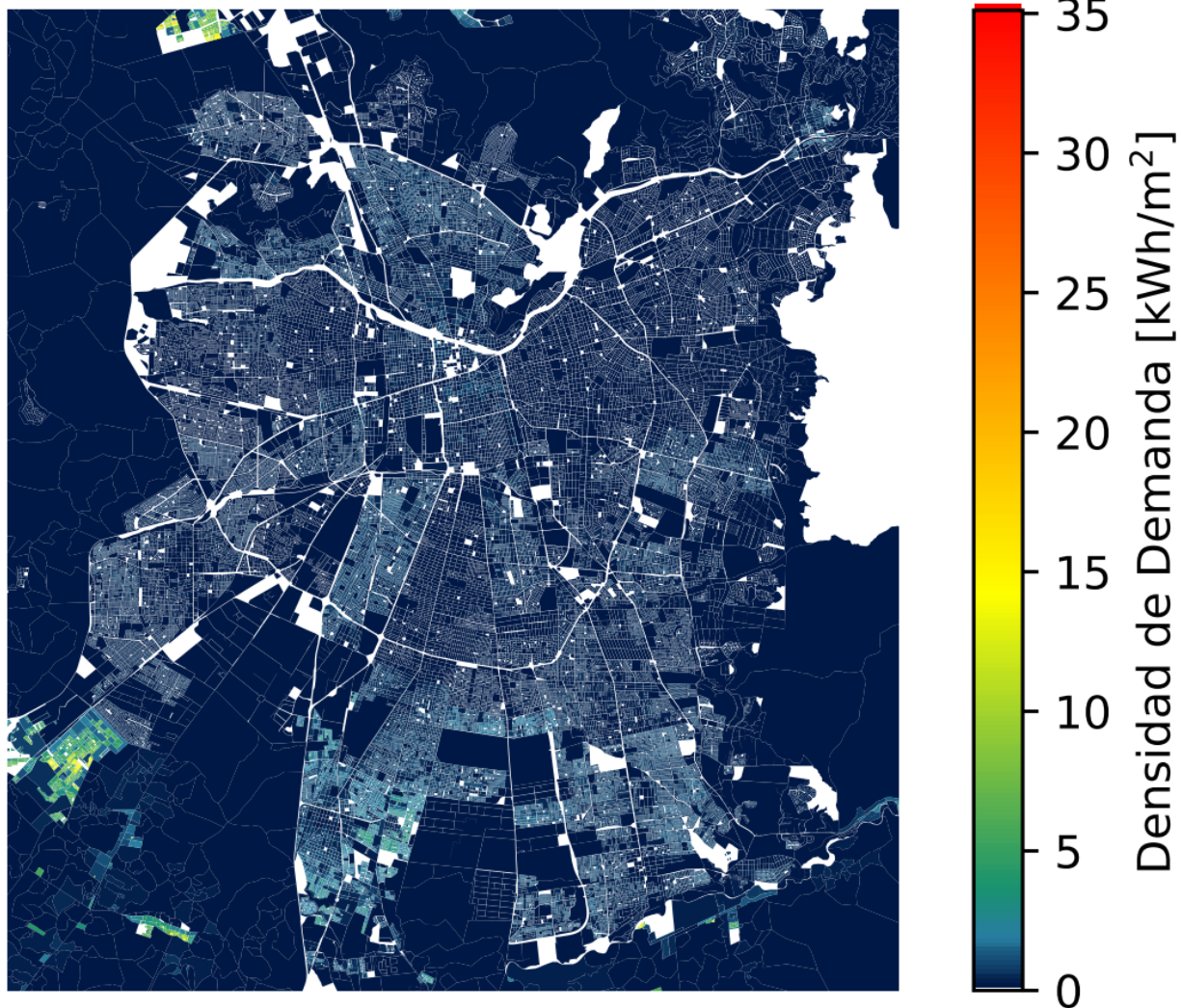


Figura 5.7: Distribución de la demanda de leña del sector residencial en 2017

Para mostrar esto, en la Figura 5.8 se muestra la distribución espacial de la demanda de leña del sector residencial, recortada para incluir la mayoría de las pequeñas ciudades y pueblos de la región. En esta Figura, se puede ver claramente que el uso de leña se concentra en estas zonas urbanas esparcidas a través de la Región Metropolitana.

Demanda de Leña Sector Residencial

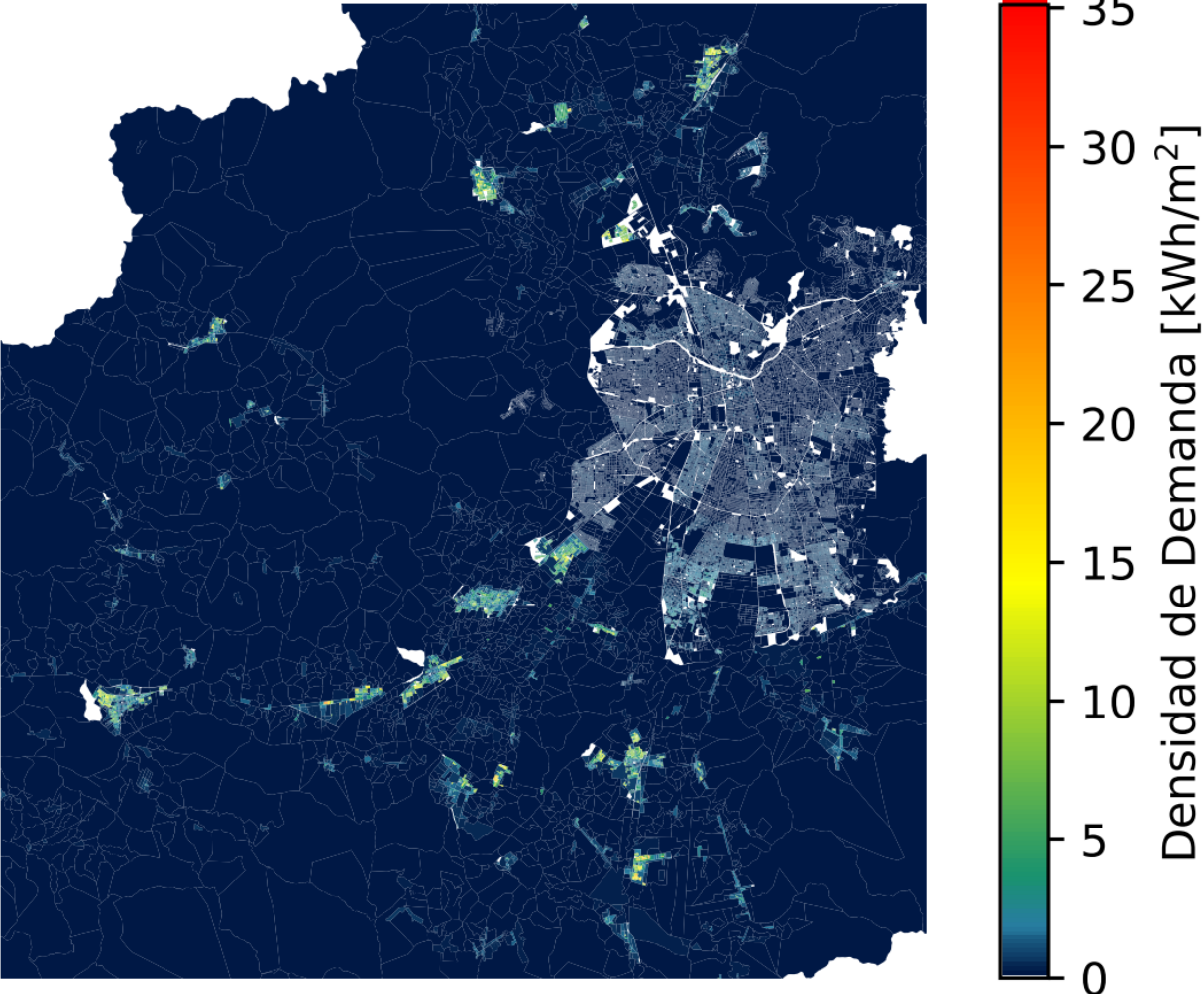


Figura 5.8: Distribución de la demanda de leña del sector residencial en 2017

5.1.2. Sector comercial

En la Figura 5.9 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía del sector comercial, recortada a la zona urbana de Santiago.

Demanda Total Sector Comercial

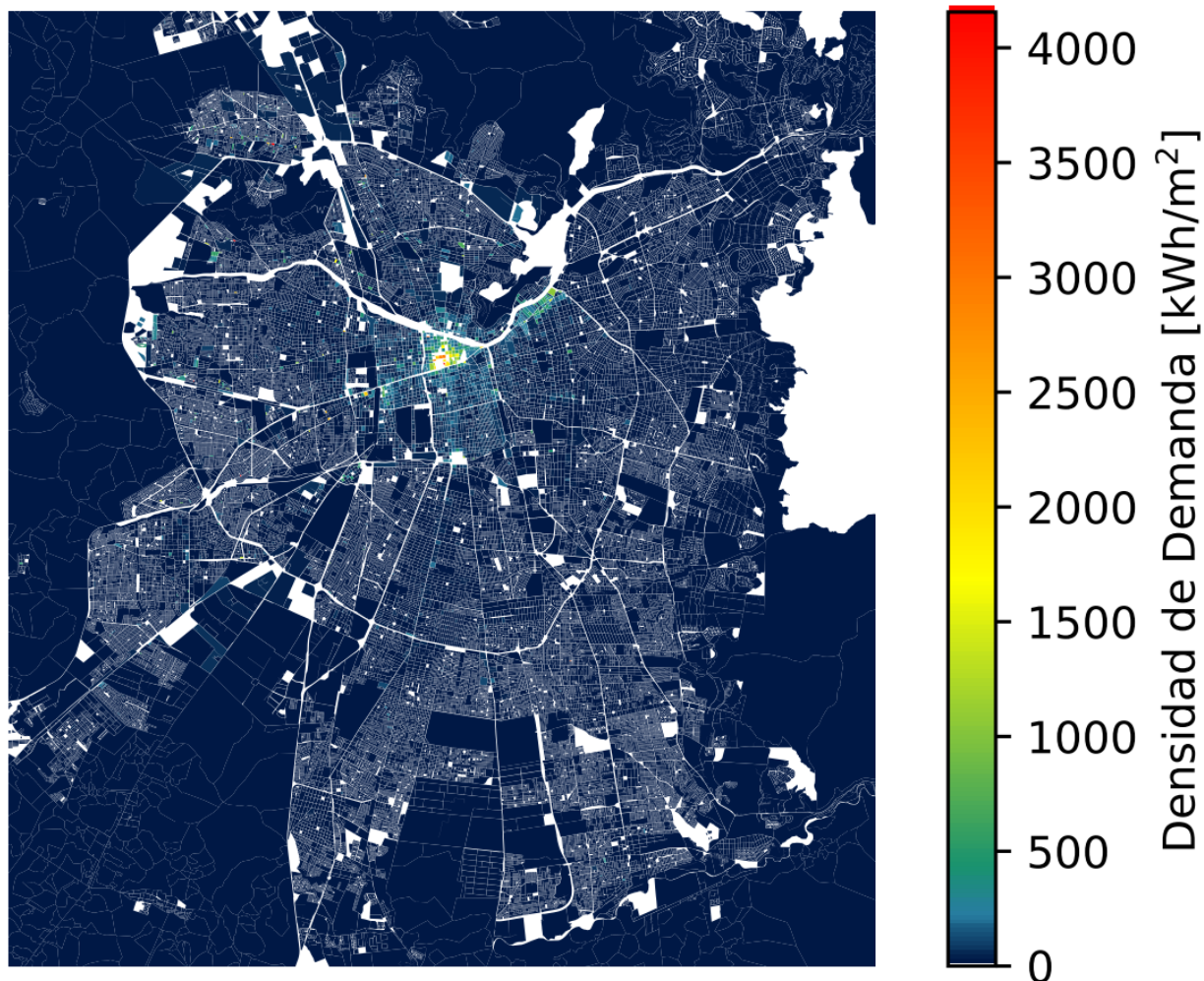


Figura 5.9: Distribución de la demanda del sector comercial en 2017

No se presenta la distribución espacial de la demanda de cada energético, pues es la misma que la de la demanda completa. Naturalmente, esta distribución es la misma que la distribución de la Figura 4.24, de la superficie construida de edificios del sector. Como se mencionó anteriormente, el consumo del sector comercial se concentra en zonas como Patronato, Santiago Centro y Barro Suecia, donde existe una gran cantidad de negocios. Sin embargo, es inusual que el consumo del sector comercial parezca tan bajo fuera de estos barrios, siendo casi nulo en el resto de las comunas de la ciudad. Debido a esto, la densidad de consumo (kWh por metro cuadrado) es mucho mayor que la del sector residencial, pues la demanda se distribuye en una superficie mucho menor. Con la información disponible es difícil determinar si la distribución espacial del sector comercial se caracterizó correctamente, pues se perdió mucha información al procesar la base de datos del Catastro de Bienes Raíces.

Al analizar el mapa de la Figura 5.9 y comparar con Google Maps, también se pueden reconocer grandes centros comerciales como el Mall Costanera Center, Mall Plaza Alameda, Mall Arauco Quilicura, Portal Lyon, algunas sucursales de Líder, Unimarc, Tottus, Sodimac y Homecenter, varios restaurantes, clínicas como VidaIntegra Maipú, Clínica Indisa, etc. Sin embargo, también se reconoce que hay muchas manzanas que aparecen con alta superficie del sector comercial, pero que en Google Maps no parecen tener ningún establecimiento importante de comercio. Por otro lado, también hay varios centros comerciales, que no aparecen en el mapa de la Figura 5.9, por ejemplo, el Mall Plaza Tobalaba o el Mall Plaza Los Dominicos. Esto último se puede deber a que no se logró encontrar la ubicación correspondiente a su dirección en el catastro, o a que se encontró en una ubicación incorrecta y terminó en otra manzana, o quizás simplemente no se encontraba en el catastro.

5.1.3. Sector industrial

En la Figura 5.10 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía del sector Industrial, recortada a la zona urbana de Santiago.

Demanda Total Sector Industrial

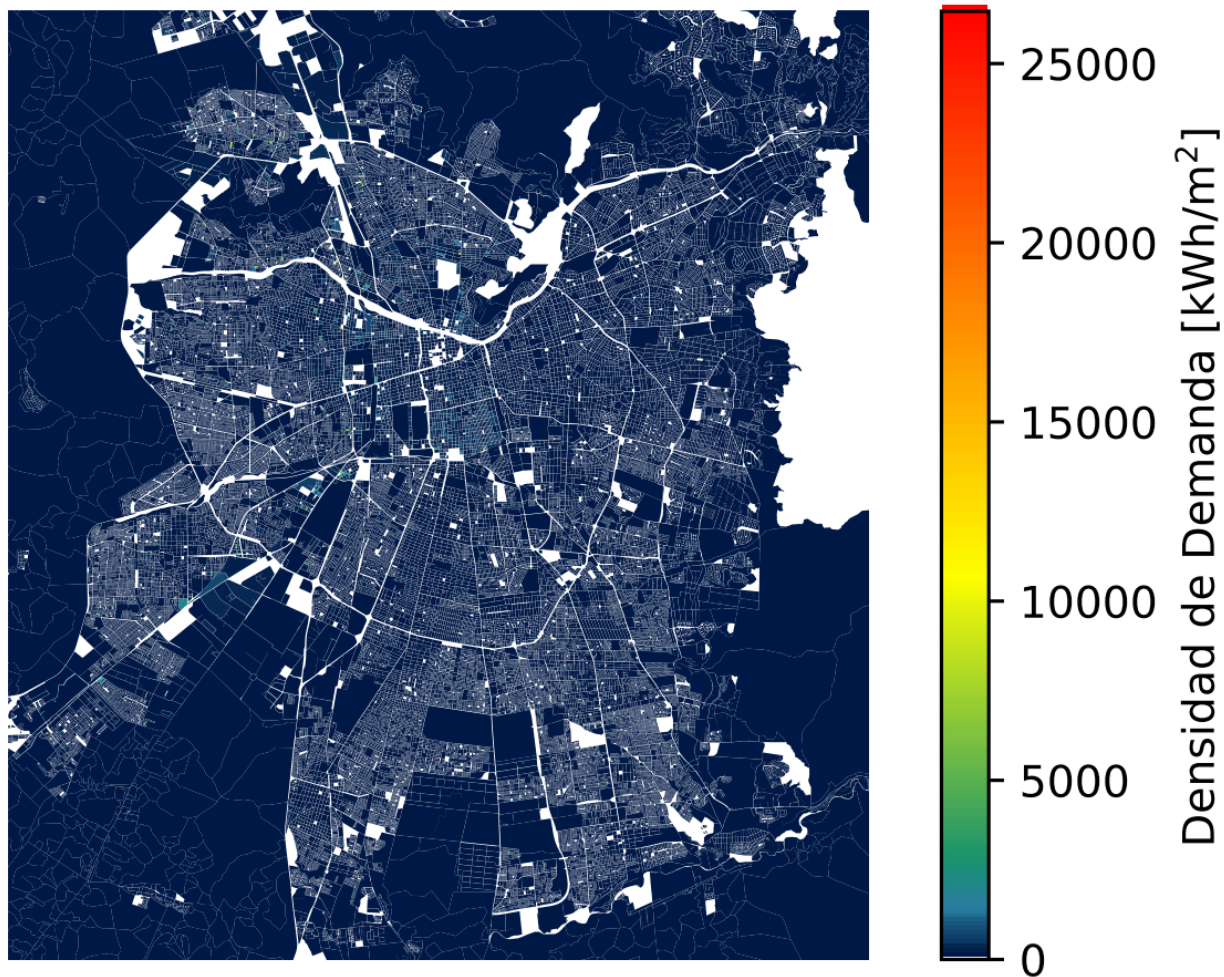


Figura 5.10: Distribución de la demanda del sector industrial en 2017

Nuevamente, la distribución del sector industrial es igual a la distribución de la Figura 4.29. A diferencia de los sectores residencial y comercial, el consumo del sector industrial se encuentra mucho más concentrado en manzanas individuales, en vez de estar repartido a través de toda la ciudad o en barrios. Esto también causa que la densidad de consumo sea mucho mayor, pues el consumo se distribuye en una superficie mucho menor. El sector industrial naturalmente se encuentra más concentrado, hay pocas industrias en comparación con la cantidad de viviendas y negocios, pero esta diferencia probablemente se empeoró durante el procesamiento de la base de datos del catastro, pues las direcciones relacionadas con el sector industrial resultaron ser las más difíciles de ubicar espacialmente. En muchos casos, en vez de incluir una dirección se incluía un nombre del predio, que la API es incapaz de reconocer, causando que muchas direcciones se tuvieran que descartar.

5.1.4. Sector público

En la Figura 5.11 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía del sector público, recortada a la zona urbana de Santiago.

Demanda Total Sector Publico

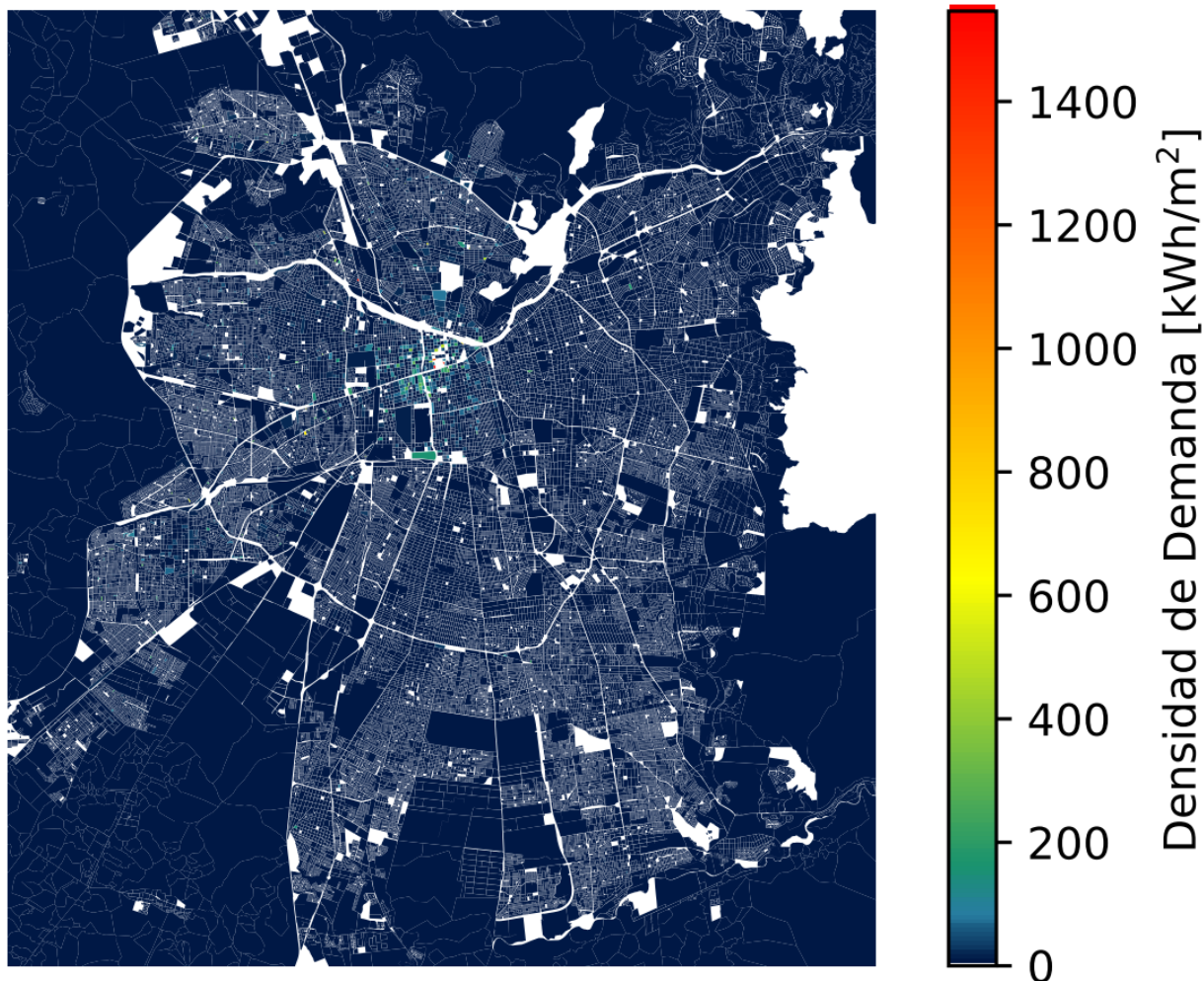


Figura 5.11: Distribución de la demanda del sector público en 2017

La superficie del sector público también tiene la misma distribución que la Figura 4.31. La mayoría del consumo se encuentra concentrado alrededor del Palacio de la Moneda, donde están ubicados todos los edificios administrativos y gubernamentales. También hay algunas manzanas aisladas, correspondientes a colegios, universidades e iglesias. El consumo del sector no es tan alto, por lo que la intensidad es moderada en comparación a los sectores comercial e industrial, a pesar de que su superficie es baja.

Además de los problemas reconocidos en el sector comercial e industrial debidos al procesamiento del Catastro de Bienes Raíces, una porción importante del consumo del sector público se debe a la iluminación pública, en forma de luminarias en las calles. Por la naturaleza del modelo desarrollado, basado en manzanas y edificios, es imposible incorporar este consumo y su distribución espacial. La distribución espacial de este consumo debería ser uniforme entre las calles de la ciudad, por lo que se podrían incorporar al modelo en función del perímetro de cada manzana.

Adicionalmente, dentro del sector público también se debería incorporar la parte pública del sector de Salud, como hospitales, sin embargo, la división del catastro no distinguía entre salud privada y pública y no se conoce su proporción, por lo que se escogió dejar toda la superficie de Salud como parte del sector comercial.

Otro problema relevante, especialmente al sector público, es que hay algunas manzanas de la ciudad que no están incluidas en el archivo de microdatos del Censo 2017, probablemente porque no existen viviendas ni habitantes. En particular, esto ocurre con el Palacio de la Moneda y varias manzanas a su alrededor. La superficie de cada predio se asignó a la manzana más cercana a su ubicación, por lo que el consumo de las manzanas faltantes se sumaría al consumo de las manzanas a su alrededor que si se incluyan en el archivo del censo. Esto puede causar inusuales picos de demanda en estas manzanas, lo cual ocurre en los tres sectores, pero es particularmente notable en el sector público.

5.1.5. Región Metropolitana

En la Tabla 5.2 se muestra la demanda de la Región Metropolitana, dividida por energético y por sector. La demanda estimada corresponde a la sumatoria de las demandas a nivel de manzana.

Tabla 5.2: Estimación de la demanda de la Región Metropolitana en el año 2017 utilizando modelo desarrollado

Energético	Residencial [GWh]	Comercial [GWh]	Industrial [GWh]	Público [GWh]	Total [GWh]
Electricidad	5.932	5.141	8.519	1.072	20.666
Gas licuado	5.480	744	2.494	98	8.719
Kerosene	886	0	0	0	866
Gas natural	3.405	766	5.528	130	9.831
Leña	826	0	0	0	826
Petróleo diésel	0	2.338	3.022	32	5.361
Coque	0	0	729	0	729
Carbón	0	0	220	0	220
Total	16.532	8.990	20.514	1.334	47.241

Para comparar los resultados obtenidos con la demanda reportada en el Balance Regional de Energía, en la Tabla 5.3 se muestra el error relativo entre los resultados obtenidos y la demanda real del año base. Se observa que el modelo logra replicar la demanda agregada del año base con alta precisión, para todos los energéticos de cada sector. Esto muestra que se logró calibrar efectivamente el modelo y se obtuvo una estimación de la distribución espacial de la demanda energética sin perder la capacidad de estimar el consumo total.

Tabla 5.3: Error relativo demanda Región Metropolitana 2017

Energético	Residencial	Comercial	Industrial	Público	Total
Electricidad	-0,13 %	-0,01 %	-0,07 %	0,00 %	-0,07 %
Gas licuado	0,71 %	-0,01 %	-0,09 %	0,00 %	1,52 %
Kerosene	0,00 %	-	-	-	2,38 %
Gas natural	1,54 %	0,02 %	-0,07 %	0,00 %	0,50 %
Leña	-0,08 %	-	-	-	4,39 %
Petróleo diésel	-	0,01 %	-0,07 %	0,03 %	0,56 %
Carbón	-	-	-0,07 %	-	-0,07 %
Coque	-	-	-2,41 %	-	-2,41 %
Total	0,56 %	0,71 %	0,00 %	0,08 %	0,61 %

En la Figura 5.12 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía en la zona urbana de Santiago, incluyendo los sectores residencial, comercial, industrial y público. Como se mencionó anteriormente, el consumo del sector industrial se encuentra concentrado en muy pocas manzanas en comparación al resto de los sectores, lo que resulta en una demanda por metro cuadrado tan alta que no se logra apreciar la distribución espacial de la demanda del resto de los sectores, al menos con un mapa de colores a escala lineal.

Demanda Total Región Metropolitana

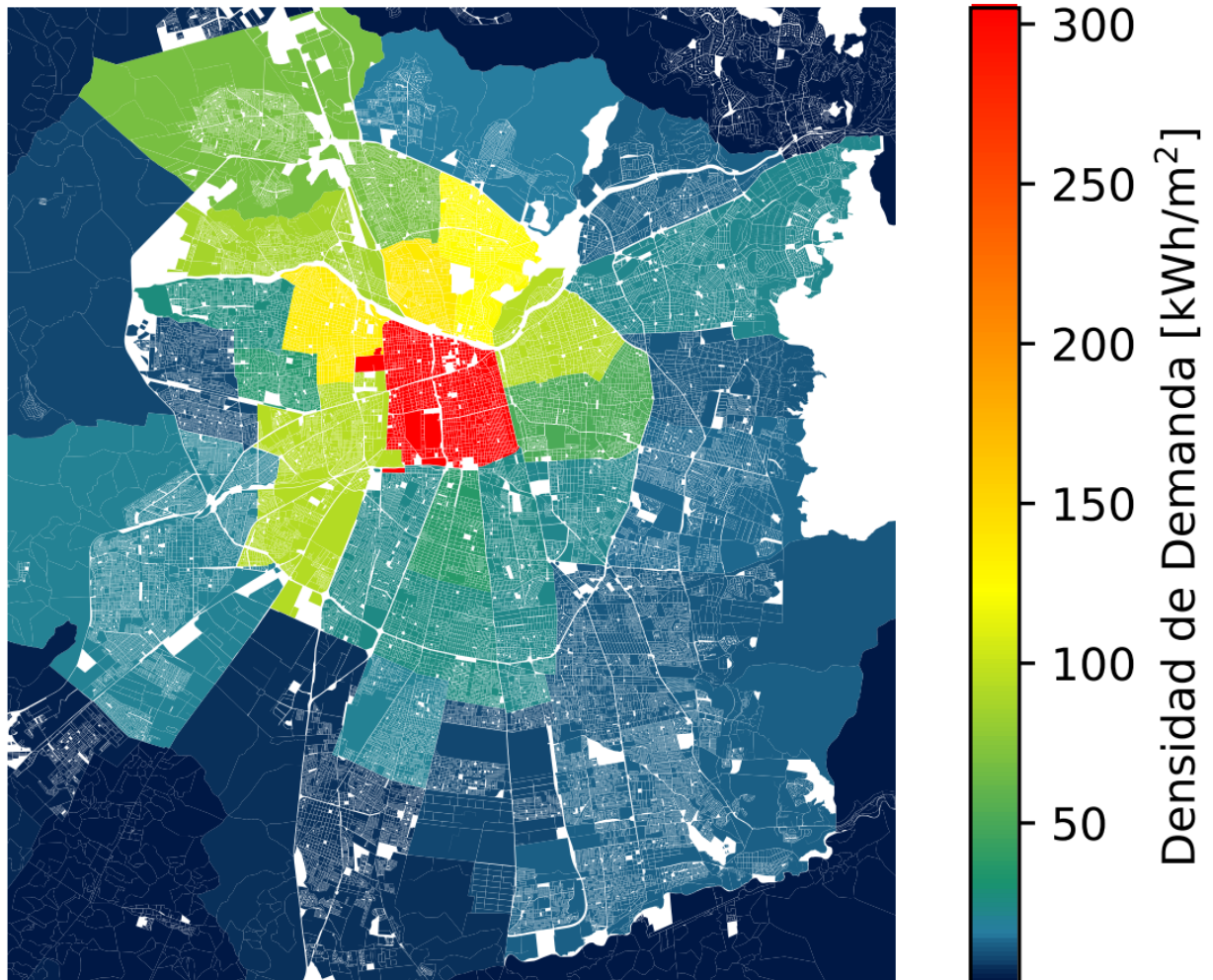


Figura 5.12: Distribución de la demanda de la Región Metropolitana en 2017

Se observa que la demanda se concentra principalmente en las comunas de Santiago, Recoleta, Independencia y Quinta Normal. Al considerar la demanda por comuna, la distribución espacial de la demanda se encuentra más influenciada por el sector industrial, que es el de mayor consumo total y también el que se encuentra concentrado en un menor número de comunas. El sector residencial es el de segundo mayor consumo total, pero se encuentra mucho mejor repartido entre las comunas. Los sectores comercial y público tienen un menor consumo, por lo que no influyen tanto la distribución de la demanda total.

Por completitud, en la Figura 5.13 se muestra la demanda de energía por comuna en toda la Región Metropolitana, donde se puede observar que la demanda se concentra principalmente en las comunas de la ciudad de Santiago, mientras que las comunas rurales son casi despreciables en comparación. Esto se debe a que tienen una densidad de habitantes y viviendas muy bajas, con poca población distribuida en una superficie muy grande.

Demanda Total Región Metropolitana

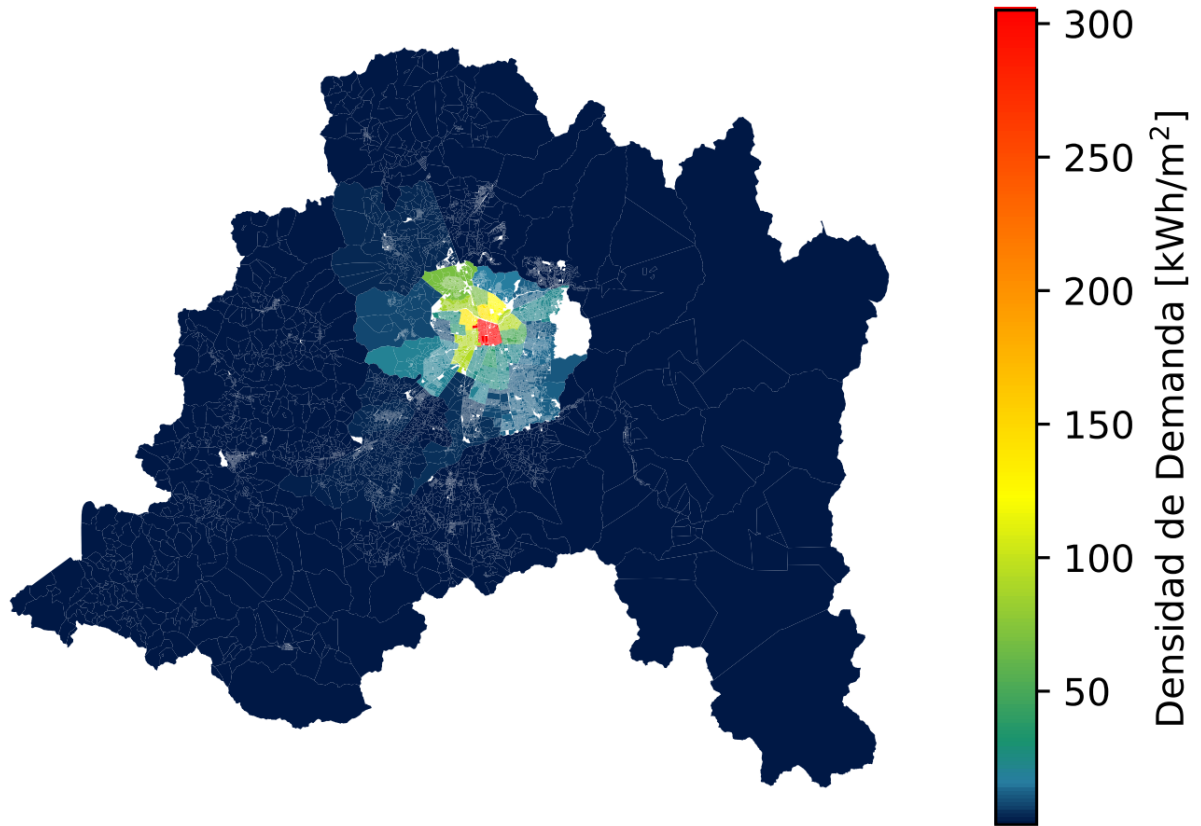


Figura 5.13: Distribución de la demanda de la Región Metropolitana en 2017

5.2. Comparación con Balance Regional de Energía 2020

Para evaluar el desempeño del modelo, en la Tabla 5.4 se muestra la demanda de energía de la Región Metropolitana durante el año 2020, en el cual se publicó el último Balance Regional de Energía disponible a la fecha de elaboración de esta memoria.

Tabla 5.4: Balance Regional de Energía para la Región Metropolitana 2020

Energético	Residencial [GWh]	Comercial [GWh]	Industrial [GWh]	Público [GWh]	Total [GWh]
Electricidad	7.574	5.202	7.804	963	21.544
Gas licuado	5.579	667	1.534	67	7.847
Kerosene	767	9	16	0	792
Gas natural	3.367	501	5.548	96	9.512
Leña	848	25	385	12	1.270
Biogás	9	24	5	0	38
Petróleo diésel	0	815	1.422	140	2.377
Coque	0	0	546	0	546
Carbón	0	0	81	0	81
Total	18.145	7.243	17.341	1.278	44.007

En la Tabla 5.5 se muestra la demanda de la Región Metropolitana proyectada para el año 2020. Al comparar ambas tablas, se observa que la demanda real de los sectores industrial y comercial es considerablemente menor que la proyectada, mientras que la demanda del sector residencial es un poco menor. Se espera que la demanda energética sea estrictamente creciente en el tiempo, pero al comparar la demanda del año 2020 con la demanda del año 2017 en la Tabla 2.1, se puede observar que la demanda energética real del año 2020 es menor que la del año 2017, lo cual se puede atribuir a la pandemia de COVID-19. Esto explica las diferencias entre los valores reales y proyectados, pero también ilustra una de las limitaciones del modelo. Debido a la dependencia en el censo como fuente de información, el modelo se ajustó para reproducir únicamente la demanda energética del año 2017, en el cual se publicó el último censo. Sin embargo, el año 2017 no necesariamente es representativo del comportamiento de la demanda energética en la Región Metropolitana, en cambio, idealmente el modelo se ajustaría utilizando varios años en los que se conozca la demanda de energía y la información de entrada necesaria, minimizando la suma del error de la demanda proyectada.

Tabla 5.5: Estimación de la demanda de la Región Metropolitana en el año 2020 utilizando modelo desarrollado

Energético	Residencial [GWh]	Comercial [GWh]	Industrial [GWh]	Público [GWh]	Total [GWh]
Electricidad	7.062	6.011	8.494	1.175	22.742
Gas licuado	6.017	869	2.487	107	9.480
Kerosene	1.212	0	0	0	1.212
Gas natural	4.542	895	5.512	143	11.092
Leña	888	0	0	0	888
Petróleo diésel	0	2.734	3.013	35	5.782
Coque	0	0	726	0	726
Carbón	0	0	219	0	219
Total	19.721	10.509	20.451	1.460	52.141

5.3. Proyección de la demanda energética de la Región Metropolitana

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de la magnitud y distribución espacial de la demanda en la Región Metropolitana para el año objetivo 2042.

5.3.1. Sector residencial

En la Tabla 5.6 se muestra la demanda del sector Residencial por energético y uso final, agregada para toda la Región Metropolitana. La demanda corresponde a la suma de las demandas energéticas por manzana.

Tabla 5.6: Proyección de la demanda del sector residencial en el año 2042 utilizando el modelo desarrollado

Energético	Cocción [GWh]	Calefacción [GWh]	Agua Caliente [GWh]	Artefactos [GWh]	Total [GWh]
Electricidad	596	3.332	1.573	8.566	14.069
Gas licuado	847	5.468	1.880	0	8.196
Kerosene	0	3.934	0	0	3.934
Gas natural	1.597	2.769	6.542	0	10.909
Leña	0	1.214	12	0	1.227
Total	3.042	16.720	10.008	8.566	38.337

Al comparar con la demanda proyectada por el Modelo PELP de la Tabla 3.1, se observa que la mayoría de los energéticos se encuentran en un rango cercano. La única excepción es el gas natural, cuyo consumo es un 65% mayor que el proyectado por el Modelo PELP, lo cual también causa que el consumo total sea un poco mayor.

Esto se debe a que la intensidad en ambos modelos se calculó utilizando distintos porcentajes de participación del combustible. En el Modelo PELP los porcentajes de utilización se determinaron por medio de criterio experto y son mayores a los resultados de la Encuesta Casen 2017. Al considerar un mayor porcentaje de utilización, la intensidad disminuye, ya que el consumo se divide entre más usuarios. Por lo tanto, las intensidades de consumo de gas natural obtenidas en este modelo son mayores a las del Modelo PELP. Y como se considera que el porcentaje de utilización de gas natural aumenta para todos los usos finales, esta diferencia se magnifica en el consumo del año objetivo.

En la Figura 5.14 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía del sector residencial, para toda la Región Metropolitana. Como se mencionó anteriormente, el tamaño de las manzanas es muy pequeño en comparación al resto de la región y no se alcanzan a apreciar en este formato.

Demanda Total Sector Residencial

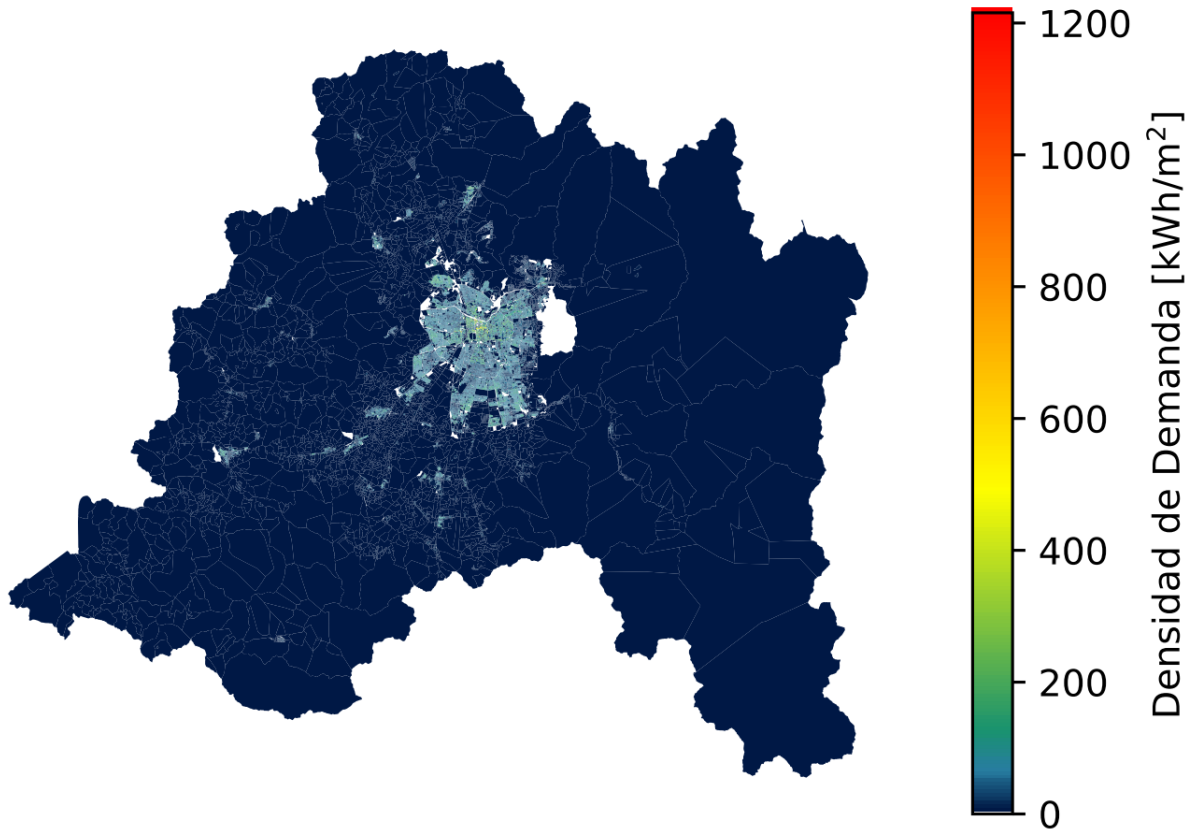


Figura 5.14: Distribución de la demanda del sector residencial el 2042

En la Figura 5.15 se muestra la distribución espacial de la demanda completa del sector residencial, recortada a la zona urbana de Santiago. Como es de esperar, la distribución espacial de la demanda del sector residencial es muy parecida a la proyección de la distribución espacial de viviendas de la Figura 4.13.

En comparación a la distribución del año base en la Figura 5.2, se observa que la demanda de energía está distribuida más uniformemente. La mayor demanda aún se encuentra en el Santiago centro, pero ya no existe una diferencia considerable entre el sector oriente y el resto de la ciudad. También se observa que la la demanda por metro cuadrado aumentó en toda la ciudad, debido al aumento en la cantidad de habitantes y viviendas, así como al aumento en la intensidad de consumo por calefacción y uso de artefactos eléctricos.

Demanda Total Sector Residencial

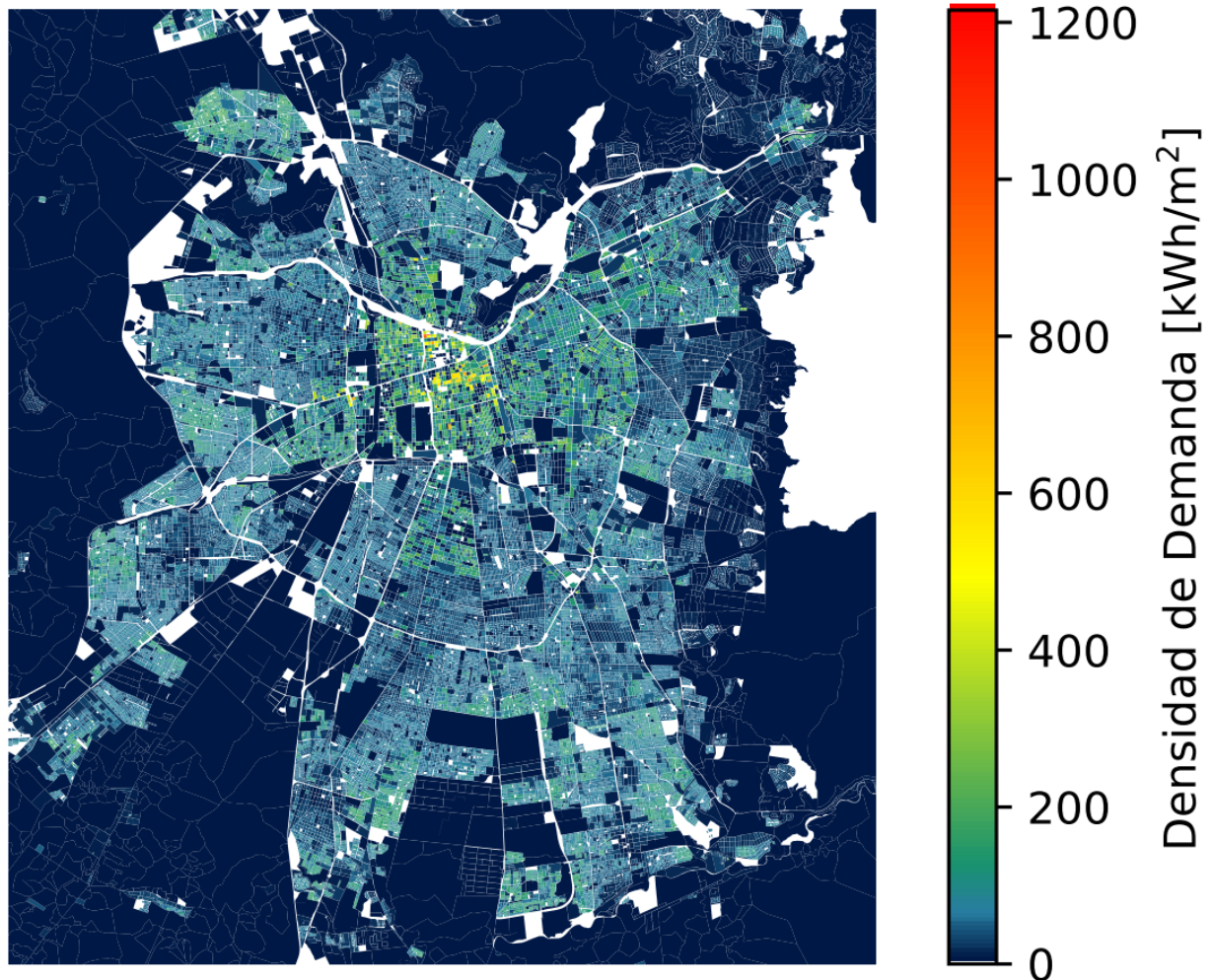


Figura 5.15: Distribución de la demanda del sector residencial el 2042

En la Figura 5.16 se muestra la distribución espacial de la demanda de electricidad del sector residencial. Nuevamente, se observa que las zonas con mayor demanda de electricidad son aquellas con mayor concentración de viviendas.

En comparación a la distribución del año base de la Figura 5.3, también se observa que la densidad de demanda está mejor distribuida y aumentó en toda la ciudad.

Demanda de Electricidad Sector Residencial

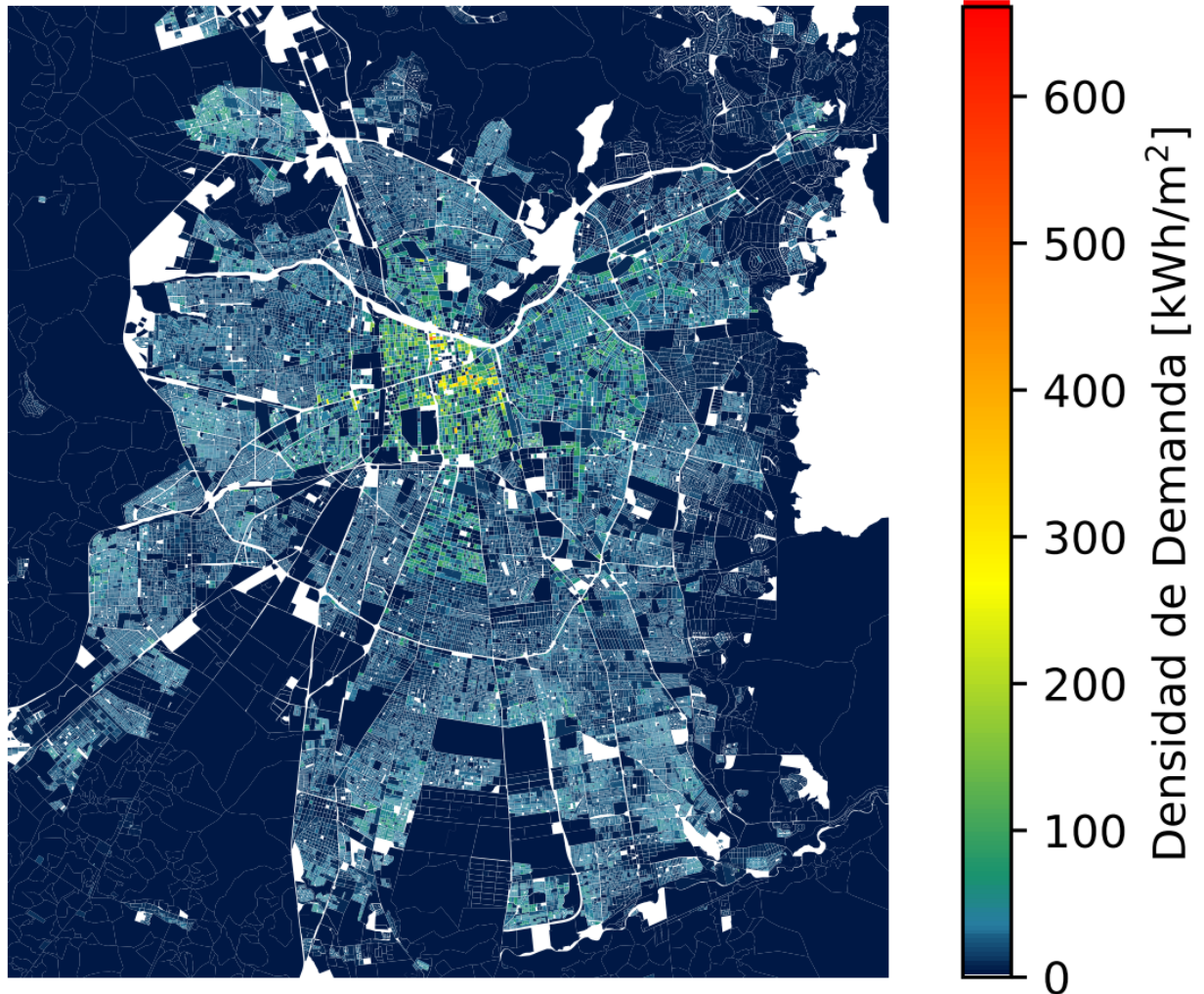


Figura 5.16: Distribución de la demanda eléctrica del sector residencial en 2042

En la Figura 5.17 se muestra la distribución espacial de la demanda de gas natural del sector residencial. En la distribución del año base de la Figura 5.4, el consumo de gas natural se encontraba concentrado casi exclusivamente en Santiago Centro y en el sector oriente. Por otro lado, en la distribución proyectada se observa que el consumo de gas natural se expandió al resto de la ciudad.

Demanda de Gas Natural Sector Residencial

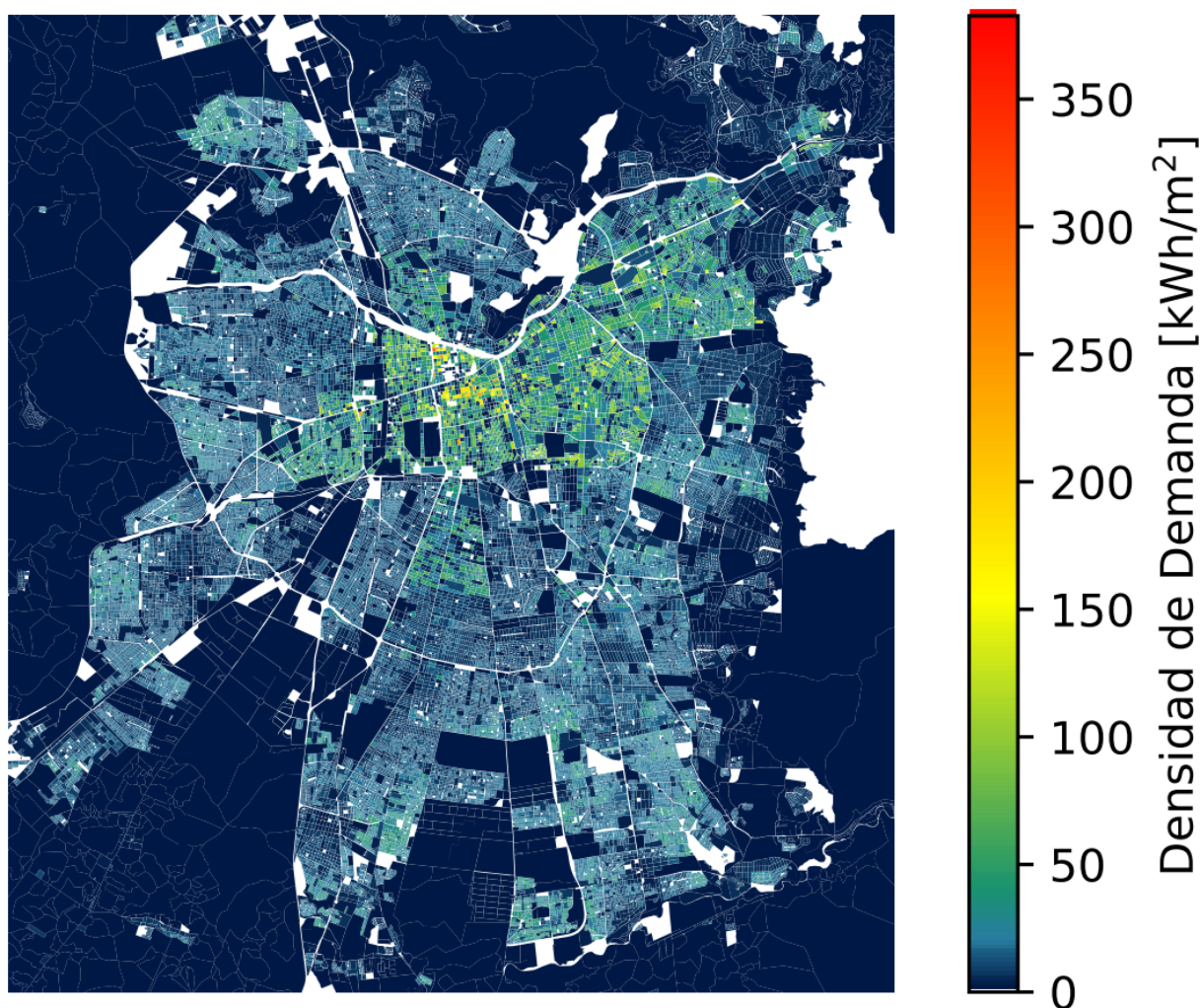


Figura 5.17: Distribución de la demanda de gas natural del sector residencial en 2042

Según la proyección de uso de combustibles en la Región Metropolitana, el uso de gas licuado de petróleo, kerosene y leña se reemplaza por gas natural y electricidad. La proyección de población y vivienda en las comunas que utilizan gas natural en el año base es menor que la cantidad proyectada de usuarios de gas natural, por lo que es necesario que el uso de este combustible se expanda a otras comunas.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la utilización de gas natural está limitado por la infraestructura necesaria para su transporte. Para llegar a la distribución espacial de consumo de gas natural proyectada por este modelo, se tendría que expandir considerablemente la red de ductos y cañerías para transporte de gas natural en la ciudad.

En la Figura 5.18 se muestra la distribución espacial de la demanda de gas licuado. Se observa que su distribución espacial sigue siendo complementaria a la distribución de gas natural.

A diferencia de los energéticos presentados anteriormente, se observa que la máxima demanda de gas licuado por metro cuadrado disminuye en comparación al año base en la Figura 5.5. Esto ocurre porque, en todos los usos finales del sector residencial, se proyecta que el porcentaje de utilización de gas licuado disminuye en la región, siendo reemplazado por electricidad y gas natural.

Demanda de Gas Licuado Sector Residencial

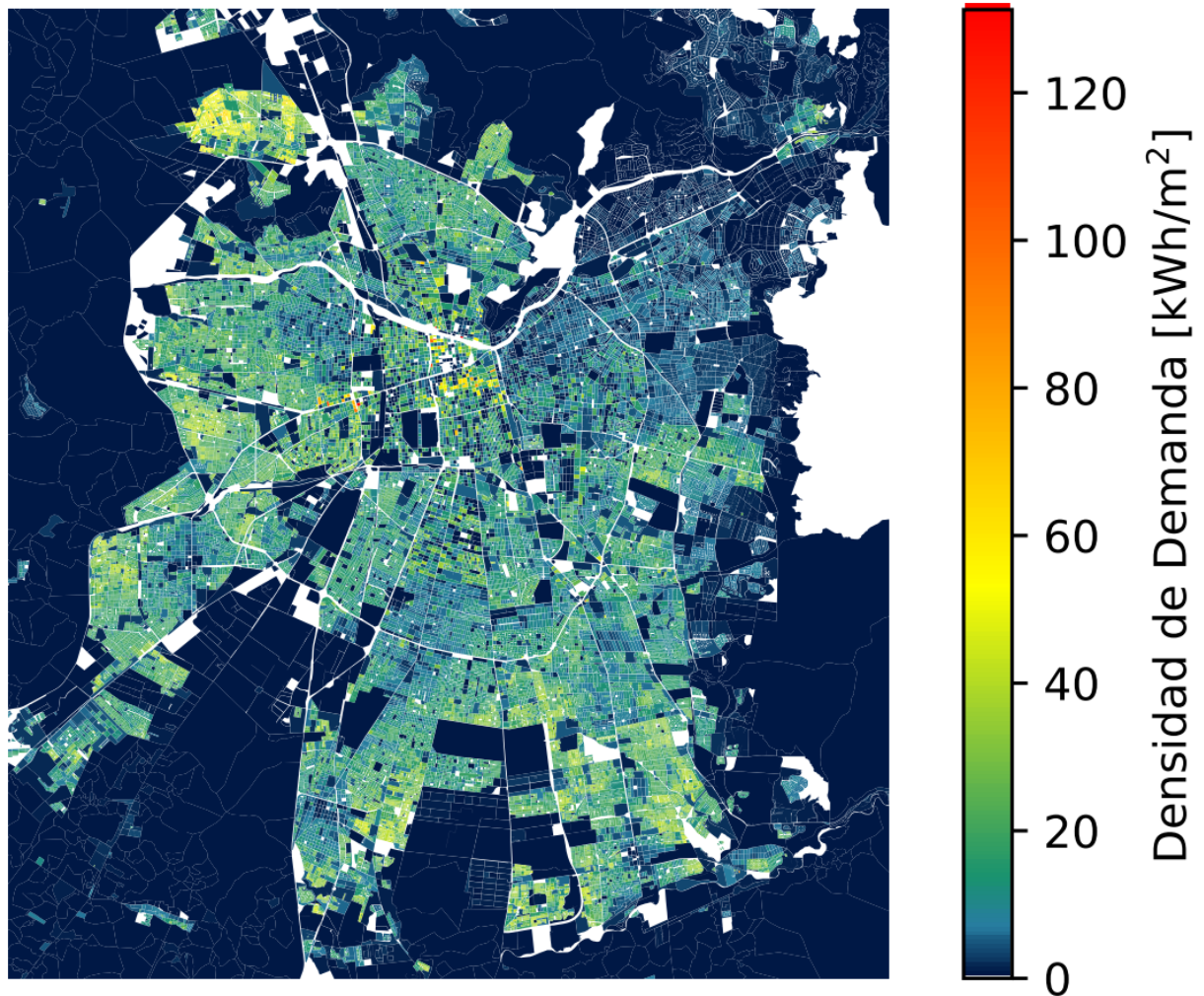


Figura 5.18: Distribución de la demanda de gas licuado del sector residencial en 2042

En la Figura 5.19 se muestra la distribución espacial de la demanda de kerosene. En comparación a la distribución del año base de la Figura 5.6, se observa que el uso de kerosene aumenta uniformemente a través de la ciudad.

A pesar de que se proyecta que el porcentaje de utilización de kerosene disminuye en toda la región, su consumo aumenta debido al aumento de habitantes y viviendas y debido al aumento en la intensidad de consumo por calefacción, que es el único uso final para el cual se utiliza kerosene.

Demanda de Kerosene Sector Residencial

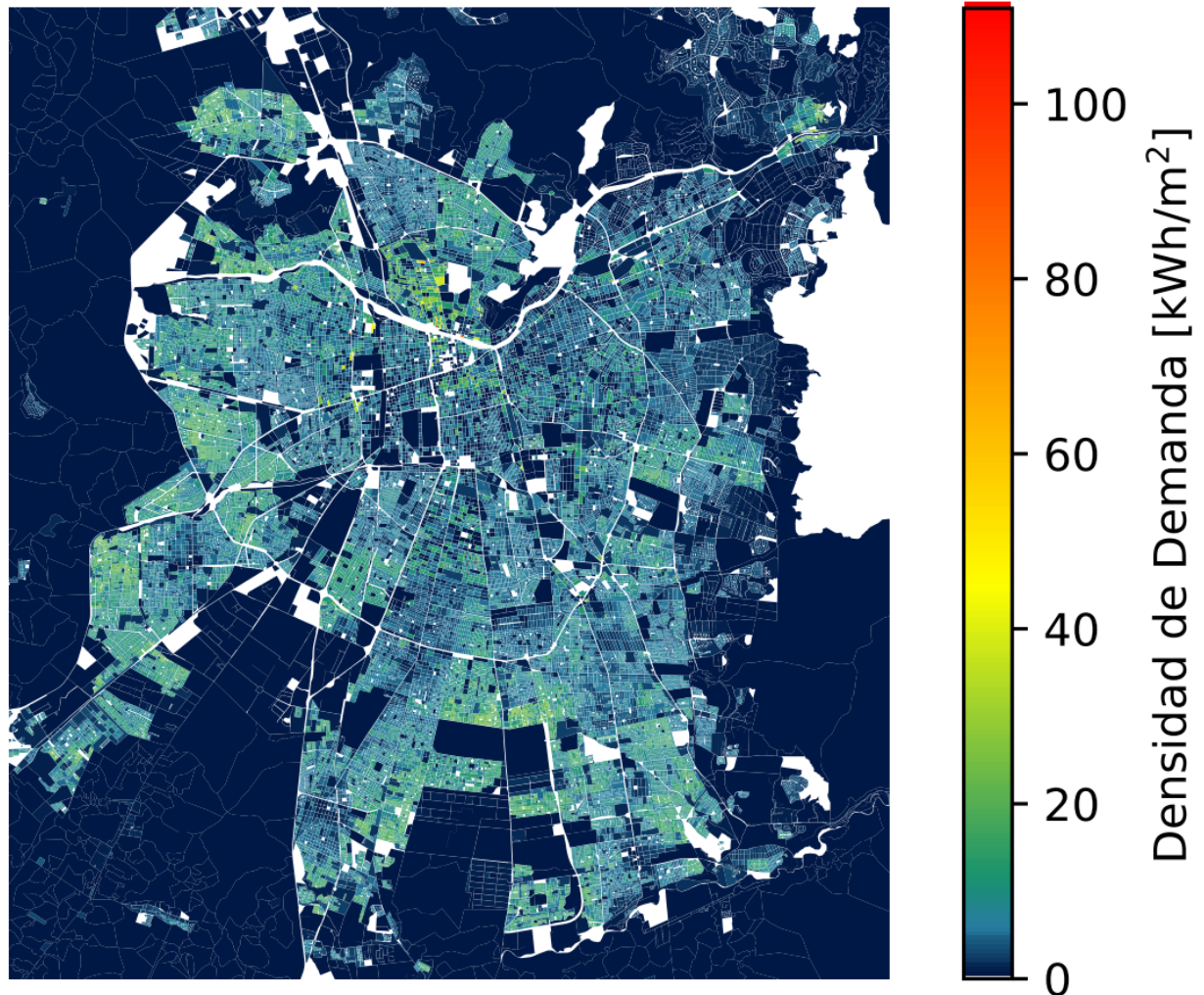


Figura 5.19: Distribución de la demanda de kerosene del sector residencial en 2042

En la Figura 5.20 se muestra la distribución espacial de la demanda de leña. En comparación al año base en la Figura 5.7, la distribución espacial es prácticamente la misma y la demanda por metro cuadrado es mayor.

En todos los usos finales, a excepción de calefacción en casas, se proyecta que se deja de utilizar leña como combustible para el año 2042. A pesar de esto, el consumo igual aumenta, debido al aumento en población y viviendas y en la intensidad de calefacción, al igual que el consumo de kerosene.

Demanda de Leña Sector Residencial

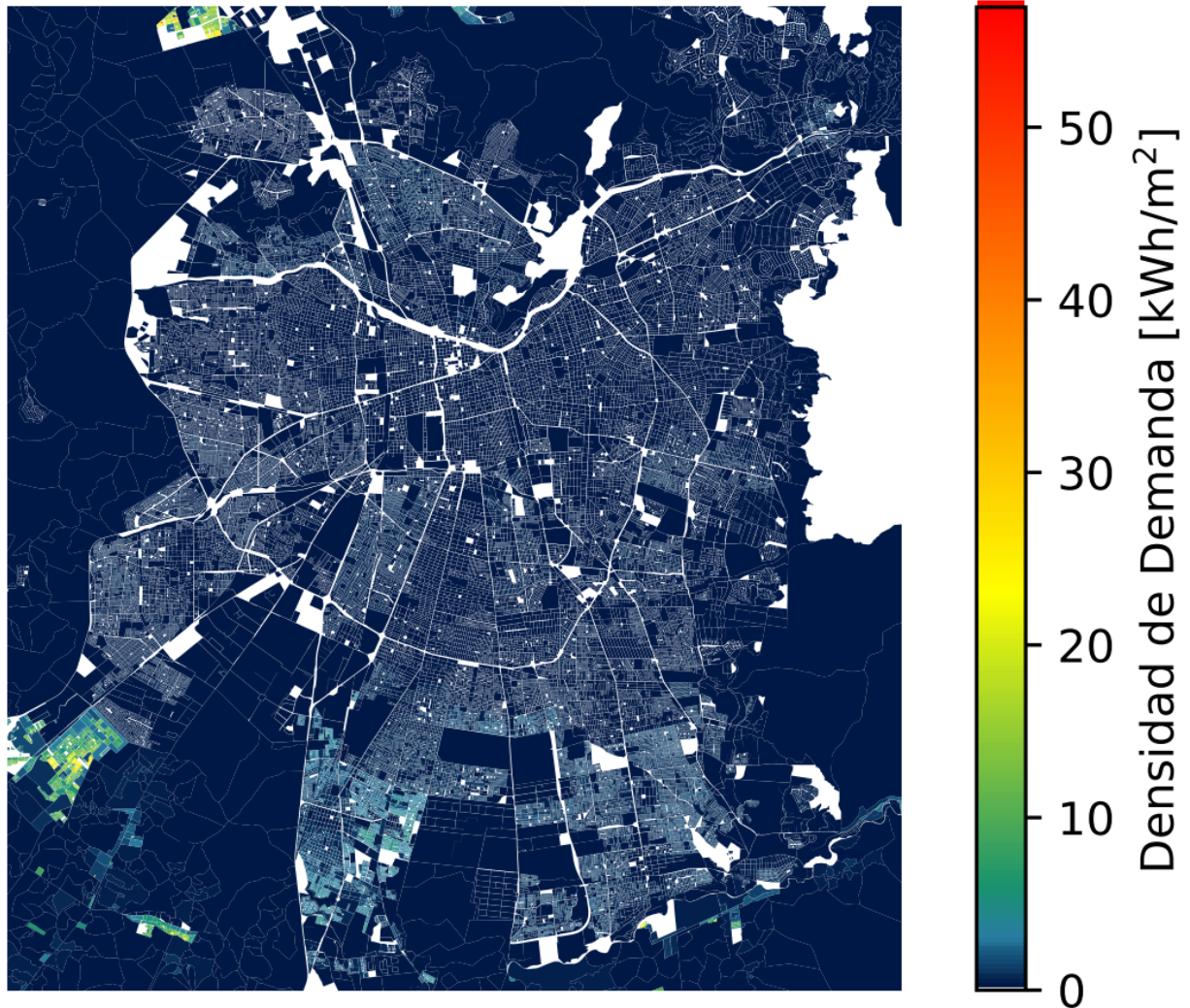


Figura 5.20: Distribución de la demanda de leña del sector residencial en 2042

En la Figura 5.21 se muestra la distribución espacial de la demanda de leña del sector residencial, recortada para incluir la mayoría de las pequeñas ciudades y pueblos de la región.

Nuevamente, se observa que la distribución espacial es igual a la del año base, concentrada en las pequeñas zonas urbanas alrededor de Santiago.

Demanda de Leña Sector Residencial

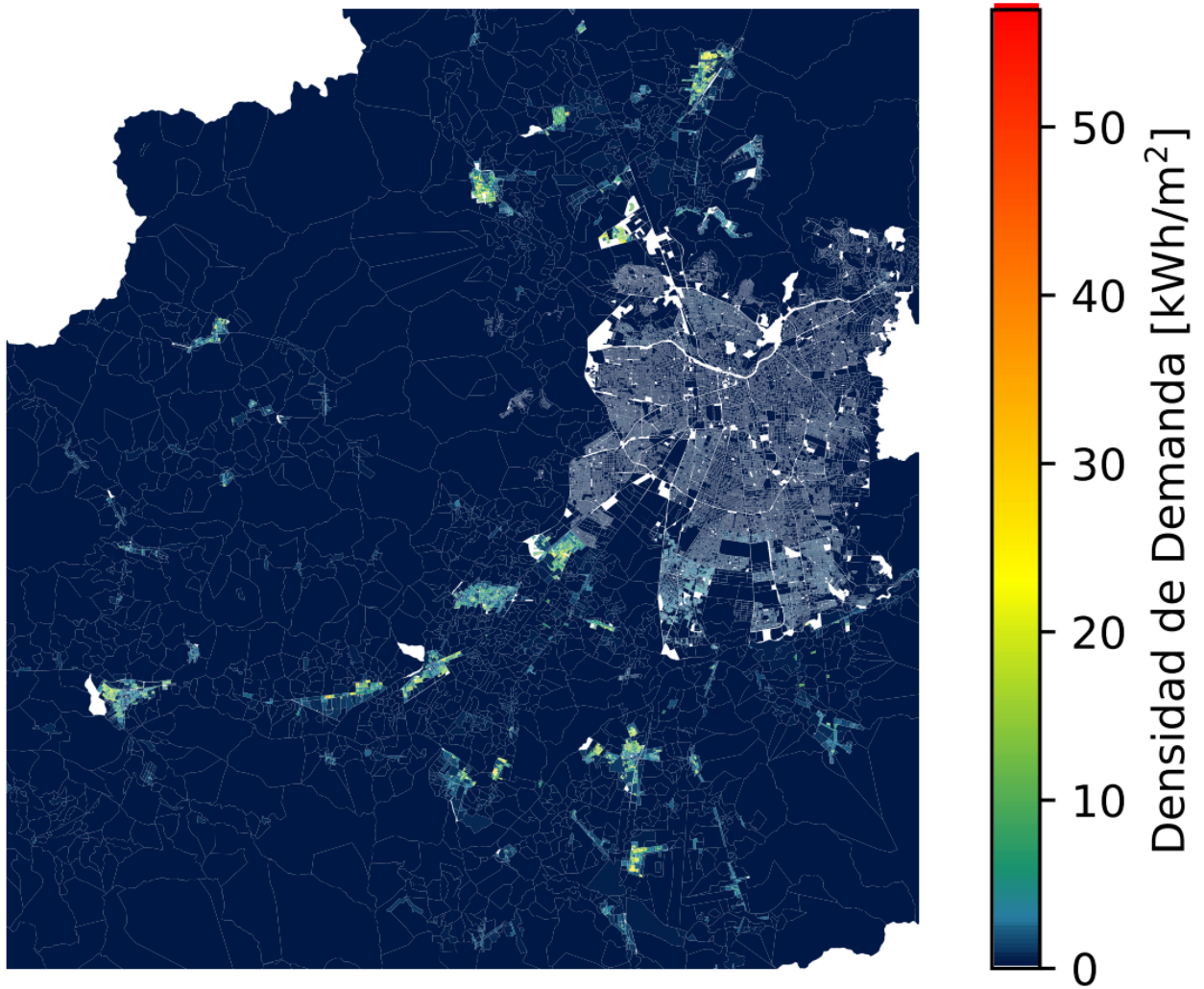


Figura 5.21: Distribución de la demanda de leña del sector residencial en 2042

5.3.2. Sector comercial

En la Figura 5.22 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía del sector comercial, recortada a la zona urbana de Santiago.

Demanda Total Sector Comercial

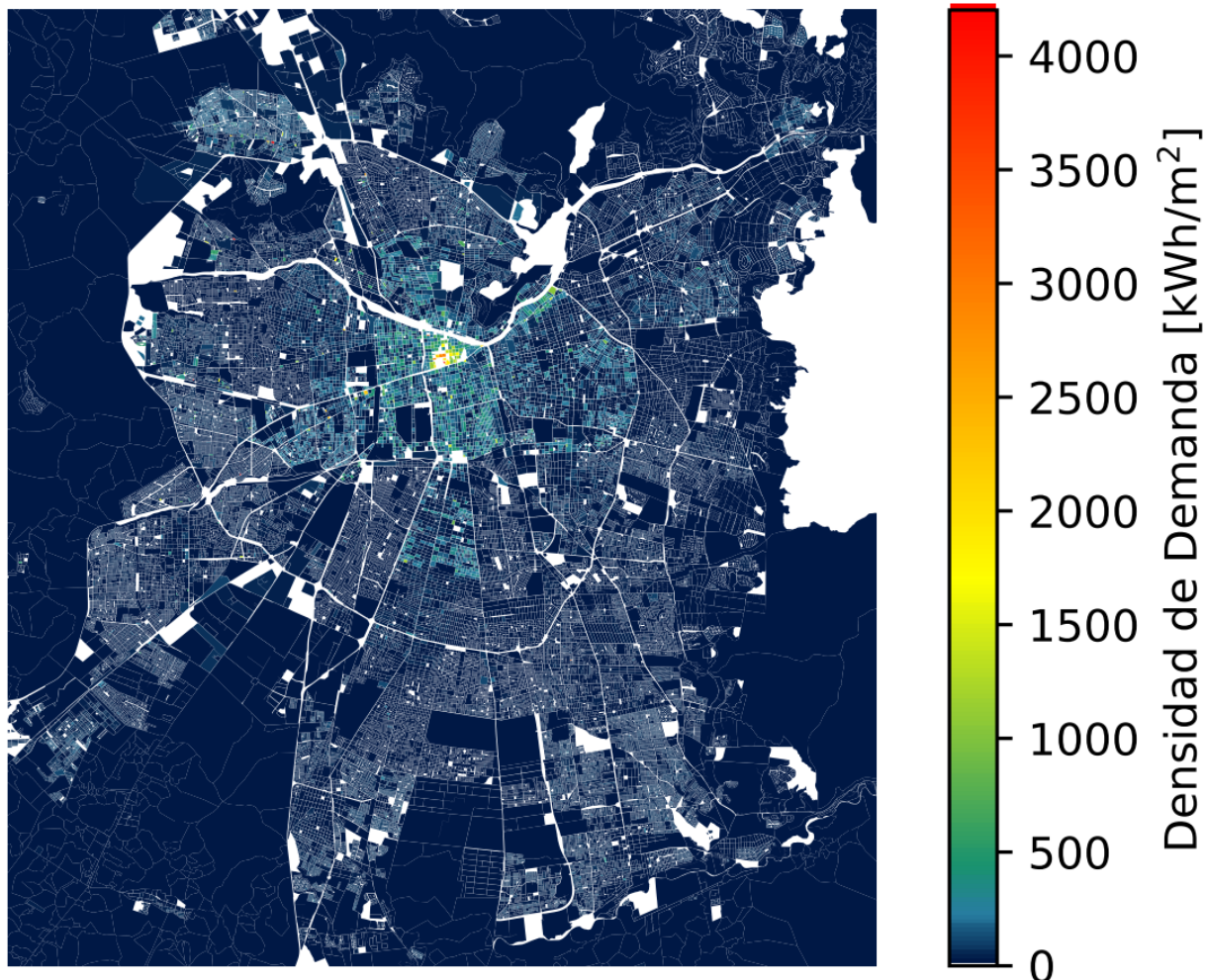


Figura 5.22: Distribución de la demanda del sector comercial en 2042

Naturalmente, esta distribución es la misma que la de la Figura 4.28, la proyección de la superficie construida de edificios del sector. A diferencia del consumo del año base en la Figura 5.9, la distribución proyectada está mejor repartida, pues el comercio se expandió fuera de los sectores mencionados anteriormente, siguiendo el crecimiento del sector residencial. Debido a esta expansión, la máxima demanda por metro cuadrado es menor que en el año base, a pesar de que el consumo agregado a través de toda la Región es 3 veces mayor.

De acuerdo a la proyección de población y vivienda del Centro de Energía, hay 4 comunas en las que se proyecta que disminuirá la cantidad de habitantes y viviendas entre el año base 2017 y el año objetivo 2042. De acuerdo a la metodología propuesta, en estas manzanas debería disminuir la superficie construida del sector comercial. Se escogió mantener la superficie

del sector comercial en estas manzanas, para evitar demandas negativas, pero esta situación presenta un interesante dilema: ¿Qué debería ocurrir con la superficie del sector comercial en zonas donde disminuya la población? Es posible que los habitantes restantes mejoren su situación socioeconómica, causando el crecimiento del sector comercial, a pesar de que la cantidad de habitantes disminuyera. Si es que se conociera el Producto Interno Bruto con una mayor resolución espacial, por ejemplo, por comuna, se podría aplicar la metodología propuesta para proyectar la superficie de cada comuna en vez de toda la región.

Al observar la superficie proyectada para el sector comercial en la Figura 4.27, se nota que la cantidad de metros cuadrados se triplica entre 2017 y 2042, lo que corresponde a un aumento de 3 a 5 millones de metros cuadrados al año. La demanda total resultante es consistente con la demanda proyectada por el Modelo PELP, pero es posible que no exista suficiente espacio en la ciudad para ubicar tantas construcciones del sector comercial. En comparación, según el Informe Anual de Edificación del Instituto Nacional de Estadísticas, entre 2012 y 2016 se autorizaron en promedio 5 millones de metros cuadrados en superficie de edificación de industria, comercio y establecimientos financieros [25]. Este valor está en el mismo orden de magnitud, pero no se puede aislar el sector comercial y es difícil distinguir si el término “superficie de edificación” significa lo mismo que la superficie reportada en el Catastro de Bienes Raíces.

5.3.3. Sector industrial

En la Figura 5.23 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía del sector industrial, recortada a la zona urbana de Santiago.

Demanda Total Sector Industrial

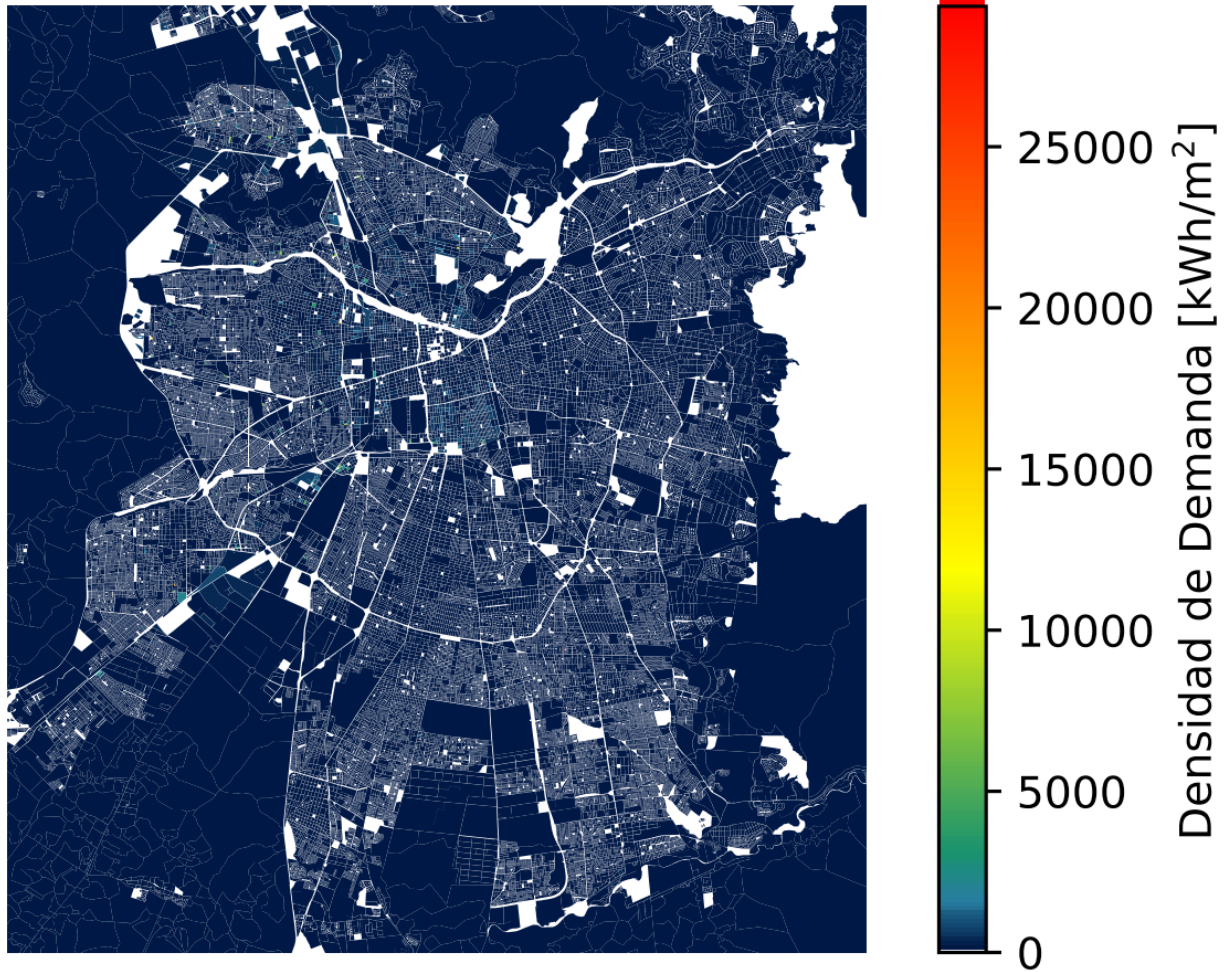


Figura 5.23: Distribución de la demanda del sector industrial en 2042

Como se mencionó en el Capítulo 4, el modelo del sector industrial se simplificó tomando el supuesto de que su distribución espacial se mantenía constante, por lo que al comparar con el mapa del año base de la Figura 5.10 solo se puede apreciar que aumentó el consumo, debido al aumento en la intensidad.

5.3.4. Sector público

En la Figura 5.24 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía del sector público, recortada a la zona urbana de Santiago.

Demanda Total Sector Publico

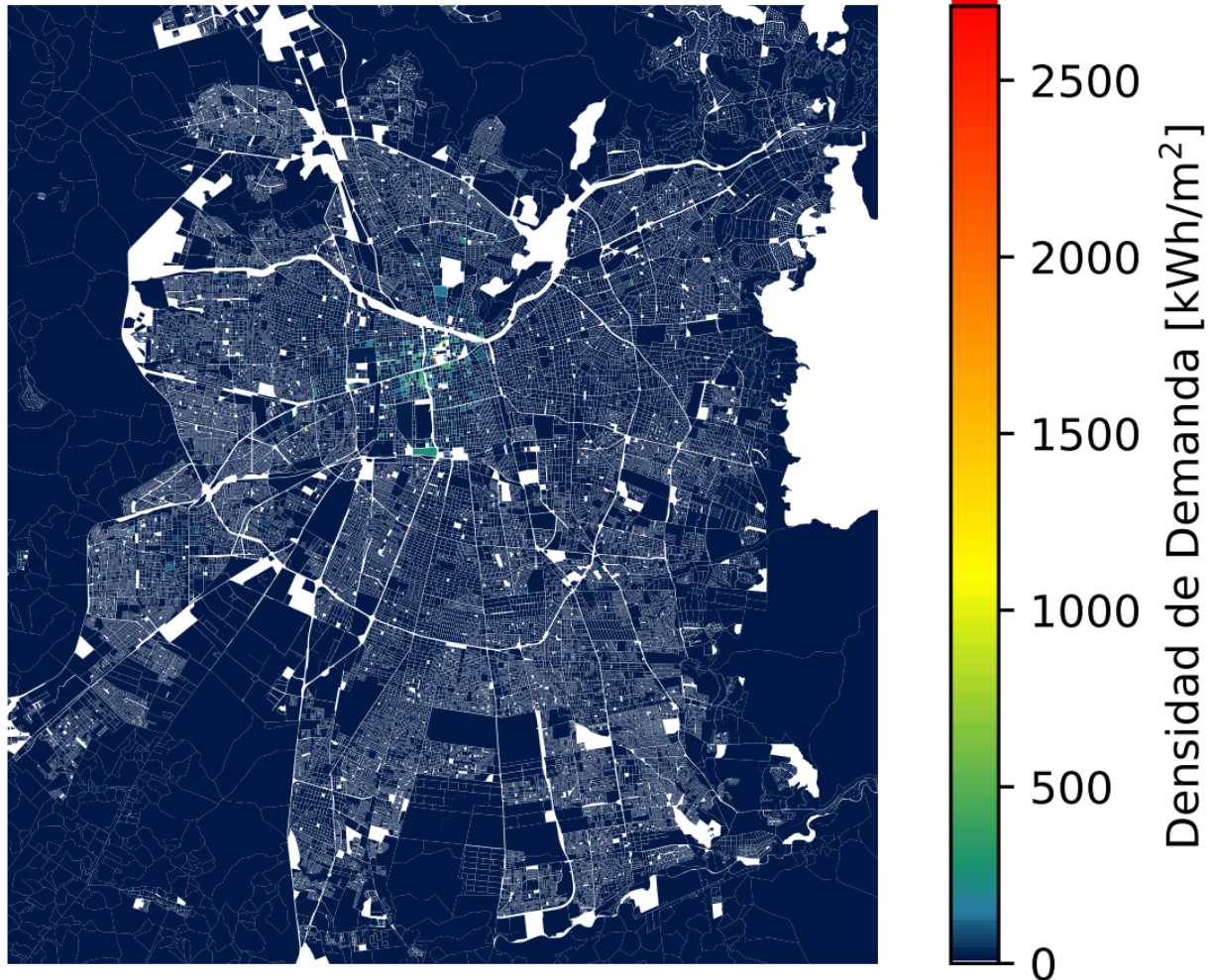


Figura 5.24: Distribución de la demanda del sector público en 2042

Como se mencionó en el Capítulo 4, el modelo del sector público también se simplificó, tomando el supuesto de que su superficie construida aumenta proporcionalmente a la superficie ya existente. Por lo tanto, al comparar con el mapa del año base de la Figura 5.11 solo se puede apreciar que aumentó el consumo, debido al aumento en la superficie construida del sector público.

5.3.5. Región Metropolitana

En la Tabla 5.7 se muestra la demanda de la Región Metropolitana, dividida por energético y por sector.

Tabla 5.7: Demanda de la Región Metropolitana año 2042

Energético	Residencial [GWh]	Comercial [GWh]	Industrial [GWh]	Público [GWh]	Total [GWh]
Electricidad	14.069	17.710	9.451	1.880	43.111
Gas licuado	8.196	1.692	2.767	172	12.656
Kerosene	3.934	0	0	0	3.634
Gas natural	10.909	1.743	6.134	229	19.016
Leña	1.227	0	0	0	1.227
Petróleo diésel	0	5.321	3.353	56	8.674
Coque	0	0	808	0	808
Carbón	0	0	244	0	244
Total	38.337	26.468	22.760	2.338	89.675

Para comparar los resultados obtenidos con la demanda proyectada por el Modelo PELP, en la Tabla 5.8 se muestra la diferencia entre los resultados obtenidos y la demanda proyectada para el año objetivo por el Modelo PELP. Por construcción, los sectores industrial y público tienen la misma demanda que la del Modelo PELP, ya que esta demanda total se utilizó para calcular su proyección de intensidad y superficie respectivamente. Sin embargo, para los sectores residencial y comercial, en ningún paso de la metodología se usó la demanda proyectada por el Modelo PELP como dato de entrada, pero aun así se logró replicar la demanda total con alta precisión. Esto muestra que se logró replicar la demanda total proyectada en la Planificación Energética de Largo Plazo, incorporando una nueva dimensión de distribución espacial que no se conocía previamente.

Tabla 5.8: Diferencia demanda Región Metropolitana 2042

Energético	Residencial	Comercial	Industrial	Público
Electricidad	3,80 %	-0,02 %	15,37 %	-30,86 %
Gas licuado	11,14 %	-0,02 %	-12,31 %	-2,63 %
Kerosene	5,82 %	-	-	-
Gas natural	-65,30 %	-0,02 %	-21,39 %	66,69 %
Leña	-20,94 %	-	-	-
Petróleo diésel	-	-0,02 %	-11,70 %	-30,85 %
Carbón	-	-	-	-
Coque	-	-	-	-
Total	-7,57 %	-0,02 %	0,00 %	-0,06 %

Con respecto a la participación de cada energético, para el sector comercial se consideró un cambio en los porcentajes de uso de cada energético como parte de la metodología de proyección, por lo que el error de cada energético también es muy bajo. Por otro lado, se nota la diferencia con el sector público, donde por simplicidad no se incluyó un cambio en el uso de energéticos en la metodología de proyección, lo que resultó en una distribución de combustibles considerablemente distinta con respecto al Modelo PELP. Para el sector indus-

trial, por falta de tiempo no se conoce el detalle de consumo por energético, por lo que no se pueden comparar. Por último, el consumo por energético del sector residencial es distinto al proyectado por el Modelo PELP, porque las intensidades del año base se calcularon con base en distintos porcentajes de participación de energéticos. Por ejemplo, según la encuesta CASEN 2017, el porcentaje de usuarios de gas natural es mayor que el utilizado por el Modelo PELP, lo que resulta en una menor intensidad calculada y finalmente en un menor consumo en el año objetivo.

En la Figura 5.25 se muestra la distribución espacial de la demanda de energía por comuna en la zona urbana de Santiago, incluyendo los sectores residencial, comercial, industrial y público.

Demanda Total Región Metropolitana

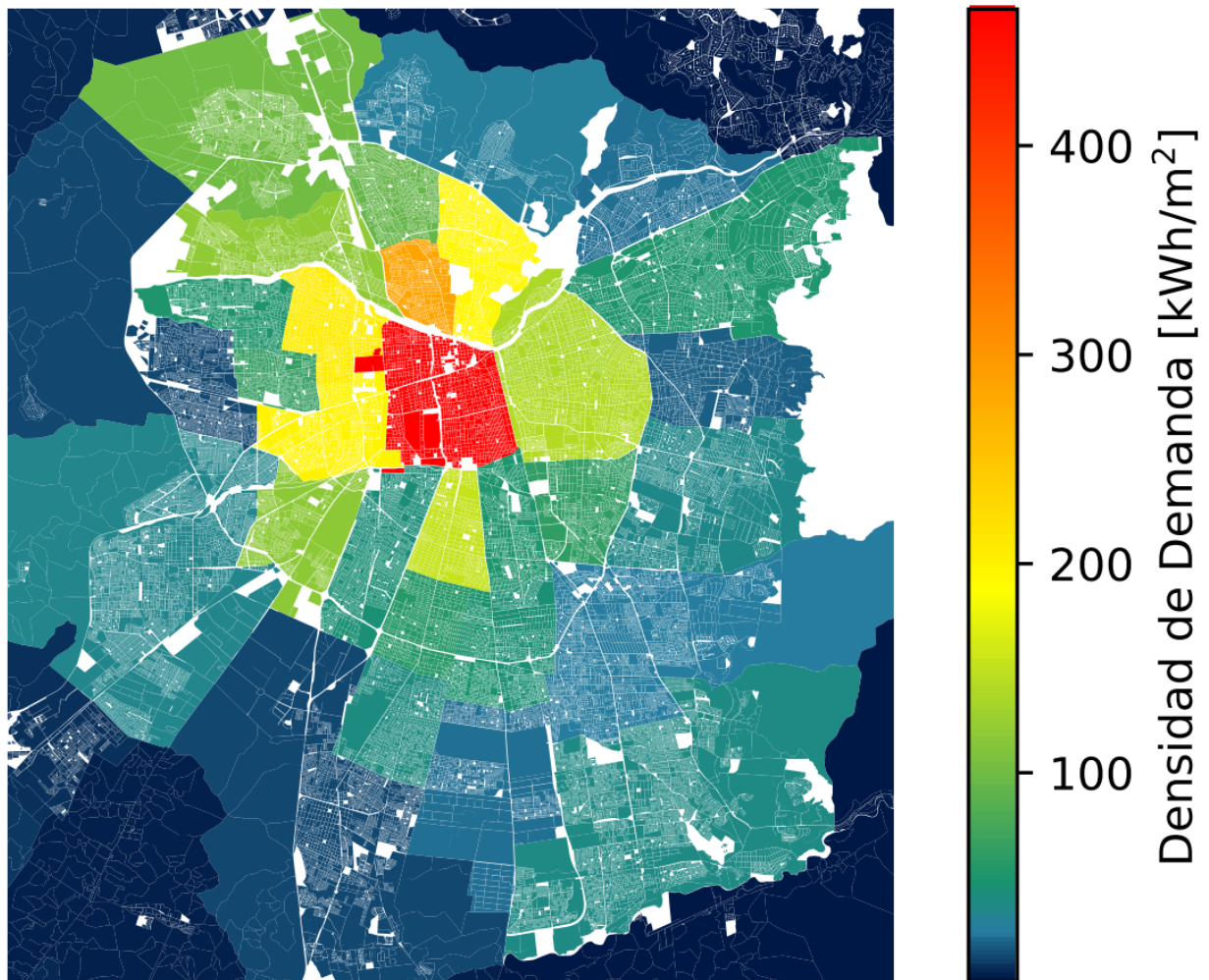


Figura 5.25: Distribución de la demanda de la Región Metropolitana en 2042

En primer lugar, se observa que la distribución espacial de la demanda del año objetivo es distinta a la del año base, en algunas comunas aumentó el consumo en relación con el resto de la ciudad, mientras que en otras disminuyó. Esto muestra que además de lograr caracterizar

la distribución espacial de la demanda del año base, también se logró modelar algunos de los mecanismos por los cuales evoluciona la distribución espacial de la demanda de energía con el tiempo. Los cambios en la distribución espacial de la demanda se deben al desarrollo de los sectores residencial y comercial, ya que la distribución espacial de los sectores industrial y público se mantuvo constante.

Por completitud, en la Figura 5.26 se muestra la proyección de la demanda de energía por comuna en toda la Región Metropolitana. Al igual que en el año base, se observa que la demanda se concentra principalmente en la ciudad de Santiago, mientras que la demanda de las zonas rurales es casi despreciable.

Demanda Total Región Metropolitana

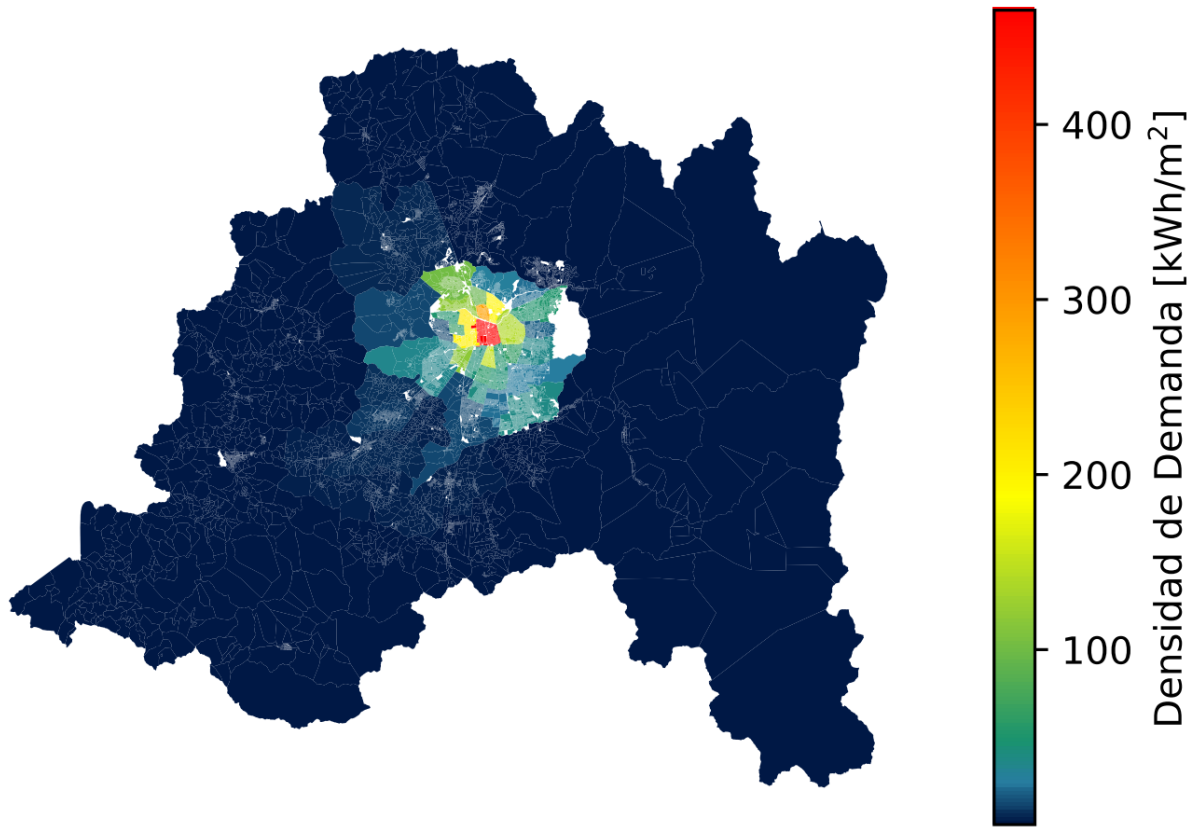


Figura 5.26: Distribución de la demanda de la Región Metropolitana en 2042

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones generales de la metodología desarrollada

Durante el desarrollo de este trabajo de memoria se cumplieron todos los objetivos planteados en la Introducción:

- Se logró determinar variables que permiten calcular la demanda de energía de los sectores Residencial, Comercial, Industrial y Público.
- Se logró implementar un modelo que utiliza la información disponible y las relaciones cuantificadas para estimar la demanda energética con un nivel de desagregación espacial a nivel de manzana.
- Se logró recopilar información y aplicar el modelo desarrollado para caracterizar la distribución espacial de la demanda de energía en la Región Metropolitana para el año base 2017, replicando el consumo total por sector y energético reportado en el Balance Regional de Energía.
- Se logró recopilar información y plantear una metodología para proyectar la información de entrada del modelo.
- Se logró aplicar el modelo sobre la información proyectada, para obtener una proyección de la demanda energética de la Región Metropolitana en el año 2042.

Previo al desarrollo de esta memoria, la mejor caracterización disponible de la demanda de energía en la Región Metropolitana es el Balance Regional de Energía, mientras que la mejor proyección de la demanda de energía en la región es el modelo desarrollado para la Planificación Energética de Largo Plazo, ambos de los cuales solamente tienen una desagregación espacial por región. Al respecto, se lograron los siguientes aportes al estado del arte:

- La metodología propuesta permite caracterizar la demanda del año base, siendo el primer acercamiento para intentar estimar la distribución espacial de la demanda de energía por manzana.
- La metodología propuesta permite proyectar la magnitud y distribución de las variables que afectan la demanda y el resultado de la proyección de la distribución espacial de la demanda de la región.

- El resultado de la proyección de la distribución espacial de la demanda de la región, ya que se logró incorporar la nueva dimensión de distribución espacial a la proyección de la Planificación Energética de Largo Plazo.

Con respecto a la metodología propuesta, se logró caracterizar en profundidad el sector residencial, incluyendo parámetros de población y vivienda por manzana, distintos usos finales, considerando distintos porcentajes de uso de energéticos entre comunas, la evolución de la intensidad de consumo en el tiempo, proyecciones de población y vivienda, dinámicas del desarrollo de viviendas y metas de uso de combustibles, etc. Este nivel de detalle en la caracterización se logró gracias a que existen suficientes fuentes de información relevante para el sector, en particular los resultados del Censo publicados con detalle por manzana. Por otro lado, para los sectores comercial, industrial y público no fue posible llegar a una caracterización tan detallada, debido a la falta de información necesaria. Este hecho resalta la necesidad de trabajar para mejorar y unificar las fuentes de información disponibles en el país.

6.2. Comentarios generales sobre la experiencia de este trabajo de memoria

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica, la mayoría de los cursos de la línea de especialización de Energía Eléctrica se enfocan en los segmentos de generación, transmisión y distribución de electricidad, pero rara vez incluyen como se utiliza la energía distribuida y tampoco consideran la participación de otros energéticos. Por lo tanto, esta memoria fue una excelente oportunidad para aprender sobre estos temas. Además, este trabajo también involucra conocimientos de disciplinas distintas a la ingeniería eléctrica, tales como urbanismo y planificación, por lo que permitió expandir el campo de conocimientos y reconocer la importancia de equipos de trabajo interdisciplinarios.

Con respecto a aprendizajes específicos, se aprendió como procesar grandes cantidades de datos, se aprendió a recopilar datos de diversas fuentes, se aprendió sobre la dinámica del desarrollo de ciudades, usos finales de energía, diferencias en el consumo de energéticos de los distintos sectores, metodologías para la proyección de distintas variables socioeconómicas y diferencias en el consumo de energía de comunas de Santiago con distinta clasificación socioeconómica. También se amplió la perspectiva sobre las condiciones de vida en distintos lugares de la región, por ejemplo, al comparar la densidad de población en el centro de Santiago, donde se construyeron los llamados “ghettos verticales”, con la densidad en el sector oriente, donde existen grandes casas individuales; o al comparar el uso de combustibles entre las zonas rurales de la región, donde se utiliza más leña y gas licuado, contra el uso de combustibles en la zona urbana de Santiago, donde el consumo está más electrificado, es más eficiente, menos contaminante y más seguro.

La principal dificultad encontrada durante el desarrollo de la memoria fue la falta de información. Durante la revisión bibliográfica, se notó una importante diferencia entre los sistemas de información disponibles en países más desarrollados y aquellos disponibles en Chile. En los artículos revisados se desarrollaban modelos mucho más complejos, pero que también requerían mucha más información en comparación con el modelo desarrollado en esta memoria. Por ejemplo, mapas de uso de suelo, mapas con la distribución espacial de la demanda de

varios años, proyecciones detalladas de estos mapas, etc. En Chile no existen bases de datos que contengan esta información y la información disponible proviene de distintas fuentes que utilizan distintos estándares y formatos, como se observó al intentar unificar las bases de datos del Catastro de Bienes Raíces con el Censo 2017. Durante el desarrollo de esta memoria, se tomaron varios supuestos y se realizaron hartas aproximaciones y simplificaciones para compensar por la falta de información, pero esto plantea un desafío para Chile en nuestro camino hacia ser un país desarrollado. Se debe realizar un esfuerzo para construir bases de datos integradas y detalladas, que incluyan información de diversas fuentes y se encuentren georreferenciadas; o que al menos las bases de datos de distintas fuentes se encuentren estandarizadas, por ejemplo, usando los mismos códigos para la identificación de manzanas.

En la metodología propuesta se tomaron varios supuestos con el objetivo de simplificar los cálculos necesarios, de forma que se pudieran ejecutar aplicando simultáneamente una función a todas las manzanas. Al hacer esto, se sacrificó un poco de precisión en el modelamiento de las distintas mecánicas de desarrollo de la ciudad, pero a cambio se obtuvo un modelo capaz de realizar todos los cálculos necesarios para proyectar las variables necesarias y obtener la distribución espacial de la demanda en solo minutos (en un computador de gama media), a pesar de la gran cantidad de datos procesados. Esto significa que aún existe un margen para agregar características y aumentar la complejidad del modelo, manteniendo un tiempo razonable de ejecución. Estas posibles características adicionales se discuten en la próxima sección.

6.3. Pasos a seguir

Como se mencionó previamente, en la revisión bibliográfica se revisaron modelos desarrollados en países donde existen mejores fuentes de información. Una de las principales diferencias con estos modelos, es que en un modelo de simulación los parámetros se deberían calibrar considerando varios años hacia el pasado, mientras que en el modelo desarrollado en esta memoria todo se calibró en función del año base. Es posible que el año 2017 no sea representativo, por lo que idealmente el modelo se debería calibrar para reproducir la demanda de al menos 10 o 15 años hacia el pasado. Otras fuentes de información, como el Balance Nacional de Energía, si se publican anualmente, pero el modelo está limitado por la frecuencia con la cual se realizan los censos en el país y, en particular, porque el Censo 2012 se descartó por problemas técnicos, por lo que solamente existe información de un censo en los últimos 20 años.

Una característica importante que el modelo no es capaz de simular, es la expansión horizontal de las zonas urbanas. A medida que una ciudad crece, se expande ocupando territorios vacíos, creando nuevas manzanas, viviendas y alojando nuevos habitantes. Este es un proceso muy complejo que no se pudo incorporar en este trabajo, pero es necesario para modelar correctamente la evolución de la distribución espacial de la demanda energética, especialmente de casas y del sector industrial. Por lo tanto, en el futuro se deberían realizar estudios para intentar proyectar como evoluciona la estructura y ubicación de las manzanas de la ciudad, para incorporarlo al modelo.

A propósito, la metodología propuesta es flexible, dejando la oportunidad de que si en el futuro se obtienen proyecciones más detalladas de los datos de entrada, se puedan incorpo-

rar al modelo para obtener mejores proyecciones de la distribución espacial de la demanda. Esto puede incluir mejores proyecciones de uso de combustibles, de población y vivienda, de intensidad de consumo, etc.

A continuación se listan posibles pasos a seguir para mejorar la caracterización del sector Residencial:

- Considerar viviendas como unidad básica de consumo, en vez de manzana.
- Incluir en el cálculo de intensidad la situación socioeconómica de las familias.
- Incorporar límites de altura de construcción por comuna en la metodología propuesta para proyectar la cantidad de departamentos por manzana.
- Considerar otros escenarios de uso de combustibles.

Para el sector comercial, se debería caracterizar por separado cada uno de los destinos del catastro: comercio, oficinas, salud, hotelería y bodegas, los cuales consumen distintas cantidades de energía, usan distintos energéticos, tienen distinta distribución espacial y se desarrollan de forma distinta. Esto se podría realizar si es que el Balance Nacional de Energía considerara la misma subdivisión en el consumo del sector comercial, o basándose en estudios académicos.

Por otro lado, la metodología para proyectar la superficie del sector comercial se podría mejorar incorporando permisos de construcción. La construcción de edificios como grandes centros comerciales se aprueba con varios años de antelación y, si se conociera su ubicación en un formato compatible con el modelo, se podría agregar fácilmente esta superficie a la manzana correspondiente. De esta forma, se evitaría tener que elegir aleatoriamente donde ubicar el gran comercio y el del pequeño comercio se podría proyectar con la metodología propuesta en este trabajo. Lo anterior también se puede aplicar al sector público, para mejorar la proyección de la ubicación de colegios, universidades, hospitales, iglesias, etc.

Con respecto al sector industrial, el supuesto de que su consumo depende de la superficie construida puede ser un buen primer intento para estimar su distribución espacial, pero no es realista. El consumo de una industria no depende del tamaño de sus edificios, sino del proceso que se lleve a cabo y los niveles de producción. Además, no se puede agrupar el sector industrial en un único modelo, ya que cada industria tiene distintos procesos, distintos niveles de producción y una distinta distribución espacial. Al igual que en el Modelo PELP, el consumo del sector industrial se debería modelar individualmente para cada industria. El desafío es que las bases de datos relevantes a cada industria generalmente están en manos de privados, por lo que recopilar y unificar toda la información se transforma en un problema muy complicado y engorroso, especialmente agregando la necesidad de información georreferenciada. Por estas razones, un modelo detallado del sector industrial podría ser trabajo para otra memoria de título completa y definitivamente se escapa del alcance de este trabajo.

Aparte de las posibles mejoras al modelo, también existen oportunidades para mejorar la presentación de resultados. Para este informe se extrajeron gráficos con mapas de la distribución espacial de la demanda de energía. Pero para evitar tener que ejecutar todo el modelo cada vez que se quisieran extraer resultados, se guardó el *GeoDataFrame* en formato GeoJSON. Este formato mantiene toda la información georreferenciada y se puede utilizar

en páginas web, por lo que se podría crear una aplicación para visualizar los resultados, como en la Figura 4.2. De esta forma, se podría hacer acercamiento a distintas partes del mapa, elegir una manzana para revisar sus parámetros y su demanda, se podría cambiar el año de la proyección, se podría elegir ver la distribución espacial de un combustible o uso final o sector, etc.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía, “Informe balance nacional de energía,” 2020, Santiago de Chile.
- [2] Willis, H., Spatial electric load forecasting. CRC Press, 2002.
- [3] Melo, J. D., Padilha-Feltrin, A., y Carreno, E. M., “Data issues in spatial electric load forecasting,” en 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, pp. 1–20, 2014, [doi:10.1109/PESGM.2014.6939941](https://doi.org/10.1109/PESGM.2014.6939941).
- [4] Evangelopoulos, V., Karafotis, P., y Georgilakis, P., “Probabilistic spatial load forecasting based on hierarchical trending method,” *Energies*, vol. 13, no. 18, 2020, [doi:10.3390/en13184643](https://doi.org/10.3390/en13184643).
- [5] Melo, J. D., Carreno, E. M., Calviño, A., y Padilha-Feltrin, A., “Determining spatial resolution in spatial load forecasting using a grid-based model,” *Electric Power Systems Research*, vol. 111, pp. 177–184, 2014, [doi:https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.02.019](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.02.019).
- [6] Morales, D. X., Besanger, Y., Moscoso, S., y Pesantez, P., “Development of a spatial load-forecasting module for optimizing planning of electricity supply,” en 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), pp. 1–6, 2017, [doi:10.1109/ISGT-LA.2017.8126738](https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2017.8126738).
- [7] Carreno, E. M., Rocha, R. M., y Padilha-Feltrin, A., “A cellular automaton approach to spatial electric load forecasting,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 532–540, 2011, [doi:10.1109/TPWRS.2010.2061877](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2061877).
- [8] He, Y., Zhang, J., Xu, Y., Gao, Y., Xia, T., y He, H., “Forecasting the urban power load in china based on the risk analysis of land-use change and load density,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 71–79, 2015, [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.03.018](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.03.018).
- [9] Carreno, E. M. y Padilha-Feltrin, A., “Spatial electric load forecasting using a local movement approach,” en 2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, pp. 1–6, 2009, [doi:10.1109/ISAP.2009.5352827](https://doi.org/10.1109/ISAP.2009.5352827).
- [10] Melo, J., Carreno, E., y Padilha-Feltrin, A., “Spatial load forecasting using a demand propagation approach,” en 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T and D-LA 2010, pp. 196 – 203, 2010, [doi:10.1109/TDC-LA.2010.5762882](https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2010.5762882).
- [11] Melo, J. D., Carreno, E. M., y Padilha-Feltrin, A., “Multi-agent framework for spatial load forecasting,” en 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–8, 2011, [doi:10.1109/PES.2011.6039624](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039624).
- [12] Melo, J. D., Carreno, E. M., y Padilha-Feltrin, A., “Considering urban dynamics in spatial electric load forecasting,” en 2012 IEEE Power and Energy Society General

- Meeting, pp. 1–7, 2012, [doi:10.1109/PESGM.2012.6345436](https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345436).
- [13] Melo, J., Carreno, E., y Padilha-Feltrin, A., “Multi-agent simulation of urban social dynamics for spatial load forecasting,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 1870 – 1878, 2012, [doi:10.1109/TPWRS.2012.2190109](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2190109).
- [14] Ye, C., Ding, Y., Wang, P., y Lin, Z., “A data-driven bottom-up approach for spatial and temporal electric load forecasting,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 1966–1979, 2019, [doi:10.1109/TPWRS.2018.2889995](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2889995).
- [15] Melo, J., Carreno, E., Padilha-Feltrin, A., y Minussi, C. R., “Grid-based simulation method for spatial electric load forecasting using power-law distribution with fractal exponent,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 26, pp. n/a–n/a, 2015, [doi:10.1002/etep.2151](https://doi.org/10.1002/etep.2151).
- [16] Vasquez-Arnez, R. L., Jardini, J. A., Casolari, R., Magrini, L. C., Semolini, R., y Pascon, J. R., “A methodology for electrical energy forecast and its spatial allocation over developing boroughs,” en *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1–6, 2008, [doi:10.1109/TDC.2008.4517252](https://doi.org/10.1109/TDC.2008.4517252).
- [17] XIAO, B. y LIU, T., “A spatial load forecasting method based on load regularity analysis,” *TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES*, vol. 25, pp. 3892–3903, 2017, [doi:10.3906/elk-1607-5](https://doi.org/10.3906/elk-1607-5).
- [18] Heymann, F., Silva, J., Miranda, V., Melo, J., Soares, F. J., y Padilha-Feltrin, A., “Distribution network planning considering technology diffusion dynamics and spatial net-load behavior,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 106, pp. 254–265, 2019, [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.10.006).
- [19] Melo, J. D., Carreno, E. M., y Padilha-Feltrin, A., “Estimation of a preference map of new consumers for spatial load forecasting simulation methods using a spatial analysis of points,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 299–305, 2015, [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.11.023](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.11.023).
- [20] Ministerio de Economía Fomento y Reconstrucción, “D.f.l núm. 4/20.018 ley general de servicios electricos,” 2006, Santiago de Chile.
- [21] Centro de Energía, “Estudio de actualización y complementación de herramientas de perspectivas de largo plazo asociadas a la demanda energética,” 2019, Santiago de Chile.
- [22] Ministerio de Energía, “Planificación energética de largo plazo 2023 - 2027,” 2021, Santiago de Chile.
- [23] Instituto Nacional de Estadísticas, “Microdatos censo 2017 manzana,” 2017, Santiago de Chile.
- [24] Zhou, N., Mcneil, M., Fridley, D., Lin, J., Price, L., Sathaye, J., y Levine, M., “Energy use in china: Sectoral trends and future outlook,” 2007, [doi:10.2172/927321](https://doi.org/10.2172/927321).
- [25] Instituto Nacional de Estadísticas, “Informe anual de edificación,” 2016, Santiago de Chile.

Anexos

Anexo A. Resultados encuesta CASEN 2017

Comuna	GLP	GN	Leña	Electricidad
Santiago	49.78 %	31.24 %	0.53 %	18.45 %
Cerrillos	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Cerro Navia	98.23 %	0.88 %	0.88 %	0.00 %
Conchalí	93.70 %	6.30 %	0.00 %	0.00 %
El Bosque	95.91 %	1.74 %	1.94 %	0.41 %
Estación Central	78.14 %	21.11 %	0.50 %	0.25 %
Huechuraba	98.14 %	0.00 %	0.70 %	1.17 %
Independencia	84.55 %	8.58 %	0.00 %	6.87 %
La Cisterna	87.91 %	10.81 %	0.73 %	0.55 %
La Florida	86.00 %	13.33 %	0.17 %	0.50 %
La Granja	99.63 %	0.00 %	0.37 %	0.00 %
La Pintana	99.29 %	0.41 %	0.00 %	0.31 %
La Reina	51.82 %	44.04 %	0.00 %	4.14 %
Las Condes	39.22 %	57.77 %	0.28 %	2.73 %
Lo Barnechea	77.28 %	21.62 %	0.20 %	0.90 %
Lo Espejo	97.47 %	0.00 %	2.36 %	0.17 %
Lo Prado	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Macul	86.00 %	14.00 %	0.00 %	0.00 %
Maipú	95.94 %	3.83 %	0.12 %	0.12 %
Ñuñoa	45.73 %	51.99 %	0.00 %	2.29 %
Pedro Aguirre Cerda	97.15 %	1.78 %	1.07 %	0.00 %
Peñalolén	84.39 %	15.41 %	0.14 %	0.07 %
Providencia	27.22 %	66.03 %	0.26 %	6.49 %
Pudahuel	95.72 %	3.32 %	0.64 %	0.32 %
Quilicura	97.99 %	0.24 %	1.07 %	0.71 %
Quinta Normal	90.23 %	9.77 %	0.00 %	0.00 %
Recoleta	95.48 %	2.83 %	0.79 %	0.90 %
Renca	97.77 %	1.11 %	1.11 %	0.00 %

San Joaquín	99.33 %	0.34 %	0.34 %	0.00 %
San Miguel	72.45 %	25.85 %	0.57 %	1.13 %
San Ramón	99.38 %	0.62 %	0.00 %	0.00 %
Vitacura	16.53 %	78.60 %	0.00 %	4.87 %
Puente Alto	94.23 %	5.33 %	0.35 %	0.09 %
Pirque	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
San José de Maipo	97.53 %	0.00 %	2.47 %	0.00 %
Colina	96.94 %	0.00 %	3.06 %	0.00 %
Lampa	94.87 %	3.18 %	1.96 %	0.00 %
Tiltil	97.79 %	0.00 %	0.98 %	1.23 %
San Bernardo	92.02 %	6.96 %	1.02 %	0.00 %
Buín	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Calera de Tango	99.72 %	0.00 %	0.28 %	0.00 %
Paine	99.29 %	0.00 %	0.71 %	0.00 %
Melipilla	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Alhué	96.48 %	0.00 %	3.52 %	0.00 %
Curacaví	99.22 %	0.78 %	0.00 %	0.00 %
María Pinto	99.01 %	0.00 %	0.00 %	0.99 %
San Pedro	86.81 %	0.00 %	13.19 %	0.00 %
Talagante	96.48 %	2.05 %	1.47 %	0.00 %
El Monte	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Isla de Maipo	99.10 %	0.00 %	0.90 %	0.00 %
Padre Hurtado	98.68 %	0.00 %	0.00 %	1.32 %
Peñaflor	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

Tabla A.1: Participación Cocción

Comuna	GLP	GN	Leña	Electricidad
Santiago	45.90 %	35.25 %	0.71 %	18.14 %
Cerrillos	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Cerro Navia	98.68 %	0.49 %	0.82 %	0.00 %
Conchalí	92.34 %	7.36 %	0.29 %	0.00 %
El Bosque	97.64 %	1.82 %	0.11 %	0.43 %
Estación Central	75.38 %	23.93 %	0.69 %	0.00 %
Huechuraba	98.23 %	0.51 %	1.26 %	0.00 %
Independencia	79.96 %	12.25 %	1.56 %	6.24 %
La Cisterna	86.48 %	11.33 %	0.00 %	2.19 %
La Florida	85.24 %	14.28 %	0.35 %	0.13 %
La Granja	99.23 %	0.77 %	0.00 %	0.00 %

La Pintana	97.49 %	1.67 %	0.84 %	0.00 %
La Reina	54.94 %	43.05 %	0.00 %	2.01 %
Las Condes	39.41 %	58.65 %	0.14 %	1.80 %
Lo Barnechea	76.03 %	22.82 %	1.16 %	0.00 %
Lo Espejo	98.07 %	0.00 %	1.93 %	0.00 %
Lo Prado	98.79 %	0.00 %	0.00 %	1.21 %
Macul	85.46 %	13.10 %	0.16 %	1.28 %
Maipú	95.50 %	4.06 %	0.12 %	0.32 %
Ñuñoa	45.33 %	51.39 %	0.24 %	3.03 %
Pedro Aguirre Cerda	95.09 %	0.94 %	1.89 %	2.08 %
Peñalolén	79.75 %	18.69 %	1.56 %	0.00 %
Providencia	24.23 %	65.98 %	0.31 %	9.49 %
Pudahuel	97.05 %	2.95 %	0.00 %	0.00 %
Quilicura	98.11 %	0.54 %	1.35 %	0.00 %
Quinta Normal	88.35 %	10.17 %	0.00 %	1.48 %
Recoleta	95.10 %	1.96 %	1.10 %	1.84 %
Renca	96.17 %	2.91 %	0.61 %	0.31 %
San Joaquín	98.41 %	1.59 %	0.00 %	0.00 %
San Miguel	72.12 %	22.61 %	0.00 %	5.26 %
San Ramón	98.70 %	0.87 %	0.00 %	0.43 %
Vitacura	15.28 %	82.64 %	0.58 %	1.50 %
Puente Alto	92.55 %	6.69 %	0.24 %	0.52 %
Pirque	96.57 %	0.00 %	0.00 %	3.43 %
San José de Maipo	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Colina	97.25 %	0.79 %	1.44 %	0.52 %
Lampa	91.58 %	4.76 %	3.13 %	0.54 %
Tiltil	88.03 %	0.00 %	11.97 %	0.00 %
San Bernardo	92.03 %	6.98 %	0.28 %	0.71 %
Buín	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Calera de Tango	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
Paine	96.77 %	0.00 %	2.96 %	0.27 %
Melipilla	96.77 %	0.00 %	1.49 %	1.74 %
Alhué	99.12 %	0.00 %	0.88 %	0.00 %
Curacaví	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
María Pinto	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
San Pedro	95.65 %	0.00 %	4.35 %	0.00 %
Talagante	94.51 %	3.66 %	1.83 %	0.00 %
El Monte	96.89 %	1.17 %	1.95 %	0.00 %
Isla de Maipo	100.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

Padre Hurtado	98.52 %	0.00 %	0.00 %	1.48 %
Peñaflor	96.18 %	0.00 %	3.82 %	0.00 %

Tabla A.2: Participación Agua Caliente Sanitaria

Comuna	GLP	GN	Kerosene	Leña	Electricidad
Santiago	33.08 %	9.22 %	10.73 %	0.69 %	46.29 %
Cerrillos	57.65 %	0.00 %	34.12 %	0.00 %	8.24 %
Cerro Navia	58.82 %	0.18 %	31.43 %	0.37 %	9.19 %
Conchalí	59.65 %	6.80 %	25.32 %	2.69 %	5.54 %
El Bosque	55.43 %	1.40 %	32.32 %	2.22 %	8.63 %
Estación Central	61.67 %	10.04 %	18.10 %	1.27 %	8.91 %
Huechuraba	69.21 %	0.00 %	30.79 %	0.00 %	0.00 %
Independencia	39.03 %	3.57 %	43.37 %	1.02 %	13.01 %
La Cisterna	54.26 %	2.97 %	30.10 %	0.20 %	12.48 %
La Florida	56.44 %	5.63 %	29.59 %	1.04 %	7.30 %
La Granja	66.31 %	0.00 %	28.40 %	0.79 %	4.49 %
La Pintana	45.15 %	0.13 %	41.14 %	2.59 %	11.00 %
La Reina	38.28 %	16.36 %	30.69 %	0.34 %	14.33 %
Las Condes	20.76 %	23.72 %	23.22 %	0.84 %	31.46 %
Lo Barnechea	33.45 %	15.08 %	37.07 %	2.72 %	11.68 %
Lo Espejo	45.87 %	1.24 %	45.25 %	1.24 %	6.40 %
Lo Prado	71.99 %	0.00 %	22.92 %	0.00 %	5.09 %
Macul	56.94 %	1.42 %	29.00 %	1.07 %	11.57 %
Maipú	54.27 %	0.70 %	35.48 %	1.01 %	8.54 %
Ñuñoa	36.55 %	16.60 %	20.33 %	0.84 %	25.68 %
Pedro Aguirre Cerda	56.01 %	1.43 %	26.07 %	1.83 %	14.66 %
Peñalolén	53.45 %	8.58 %	31.21 %	1.06 %	5.69 %
Providencia	21.82 %	26.85 %	16.24 %	0.60 %	34.48 %
Pudahuel	58.81 %	1.01 %	32.32 %	0.00 %	7.86 %
Quilicura	65.43 %	1.04 %	24.48 %	0.15 %	8.90 %
Quinta Normal	41.24 %	1.38 %	42.63 %	0.00 %	14.75 %
Recoleta	50.28 %	0.85 %	36.58 %	1.27 %	11.02 %
Renca	50.97 %	0.88 %	39.68 %	1.59 %	6.88 %
San Joaquín	62.18 %	0.55 %	30.36 %	2.00 %	4.91 %
San Miguel	52.41 %	2.94 %	25.16 %	0.00 %	19.50 %
San Ramón	47.10 %	0.00 %	43.53 %	0.67 %	8.71 %
Vitacura	12.64 %	32.64 %	28.74 %	0.00 %	25.98 %
Puente Alto	54.75 %	4.78 %	26.59 %	2.07 %	11.82 %

Pirque	32.02 %	0.56 %	7.30 %	56.18 %	3.93 %
San José de Maipo	30.93 %	0.00 %	6.78 %	61.44 %	0.85 %
Colina	36.86 %	1.41 %	26.55 %	24.15 %	11.02 %
Lampa	35.36 %	3.76 %	16.45 %	34.59 %	9.84 %
Tiltil	52.01 %	0.00 %	6.97 %	37.00 %	4.02 %
San Bernardo	53.45 %	2.14 %	27.97 %	5.91 %	10.53 %
Buín	33.70 %	1.64 %	26.85 %	32.05 %	5.75 %
Calera de Tango	41.38 %	0.00 %	19.44 %	36.68 %	2.51 %
Paine	18.02 %	0.00 %	28.68 %	45.18 %	8.12 %
Melipilla	51.88 %	0.00 %	13.62 %	25.22 %	9.28 %
Alhué	26.32 %	0.00 %	3.24 %	69.23 %	1.21 %
Curacaví	36.62 %	3.76 %	20.66 %	29.58 %	9.39 %
María Pinto	32.17 %	0.00 %	8.26 %	44.78 %	14.78 %
San Pedro	31.08 %	2.70 %	8.11 %	56.76 %	1.35 %
Talagante	39.92 %	3.16 %	22.13 %	27.67 %	7.11 %
El Monte	28.22 %	0.00 %	20.33 %	46.47 %	4.98 %
Isla de Maipo	34.32 %	0.99 %	10.23 %	51.49 %	2.97 %
Padre Hurtado	36.73 %	2.55 %	28.36 %	28.73 %	3.64 %
Peñaflor	46.51 %	0.23 %	24.19 %	17.91 %	11.16 %

Tabla A.3: Participación Calefacción

Anexo B. Artefactos eléctricos

Unidad	$\frac{kWh}{Equipo}$	$\frac{Equipos}{Vivienda}$	$\frac{kWh}{Vivienda}$
Refrigeradores	516.70	0.96	498.33
Iluminación	297.05	1.00	297.05
Stand by	186.42	1.00	186.42
Televisores	109.97	2.25	247.84
Computadores	103.36	0.58	60.33
Aire acondicionado	455.94	0.01	4.28
Secadora	87.98	0.16	14.39
Lavavajillas	278.00	0.05	13.28
Microondas	70.36	0.61	42.67
Freezers	293.06	0.08	24.42
Horno Eléctrico	61.52	0.26	15.80
Lavadoras	70.36	0.95	66.97
Equipos de música	41.25	0.89	36.72
Plancha	31.22	0.89	27.85

DVD	4.36	0.60	2.63
Total			1538.98

Tabla B.1: Detalle artefactos eléctricos casas

Unidad	$\frac{kWh}{Equipo}$	$\frac{Equipos}{Vivienda}$	$\frac{kWh}{Vivienda}$
Refrigeradores	516.70	0.97	503.74
Iluminación	345.84	1.00	345.84
Stand by	186.42	1.00	186.42
Televisores	109.97	2.25	247.84
Computadores	103.36	0.77	79.48
Aire acondicionado	455.94	0.01	4.28
Secadora	87.98	0.16	14.39
Lavavajillas	278.00	0.05	13.28
Microondas	70.36	0.61	42.67
Freezers	293.06	0.08	24.42
HornoEléctrico	61.52	0.26	15.80
Lavadoras	70.36	0.90	63.32
Equipos de música	41.25	0.89	36.72
Plancha	31.22	0.89	27.85
DVD	4.36	0.60	2.63
Condominios Iluminación	229.79	1.00	229.79
Condominios ascensores	344.68	1.00	344.68
Condominios bombas	150.00	1.00	150.00
Total			2333.15

Tabla B.2: Detalle artefactos eléctricos departamentos

Anexo C. Proyección de participación de energéticos

Comuna	GLP	GN	Leña	Electricidad
Santiago	24.36 %	46.35 %	0.00 %	29.30 %
Cerrillos	48.93 %	29.72 %	0.00 %	21.35 %
Cerro Navia	48.06 %	30.60 %	0.00 %	21.34 %
Conchalí	45.84 %	34.15 %	0.00 %	20.01 %
El Bosque	46.93 %	31.38 %	0.00 %	21.70 %
Estación Central	38.23 %	44.62 %	0.00 %	17.15 %
Huechuraba	48.01 %	29.58 %	0.00 %	22.41 %
Independencia	41.37 %	33.71 %	0.00 %	24.92 %

La Cisterna	43.01 %	37.36 %	0.00 %	19.63 %
La Florida	42.08 %	38.99 %	0.00 %	18.93 %
La Granja	48.74 %	29.83 %	0.00 %	21.43 %
La Pintana	48.58 %	29.92 %	0.00 %	21.50 %
La Reina	25.35 %	59.44 %	0.00 %	15.20 %
Las Condes	19.19 %	69.59 %	0.00 %	11.22 %
Lo Barnechea	37.81 %	44.71 %	0.00 %	17.48 %
Lo Espejo	47.69 %	30.34 %	0.00 %	21.97 %
Lo Prado	48.93 %	29.72 %	0.00 %	21.35 %
Macul	42.08 %	39.56 %	0.00 %	18.36 %
Maipú	46.94 %	32.41 %	0.00 %	20.65 %
Ñuñoa	22.37 %	65.58 %	0.00 %	12.05 %
Pedro Aguirre Cerda	47.53 %	31.28 %	0.00 %	21.19 %
Peñalolén	41.29 %	40.57 %	0.00 %	18.14 %
Providencia	13.32 %	74.27 %	0.00 %	12.41 %
Pudahuel	46.83 %	32.14 %	0.00 %	21.03 %
Quilicura	47.94 %	29.98 %	0.00 %	22.08 %
Quinta Normal	44.15 %	36.59 %	0.00 %	19.27 %
Recoleta	46.71 %	31.67 %	0.00 %	21.62 %
Renca	47.84 %	30.82 %	0.00 %	21.34 %
San Joaquín	48.60 %	30.05 %	0.00 %	21.35 %
San Miguel	35.45 %	47.71 %	0.00 %	16.84 %
San Ramón	48.62 %	30.16 %	0.00 %	21.22 %
Vitacura	8.09 %	83.51 %	0.00 %	8.40 %
Puente Alto	46.11 %	33.54 %	0.00 %	20.35 %
Pirque	48.93 %	29.72 %	0.00 %	21.35 %
San José de Maipo	47.72 %	30.43 %	0.00 %	21.86 %
Colina	47.43 %	30.59 %	0.00 %	21.98 %
Lampa	46.41 %	32.51 %	0.00 %	21.07 %
Tiltil	47.84 %	29.64 %	0.00 %	22.52 %
San Bernardo	45.02 %	34.91 %	0.00 %	20.07 %
Buín	48.93 %	29.72 %	0.00 %	21.35 %
Calera de Tango	48.79 %	29.80 %	0.00 %	21.41 %
Paine	48.58 %	29.93 %	0.00 %	21.50 %
Melipilla	48.93 %	29.72 %	0.00 %	21.35 %
Alhué	47.21 %	30.72 %	0.00 %	22.07 %
Curacaví	48.54 %	30.27 %	0.00 %	21.18 %
María Pinto	48.44 %	29.43 %	0.00 %	22.13 %
San Pedro	42.47 %	33.48 %	0.00 %	24.05 %

Talagante	47.20 %	31.58 %	0.00 %	21.21 %
El Monte	48.93 %	29.72 %	0.00 %	21.35 %
Isla de Maipo	48.49 %	29.98 %	0.00 %	21.53 %
Padre Hurtado	48.28 %	29.33 %	0.00 %	22.39 %
Peñaflor	48.93 %	29.72 %	0.00 %	21.35 %

Tabla C.1: Proyección participación cocción

Comuna	GLP	GN	Leña	Electricidad
Santiago	21.27 %	50.47 %	0.17 %	28.09 %
Cerrillos	46.34 %	32.45 %	0.00 %	21.20 %
Cerro Navia	45.73 %	32.90 %	0.20 %	21.17 %
Conchalí	42.79 %	37.47 %	0.07 %	19.67 %
El Bosque	45.25 %	33.56 %	0.03 %	21.16 %
Estación Central	34.93 %	48.71 %	0.17 %	16.19 %
Huechuraba	45.52 %	32.96 %	0.31 %	21.21 %
Independencia	37.05 %	38.91 %	0.38 %	23.66 %
La Cisterna	40.08 %	39.40 %	0.00 %	20.52 %
La Florida	39.50 %	42.10 %	0.08 %	18.31 %
La Granja	45.99 %	32.97 %	0.00 %	21.04 %
La Pintana	45.18 %	33.70 %	0.20 %	20.92 %
La Reina	25.46 %	60.88 %	0.00 %	13.66 %
Las Condes	18.27 %	71.50 %	0.03 %	10.20 %
Lo Barnechea	35.23 %	48.02 %	0.28 %	16.47 %
Lo Espejo	45.45 %	32.71 %	0.47 %	21.37 %
Lo Prado	45.78 %	32.06 %	0.00 %	22.16 %
Macul	39.61 %	40.91 %	0.04 %	19.45 %
Maipú	44.26 %	35.10 %	0.03 %	20.61 %
Ñuñoa	21.01 %	66.22 %	0.06 %	12.72 %
Pedro Aguirre Cerda	44.07 %	32.67 %	0.46 %	22.80 %
Peñalolén	36.96 %	45.29 %	0.38 %	17.38 %
Providencia	11.23 %	73.98 %	0.07 %	14.72 %
Pudahuel	44.98 %	34.45 %	0.00 %	20.58 %
Quilicura	45.47 %	33.00 %	0.33 %	21.21 %
Quinta Normal	40.95 %	38.84 %	0.00 %	20.21 %
Recoleta	44.07 %	33.33 %	0.27 %	22.33 %
Renca	44.57 %	34.40 %	0.15 %	20.88 %
San Joaquín	45.61 %	33.53 %	0.00 %	20.87 %
San Miguel	33.43 %	46.02 %	0.00 %	20.56 %

San Ramón	45.74 %	32.90 %	0.00 %	21.36 %
Vitacura	7.08 %	87.86 %	0.14 %	4.92 %
Puente Alto	42.89 %	36.83 %	0.06 %	20.22 %
Pirque	44.75 %	31.34 %	0.00 %	23.91 %
San José de Maipo	46.34 %	32.45 %	0.00 %	21.20 %
Colina	45.07 %	33.01 %	0.35 %	21.58 %
Lampa	42.44 %	35.91 %	0.76 %	20.90 %
Tiltil	40.80 %	34.05 %	2.90 %	22.25 %
San Bernardo	42.65 %	36.98 %	0.07 %	20.30 %
Buín	46.34 %	32.45 %	0.00 %	21.20 %
Calera de Tango	46.34 %	32.45 %	0.00 %	21.20 %
Paine	44.85 %	32.76 %	0.72 %	21.67 %
Melipilla	44.84 %	32.09 %	0.36 %	22.71 %
Alhué	45.93 %	32.57 %	0.21 %	21.28 %
Curacaví	46.34 %	32.45 %	0.00 %	21.20 %
María Pinto	46.34 %	32.45 %	0.00 %	21.20 %
San Pedro	44.33 %	33.03 %	1.05 %	21.58 %
Talagante	43.80 %	35.17 %	0.44 %	20.59 %
El Monte	44.90 %	33.50 %	0.47 %	21.13 %
Isla de Maipo	46.34 %	32.45 %	0.00 %	21.20 %
Padre Hurtado	45.66 %	31.97 %	0.00 %	22.37 %
Peñaflor	44.57 %	32.96 %	0.93 %	21.54 %

Tabla C.2: Proyección participación agua caliente sanitaria

Comuna	GLP	GN	Kerosene	Leña	Electricidad
Santiago	23.52 %	11.89 %	8.81 %	0.49 %	55.29 %
Cerrillos	40.98 %	5.21 %	28.02 %	0.00 %	25.79 %
Cerro Navia	41.82 %	5.39 %	25.81 %	0.26 %	26.72 %
Conchalí	42.40 %	11.96 %	20.79 %	1.93 %	22.91 %
El Bosque	39.40 %	6.53 %	26.54 %	1.59 %	25.93 %
Estación Central	43.84 %	14.94 %	14.87 %	0.92 %	25.43 %
Huechuraba	49.20 %	5.84 %	25.28 %	0.00 %	19.68 %
Independencia	27.75 %	7.99 %	35.61 %	0.73 %	27.91 %
La Cisterna	38.57 %	7.80 %	24.72 %	0.14 %	28.77 %
La Florida	40.12 %	10.64 %	24.30 %	0.75 %	24.19 %
La Granja	47.14 %	5.60 %	23.32 %	0.57 %	23.37 %
La Pintana	32.09 %	4.97 %	33.78 %	1.86 %	27.30 %
La Reina	27.21 %	20.17 %	25.20 %	0.24 %	27.17 %

Las Condes	14.76 %	26.10 %	19.07 %	0.60 %	39.47 %
Lo Barnechea	23.78 %	18.98 %	30.45 %	1.96 %	24.84 %
Lo Espejo	32.61 %	6.20 %	37.16 %	0.89 %	23.14 %
Lo Prado	51.18 %	5.70 %	18.82 %	0.00 %	24.30 %
Macul	40.48 %	6.45 %	23.82 %	0.77 %	28.49 %
Maipú	38.58 %	5.81 %	29.13 %	0.73 %	25.75 %
Ñuñoa	25.98 %	19.91 %	16.70 %	0.60 %	36.81 %
Pedro Aguirre Cerda	39.81 %	6.32 %	21.41 %	1.32 %	31.14 %
Peñalolén	38.00 %	13.46 %	25.63 %	0.76 %	22.15 %
Providencia	15.51 %	29.00 %	13.34 %	0.44 %	41.72 %
Pudahuel	41.80 %	6.23 %	26.54 %	0.00 %	25.43 %
Quilicura	46.51 %	6.38 %	20.10 %	0.11 %	26.90 %
Quinta Normal	29.32 %	5.85 %	35.01 %	0.00 %	29.82 %
Recoleta	35.74 %	5.75 %	30.04 %	0.91 %	27.55 %
Renca	36.23 %	5.98 %	32.59 %	1.14 %	24.06 %
San Joaquín	44.20 %	6.03 %	24.94 %	1.44 %	23.39 %
San Miguel	37.26 %	7.43 %	20.66 %	0.00 %	34.65 %
San Ramón	33.48 %	4.94 %	35.75 %	0.48 %	25.35 %
Vitacura	8.99 %	34.66 %	23.60 %	0.00 %	32.76 %
Puente Alto	38.92 %	9.62 %	21.84 %	1.49 %	28.14 %
Pirque	22.76 %	6.59 %	6.00 %	40.40 %	24.25 %
San José de Maipo	21.99 %	6.27 %	5.57 %	44.18 %	21.99 %
Colina	26.21 %	6.49 %	21.81 %	17.37 %	28.13 %
Lampa	25.14 %	8.99 %	13.51 %	24.87 %	27.49 %
Tiltil	36.97 %	6.10 %	5.72 %	26.61 %	24.59 %
San Bernardo	38.00 %	7.20 %	22.97 %	4.25 %	27.59 %
Buín	23.96 %	7.03 %	22.05 %	23.05 %	23.91 %
Calera de Tango	29.41 %	5.89 %	15.96 %	26.38 %	22.36 %
Paine	12.81 %	5.27 %	23.55 %	32.49 %	25.88 %
Melipilla	36.88 %	5.61 %	11.19 %	18.13 %	28.19 %
Alhué	18.71 %	6.32 %	2.66 %	49.78 %	22.53 %
Curacaví	26.03 %	8.92 %	16.96 %	21.27 %	26.81 %
María Pinto	22.87 %	5.34 %	6.78 %	32.20 %	32.80 %
San Pedro	22.09 %	8.74 %	6.66 %	40.81 %	21.69 %
Talagante	28.38 %	8.49 %	18.18 %	19.90 %	25.06 %
El Monte	20.06 %	5.69 %	16.70 %	33.42 %	24.14 %
Isla de Maipo	24.40 %	6.99 %	8.40 %	37.02 %	23.19 %
Padre Hurtado	26.11 %	7.98 %	23.29 %	20.66 %	21.96 %
Peñaflor	33.06 %	5.45 %	19.86 %	12.88 %	28.75 %

Tabla C.3: Proyección participación calefacción casas

Comuna	GLP	GN	Kerosene	Leña	Electricidad
Santiago	17.82 %	11.89 %	8.60 %	0.00 %	61.69 %
Cerrillos	31.06 %	4.93 %	27.36 %	0.00 %	36.65 %
Cerro Navia	31.69 %	5.17 %	25.21 %	0.00 %	37.93 %
Conchalí	32.14 %	12.01 %	20.30 %	0.00 %	35.55 %
El Bosque	29.86 %	6.45 %	25.92 %	0.00 %	37.76 %
Estación Central	33.23 %	14.97 %	14.52 %	0.00 %	37.29 %
Huechuraba	37.29 %	5.62 %	24.69 %	0.00 %	32.40 %
Independencia	21.03 %	7.65 %	34.78 %	0.00 %	36.54 %
La Cisterna	29.23 %	7.58 %	24.14 %	0.00 %	39.05 %
La Florida	30.41 %	10.50 %	23.73 %	0.00 %	35.36 %
La Granja	35.73 %	5.47 %	22.77 %	0.00 %	36.02 %
La Pintana	24.33 %	4.80 %	32.99 %	0.00 %	37.89 %
La Reina	20.62 %	19.92 %	24.61 %	0.00 %	34.85 %
Las Condes	11.18 %	25.94 %	18.62 %	0.00 %	44.25 %
Lo Barnechea	18.02 %	18.85 %	29.73 %	0.00 %	33.40 %
Lo Espejo	24.71 %	5.88 %	36.28 %	0.00 %	33.13 %
Lo Prado	38.79 %	5.58 %	18.38 %	0.00 %	37.26 %
Macul	30.68 %	6.31 %	23.26 %	0.00 %	39.75 %
Maipú	29.24 %	5.59 %	28.45 %	0.00 %	36.72 %
Ñuñoa	19.69 %	19.81 %	16.31 %	0.00 %	44.19 %
Pedro Aguirre Cerda	30.18 %	6.28 %	20.90 %	0.00 %	42.64 %
Peñalolén	28.80 %	13.30 %	25.02 %	0.00 %	32.88 %
Providencia	11.76 %	28.90 %	13.02 %	0.00 %	46.32 %
Pudahuel	31.69 %	5.97 %	25.92 %	0.00 %	36.43 %
Quilicura	35.25 %	6.24 %	19.63 %	0.00 %	38.88 %
Quinta Normal	22.22 %	5.44 %	34.18 %	0.00 %	38.15 %
Recoleta	27.09 %	5.54 %	29.33 %	0.00 %	38.04 %
Renca	27.46 %	5.75 %	31.82 %	0.00 %	34.96 %
San Joaquín	33.50 %	5.97 %	24.35 %	0.00 %	36.18 %
San Miguel	28.24 %	7.25 %	20.17 %	0.00 %	44.34 %
San Ramón	25.38 %	4.59 %	34.90 %	0.00 %	35.14 %
Vitacura	6.81 %	34.35 %	23.04 %	0.00 %	35.80 %
Puente Alto	29.50 %	9.59 %	21.32 %	0.00 %	39.59 %
Pirque	17.25 %	11.27 %	5.86 %	0.00 %	65.62 %
San José de Maipo	16.67 %	11.39 %	5.44 %	0.00 %	66.51 %

Colina	19.86 %	8.28 %	21.29 %	0.00 %	50.57 %
Lampa	19.05 %	11.76 %	13.19 %	0.00 %	55.99 %
Tiltil	28.02 %	9.22 %	5.59 %	0.00 %	57.17 %
San Bernardo	28.80 %	7.47 %	22.43 %	0.00 %	41.30 %
Buín	18.16 %	9.47 %	21.53 %	0.00 %	50.85 %
Calera de Tango	22.29 %	8.81 %	15.59 %	0.00 %	53.31 %
Paine	9.71 %	8.75 %	23.00 %	0.00 %	58.54 %
Melipilla	27.95 %	7.67 %	10.92 %	0.00 %	53.46 %
Alhué	14.18 %	12.13 %	2.60 %	0.00 %	71.10 %
Curacaví	19.73 %	11.23 %	16.56 %	0.00 %	52.47 %
María Pinto	17.33 %	9.06 %	6.62 %	0.00 %	66.98 %
San Pedro	16.75 %	13.45 %	6.50 %	0.00 %	63.30 %
Talagante	21.51 %	10.62 %	17.75 %	0.00 %	50.12 %
El Monte	15.20 %	9.39 %	16.30 %	0.00 %	59.10 %
Isla de Maipo	18.49 %	11.24 %	8.20 %	0.00 %	62.06 %
Padre Hurtado	19.79 %	10.13 %	22.74 %	0.00 %	47.34 %
Peñaflor	25.06 %	6.76 %	19.39 %	0.00 %	48.79 %

Tabla C.4: Proyección participación calefacción departamentos