



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA ISLA DE CALOR
URBANA SUPERFICIAL Y EL CRECIMIENTO
POBLACIONAL A ESCALA LOCAL EN CHILE ENTRE EL
AÑO 2008 Y 2018

Memoria para optar al título de Geógrafa

CATALINA INÉS TORO ARAYA

Profesora Guía: Pamela Smith G.

Santiago – Chile
2021

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que me han acompañado y conocido en este proceso educativo, a quienes agradezco de todo corazón su constante apoyo y ánimo durante todo el período en el que me formé como profesional.

En primer lugar, a mi mamá, la Pili, quien me brindó todas las oportunidades y consejos en esta vida, por siempre estar conmigo y apoyarme en todas mis decisiones sin reclamar ni interferir. Gracias a su esfuerzo y perseverancia pude estudiar, y es a ella a quien le debo todo lo que tengo y lo que soy. A mis hermanas, Andrea, Millaray y Francisca, y mi mejor amigo Jorge, que pese a cada “es que ustedes no entienden” de parte mía, siempre entendieron y apoyaron, les quiero y agradezco millones.

Agradezco la amistad de muchas personas, y espero llevarles conmigo en todos los nuevos proyectos que se den de ahora en adelante. A mis K, quienes fueron parte fundamental de este proceso de frustración e incertidumbre. A Isidora, por su constante compañía, las videollamadas nocturnas en época de encierro, el pancito de masa madre, por enseñarme que los abrazos siempre son el mejor remedio. A Ana, por jamás juzgarme por mis gustos bizarros, por recorrer todos los locales de comida exótica, por las risas y llantos, y su cariño incondicional. Gracias por incluirme en sus familias y hogares, espero tenerlas por siempre, y que nuestras aventuras matutinas no se acaben jamás.

A Coke, por su compañía en el proceso de práctica, por los tabacos compartidos, los memes y los lunes de animé. Gracias porque a pesar del tiempo, la confianza y atención siempre es la misma.

Agradezco enormemente a mi profesora guía Pamela, por confiar en mí y mi trabajo, por la orientación en el desarrollo de este proyecto, y por brindarme distintas oportunidades para desarrollarme como profesional. A ella y todos los profesores que fueron parte de mi vida universitaria, muchas gracias.

Finalmente, agradezco a mi Tata Carlos que, si bien no está conmigo, fue y siempre será parte importante en mi vida, y espero llenarlo de orgullo esté donde esté.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	3
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	6
Resumen	7
Capítulo 1: Presentación	8
1.1 Introducción	8
1.2 Planteamiento del Problema	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 General	10
1.3.2 Específicos	10
1.4 Estado del asunto	10
1.4.1. Isla de calor: tipología y sus efectos	10
A. Isla de Calor Superficial	11
B. Isla de Calor Atmosférica del Palio Urbano	11
1.4.2 Efectos y consecuencias de la isla de calor urbana	12
1.4.3. Factores condicionantes de la isla de calor	13
Capítulo 2: Planteamiento metodológico	15
2.1 Área de estudio	15
2.2 Metodología	17
2.2.1 Revisión de Datos y Antecedentes	17
2.2.2 Cálculo de la isla de calor urbana superficial	17
2.2.3 Análisis de los resultados	20
Capítulo 3: Resultados	23
3.1 Intensidad de la Isla de Calor Urbana en las ciudades chilenas	23
A. Verano Nocturna	23
B. Invierno Nocturna	26
C. Verano Diurna	29
D. Invierno Diurna	32
3.2 Relación entre la Isla de Calor Urbana y el crecimiento poblacional en las ciudades chilenas	35
A. Verano Nocturna	35
B. Invierno Nocturna	37

C. Verano Diurna	39
D. Invierno Diurna	41
Capítulo 4: Discusiones y Conclusiones	43
Bibliografía	46

Índice de Figuras

Figura N°1: Representación gráfica de las islas de calor urbana.....	11
Figura N°2 Cartografía del área de estudio.....	16
Figura N°3 Ejemplo de código de programación en GEE, estación invierno entre 2008 y 2018.....	19
Figura N°4 Cartografía de Temperatura Superficial promedio verano entre 2008 y 2018, período nocturno.....	25
Figura N°5 Cartografía de Temperatura Superficial promedio invierno entre 2008 y 2018, período nocturno.....	28
Figura N°6 Cartografía de Temperatura Superficial promedio verano entre 2008 y 2018, período diurno.....	31
Figura N°7 Cartografía de Temperatura Superficial promedio invierno entre 2008 y 2018, período diurno.....	34

Índice de Tablas

Tabla N°1 Macrozonas y zonas climáticas de las ciudades chilenas.....	15
Tabla N°2 Categorías de la isla de calor urbana según su intensidad.....	20
Tabla N°3 Categorías de relación entre ICUs y Crecimiento poblacional.....	21
Tabla N°4 Población años 2008, 2013 y 2018 en las ciudades chilenas	22
Tabla N°5 Intensidad de la isla de calor urbana de verano nocturna en los años 2008, 2013 y 2018.....	23
Tabla N°6 Intensidad de la isla de calor urbana de invierno nocturna en los años 2008, 2013 y 2018.....	26
Tabla N°7 Intensidad de la isla de calor urbana de verano diurna en los años 2008, 2013 y 2018.....	29
Tabla N°8 Intensidad de la isla de calor urbana de invierno diurna en los años 2008, 2013 y 2018.....	32
Tabla N°9 Relación entre ICU y crecimiento poblacional en el periodo verano nocturno.....	35
Tabla N°10 Relación entre ICU y crecimiento poblacional en el periodo invierno nocturno.....	37
Tabla N°11 Relación entre ICU y crecimiento poblacional en el periodo verano diurno.....	39
Tabla N°12 Relación entre ICU y crecimiento poblacional en el periodo invierno diurno.....	41

Resumen

El aumento de la población durante el último siglo ha conllevado al incremento exponencial de distintos fenómenos asociados al crecimiento urbano. Uno de los principales que se estudia en la actualidad es el calentamiento global y sus efectos, los cuales han derivado en diversos fenómenos de carácter climático que afectan principalmente a los centros urbanos del mundo. Uno de los que más destaca es la formación de la isla de calor urbana, donde Chile y sus principales ciudades, se han visto afectados, sobre todo en la última década.

Dentro de la presente investigación, se identificó y analizó el comportamiento de la isla de calor urbana superficial, que se define como la diferencia de temperaturas entre las superficies urbanas y rurales, así como su relación con el crecimiento poblacional. Este se realizó en las ciudades catalogadas como intermedias, que presentan una población entre 20.000 y 300.000 habitantes, mediante el uso de imágenes satelitales de temperatura superficial MODIS. El período de estudio comprende las estaciones de verano e invierno, en períodos diurnos y nocturnos, entre 2008 y 2018.

Los principales resultados concluyen que la isla de calor superficial se presenta en mayor intensidad en la macrozona central, en la estación de verano, durante el día con valores superiores a 7°C. Sin embargo, la relación existente entre la isla térmica y el crecimiento poblacional no es lo suficientemente fuerte, por lo cual es necesario generar nuevos estudios que identifiquen aquellos factores que inciden en la formación de la isla de calor urbana superficial a escala local en Chile.

Palabras claves: isla de calor urbana superficial, crecimiento poblacional, clima urbano

Capítulo 1: Presentación

1.1 Introducción

El calentamiento global es un fenómeno que se ha instaurado en las últimas décadas en el mundo, y el cual se refiere al incremento de la temperatura promedio global reciente (Caballero et al., 2007). Los resultados de estudios de los últimos cien años indican que la temperatura media se ha incrementado en un $0,1^{\circ}\text{C}$ por década aproximadamente (Power, 2009). Si bien no ha sido posible cuantificar cuánto de este incremento se les atribuye a causas naturales, y cuánto es atribuible a causas humanas, algunos resultados de modelados climáticos indican que, considerando solo la contribución por actividades humanas, se puede explicar el aumento tan marcado de temperatura, sobre todo en las últimas décadas (Caballero et al., 2007).

Según datos del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) en 2018, el clima de la tierra ha cambiado, y el mayor aumento de temperatura se ha dado después de 1976, donde la década de los noventa es la que se presenta como la más cálida (Letelier, 2020). El aumento del uso de combustibles fósiles para la producción de energía, así como fenómenos de crecimiento urbano y el desinterés por desarrollar nuevas tecnologías y no competitivas, son las principales causas del fenómeno (Power, 2009).

El aumento de áreas urbanas, y a su vez el crecimiento poblacional, así como su densidad, es de los fenómenos que más se ha estudiado en el último tiempo, ya que la morfología de las grandes ciudades, y los distintos factores que la caracterizan, han jugado un rol importantísimo en la aparición de nuevos fenómenos climáticos. Uno de estos es el de la isla térmica o isla de calor urbana, la cual corresponde a la diferencia de temperaturas entre el área urbana y rural (Letelier, 2020). Como explica la autora, mientras “*en los sistemas urbanos las áreas verdes proveen sombra, frescor, refugio de la lluvia, humedad y filtración de aire, en contraposición con las edificaciones que son estructuras que almacenan calor*” las cuales se presentan en mayor cantidad y densidad, “*en las áreas rurales, al presentar construcciones pequeñas y grandes extensiones de área verde, se almacena una cantidad pequeña de calor*” (Letelier, 2020).

Debido al alto impacto de estos factores en la ICU, tanto en su formación, así como las consecuencias que genera, es necesario su estudio y posterior análisis, con el fin de generar nuevas formas de planificación urbana, así como políticas que incluyan el factor climático en el diseño y acceso a la ciudad. La relación entre el crecimiento poblacional y la isla térmica, debido al aumento de la población, tanto en Chile como en el mundo, hacen imprescindible conocer hasta qué punto existe una relación entre ambos fenómenos, los cuales han sido estudiados en la siguiente investigación. Esta se enmarca dentro del proyecto Fondecyt N°11180990 "La construcción del clima urbano: hacia la calidad y justicia climática en las ciudades chilenas".

1.2 Planteamiento del Problema

El crecimiento urbano durante las últimas décadas se ha transformado en un fenómeno muy importante, ya que, según el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (2018), la población urbana a nivel mundial en el año 2018 alcanzaba un 55%, y se prevé que esta continuará creciendo exponencialmente alcanzando un 68% el año 2050. De esta forma, la situación implica una serie de desafíos, que incluyen la producción de nueva infraestructura residencial, así como para la producción de nuevas fuentes laborales, transformando la morfología urbana (Santamouris et al., 2001).

El efecto de la urbanización se puede observar fácilmente en todas las escalas espaciales, ya que en todas ellas el crecimiento urbano ha conllevado a la pérdida y reemplazo de las cubiertas de tierras naturales y agrícolas por suelos de uso urbano, que implican una transformación de los paisajes, así como una modificación del ciclo hidrológico, contaminación del aire, fragmentación de hábitats y la formación de un clima urbano (Smith, 2018).

A partir de lo anterior, y como explica Jáuregui (1995), a su vez, han surgido diversos estudios de climatología, debido principalmente a los cambios producidos en el clima, por la sustitución de áreas verdes y bosques a un tejido urbano que crece exponencialmente. Una de las principales transformaciones en el medio ambiente urbano, se ven relacionados con el incremento de la temperatura del aire y la superficie urbana (pavimentos, edificaciones, entre otros), y a su vez, el desarrollo de una isla de calor o térmica (Oke, 1990; Arnfield, 2003 en Cuadrat et al., 2005).

A mayor superficie construida, mayor es la alteración de los parámetros climáticos que contribuyen a regular el clima de la localidad, ya que disminuyen factores como el aporte de humedad por evapotranspiración artificial, así como la sombra de la vegetación, aumentando el impacto de la radiación solar, y en consecuencia el calentamiento, así como la emisividad de calor durante las primeras horas nocturnas (Sarricolea y Martín-Vidae, 2014).

Bajo estos antecedentes, Oke (1973) desarrolla una investigación de la isla de calor, y su directa relación con el tamaño de la ciudad, basado en la población, tanto en ciudades mediterráneas del continente europeo, como ciudades norteamericanas. Las ciudades estudiadas, presentaban una población de entre 1000 y 2 millones de habitantes, y los resultados indican que aquellas ciudades más pequeñas, presentaban un mayor aumento en su isla de calor al aumentar la cantidad de habitantes, a diferencia de aquellas ciudades de mayor escala.

Bajo este contexto, y entendiendo que cada ciudad presenta características y condiciones diferentes, cabe cuestionarse **¿Cuál es la relación entre el crecimiento de la población y la isla de calor urbana superficial a escala local, en las ciudades medias mayores y/o capitales regionales de Chile, en el período de 2008-2018?**

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Analizar la relación existente entre el tamaño de la población y la isla de calor urbana superficial tanto diurna como nocturna, en las estaciones de verano (Ene-Feb) e invierno (Jul-Ago) a escala local en las ciudades medias y/o capitales regionales de Chile, entre el período 2008 y 2018.

1.3.2 Específicos

1. Calcular la intensidad de la isla de calor urbana superficial de las ciudades medias mayores y/o capitales regionales de Chile.
2. Determinar la relación entre la isla de calor superficial y el tamaño de la ciudad según su cantidad de habitantes.

1.4 Estado del asunto

El primer acercamiento a este fenómeno se dio en 1817 con Luke Howard, quien descubrió la modificación térmica que presentaba Londres, donde indicó que el centro urbano tenía temperaturas más altas que sus alrededores, identificando así una clara diferencia de 2,2°C durante la noche (Moreno y Serra, 2016). Sin embargo, fue hasta 1958 que este fenómeno tuvo nombre, siendo denominada isla de calor urbana por Gordon Manley (Moreno y Serra, 2016).

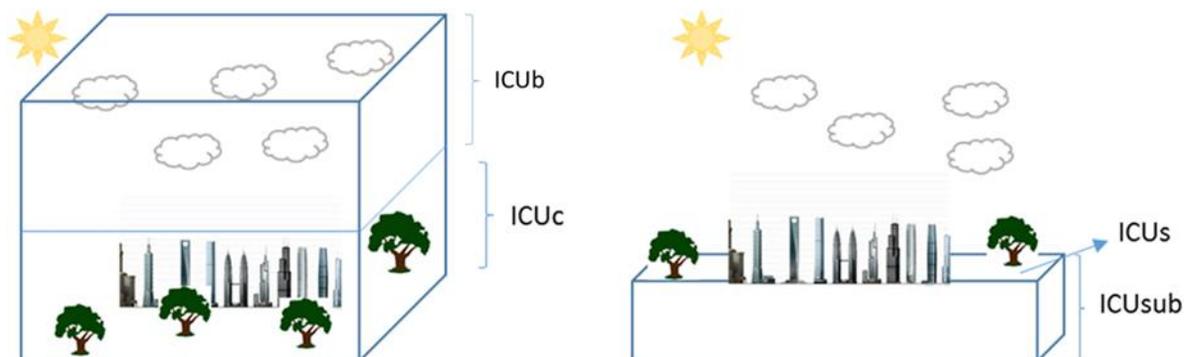
1.4.1. Isla de calor: tipología y sus efectos

Las islas de calor urbano (ICU) se definen por la diferencia de temperatura entre los espacios urbanos densamente ocupados y construidos y la periferia rural o peri-urbana (Córdova, 2011). Esta diferencia en temperaturas se debe principalmente a tres factores: la producción directa de calor por combustión, el desprendimiento gradual del calor almacenado por construcciones urbanas durante el día, y la radiación que es devuelta a la superficie terrestre por reflexión de la capa de contaminación atmosférica (Moreno y Serra, 2016). El patrón espacial general de las islas térmicas es concéntrico, donde las más altas temperaturas se encuentran en las áreas céntricas o más densamente construidas, y van disminuyendo progresivamente hacia la periferia (EPA, 2008).

Según Oke et al. (2017), es posible encontrar cuatro tipos de islas de calor (ver figura N°1), que son: la isla de calor subsuperficial (ICUsub), la isla de calor superficial (ICUs), la isla de calor atmosférica de la capa límite urbana o *boundary layer urban heat island* (ICUb) y la isla de calor atmosférica del palio urbano o *canopy layer urban heat island* (ICUc). La ICUsub corresponde a la diferencia de patrones de temperaturas entre el subsuelo urbano, incluyendo material natural que esté bajo la superficie urbana o el material por construcciones subterráneas, y los subsuelos del área rural (Oke et al, 2017). Por otro lado, la ICUb es la diferencia en la temperatura del aire que se encuentra entre el límite de las

copas de los árboles y edificios, y aquella parte de la atmósfera que ya no se ve influenciada por los cambios térmicos en la ciudad, generalmente entre 1 o 1,5 km de altura, y la temperatura del aire del área rural (Moreno y Serra, 2016). Sin embargo, son las ICUs y las ICUc aquellas islas térmicas que más interés generan en los estudios, por lo que requieren de una mayor descripción y análisis de sus características.

Figura N°1: Representación gráfica de las islas de calor urbana.



Fuente: Elaboración propia en base a Oke et al, 2017

A. Isla de Calor Superficial

Corresponde a la diferencia de temperaturas entre las superficies propiamente urbanas, como pavimentos, edificios, entre otros, y las superficies naturales de áreas rurales, que pueden ser cultivos, bosques nativos, desiertos o áreas rocosas (Moreno y Serra, 2016). A mayor superficie construida, mayor es la alteración de los parámetros climáticos que contribuyen a regular el clima de la localidad, ya que disminuyen factores como el aporte de humedad por evapotranspiración artificial, así como la sombra de la vegetación, aumentando el impacto de la radiación solar, y en consecuencia el calentamiento, así como la emisividad de calor durante las primeras horas nocturnas (Sarricolea y Martín-Vidae, 2014). La ICUc se presenta tanto en el día como la noche, sin embargo, es mucho más intensa durante el día, y en verano (Tamini, 2010). Según estudios realizados en ciudades de clima mediterráneo, sus intensidades varían entre 10° y 15° Celsius durante el día, y entre 5° y 10° durante la noche (Moreno y Serra, 2016). El método de identificación para este tipo de isla térmica corresponde a la teledetección, y su representación es una imagen térmica que represente los valores de temperatura en los que varía la imagen (Moreno y Serra, 2016).

B. Isla de Calor Atmosférica del Palio Urbano

Este tipo de isla térmica señala las diferencias de temperatura en el aire que está entre el suelo y las copas de los árboles y tejados de edificios, de las zonas urbanas y rurales (Oke

et al, 2017). Esta se desarrolla principalmente por el calor acumulado por las edificaciones y cuerpos que componen la ciudad, como techos, paredes, calles, entre otros, que se caracterizan por estar construidas con materiales que almacenan y conducen el calor recibido por insolación directa, y que posteriormente es devuelta a la atmósfera (Sarricolea et al, 2008). La ICUc se presenta a partir del atardecer, y es mucho más intensa durante la noche, en invierno (Tamini, 2010). Su intensidad varía entre 7° y 12°C durante la noche, y es casi inexistente en el período diurno la intensidad varía entre -1° y 3°C en ciudades con climas mediterráneos, sin embargo, tiende a variar según las condiciones y factores que inciden en el clima local de las áreas urbanas (Moreno y Serra, 2016). El método de identificación de esta isla es directo, y se realiza mediante estaciones meteorológicas fijas y transectos móviles, siendo representadas mediante un mapa de isotermas o una imagen térmica.

1.4.2 Efectos y consecuencias de la isla de calor urbana

Producto del aumento de la temperatura en el ambiente urbano, las ICU generan diversos efectos secundarios en la ciudad y su población. Según Godoy (2013), la relevancia del estudio de estas radica en los efectos nocivos para la salud y el medio ambiente que generan a corto, mediano y largo plazo.

Una de las primeras consecuencias de la ICU, es el aumento del consumo energético para el enfriamiento en los periodos de verano de las diversas construcciones que componen la ciudad (Tamini, 2010). El autor señala que, durante las últimas décadas el consumo para la refrigeración y enfriamiento se ha disparado significativamente, sobre todo en las ciudades europeas. A su vez indica que “hay que tener en cuenta que los sistemas de aire acondicionado usan energía eléctrica, lo que crea importantes problemas en el suministro energético, además de traducirse en un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, de los contaminantes como dióxidos de sulfuros, monóxido de carbono, los NOx y de las partículas volátiles producidas por la planta de generación” (Tamini, 2010, 3). De esta forma, se genera un ciclo en el cual, por mitigar los aumentos de temperatura, se genera un aumento en los factores que producen en un principio la isla de calor urbana. Además, los cambios de temperatura asociados al cambio climático, por factores tanto naturales como antropogénicos, también inciden en aumento del uso de sistemas de refrigeración o enfriamiento.

Bajo este contexto, se hace necesario tener en cuenta dos aspectos: el aumento de la potencia para alcanzar las condiciones de confort térmico y el tiempo de uso de los sistemas de refrigeración, ya que, en presencia de la ICU, la dispersión del calor acumulado en el día es más lenta, aumentando el uso de aire acondicionado pasando de 8 horas a 12 horas (Tamini, 2010).

Conti (2005, en Godoy 2013) explica que las ICU son fenómenos de estudio epidemiológico, pues existe una correlación entre el aumento de las temperaturas y el

incremento de las defunciones en la población urbana. Esto queda claramente evidenciado en los estudios de alta mortalidad sobre personas de 65 años o más, durante y después de unos días del efecto de las olas de calor según un estudio realizado las ciudades de Estados Unidos (Basu y Samet, 2002, en Godoy, 2013). Esta relación entre temperatura y mortalidad se intensifican en ciudades de clima templado, donde Godoy explica que se establece una relación no lineal que aumenta las tasas de mortalidad sobre los 34°C (2013).

Entre otros efectos negativos de la formación de las islas de calor urbanas, se puede identificar que durante la temporada de verano un incremento en el nivel de estrés hídrico de la vegetación, así como la deshidratación del suelo y la sequedad del aire (Córdova, 2011). Esto conlleva a un aumento en la generación de incendios forestales, ya que, debido a las altas temperaturas, la maleza tiende a crecer más rápido, y a su vez a secarse más rápido, por lo que el material presenta una mayor combustibilidad (Córdova, 2011). Además, es posible identificar la formación de otros fenómenos atmosféricos, como la calima, debido al aumento del material particulado en suspensión y la intensificación de la niebla por el humo de incendios, que ocasiona un incremento en mortalidad y enfermedades por patologías asociadas a cuadros alérgicos y respiratorios (CDC, 2010 en Córdova, 2011).

1.4.3. Factores condicionantes de la isla de calor

Como se mencionó anteriormente, las ICUs e ICUc, están fuertemente condicionadas por la densidad de edificaciones, siendo esto un factor importante en su morfología (Sarricolea et al, 2008). Sin embargo, autores como Fernández et al (2004, en Sarricolea et al, 2008), se refieren en particular a la importancia de las áreas verdes en la forma que se presenta la isla térmica. Estas áreas al ser relativamente frías, en comparación con las superficies construidas de su entorno, generan cambios en la morfología de la isla térmica, así la ICUb se diluye hasta desaparecer en estos sectores, especialmente en presencia de arbóreos (Sarricolea et al, 2008). En el caso de Barcelona, Moreno (1994, en Sarricolea et al, 2008) ratifica este fenómeno, explicando que las áreas verdes logran alterar y modificar la forma de las ICUc.

La densidad de población se presenta como otro factor condicionante de las islas de calor, asociado tanto al uso residencial como actividades económicas, ya que como describe Sailor (2004, en Gálvez, 2013), la forma de la isla a lo largo del día, también se explica en gran medida, por los cambios de densidad que se dan en la ciudad. Según Gálvez (2013), se ha confirmado que las zonas donde se localiza la mayor densidad de población, además es donde se encuentran los valores de temperatura más altos.

Por otro lado, existe una fuerte relación entre las islas de calor y la topografía, en este sentido, el viento juega un rol importante, ya que, al existir gran densidad de construcciones en altura en los centros urbanos, la oscilación de los vientos se dificulta, por lo que no existe un flujo constante de estos en estas zonas, manteniéndose e incluso aumentar la temperatura en estos sectores por la ausencia de ventilación (Sarricolea et al, 2008). De esta

forma, el pico de intensidad de la isla térmica se ubica en esta zona, sobretodo en ciudades grandes o metropolitanas, que tienden a poseer un centro urbano que se caracteriza por la presencia de edificios de gran altura.

El tamaño de la ciudad y la distribución de esta juega un rol muy importante, ya que se ha demostrado que, al incrementarse la superficie urbana, también aumenta la intensidad de la isla de calor (Cuadrat et al, 2005). Respecto a su distribución, las ciudades compactas tienden a presentar un pico de intensidad generalmente en el centro de la ciudad, ya que es donde se encuentran las edificaciones de mayor altura (Sarricolea et al, 2008). En el caso de las ciudades fragmentadas, al tener diversos polos de concentración, existen a su vez diversos puntos en los cuales se ubican los picos de intensidad de la isla de calor urbana.

En otros estudios, también se ha señalado la fuerte conexión entre la temperatura y la geometría de las calles. Eliason (1994 en Sarricolea et al, 2008), indica que la orientación longitudinal de las calles y el bajo factor de visión del cielo dentro del cañón urbano (calles con edificios a ambos lados) influyen en las características de la isla térmica. En este sentido, se intensifica la isla de calor superficial, debido a la reflectancia que se genera entre el pavimento y las paredes de los edificios (Godoy, 2013).

Tamini (2010), entiende que el aumento de la temperatura está dado en *“la reducción de la amplitud térmica diaria, en una peculiar distribución de los vientos de la ciudad, consecuencia del rozamiento con los edificios y encauzamiento en las avenidas, y en un balance hídrico diferente al existente en los espacios rurales”*. Así mismo, el autor explica que las principales causas por las que se generan las ICU, son debido a la sustitución de las superficies vegetales, a la diferente absorción de los rayos solares de los materiales por sus características de reflectancia, o inercia térmica, al calor generado por fuentes antropogénicas, y a la contaminación atmosférica (Tamini, 2010). Este último factor, es mencionado en diversos estudios, donde Taulé (2012) explica que las partículas contaminantes no permiten que la radiación emitida por la superficie de la ciudad escape a la atmósfera, devolviéndola al suelo, produciendo un aumento de la temperatura, e intensificando la ICUs.

Bajo este contexto, se entiende que existen diferencias en la formación de las distintas islas de calor, sin embargo, también es posible inferir que existe una relación entre los factores condicionantes de la ICUs y la ICUc, existen factores condicionantes que afectan de manera indirecta al otro tipo de isla térmica. Ejemplo de esto, es que la temperatura de las superficies urbanas obtenida por la radiación o insolación solar directa es emitida durante la tarde y noche, generando un calentamiento de la masa de aire y formando la isla de calor atmosférica del palio urbano.

Capítulo 2: Planteamiento metodológico

2.1 Área de estudio

El área de estudio para el análisis de la isla de calor urbana superficial corresponde a 44 ciudades clasificadas como intermedia y/o capital regional (20.000 a 300.000 habitantes), de acuerdo con la clasificación realizada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (en Maturana y Muñoz, 2007). Esta selección se debe al crecimiento del área urbana en distintas zonas del país, incrementando a su vez el número de ciudades clasificadas en esta categoría (Maturana y Muñoz, 2007).

Tabla N°1 Macrozonas y zonas climáticas de las ciudades chilenas

Ciudad	Latitud	Longitud	Zona Climática	Abreviación	Macrozona
Arica	18,47° S	70,31° W	Clima desértico calido	BWh	NORTE
Iquique	20,23° S	70,13° W	Clima desértico calido	BWh	
Alto Hospicio	20,26° S	70,10° W	Clima desértico frío	BWk	
Calama	22,45° S	68,92° W	Clima desértico frío	BWk	
Antofagasta	23,65° S	70,39° W	Clima desértico calido	BWh	
Copiapó	27,36° S	70,33° W	Clima desértico frío de lluvia invernal	BWk (s)	
Caldera	27,06° S	70,81° W	Clima semiárido de lluvia invernal e influencia costera	BSk (s) (i)	
La Serena	29,90° S	71,25° W	Clima semiárido de lluvia invernal e influencia costera	BSk (s) (i)	
Coquimbo	29,95° S	71,33° W	Clima semiárido de lluvia invernal e influencia costera	BSk (s) (i)	
Ovalle	30,60° S	71,19° W	Clima semiárido de lluvia invernal	BSk (s)	
San Felipe	32,75° S	70,72° W	Clima semiárido de lluvia invernal	BSk (s)	CENTRO NORTE
Los Andes	32,83° S	70,59° W	Clima semiárido de lluvia invernal	BSk (s)	
Colina	33,20° S	70,67° W	Clima semiárido de lluvia invernal	BSk (s)	CENTRO
La Calera	32,78° S	71,20° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Quillota	32,88° S	71,24° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Villa Alemana	32,88° S	71,24° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Quilpué	33,04° S	71,44° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Olmué	32,99° S	71,18° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Limache	33,00° S	71,25° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Concón	32,92° S	71,51° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera	Csb (i)	
Cartagena	33,54° S	71,60° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera	Csb (i)	
San Antonio	33,59° S	71,60° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera	Csb (i)	
Santo Domingo	33,64° S	71,62° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera	Csb (i)	CENTRO SUR
Talagante	33,66° S	70,92° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Melipilla	33,68° S	71,21° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Buín	33,73° S	70,74° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Rancagua	34,17° S	70,74° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Machali	34,17° S	70,65° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
San Fernando	34,58° S	70,99° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Curicó	34,97° S	71,25° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Constitución	35,33° S	72,41° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera	Csb (i)	
Talca	35,42° S	71,64° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Linares	35,84° S	71,59° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	SUR
Chillán	36,60° S	72,10° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Coronel	37,03° S	73,14° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera	Csb (i)	
Los Ángeles	37,46° S	72,36° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Temuco	38,73° S	72,59° W	Clima mediterráneo de lluvia invernal	Csb	
Valdivia	39,81° S	73,24° W	Clima templado lluvioso con leve sequedad estival e influencia costera	Cfb (s) (i)	
Osorno	40,57° S	73,11° W	Clima templado lluvioso con leve sequedad estival	Cfb (s)	
Puerto Montt	41,46° S	72,94° W	Clima templado lluvioso e influencia costera	Cfb (i)	
Coyhaique	45,57° S	72,06° W	Clima templado lluvioso	Cfb	
Punta Arenas	53,16° S	70,91° W	Clima mediterráneo frío de lluvia invernal	Csc	

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.2 Metodología

La presente investigación se realizó mediante una metodología cuantitativa, ya que tanto el cálculo de la intensidad de la isla de calor urbana superficial, así como la relación existente entre esta y el tamaño de la población en las distintas ciudades que componen este estudio depende de datos y procesos cuantitativos. A continuación, se describen las etapas de las cuales consistió esta investigación.

2.2.1 Revisión de Datos y Antecedentes

Esta primera etapa se centró en la recopilación de datos y antecedentes referidos tanto a las ciudades que componen este estudio, así como a los conceptos claves y atingentes para esta investigación, los cuales comprenden tanto el desarrollo como el análisis de los resultados. A partir de esta información, es que se definieron las 4 macrozonas para un análisis en base a la zona climática en que se emplazan.

Se realizó una revisión bibliográfica, la cual permitió definir y reconocer información pertinente en relación con las componentes geográficas del área de estudio (demografía, zonas climáticas, altitud e hidrografía), así como información geoespacial en formato vectorial, de las que se pudo extraer los datos pertinentes para el análisis de las distintas ciudades (área urbana y límites administrativos). A partir del límite de área urbana de cada ciudad, se definió el área de influencia para la identificación y el análisis de la ICUs, la que corresponde a 25 kilómetros adicionales al área urbana definida.

2.2.2 Cálculo de la isla de calor urbana superficial

Con el fin de obtener la intensidad de la isla térmica en las ciudades definidas para esta investigación, fue necesario el uso de imágenes satelitales térmicas, que indiquen las temperaturas de las diversas superficies que componen tanto el área urbana como rural. Se utilizó las que corresponden al sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), de temperatura y emisividad, posteriormente procesadas para el cálculo de la ICUs diurnas y nocturnas.

A. Obtención de imágenes satelitales y escala temporal

Mediante el uso de la plataforma Explorer de Google Earth Engine (GEE), la cual permite visualizar y analizar imágenes de satélite a nivel planetario, se seleccionaron las imágenes a partir de las cuales se detectó la ICUs de cada ciudad. Del sensor MODIS, se utilizó específicamente los satélites Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily ('MODIS/006/MOD11A1') y Aqua Land Surface Temperature and Emissivity Daily ('MODIS/006/MYD11A1'). Entre sus características está su resolución de 1km, es de carácter diario, y su principal objetivo es ilustrar la temperatura superficial de la tierra.

Con el fin de evidenciar y analizar los cambios de los que ha sido afecto el fenómeno a estudiar, el periodo de estudio seleccionado corresponde a la estación de verano (considerando los meses de enero y febrero) e invierno (julio y agosto) tanto diurno como nocturno. Se seleccionó los años 2008, 2013 y 2018 para analizar la evolución de las ICUs, así como un promedio entre 2008 y 2018, para ilustrar a grandes rasgos la intensidad de la isla térmica en el área de estudio.

B. Programación de código para la obtención de imágenes satelitales de temperatura superficial a través de GEE

En esta etapa, los datos obtenidos fueron procesados para identificar los puntos a contrastar en el área urbana y el área rural. Para esto, las imágenes seleccionadas fueron procesadas en un código programado en la plataforma Code Editor de GEE (Figura 3), para así seleccionar tanto los periodos, así como la proyección y resolución de las imágenes de temperatura superficial.

En primer lugar, se seleccionaron las bandas a trabajar, siendo estas ‘LST_Day_1km’ para el día, y ‘LST_Night_1km’ para la noche. En ambos casos, se unieron las bandas del sensor TERRA y el sensor AQUA, para obtener el registro de las temperaturas superficiales. Luego, se utilizó un filtro de fecha, que permitió seleccionar el año y los meses, a los cuales se les aplicó un promedio para obtener una imagen por cada periodo definido anteriormente.

Las imágenes del sensor MODIS, ilustran la temperatura en grados Kelvin y un factor de escala de 0.02, por lo cual, se aplicó la fórmula $^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{K}(0.2) - 273.15$, para trabajar en grados Celsius y ajustar los datos. Posteriormente, se seleccionó y atribuyó la proyección en la cual se trabajó tanto la imagen como los datos geoespaciales, siendo esta Universal Transversal Mercator, Datum WGS84, Huso 19 sur.

C. Correcciones

Finalmente, y antes de exportar las imágenes, con el fin de establecer una resolución que permita un análisis a nivel local, se realizó un resampleo bilinear, que permite suavizar los pixeles mediante una interpolación de los valores de las celdas cercanas. Este cambio en la resolución primero se realizó a 400 metros, y posteriormente se suavizó a 200 metros. Las imágenes se exportaron mediante la nube a una carpeta Drive, y se descargó para el cálculo de la intensidad de las ICUs.

Figura N°3 Ejemplo de código de programación en GEE, estación invierno entre 2008 y 2018

```
//CARGAR ID MODIS
var TerraModis = ee.ImageCollection("MODIS/006/MOD11A1").select('LST_Day_1km');
var AquaModis = ee.ImageCollection("MODIS/006/MYD11A1").select('LST_Day_1km');
var MergeLST = ee.ImageCollection(TerraModis.merge(AquaModis));

// DEFINIR FECHAS
var Filtro = MergeLST.filter(ee.Filter.calendarRange(2008, 2018,'year')).filter(ee.Filter.calendarRange(7,8,'month'));
var LSTpromedio = Filtro.mean();
print(LSTpromedio);

//CONVERTIR K° A C°. CREAR PALETA DE COLORES. ADHERIR AL MAPA
var Conversion_Promedio = LSTpromedio.expression('(LST*0.02)-273.15',{'LST':LSTpromedio.select('LST_Day_1km')});
var Color = ['#f35105','#f37505','#a50026','#d73027','#46d43','#dae61','#fee090','#ffffbf',
'#e0f3f8','#abd9e9','#74add1','#4575b4','#313695'];
var Viz = {min:-30, max:50,palette: Color.reverse()};
Map.addLayer(Conversion_Promedio,Viz,'LST*');

//PROYECTAR IMAGEN
var UTMHUSO19S = '\
PROJCS["WGS_1984_UTM_Zone_19S",\
GEOGCS["GCS_WGS_1984",\
DATUM["D_WGS_1984",\
SPHEROID["WGS_1984",\
PRIMEM["Greenwich",0],\
UNIT["Degree",0.0174532925199433]],\
PROJECTION["Transverse_Mercator"],\
PARAMETER["False_Easting",500000.0],\
PARAMETER["False_Northing",10000000.0],\
PARAMETER["Central_Meridian",-69.0],\
UNIT["Meter",1],\
AUTHORITY["EPSG","32719"]];\

var Proyeccion_UTM19S = ee.Projection(UTMHUSO19S);
var Imagen_UTM19S = Conversion_Promedio.reproject({
  crs: Proyeccion_UTM19S,
  scale: 1000
});
var LST_Noche = Imagen_UTM19S.select('LST_Day_1km');
print('CRS:', Proyeccion_UTM19S);

• //RESAMPLEAR A 400 M
• var Imagen_400m = Imagen_UTM19S.resample('bilinear').reproject({
• crs: Proyeccion_UTM19S,
• scale: 400
• });

• // RESAMPLEAR A 200 M
• var Imagen_200m = Imagen_400m.resample('bilinear').reproject({
• crs: Proyeccion_UTM19S,
• scale: 200
• });

• //EXPORTAR IMAGEN A DRIVE
• var Geometria = ee.FeatureCollection(CIUDAD);

• Export.image.toDrive({
• image: Imagen_200m, //Nombre del objeto a descargar
• description: 'CIUDAD', //Nombre del archivo que queremos colocarle
• folder: '2018DI', //Nombre de la carpeta que queremos crear en nuestro google drive
• scale: 200, //Resolución final de nuestra imagen
• region: CIUDAD, //Polígono en la cual nuestra imagen se va a recortar
• maxPixels:1.0e9
• });
```

Fuente: Elaboración propia, 2020 (Código GEE)

C. Criterios para el cálculo de la intensidad de la isla de calor urbana superficial

Para identificar la intensidad de la ICUs de cada ciudad que compone esta investigación, se seleccionaron los puntos urbanos y rurales de referencia para cada ciudad. El punto urbano se definió considerando el punto de mayor temperatura dentro del área urbana, definido a partir del promedio 2008-2018 de la temperatura de emisión superficial. El punto rural se definió considerando el punto de menor temperatura en el área rural, y que además cumplía con las siguientes características:

- Distancia de cursos y cuerpos de agua equivalente al punto del área urbana
- Igual zona climática
- Diferencia de alturas no mayor a 300 metros
- Representar el contexto rural que rodea a la ciudad (agrícola, vegetación natural, suelo desnudo, etc)
- Que el punto de estudio no se encuentre en un fondo de quebrada o humedal

Además, a ambos puntos se les aplicó un área de influencia de 500 metros, con el fin de obtener valores representativos de un área en particular, y no solo de un punto en específico.

Finalmente, para obtener los valores de la intensidad, se calculó la diferencia entre ambos puntos, en base a la siguiente ecuación:

$$\text{ICUs} = \text{Temperatura área urbana (T}^{\circ}\text{u)} - \text{Temperatura área rural (T}^{\circ}\text{r)}$$

2.2.3 Análisis de los resultados

A. Intensidad de la isla de calor urbana superficial

Con el fin de analizar y clasificar los valores de intensidad de las ICUs, se definieron las categorías adaptando las establecidas por Fernández-García (1996, en Sarricolea et al, 2008), las cuales se ilustran en la siguiente tabla.

Tabla N°2 Categorías de la isla de calor urbana según su intensidad

Gradiente térmico (en °C)	Categoría ICU
Menor a 2	Muy débil
2 - 4	Débil
4 - 6	Moderada
6 - 8	Fuerte
Mayor a 8	Muy fuerte

Fuente: Elaboración propia en base a Fernández-García (1996), en Sarricolea et al (2008), 2021

Estos resultados, también se analizaron y relacionaron con la clasificación climática actualizada de Köppen-Geiger (Sarricolea et al, 2016) en la cual se encuentra cada ciudad, con el fin de identificar patrones que puedan existir en las zonas climáticas que componen el territorio nacional.

B. Crecimiento poblacional en Chile

Posteriormente, se realizó una correlación entre el crecimiento poblacional y las ICUs de cada ciudad los años 2008, 2013 y 2018, con el cual se analizó la relación que existe entre estos valores. Para ello, se sometió a los valores a un proceso de análisis de datos en el programa Excel, el cual arrojó valores que se expresan en las categorías que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla N° 3 Categorías de relación entre ICUs y Crecimiento poblacional

Valor R	Categoría
Mayor a 0,9	Relación directa muy alta
0,7 – 0,9	Relación directa alta
Menor a 0,7	Baja o nula relación
Variables crecen de forma inversamente proporcional	Relación Inversa

Fuente: Elaboración propia, 2021

En el caso del crecimiento poblacional, en la siguiente tabla se puede observar la población de las ciudades, las cuales fueron obtenidas del Instituto Nacional de Estadísticas (2020). Para el año 2008 y 2013, fueron utilizadas las proyecciones de población basadas en los censos de población, mientras que para el año 2018, se utilizaron los datos del último Censo de Emergencia del año 2017.

Tabla N°4 Población en las ciudades chilenas, años 2008, 2013 y 2018

Ciudad	Pob. 2008	Pob. 2013	Pob. 2018	Ciudad	Pob. 2008	Pob. 2013	Pob. 2018
Alto Hospicio	86.042	100.566	113.098	Los Andes	63.472	65.174	66.572
Antofagasta	330.287	356.933	381.635	Los Angeles	191.984	204.496	212.875
Arica	205.044	220.684	232.628	Machalí	40.546	48.972	55.258
Buín	80.545	92.461	101.743	Melipilla	113.062	124.500	133.232
Calama	153.235	162.867	171.875	Olmué	16.021	17.265	18.314
Caldera	15.998	17.586	18.582	Osorno	159.741	166.249	170.129
Cartagena	19.898	22.014	23.795	Ovalle	107.150	112.657	117.221
Chillán	178.524	186.537	193.226	Puerto Montt	215.871	241.293	258.579
Colina	107.725	132.303	152.740	Punta Arenas	126.473	131.735	136.476
Concón	37.533	40.906	43.578	Quillota	84.670	89.691	93.787
Constitución	48.519	49.071	49.714	Quilpué	143.656	152.760	160.210
Copiapó	147.137	157.946	165.066	Rancagua	232.591	244.763	255.550
Coquimbo	184.685	218.993	239.467	San Antonio-1	90.551	92.390	94.364
Coronel	110.145	117.540	122.496	San Felipe	71.456	76.109	79.961
Coyhaique	55.415	58.327	60.005	San Fernando	70.008	73.163	76.009
Curicó	136.984	147.466	156.377	Santo Domingo	9.137	10.347	11.231
Iquique	174.518	190.437	202.891	Talagante	68.729	73.888	77.899
La Calera	51.470	52.108	52.715	Talca	216.627	223.771	230.644
La Serena	190.903	213.793	233.270	Temuco	272.969	286.138	295.839
Limache	43.401	45.929	47.999	Valdivia	156.221	165.071	171.725
Linares	90.502	94.434	98.039	Villa Alemana	111.669	122.613	131.544

Fuente: Elaboración propia, en base a INE (2020).

Capítulo 3: Resultados

3.1 Intensidad de la Isla de Calor Urbana en las ciudades chilenas

A. Verano Nocturna

Tabla N°5 Intensidad de la isla de calor urbana de verano nocturna en los años 2008, 2013 y 2018

Ciudad	Verano Nocturna			Ciudad	Verano Nocturna		
	2008	2013	2018		2008	2013	2018
Arica	0,81	1,02	1,49	San Antonio-Llolleo	2,14	2,65	2,68
Iquique	2,06	1,67	2,17	Santo Domingo	1,4	1,61	2,04
Alto Hospicio	1,93	3,36	2,66	Talagante	1,75	1,52	1,62
Calama	2,85	3,25	2,4	Melipilla	1,49	1,31	1,31
Antofagasta	3	2,96	2,83	Buin	1,95	1,87	2,21
Copiapó	2,05	2,14	1,82	Rancagua	2,82	2,2	2,48
Caldera	0,64	-0,08	0,76	Machalí	1,14	0,97	1,4
La Serena	1,86	2,03	2,19	San Fernando	1,8	0	1,19
La Serena Alta	1,54	1,8	1,99	Curicó	2,59	1,59	1,89
Coquimbo	0,68	0,77	0,82	Constitución	2,67	2,47	1,89
Ovalle	1,6	1,53	1,76	Talca	2,68	2	1,97
San Felipe	2,82	2,81	3,21	Linares	1,8	1,57	1,33
Los Andes	2,54	2,4	2,34	Chillan	1,97	1,71	0,91
Colina	1	1,76	2,21	Coronel	2,57	2,21	2,05
La Calera	1,41	1,75	1,67	Los Angeles	1,41	1,37	0,81
Quillota	2,05	2,08	2,32	Temuco	2,3	2,57	2,6
Villa Alemana	1,65	1,9	1,99	Valdivia (Centro)	0,58	0,7	0,78
Quilpué	1,79	1,87	1,9	Valdivia (Isla Teja)	2,21	2,58	2,76
Olmué	1,09	0,87	1,26	Osorno	2,7	2,32	2,63
Limache	1,88	1,65	1,89	Puerto Montt	1,26	1,27	0,8
Concón	1,5	1,97	2,05	Coyhaique	1,82	3,01	2,18
Cartagena	1,86	2,23	1,86	Punta Arenas	1,51	1,59	-0,4

Fuente: Elaboración propia (2021)

Los resultados de la isla de calor urbana superficial nocturna de verano, presentan una dinámica bastante homogénea entre las ciudades estudiadas, con intensidades que bordean entre una ICU débil a moderada, alcanzando un promedio de 1,8°C para cada año. En general, no existe un patrón asociado a cada zona climática, sin embargo, en el sector norte, donde predomina el clima desértico, es posible identificar en su mayoría ICUs de categoría débil en general

LEYENDA

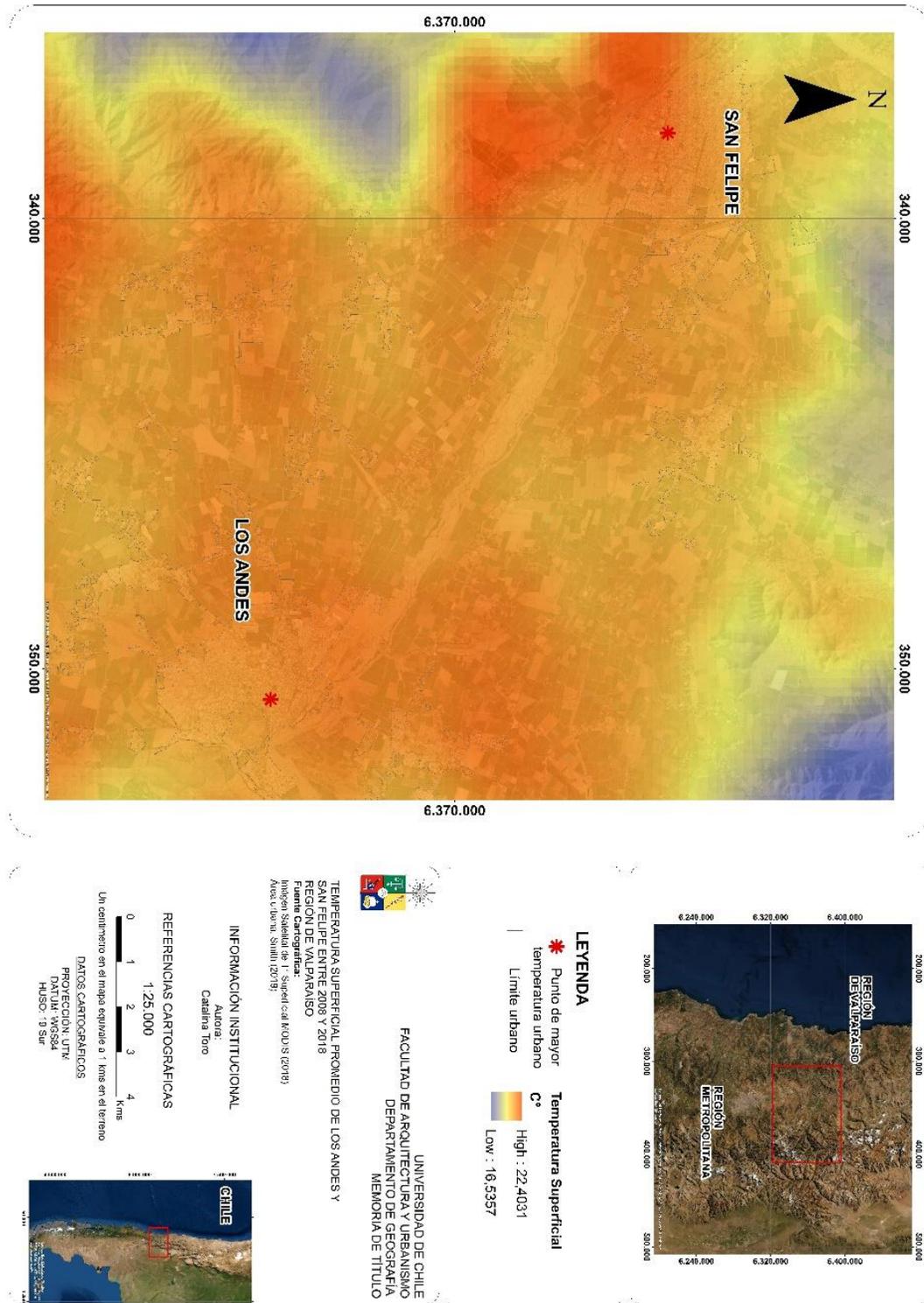
Muy Débil
Débil
Moderada
Fuerte
Muy fuerte

en todas las ciudades que componen esta zona.

En particular llaman la atención ciudades como Colina, Concón, Santo Domingo y Buin, que han presentado un cambio de débil a moderada en el año 2018, sobrepasando los 2°C de umbral. Por otro lado, ciudades como Copiapó, Curicó, Constitución, Talca y Punta Arenas, presentan una situación completamente distinta, ya que estas se caracterizan por pasar de ICU de carácter muy débil a débil, e incluso como es el caso de Punta Arenas, la ICU de verano nocturna en esta ciudad ya no es posible de observar.

A continuación, como ejemplo de la distribución de la temperatura superficial del período, en la figura N°4 se observan las ciudades de Los Andes y San Felipe, donde las temperaturas oscilan entre los 16° y 22°C. En este caso, y en general en las ciudades, durante la noche existe un patrón de temperaturas similar en las áreas rurales y urbanas, por lo que la isla de calor no se presenta con valores mayores a las categorías de débil y muy débil. Esto se debe principalmente a la concentración del calor de las superficies terrestres, las cuales liberan energía en forma de calor hacia la atmósfera durante la noche, lo cual se relaciona fuertemente con el fenómeno de ICU atmosférica.

Figura N° 4 Cartografía de Temperatura Superficial promedio de verano, entre 2008 y 2018, período nocturno



Fuente: Elaboración propia, 2021

B. Invierno Nocturna

Tabla N°6 Intensidad de la isla de calor urbana de invierno nocturna en los años 2008, 2013 y 2018

Ciudad	Invierno Nocturna			Ciudad	Invierno Nocturna		
	2008	2013	2018		2008	2013	2018
Arica	2,21	2,58	1,6	San Antonio-Llolleo	1,28	1,8	2,33
Iquique	1,17	1,04	3,1	Santo Domingo	1,12	2,01	2,53
Alto Hospicio	2,44	1,88	0,17	Talagante	1,1	1,51	1,04
Calama	2,49	1,75	1,93	Melipilla	1,55	1,79	1,47
Antofagasta	2,55	3,36	3,76	Buin	0,74	1,21	1,46
Copiapó	2,2	2,93	2,66	Rancagua	0,36	1,1	0,98
Caldera	0,1	-0,29	-0,54	Machalí	0,7	1,3	1,71
La Serena	2,77	3,23	3,22	San Fernando	0,66	0,85	0,75
La Serena Alta	1,69	2,15	2,33	Curicó	0,48	1,12	0,78
Coquimbo	0,03	0,01	-0,13	Constitución	2,28	2,15	2
Ovalle	1,72	2,11	1,85	Talca	1,66	1,44	2,13
San Felipe	3,6	4,53	4,67	Linares	1,15	0,93	0,4
Los Andes	1,07	2,93	2,87	Chillan	0,5	1,12	0,54
Colina	1,65	2,35	1,67	Coronel	1,09	2,35	2,04
La Calera	2,12	2,44	2,01	Los Angeles	1,22	1,87	1,43
Quillota	1,47	1,42	1,36	Temuco	0,93	1,55	0,99
Villa Alemana	-0,03	0,05	0,44	Valdivia (Centro)	-0,52	0,43	-0,35
Quilpué	0,12	0,02	0,25	Valdivia (Isla Teja)	0,52	1,72	1,31
Olmué	0,93	2	2,06	Osorno	0,97	1,88	1,43
Limache	1,71	2,52	2,17	Puerto Montt	-1,81	-1,37	-0,28
Concón	1,63	1,46	1,16	Coyhaique	0,26	0,32	0,66
Cartagena	1,83	2,23	2,64	Punta Arenas	0,2	-0,09	0,14

Fuente: Elaboración propia, 2021

A diferencia de la estación de verano, en invierno se puede distinguir un patrón particular para las ciudades ubicadas tanto en la zona norte como sur del país. Las ciudades ubicadas al centro norte y norte del país, presentan en su mayoría ICUs de categoría moderada. Destaca en particular la ciudad de San Felipe, que con intensidades de 4,53° y 4,67°C en 2013 y 2018 respectivamente, presenta una isla de calor fuerte. La zona

LEYENDA

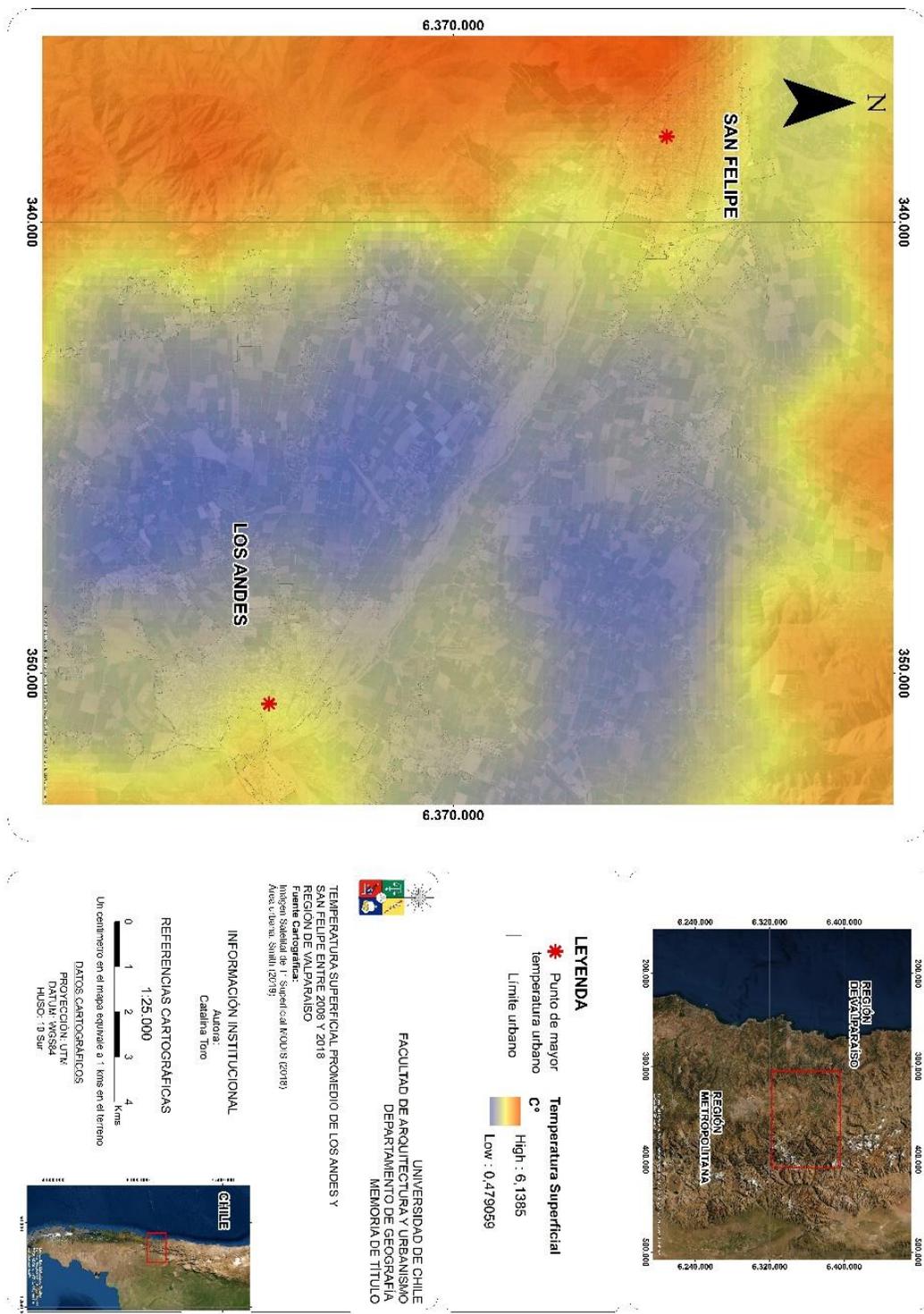
Muy Débil
Débil
Moderada
Fuerte
Muy fuerte

centro sur y sur, presentan mayoritariamente ICUs débiles e inexistentes, como es el caso de Puerto Montt.

En este caso, es posible observar un contraste entre los climas áridos y semiáridos ubicados en la zona norte, y los climas mediterráneos y templados que representan la zona central y sur de Chile. En algunos casos es posible identificar un aumento de la intensidad de la ICUs durante los años de estudios, como es el caso de Olmué y Cartagena, los cuales se ven reflejados en los promedios anuales de la isla térmica, siendo $1,17^{\circ}\text{C}$ en 2008, y $1,5^{\circ}\text{C}$ en 2013 y 2018.

En el caso de la temperatura superficial durante las noches de invierno, si es posible observar una clara predominancia del calor en las áreas urbanas, como se observa en la figura N°5 de las ciudades de San Felipe y Los Andes. Las temperaturas oscilan entre los 0° y 4°C , donde la mayor temperatura, como se observó en la tabla se ubica en la ciudad de San Felipe. Sin embargo, y como se observa en las islas térmicas, esta diferencia no es sustancial, ya que no genera una categoría superior a la de tipo moderada.

Figura N°5 Cartografía de Temperatura Superficial promedio de invierno, entre 2008 y 2018, período nocturno



Fuente: Elaboración propia, 2021

C. Verano Diurna

Tabla N°7 Intensidad de la isla de calor urbana de verano diurna en los años 2008, 2013 y 2018

Ciudad	Verano Diurna			Ciudad	Verano Diurna		
	2008	2013	2018		2008	2013	2018
Arica	-0,28	-0,33	-3,13	San Antonio-Llolleo	1,36	3,09	3,73
Iquique	7,65	7,14	7,47	Santo Domingo	-1,86	-3,19	-0,36
Alto Hospicio	-5,32	-4,84	-4,55	Talagante	5,19	5,65	5,1
Calama	-2,02	-2,29	-2,42	Melipilla	6,47	5,19	5,51
Antofagasta	-1,95	-1,72	-5,44	Buín	5,03	5,38	5,51
Copiapó	0,16	-0,28	-0,48	Rancagua	8,17	7,19	7,48
Caldera	3,51	2,4	2,75	Machalí	6,82	3,78	4,06
La Serena	-5,38	-4,52	-4,79	San Fernando	5,01	4,98	4,43
La Serena Alta	-2,73	-1,67	-2,12	Curicó	6,78	5,78	5,62
Coquimbo	1,94	2,32	3,33	Constitución	-0,6	0,81	2,42
Ovalle	2,53	1,95	3,08	Talca	5,75	5,99	4,27
San Felipe	8,2	8,32	8,66	Linares	4,32	3,65	3,92
Los Andes	7,71	7,3	6,85	Chillan	3,83	5,2	3,46
Colina	0,61	-2,21	-0,17	Coronel	5,31	3,58	4,27
La Calera	3,28	2,51	2,85	Los Angeles	6,95	6,4	5,73
Quillota	4,56	5,45	5,94	Temuco	1,17	3,75	3,61
Villa Alemana	2,63	3,93	3,29	Valdivia (Centro)	6,47	5,77	6,47
Quilpué	6,31	6,16	7,35	Valdivia (Isla Teja)	4,38	3,65	4,43
Olmué	1,39	1,15	0,7	Osorno	3,18	3,87	2,85
Limache	4,32	3,43	2,7	Puerto Montt	3,04	3,34	4
Concón	0,01	2,04	1,8	Coyhaique	0,8	2,84	1,77
Cartagena	-1,39	0,76	0,02	Punta Arenas	1,78	1,92	0,35

Fuente: Elaboración propia, 2021

LEYENDA

Muy Débil
Débil
Moderada
Fuerte
Muy fuerte

Durante el día en la estación de verano, se presenta una heterogeneidad de la isla térmica superficial en las distintas ciudades que componen este estudio. En la zona norte, a diferencia de la situación durante la noche en ambas estaciones, predomina una inexistencia de la ICUs, existiendo pocas excepciones como Caldera, con una isla de categoría moderada, pero que a su vez a lo largo de los años ha ido disminuyendo en temperatura en casi 1°C. Destaca en esta zona Iquique, que presenta una isla de calor muy fuerte, alcanzando una intensidad de 7°C durante los 3 años estudiados.

Avanzando a la zona central, destacan las ciudades de San Felipe, los Andes, Quilpué y Rancagua, con una isla térmica de categoría muy fuerte. San Felipe ha presentado un aumento a lo largo de los años de su isla de calor, pasando de los 8,2° a los 8,7°C de intensidad. Quilpué también se caracteriza por presentar un aumento durante los años, pasando de 6,3° a 7,35°C.

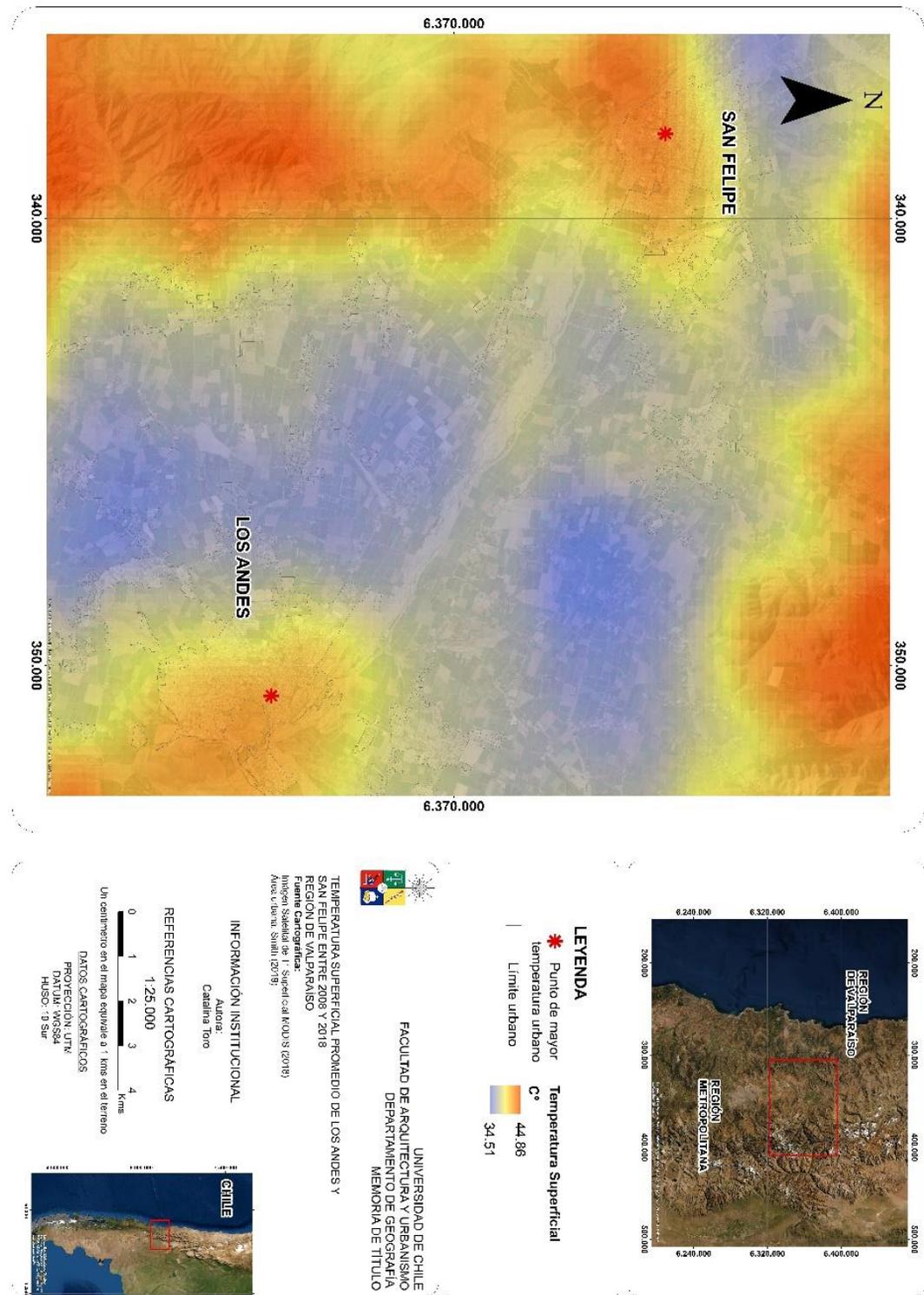
Por otra parte, en Los Andes y Rancagua se da una situación completamente inversa, donde la isla de calor ha ido disminuyendo entre el año 2008 y 2018, de 7,71° a 6,85°C en la primera, y de 8,17° a 7,48°C en la segunda.

En esta zona además se puede identificar ciudades que han pasado de una ICUs muy fuerte a una de categoría fuerte. Melipilla, Machalí y Curicó han disminuido sus intensidades de los 6° a los 5°C aproximadamente.

Finalmente, en la zona centro-sur y sur del país, comprende una ICUs heterogénea, con cambios entre una categoría moderada y fuerte, llegando a la zona austral a una de carácter débil, pero sin desaparecer. Los Ángeles y Valdivia destacan presentando temperaturas sobre los 6°, sin embargo, no se presenta un aumento constante de la temperatura.

Durante los días de verano, es cuando la ICU superficial se presenta mucho más fuerte. Esta se observa en la figura N°6, donde las temperaturas oscilan entre los 34° y 44°C, y se puede percibir una clara diferencia entre el área urbana y rural en las ciudades de Los Andes y San Felipe, que como ya se mencionó, son aquellas que presentan la ICU de mayor intensidad, tanto en la macrozona que se ubican, así como a nivel nacional. Las áreas verdes, compuestas principalmente de cultivos en esta zona, son esenciales en la regulación de la temperatura en el área rural, mientras la ciudad, debido a la alta concentración de edificaciones y carreteras, concentran mayormente el calor durante el día, alcanzando la categoría de intensidad muy fuerte fácilmente en esta zona en particular.

Figura N°6 Cartografía de Temperatura Superficial promedio de invierno, entre 2008 y 2018, período nocturno



Fuente: Elaboración propia, 2021

D. Invierno Diurna

Tabla N°8 Intensidad de la isla de calor urbana de invierno diurna en los años 2008, 2013 y 2018

Ciudad	Invierno Diurna			Ciudad	Invierno Diurna		
	2008	2013	2018		2008	2013	2018
Arica	-11,26	-2,09	-1,38	San Antonio-Llolleo	1,87	1,7	1,77
Iquique	0,93	-0,47	1,04	Santo Domingo	0,6	0,29	0,29
Alto Hospicio	-5,77	-6,27	-6,14	Talagante	1,47	1,31	1,29
Calama	-2,13	-2,59	-2,33	Melipilla	2,53	2,47	2,74
Antofagasta	-0,99	-0,95	-2,1	Buin	0,53	0,67	-0,25
Copiapó	-1,67	-1,5	-0,91	Rancagua	0,8	0,54	0,78
Caldera	1,86	2,22	1,5	Machalí	-0,27	-0,67	-0,58
La Serena	-1,98	-2,07	-1,94	San Fernando	0,82	1,29	0,13
La Serena Alta	-0,17	-0,25	-0,69	Curicó	1,31	1,28	1,05
Coquimbo	3,68	2,94	4,12	Constitución	0	0,42	0,5
Ovalle	2,99	1,76	2,81	Talca	1,12	0,52	-0,51
San Felipe	1,11	2,2	1,49	Linares	0,07	0,23	0,47
Los Andes	0,41	1,26	0,79	Chillan	-0,54	-0,67	0,3
Colina	1,72	-0,65	-1,66	Coronel	1,68	1,08	1,13
La Calera	2,13	2,12	1,82	Los Angeles	-0,65	-0,55	-0,49
Quillota	1,79	2,63	1,59	Temuco	0,45	0,2	0,51
Villa Alemana	4,02	3,69	3,8	Valdivia (Centro)	1,64	1,29	0,69
Quilpué	3,23	3,36	4,43	Valdivia (Isla Teja)	2,26	1,82	2,07
Olmué	-0,96	-0,2	-0,5	Osorno	0,42	0,11	0,69
Limache	0,69	1,74	0,99	Puerto Montt	-1,05	-0,01	-1,23
Concón	1,58	1,87	1,59	Coyhaique	0,39	-0,43	-1,53
Cartagena	1,21	0,51	0,46	Punta Arenas	1,23	-0,25	0,21

Fuente: Elaboración propia, 2021

Los días invernales presentan un claro patrón en las distintas zonas climáticas del país. El área desértica en el norte, presenta una ausencia de la isla de calor superficial, entre Arica y La Serena. Alto Hospicio destaca con una diferencia negativa de

LEYENDA

Muy Débil
Débil
Moderada
Fuerte
Muy fuerte

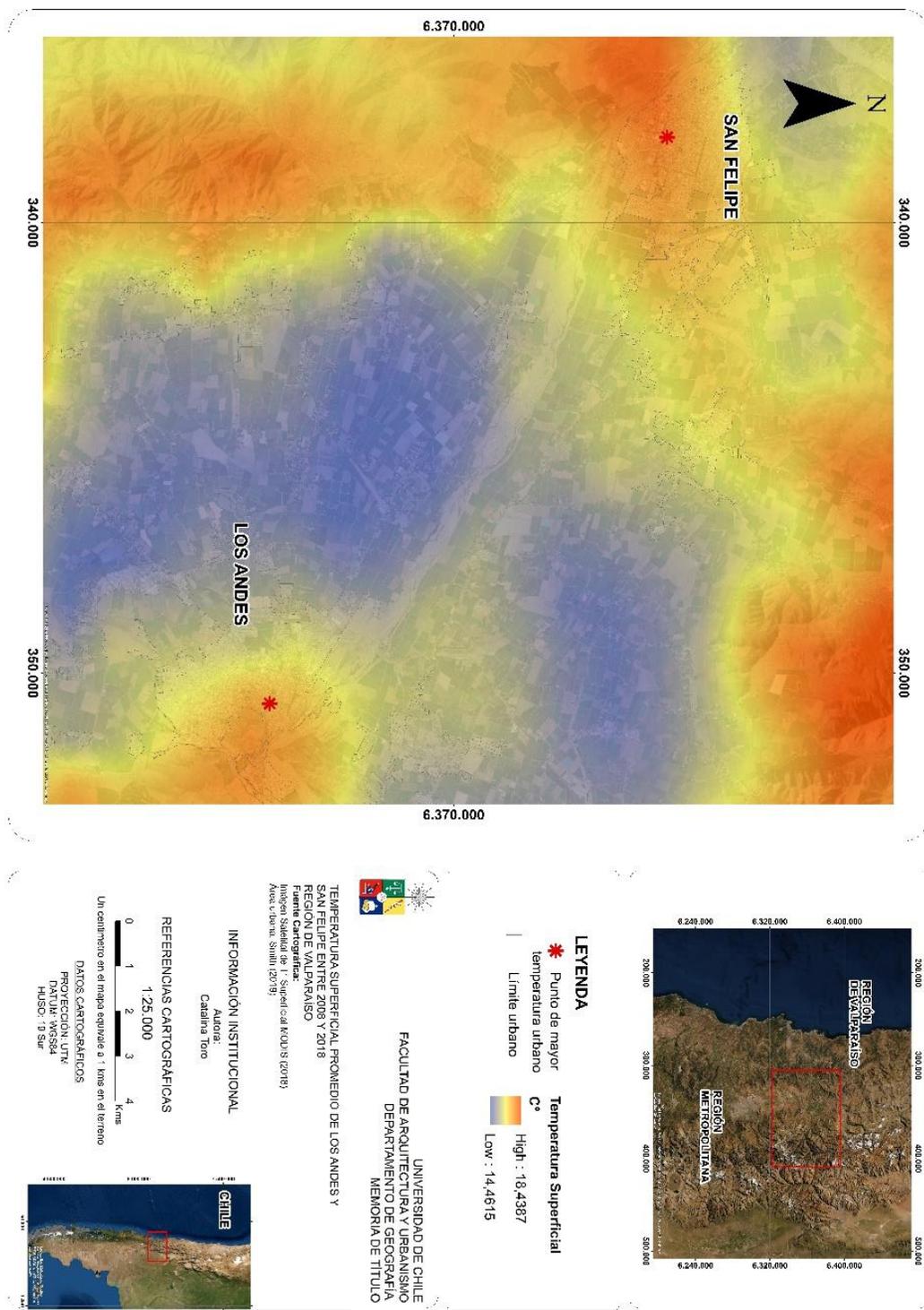
hasta 6°C. Caldera presenta una isla térmica que oscila entre débil y moderada a lo largo de los años de estudio. En esta zona cobra real importancia la influencia costera en el clima, regulando así las temperaturas de estas ciudades. Sin embargo, Coquimbo genera una isla de tipo moderada que en el año 2018 pasa a ser de 4,12°C, generando así un caso en particular donde la isla térmica no se comporta al igual que el resto de las ciudades encontradas en esta zona climática.

Avanzando hacia la zona central, se observa ICUs de carácter débil y moderado. Villa Alemana y Quilpué presentan un caso totalmente opuesto respecto a la evolución de la isla, ya que, en el primer caso, la isla va disminuyendo en intensidad, mientras que Quilpué presenta un aumento en esta.

Ya hacia el sur se hace clara la presencia de una isla de calor bastante débil y en algunos casos inexistente. Al ser invierno, esto podría considerarse beneficioso para la población que reside en estas ciudades, ya que el tipo de clima presente en estas zonas destaca por ser del tipo mediterráneo con lluvias invernales, por lo cual las temperaturas tienden a ser bajas durante esta temporada.

Al observar la imagen de temperatura superficial en la figura N°7, al igual que en las noches de invierno, durante el día se percibe claramente la diferencia de temperaturas entre las áreas urbana y rural. Sin embargo, al oscilar entre los 14° y 18°C, y como se presenta en la tabla de intensidades de la ICU, no generan valores superiores a los catalogados como moderado.

Figura N°7 Cartografía de Temperatura Superficial promedio invierno entre 2008 y 2018, período diurno



Fuente: Elaboración propia, 2021

3.2 Relación entre la Isla de Calor Urbana y el crecimiento poblacional en las ciudades chilenas

El crecimiento poblacional, como se mencionó anteriormente, es uno de los factores que juegan un rol importante en el aumento de la isla de calor superficial. En las siguientes tablas, se puede observar los resultados que arroja el análisis de datos establecido entre las distintas ICUs estudiadas y el crecimiento poblacional que han afectado a las ciudades estudiadas.

A. Verano Nocturna

Tabla N°9 Relación entre ICU y crecimiento poblacional en el periodo verano nocturno

Ciudad	R ² Verano Nocturna ICU	Ciudad	R ² Verano Nocturna ICU
Arica	0,9057	San Antonio - Llole	0,7796
Iquique	0,0142	Santo Domingo	0,9046
Alto Hospicio	0,3347	Talagante	0,4037
Calama	0,2484	Melipilla	0,8312
Antofagasta	0,8893	Buin	0,4309
Copiapó	0,354	Rancagua	0,3449
Caldera	0,0004	Machalí	0,2448
La Serena	0,9967	San Fernando	0,5446
La Serena Alta	0,9998	Curicó	0,5307
Coquimbo	0,9998	Constitución	0,9464
Ovalle	0,3944	Talca	0,7981
San Felipe	0,6664	Linares	0,9976
Los Andes	0,9735	Chillan	0,8829
Colina	0,9912	Coronel	0,9918
La Calera	0,5526	Los Ángeles	0,6889
Quillota	0,7743	Temuco	0,8924
Villa Alemana	0,9666	Valdivia (Centro)	0,9996
Quilpue	0,9667	Valdivia (Isla Teja)	0,9896
Olmue	0,1387	Osorno	0,1001
Limache	0,0012	Puerto Montt	0,6083
Concon	0,9123	Coyhaique	0,2
Cartagena	0,0056	Punta Arenas	0,6811

Fuente: Elaboración propia, 2021

LEYENDA

Relación directa muy alta
Relación directa alta
Baja o nula relación
Relación inversa

En la macrozona norte, se puede identificar cuatro ciudades que presentan una mayor correlación. En la zona desértica, se puede identificar a Arica como la ciudad que mayor relación posee entre el tamaño de la población y la ICU que se presenta, con un valor de 0,9057, seguido de Antofagasta con un valor de 0,8893. Mientras en la zona del semiárido con influencia costera, se puede observar tanto en La Serena (en ambos puntos), como en Coquimbo una muy alta relación con valores que sobrepasan el 0,99.

La macrozona centro norte, la comuna de Colina es la única ciudad que presenta una alta correlación positiva, por lo que se infiere que la población ha jugado un rol importante a través de los años, en la isla térmica de verano nocturna. Por otro lado, Los Andes, presenta una muy alta correlación, pero de manera inversa, por lo que se infiere que la población no afecta en la isla de calor.

Villa Alemana y Quilpué, destacan entre las ciudades de la macrozona centro, con una alta correlación positiva. Les sigue, además, Quillota y Melipilla, con una relación media alta, respecto a la población y su isla térmica. Por otro lado, dentro de aquellas ciudades que presentan una influencia costera, se puede observar a Concón y Santo Domingo con valores que sobrepasan el 0,9 de manera positiva. Cercano a Santo Domingo, se encuentra la conurbación San Antonio-Llolleo, la cual presenta una relación media alta.

En el valle de la macrozona centro sur, si bien no presentan una muy alta relación, destacan Talca, Chillán y Temuco con una correlación media alta positiva, por lo que se infiere que la población si juega un rol como factor del desarrollo de una isla de calor urbana. Por otro lado, Constitución, Linares y Coronel, si bien presentan valores sobre el 0,9, estos son de manera inversa, por lo que la población no se considera como un factor ante el desarrollo de una isla térmica.

Valdivia (en ambos puntos), se presenta como la única ciudad en la cual la correlación es altamente positiva, dentro de la macrozona sur, por lo que se infiere que, dentro de esta zona, la población no es un factor importante en el desarrollo de una isla de calor urbana en las noches de verano.

B. Invierno Nocturna

Tabla N°10 Relación entre ICU y crecimiento poblacional en el periodo invierno nocturno

Ciudad	R ² ICU Invierno Nocturna	Ciudad	R ² ICU Invierno Nocturna
Arica	0,2905	San Antonio - Llolleo	0,9999
Iquique	0,6129	Santo Domingo	0,999
Alto Hospicio	0,8721	Talagante	0,0008
Calama	0,5621	Melipilla	0,0201
Antofagasta	0,9775	Buín	0,995
Copiapó	0,5211	Rancagua	0,6558
Caldera	0,9993	Machalí	0,9997
La Serena	0,7967	San Fernando	0,2597
La Serena Alta	0,9705	Curicó	0,276
Coquimbo	0,6934	Constitución	1
Ovalle	0,1518	Talca	0,4245
San Felipe	0,8934	Linares	0,9284
Los Andes	0,7796	Chillan	0,0145
Colina	0,0161	Coronel	0,6491
La Calera	0,0524	Los Ángeles	0,1891
Quillota	0,9843	Temuco	0,0343
Villa Alemana	0,8144	Valdivia (Centro)	0,0678
Quilpue	0,2518	Valdivia (Isla Teja)	0,5138
Olmue	0,8423	Osorno	0,3933
Limache	0,3891	Puerto Montt	0,8662
Concon	0,9406	Coyhaique	0,7282
Cartagena	0,9933	Punta Arenas	0,557

Fuente: Elaboración propia, 2021

LEYENDA

Relación directa muy alta
Relación directa alta
Baja o nula relación
Relación inversa

En el caso de la isla de calor de invierno nocturna, en la macrozona norte, destacan las ciudades costeras de Antofagasta, y La Serena en el punto alto de la ciudad, con una correlación superior a 0,9, por lo que el factor poblacional es determinante en el desarrollo de esta ICU. En el caso de la zona centro de la ciudad de La Serena, así como Alto Hospicio, presentan una relación

media alta, por lo cual se infiere que existe una relación fuerte, pero no determinante. Caldera, si bien presenta un valor superior a 0,9, este se presenta de forma inversa, por lo cual la población no tiene relación con la formación de la isla térmica en la ciudad.

La macrozona centro norte, no presenta una alta correlación entre la población y la isla de calor, destacando solo San Felipe y Los Andes, con una relación media alta. Estas ciudades destacan por presentar una alta intensidad de ICU, sin embargo, el crecimiento de la población no es alto, ya que entre 2008 y 2018 se incrementa entre un 4 y un 11%, por lo que no se presenta como un factor importante en la formación de la isla.

Cartagena, San Antonio-Llolleo, Santo Domingo, Buin y Machalí, son las ciudades que presentan la correlación más alta dentro de la macrozona central, superando el 0,9 en sus valores. Les sigue Villa Alemana y Olmué, con una relación media alta, superior a 0,7. En la zona costera es donde en mayor medida se presenta una alta relación entre el crecimiento poblacional y el desarrollo de una isla de calor urbana. Destacan además Quillota y Concón por sus valores superiores a 0,9, sin embargo, estos se presentan de manera inversa, por lo que la población no es un factor en la formación de la ICU.

Dentro de la macrozona centro sur, y a diferencia del periodo veraniego, destaca con el valor más alto la ciudad de Constitución, sin embargo, la relación es inversa, por lo que el crecimiento poblacional no afecta en la formación de la isla de calor de invierno en esta localidad. A su vez, con un valor cercano a 1, Linares también presenta una relación inversa entre la intensidad y el crecimiento poblacional. En esta macrozona no se observan ciudades con una relación alta o media alta, por lo que la población no es un factor en la formación de la ICU de invierno nocturna.

Puerto Montt y Coyhaique, presentan una relación media alta en la macrozona sur, siendo las únicas en las que se infiere que el crecimiento poblacional es un factor, si bien no determinante, en la formación de la isla térmica.

C. Verano Diurna

Tabla N°11 Relación entre ICU y crecimiento poblacional en el periodo verano diurno

Ciudad	R ² ICU Verano Diurna	Ciudad	R ² ICU Verano Diurna
Arica	0,6783	San Antonio - Lolleo	0,9268
Iquique	0,1868	Santo Domingo	0,1816
Alto Hospicio	0,9964	Talagante	0,004
Calama	0,9735	Melipilla	0,6183
Antofagasta	0,6611	Buín	0,9763
Copiapó	0,9937	Rancagua	0,5179
Caldera	0,599	Machalí	0,7861
La Serena	0,5247	San Fernando	0,7538
La Serena Alta	0,4007	Curicó	0,8947
Coquimbo	0,8231	Constitución	1
Ovalle	0,1826	Talca	0,6115
San Felipe	0,889	Linares	0,3873
Los Andes	0,9919	Chillan	0,0195
Colina	0,1329	Coronel	0,4824
La Calera	0,3271	Los Ángeles	0,9664
Quillota	0,9914	Temuco	0,7922
Villa Alemana	0,332	Valdivia (Centro)	0,009
Quilpue	0,5725	Valdivia (Isla Teja)	0,0014
Olmue	0,9426	Osorno	0,0302
Limache	0,9998	Puerto Montt	0,8842
Concon	0,732	Coyhaique	0,3755
Cartagena	0,4912	Punta Arenas	0,6383

Fuente: Elaboración propia, 2021

LEYENDA

Relación directa muy alta
Relación directa alta
Baja o nula relación
Relación inversa

En el periodo diurno de verano, dentro de la macrozona norte, destaca Alto Hospicio, ciudad que presenta un crecimiento poblacional de un 31% aproximadamente, pasando de ser una ciudad pequeña, a una intermedia el año 2008, y ya consolidada como tal en 2018. Por lo que la población se reconoce como un factor importante en el desarrollo

de la isla térmica. También destaca Coquimbo, en menor medida, ya que presenta una correlación media alta.

En esta macrozona, además se observan Calama y Copiapó, con valores sobre los 0,9, pero de manera inversa, por lo que la población no se relaciona con la ICU.

En la macrozona centro norte, si bien no existe una correlación altamente positiva, destacan tanto San Felipe con una correlación media alta, así como Los Andes. Esta última, con un valor sobre 0,9, al igual que en el periodo nocturno del verano, pero de manera inversa, por lo que en esta macrozona la población no juega un rol importante a la hora del desarrollo de una isla térmica.

Quillota y Buin, ciudades que se encuentran en la depresión intermedia de la macrozona centro, presentan una correlación altamente positiva, con valores sobre el 0,98, seguido de Machalí, San Fernando y Curicó, con valores sobre el 0,7, presentando una relación media alta. Por otro lado, dentro de las comunas costeras, disminuye el r^2 , pero sigue siendo alta la correlación, como es el caso de Concón. La conurbación San Antonio-Llolleo, también presenta una muy alta relación entre la población y la isla de calor, destacando entre aquellas ciudades que presentan una influencia costera, con un valor sobre 0.98.

En el caso de la macrozona centro sur, la ciudad que más destaca es Constitución, con el valor r^2 más alto del periodo, por lo cual se infiere que la población juega un rol importantísimo en la isla térmica de verano diurna. Le sigue Temuco, con una relación media alta, por lo que si bien no es un factor determinante, si afecta en el desarrollo de la ICU en esta ciudad. Por otro lado, Los Ángeles, presenta una relación muy alta pero de tipo inversa, por lo que no se considera la población como un factor de la isla de calor.

Finalmente, en la macrozona sur, se infiere que la población no es un factor a la hora del desarrollo de la isla, ya que Puerto Montt es la única ciudad que presenta un valor medianamente alto, pero que aún así no se caracteriza como una correlación determinante.

D. Invierno Diurna

Tabla N°12 Relación entre ICU y crecimiento poblacional en el periodo invierno diurno

Ciudad	R ² ICU Invierno Diurna	Ciudad	R ² ICU Invierno Diurna
Arica	0,8731	San Antonio - Lolleo	0,3288
Iquique	0,0007	Santo Domingo	0,8443
Alto Hospicio	0,5893	Talagante	0,8936
Calama	0,2167	Melipilla	0,4485
Antofagasta	0,6841	Buín	0,5159
Copiapó	0,8166	Rancagua	0,0137
Caldera	0,1323	Machalí	0,6685
La Serena	0,0521	San Fernando	0,3106
La Serena Alta	0,8067	Curicó	0,7839
Coquimbo	0,0394	Constitución	0,0834
Ovalle	0,0405	Talca	0,9709
San Felipe	0,1669	Linares	0,9772
Los Andes	0,252	Chillan	0,5745
Colina	0,9841	Coronel	0,7942
La Calera	0,7591	Los Ángeles	0,9998
Quillota	0,0119	Temuco	0,0072
Villa Alemana	0,5099	Valdivia (Centro)	0,9409
Quilpue	0,772	Valdivia (Isla Teja)	0,2642
Olmue	0,4275	Osorno	0,1086
Limache	0,1194	Puerto Montt	0,00001
Concon	0,0139	Coyhaique	0,9396
Cartagena	0,8532	Punta Arenas	0,4943

Fuente: Elaboración propia, 2021

LEYENDA

Relación directa muy alta
Relación directa alta
Baja o nula relación
Relación inversa

Como se observa en la tabla, dentro de la macrozona norte, Arica, Copiapó y el punto La Serena Alta, presentan una relación media alta, respecto al crecimiento

poblacional y la formación de la ICU. Sin embargo, no representan una mayoría dentro de la macrozona, por lo que la población no es un factor importante en el desarrollo de la isla de calor urbana de invierno diurna.

La macrozona centro norte, no presenta una relación entre la población y la isla térmica, ya que la única ciudad que destaca con un valor superior a 0,9 es Colina, sin embargo, esta relación es de tipo inversa, por lo que no existe una correlación entre el factor y la ICU.

La Calera, Santo Domingo, Talagante y Curicó, presentan una relación de tipo media alta dentro de la macrozona central, con valores superiores a 0,7. Sin embargo, y al igual que dentro de la zona norte, estas no representan una mayoría, por lo cual el crecimiento poblacional no es un factor determinante en esta macrozona.

En el caso de la macrozona centro sur, Linares y Los Ángeles presentan una muy alta correlación, siendo las únicas dos ciudades dentro del territorio nacional que presentan valores superiores a 0,9 en la estación de invierno en período diurno, seguidas de Coronel, con una relación media alta entre el crecimiento poblacional y la formación de la isla térmica.

Finalmente, dentro de la macrozona sur, no existen ciudades con una correlación alta o media alta entre la población y la ICU, ya que tanto Valdivia como Coyhaique, si bien presentan valores sobre 0,9, se da una relación de tipo inversa, ya que la intensidad de la isla de calor ha disminuido a lo largo de los años, mientras que la población aumenta.

Capítulo 4: Discusiones y Conclusiones

Esta investigación se enfocó en el análisis de las islas de calor urbana superficial en Chile, y su relación con el tamaño de la ciudad, asociado a la población, y por ende su crecimiento a través de los años.

Según Oke (1973), el incremento de la intensidad de la ICU, se da mayoritariamente en ciudades pequeñas que aumentan su población, sin embargo, esto no se ve reflejado en las ciudades chilenas, ya que como se observó anteriormente, este no se presenta como un factor importante al generar la correlación de los datos obtenidos dentro del período 2008 y 2018. De esta forma, se hace fundamental generar estudios que relacionen la isla de calor y otros factores urbanos y sociales que inciden en su formación. Como explica Cuadrat (2015), el aumento de la superficie urbana debido a este crecimiento poblacional también implica en el incremento de la intensidad de la isla de calor, por lo que es imperante correlacionar los datos asociados a la ICUs, en conjunto con este factor, y establecer qué tipo de relación existe. Así mismo, esto conlleva a un aumento de la densidad de edificaciones, y como explica Sarricolea et al. (2008), este podría ser un factor relevante para la formación de la isla térmica,

Por otra parte, el aumento de la superficie urbana no necesariamente va de la mano con el aumento de acceso a áreas verdes para la población, factor que regula fuertemente la temperatura en la ciudad, y determina la formación y patrón de la isla de calor urbana, tal y como explica Fernández et al (2004, en Sarricolea et al, 2008).

A partir de lo anterior, es que se hace imprescindible el análisis de estos fenómenos y sus factores, para generar estudios y proyectos asociados a la planificación urbana sensible al clima, así como nuevos conceptos como lo es la justicia climática, ya que como indica Innerati (2004), el calentamiento global es causado por una pluralidad de actores, pero en mayor medida, los principales son aquellos países pertenecientes a la OCDE, debido al alto nivel de emisiones que generan. Esto a su vez, se ve a menor escala, tanto a nivel regional, como a nivel local, donde aquellos barrios con un menor poder adquisitivo además presentan menores porcentajes de áreas verdes, y una mayor concentración de infraestructura urbana, lo cual genera grandes desigualdades con aquellos barrios de mayor poder adquisitivo, donde el acceso a plazas y parques es mucho mayor.

El fenómeno del cambio climático y sus consecuencias en los centros urbanos ya es una realidad en Chile. Entonces, y a partir de lo anteriormente descrito, la implicancia de los resultados se presenta de la siguiente forma;

La mayor intensidad de la ICUs, se observa en el período diurno de la estación verano, donde ciudades como San Felipe y Los Andes dentro de la zona centro norte presentan una muy alta isla de calor, superiores a 7°C. En la macrozona norte destaca Iquique, con valores superiores a 7°C igualmente, mientras que, en la macrozona central, destaca Rancagua, con intensidades que superan los 8°C. Sin embargo, al analizar la relación que existe entre la

población y la formación de la isla térmica, estas ciudades no presentan una alta correlación. Esto indica que existen otros factores que influyen en las islas de calor de estas ciudades, tales como el material de las viviendas, la geometría de las calles, la presencia de áreas verdes y el uso de artefactos de enfriamiento, factores que no pudieron ser analizados dentro de esta investigación debido a la extensión del área de estudio que la compone.

Por otra parte, con una intensidad moderada a fuerte, en el mismo periodo destacan las ciudades de Quilpué, Melipilla, Los Ángeles y Valdivia (centro), las cuales se ubican en su mayoría en la depresión intermedia del territorio chileno. Estas igualmente, no presentan una alta relación entre el crecimiento poblacional y la isla térmica, por lo que es necesario un análisis de otros factores que pueden generar estas altas temperaturas dentro del área urbana de estas localidades.

A diferencia del período diurno, las intensidades de la ICU de verano nocturna, es el período donde existe la mayor cantidad de ciudades con una muy alta correlación entre el crecimiento poblacional y la formación de la ICU. Sin embargo, los valores de estas intensidades no superan los rangos débiles, por lo que, en este sentido, se infiere que, aunque la población puede afectar en el aumento de la isla de calor, no genera una consecuencia importante en su intensidad, o existen otro tipo de factores como la presencia de áreas verdes que podrían afectar en la intensidad de estas.

En el caso de las ICUs de invierno, tanto en el día como la noche, las intensidades no superan el rango moderado, e incluso en la mayoría de las ciudades, la isla térmica es inexistente, presentando diferencias negativas entre el área rural y el área urbana. A diferencia de la estación de verano, la ICU en este caso, puede tener un efecto beneficioso en la población, debido a las bajas temperaturas que afectan a los centros urbanos, sobretodo en aquellos climas de tipo templado en la macrozona sur, donde las temperaturas máximas en estas fechas no superan los 10°C.

En cuanto a su relación con el crecimiento poblacional, al igual que en el caso de la ICUs de verano nocturna, si bien existen ciudades que presentan una alta o muy alta correlación, al no existir una isla de calor urbana, por lo que la población, aunque existe como factor, no genera un aumento determinante en la intensidad de la isla térmica.

En síntesis, si bien existen casos en los cuales se presenta una alta correlación entre el crecimiento poblacional y la formación de una isla de calor urbana superficial, esta no es substancial para afirmar que, en las ciudades chilenas intermedias, este factor juega un rol importante en su desarrollo. Sin embargo, debido a las altas intensidades que se generan, sobre todo en ciudades de climas mediterráneos, principalmente en el período verano diurno, es que se hace indispensable generar estudios que demuestren la correlación existente con otros factores. La infraestructura y su densidad pueden generar una importante influencia, así como el uso, cada vez más frecuente, de artefactos de

enfriamiento en estas ciudades, genera un aumento en las fuentes de calor que puede afectar a la isla de calor urbana superficial.

Bibliografía

- Caballero, M., Lozano, S. y Ortega, B. (2007) Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. Revista Digital Universitaria, Vol. 8, N°10. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Córdova, K. (2011) Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Revista Terra. Vol. XXVII, N° 42, Pág. 95-122
- Cuadrat, J; Vicente-Serrano, S. y Saz, M. (2005) Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. Boletín de la A.G.E. N°40, 311-327.
- DAES (2018) Naciones Unidas. Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Nueva York. Obtenido en: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Environmental Protection Agency, EPA (2008). Reducing Urban Heat Islands. Compendium of Strategies. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Obtenido en: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>
- Gálvez, J. (2013) Criterios para la planificación y el diseño de corredores fluviales urbanos para la mitigación de la isla de calor (urban heat island) Foro sobre Desarrollo Sustentable. Laboratorio de Planificación Ambiental. Universidad de Granada
- Godoy, G (2013) Modelo de la Isla de Calor Atmosférico y Superficial: Factores en Común y alternativas para la Mitigación de su Efecto en salud humana y medioambiente urbano. Obtenido en: https://www.researchgate.net/publication/266732360_Modelo_de_la_Isla_de_Calor_Atmosferico_y_Superficial_Factores_en_Comun_y_alternativas_para_la_Mitigacion_de_su_Efecto_en_salud_humana_y_medioambiente_urbano/stats
- Innerarity, D. (2012) Justicia Climática. Dielmata, N°9, 175-191
- Letelier A. (2020) Estudio de la isla de calor urbana en Santiago Centro entre 2016 y 2017, bajo la mirada de la planificación y diseño sensible al clima. Memoria de Título. Universidad de Chile
- Moreno, C. y Serra, J. A. (2016) El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. Revista Biblio 3W, vol XXI, n° 1.179
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. y Voogt, J. A. (2017) Urban Climate. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oke, T. R. (1973) City size and the Urban Heat Island. Atmospheric Environment, Vol 7, 769-779.

- Power, G. (2009) El calentamiento global y las emisiones de carbono. Revista Ingeniería Industrial, N°27, 101-122
- Santamouris, M; Papanikolaou, N; Livada, I; Koronakis, I; Georgakis, C; Argiriou, A. y Assimakopoulos, D. (2001) On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. Pergamon, Vol 70, N°3, 201-2016
- Sarricolea Espinoza, Pablo, & Martín-Vide, Javier. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. Revista de geografía Norte Grande, (57), 123-141
- Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P. y Escobedo, C. (2008) Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. Revista de Climatología. Vol 8. Pág. 71-84
- Smith, P. (2018) Formulación de propuesta proyecto Fondecyt 11180990 "La construcción del clima urbano: hacia la calidad y justicia climática en las ciudades chilenas".
- Tamini, I. (2010) Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. Sustainable Building Conference. Madrid, España.
- Taule, G. (2012) La contaminación y la isla de calor urbana. Levante-EMV. Obtenido en: <https://www.levante-emv.com/opinion/2012/06/03/contaminacion-isla-calor-urbana/910111.html>