



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

**EVIDENCIAS DE LAS RELACIONES ENTRE MORFOLOGÍAS URBANAS Y LA
TEMPERATURA SUPERFICIAL DE MESO Y MICROESCALA.
ALGUNOS APORTES A LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL.
EL CASO DE CURICÓ, CHILE**

Memoria para optar al título de Geógrafo
JUAN PABLO AGUILA HUMERES
Profesor Guía: Dr. Pablo Sarricolea
Profesora Co-Guía: Dra. Pamela Smith

SANTIAGO-CHILE
2020

Agradecimientos

Agradecer a todos y todas las personas que me ayudaron y acompañaron a lo largo de mi etapa universitaria. A mi familia que me ayudo en todo este proceso con su consejo y apoyo constante. A mi compañero de oficina virtual y no virtual Felipe, por todo el aguante y retroalimentación que me dio durante este proceso, muchas gracias querido amigo por tu ayuda y compañerismo.

También agradecer a mis compañeres querides del club social y deportivo Camila Tapia por todo el apoyo incondicional al equipo y a su gente. Un saludo especial a la presidenta del club y mi amiga Camila con quien compartí mucho durante este año de trabajo, gracias por el apoyo y por el cariño. También a mis amigos Diego, Martín y Mauricio que estuvieron conmigo desde el principio de esta etapa.

A mi profesor, Pablo, por ayudarme a solucionar todos los problemas que fueron surgiendo a lo largo de esta memoria y por su gran calidad pedagógica a lo largo de la carrera. A la profesora Pamela por toda la ayuda durante este acontecido año, por darme todas las facilidades para trabajar de la manera más cómoda y grata posible, muchas gracias.

Finalmente agradecer a todas las personas que me escucharon en algún momento hablar de algo relacionado con geografía, a mis amigos del colegio, a mi amigos de scout y a la Isa, gracias por toda la contención emocional y el cariño que me das.

Resumen:

La planificación territorial ha sido una temática de estudio bastante potenciada actualmente debido a la necesidad de ordenar el territorio en la medida en que este se ocupa. El impulso de esta disciplina se debe a que las diferentes regiones del planeta y del país están siendo saturadas por la demanda de espacios por parte de una población que crece constantemente.

Lo que marca un cambio en la idea de ordenar el territorio en el presente es que cada vez se toman más variables en consideración debido a los avances científicos y por las demandas ciudadanas, las cuales toman cada vez más peso por lo precario que puede ser la planificación. Dentro de estos avances científicos se encuentra el estudio del clima, y más específicamente, como las ciudades y los asentamientos han perturbado el equilibrio climático que existía en las diferentes regiones.

Es por estos cambios que la presente memoria de título se desarrolla para plantear lineamientos generales en como se puede integrar la componente climática a la planificación territorial en el contexto chileno, en particular en la ciudad de Curicó. Estos lineamientos apuntan a generar cambios en la toma de decisiones en cuanto a la conformación de las ciudades respecta.

Para generar estas directrices se estudió el comportamiento de la temperatura superficial de la ciudad de Curicó con el fin de tomar una variable que se relaciona directamente con la materialidad de la ciudad y como esta se ordena. El análisis de la distribución se refiere a la morfología de la ciudad y como esta interfiere en el comportamiento de los materiales respecto a su temperatura.

Con el propósito de analizar en profundidad la temperatura, la morfología de la ciudad y la relación de estas dos, se tomó como principal consideración el trabajo de escalas para dar cuenta de lo cambios que provoca la ciudad respecto a sus alrededores. Impulsado por este tipo de trabajo se realizó una caracterización de la temperatura superficial meso escalar tanto como micro escalar, lo que por medio de imágenes satelitales y el uso de UAVs se logró obtener una imagen del comportamiento térmico de la ciudad en la estación de verano del año 2020. De la misma forma se trabajó con la morfología urbana, buscando una explicación al comportamiento térmico, realizando un análisis meso y micro escalar. A través de esto se pudo efectuar un análisis efectivo de la morfología urbana encontrando explicaciones a la relación entre el comportamiento térmico y como se ordena la ciudad.

Con los resultados de la presente memoria de título, junto a los entregados por el proyecto FONDECYT de iniciación N°11180990, el que se titula “La construcción del clima urbano: hacia la calidad y justicia climática en las ciudades chilenas” (2018 – 2021) de la Universidad de Chile, dentro del cual se enmarca la presente memoria de título, se puede concluir que existe una relación en el comportamiento térmico de la ciudad de Curicó y la manera en que esta fue planificada, lo que lleva a inferir que es en la toma de decisiones que se puede incidir en el clima local, por lo que con un ordenamiento sensible al clima se podría crear espacios ciudadanos más confortables.

Estos resultados aportan información relevante para la planificación sensible al clima y para crear modelos de estudios climáticos considerando los aspectos beneficiosos que aportan los sistemas remotos tales como las imágenes satelitales, y en especial los UAV, los cuales presentan una oportunidad para el trabajo de campo en grandes áreas. Con esto se puede contribuir a la creación de espacios más preocupados por la salud de la población y potencialmente al ahorro energético de las ciudades.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	6
1.1 Introducción	6
1.2 Planteamiento del problema	7
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo general	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
1.4 Área de estudio	10
CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO	14
2.1 Comportamiento térmico urbano	14
2.1.1 Balance energético (BE).....	14
2.1.2 Propiedades térmicas de los materiales	14
2.1.3 Temperatura urbana de superficie	15
2.2 Escalas de análisis climático	16
2.2.1 Capas urbanas.....	16
2.2.2 Islas de calor.....	17
2.2.3 <i>Surface urban heat island (SUHI)</i> y <i>Sky View Factor (SVF)</i>	19
2.3 Zonas climáticas locales (ZCL)	20
2.4 Planificación territorial sensible al clima	21
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	23
3.1 Levantamiento de imágenes por medio de un UAV	23
3.1.1 Trabajo en terreno y obtención de imágenes	23
3.1.2 Procesamiento de ortofotografías.....	24
3.1.3 Conversión de información cualitativa a cuantitativa	25
3.2 Trabajo de imágenes satelitales de temperatura superficial	26
3.2.1 Cálculo de TOA (Top of atmospheric) radiancia espectral.....	27
3.2.4 Cálculo de porción vegetal (Pv)	28
3.3 Levantamiento de zonas climáticas locales	29
3.4 Producción del Sky view factor para el área de estudio	30
3.5 Cruce de datos de temperatura superficial y morfología (SVF) a microescala	31
CAPITULO 4: RESULTADOS	33
4.1 Temperaturas superficiales en la ciudad de Curicó en la estación de verano, Enero del año 2020	33
4.1.1 Temperaturas a meso escala	33

4.1.2	Temperaturas a microescala	35
4.1.3	Comportamiento de la temperatura superficial a diferentes escalas.....	38
4.2	Análisis morfológico de la ciudad	39
4.2.1	Meso escalar: Zonas climáticas locales.....	39
4.2.2	Micro escalar: Sky view factor.....	42
4.3	Correlación entre la morfología urbana y la temperatura superficial	45
4.3.1	Nube densa de puntos.....	45
4.3.2	Relación entre temperatura superficial promedio por rango de clase de SVF	46
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES		48
5.1	Contraste de fenómenos a diferentes escalas	48
5.1.1	Comportamiento de la temperatura superficial a diferentes escalas.....	48
5.1.2	Morfología urbana.....	48
5.2	Relación entre la temperatura superficial y la morfología urbana	50
BIBLIOGRAFÍA.....		51

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1:	Área de estudio meso escalar	12
Figura N° 2:	Área de estudio micro escalar	13
Figura N° 3:	Capas urbanas.....	17
Figura N° 4:	Esquema ilustrativo sobre el comportamiento de las islas de calor	18
Figura N° 5:	Clasificación de zonas climáticas locales (ZCL)	20
Figura N° 6:	Captura de pantalla del plan de vuelo	24
Figura N° 7:	Ecuación para conversión de RGB a grados Celsius.....	25
Figura N° 8:	Esquema para la conversión de la temperatura superficial	27
Figura N° 9:	Esquema metodológico para el cálculo del SVF.....	31
Figura N° 10:	Puntos individuales por valor del SVF.....	32
Figura N° 11:	Temperatura superficial a meso escala de la ciudad de Curicó.....	34
Figura N° 12:	Temperatura superficial a micro escala de la ciudad de Curicó	37
Figura N° 13:	Zonas climáticas locales de la ciudad de Curicó.....	40
Figura N° 14:	SVF del centro de la ciudad de Curicó.....	44

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico N° 1:	Áreas por zona climática local.....	41
Gráfico N° 2:	Relación entre Temperatura superficial y SVF	45
Gráfico N° 3:	Relación entre Temperatura Superficial promedio y SVF	46
Gráfico N° 4:	Frecuencia de datos de la relación entre Temperatura Superficial promedio y SVF .	47

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1:	Área total por zona climática.....	41
-------------	------------------------------------	----

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

Actualmente el proceso de urbanización es un tema de alta contingencia que ha sido foco de numerosos estudios, debido a la velocidad con la que se está desarrollando y por lo significativo que puede ser no tomar en cuenta los impactos que lleva consigo la urbanización. Para el 2019 aproximadamente un 55% de la población mundial vive en asentamientos urbanos (UN, 2019) y de acuerdo con las proyecciones, para el año 2030 esta cifra aumentara a un 60% (UN, 2018). Si es que se considera a la ciudad como el lugar donde se concentra la población, la urbanización también determinará la distribución espacial de la población mundial (UN, 2019).

Si bien la urbanización puede presentarse como una problemática debido a la utilización de suelo o al crecimiento descontrolado, también puede ser una oportunidad para aprovechar los beneficios que trae consigo la aglomeración de población, siempre y cuando se intente minimizar los problemas ambientales que se asocian al crecimiento urbano (UN, 2019). Debido a esto, es sustancial que se cree una planificación territorial que utilice los recursos de la manera más eficiente, minimizando su impacto (Oke et al., 2017). Si tomamos el contexto latinoamericano, las áreas metropolitanas ya han provocado cambios en los ciclos hidrológicos, contaminación atmosférica, segmentación de la ciudad debido a fragmentación del tejido urbano, lo que ha resultado en la creación de un propio clima urbano (Smith & Henríquez, 2019).

El clima urbano es resultado de modificaciones que se producen en el clima local de la zona, lo que provoca quiebres en los equilibrios energéticos e hidrológicos naturales (Sarricolea, 2012) creando un contexto climático que está sometido a diversos cambios producto de la estructura urbana. Esta variación continua se debe a la pluralidad de microclimas que coexisten dentro de las ciudades, los cuales son producto, en gran medida, de la morfología urbana y la basta cantidad de materiales que componen la ciudad (Oke et al., 2017). Es la alteración de la morfología la que provoca quiebres en el contexto climático local, creando diferentes microclimas dentro de una misma ciudad, los cuales pueden variar dependiendo de las discontinuidades en la geometría urbana o en la composición de los materiales de construcción, debido a las distintas propiedades de estos.

Esta memoria se centrará en estudiar la relación entre la morfología urbana y las condiciones micro climáticas de la ciudad. Específicamente se desarrollará en la ciudad de Curicó y en las estructuras urbanas de ésta. El análisis se realizará tanto a micro como a meso escala, con el fin de poder observar cómo la ciudad crea un clima propio, pero que a su vez desarrolla distintos climas dentro de ella. Esta variación se debe en gran medida a decisiones en cuanto a la planificación territorial se refiere. Por ello es que la siguiente memoria de título también analizará la estructura morfológica de la ciudad para poder dar cuenta de la relación que existe entre la morfología urbana y las características climáticas propias de la ciudad de Curicó.

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad, vivir en una sociedad cada vez más urbanizada requiere una manera de pensar cómo se pueden habitar los espacios dentro de un contexto urbano (Rehren, Orellana, Arenas & Hidalgo, 2018), resultando ser un tema de suma importancia para crear espacios en donde pueda desarrollarse el ser humano, considerando que actualmente la ciudad es su principal hábitat (Smith & Henríquez, 2019).

Para poder extender el tejido urbano de manera lógica y ordenada, es necesario generar modelos de planificación territorial, donde se consideran factores locales, como las horas de luz, la incidencia del sol, la dirección de los vientos, etc... con el fin de crear espacios amigables para los seres humanos. No obstante, que no en todos los casos se toman en cuenta los factores locales, debido a la infinidad de ambientes que existen, que rara vez son representados en los modelos de planificación territorial que se aplican para más de un centro urbano, cuando estos pueden ser totalmente distintos.

En el contexto latinoamericano se ha visto como el proceso de urbanización se ha ligado fuertemente al desarrollo económico, donde el lucro de las grandes empresas crecerá en la medida en que se desarrollen en el territorio (Silveira, 2011). Este desarrollo urbano ligado al mercado se debe a que el capital ve a la ciudad como un lugar deseable para desenvolverse (Rehren et al., 2018). Es importante también mencionar que en Latinoamérica se ha fortalecido el crecimiento de las grandes ciudades debido a que son centros de acumulación de capital, lo que ha provocado un debilitamiento para el desarrollo regional (Rehren et al., 2018). Esto ha traído consigo que las ciudades que encuentran lejanas a las capitales regionales sean dejadas de lado respecto a su desarrollo, tanto económico como urbano.

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente es la industria inmobiliaria y cómo ésta modifica el territorio, esto sucede debido a que el capital pasa a ser una de las principales preocupaciones de las autoridades respecto a cómo se conforma la ciudad, con ello, las problemáticas ambientales pasan a un segundo plano. Estas al no ser consideradas provocan que la ciudad no sea un espacio de desarrollo simbiótico con el medio, sino que la ciudad pasa a ser un agente invasivo en el espacio. Otro ejemplo de esto, y en lo que se enfocará la presente memoria de título, es los cambios que causa la ciudad en el microclima local. Es por causa del desarrollo urbano que se generan impactos en el microclima, ya que suceden cambios ambientales y meteorológicos, los cuales provocan islas de calor, cambios en la precipitación, entre otros problemas (Bherwani, Singh & Kumar, 2020).

Si consideramos que el humano se desarrolla principalmente en la ciudad, y ésta genera cambios en el microclima local, hay que dar por sentado que la población de los diferentes territorios urbanos deberá convivir con dichos microclimas que la ciudad provoca. Esto significa que la planificación territorial debe considerar los factores climáticos para crear espacios que sean utilizables por la población. El espacio público entra a jugar un rol clave en este sentido, ya que es por medio de él que la ciudadanía puede tomar control de la ciudad y establecerse como parte de ella. Al considerar los diferentes microclimas urbanos en la planificación territorial se puede lograr que las modificaciones que provoca la ciudad sean con el fin de crear un microclima agradable para la población. Si esto se logra alcanzar podría aumentar el uso de los espacios públicos externos por parte de la ciudadanía, lo que es un factor clave para la participación y cohesión social (Tumini, 2013), elementos esenciales

para lograr una ciudad que involucre a la ciudadanía como un actor de cambio en cómo se desarrolla el tejido urbano.

Una de las maneras en que el tejido urbano modifica el microclima es por medio de la morfología propia de cada ciudad. Esto se debe a que la manera en que se compone la ciudad y sus diferentes superficies se convierten en captadores de energía térmica (Perico-Agudelo, 2013) modificando la temperatura tanto superficial como atmosférica. Estas variaciones energéticas se deben a los distintos comportamientos energéticos de las diferentes materialidades de la ciudad, las cuales impactan en cómo se da el clima local (Alchapar, Correa, & Cantón, 2012; Oke et al., 2017). Es por esto que una buena planificación territorial, en la cual se consideran este tipo de factores, puede generar cambios al microclima que beneficien a la población, mientras que, por el contrario, como sucede actualmente, se crean ambientes poco coherentes con el clima local.

Por esta razón se quiere lograr evidenciar la relación entre la morfología urbana y la temperatura superficial, ya que es por medio de estas señales que se podrían crear instrumentos de planificación territorial que consideren los microclimas urbanos y como estos afectan a la cotidianidad de la población. Por medio de estas consideraciones se podría llegar a una ciudad sensible al clima, en donde se toman en cuenta estos factores para crear espacios eficientes energéticamente, barrios diseñados para mejorar el microclima e infraestructura protegida para eventos climáticos extremos (Oke et al., 2017)

Tomando en cuenta las evidencias científicas respecto a la relación entre morfología urbana y temperatura superficial cabe preguntarse ¿Se podrían realizar instrumentos de planificación territorial que sean sensibles al clima urbano? Es ante esta pregunta que en la presente memoria de título, se buscará como objetivo general evidenciar la relación entre la temperatura superficial y la morfología urbana para realizar aportes a la planificación territorial, en este caso en la ciudad de Curicó, la cual será el área de estudio, en su espacialidad comunal, y también tomando en cuenta el sector centro de la ciudad, esto con el fin de poder contrastar lo macro y lo micro, manteniendo las mismas relaciones entre las variables a estudiar. Ante esta dualidad de escalas es que se ha propuesto primero caracterizar las temperaturas superficiales de la ciudad a meso y a microescala. En segundo lugar, se buscará analizar la morfología urbana tanto a nivel meso como micro escalar, manteniendo una perspectiva climática. Por último, se examinará la planificación territorial actual de la ciudad de Curicó tomando las evidencias otorgadas por los objetivos específicos anteriores y así poder dar cuenta de las características climáticas de la ciudad de Curicó.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar la relación entre la morfología urbana y la temperatura superficial para realizar aportes a la planificación territorial, en el caso de la ciudad de Curicó

1.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la temperatura superficial de la ciudad de Curicó a meso y microescala
2. Analizar la morfología urbana de la ciudad de Curicó a nivel meso y microescala
3. Relacionar la morfología urbana existente con la temperatura superficial de la ciudad de Curicó.

1.4 Área de estudio

La ciudad de Curicó se encuentra en la VII Región del Maule, ubicada en las coordenadas 34°58'60''Sur y 71°13'60''Oeste. Cuenta con una superficie de 1.328 Km² (BCN, 2020) y con una población total de 149.136 habitantes (INE, 2017). Además, esta comuna se presenta como un foco de servicios para la provincia, por lo que mantiene un gran flujo de personas que visitan la ciudad de las comunas aledañas (Marte, 2020).

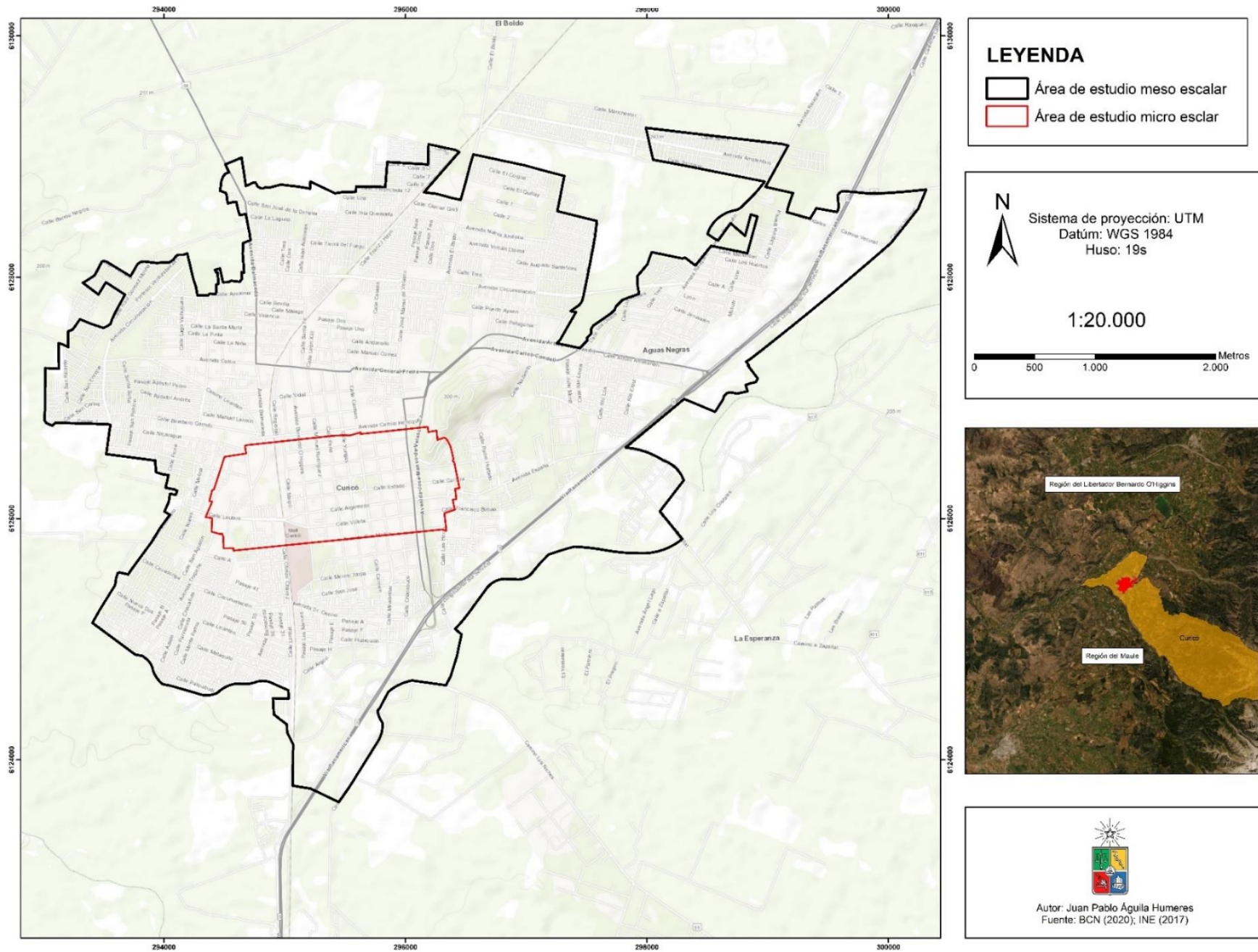
Esta ciudad entra en la categoría de ciudad media, según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), quienes definen una ciudad intermedia por su cantidad de población que oscila entre los 50.000 y 300.000 habitantes (CEPAL, 1998). Aunque la definición de una ciudad intermedia es un concepto que ha variado bastante debido a las características cambiantes del territorio y a sus dinámicas (CEPAL, 1998), sobre todo en una ciudad como Curicó, la cual ha tenido un aumento demográfico considerable (un 19,8% desde el año 2002) y que ha provocado problemáticas en la infraestructura de la ciudad como el tamaño de las calles en comparación con la cantidad de vehículos que circulan por la ciudad, además de otras vinculadas a esta área.

En términos de empleabilidad, la ciudad de Curicó presenta un porcentaje positivo, con un 60% que declara trabajar, respecto al resto de la región, la cual tiene un porcentaje de empleabilidad del 54%. La distribución de esta empleabilidad se da en su mayoría en el sector terciarios, con un 73%, lo que explicaría la concentración de población en la ciudad, aunque el porcentaje de trabajadores en el sector primario también es considerable, siendo un 19%. La edad promedio de empleo es de 42,2 años, lo que da cuenta de una población empleada de mediana edad.

Respecto a la dimensión de hogar, la comuna cuenta con 49.629 hogares y 54.598 viviendas, de las cuales solo un 7% están desocupadas, y solo el 1% de las viviendas cuentan con más de un hogar. El tamaño de hogar en promedio es de 3 personas, y la cantidad de hogares que presentan hacinamiento es del 7%. Es importante destacar que el 96% de las viviendas de la comuna cuenta con red pública de agua, lo que demuestra que el servicio de distribución de aguas cubre a la gran mayoría de la comuna, y por ende, de las viviendas.

En el caso particular de esta investigación el área estudio será dividida en dos, debido a la naturaleza del trabajo en escalas. Esto se traduce en que se tomará en cuenta solo el centro urbano de la comuna, como se puede ver en la Figura N°1, la cual será el área de trabajo para el análisis meso escalar. En cuanto al enfoque micro escalar se trabajará con el centro de la ciudad de Curicó, como se puede observar en la Figura N°2, considerando también ciertas calles aledañas, esto con el fin de poder tomar puntos de control variados y heterogéneos, contrastando las calles estrechas del centro de Curicó con avenidas amplias y edificaciones de un solo piso.

Figura N° 1: Área de estudio meso esclar



Fuente: Elaboración propia (2020).

Figura N° 2: Área de estudio micro escalar



Fuente: Elaboración propia (2020)

CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO

2.1 Comportamiento térmico urbano

2.1.1 Balance energético (BE)

Como concepto medular dentro de esta memoria de título se encuentra la temperatura superficial y cómo esta se comporta en el contexto urbano. Es importante diferenciar la temperatura de superficie en contextos urbanos y rurales debido a que difieren en sus materialidades, como se compone su morfología y por el nivel de vegetación existente. Para dar una aproximación a su comportamiento es importante entender el concepto de balance energético.

Según Oke et al. (2017) el balance térmico de superficie (BTS) es importante para comprender los microclimas de superficie, y por ende es relevante para poder caracterizar la temperatura superficial. El concepto hace referencia al intercambio de energía por radiación, convección o conducción y es utilizado para poder evaluar la transferencia y almacenamiento de energía dentro del sistema urbano, y también, entre este sistema y la atmosfera (Oke et al., 2017).

Además, el balance térmico permite entender, cuantificar y modelar los cambios en la temperatura, humedad y precipitación. También explica la interacción calórica que se da entre las estructuras urbanas, ya sean muralla, suelo, techos, caminos, etc. (Oke et al., 2017) y es mediante estas interacciones que se puede describir el comportamiento de la temperatura superficial.

La importancia del BTS es que en parte conduce al clima urbano, junto con el balance de radiación (Van Hove et al., 2011), sin embargo, al existir diferentes áreas urbanas (centros de ciudad, parques, suburbios residenciales, etc.) se provocan diferentes alteraciones a la red de radiación y al almacenamiento de calor, lo que causa los diferentes microclimas (Coutts, Beringer & Tapper, 2007). Esto es lo que lleva a considerar las diferentes propiedades térmicas, debido a la gran variedad que materialidades en el tejido urbano.

2.1.2 Propiedades térmicas de los materiales

Este concepto hace referencia a cómo los diferentes materiales se comportan respecto a su estructura interna y a las dinámicas calóricas. La importancia de hondar en estas propiedades se debe a que, al existir diferentes materialidades en la ciudad, los comportamientos de estas, en términos calóricos, se darán de diferentes formas.

Sarricolea (2012) cita a Curran (1985) para explicar las cuatro propiedades térmicas de los diferentes materiales que pueden ser detectadas por sensores remotos. La primera es la capacidad térmica, que se refiere al potencial de un material para almacenar calor; la segunda es la conductividad térmica, la cual se refiere al ritmo al que se trasmite la energía (calor) en algún material; la tercera es la difusión térmica, en donde se ve cómo varía la temperatura dentro de un volumen de algún material; y por último ésta la inercia térmica, que se refiere a la resistencia de un material a los cambios de temperatura. Sarricolea (2012) realiza una comparación para las diferentes cubiertas contrastando las diferencias en el comportamiento y da cuenta de cómo, por ejemplo, la superficie urbana posee una conductividad térmica bastante mayor a la que tienen las cubiertas vegetales. Este tipo de análisis

demuestra cómo el flujo energético se puede dar de distintas maneras en las diferentes materialidades, por lo que es importante considerar las propiedades térmicas para poder analizar la manera en que la energía calórica se transmite en el tejido urbano.

También cabe destacar que para poder realizar una planificación territorial que considere los microclimas se debe comprender la manera en que se componen las materialidades de la ciudad, ya que es una variable que incide de manera directa con la temperatura de los cañones urbanos, lo cual se debe a las variaciones que provoca la ciudad en el balance de radiación (Correa, Rosa & Lesino, 2006). Si es que se consideran las propiedades térmicas de los materiales, se puede controlar la absorción y almacenamiento de energía en las superficies urbanas, lo que traería consigo un mejor balance térmico de superficie.

2.1.3 Temperatura urbana de superficie

Considerando los dos conceptos mencionados anteriormente, ahora se puede dar paso a exponer cómo se comporta la temperatura superficial en un contexto urbano. La importancia de la diferenciación de este parámetro para el contexto urbano se debe a las propiedades singulares de la ciudad de provocan variaciones en la temperatura superficial.

Si se investigan los cambios de la temperatura atmosférica, hay que considerar la superficie que se encuentra subyacente a esta, debido a que es la superficie la que influye, en gran medida, a las variaciones de temperatura debido a los aportes energéticos que entrega. Estos aportes son singulares en el caso de la ciudad, debido a las intervenciones en los elementos físicos de las superficies (Dousset & Gourmelon, 2003)

Si es que consideramos que existe un balance energético para las diferentes superficies, en donde la energía se distribuye entre ellas, y a la vez con la atmosfera, se podría decir que existe una temperatura que sea acorde a este balance. Esta temperatura (T_0) satisface una combinación de flujos de energía radiativa, conductiva y flujos turbulentos. La temperatura mencionada es la que genera un flujo denso de calor sensible (Q_H) hacia la atmosfera y también genera un comportamiento similar hacia el sustrato por medio de un flujo denso de calor sensible (Q_G) (Oke et al., 2017). Esto significa que variaciones en el balance energético provocaría cambios en T_0 y existen cinco propiedades de superficie que provocan estos cambios (Oke et al., 2017):

- 1) Propiedades geométricas: Esto se refiere a la orientación de la superficie (ángulo de pendiente y azimut) y apertura al cielo y sol.
- 2) Radiativo: Hace referencia a la habilidad de las superficies para reflejar ondas cortas (albedo) y ondas largas de radiación, tanto como para emitir ondas de larga longitud.
- 3) Termal: Esta propiedad se refiere a la capacidad de conducción termal de los materiales y a la capacidad calórica. Esto provoca cambios en T_0 dependiendo de la capacidad calórica y a la capacidad de almacenamiento de cada superficie.
- 4) Humedad: Para esta variable se estudia la capacidad de los materiales que sufren evapotranspiración, lo que provoca pérdida de energía por medio de flujos de calor latente. Es por esto que en superficies secas existe un T_0 más bajo.
- 5) Aerodinámica: Se refiere al nivel de resistencia o rugosidad que provocan las superficies a los flujos de viento que influyen en T_0

Es la suma de estas propiedades, junto con los conceptos mencionados anteriormente, las que dan forma a la temperatura de superficie en la ciudad. A diferencia de las propiedades térmicas de los

materiales, las cuales son propias de cada uno, las propiedades físicas de las superficies pueden ser modificadas por medio de tomas de decisiones. Claramente algunas serán fijas para objetivos específicos, pero otras pueden ser manejadas con una buena planificación territorial. Un ejemplo de esto sería considerar las propiedades aerodinámicas de las superficies de las viviendas y así poder aprovechar los vientos para mantener una temperatura más agradable o elegir colores que no almacenen el calor en demasía.

2.2 Escalas de análisis climático

2.2.1 Capas urbanas

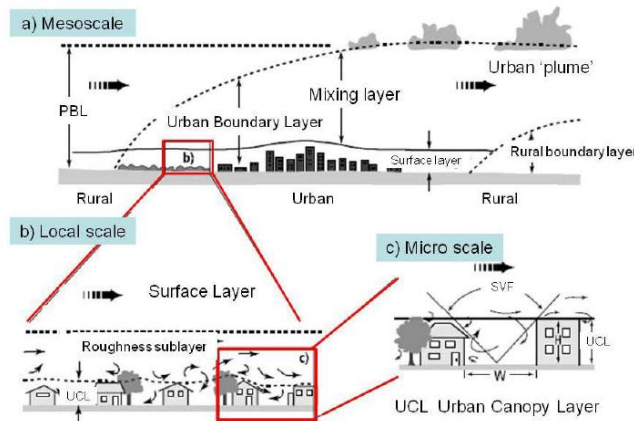
Para poder comprender los fenómenos que ocurren en la superficie urbana es importante segmentar las distintas capas que influyen en los procesos climáticos de la ciudad. Primero hay que señalar que las distintas superficies condicionan en gran medida a la capa límite terrestre o *Boundary Layer* (BL), por medio de la transferencia, absorción y emisión de radiación (Oke et al., 2017). En definitiva, la capa límite terrestre es el punto hasta donde afectan las superficies a la atmósfera.

Para un contexto urbano se le llama Urban boundary layer (UBL), y al igual que la boundary layer, es el punto límite en que la ciudad tiene una influencia en el comportamiento atmosférico, por lo que sus características van a depender de la presencia o no de superficie urbana (siempre por sobre los techos). Esta capa es considerada a nivel de estudios sobre fenómenos de meso escala y escala local, los cuales se ven controlados por procesos que ocurren a una gran escala espacial y temporal (Arnfield, 2003) (Ver figura N°3). Para estos estudios son las parametrizaciones urbanas las que logran estimar los efectos que tiene la ciudad sobre la atmósfera respecto a sus dinámicas y a la temperatura media (Salamanca et al., 2011)

Por otra parte, considerando la escala micro climática, los fenómenos se estudian al nivel de escala del Urban canopy layer (UCL). Este concepto hace referencia a una estructura que se forma por la manera en que se ordena la calle respecto a los edificios que lo rodean (Oke et al., 2017), y se extiende desde el piso hasta la punta de la rugosidad urbana (edificios y árboles) (Rotach et al., 2005). Dentro de sus límites que lo definen se encuentran los edificios, las murallas y elementos que se encuentran entre los edificios. En los UCLs los procesos de vientos e intercambios energéticos están controlados por factores de micro escala, debido a los procesos y características propias del lugar (Arnfield, 2003).

En la Figura N°3 se puede observar cómo se distribuyen las diferentes capas en la ciudad y como se diferencian en cuanto a su escala. Al contrastarlas, la UBL y la UCL, queda en evidencia que el ensamble de procesos que definen a cada una provoca efectos propios en cada capa.

Figura N° 3: Capas urbanas



Fuente: Fuente: Van Hove et al., (2011) modificado de Oke (1997)

En el caso de la UBL se puede observar cómo considera una serie de procesos meso escalares que provocan efectos a una escala meso y local. Por otro lado, para la UCL se deben considerar otros factores para entender sus dinámicas propias, que se dan a micro escala.

2.2.2 Islas de calor

Una gran cantidad de estudios han demostrado que las ciudades se encuentran a mayores temperaturas que las áreas rurales, a este fenómeno se le llama isla de calor urbano o UHI (Oke et al., 2017). Este fenómeno es la mayor expresión de modificaciones climáticas provocadas por el humano. El concepto de UHI también hace referencia a fenómenos de meso escala, asociados a aumentos en la temperatura atmosférica y superficial en el ambiente urbano en contraste con las áreas rurales, esto en gran medida por la urbanización (Ravanelli et al., 2018). En muchos casos, las UHI son más altas en condiciones nocturnas, debido a que los edificios de materiales como el concreto o el ladrillo absorben el calor durante el día y lo libran lentamente durante la noche (Davies, Steadman & Oreszczyn, 2008). Otra característica es que se dan más en el invierno que en el verano y son más aparentes cuando hay vientos suaves (Tan et al., 2010).

Aunque las UHIs en general se comportan de manera similar y se mantienen en la definición de una concentración de altas temperaturas, es importante mencionar que existen diferentes tipos de UHIs. La diferencia de estas se debe a las variadas características propias y por las diferencias en los procesos de intercambio de energía, lo que determina la categoría de cada una (Arnfield, 2003). La principal diferencia entre cada una es la altura en donde se desarrolla, lo que a su vez les da una característica propia en términos de los procesos a los cuales se ven involucradas.

Según Oke et al. (2017) existen cuatro categorías de UHIs, las cuales son:

- 1) **Subsuperficiales (UHI_{Sub}):** Son las cuales muestran diferencias de temperaturas entre la superficie urbana y su sustrato (y sus minerales) con el equivalente del sustrato rural. Se mide por el balance energético subsuperficial del suelo y es para estudios de escala local.
- 2) **Boundary layer o de capa límite (UHI_{UBL}):** Son aquellas zonas que muestran diferencias de temperaturas entre la parte superior de la UCL y el límite superior de la UBL, en contraste con la capa atmosférica límite en un área rural. Se mide el balance energético

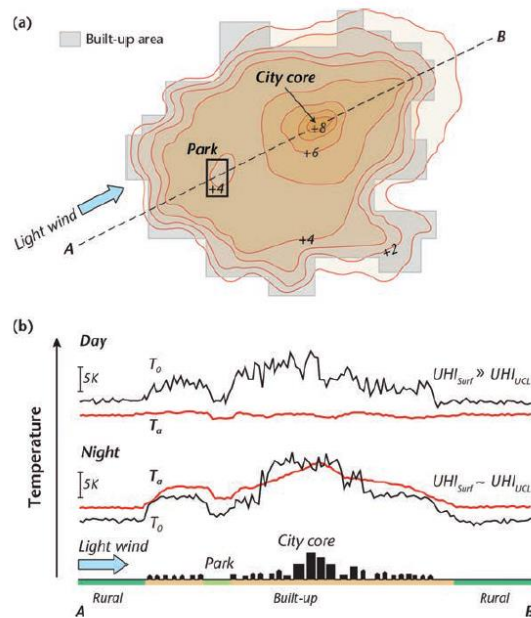
del límite superior de la capa atmosférica rural y el balance energético del BL. Este tipo de UHI tiene una escala local y meso.

- 3) Canopy layer heat island o de cañón urbano (UHI_{UCL}): Este tipo se refiere a las islas de calor donde existe una diferencia entre la temperatura contenida en el UCL y el exterior de la UCL (por sobre los techos) contrastado con la capa a una altura correspondiente en un sector rural. Se mide el balance energético de la superficie y del volumen de aire de la UCL. Este tipo de UHI tiene una escala local
- 4) Surface heat island o de superficie (UHI_{Surf}): Corresponde a la diferencia entre la temperatura de la superficie urbana y el suelo (y sus materiales) con el equivalente del aire rural. Este tipo de UHI es para estudios de nivel (UHI_{Surf}): escalar micro.

Con respecto a los tipos de islas de calor, los objetivos planteados en la presente investigación hacen énfasis en la de carácter superficial, a pesar de ello, todas las definiciones mencionadas por Oke et al., (2017) son relevantes al momento de contrastar la escala micro de las SUHIs con el resto de las islas de calor.

Respecto a la espacialidad de las UHI, estas son espacializadas mediante isotermas que son trazadas por la ciudad, donde es posible observar “relieves” que denotan concentraciones de calor en algunos sectores de la ciudad. Es precisamente en estos sectores donde se desarrollan las islas de calor.

Figura N° 4: Esquema ilustrativo sobre el comportamiento de las islas de calor



Fuente: Oke et al., (2017)

En este esquema diseñado por Oke et al. (2017) se puede observar cómo se presentan las islas de calor a través de isotermas destacando un cierto “relieve” o Peak, como lo señala Oke. Es en estos peak es donde se da con mayor fuerza la isla de calor. Por otro lado, en las zonas donde existe una menor gradiente y se mantiene una temperatura se le llama “Plateu” y por el contrario, donde existe una gradiente más alta, por ejemplo, en el cambio de rural a urbano, se le llama acantilado o “Cliff”.

En este tipo de esquemas se puede observar el desarrollo de las islas de calor en la ciudad y como se manifiestan espacialmente.

Mientras tanto en la parte baja del esquema (b), se realiza un corte transversal a la ciudad siguiendo el transepto delineado en el esquema superior (a) desde el punto A al punto B, cruzando un área de la ciudad que se encuentra a una mayor temperatura. La línea de color negro representa la temperatura de superficie y en color rojo la temperatura del aire. Esto es utilizado para dar cuenta como durante el día la temperatura superficial se mantiene considerablemente más alta que la temperatura atmosférica. Por otro lado, en el caso nocturno (considerando ambiente con condiciones calmadas y claras) las temperaturas tienden a igualarse, demostrando como en la noche las islas de calor se magnifican, debido a la liberación lenta y prolongada de energía.

2.2.3 *Surface urban heat island (SUHI) y Sky View Factor (SVF)*

Las Islas de calor urbana de superficie o *Surface urban heat island (SUHI)* son un fenómeno micro climático que se origina por las variaciones en la temperatura superficial de los diferentes materiales, los cuales pueden variar dependiendo de la estructura de la ciudad (Oke et al., 2017). Este fenómeno tiene una alta probabilidad de darse en el contexto urbano, debido a las propiedades de los materiales de construcción que suelen usarse, los cuales poseen bajo albedo, bajo nivel de absorción de agua y características que facilitan la absorción y emisión de calor (Romero & Sarricolea, 2006), lo que confiere un ambiente favorable para la ocurrencia de este fenómeno debido a la absorción de calor de las superficies.

Dentro de los factores que influyen en la intensidad de las SUHI aparte de la materialidad, está el factor de visión de cielo o *Sky view factor (SVF)*. Este es definido como al grado de apertura del cielo dentro del UCL, tomando el suelo como punto de partida (Yamashita et al., 1986; Watson & Johnson, 1987; Bernard et al., 2018a; Heo et al., 2020), donde se mide que tan abierto se encuentra el cielo para transportar la radiación con relación a un lugar en particular, donde los valores van desde el 0 (totalmente bloqueado), hasta el 1 (no hay obstrucción), considerando que la radiación se propaga al aire (Brown & Grimmond, 2001). En definitiva, el SVF define la cantidad de fracción de flujo radiativo que sale de la superficie en un punto y que toca la atmosfera por sobre el UCL (Oke et al., 2017).

El SVF es un fenómeno micro climático que ocurre dentro del UCL, manteniendo un enfoque en la razón entre la altura de los edificios (H) y el ancho de las calles (W). Mientras la razón H/W sea más alta, significa que existe una menor área visible y, por tanto, una menor dispersión de energía de onda larga (Nakata-Osaki, Souza & Rodríguez, 2018). Esto se relaciona en cierta medida con el SVF, pero solo respecto a la densidad entre los edificios en consideración con su altura (Unger, 2009), por lo que no explica todas las dinámicas que ocurren dentro del UCL. Es por esto que el SVF se entiende como un concepto más inclusivo, debido a que el ambiente urbano puede ser descrito de mejor manera que solo por su razón H/W (Johnson & Watson, 1984). Además, si consideramos variables micro climáticas, el SVF es una medida relevante por la manera en que da a conocer la apertura del cielo respecto al transporte de flujo radiativo relativo, para un punto específico (Unger, 2009).

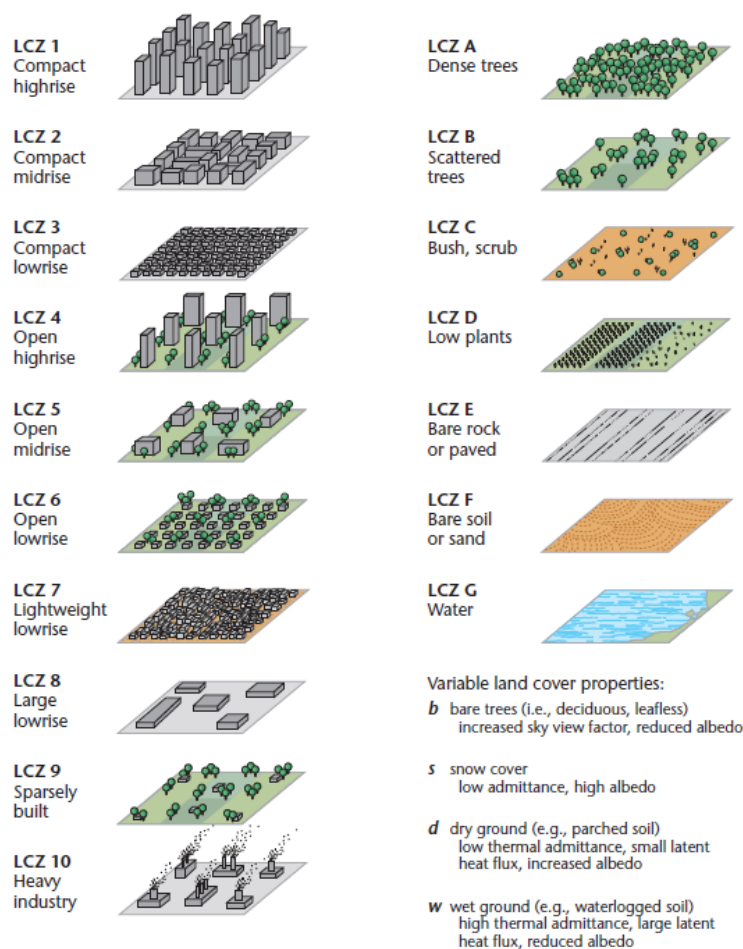
La importancia del SVF con relación a las SUHIs es que se comporta como un indicador para las dinámicas calóricas que se dan en las distintas superficies respecto a la liberación de radiación. Esto se debe a que es el SVF el que dará cuanta de los procesos al interior del UCL, donde su configuración tridimensional juega un importante rol en la regulación de la pérdida de calor de onda larga, y

tomando en cuenta que el proceso de enfriamiento nocturno es dirigido principalmente por este tipo de radiación, es significativo considerar al SVF como un indicador del comportamiento radiativo del UCL, que, en definitiva, afecta directamente al comportamiento de las SUHIs.

2.3 Zonas climáticas locales (ZCL)

El término de zonas climáticas locales se define como diferentes regiones con coberturas uniformes respecto a su estructura, materialidad y actividad humana, de superficies variables, que se extienden por cientos de metros o decenas de kilómetros (Stewart & Oke, 2012). Este tipo de clasificación sectorial da a conocer como el espacio urbano se estructura al encontrarse con una dispersión uniforme respecto a sus características climáticas, debido a una combinación de su geometría y materialidad.

Figura N° 5: Clasificación de zonas climáticas locales (ZCL)



Fuente: Oke et al., 2017

Este esquema diseñado por Stewart & Oke (2012), basado en uno previo (Oke, 2004), expone las diferentes zonas climáticas que se pueden encontrar en la ciudad construida, tanto como los tipos de coberturas de suelo. Para cada clase existen características propias respecto a las temperaturas que ahí existen bajo condiciones normales (superficies secas, ambiente nocturno calmado y claro, y con

un relieve simple). Este tipo de temperaturas se deben a la homogeneidad del área (Stewart & Oke, 2012) y las condiciones de sus propiedades superficiales, dentro de las cuales se considera el SVF, grado de exposición solar, fracción de superficie construida, porcentaje de superficie impermeable, fracción de superficie permeable, altura de elementos rugosos y tipo de elemento rugosos (Stewart & Oke, 2009a)

Esta clasificación se enmarca en la presente memoria de título en cómo las diferentes geometrías se comportan, generando variados microclimas. La importancia de esta relación se debe a la incidencia que tiene la geometría de la ciudad en la variación del microclima urbano, en espacial en espacios abiertos. Estas variaciones pueden generar una posible UHI, si es que tomamos en cuenta que la geometría urbana causa en gran medida este fenómeno (Nakata-Osaki, Souza & Rodrigues, 2018).

Las ZCL demuestran el comportamiento de las diferentes áreas de la ciudad en cuanto a sus microclimas, las cuales se encuentran condicionadas por las diferentes materialidades, coberturas y geometrías. En cuanto al uso de las ZCL en estudios científicos, son utilizadas para crear un marco lógico de trabajo en donde se estandariza la clasificación de las distintas coberturas urbanas y rurales para poder estudiar las UHI, debido a que entregan parámetros representativos que describen la morfología urbana local (Bechtel et al., 2015; Ren et al., 2016).

Por consiguiente, el uso de este modelo estandarizado de clasificación de barrios urbanos puede facilitar un diseño urbano que sea inteligente, el cual considere factores climáticos al momento de crear instrumentos de planificación territorial. Con esto no se refiere a la eficiencia del espacio, sino que la ciudad sea construida de manera sustentable (Middel et al., 2014). Para esto se debería tomar en cuenta la relación compleja del entorno construido y el clima urbano, lo que en definitiva podría concluir en una ciudad más cómoda para el humano, sin tener que comprometer la eficiencia energética urbana (Guhathakurta & Gober, 2010).

2.4 Planificación territorial sensible al clima

La planificación territorial consta de un proceso en donde se busca ordenar el territorio basado en un análisis técnico, en donde haya un consenso de la ciudadanía y exista una responsabilidad política sobre las acciones que se toman (Nicola, 2008). En la actualidad, en ciertas ocasiones, la planificación ha sido orientada hacia la densificación o a la ampliación de la estructura vial o a la construcción de infraestructura, lo que trae consigo, a veces, efectos no deseados sobre el ambiente (Rebolledo, 2003).

Una de las áreas ambientales que sufre este tipo de efectos es el clima, el cual, debido al paisaje urbano, crea un clima local que difiere del que existe en los alrededores rurales (Eliasson, 2000). Esto provoca que se creen los diferentes microclimas urbanos, los cuales pueden tener efectos negativos, como el calentamiento de los cañones urbanos, pero que pueden ser mitigados utilizando esa energía, por ejemplo, para calefaccionar los edificios dentro del cañón (Kelly, 2010). Este tipo de medidas son parte de la planificación sensible al clima.

Este tipo de ordenamiento territorial, en donde se considere el factor climático, es importante debido a que el cambio climático ha provocado que los métodos tradicionales de planificación se vuelvan obsoletos, por lo que se necesitan nuevos instrumentos para crear ciudades más resilientes (Raven, 2011). Es por esto que la planificación debe considerar los distintos patrones climatológicos para

asegurar el funcionamiento de la ciudad, tomando en cuenta las pequeñas variaciones que puedan ocurrir (Conde, Pabón & Sánchez, 2013).

Uno de los problemas principales de la ciudad es su materialidad, debido a su capacidad de absorber calor (Eliasson, 2000), causado por los cambios de coberturas permeables y húmedas por materiales secos e impermeables, como lo son el pavimento y las edificaciones urbanas (Arellano & Roca, 2015). Este cambio a materiales impermeables está correlacionado positivamente con la temperatura superficial (Conde, Pabón & Sánchez, 2013), lo que provoca que la ciudad este expuesta a estar a altas temperaturas.

Además de esta materialidad, y a grueso modo lo que la determina, e impacta profundamente al clima urbano es la morfología de la ciudad, la cual es responsable de cómo se configura la rugosidad de esta (Raven, 2011). La importancia de considerar la rugosidad en la planificación territorial es que esta determina que tan denso es el tejido urbano, lo cual puede ser una problemática, ya que si existen calles muy angostas, con edificios muy altos, provoca cañones urbanos muy profundos y reducen el intercambio térmico (Scarano & Mancini, 2017) lo que resulta en calles más calurosas, si se considera que los índices térmicos a nivel de calle están altamente relacionados con la razón H/W del cañón urbano (Ali-Toudert & Mayer, 2006)

Este tipo de cambios en el paisaje, generando impactos en el viento, humedad y temperatura, concluyen en perturbaciones en el confort de la población (Eliasson, 2000). Si concediéramos que el confort humano está altamente relacionado con el ambiente térmico de exterior (Ahmed, 2003; Spagnolo & De Dear, 2003; Lin & Matzarakis, 2008) es por medio de la planificación sensible al clima que se puede lograr un desarrollo de la ciudad y, a su vez, mejorar la calidad climática de esta, promoviendo el uso de los espacios públicos.

Es por estas características de la ciudad, y sus efectos en el clima, que se debe considerar la componente climática al momento de establecer planes de desarrollo urbano, para que la ciudad pueda ser un lugar de confort para la población, y a su vez, pueda expandirse sin irrumpir en el balance energético del medioambiente.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Levantamiento de imágenes por medio de un UAV

La presente memoria de título se enmarca dentro del proyecto FONDECYT de iniciación N°11180990, que se titula “La construcción del clima urbano: hacia la calidad y justicia climática en las ciudades chilenas” (2018 – 2021) de la Universidad de Chile, el cual se enfoca en el estudio de los microclimas urbanos y como estos son afectados por la morfología y la estructura de la ciudad. Es en este contexto que se realizó un levantamiento de información en la ciudad de Curicó, la cual será utilizada en la presente memoria de título.

La información levantada fueron imágenes aéreas tomadas por un UAV o “drone” del centro de la ciudad de Curicó, tanto en color verdadero como en temperatura superficial, las cuales fueron procesadas para crear un Ortofotomosaico del área de estudio.

En cuanto a la elección del trabajo por medio de un UAV, esta se debe al gran nivel de detalle que se puede lograr mediante esta metodología. Se ha demostrado como por este medio se pueden obtener imágenes más precisas que el trabajo con satélites, y al mismo tiempo obtener resultados más acabados (Feng, Liu & Gong, 2015). Por otro lado, también se pueden adquirir resultados de alta resolución que facilitan el trabajo para el análisis de materialidades urbanas y su comportamiento térmico (Burd et al., 2018).

3.1.1 Trabajo en terreno y obtención de imágenes

La etapa de terreno para la toma de imágenes se realizó durante dos días, los cuales fueron el 10 y 11 de marzo del año 2020. Se usaron dos días debido a que se tomaron fotografías en tres horarios, a las 12, 17 y 23 hrs. Para poder contrastar las diferencias de horarios (incidencia del sol) en cuanto a las superficies y su temperatura.

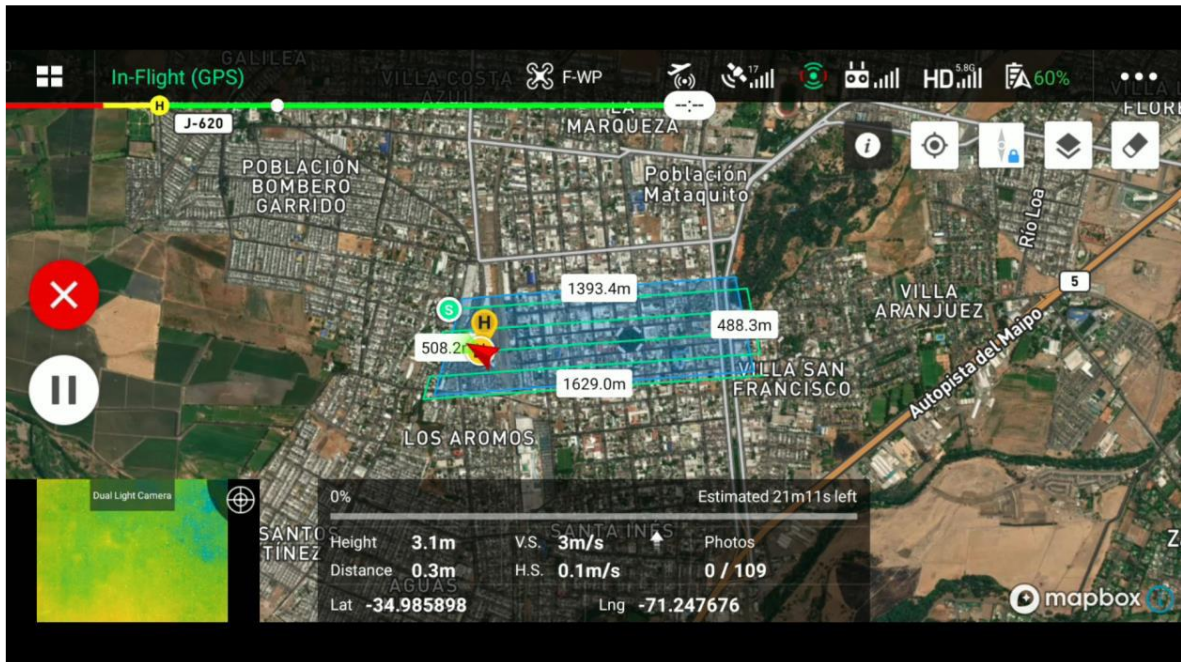
Se utilizaron solo las imágenes obtenidas a las 12 hrs, debido a que es el vuelo que logró mayor éxito en términos de la calidad de las fotografías, además de ser el horario en donde el sol incide de manera más perpendicular de los tres horarios propuestos. Otra razón para utilizar este horario es que las SUHI ocurren con mayor intensidad durante el día (Allen, Voogt & Christen, 2018; Bechtel et al., 2019).

Para la toma de imágenes se utilizó el drone Mavic pro-2 enterprise dual, debido a que tiene un buen rendimiento y es de gran fiabilidad (Sorenson, G., 2018). Otra razón para elegir este UAV es que cuenta con una cámara de alta resolución de 12 Megapíxeles, además de un sensor radiométrico FLIR® (DJI, 2020) lo que permite visualizar la temperatura superficial.

Para los vuelos efectuados se realizó un plan de vuelo, el cual fue configurado por medio de la aplicación propia del drone, llamada DJIPilot. En esta se trazó la ruta que siguió el drone y por donde tomó las ortofotos (ver figura N°6). En el plan de vuelo también se eligen las variables de altura, velocidad, tiempo de toma entre ortofoto y distancia a recorrer. Luego en la pantalla se puede observar estas variables y cómo se comporta el drone, tanto como la batería que este tiene, el cual, al llegar a un porcentaje bajo, vuelve al punto de partida.

En la figura N°6 se puede observar el plan de vuelo del área de estudio en el centro de Curicó, tanto como el trazado por donde se tomaron las ortofotos.

Figura N° 6: Captura de pantalla del plan de vuelo



Fuente: Fondecyt de Iniciación N°11180990 (2018-2021): “La construcción del clima urbano: hacia la calidad y justicia climática en las ciudades chilenas”, liderado por Pamela Smith

3.1.2 Procesamiento de ortofotografías

Luego del trabajo en terreno se llevó a cabo el procesamiento de las imágenes. Como primero resultado, y materia prima para la composición del Ortofotomosaico, se obtuvieron ciento once ortofotos en color verdadero (RGB) y ciento nueve ortofotos termales, las cuales fueron procesadas en el software Agisoft Metashape.

Este software tiene por fin la creación de Ortofotomosaico por medio de una serie de procesos, los cuales son autómatas, por lo que es el software el que se encarga de procesar, para poder llegar a un único resultado (Duarte, 2018). El objetivo de esto es que la única manera de alterar el resultado es por medio de los parámetros que se le otorguen al software, esto con el fin de que el usuario no pueda intervenir en el procesamiento de las imágenes.

Se creó un mosaico para unir para unir las 111 imágenes individuales. Al ser ortofotos, cuentan con las características geométricas y georreferenciadas (García & Martínez, 2007) por lo que están orientadas en el mismo sentido. Esto facilita el trabajo para el software y permite crear una composición de ortofotos como una malla.

Después de alinear las ortofotos, se creó una nube densa de puntos, la cual es una malla 3D que sirve para poder crear el Ortofotomosaico. Para este proceso el software utiliza los principios de la aerofotogrametría y la fotogrametría, en donde se busca reconstruir objetos 3D de una forma acabada, manteniendo la dimensión de los distintos objetos, por medio de fotografías (Jiménez & Prado, 2018; Brenes-González, 2016), solo que en este caso es con un enfoque más orientado hacia la aerofotogrametría debido a que es por medio de fotografías aéreas.

Como resultado el software calcula las distancias entre los puntos por medio de la misma nube densa, construyendo una planimetría del área de estudio. Con esto se puede crear un modelo de elevación del terreno, el cual será utilizado para conocer de manera precisa las diferentes alturas de la zona (casa, edificios, calles, etc...)

Una vez construidos los modelos elevación (DEM y Mesh) se puede dar paso a la creación del Ortofotomosaico. Lo acabado de este tipo de resultados depende de la calidad de los resultados anteriores, ya que son estos los cuales sirven como input para crear el Ortofotomosaico.

3.1.3 Conversión de información cualitativa a cuantitativa

Una vez que se tiene el Ortofotomosaico, se debe transformar la información que expresa cada píxel. Esto es causa de que la información se encuentra en código RGB, por tanto, es de carácter cualitativo. Para poder lograr que cada píxel muestre la temperatura superficial en grado Celsius, se debe realizar una conversión de información cualitativa (código RGB) a cuantitativa (Grados Celsius). Para esto se realiza un procesamiento de la información mediante el software Excel, en donde se ingresan una cantidad de doce puntos de control de la imagen termal, se tabula la información otorgándole a cada punto de control un código de identificación (ID), la temperatura superficial registrada (en grados Celsius), y el valor del código RGB en cada una de las bandas.

Una vez obteniendo los resultados de dicha regresión, si es que son positivos y se mantienen dentro de un nivel de correlación alto, se comienza a trabajar en el software ArcGIS, en su extensión ArcMap, para poder realizar un cálculo matemático a cada píxel con los valores de coeficiente que entrego la regresión. Es en este paso metodológico en donde se convierte la información cualitativa a cuantitativa.

Para esto se multiplica cada banda del espectro electromagnético por su coeficiente propio, el cual es entregado por el software Excel, y luego el resultado de cada una de estas multiplicaciones es sumado junto con un coeficiente de intersección. Como resultado se obtendrá una imagen ráster con valores de píxel que representen la temperatura de superficie del terreno.

Figura N° 7: Ecuación para conversión de RGB a grados Celsius

$$\text{Coeficiente de intersección} + (\text{Banda R} * \text{coeficiente R}) + (\text{Banda G} * \text{coeficiente G}) + (\text{Banda B} * \text{coeficiente B})$$

Fuente: Fondecyt de Iniciación N°11180990 (2018-2021): “La construcción del clima urbano: hacia la calidad y justicia climática en las ciudades chilenas”, liderado por Pamela Smith

En caso de que la ecuación sea exitosa, debería dar como resultado la transformación de la información cualitativa a cuantitativa, lo que significaría la obtención de una imagen termal del centro de la ciudad de Curicó en donde cada píxel de la imagen refleja la temperatura superficial de ese punto exacto. Cabe recalcar que la elección del uso de drones se justifica en el tamaño del píxel de la imagen final, la cual tiene un tamaño 48 centímetros aproximadamente, lo que significa una imagen termal y de color verdadero de alta resolución.

3.2 Trabajo de imágenes satelitales de temperatura superficial

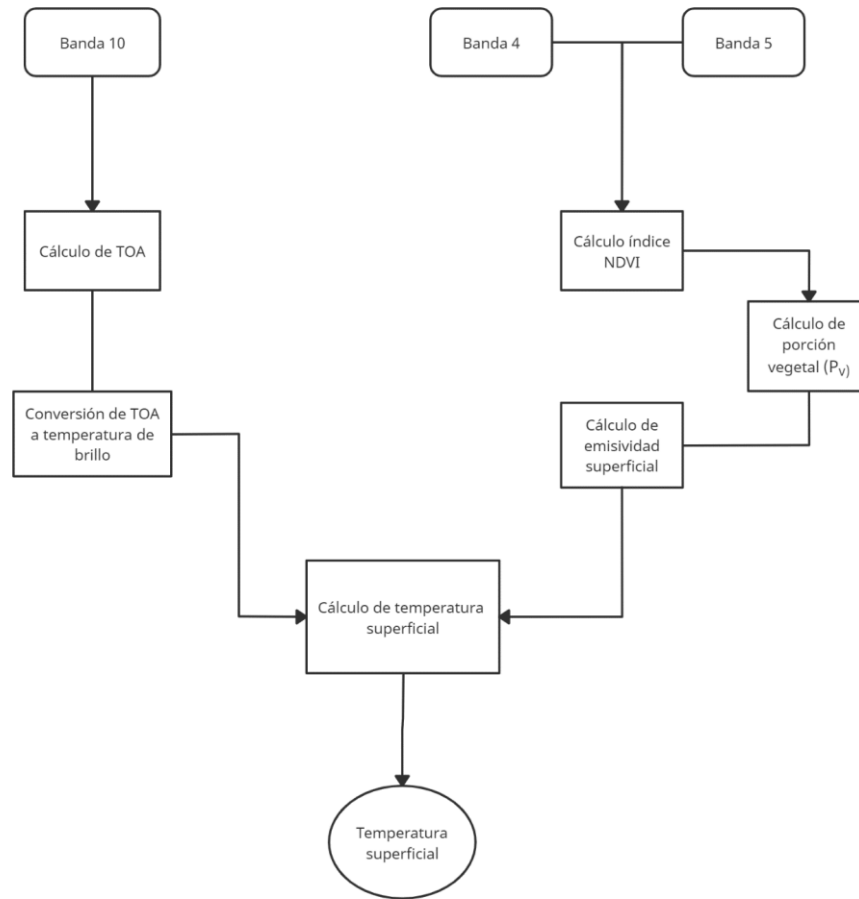
Para el trabajo de la temperatura superficial a meso escala, se utilizarán imágenes satelitales por medio de la aplicación de Google Earth Engine (GEE). Esta herramienta brinda grandes posibilidades en cuanto al procesamiento de imágenes satelitales debido a la gran cantidad de data que tiene a disposición, la cual incrementa constantemente con el paso del tiempo. Esta herramienta permite utilizar imágenes con una gran resolución espacial, la cual corresponde a píxeles de 30 metros. Además, contiene colecciones de imágenes desde 1982 hasta la actualidad (en el caso del satélite Landsat), lo que posibilita un trabajo a diferentes niveles de escalas. Esto también facilita el trabajo para el análisis de las UHI, debido a que se pueden analizar los cambios en el uso de suelo a lo largo del tiempo (Ravanelli et al., 2018), tanto como el cambio de la morfología de la ciudad.

Para el uso de esta plataforma se creó un código, por medio del lenguaje de programación JavaScript o Python, en donde se plantean las variables a trabajar respecto a una colección de imágenes satelitales. Estas variables propuestas procesaran la imagen satelital elegida y el resultado se visualizará en el mapa que ofrece la aplicación. Una vez terminado el código este puede ser guardado para un uso posterior, y también puede ser compartido a diferentes usuarios para su utilización. Esta apertura de código es una de las mayores ventajas de la plataforma, ya que otorga la posibilidad de trabajar en comunidad con diferentes personas del mundo.

En cuanto a la temperatura superficial de la ciudad de Curicó, se trabajó a partir de la metodología propuesta por Avdan & Jovanovska (2016), utilizándose el satélite del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), Landsat 8, en su versión de reflectancia superficial Tier 1, la cual presenta una corrección atmosférica de la reflectancia superficial. Estas imágenes contienen tres bandas visibles, dos bandas de infra rojo cercano (VNIR), dos bandas de infra rojo de onda corta (SWIR) y dos bandas infra rojo termal (TIR) que procesan la temperatura de brillo (Google Earth Engine, 2020).

Para lograr extraer la temperatura superficial, se debe ejecutar una serie de ecuaciones planteadas por Avdan & Jovanovska (2016), en las cuales se ocupan las bandas B3, B4 y B10 del satélite Landsat 8, como se demuestra en la figura N°8

Figura N° 8: Esquema para la conversión de la temperatura superficial



Fuente: Elaboración propia (2020) en base a Avdan & Jovanovska (2016)

El cálculo cuenta con una serie de pasos correctivos para alcanzar un resultado preciso, los cuales serán descritos a continuación.

3.2.1 Cálculo de TOA (Top of atmospheric) radiancia espectral

Primero se debe calcular la radiancia espectral del TOA en base a la banda 10, debido a que esto servirá para poder calcular la temperatura de brillo en el siguiente paso. Para esto se aplicará la ecuación N° ...

$$L\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L - O_i,$$

En este caso $L\lambda$ representa el valor de la radiancia espectral de TOA; M_L hace referencia al factor de reescalamiento multiplicativo específico para la banda 10; Q_{cal} significa la banda 10; A_L es el factor de reescalamiento aditivo específico para la banda 10; y O_i representa la corrección para la banda 10. Cada valor específico de la banda termal se puede encontrar en la meta data del satélite.

3.2.2 Conversión de TOA a temperatura de brillo:

Para esto se convierte la banda 10 (TIRS) de radianza espectral a la temperatura de brillo (BT) usando las constantes termaltes que también se encuentran en la meta data de Landsat 8. En este caso se debe utilizar la siguiente ecuación para la conversión:

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left[\left(\frac{K_1}{L\lambda}\right) + 1\right]} - 273,15$$

En este caso BT sería la temperatura de brillo; K_1 y K_2 son constantes termaltes específicas para la conversión, las cuales se encuentran en la meta data de la banda termal; y se le restan 273.15 para obtener el resultado en grados Celsius.

3.2.3 Método para la corrección de la emisividad por medio del NDVI

A continuación, se utilizarán las bandas 4 y 5 del satélite Landsat 8 para el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual mide la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación. La importancia de este paso recae en que el NDVI será utilizado para calcular la porción vegetal de la zona y la emisividad de superficie.

Para el cálculo del NDVI se debe realizar una división entre la diferencia de la banda infra roja cercana y la banda roja visible, y la suma de estas dos bandas, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR (banda 5) - R (banda 4)}{NIR (banda 5) + R (banda 4)}$$

3.2.4 Cálculo de porción vegetal (Pv)

Para el cálculo de la porción vegetal se debe utilizar el NDVI calculado anteriormente. Es a partir de los valores máximos y mínimos de este índice que se obtiene la porción vegetal, utilizándolos de la siguiente manera como muestra la ecuación:

$$Pv = \frac{(NDVI - NDVI \text{ mín})}{(NDVI_{max} - NDVI \text{ mín})}$$

El propósito de utilizar los valores máximos y mínimos del NDVI es lograr alcanzar un mayor nivel de representatividad respecto a las coberturas de suelo y a sus valores propios de NDVI.

3.2.5 Cálculo de emisividad de superficie (ϵ)

Es crucial calcular la emisividad de superficie debido a que tiene una gran relevancia para lograr llegar al producto final, el cual es la temperatura de superficie. Esta importancia recae en que la emisividad es un factor de proporcionalidad, el cual escala la radiancia de los cuerpos negros (Ley de Planck) para predecir la radiancia emitida, y a la vez, saber la eficiencia de transmitir la energía termal a lo largo de la superficie y hacia la atmosfera (Avdan & Jovanovska, 2016). Para esto se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\epsilon = 0,004 * Pv * 0,986$$

En este caso el primero valor corresponde a la rugosidad del terreno, el cual es representado por una constante; el segundo es la porción vegetal calculada anteriormente, y el último factor corresponde a un valor de corrección de la ecuación.

3.2.6 Cálculo de la temperatura superficial (LST)

Finalmente, luego de realizar todas las operaciones anteriores, se puede avanzar al último paso, el cual corresponde a la transformación final que da como resultado la temperatura superficial. Para esto se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$LST = \frac{BT}{(1 + (0,00115 * \frac{BT}{1,14388}) * Ln(\epsilon))}$$

Es por medio de esta ecuación que se puede obtener la temperatura superficial de un área que se desee por medio del uso del satélite Landsat 8. Es importante señalar que todas estas ecuaciones son procesadas en la aplicación de GEE, la cual toma como variable cada uno de los resultados, y de esta manera se calculará la temperatura superficial de la ciudad de Curicó.

3.3 Levantamiento de zonas climáticas locales

Para el levantamiento de las zonas climáticas locales existen dos métodos que son utilizados: El levantamiento por medio de la plataforma World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) o por medio de fotointerpretación, la cual puede ser variada en su forma. La primera opción representa un gran avance en términos de manejo de información climática. Esto se debe a que WUDAPT ofrece información validada por especialistas de manera abierta y gratuita. La única dificultad es que depende de los desarrolladores para que exista información en los distintos territorios, por lo que existe una concentración de la información en las ciudades más reconocidas a nivel mundial.

Por otro lado, la fotointerpretación representa una gran herramienta debido a que se entrega la información de inmediato y es levantada por supervisión propia, a diferencia de la que se podría obtener de un portal de información. También se le debe sumar a esta metodología que la información recopilada debe ser verificada con una revisión en terreno, con el fin de corroborar las conclusiones que fueron extraídas de las imágenes analizadas.

En el caso particular de esta memoria de título, se utilizará la información levantada por Toro (2020) en el contexto del proyecto FONDECYT “La construcción del clima urbano: hacia la calidad y justicia climática en las ciudades chilenas” (2018 – 2021) de la Universidad de Chile, en el área de Curicó, la cual fue obtenida por medio de fotointerpretación de la zona a través de la aplicación Google Earth. Este tipo de metodología brinda una facilidad para el trabajo debido a que se puede trabajar analizando las diferentes manzanas, creando polígonos que luego son compatibles con los softwares GIS (Ferreira et al., 2017). Luego esta información debe ser comprobada en terreno para verificar los datos.

Es importante señalar que muchos de los parámetros relacionados al clima urbano pueden ser obtenidos por medio de la observación terrestre de manera remota (Mitraka, 2015) y el uso de Google Earth como plataforma de fotointerpretación esta validada por diferentes investigaciones relacionadas al clima urbano y al mapeo de zonas climáticas locales (Stewart & Oke, 2009B; Ferreira et al., 2017; Wang, 2018)

3.4 Producción del Sky view factor para el área de estudio

Para el cálculo del índice Sky view factor (SVF) se utilizará la metodología planteada por Sarricolea (2012) en donde se utilizan los datos de las alturas de las edificaciones (H) y del ancho de las calles (W). Por medio de estos datos se puede calcular que tan bloqueado se encuentra el cielo desde la perspectiva de la calle (SVF) y por tanto se puede saber que tan encañonadas se encuentran las calles y que tanta visión del cielo hay dentro del cañón urbano (Grimmond et al., 2001). Además, junto con la razón H/W se puede evaluar la cantidad de sombra que existe dentro del mismo cañón (Lin et al., 2012) lo que interesa al momento de considerar variables climáticas para analizar procesos dentro del cañón urbano.

Este método considera una visión analítica (Grimmond et al., 2001) y geométrica del terreno, por lo que no muestra el valor exacto del SVF, pero si logra estimarlo con gran precisión. Esto se debe a que considera solo las variables geométricas de la morfología urbana, sin tomar en cuenta otras rugosidades que bloquean la visión de cielo, como árboles, postes de luz u otros elementos. Esto es lo que diferencia esta metodología de la cual utiliza fotografías tomadas con ojo de pez desde una altura designada, debido a que esta sí considera otros objetos que interfieren con el cielo. Aunque el problema con este método es que, al estar a una altura determinada, y no al nivel de calle como la metodología elegida, se excluyen porciones del terreno que afectan a los resultados, sobre estimando el SVF, también esto se puede ver amplificado en lugares con una razón H/W baja (Grimmond et al., 2001), por lo que se considera que el método geométrico tendrá un resultado más acabado.

Es por esto que para el cálculo del SVF se utilizó el nivel de calle como punto cero de altura, para lo cual se utilizó el modelo de elevación, el que se obtuvo de las imágenes del Ortofotomosaico de color verdadero (RGB), el cual contiene la altura vertical para cada píxel en específico (Bernard et al., 2018a). Es importante destacar que la fidelidad del SVF depende de la exactitud de la imagen ráster que se utiliza como input (Häntzschel, Goldberg & Bernhofer, 2005; Bernard et al., 2018a) por lo que esta metodología se utilizó debido a la alta resolución de las imágenes que entrego el UAV.

Luego se trazaron las calles en el software ArcGIS, en su extensión ArcMap, con el ancho de calle que corresponde según lo estipulado en la ordenanza local del plano regulador de la Municipalidad de Curicó (2011). Las calles trazadas fueron las del centro de Curicó, además de dos avenidas y 4 pasajes, esto con el fin de tener más de un escenario y así poder realizar un análisis más completo.

Posteriormente se crearon 286 puntos de control, los cuales fueron ubicados en el centro de las calles, en donde se midieron las alturas de las edificaciones adyacentes para poder tener los datos necesarios para ejecutar las ecuaciones presentadas por Sarricolea (2012), las cuales se basaron en Bonan (2002), las cuales se encuentran en la figura N° 9. Cada punto cuenta con un número de identificación, la calle en que se encuentra, las alturas de las edificaciones que se encuentran adyacentes a la calle, el ancho de la calle, el ángulo de incidencia, numérico y en grados, el valor del SVF y las coordenadas exactas.

Figura N° 9: Esquema metodológico para el cálculo del SVF

<p>Diagram showing two buildings of height $H=16\text{ m}$ and width $W=16\text{ m}$. The angle of incidence is $a=63,4^\circ$, and the SVF is $\Psi=0,45$.</p>	<p>Factor de visión del cielo (SVF) o ψ es: $\Psi = \cos[\tan^{-1} 2H/W]$ $\Psi = \cos[\tan^{-1} 2 \cdot 16/16]$ $\Psi = \cos[\tan^{-1} 2]$ $\Psi = \cos[1,107]$ $\Psi = 0,45$</p> <p>$a = \text{Grados } [\tan^{-1} 2H/W]$ $a = 63,4^\circ = 1,107\text{rad}$</p>
<p>Diagram showing two buildings of height $H=8\text{ m}$ and width $W=16\text{ m}$. The angle of incidence is $a=45^\circ$, and the SVF is $\Psi=0,71$.</p>	<p>$\Psi = \cos[\tan^{-1} 2 \cdot 8/16]$ $\Psi = \cos[\tan^{-1} 1]$ $\Psi = \cos[0,785]$ $\Psi = 0,71$</p> <p>$a = \text{Grados } [0,785]$ $a = 45^\circ = 0,785\text{rad}$</p>
<p>Diagram showing two buildings of height $H=4\text{ m}$ and width $W=16\text{ m}$. The angle of incidence is $a=26,6^\circ$, and the SVF is $\Psi=0,89$.</p>	<p>$\Psi = \cos[\tan^{-1} 2 \cdot 4/16]$ $\Psi = \cos[\tan^{-1} 0,5]$ $\Psi = \cos[0,463]$ $\Psi = 0,89$</p> <p>$a = \text{Grados } [0,463]$ $a = 26,6^\circ = 0,463\text{rad}$</p>
<p>Diagram showing two buildings of height $H=4\text{ m}$ and width $W=16\text{ m}$. The angle of incidence is $a=36,9^\circ$, and the SVF is $\Psi=0,80$. H es 6, ya que es el promedio de 4 y 8</p>	<p>$\Psi = \cos[\tan^{-1} 2 \cdot 6/16]$ $\Psi = \cos[\tan^{-1} 0,75]$ $\Psi = \cos[0,643]$ $\Psi = 0,80$</p> <p>$a = \text{Grados } [0,643]$ $a = 36,9^\circ = 0,643\text{rad}$</p>

Fuente: Sarricolea (2012)

Es por medio de estas ecuaciones que se puede obtener el ángulo de incidencia del sol hacia el centro de la calle, y posteriormente con este resultado se puede obtener el valor del SVF. Estos valores fueron procesados en el software Excel en donde se le dio a cada punto las alturas de las edificaciones, el ancho de la calle en que se situaban, el ángulo de incidencia en grados, las coordenadas geográficas de su ubicación y el valor del SVF para ese punto en específico.

Por último, se pondero los valores del SVF para el resto de las calles seleccionadas en base a los puntos de control con la herramienta de ponderación inversa a la distancia (IDW). Es importante realizar este paso cuando los datos no cubren toda el área de estudio y es importante elegir la herramienta correcta para lograr el resultado que se espera y no crear información incoherente con el terreno (Ikechukwu et al., 2017). La elección de la función IDW se debe a que asume los valores en lugares no conocidos puede aproximarse de la manera correcta respecto a la ponderación de los valores más cercanos (Ikechukwu et al., 2017). Al realizar esta ponderación se logra obtener el valor del SVF para las calles seleccionadas debido a que se utilizaron como mascara el shape creado anteriormente en donde se tiene el ancho de las calles.

3.5 Cruce de datos de temperatura superficial y morfología (SVF) a microescala

Como último paso se realizó un cruzamiento de los datos obtenidos a nivel micro escalar. La razón del uso de estos se debe a que se buscó encontrar la relación entre la morfología urbana y la temperatura superficial levantada anteriormente. Con esto se busca dar cuenta como en el contexto de la ciudad de Curicó la geometría urbana, la cual varía en altura, longitud y espacio entre edificaciones, tiene un impacto en la temperatura superficial, lo cual puede tener una repercusión a su vez en los balances energéticos (Grimmond, 2001).

Para poder efectuar el cruzamiento primero se tuvo que trabajar en el software ArcGIS, en donde se transformó la imagen ráster que contiene los valores del SVF en puntos individuales por medio de la herramienta *Ráster to Point*, los cuales luego fueron relacionados con la temperatura superficial a través de la herramienta *Extract Multi Values to Point*. De esta manera se logró que cada punto del área de estudio contuviera los datos del SVF y su temperatura superficial. Luego estos datos fueron exportados a un archivo de tipo Excel en donde se realizó la regresión lineal con la herramienta de análisis de datos que ofrece este software. Una vez realizada la regresión se analizaron los datos que se obtuvieron, además de generar un gráfico que demuestra la relación existente entre estas dos variables.

Figura N° 10: Puntos individuales por valor del SVF



Fuente: Elaboración propia (2021)

Para poder realizar un análisis más acabado de las gráficas que se obtuvieron se utilizará la metodología planteada por Scarano & Sobrino (2015) en donde se agrupan los datos para ejecutar tres regresiones distintas para cada escenario, los cuales son los siguientes: En el primero caso se usó la temperatura superficial y el SVF de cada punto extraído; en el segundo caso se calculó la temperatura superficial promedio para cada tramo centesimal del SVF, o sea, cada 0,01 del índice, y se realizó una regresión entre los valores promedios de temperatura y el tramo que se utilizó del SVF; y por último una gráfica en donde se expresa la regresión realizada con los datos de temperatura superficial promedio por tramo y la frecuencia de cada tramo.

CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1 Temperaturas superficiales en la ciudad de Curicó en la estación de verano, Enero del año 2020.

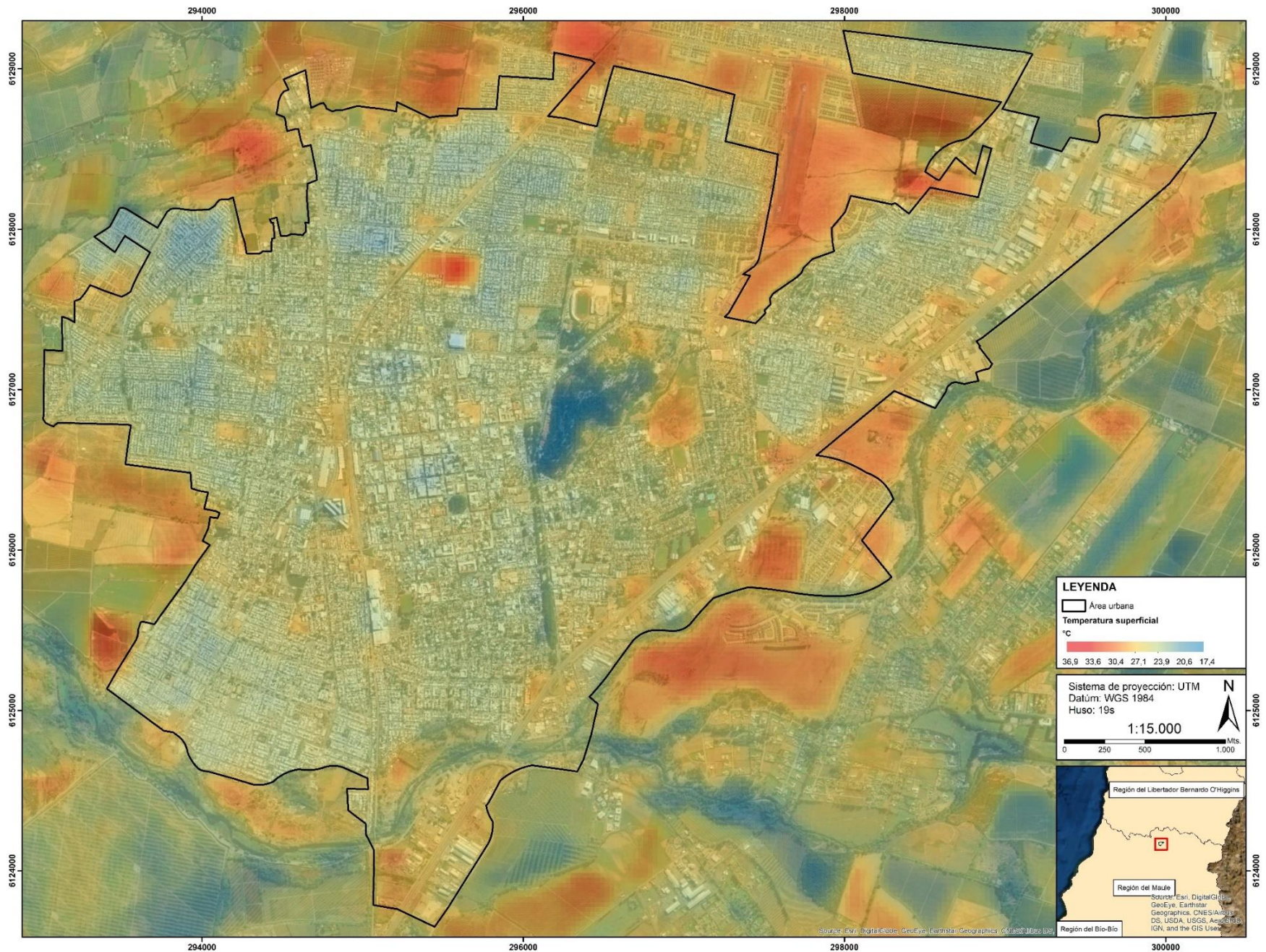
4.1.1 Temperaturas a meso escala

En la figura N°11 se exponen los rangos de temperatura superficial, donde el límite superior es de 36,9°C, representado por los colores más rojizos, hasta los 17,4°C, los cuales son graficados por tonos más azules. Con esta información se puede observar cómo dentro de la ciudad existen ciertos patrones espaciales que se diferencian de los que se encuentran en las afueras, en donde existen grandes extensiones de superficie sobre los 25°C. Por otro lado, en la ciudad se pueden apreciar ciertos focos de altas temperaturas, los cuales corresponden a zonas de la ciudad que no cuentan con el beneficio de tener sombra durante el día, debido a que se encuentran en grandes extensiones de tierra sin ninguna edificación cercana.

En cuanto a focos de bajas temperaturas, se puede observar como el cerro Condell, el cual se encuentra al centro de la imagen, es uno de los puntos más fríos de la ciudad, alcanzando temperaturas de hasta 18,8°C. Esta área verde muestra como este tipo de infraestructuras de la ciudad puede ofrecer temperaturas más bajas debido a la sombra que crean los árboles que ahí se encuentran. Algo similar ocurre en el centro de la ciudad, pero en menor medida. Se puede apreciar que la plaza de armas de la ciudad, donde se reflejan bajas temperaturas, alcanzando los 22,7°C, aunque esta temperatura se puede ver solo alrededor de los árboles que ahí se encuentran, porque a medida que se aleja de la plaza las temperaturas tienden a aumentar, salvo en algunos tejados de edificios cercanos. Este efecto sobre los tejados puede ser explicado por la materialidad de estos, los cuales al ser de Zinc reflejan la luz solar, manteniendo una temperatura mas baja. Por otro lado, cuando este tipo de techumbre se oxida o se daña y cambia de color, tiende a acumular el calor, perdiendo su capacidad de reflejar la luz.

En las afueras de la ciudad se puede apreciar cómo se alcanzan altas temperaturas, sobre todo en las parcelas de agrado que se encuentran en los alrededores. Estas altas temperaturas pueden deberse a la ausencia de sombra en estos lugares, por lo que la incidencia de luz solar es mayor que en la ciudad. También se puede apreciar como en la rivera del estero Guaiquillo, el cual se encuentra al sur del centro urbano se dan temperaturas bajas que se contrastan con las de las parcelas de agrado. Esto se debe a las capacidades térmicas de este cuerpo de agua, el cual influencia a las zonas aledañas en donde el estero logra infiltrarse, como puede apreciarse en el sector noreste de la imagen, en donde hay un foco de bajas temperaturas, el cual se encuentra en la riera del rio, a diferencia de las parcelas que se encuentran en el sector norte de la ciudad. Además, si se toma en cuenta la variable de humedad, una de las cuales tiene mayor incidencia en el balance térmico, se puede explicar la razón de las bajas temperaturas en las zonas que se encuentran colindantes al estero Guaiquillo.

Figura N° 11: Temperatura superficial a meso escala de la ciudad de Curicó



Fuente: Elaboración propia en base a datos levantados vía UAV, 2021

4.1.2 Temperaturas a microescala

La figura N°12 muestra la temperatura a microescala en donde esta alcanza una máxima es de 50,4° Celsius, representado por los colores más rojizos, y una mínima de 10,57°, la cual es reflejada por los colores más azules. A raíz de la conversión realizada la información puede variar en 2,4° Celsius debido al error típico resultante de la regresión necesaria para la transformación de los datos.

Es en esta imagen donde se puede apreciar las diferencias de temperaturas con gran nivel de detalle debido a la alta resolución que entregan las imágenes drone. Con esto se puede notar como las calles muestran temperaturas altas en su mayoría, debido a la absorción de calor del pavimento. También se puede apreciar como al lado oeste se encuentran las temperaturas más altas, las cuales se deben a la materialidad de esa zona, las cuales son pavimento y también metales que se encuentran en las líneas del tren que cruza la ciudad. Es en esta misma línea férrea donde encontramos suelo desnudo, el cual al tener ausencia de sombra y de infraestructura verde, alcanza altas temperaturas superficiales (Ver figura N°12)

Otro foco de altas temperaturas se puede apreciar en los tejados de las viviendas que se encuentran al oeste de las vías del tren, las cuales son hogares de no más de un piso de altura, por lo que esa zona es bastante uniforme respecto a las edificaciones. Esto podría explicar las alzas en la temperatura, debido a que, al igual que en las parcelas de agrado a las afuera de la ciudad, esta área no presenta edificios que generen sombra, por lo que los tejados quedan expuestos a la radiación solar, alcanzado estas altas temperaturas.

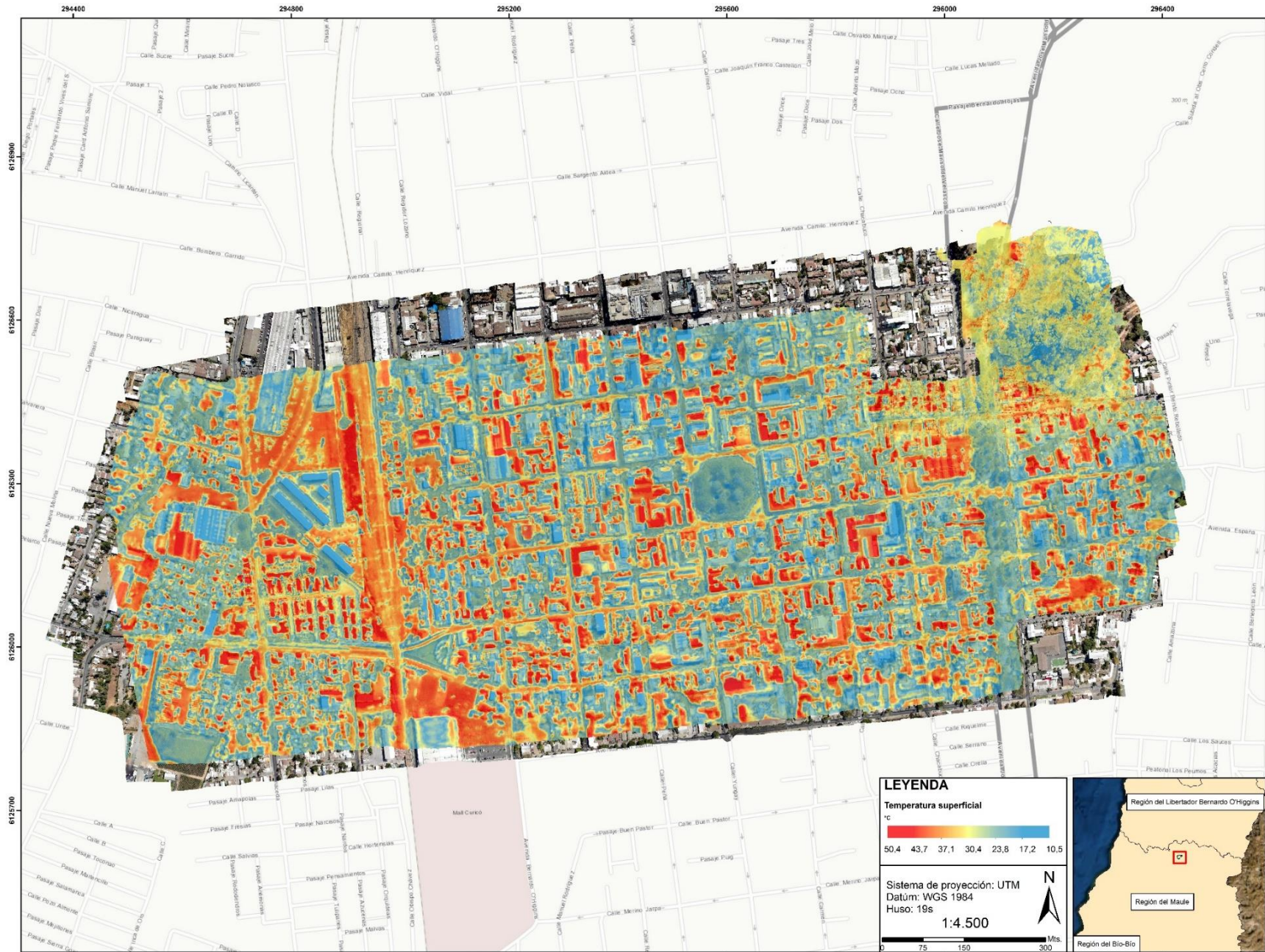
Uno de los factores que más influye en el caso de los tejados es el albedo de estos. Como se puede observar en las imágenes RGB mostradas en el área de estudio (Ver figura N°2) existen variados materiales de techumbres, pero el que predomina son las planchas de Zinc, en variados tipos, ya sean acanaladas o tipo 5V. Este material al estar en perfectas condiciones refleja gran parte de la luz solar que incide sobre ellos, lo que se condice con bajas temperaturas, mientras que en el caso de las planchas más dañadas por el óxido y la corrosión, se dan temperaturas más altas, alcanzando las alzas que se demuestran en el grupo de viviendas al oeste de la línea del tren. Este efecto que provoca un aumento en la temperatura superficial está fuertemente ligado al albedo de estos materiales, pues las planchas más oscuras (oxidadas) absorben más energía que las planchas que están en mejores condiciones, además de las propiedades singulares del Zinc.

Por otra parte, también se puede apreciar como hay zonas del centro de Curicó que muestran las temperaturas más bajas, destacando entre ellas la plaza de armas y el cerro Condell. También se pueden apreciar temperaturas bajas en el transecto que se encuentra al este de la figura, en donde está la Avenida Manso de Velasco, la cual cuenta con un bandejon central en donde hay una infraestructura verde (corredor de árboles). Estos focos de bajas temperaturas se pueden observar en áreas donde existe vegetación, la cual, al crear sombra constante, y por la naturaleza propia de esta, mantiene una temperatura más baja. Además, es importante destacar que existen techos que no superan los 20° debido a su comportamiento y propiedades térmicas asociadas a su materialidad, aunque en otros casos solo se debe a la cobertura de sombra que existe ahí.

La importancia de este resultado es que se puede analizar el comportamiento térmico de la zona a un gran nivel de detalle, debido a la alta resolución que entrega las imágenes drone. Esto presenta un gran beneficio para el análisis micro escalar debido a que se puede observar y analizar la manera en que se comportan las diferentes áreas de la ciudad, tanto como los cañones urbanos. De todas maneras,

es importante recalcar que los resultados aquí presentados son de temperatura superficial, por lo que no se puede inferir resultados totales del comportamiento climático de la ciudad, pero si se pueden tener ciertos deslumbres de cómo se comportan las superficies respecto a sus capacidades y propiedades térmicas.

Figura N° 12: Temperatura superficial a micro escala de la ciudad de Curicó



Fuente: Elaboración propia en base a datos levantados vía UAV, 2020

4.1.3 Comportamiento de la temperatura superficial a diferentes escalas

Al momento de contrastar los resultados en diferentes escalas, se pueden apreciar como cada uno de los resultados funciona acorde a su espacialidad, pero resulta difícil encontrar representatividad en la imagen meso escalar en contraste con la micro escalar. En principio una de las principales razones para hacer este tipo de análisis se logra notar en la diferencia de escalas, ya que mientras la imagen satelital muestra una temperatura máxima de 35,9° Celsius (Ver figura N°10), la imagen a micro escalar demuestra como ciertas superficies logran llegar hasta los 50° Celsius. Es importante recalcar que esto no es un símbolo de imprecisión por parte de la imagen satelital, solo que trabaja a otra escala, al cual busca ilustrar otro tipo de resultados, los cuales son necesarios para realizar una caracterización de una ciudad contrastada con el ambiente rural. Además, la diferencia de resolución es bastante considerable, puesto que cada píxel en la imagen satelital representa 90 m² (30x30 metros), mientras que la imagen del UAV representa apenas un área de 0,242 m² (0,55x0,44)

A continuación, se busca contrastar los resultados de las imágenes satelitales con los resultados obtenidos mediante el uso de un UAV para el levantamiento de información en el centro de la ciudad de Curicó. Esta caracterización será guiada por la suma de resultados, ya que cada uno entrega información relevante debido a la escala que trabaja.

Primero hay que destacar que la imagen satelital entrega información que puede ser útil al momento de analizar cómo se comporta la ciudad, en términos de su temperatura superficial, respecto a su contra parte rural. En este ámbito se puede ver como el área urbana de la ciudad se encuentra a una menor temperatura que el área rural, salvo por ciertos focos de calor que se dan debido a que comparten la característica del ambiente rural, que vendría siendo la carencia de sombra y una apertura total a la incidencia del sol, lo cual se debe a que no existen elementos que bloqueen la luz solar. El factor de la sombra podría ser una de las primeras explicaciones para que en el día se de este fenómeno en que el área rural se registran temperaturas superficiales más altas que en la ciudad.

Aunque esta diferencia se puede apreciar en las imágenes satelitales, estas no dan cuenta de una caracterización completa de las temperaturas superficiales, debido a que carece de precisión al momento de tomar la temperatura de los diferentes materiales en la ciudad. Es por medio del uso de un UAV que se puede entender que temperaturas máximas alcanzan realmente las distintas materialidades de la ciudad. Esto se puede apreciar en la escala de temperatura en la figura N°11 en donde el máximo registrado es de 36,9° Celsius, pero cuando se considera la temperatura máxima captada por el UAV se observa que la temperatura superficial más alta captada supera en 13,5° (Ver figura N°11). Este tipo de diferencias se deben considerar al momento de caracterizar las temperaturas ya que son bastante considerables, además de que no es solo una diferencia en el máximo, sino que es en la distribución de las temperaturas, las cuales fluctúan bastante en la imagen de microescala, debido precisamente a que si se pueden notar diferencias en las materialidades.

4.2 Análisis morfológico de la ciudad

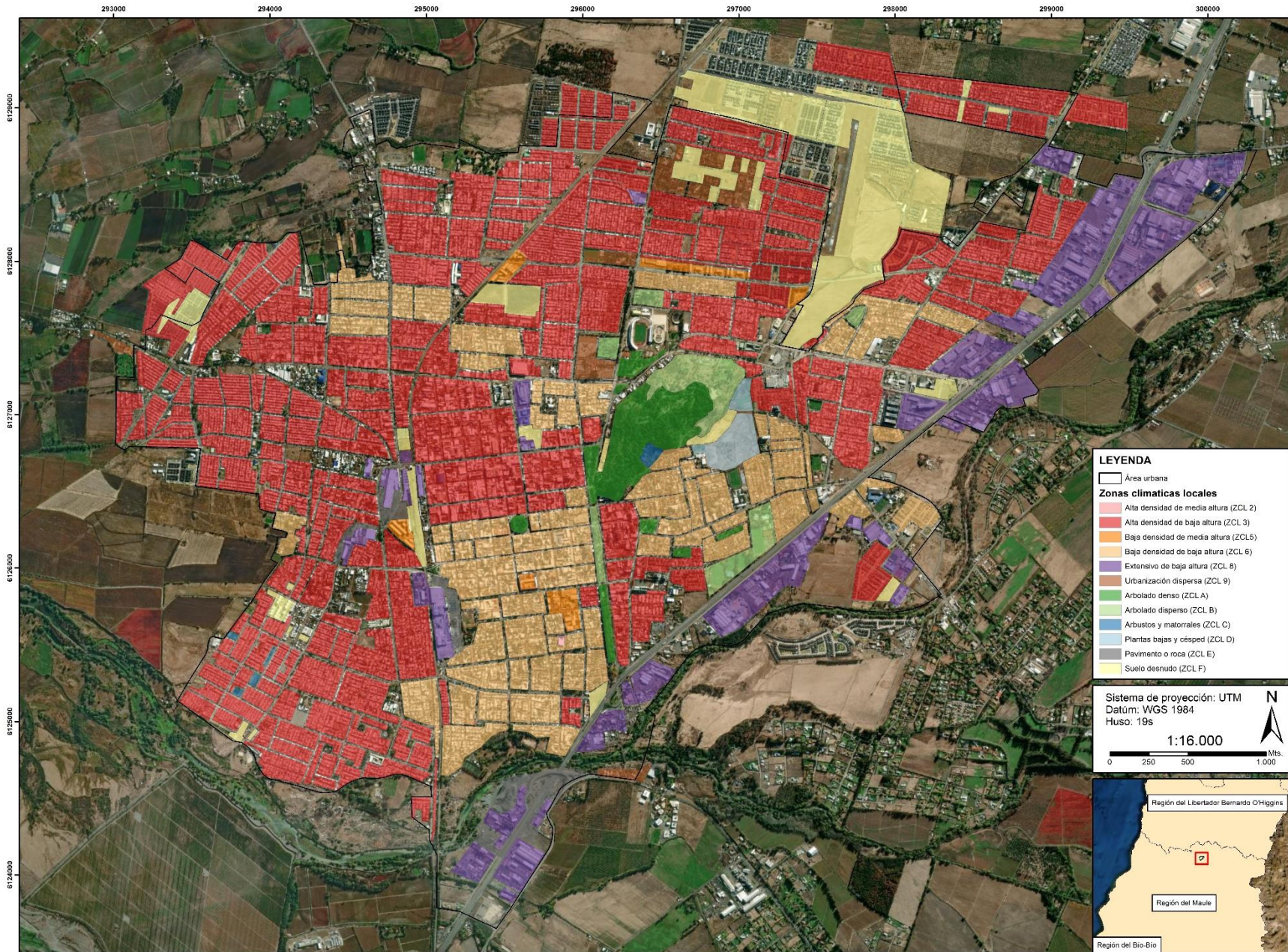
4.2.1 Meso escalar: Zonas climáticas locales

En la figura N°13 se puede observar la distribución de las zonas climáticas en el área urbana de la ciudad de Curicó y lo primero que se puede destacar es que la ciudad no cuenta con las categorías de compacto en altura ni abierto en altura. Esto da cuenta de que la ciudad no presenta grandes edificaciones en cuanto a altura corresponde, independiente de la densidad que exista. En cambio, se puede ver como si se da de manera alta las categorías de baja altura, tanto como en alta densidad como de baja densidad. Esto responde a una morfología urbana que no se caracteriza por la construcción en altura, como ocurre en las grandes ciudades, sino que la expansión de la ciudad se da en la dimensión horizontal.

En la tabla N°1 y en el gráfico N°1 se presenta el área que representa cada zona climática, y posible notar como la zona climática de alta densidad de baja altura (ZCL3) es la que más se repite en la ciudad de Curicó, con un área de 780 hectáreas. Bastante por debajo le sigue la zona climática de baja densidad de baja altura (ZCL6) con 250 hectáreas y luego continua la zona climática extensivo de baja altura (ZCL8). Lo que más destaca de este resultado es que, aunque son tres categorías distintas las que más destacan, las cuales poseen dinámicas climáticas propias, todas comparten una característica, la altura. Esto demuestra como la ciudad de Curicó tiene un desarrollo orientado hacia la horizontalidad más que hacia la verticalidad.

Otro resultado que es importante tomar en cuenta, es que la cuarta zona climática que más área cubre en la ciudad es la de suelo desnudo, con 136 hectáreas. Esto da cuenta de cómo existe suelo dentro de la ciudad que no está siendo utilizado, y que como se puede observar en los resultados de la temperatura superficial a meso escala (ver figura N°10) estos son los suelos que presentan mayores temperaturas y crean focos de calor en la ciudad. Esto puede ser presentado como una problemática cuando se compara con los resultados de la cantidad de áreas verdes, las cuales sumando las zonas climáticas A, B, C y D, solo dan un área total de 85 hectáreas. El problema recae en que, en vez de presentarse como suelo disponible para áreas verdes, se puede ver cómo han aumentado los proyectos inmobiliarios alrededor del suelo desnudo que se encuentra al noreste del mapa. Es importante señalar que parte de este suelo desnudo corresponde a un aeródromo que se encuentran en la ciudad, por lo que este no podría ser convertido en áreas verdes, pero de todas maneras eso no ha provocado que disminuya el aumento inmobiliario de la zona.

Figura N° 13: Zonas climáticas locales de la ciudad de Curicó



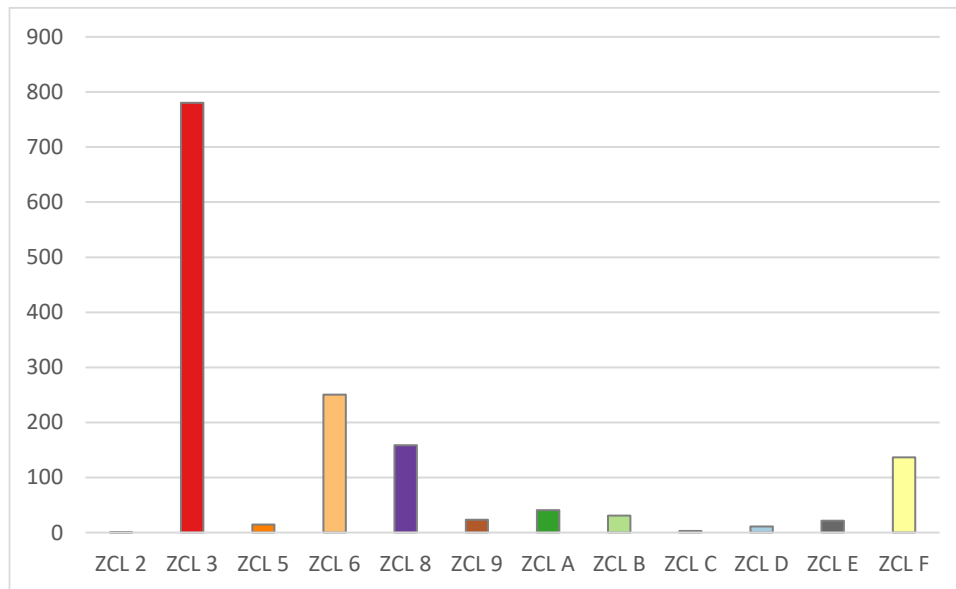
Fuente: Elaboración propia en base a Toro (2020), 2021

Tabla N° 1: Área total por zona climática

Zona climática local	Área (Has)	%
Alta densidad de media altura (ZCL 2)	0,3	0,02
Alta densidad de baja altura (ZCL 3)	780,1	53,04
Baja densidad de media altura (ZCL 5)	14,6	0,99
Baja densidad de baja altura (ZCL 6)	250,6	17,04
Extensivo de baja altura (ZCL 8)	158,9	10,80
Urbanización dispersa (ZCL 9)	23,1	1,57
Arbolado denso (ZCL A)	40,8	2,77
Arbolado disperso (ZCL B)	30,9	2,10
Arbustos y matorrales (ZCL C)	2,7	0,18
Plantas bajas & césped (ZCL D)	11,1	0,75
Pavimento o roca (ZCL E)	21,7	1,47
Suelo desnudo (ZCL F)	136,3	9,27

Fuente: Elaboración propia en base a Toro (2020), 2021

Gráfico N° 1: Áreas por zona climática local



Fuente: Elaboración propia en base a Toro (2020), 2021

4.2.2 Micro escalara: Sky view factor

Para el análisis del resultado de la obtención del SVF es importante recordar que este valor ha sido calculado desde una perspectiva analítica, donde se ocupan ecuaciones basadas en la geometría del lugar, en específico la altura (H) y el ancho (W) (Grimmond et al., 2001). Teniendo estas consideraciones en la figura N°14 se puede ver como los valores del SVF aumentan en medida que se aleja del centro de la ciudad debido a la densidad que existe en los alrededores de la plaza central, en donde se encuentran edificios sobre los 20 metros, lo que resulta en calles más encajonadas, y por tanto, valores más bajos del SVF (entre 0,7 y 0,4). En cuanto a los alrededores del centro se puede ver como los valores no superan los 0,87 salvo en ciertos puntos específicos, como el que se encuentra en la Av. Balmaceda.

Aunque el centro de la ciudad demuestre valores más altos del SVF que en los alrededores, en donde existen edificaciones más bajas y calles amplias, de todas maneras, existe una diferencia entre el área al norte de la plaza de armas (calles Merced, Arturo Prat y Manuel Montt) y lo que se encuentra al sur de ella (calles Estado, Argomedo y Villota). Una de los primeros contrastes es que en el sector norte podemos encontrar focos de SVF muy bajos, los cuales se encuentran en las intersecciones de las calles Merced y la Av. O'Higgins (SVF=0,44), al igual que en la intersección de las calles Manuel Montt y Yungay (SVF=0,51). También es posible encontrar en otro foco de en la calle Carmen, entre Manuel Montt y Arturo Prat (SVF=0,36), el cual vendría siendo uno de los valores más bajos.

Por otro lado, al sur de la plaza de armas se encuentran valores más altos a lo largo de las calles, como en la calle Argomedo en donde se mantiene un valor promedio de 0,88. Aunque esta es la calle con el valor promedio más bajo, esta es la tónica en el resto de la zona, a excepción de un foco en la calle Estado que alcanza un valor de 0,55, valor que se repite en las calles Carmen y Membrillar, pero que se mantienen siendo focos aislados del resto del área.

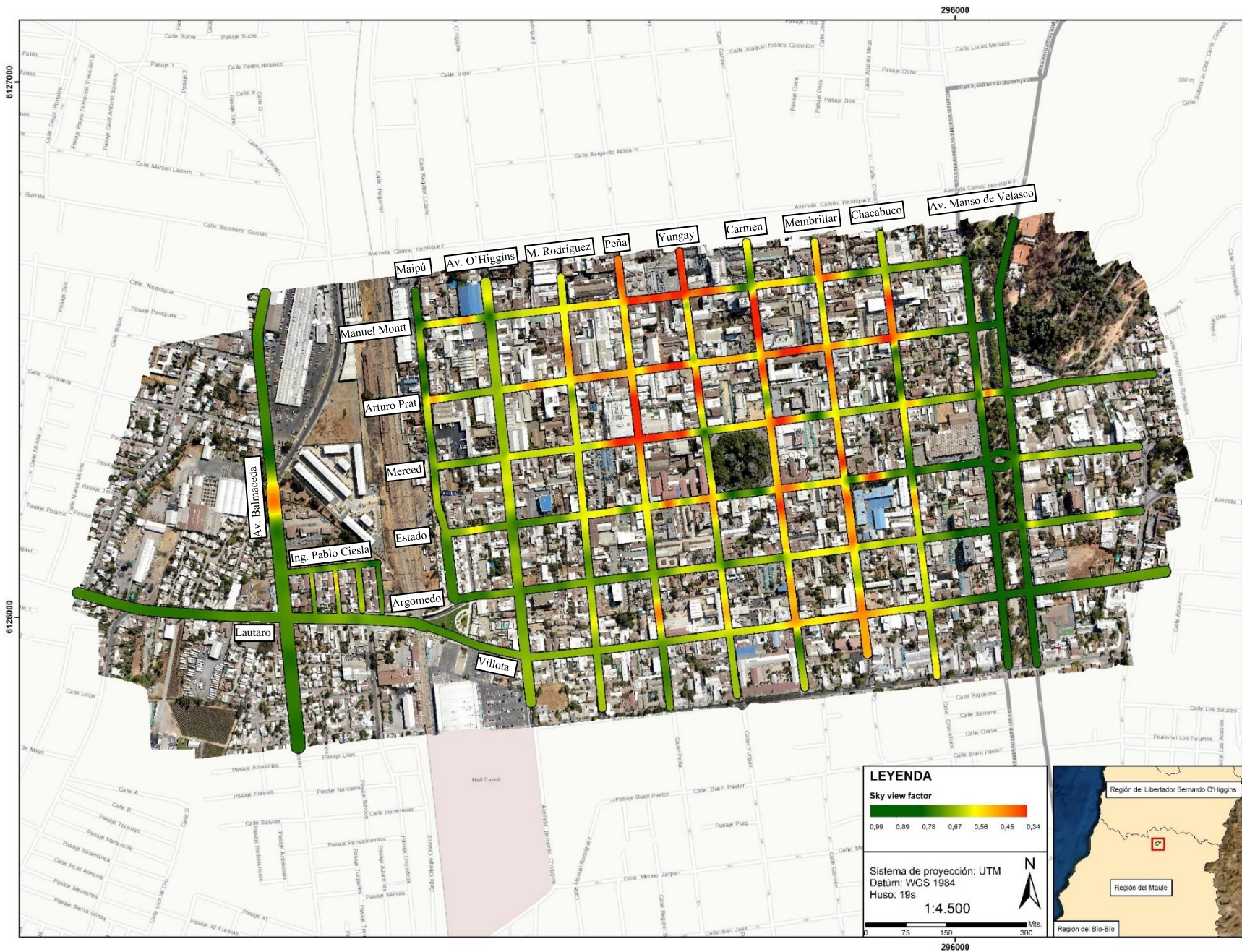
Estas diferencias que existen entre los valores más bajos de cada zona demuestran que las calles al norte de la plaza de armas se ven mucho más encajonadas que las calles que están al sur de la plaza, lo cuales se refleja en el valor del SVF. Esta discordancia provocaría que existan más horas de sombra al día en la zona norte del centro, debido a que al tener edificaciones más altas se generan cañones urbanos "más profundos". Esta diferencia también es descrita en la clasificación de zonas climáticas planteadas por Stewart & Oke (2012), pero en el análisis micro escalara se puede ver en detalle las diferencias en cuanto al SVF.

Mientras que, al lado sur de la plaza de armas, se puede observar que las calles se encuentran en una razón menos encajonada que la del sector norte de la plaza. Esto significa que la única variable que cambia es la altura de las edificaciones, ya que el ancho de las calles, en la gran mayoría de los casos, se mantiene siendo las misma en toda el área de estudio, en cuanto a la dirección norte sur compete. Salvo dos calles que presentan un valor del SVF más bajo que el resto, en general se puede ver que los valores se mantienen entre los 0,99 y 0,87, con algunos casos en donde se eleva sobre los 0,56.

Es importante mencionar que, aunque en la plaza de armas y en la avenida Manso de Velasco se muestran valores de SVF bastante altos, falta tomar en cuenta la presencia de árboles, lo que también es un factor para considerar en el momento de integrar este índice a una planificación o a alguna intervención. Esto se debe a que los árboles igualmente retienen energía, aunque esto se puede observar de mejor manera de noche, debido a que es en ese momento en donde los materiales como el cemento o el concreto liberan la energía acumulada durante el día. No obstante, el uso de

infraestructura verde es una gran manera de enfriar las ciudades, debido a que los parques, como el que se encuentra en la avenida Manso de Velasco, pueden crear aire frío, tanto en el día como en la noche, el cual puede ser transportado a otros barrios (Bernard et al., 2018b).

Figura N° 14: SVF del centro de la ciudad de Curicó



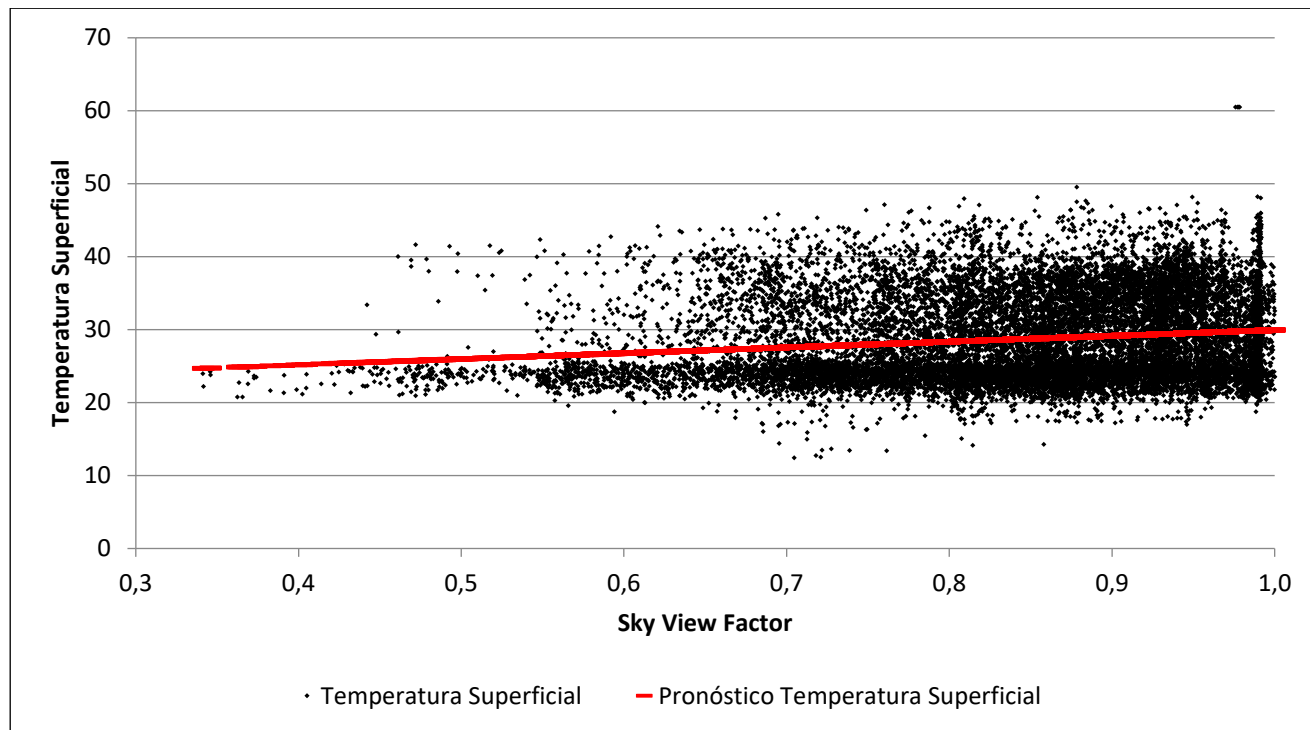
Fuente: Elaboración propia en base al DEM levantado vía UAV, 2021

4.3 Correlación entre la morfología urbana y la temperatura superficial

4.3.1 Nube densa de puntos

Para realizar la regresión se tomaron una cantidad de 17.038 puntos, los cuales contenían los datos de temperatura superficial y el valor de ese punto en específico del SVF. Una vez realizada la regresión se obtuvo como resultado el siguiente gráfico:

Gráfico N° 2: Relación entre Temperatura superficial y SVF



Fuente: Elaboración propia, 2021

Del gráfico N°1 se puede desprender que existe una gran dispersión de los datos, los cuales muestran diferencias en sus valores. Se puede destacar que existe una gran concentración de datos en el rango de temperatura entre los 20° y los 30°. Esta tendencia se puede ver a lo largo de casi todos los valores del SVF, pero sobre todo entre los valores de 0,8 y 0,9. También es posible observar que existe una gran cantidad de datos que poseen un SVF bastante cercano al valor máximo (1,0), los cuales se concentran en su mayoría en el rango de temperatura anteriormente mencionado.

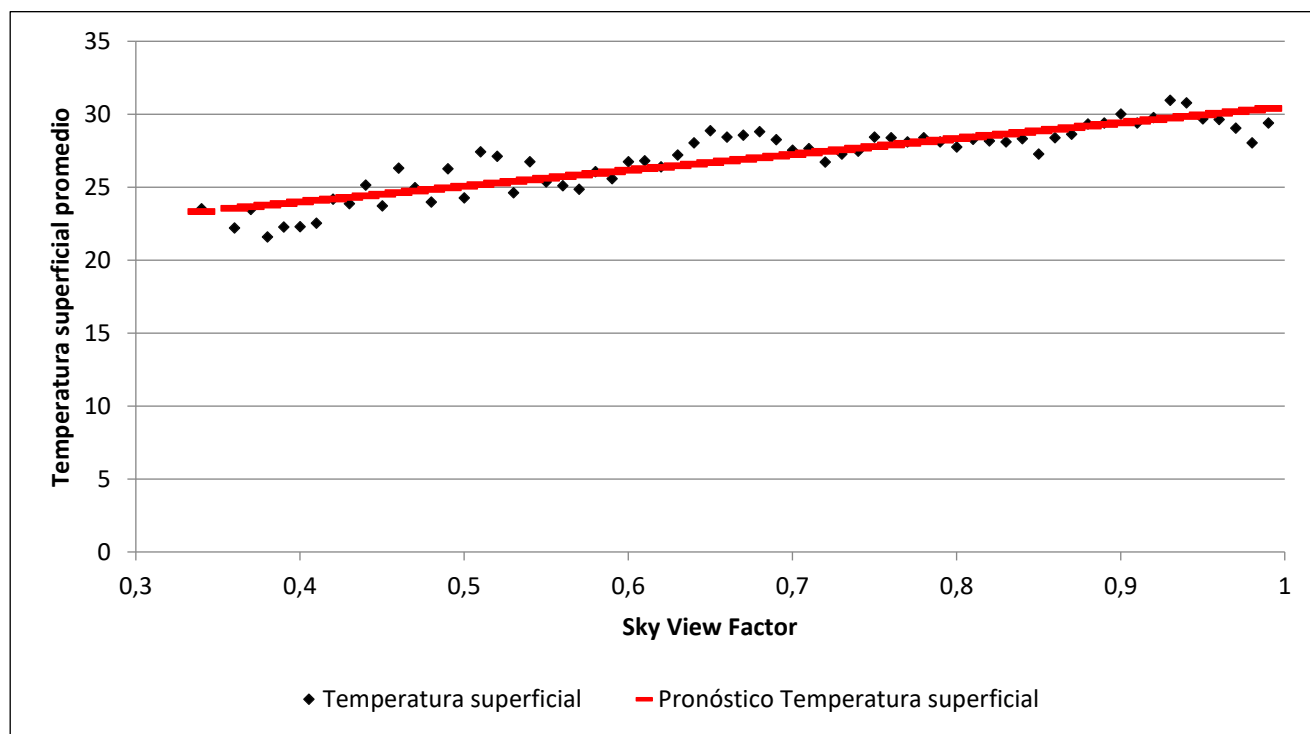
Aunque el resultado más importante a destacar en el gráfico N°1 es la línea de tendencia de la temperatura superficial, la cual muestra una relación entre la temperatura y el SVF. Aunque esta relación no se aprecia con tanta fuerza, de todas maneras, es existente debido a la pendiente de la recta, la cual da cuenta que al aumentar los valores del SVF, o sea, mientras más abierto se encuentre la visión de cielo, existirán mayores temperaturas durante el día. Este tipo de distribución estable pero confusa puede explicarse debido a la manera en que se comporta el SVF, el cual es una variable que tiene una infinidad de valores entre cada clase (Scarano & Sobrino, 2015), por lo que no se comporta

como una nube de puntos tradicional. Es por esta misma razón que se propone realizar tres gráficos que demuestren la misma relación entre SVF y temperatura superficial.

4.3.2 Relación entre temperatura superficial promedio por rango de clase de SVF

El siguiente gráfico se representa la relación entre la temperatura superficial promedio por intervalo centesimal del SVF (cada 0,01 de sí mismo) y el valor del SVF de dicho intervalo. Esto significa que cada intervalo decimal del SVF fue dividido en 10, en los casos que era posible, y se calculó la relación entre las variables para cada centésima.

Gráfico N° 3: Relación entre Temperatura Superficial promedio y SVF

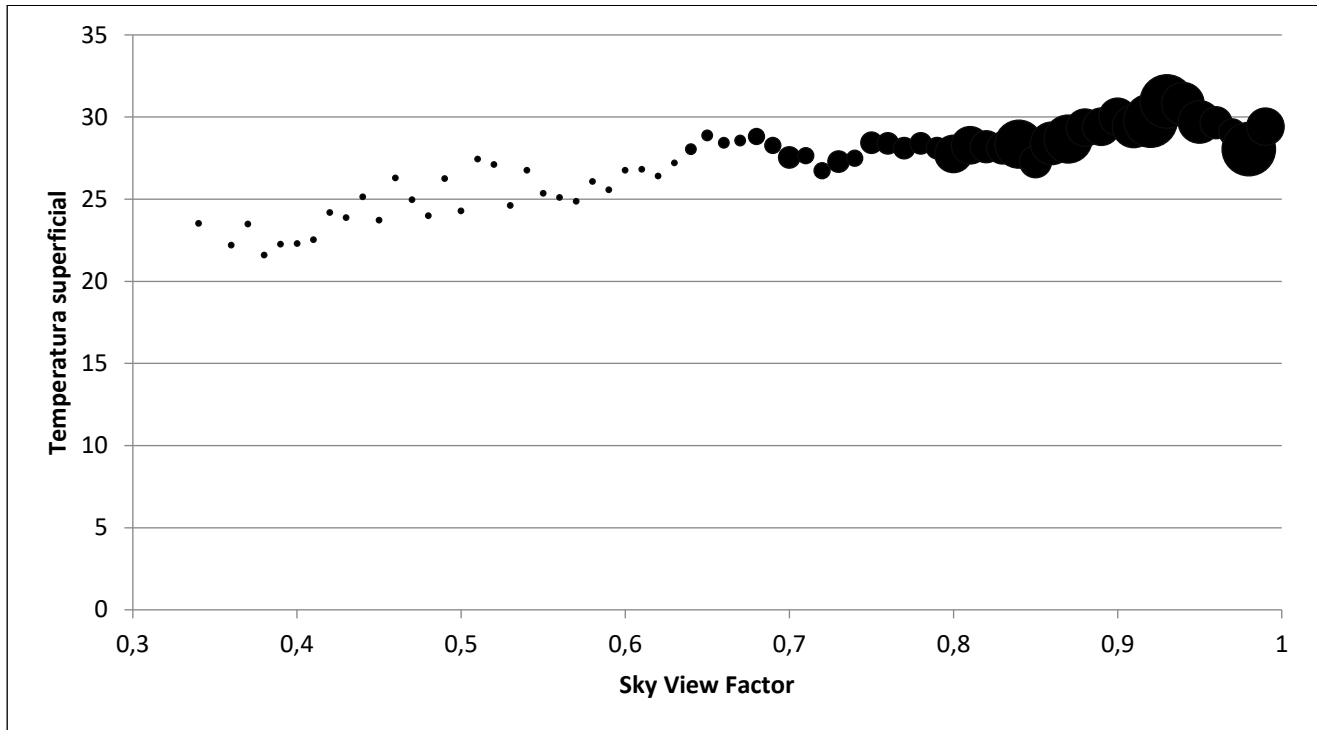


Fuente: Elaboración propia, 2021

En este caso, como postula Scarano & Sobrino (2015), se puede establecer una relación más directa entre las variables, la cual se ha logrado establecer mediante la regresión. En este caso es más visible la pendiente de la línea de tendencia, además de que los puntos oscilan cercanos a la línea, al contrario del caso del gráfico N°1, en donde los datos tienen una mayor dispersión. Este tipo de metodología también ha sido utilizada en otros estudios en donde se analiza la temperatura superficial y las características urbanas (Chen et al., 2006; Yuan & Bauer, 2007; Li et al., 2011)

Otra característica importante que se debe tener en cuenta sobre el gráfico N°2 es que, aunque existe esta relación más notoria, esta debe ser contrastada con la frecuencia de cada dato entre intervalos. Es por esto que en el gráfico N°3 se puede observar cómo cada punto en el gráfico representa en tamaño la cantidad de datos que fueron promediados respecto a su temperatura superficial.

Gráfico N° 4: Frecuencia de datos de la relación entre Temperatura Superficial promedio y SVF



Fuente: Elaboración propia, 2021

Como se mencionaba anteriormente, el gráfico N°3 da cuenta de la frecuencia de los datos utilizados para la regresión entre la temperatura superficial media y las distintas clases del SVF. La importancia de este resultado es que se puede ver como existe una concentración de los datos en los valores más altos del SVF y es por esta razón es que se promediaron las temperaturas, para poder dar un peso igualitario a los datos, lo cual se pierde en el gráfico N°1.

La relación que existe entre estas variables puede deberse al proceso de urbanización, considerando que este afecta a la energía solar que las superficies absorber, capturan y almacenan durante el día, y la cual es liberada lentamente durante la noche, provocando alzas en la temperatura, en contraste con el ambiente rural, creando islas de calor (Davies, Steadman & Oreszczyn, 2008). Este tipo de resultados, que demuestran la relación entre la forma de una ciudad, considerando su estructura, y las temperaturas de superficie, son los que pueden ayudar a crear un diseño de exteriores que influya en el comportamiento térmico de las ciudades tomando elementos propios de ellas, como los edificios, y aprovechando los efectos que provocan, como lo son la sombra (Lin et al., 2012) para crear espacios más confortables para el humano.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

5.1 Contraste de fenómenos a diferentes escalas

5.1.1 Comportamiento de la temperatura superficial a diferentes escalas

Como primera conclusión, respecto al trabajo de la temperatura superficial, se puede desprender que al existir una caracterización a dos escalas se puede lograr un trabajo más acabado, debido a que cada escala entrega características propias de la ciudad. Considerando el trabajo a meso escala se puede utilizar este método para trabajar los patrones generales de la ciudad respecto a sus alrededores urbanos, en donde es posible contrastar alzas en las temperaturas superficiales en ciertos sectores de la ciudad. También se puede observar como se demuestra el efecto que tienen los cañones urbanos sobre la ciudad, demostrando como las calles al encontrarse protegidas por los edificios presentan sombra, por lo que la temperatura superficial baja, a diferencia de ciertos sectores en donde no existe ninguna protección del sol, por lo que alcanzan altas temperaturas (Ver figura N°10).

Aunque esta escala muestra ciertas limitaciones respecto a la caracterización de la estructura urbana individual de los edificios, donde el trabajo de micro escala demuestra ser bastante superior en cuanto a la caracterización de las distintas superficies. Es en esta manera de trabajo, en donde existe una resolución y precisión bastante alta, donde se pueden captar como en un mismo edificio existen distintos comportamientos térmicos, debido a la variedad de materiales, los cuales presentan distintas propiedades térmicas. Esto fue ilustrado en la Figura N° 11 en donde se puede ver como las temperaturas varían bastante en el centro de la ciudad, dirigido en la gran mayoría de los casos por lo heterogéneo de las materialidades, lo cual se contrasta con otros sectores, por ejemplo, la línea del tren, en donde existe una continuidad de altas temperaturas debido a características similares, tanto morfológicas como de cobertura.

Es por esta heterogeneidad de materiales que se puede concluir que en las superficies del centro de Curicó no existe un balance térmico de superficies, ya que existen diferencias substanciales en cuanto a las temperaturas que se dan a lo largos de las manzanas. Solo se da un cierto balance en las áreas más uniformes, donde existe una continuidad de cobertura, además de características morfológicas análogas.

Por último, una de las conclusiones más importantes respecto al trabajo de las temperaturas superficiales es que se probó la metodología en donde se convirtió información cualitativa, expresada en código RGB, a información cuantitativa, la cual fue representada en temperatura superficial. Esto da grandes señales para futuros trabajos en donde se pueda levantar información mediante un UAV, ya que sería posible convertir los datos extraídos y así poder analizarlos. Un posible ejemplo sería un levantamiento de información en el área rural de la ciudad para poder concluir si es que existen SUHIs en la ciudad de Curicó, puesto que falta realizar un contraste urbano/rural para poder caracterizar a los cañones urbanos con altas temperaturas como islas de calor propias como tal.

5.1.2 Morfología urbana

Respeto a la composición morfológica de la ciudad de Curicó, el trabajo a dos escalas brindó un contraste entre los resultados obtenidos del SVF y las clasificaciones de Stewart & Oke (2012). Tomando en cuenta las características de las ZCL de la ciudad se pudo describir cómo se comporta

la morfología general de Curicó y, por consiguiente, como se ha desarrollado la ciudad. Este desarrollo se ha visto continuo y coherente a las extensiones por ZCL, donde se pudo ver que hay una predominancia de las construcciones a baja altura. Esto demuestra como una ciudad intermedia se encuentra todavía en un proceso de extensión horizontal, debido a que tiene terrenos aledaños a la ciudad donde puede expandirse esta, sin tener la necesidad de comenzar un desarrollo en altura.

Aunque este tipo de expansión ha sido una predominante en la ciudad, considerando que el sector norte, cercano al aeropuerto, esta en un proceso de expansión por medio de un proyecto inmobiliario de casas de dos pisos, el desarrollo de la ciudad no ha visto la necesidad de expandirse en la dimensión vertical. Esto puede ser una problemática a futuro, pero que la ciudad al ser de característica intermedia tiene los beneficios de poder crear planes y medidas que regularicen el crecimiento en altura, para así no crear problemas a futuro.

Por otro lado, el resultado del SVF proporcionó información que da cuenta cómo se comporta la morfología del centro de la ciudad en cuanto a la rugosidad que producen los edificios respecto a las calles. Con los resultados obtenidos se pudo saber la razón que existe entre las calles y los edificios del sector, demostrando las diferencias que exhibían las clasificaciones de ZCL. Esto refleja que tan encañonadas se encuentran las calles, lo cual fue utilizado luego para correlacionar la temperatura superficial con el SVF.

De este análisis se puede concluir que existen variadas dimensiones de edificios en el centro de la ciudad, en donde coexisten edificios sobre los 15 metros, junto a edificaciones que no superan 10 metros, lo que resulta en una morfología dispar. Por otro lado, el ancho de calle, el cual se mantiene en 15 metros en la gran mayoría de los casos, es bastante angosto respecto a estas alturas mencionadas, además de que en Curicó ha habido un gran aumento en el parque automotriz, lo que ha aumentado la circulación de vehículos, sumados a los que viaja a la ciudad de provincias cercanas, por lo que existen alta congestión en el centro de la ciudad. Este problema ya no puede ser solucionado cambiando las calles debido a lo cercano que se encuentran los edificios a la calle, pero que puede ser prevenido en otros sectores de la ciudad si es que se toma en cuenta esta problemática.

Este tipo de dificultades en el centro de la ciudad, respecto a su morfología, pueden ser mitigadas si es que la planificación territorial considera como se relacionan las variables de altura y ancho de calle. Para esto se debe considerar la densidad con la que se edifica respecto a las calles que tendrán que soportar el flujo de esa densidad. Este tipo de consideraciones logrará una morfología más unirme, en donde exista una coherencia lógica respecto a las variables de altura y ancho de calle.

El resultado del SVF fue posible debido a la metodología planteada por Sarricolea (2012), pero tiene más potencial considerando la imagen ráster que se utilizó. Para futuros trabajos este tipo de input de gran resolución, logrado por el uso de un UAV, puede ser procesado en otro tipo de softwares en donde se tome como punto de referencia cada pixel, lo que entregaría un resultado más acabado. Es importante mencionar que, si se utiliza otro software en el futuro, no será necesariamente el análisis geométrico de la morfología urbana como se realizó en esta investigación, sino que se sumarían otras variables, como lo son los árboles o techumbres que sobrepasan el ancho de calle, por lo que los resultados serían diferentes y para otras aplicaciones.

5.2 Relación entre la temperatura superficial y la morfología urbana

Por último, sobre la relación entre la temperatura superficial y la morfología urbana, es posible concluir que existe una relación directa entre estas dos variables para el caso de Curicó. Esta relación puede ser explicada desde planificación territorial, puesto que la morfología responde a una serie de decisiones tomadas al momento de crear los diferentes espacios dentro de la ciudad, y al mismo tiempo, las características de la temperatura de superficie en el tejido urbano responden a las materialidades de la ciudad y a como se compone la geometría de esta, expresada en la morfología.

Ahora bien, aunque esta relación se podría establecer en otros casos, lo que caracteriza a este en particular, es que existe una morfología discontinua y heterogénea, lo que provoca gran variabilidad en las temperaturas, ya que estas se ven condicionadas por las diferentes materialidades y geometrías que varían considerablemente en una misma manzana. Este tipo de variaciones son fruto de decisiones en cuanto a cómo se va a componer la ciudad en cuanto a su estructura, lo que se ve ligado a la planificación que se le dio a cada sector de la ciudad.

Tomando en cuenta que las dinámicas de temperatura se deben a la materialidad de la ciudad y a su geometría, esto da la posibilidad de causar variaciones en la temperatura por medio de una planificación que considere la variable climática al momento de crear los diferentes espacios. Esto da cuenta que las dinámicas climáticas en la ciudad están ligadas a como se toman las decisiones en el momento de ordenar la ciudad. Esto explica lo que se expuso en la siguiente investigación y el porqué de la distribución de la temperatura superficial, considerando solo las variables geométricas de la ciudad, y sirve para dar ciertos aportes a una futura planificación.

Para esta planificación futura se debe considerar que la toma de decisiones influye en cómo se comporta la temperatura en la ciudad, por lo que la creación de espacios públicos puede ser mucho más inclusiva y que genere un mayor uso por parte de la ciudadanía. Esto se puede lograr a través de estrategias que busquen como meta generar espacios que satisfagan el confort de la población, considerando los diferentes comportamientos térmicos de los materiales y como afecta la geometría del lugar a la temperatura. Tomando en cuenta estas variables se podría dar paso a una ciudad más sensible al clima y que busque el equilibrio térmico por medio de una planificación inteligente, aumentando el uso de infraestructura verde para mitigar los efectos negativos de la ciudad, creando espacios públicos acordes a las necesidades de la ciudadanía, tomando sus opiniones y necesidades en los instrumentos de planificación territorial (ej. PLADECOC) y tener como fin el bienestar de la población.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, K. S. (2003). *Comfort in urban spaces: defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments*. *Energy and Buildings*, 35(1), 103-110.
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2012). *Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: potencial para la mitigación de la isla de calor urbana*. *Ambiente Construído*, 12(3), 107-123.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). *Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate*. *Building and environment*, 41(2), 94-108.
- Allen, M. A., Voogt, J. A., & Christen, A. (2018). *Time-Continuous hemispherical urban surface temperatures*. *Remote Sensing*, 10(1), 3.
- Arellano Ramos, B., & Roca Cladera, J. (2015). Planificación urbana y cambio climático. In XLI Reunión de Estudios Regionales AEER: *International conference on regional science: innovation and geographical spillovers: new approaches and evidence* (pp. 1-18). Universitat Rovira i Virgili.
- Arnfield, A. J. (2003). *Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island*. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(1), 1-26.
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). *Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data*. *Journal of Sensors*, 2016.
- Bherwani, H., Singh, A., & Kumar, R. (2020). *Assessment methods of urban microclimate and its parameters: A critical review to take the research from lab to land*. *Urban Climate*, 34, 100690.
- Bechtel, B.; Alexander, P.J.; Böhrner, J.; Ching, J.; Conrad, O.; Feddema, J.; Mills, G.; See, L.; Stewart, I. (2015). *Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities*. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 199-219.
- Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C., & Voogt, J. (2019). *SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities*. *Urban Climate*, 28, 100451.
- Bernard, J., Bocher, E., Petit, G., & Palominos, S. (2018a). *Sky view factor calculation in urban context: computational performance and accuracy analysis of two open and free GIS tools*. *Climate*, 6(3), 60.
- Bernard, J., Rodler, A., Morille, B., & Zhang, X. (2018b). *How to design a park and its surrounding urban morphology to optimize the spreading of cool air?*. *Climate*, 6(1), 10.
- Brenes-González, L. (2016). *Metodología para la generación de mapas tridimensionales a partir de fotogrametría con vehículo aéreo no tripulado*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Brown, M. J., & Grimmond, S. (2001). *Sky View Factor Measurements in Downtown Salt Lake City-Data Report for the DOE CBNP URBAN Experiment*, Oct. 2000.

- Burud, I., Vukovic, M., Thiis, T., & Gaitani, N. (2018, August). *Urban surfaces studied by VIS/NIR imaging from UAV: possibilities and limitations*. In Sixth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2018) (Vol. 10773, p. 1077316). International Society for Optics and Photonics.
- CEPAL, N. (1998). *Ciudades intermedias de América Latina y el Caribe: propuestas para la gestión urbana*.
- Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X., & Yin, Z. Y. (2006). *Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes*. Remote sensing of environment, 104(2), 133-146.
- Conde, C., Pabón, D., & Sánchez Rodríguez, R. (2013). *La importancia de la información climática para la planificación del crecimiento y el desarrollo urbano. Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. LC/W. 563, 2013. p. 25-40.
- Correa, É. N., Rosa, C. D., & Lesino, G. (2006). *Monitoreo de clima urbano. Análisis estadístico de los factores que determinan la isla de calor y su aporte al diseño de los espacios urbanos*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 10.
- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). *Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 46(4), 477-493.
- Curran, P. J. (1985). *Principles of remote sensing*. Longman Inc..
- Davies, M., Steadman, P., & Oreszczyn, T. (2008). *Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use*. Energy Policy, 36(12), 4548-4551.
- Dousset, B., & Gourmelon, F. (2003). *Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover*. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 58(1-2), 43-54.
- Duarte Jiménez, K. T. *Evaluación de desempeño de distintos softwares para la generación de ortofotomosaicos a partir de imágenes multiespectrales tomadas con un vehículo aéreo no tripulado*.
- Eliasson, I. (2000). *The use of climate knowledge in urban planning*. Landscape and urban planning, 48(1-2), 31-44.
- Feng, Q., Liu, J., & Gong, J. (2015). *UAV remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis*. Remote sensing, 7(1), 1074-1094.
- Ferreira, L. S., Shimomura, A. P., Ferreira, A. T., & Duarte, D. H. S. (2017). *Mapping Local Climate Zones for São Paulo Metropolitan Region: a comparison between the local climate zone map and two other local maps*. PASSIVE LOW ENERGY ARCHITECTURE, 255-262.
- García Nieto, Hilario, & Martínez León, Gilberto. (2007). *Uso de ortofotos para actualizar el mapa de uso del suelo en Guanajuato, México*. Agricultura técnica en México, 33(3), 271-280.

- Grimmond, C. S. B., Potter, S. K., Zutter, H. N., & Souch, C. (2001). *Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas*. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(7), 903-913.
- Guhathakurta, S., & Gober, P. (2010). *Residential land use, the urban heat island, and water use in Phoenix: A path analysis*. *Journal of Planning Education and Research*, 30(1), 40-51.
- Häntzschel, J., Goldberg, V., & Bernhofer, C. (2005). *GIS-based regionalisation of radiation, temperature and coupling measures in complex terrain for low mountain ranges*. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 12(1), 33-42.
- Heo, H. K., Lee, D. K., Park, C. Y., & Kim, H. G. (2020). *Sky view factor calculation in complex urban geometry with terrestrial LiDAR*. *Physical Geography*, 1-21.
- Ikechukwu, M. N., Ebinne, E., Idorenyin, U., & Raphael, N. I. (2017). *Accuracy assessment and comparative analysis of IDW, spline and kriging in spatial interpolation of landform (Topography): An experimental study*. *Journal of Geographic Information System*, 9(3), 354-371.
- INE. (2017). Censo 2017.
- Johnson, G. T., & Watson, I. D. (1984). *The determination of view-factors in urban canyons*. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 329-335.
- Jiménez Cajas, W. G., & Prado Garrido, J. D. (2018). *Análisis técnico comparativo entre los métodos topográficos tradicionales y el método de aerofotogrametría con vehículo aéreo no tripulado*. 168 hojas. Quito: EPN
- Kelly, T. (2010). *Body Heat: Sweden'' s new green energy source*. *TIME magazine*, (52).
- Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X., & Wu, J. (2011). *Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China*. *Remote sensing of environment*, 115(12), 3249-3263.
- Lin, T. P., & Matzarakis, A. (2008). *Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan*. *International journal of biometeorology*, 52(4), 281-290.
- Lin, T. P., Tsai, K. T., Hwang, R. L., & Matzarakis, A. (2012). *Quantification of the effect of thermal indices and sky view factor on park attendance*. *Landscape and Urban Planning*, 107(2), 137-146.
- Marte Gómez, D. (2020). *Las formaciones recientes del proceso chileno de urbanización: caso arquitectónico edificio de estacionamientos en la ciudad de Curicó*. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176779>
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A., & Guhathakurta, S. (2014). *Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones*. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16-28.
- Mitraka, Z., Del Frate, F., Chrysoulakis, N., & Gastellu-Etchegorry, J. P. (2015). *Exploiting earth observation data products for mapping local climate zones*. In 2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE) (pp. 1-4). IEEE.

- Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L., & Rodrigues, D. S. (2018). *THIS—Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, 157-168.
- Nicola, G. (2008). *La planificación territorial*. Santiago de Chile: Comunidad Virtual de Gobernabilidad y Liderazgo, 1
- Oke, T.R. (2004). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. IOM Rep.81, WMO/TD-No. 1250, 47 pp.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Perico-Agudelo, D. (2013). *El espacio público de la ciudad: una aproximación desde el estudio de sus características microclimáticas*. Cuadernos De Vivienda Y Urbanismo, 2(4).
- Ravanelli, R., Nascetti, A., Cirigliano, R. V., Di Rico, C., Leuzzi, G., Monti, P., & Crespi, M. (2018). *Monitoring the impact of land cover change on surface urban heat island through Google Earth Engine: Proposal of a global methodology, first applications and problems*. *Remote Sensing*, 10(9), 1488.
- Raven, J. (2011). *Cooling the public realm: Climate-resilient urban design*. In *Resilient Cities* (pp. 451-463). Springer, Dordrecht.
- Rebolledo, M. D. M. (2003). *La dimensión ambiental en los instrumentos de planificación territorial*. *Urbano*, 6(7), 63-72.
- Rehren, A., Orellana, A., Arenas, F., & Hidalgo, R. (2018). *La regionalización en un contexto de urbanización regional: desde los desafíos a las propuestas de nuevos criterios de zonificación para el caso chileno*. *Revista de geografía Norte Grande*, (69), 191-209.
- Ren, C., Wang, R., Cai, M., Xu, Y., Zheng, Y., & Ng, E. (2016). *The accuracy of LCZ maps generated by the world urban database and access portal tools (WUDAPT) method: A case study of Hong Kong*. In 4th Int. Conf. Countermeasure Urban Heat Islands, Singapore.
- Romero, H., & Sarricolea, P. (2006). *Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor urbanas de superficie*. *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Zaragoza: Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (Serie A Nº 5), 827-837.
- Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., ... & Mitev, V. (2005). *BUBBLE—an urban boundary layer meteorology project*. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3-4), 231-261.
- Salamanca, F., Martilli, A., Tewari, M., & Chen, F. (2011). *A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(5), 1107-1128.
- Sarricolea, P. (2012). *La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes. El caso del área metropolitana de Santiago de Chile*. Tesis doctoral. Departamento de geografía física y análisis geográfico regional. Universidad de Barcelona

- Scarano, M., & Sobrino, J. A. (2015). *On the relationship between the sky view factor and the land surface temperature derived by Landsat-8 images in Bari, Italy*. *International Journal of Remote Sensing*, 36(19-20), 4820-4835.
- Scarano, M., & Mancini, F. (2017). *Assessing the relationship between sky view factor and land surface temperature to the spatial resolution*. *International Journal of Remote Sensing*, 38(23), 6910-6929.
- Smith, P., & Henríquez, C. (2019). *Perception of thermal comfort in outdoor public spaces in the medium-sized city of Chillán, Chile, during a warm summer*. *Urban Climate*, 30, 100525.
- Sorenson, G. (2018). *Evaluation of unmanned aerial vehicles and analytical software for creation of a crop consulting business*.
- Spagnolo, J., & De Dear, R. (2003). *A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia*. *Building and environment*, 38(5), 721-738.
- Stewart, I., & Oke, T. R. (2009a). *Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer*. In *Eighth Symposium on Urban Environment*, Phoenix, AZ.
- Stewart, I. D., & Oke, T. (2009b). *Classifying urban climate field sites by "local climate zones": The case of Nagano, Japan*. In *IN: Seventh International Conference on Urban Climate (Vol. 29)*.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., ... & Chen, H. (2010). *The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai*. *International journal of biometeorology*, 54(1), 75-84.
- Tumini, I. (2013). *El microclima urbano en los espacios abiertos: estudio de casos en Madrid* (Doctoral dissertation, Arquitectura)
- Unger, J. (2009). *Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database*. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1-3), 59-80.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs Population Division (2018). *The World's Cities in 2018: Data Booklet*. New York: United Nations
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization. Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations.
- Van Hove, L. W. A., Steeneveld, G. J., Jacobs, C. M. J., Heusinkveld, B. G., Elbers, J. A., Moors, E. J., & Holtslag, A. A. M. (2011). *Exploring the urban heat island intensity of Dutch cities: assessment based on a literature review, recent meteorological observation and datasets provide by hobby meteorologists* (No. 2170). Alterra.
- Wang, C., Middel, A., Myint, S. W., Kaplan, S., Brazel, A. J., & Lukasczyk, J. (2018). *Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 141, 59-71.

- Watson, I. D., & Johnson, G. T. (1987). *Graphical estimation of sky view-factors in urban environments*. *Journal of climatology*, 7(2), 193-197.
- Yamashita, S., Sekine, K., Shoda, M., Yamashita, K., & Hara, Y. (1986). *On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan*. *Atmospheric Environment* (1967), 20(4), 681-686.
- Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). *Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery*. *Remote Sensing of environment*, 106(3), 375-386.