



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

“CLIMATOLOGÍA URBANA DE COPIAPÓ COMO CIUDAD LOCALIZADA EN UN MEDIO AMBIENTE ÁRIDO”

Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafa

NATALIA GÓMEZ SARRIA

Profesor Guía: Dr. Hugo Romero Aravena

SANTIAGO, CHILE
2014

*Dedico este trabajo a mi madre Pilar,
a mi novio Sebastián,
hermanas, sobrinos y padre.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi novio Sebastián, a mi familia y a mis amigas Wilda y Marcela por todo el amor y apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación.

También agradecer al proyecto FONDECYT N° 1130305 a través de su apoyo económico, el cual facilitó la adquisición de información, trabajos de terreno y participación a congreso que posibilitó la realización de esta investigación

Agradezco las observaciones y recomendaciones de mi profesor guía el Dr. Hugo Romero.

Agradecer a todo el laboratorio de Medioambiente y Territorio, especialmente a Alexis, Pamela y Dustyn por su ayuda en momentos de confusión y agobio. También al equipo de Corredores verdes quienes hicieron que el trayecto de este trabajo fuera más alegre y grato.

RESUMEN

En las últimas décadas las ciudades chilenas han experimentado un acelerado proceso de crecimiento espacial, que ha significado sustituir usos y coberturas de suelo naturales y agrícolas por áreas urbanas (Romero *et al.*, 2010). Dicho crecimiento ha provocado que las áreas urbanizadas sean mucho más cálidas que sus entornos no urbanos, conformando las llamadas islas de calor urbano. Así como la ciudad genera fenómenos de islas de calor, también lo hace respecto a la generación de islas o islotes de frescor, que son paisajes que registran temperaturas menores dentro de las islas de calor urbano (Moreno, 1999).

Los estudios sobre las islas de calor urbano han tomado cada vez más fuerza en el ámbito de la Geografía. La ciudad de Londres fue la primera en atraer la atención de este tipo de investigaciones, ya desde principios del siglo XIX. La mayoría de las investigaciones se concentran en ciudades de climas templados o mediterráneos, siendo escasos los estudios que se enfocan en ciudades de climas áridos. En estos medio ambientes, es posible esperar que existan diferencias o particularidades propias en la totalidad de los atributos de sus climas urbanos, especialmente en sus islas de calor y frescor, debido especialmente a la sequedad de la atmósfera, ausencia de vegetación y humedad en los suelos, mayor transparencia atmosférica y con ello balances de radiación diarios negativos y altas oscilaciones térmicas diarias. Para Oke (1978) la forma e intensidad de estos fenómenos varía con el tiempo y el espacio, siendo el resultado de las características meteorológicas, geográficas y urbanas.

Esta investigación analiza el comportamiento espacial y temporal de la intensidad de las temperaturas atmosféricas de la ciudad de Copiapó, localizada en el borde sur del Desierto de Atacama, uno de los más áridos del mundo, buscando identificar la generación de islas de calor y frescor urbano. Además analiza las diferencias de temperaturas atmosféricas y el origen de las islas de calor y frescor urbano entre las zonas climáticas locales. Como las islas de calor han sido consideradas causas de estrés térmico sobre los habitantes de las ciudades, que amenazan con expandirse en la medida que se concreten los pronósticos de calentamiento global, es relevante proponer medidas para paliar sus efectos negativos e incrementar y consolidar las islas de frescor.

La investigación se divide en tres partes: la primera tiene como objetivo analizar el comportamiento de las temperaturas atmosféricas e islas de calor y frescor urbano. Para ello se utilizaron once estaciones fijas distribuidas en la ciudad, de las cuales nueve pertenecen al proyecto FONDECYT N°1130305 y las dos restantes a una red de alcance nacional denominada Red Agroclima. Mientras las primeras son de carácter experimental y se localizan sobre paisajes urbanos específicos y diferentes entre si, la segunda constituye una fuente de información sistemática sobre los climas y por ello sigue los estándares de instalación y funcionamiento propios de los servicios meteorológicos. La segunda parte divide la ciudad en zonas morfológicas y de similares usos y coberturas de

los suelos denominadas zonas climáticas locales (ZCL), a las cuales se les atribuyen temperaturas atmosféricas e intensidad de las islas de calor y frescor urbanos. Para estimar el valor de las diferencias entre zonas, se empleó el test de Kruskal-Wallis y como prueba posterior para comparaciones pareadas, el test de C Dunett. Por último, en una tercera etapa, para poder formular lineamientos para la mitigación de islas de calor y consolidación de islas de frescor urbano, se realizó una revisión bibliográfica que interpretase los resultados empíricos anteriormente mencionados.

La Ciudad de Copiapó revela que en periodo estival, la isla de calor urbano es más intensa en las horas de la mañana, mientras que por la tarde se aprecia el efecto “oasis” o desarrollo de menores temperaturas al interior de la ciudad como consecuencia de los efectos de sombra y de la vegetación urbana. En invierno, la ciudad tanto en la mañana como en la tarde se comporta como una isla de frescor, pero durante la noche se observan islas de calor de alta intensidad.

En la época estival es cuando las diferencias son estadísticamente más significativas entre las temperaturas atmosféricas de las ZCL, que se intensifican, en comparación a lo observado en invierno. Además se comprueba que en verano las ZCL de alta y baja densidad de baja altura se asocian estrechamente a la generación de las islas de calor, es decir, las series construidas o urbanizadas están asociadas a mayores intensidades de islas de calor. Por otro lado las zonas “extensiva de baja altura” y de “cobertura vegetal rasante” se relacionan al origen de islas de frescor urbano.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN.....	10
1.1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.3 ÁREA DE ESTUDIO.....	14
1.4 OBJETIVOS.....	17
1.4.1 HIPÓTESIS.....	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 CLIMA URBANO.....	19
2.2 ISLAS DE CALOR.....	20
2.2.1 EFECTOS DE LA ISLA DE CALOR EN LAS CIUDADES.....	22
2.3 ESTUDIOS SOBRE ISLAS DE CALOR EN ZONAS ÁRIDAS.....	23
2.4 ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES.....	26
2.5 MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO EN ZONAS ÁRIDAS.....	29
2.6 PLANIFICACIÓN URBANA SUSTENTABLE.....	31
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	34
3.1. MATERIALES.....	35
3.2. MÉTODOS.....	36
3.2.1. Análisis de distribución de las temperaturas atmosféricas e intensidad de ICU e IFU... 36	
3.2.2. La relación de las Zonas Climáticas Locales y la Temperatura Atmosférica. 40	
3.2.3. La relación intensidad de islas de calor y frescor urbano y las zonas climáticas locales. 43	
3.2.4. Proposición de lineamientos para medidas de mitigación de las islas de calor y la consolidación de las islas de frío. 43	
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	45
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA URBANO DE LA CIUDAD DE COPIAPÓ.....	46
4.1.2 Análisis de las temperaturas atmosféricas e Intensidad de la ICU de la ciudad de Copiapó.....	46
4.1.2.1. Intensidad de las islas de calor y frescor urbano de verano e invierno.....	46
4.1.2.2. Temperatura del aire e Intensidad de ICU a las 9:00 horas en verano e invierno.....	50
4.1.2.3. Temperatura del aire e Intensidad de ICU a las 16:00 horas en verano e invierno.....	55

4.1.2.4. Temperatura del aire e Intensidad de ICU a las 22:00 horas en verano e invierno.....	58
4.2. RELACIÓN ENTRE LAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES Y LAS TEMPERATURAS ATMOSFÉRICAS.	61
4.2.1. Tipología zonas climáticas locales.....	61
4.2.2. Análisis de las relaciones entre las temperaturas atmosféricas de las zonas climáticas locales.....	70
4.3. ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y LAS TIPOLOGÍAS DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES.....	79
4.3.1. Intensidad de las ICU y su relación con las zonas climáticas locales para el 3 de enero.	79
4.3.2. Intensidad de las ICU y su relación con las zonas climáticas locales para el 18 de julio.	81
4.4. ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y CONSOLIDACIÓN DE ISLAS DE FRESCOR EN LA CIUDAD DE COPIAPO.	83
4.4.1. Medidas de mitigación a escala Capa de Perímetro Urbana “Urban boundary layer”... <i>Áreas de expansión urbana.</i>	83
<i>Intervención de los usos de suelo.</i>	85
4.4.2. Medidas de mitigación a escala Capa de dosel urbana “Urban canopy layer” <i>Propuesta de medidas para contrarrestar o mitigar la ICU.</i>	86
<i>Propuesta de medidas para consolidar la IFU.</i>	88
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	91
5.1. DISCUSIÓN.....	92
5.3. CONCLUSIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS.....	105
Anexo 1. Tipología de clasificación ZCL.....	106
Anexo 2. Caracterización de las estaciones fijas.....	109
Anexo 3. Distribución de las temperaturas atmosféricas por ZCL el 3 de enero.....	111
Anexo 4. Distribución de las temperaturas atmosféricas por ZCL el 18 de julio.....	112

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Ciudad de Copiapó.....	16
Figura N° 2. Escala de estudio del clima según Pedelaborde, 1970.....	19

Figura N° 3. Extensión espacial del clima.....	20
Figura N° 4. Representación esquemática de los componentes principales de la atmósfera urbana. Oke (1995).....	21
Figura N° 5. Clasificación de las zonas climáticas locales (Stewart y Oke, 2009).....	28
Figura N° 6. Localización de las estaciones fijas en la Ciudad de Copiapó.....	37
Figura N° 7. Condición de nubosidad a través del sensor GOES 13.....	38
Figura N° 8. Procesamiento de los datos en ArcGIS 9.3.....	41
Figura N° 9. Pruebas no paramétricas aplicadas a las temperaturas atmosféricas y zonas climáticas locales.....	43
Figura N° 10. Pasos para formular lineamientos de mitigación de ICU y consolidación de IFU.	44
Figura N° 11. Temperaturas atmosféricas de la ciudad de Copiapó el día 3 de enero.....	48
Figura N° 12. Temperaturas atmosféricas de la ciudad de Copiapó el día 18 de julio.....	49
Figura N° 13. Islas de calor y frescor a las 9:00 horas.....	52
Figura N° 14. Distribución de la intensidad de las islas de calor y frescor urbano en las tres horas del día 3 de enero por puntos de observación.....	53
Figura N° 15. Distribución de la intensidad de las islas de calor y frescor urbano en las tres horas del día 18 de julio por puntos de observación.....	54
Figura N° 16. Islas de calor y frescor a las 16:00 horas.....	57
Figura N° 17. Islas de calor y frescor urbano a las 22:00 horas.....	60
Figura N° 18. Distribución espacial de las zonas climáticas locales.....	62
Figura N° 19. Imágenes tipología B2.....	63
Figura N° 20. Imágenes tipología B3.....	63
Figura N° 21. Imágenes tipología B3-B8.....	64
Figura N° 22. Imágenes tipología B5.....	64
Figura N° 23. Imágenes tipología B4-B5.....	65
Figura N° 24. Imágenes tipología B6.....	65
Figura N° 25. Imágenes tipología B6-B9.....	66
Figura N° 26. Imágenes tipología B7.....	66
Figura N° 27. Imágenes tipología B8.....	67
Figura N° 28. Imágenes tipología B9.....	67
Figura N° 29. Imágenes tipología N1.....	68
Figura N° 30. Imágenes tipología N2.....	68
Figura N° 31. Imágenes tipología N3.....	68
Figura N° 32. Imágenes tipología N4.....	69
Figura N° 33. Imágenes tipología N5.....	69
Figura N° 34. Temperaturas atmosféricas promedios de las zonas climáticas locales, el día 3 de enero.....	71
Figura N° 35. Temperaturas atmosféricas promedios de las zonas climáticas locales, el día 18 de julio.....	72
Figura N° 36. Diferencias y homogeneidad entre zonas climáticas locales (sitios construidos) en relación a su temperatura atmosférica, el día 3 de enero.....	75

Figura N° 37. Diferencias y homogeneidad entre zonas climáticas locales (sitios naturales) en relación a su temperatura atmosférica, el día 3 de enero.....	75
Figura N° 38. Diferencias y homogeneidad entre zonas climáticas locales (sitios urbanos) en relación a su temperatura atmosférica, el día 18 de julio.	78
Figura N° 39. Diferencias y homogeneidad entre zonas climáticas locales (sitios naturales) en relación a su temperatura atmosférica, el día 18 de julio.	78
Figura N° 40. Distribución de la intensidad de ICU e IFU por zona climática local el 3 de enero.	80
Figura N° 41. Distribución de la intensidad de ICU e IFU por zona climática local el 18 de julio.....	82
Figura N° 42. Imágenes zona alta densidad de baja altura. a) Imagen panorámica b) Imagen vertical.....	87
Figura N° 43. Imágenes zona baja densidad de baja altura. a) Imagen panorámica b) Imagen vertical.....	88
Figura N° 44. Imágenes zona extensivo de baja altura. a) Imagen panorámica b) Imagen vertical.	89

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Elección del día para Enero. Promedio diario de la velocidad del viento y condición sinóptica	38
Tabla N° 2. Elección del día para Julio. Promedio diario de la velocidad del viento y condición sinóptica	39
Tabla N° 3. Intensidad promedio de las islas de calor y frescor urbano.	47
Tabla N° 4. Intensidad promedio de las islas de calor y frescor urbano.	47
Tabla N° 5. Superficies zonas climáticas locales.....	61

CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Es de conocimiento general que las ciudades chilenas están experimentando un acelerado crecimiento urbano, y la ciudad de Copiapó no es la excepción. El reemplazo de suelo agrícola por superficies construidas, principalmente para uso residencial, ha traído consigo efectos ambientales, en este caso la modificación del clima local, específicamente la generación del fenómeno denominado isla de calor urbano (ICU). La isla de calor urbano es el nombre que se usa para describir el calor característico almacenado y emitido tanto en la atmósfera como en las superficies de las ciudades (o áreas urbanas) en comparación con las temperaturas más bajas de sus entornos no urbanizados.

Este fenómeno no es estático sino que varía en el tiempo, puede mostrar diferentes intensidades según el clima, posición geográfica, día, hora, estacionalidad y la morfología de la ciudad. A la hora de realizar un estudio climático en una ciudad es fundamental considerar que las condiciones meteorológicas sean estables, vientos menores a 2 m/seg, sin precipitación y cielos despejados.

Por otra parte, estudios de clima urbano en ciudades áridas sostienen que en ellas se pueden registrar sumideros urbanos de calor (*Urban Heat Sink*) es decir, la atenuación de las temperaturas del medio urbano en comparación a las áreas rurales.

El clima urbano comienza a cobrar importancia cuando se demuestra que existe una clara relación entre los factores atmosféricos y la calidad de vida urbana. Actualmente la población urbana representa más del 50% de la población total y, aunque el área ocupada por las ciudades, apenas corresponde al 2% de la superficie del planeta, consumen más del 75% de los recursos naturales y de ellas procede más del 80% de las emisiones de gases a la atmósfera. Todo ello ha convertido a las ciudades en las zonas más vulnerables a los impactos negativos del calentamiento global y piezas claves en las políticas para frenar el calentamiento y mitigar sus impactos (Fernández & Martilli, 2012).

Este proyecto intenta contribuir con nuevas evidencias al conocimiento del comportamiento espacial y temporal de las temperaturas atmosféricas al interior de la ciudad, para así poder identificar la generación e intensidad de islas de calor y frescor urbano. Además se analizan las diferencias de temperaturas atmosféricas y el origen de las islas de calor y frescor urbano entre las zonas climáticas locales o áreas homogéneas desde el punto de vista de la morfología y usos y coberturas de los suelos en que se divide el plano de las ciudades. El objetivo es proponer medidas para paliar los efectos negativos de la isla de calor sobre la calidad de vida de los habitantes urbanos y adoptar medidas de consolidación para asegurar la presencia de las islas de frescor, bajo dos escalas de análisis Capa de Perímetro y Dospel Urbana. El principal interés de las investigaciones sobre clima urbano es poner sus resultados a disposición de las instituciones gubernamentales, municipales, organizaciones vecinales y privadas, para

que sus recomendaciones sean incorporadas en la planificación urbana sustentable. Mientras numerosas investigaciones anteriores se han concentrado en las condiciones climáticas de las metrópolis chilenas (Valparaíso, Santiago y Concepción), además de algunas ciudades intermedias ubicadas en la zona de climas mediterráneos (Quillota, Chillán y Los Ángeles), en este estudio se aborda el análisis de los climas urbanos de una ciudad árida, Copiapó, que se enmarca en el proyecto FONDECYT N° 1130305.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En general, América Latina manifiesta tasas considerables de crecimiento urbano (Heinrichs *et al.*, 2009). Es la región más urbanizada entre los países en vías de desarrollo, donde casi la mitad de la población vive en ciudades (Elgueta, 2006). En los últimos censos de Población y Vivienda, Chile resultó ser uno de los países más urbanizados de Latinoamérica, con un 86,7% de su población habitando en áreas urbanas (Henríquez *et al.*, 2005).

El crecimiento urbano como proceso se manifiesta, en dos diferentes escalas, la temporal y la espacial. El crecimiento espacial ha acompañado la historia de las ciudades, reflejando, con sus alcances, formas y ritmos, profundas causalidades socioeconómicas, culturales y ambientales (Azócar *et al.*, 2007, en Almendras, 2009). En relación a lo anterior, en las últimas décadas las ciudades chilenas han experimentado un acelerado proceso de crecimiento espacial, que ha significado sustituir usos y coberturas de suelo naturales y agrícolas por áreas urbanas (Romero *et al.*, 2010). Entre los efectos ambientales provocados por el crecimiento espacial urbano destacan, degradación y pérdida del capital natural (pulmones verdes), contaminación atmosférica, problemas de salud, niveles de ruido excesivo, vulnerabilidad frente a amenazas naturales (Tyler-Miller, 2007) y la conformación de islas de calor urbano (Romero *et al.*, 2010), entre otros.

Por otro lado, la transformación del medio natural por la acción humana alcanza su máxima expresión en las ciudades, donde afecta de modo especial a las condiciones climáticas (Cuadrat *et al.*, 1993). El clima urbano ha sido un constante objeto de estudio, principalmente el fenómeno denominado “Isla de Calor Urbano” (*Urban Heat Island*) cuyos orígenes se remontan hasta el año 1820 con lo realizado por Luke Howard sobre el clima de Londres.

Las islas de calor urbano (ICU) son entendidas como áreas de la ciudad que registran la diferencia de temperaturas más elevadas que se observan, tanto en la atmósfera, como en las superficies de los suelos, frente a las zonas más frescas de su entorno no urbanizado. Dicha diferencia entre ambos ambientes varía entre 2 y 8 °C. (Oke, 1982 en Smith & Méndez, 2010). Las temperaturas más elevadas se tienden a ubicar en el centro de las ciudades, donde las construcciones y edificaciones forman parte de un conjunto denso y compacto (Moreno, 1999). Así como la ciudad genera fenómenos de Islas de calor, también lo hace con las islas o islotes de frescor, áreas urbanas que concentran las

temperaturas menores, dentro de las islas de calor urbano (Moreno, 1999). La vegetación en el medio ambiente urbano y las construcciones de gran altura (proveedoras de sombra) constituyen islas frías (IFU) durante el día (Romero *et al.*, 2010). Para los investigadores, los estudios de clima urbano, enfatizan los agentes modificadores de las temperaturas, tales como la densidad de la vegetación y morfología. La vegetación es uno de los temas más analizados, por los beneficios que implica en la ciudad y calidad de vida para sus habitantes. Su sustitución por suelo construido, ocasiona aumentos de la temperatura, disminución de la evaporación y evapotranspiración e impermeabilización de los suelos. (López *et al.*, 1991; Romero *et al.*, 2007).

Por otra parte, Stewart y Oke (2009) proponen una metodología para clasificar los diferentes tipos de climas en áreas construidas como Zonas Climáticas Locales (ZCL) con el fin de estandarizarlas y compararlas a escala global. La clasificación está basada en la capacidad de un sitio de modificar su microclima térmico, debido a su particular combinación de radiación, emisividad, rugosidad, humedad y propiedades antropogénicas.

Los climas urbanos son fenómenos estructurales derivados de la artificialización de las coberturas naturales y el interés por su estudio radica en gestionarlos o planificarlos, con el fin de mitigar sus posibles efectos adversos en la medida que afectan la sustentabilidad de la ciudad y la calidad de vida y salud de sus habitantes.

Aunque según el Cuarto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), del año 2007, las ICU han tenido una escasa influencia sobre el incremento total de las temperaturas atmosféricas de menos de 0,006°C de un total de 0,76°C durante el siglo XX (Vergara *et al.*, 2009) constituyen un problema frente a la desaprensiva planificación y gestión de los espacios urbanos (Correa *et al.*, 2010; Moreno, 1999).

Las ciudades áridas u oasis representan un tipo especial de ciudades latinoamericanas, como se desprende de las condiciones observadas con anterioridad en Calama en Chile, o San Juan y Mendoza en Argentina (Correa *et al.*, 2010). En estas ciudades áridas se pueden registrar sumideros de calor urbano (*Urban Heat Sink*), es decir, que en vez de que acumulen calor por sobre las áreas rurales, se comporten como áreas más frías, que atraigan las masas aéreas desde sus periferias. Este efecto de hundimiento de las temperaturas varía entre otras causas por el tipo de material de las construcciones, el sombreado de las edificaciones y hasta el tipo de cobertura de suelo (Carnahan & Larson, 1990 en Peña, 2008). Las islas de frescor se pueden desarrollar a diferentes horas del día como ocurre durante las tardes en la ciudad de Beer Sheba en Israel (Potchter *et al* 2006; Saaroni & Ziv, 2010).

La tarea de controlar los efectos negativos de los climas urbanos sobre la calidad de vida de sus habitantes obliga a tomar en cuenta en la planificación y construcción de estas

ciudades, la consideración especial de la vegetación y las áreas verdes, por los efectos refrescantes y servicios ambientales que ofertan al medio ambiente urbano. Además y dada la ausencia o escasez de agua para generar y mantener áreas verdes en las ciudades áridas, es evidente que se deben tener en cuenta otras medidas como diseños acoplados con vientos y brisas locales, consolidación y construcción de corredores de enfriamiento, áreas de máxima contrastación térmica para generar brisas, áreas de sombra, colores de los materiales, pavimentos fríos, etc. (Contreras, 2008; Correa, 2010; Villanueva *et al.*, 2013). El clima urbano de regiones áridas es un tipo singular de climatología de ciudades. Su conocimiento particular aportará nuevas herramientas de gestión y planificación. Se debe buscar confort térmico y de humedad para crear un ambiente idóneo para la población.

El presente trabajo se basará en un análisis espacial y temporal de los datos atmosféricos, obtenidos de bases y estaciones distribuidos en diferentes puntos de la ciudad de Copiapó. Además se analizará las zonas climáticas locales respecto a las temperaturas atmosféricas. Finalmente se propondrán medidas de mitigación para los efectos adversos de la isla de calor y para consolidar las islas de frescor urbano.

1.3 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio seleccionada se ubica dentro de la Comuna de Copiapó, inserta en la Provincia del mismo nombre en la Región de Atacama. La ciudad de Copiapó (figura 1) es la capital tanto de la Región de Atacama como de la Provincia de Copiapó, ante lo cual cobra importancia tanto a nivel nacional como local. Se encuentra en el margen sur del desierto de Atacama, donde la ocurrencia de algunas pocas lluvias de invierno, especialmente sobre la Cordillera de los Andes, sustituye la absoluta aridez de los paisajes desérticos áridos por fértiles valles transversales.

El clima de Copiapó se define como desértico marginal bajo, ya que las condiciones áridas se encuentran aminoradas por la influencia del río Copiapó, cuyo valle marca la transición desde la extrema aridez del desierto de Atacama hacia la estepa cálida. La dinámica de circulación atmosférica de Copiapó está regida por el sistema general del norte de Chile, que se encuentra condicionado por la presencia de un Centro Permanente de Alta Presión en el mar, denominado Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS), responsable de la ausencia o escasez de precipitaciones y, por ende, de la aridez del norte del país (Juliá *et al.*, 2008). También se debe considerar el efecto de la corriente fría de Humboldt en el océano Pacífico, que aporta la humedad y favorece la presencia de nubosidad costera (“camanchaca”; Juliá *et al.*, 2008).

Los registros de la estación meteorológica de Chamonate, localizada a 11 km al noroeste de Copiapó, indican una temperatura promedio de 15,2°C, con una oscilación térmica anual de 8,2°C. Las precipitaciones son de origen *frontal*, y su régimen se caracteriza por

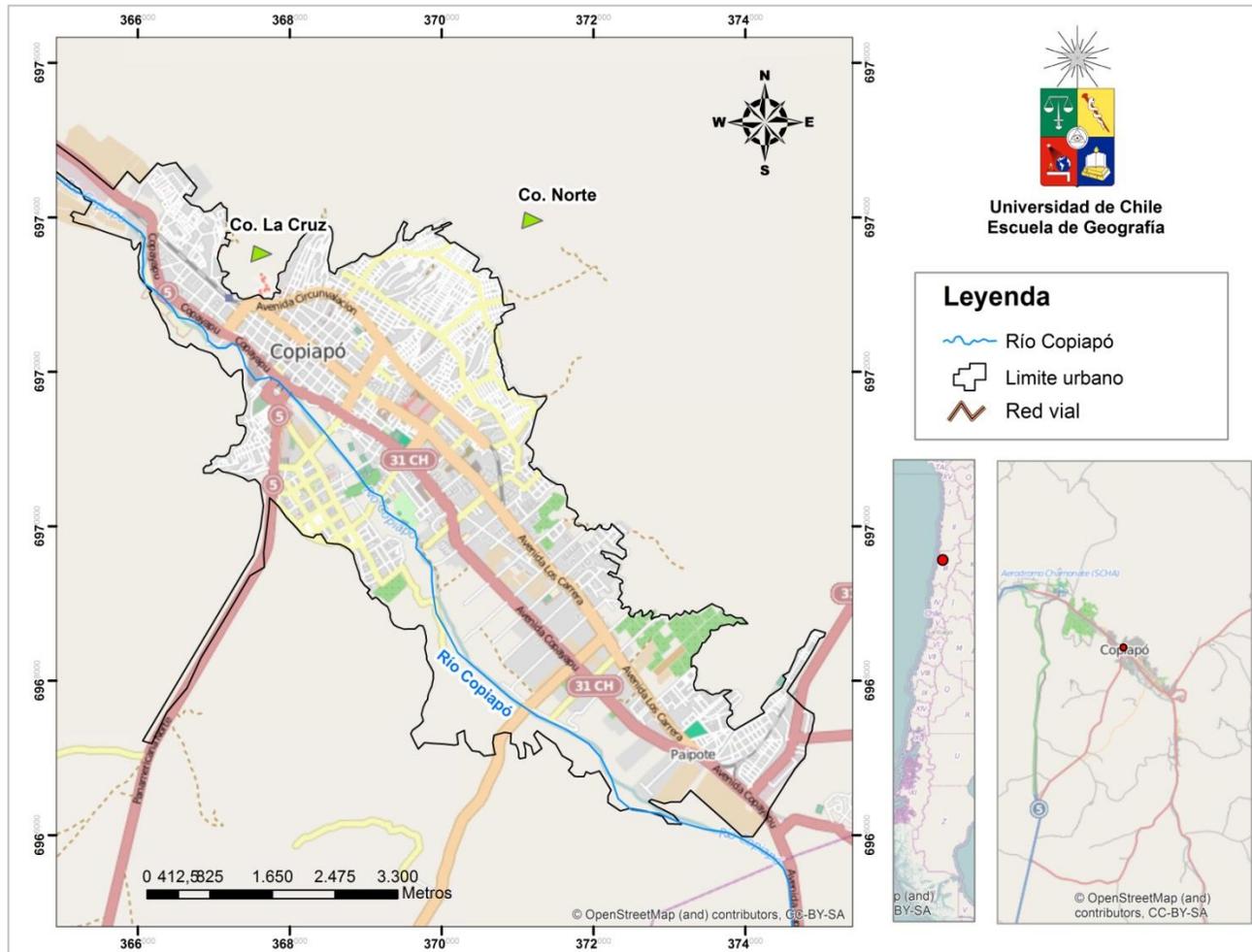
presentar reducidos montos de agua caída, concentrados en invierno (junio, julio y agosto), siendo el promedio anual de 16,6 mm.

Desde el punto de vista económico, la ciudad de Copiapó se ha consolidado como centro operacional para la pequeña y mediana industria de la minería, y también para el desarrollo agroindustrial del valle del río Copiapó (MOP, 2006). Así, se transforma en el centro neurálgico para la economía y la administración tanto de la provincia como de la región; allí se encuentran los servicios públicos, por ejemplo, Gobierno Regional, Secretaría regional de los ministerios como el de Medio Ambiente, Servicio Nacional de Geología y Minería, entre otros (Geo. Copiapó, 2009).

La comuna de Copiapó de acuerdo al censo de 2002 alcanzaba una población total de 129.091 habitantes, con una tasa de crecimiento anual de 2,49%, superior a la que presenta el total del país (1,09%). El 98% se encuentra en el área urbana y sólo 3.108 habitantes viven en área rural.

La ciudad de Copiapó se caracteriza por una marcada segmentación socioeconómica. En efecto, para el año 2005 el estrato socioeconómico más alto (ABC1) percibía un ingreso promedio por hogar 55 veces mayor que el estrato más bajo y correspondía a un total de 1.595 viviendas, las cuales representan el 4,5% de las 34.857 viviendas existentes en la zona urbana. En la ciudad, este grupo social reside en sectores tradicionales como el casco histórico, la periferia poniente y, últimamente, en parcelas de agrado localizadas en sectores rurales que bordean la parte sur de la ciudad. Al estrato medio alto (C2) correspondían 4.955 viviendas, es decir, el 13,8% de la comuna. Se concentran al oriente del centro de Copiapó, en barrios antiguos. El estrato medio bajo (C3) representaba el 25,7 % de las viviendas y ocupaba el área consolidada de la ciudad. Los estratos más pobres (grupos D y E) corresponden al 56% de las viviendas (ATISBA, 2005), que se concentran en la periferia de la ciudad.

Figura N° 1. Ciudad de Copiapó



Fuente: elaboración propia

1.4 OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la climatología urbana de la ciudad de Copiapó, especialmente aquellos aspectos relacionados con la configuración de las islas de calor y frescor, con la finalidad de sugerir medidas para su incorporación en la planificación urbana sustentable como ejemplo de las ciudades áridas del país.

Objetivos específicos

1. Analizar el comportamiento temporal y espacial de las temperaturas atmosféricas e islas de calor y frescor urbano.
2. Relacionar las zonas climáticas locales definidas al interior de la ciudad con las temperaturas atmosféricas e intensidad de la isla de calor y frescor urbano.
3. Proponer lineamientos para la planificación ambiental que permitan incorporar medidas de mitigación de las islas de calor y la consolidación de las islas de frío.

1.4.1 HIPÓTESIS

1. Adoptando un comportamiento típico de ciudades-oasis, en enero y en horas de la tarde, en la ciudad de Copiapó se observan islas de frío o frescor, contrariando la teoría general que reserva para los espacios urbanos la generación de ICUs. Sin embargo, durante la noche las islas de frío son reemplazadas por islas de calor muy intensas, adoptando el comportamiento habitual de las ciudades de climas mediterráneos.
2. Algunas zonas climáticas locales se encuentran estrechamente asociadas al origen de las islas de calor urbano como por ejemplo la categoría alta densidad urbana de baja altura (B3). Por otro lado, el sitio natural cobertura vegetal rasante (N4) se relaciona con el registro de islas de frescor urbano.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 CLIMA URBANO

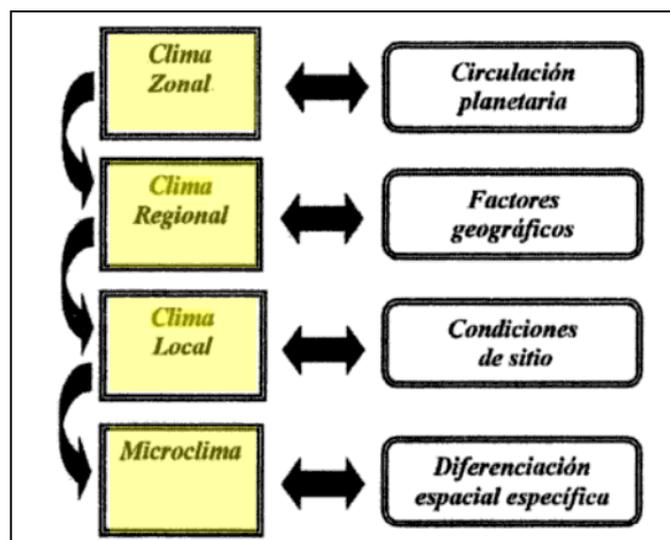
La investigación en la Geografía Física se enfoca en ramas como la climatología. Para Yeves (1993) el clima puede ser entendido como síntesis de un conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas, en un área determinada, correspondiente a un tiempo suficientemente largo para que sea geográficamente representativo. El Clima por ser un sistema complejo, presenta un comportamiento difícil de predecir, aunque no por ello menos estudiado. Se ha dividido en diversas escalas, que alcanzan un orden de magnitud de los procesos atmosféricos y se refieren a la extensión espacial del estudio (Capelli et al., 2005).

En el caso de los procesos atmosféricos, según Pédelaborde (1970) las escalas de estudio del clima se analizan de la siguiente manera (figura 2):

- Clima zonal que se caracteriza por la dominante circulación planetaria
- Escala regional, determinada por los factores geográficos que inciden en el actuar de los centros de acción.
- Clima local, donde predominan las condiciones del sitio, sean producidas por los medios ambientes naturales o por la actividad del hombre.
- Microclimas.

La otra escala es la concerniente a la extensión espacial del estudio, Oke (1992) designa como estudios de macro-escala a los que cubren una extensión que varía entre 200 y 100.000 km. Para meso-escala otorga una distancia horizontal de 10 a 200 km. La escala local queda comprendida entre 1000 m y 50 km y por último la escala microclimática estudia los procesos que oscilan entre 1 cm y 1000 m (figura 3)

Figura N° 2. Escala de estudio del clima según Pedelaborde, 1970



Fuente: Capelli, 2005

Figura N° 3. Extensión espacial del clima.

Micro-escala	1 cm a 1000 metros
Escala local	100 m a 50 km
Meso escala	10km a 200 km
Macro-escala	200 km a 1000 km

Fuente: Oke, 1992

Se puede concluir que a escala meso el clima se define a través de los factores de una región en particular, ya sea por circulación general atmosférica, continentalidad, orografía y la cercanía con el océano. A escala micro se encuentra una gran diversidad de factores climáticos secundarios o complementarios como la altitud, vegetación, áreas urbanas etc.

El hombre a través de la construcción de ciudades ha determinado la aparición de un tipo particular de clima local, el clima urbano. El clima urbano refleja la totalidad de cambios microclimáticos surgidos por la alteración del hombre sobre la superficie urbana (Capelli, op. cit).

Los estudios de climatología urbana tienen como propósito explicar las modificaciones del clima surgidas del proceso de urbanización y a la vez proponer espacios climáticamente favorables para futuros asentamientos. Para ello analiza el comportamiento de los parámetros meteorológicos dentro de una porción de la atmósfera que constituye la capa límite urbana. Capelli et al (2005) expone que la capa límite urbana está definida por la turbulencia que genera la fricción del aire sobre la superficie de la tierra. Mientras Oke (1978), explica que su espesor no es constante sino que varía con el estado del tiempo y la hora del día. Durante el periodo diurno los procesos radiativos y convectivos extienden la capa límite hasta 1 o 2 km de altura en tanto que en horas de la noche decrece hasta unos 100 m. (Oke, 1978 en Capelli et al., 2005).

Los climas urbanos no corresponden solo a las características promedio que adoptan las variables físicas o químicas que presenta el aire al sobrevolar los espacios urbanos. A microescala, cada objeto del paisaje urbano genera especiales flujos e intercambios de materia y energía entre la atmósfera, los suelos, la vegetación, las calles, las casas, los edificios, las industrias, los parques, etc. (Romero et al., 2010).

2.2 ISLAS DE CALOR.

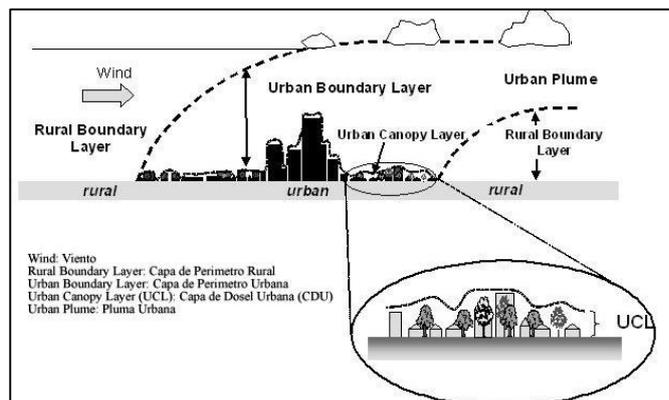
La principal modificación que causa la ciudad sobre el clima es el fenómeno denominado "Isla de Calor Urbana" (*Urban Heat Island*).

Las islas de calor son entendidas como las áreas cálidas que concentran las temperaturas más elevadas que se observan, tanto en la atmósfera como en las superficies de los suelos de las ciudades, en comparación con su entorno no urbanizado. Dicha diferencia varía entre 2 y 8 °C (Oke, 1985 en Smith y Méndez, 2010). Otros autores definen la isla de calor urbano como la “diferencia entre la temperatura del área urbana y del área no urbana” (Papparelli et al., 1998), y como un “oasis invertido”, donde las temperaturas del aire y de las superficies urbanas son más cálidas que aquellas en sus entornos rurales” (Garland, 2011 en Papparelli et al., 2011).

Por otro lado, Oke (1995) en Voogt (2008) muestra tres tipos de Isla de Calor: Isla de Calor Superficial (ICS), Isla de Calor de la Capa de Dosel (ICCD) e Isla de Calor de la Capa de Perímetro (ICCP, Urban boundary layer en la figura 4). La ICS alude a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y cuerpos urbanos y que son captadas directamente por sensores infrarrojos, tales como los que disponen los satélites de observación terrestre (Sarricolea & Romero, 2008). La ICCD es el espacio comprendido entre el suelo y los tejados de los edificios (Urban canopy layer en la figura 4). El viento y las temperaturas experimentan cambios notables en espacios muy reducidos y se forma un complejo entramado de microclimas diferentes debido al trazado y anchura de la red vial, los usos del suelo, los materiales de asfalto y edificios, así como por las diferentes alturas y orientaciones. Por último, la ICCP es la capa turbulenta, generada por la rugosidad de la superficie y los movimientos convectivos asociados al caldeoamiento del aire en contacto con el suelo. Para la medición de las temperaturas del aire para la ICCD y la ICCP se utilizan termómetros, mientras que la ICS es medida a través de sensores remotos que permiten generar lo que se conoce como Temperatura de Emisión Superficial (Smith, 2011).

La capa de dosel urbano (CDU) es la capa de aire de las ciudades que está más cercana a la superficie, la cual se extiende hacia arriba aproximadamente hasta la altura media de las edificaciones. Por encima de la capa de dosel urbano se encuentra la capa de perímetro urbano la cual puede ser de 1 km o más de espesor durante el día, y puede encogerse a cientos de metros o menos durante la noche (figura 4). La ICCP es la que forma una cúpula de aire más caliente que se extiende en dirección del viento más allá de la ciudad. (Voogt, 2008)

Figura N° 4. Representación esquemática de los componentes principales de la atmósfera urbana. Oke (1995)



Fuente:Voogt, 2008.

Por la noche la intensidad de la isla de calor de la capa de dosel típicamente se encuentra en un rango de entre 1° y 3°C, pero bajo condiciones óptimas, intensidades de hasta 12°C han sido registradas (Oke, 1997 en Voogt, 2008). La ICCP tiende a mantener una intensidad de isla de calor más constante tanto durante el día como en la noche (~1.5° a 2°C). La ICS es generalmente más definida durante el día cuando el fuerte calentamiento solar puede llevar a mayores diferencias de temperatura entre las superficies secas y aquellas mojadas, sombreadas o con vegetación.

Existen varios factores que contribuyen a la ocurrencia o intensidad de la isla de calor entre los que se encuentran el clima, la localización geográfica, hora del día y estación del año, forma y funciones de la ciudad (Voogt, 2003). La magnitud de la ICU es máxima durante la noche debido al enfriamiento radiativo diferencial por encima de las superficies urbanas y rurales, que a su vez es una respuesta a la geometría de la superficie (cañón urbano vs rural abierto) y de almacenamiento de calor (concreto urbano vs suelos rurales) (Oke, 1982).

Así como el clima urbano presenta fenómenos de isla de calor también se aprecian islas o islotes de frescor. Moreno (1999) define este último concepto como un núcleo con temperaturas menores dentro de las islas de calor urbanas. Mientras Voogt (2008) afirma que las Islas de calor pueden convertirse en islas de frío, donde la intensidad es bastante débil, y a veces negativa, en algunas partes de la ciudad donde altos edificios u otras estructuras proveen sombra extensa, y donde hay una carencia de calentamiento debido al almacenamiento de calor en los materiales de construcción. También la vegetación en el medio ambiente urbano constituye islas frías (Romero et al., 2010).

Así mismo Narita et al (2009) plantean que los parques en las ciudades se comportan como islas de frío o frescor durante la noche contribuyendo al enfriamiento del espacio construido. Es así como la vegetación traducida en parques corredores o pulmones verdes forma parte de las medidas de mitigación para la reducción de las islas de calor urbano en diferentes partes del mundo.

2.2.1 EFECTOS DE LA ISLA DE CALOR EN LAS CIUDADES.

Toda modificación en el clima local urbano conlleva tanto efectos negativos como positivos en diversos ámbitos; Voogt (2005) incluye los siguientes:

- confort humano: positivo (invierno), negativo (verano)
- uso de energía: positivo (invierno), negativo (verano)
- uso de agua: negativo
- actividad biológica (por ejemplo, la duración de la temporada de cultivo): positivo
- hielo y nieve: positivo.

Rosenfeld et al (1995) sostienen que las islas de calor en periodo estival pueden aumentar la demanda de energía para aire acondicionado, lo cual libera más calor al aire y también gases de efecto invernadero, degradando así la calidad del aire local. Las temperaturas urbanas más elevadas durante el día en la ICCP pueden aumentar la formación del smog urbano, puesto que tanto las emisiones de contaminantes precursores, como las tasas de reacciones fotoquímicas de la atmósfera, aumentan (Cardelin et al., 1990; Silman et al., 1995; Borderias et al., 2006).

Este fenómeno también afecta en forma directa la salud humana, donde las elevadas temperaturas aumentan el estrés por calor, creando condiciones adecuadas para que se distribuyan las enfermedades transmitidas por vectores (Changnon et al., 1996).

Otro de los problemas que afectan al ser humano incluye el bienestar físico y psicológico del individuo, el denominado confort térmico, definido por las condiciones del ambiente que le rodean y que deben ser las adecuadas para la actividad que desarrolla. Para Carrieri et al (2009) un confort térmico agradable oscila entre los 21°C y 26°C con humedad relativa entre 35 y 70%.

Por último la trascendencia económica y social que en la actualidad tiene el fenómeno urbano y su incidencia sobre el confort y la calidad de vida explican el lugar privilegiado que ocupa como tema de estudio y la utilidad de su conocimiento para la gestión ambiental de la ciudad (Cuadrat et al., 2005).

2.3 ESTUDIOS SOBRE ISLAS DE CALOR EN ZONAS ÁRIDAS.

Los estudios sobre las islas de calor urbano han tomado cada vez más fuerza en el ámbito de la Geografía. El análisis de este fenómeno concentra un volumen mayor de investigaciones en ciudades como Nueva York y las de Japón (Carreras *et al.*, 1990), pero en las últimas décadas ha traspasado distintas latitudes para realizarse en ciudades como Madrid, Zaragoza, Tel- Aviv, Santiago de Chile, entre otras; las últimas marcadas por un clima templado. Ciudades insertas en contextos áridos o semiáridos también han sido objeto de estudios, como por ejemplo Mendoza y San Juan en Argentina, Tucson de EE.UU y Beer Sheba en Israel.

A continuación se exponen en breve resultados de estudios practicados en ciudades con climas templados: En el caso de la ciudad de Zaragoza, el clima urbano, presenta islas de calor de mayor intensidad en condiciones nocturnas, basándose en la mayor capacidad que posee la cobertura urbana para almacenar calor durante el día mientras que en las últimas horas de la tarde y por la noche lo libera dando lugar así a una fuente adicional de energía que se incorpora a la atmósfera urbana (Lowry, 1967). En Santiago de Chile, investigaciones señalan que las temperaturas son mayores en comparación a su entorno suburbano y que coinciden con zonas con mayor densidad residencial, comercial, industrial y vehicular. También las islas de calor urbano se presentan durante la noche con diferencias de 3°C a 4°C. Por otro parte Sarricolea & Romero (2010) sostienen que en Valparaíso, a pesar de su posición costera y su orografía, se presentan también islas de calor urbano con intensidades de hasta 5° C observables durante la noche.

Las investigaciones sobre áreas de ICUs en zonas áridas hablan que éstas pueden ser ocupadas por el contrario por barrios más fríos o de hundimiento de temperaturas en comparación a su entorno rural. Este hundimiento de la intensidad de calor sobre la ciudad es denominado como Islas de Frescor o Isla de Frío Urbano (IFU) y se genera durante el día. Las islas de frescor también son conocidas como “Efecto Oasis”, que se define como un cambio en las condiciones microclimáticas en áreas provistas de vegetación, a diferencia de lo que sucede en espacios sin vegetación. El cambio consiste en el registro de temperaturas más bajas y una mayor humedad relativa (Oke, 1987). Una zona verde es más húmeda y por lo tanto, más fría que sus alrededores debido a los procesos de evapotranspiración que consumen calor sensible y lo transforman en calor latente de evaporación de acuerdo con la Relación de Bowen de balance de energía. Además, la sombra de la vegetación evita que la radiación directa del sol llegue a la superficie del suelo y lo caliente, lo que resulta en temperaturas del aire más bajas por encima de estas superficies.

A continuación se presentan diferentes estudios de casos sobre ICU en zonas áridas.

a. Ciudad de Mendoza, Argentina.

Correa *et al.*, 2006, estudian el clima urbano de la Ciudad de Mendoza (Argentina), señalando que presenta como característica especial, debido a la acción del hombre, la presencia de un oasis artificial al pie de la Cordillera de los Andes, con una importante forestación del área urbana. En su trabajo examinan la ICU comparando las temperaturas del área urbana y suburbana con la temperatura de las áreas rurales o periféricas del área metropolitana durante los años 2004 y 2005. La evaluación se llevó a cabo mediante dos métodos de monitoreo: transectos móviles de mediciones y adquisición automática de datos (temperatura y humedad) mediante estaciones fijas colocadas en distintos puntos dentro de la ciudad y sus alrededores. Sus resultados arrojaron que, durante la noche la condición abovedada de la estructura verde disminuye el factor de visión de cielo (Sky View Factor) hecho que sumado a las características climáticas del emplazamiento (baja frecuencia e intensidad de los vientos) reducen el potencial de enfriamiento pasivo por radiación y convección. Este fenómeno genera una isla de calor nocturna, especialmente antes de la salida del sol, alcanzando máximas de 10°C que se registra en todas las estaciones del año (Correa *et al.*, 2010).

Por otro lado, exponen que la ICU se manifiesta en forma negativa (la ciudad se encuentra más fresca que los alrededores) durante las tardes, registrándose una isla de frescor urbano (IFU) que alcanza máximas de hasta -8.6°C. Correa *et al.*, demuestran que la IFU está relacionada con el grado de insolación de los alrededores del área metropolitana de Mendoza, indicando que cuando disminuye la intensidad de la radiación disminuye también la intensidad de la isla de frescor desarrollada. Por otro lado los autores sostienen que el tamaño de los espacios verdes determina los efectos benéficos de los parques en la ciudad, pues revelan que los de menor superficie (interior de la ciudad), resultan ser más eficientes en la regulación de la temperatura, en comparación a las grandes extensiones de parques (bordes de la ciudad).

b. Ciudad de Beer Sheba, Israel.

La ciudad de Beer Sheba se ubica al sur de Israel en pleno desierto de Negev. Entre los autores que han abordado este tema se encuentran Saaroni & Ziv, 2010; Besson et al., 2005; Potchter *et al.*, 2006 entre otros. Estos últimos han tratado específicamente las ICU en la ciudad utilizando dos métodos para llevar a cabo su investigación: el primero tiene que ver con el examen de las temperaturas y las tendencias de humedad en los últimos 50 años, durante los meses de enero (invierno) y julio (verano). El segundo a través de mediciones climáticas (5 dispositivos móviles dispuestos en la ciudad) durante las diferentes estaciones (invierno, primavera y verano), en dos años consecutivos: 2004-2005.

En relación al examen de las tendencias de la temperatura entre los años 1950-2005 demuestran que las mínimas promedio diarias aumentaron. Este fenómeno es más significativo en el invierno que en verano. La temperatura máxima diaria experimentó pocos cambios.

El estudio sostiene como conclusión, que a diferencia de la mayor parte del país, la temperatura mínima en Beer Sheba aumentó probablemente debido a la ICU intensiva desarrollada en la noche y al amanecer. La tendencia de la temperatura máxima de Beer Sheba mostró cambios menores, mientras que la mayor parte del país experimentó un aumento de éstas. Ello se puede explicar por el efecto oasis causado por la jardinería intensiva en la ciudad, un fenómeno que se observó en el estudio de Besson et al (2005).

Por otro lado, un estudio realizado por Saaroni y Ziv para el año 2004 en la misma ciudad, detectó ICU en diferentes áreas del entramado urbano, con elevaciones de temperatura que variaron entre 0,8° y 3,1°C, registrados durante las horas nocturnas. También detectaron islas de frescor en menor medida, gracias al efecto "oasis" que imparte los parques municipales de la ciudad durante la tarde (Saaroni & Ziv, 2010).

c. Ciudad de Tucson, EE.UU

El área metropolitana de Tucson se encuentra en un amplio valle plano (elevación de 750 a 800 m), que está rodeado por cadenas montañosas con picos de hasta 2.750 metros de altitud. Los principales sistemas de drenaje de la cuenca, son el río Santa Cruz y sus afluentes, el Rillito Creek, la Cañada del Oro, el Tanque Verde Creek y el Pantano de Lavado. Los cauces de los ríos, en general se encuentran secos.

Un estudio realizado por Andrew Comrie (2000) expuso sobre el mapeo del viento y la modificación que genera esta variable meteorológica en el comportamiento de la isla de calor. Comrie realizó un análisis de las tendencias temporales de la temperatura mínima observada durante treinta años (1969-1999) en zonas urbanas y no urbanas en toda la región.

Sus principales resultados arrojaron que los sitios no urbanos se han calentado en un promedio de 0,026°C año⁻¹, mientras que los núcleos urbanos lo han hecho en un promedio de 0,096°C año⁻¹. Por lo tanto el calentamiento urbano que se ha producido es casi tres veces el de los lugares no urbanos, con una tasa neta de 0,07°C año⁻¹ o de 2,1°C en más de 30 años.

Al parecer, cerca del amanecer los vientos superficiales de drenaje sobre la cuenca son un 20% más fuerte en los meses de octubre a diciembre. Estos vientos frescos al soplar sobre la zona urbana (en noviembre) invierten el flujo térmico habitual, eliminando así el efecto ICU.

En sus conclusiones señalan que la intensidad de la ICU ha aumentado aproximadamente en 3°C desde 1910, con cerca de tres cuartas partes de este aumento (2,1°C) producido por el crecimiento urbano acelerado ocurrido durante las últimas tres décadas. La ICU es estacional, siendo más fuerte al final del invierno y más débil a principios del otoño. Por otro lado, el viento catabático (descendente desde las montañas), las características topográficas del terreno y los patrones de drenaje de ríos y quebradas pueden constituir una de las principales fuentes de variabilidad de la temperatura en Tucson.

2.4 ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES.

La ciencia ambiental ha estudiado el clima urbano, específicamente las ICU, desde la dicotomía de lo urbano-rural, estableciendo diferencias entre ambos ámbitos. Lowry en 1977 comienza el proceso de disección de la dicotomía urbana-rural, al plantear que el estudio macro escalar entre lo urbano-rural es poco efectivo para identificar el efecto de la urbanización sobre el clima, ante lo cual sostiene el concepto de zonas pre-urbanas. Establece así una crítica a las metodologías utilizadas en la clasificación del espacio urbano en el estudio de las islas de calor. Desde entonces varios investigadores han formulado diversos criterios de clasificación para el espacio "urbano" y "rural". Por ejemplo Auer en 1978 propone un sistema de clasificación para el estudio del clima de la ciudad St. Louis EE.UU., utilizando criterios de uso de suelo y cubierta vegetal. En su investigación determinó cuatro clases (Industrial pesada, comercial, común residencial y metropolitana natural) las cuales derivaron en doce sub-clases finales. En sus resultados la ciudad presentaba diferencias intraurbanas de 1.5 a 3 °C en la temperatura y -0.5 a 1.5 g kg⁻¹ en la humedad atmosférica. A pesar que sus resultados reflejaban la relación directa entre las cobertura vegetal con la humedad e inversa con la temperatura, su clasificación no lograba explicar el comportamiento termodinámico por lo que el análisis debería considerar la relación interactiva y sinérgica entre los distintos usos y coberturas de los suelos, además de complejizar el modelo para poder comprender aquellas anomalías que no logra explicar por sí mismo (Irrázaval, 2011).

A nivel local y microescalar, Ellefsen (1990-1991) ideó un sistema a escala de barrio denominada "zonas urbanas de terreno" (UTZ) basado en la morfología de las edificaciones, el tipo de construcción, las características de ventilación, la edad, la densidad y configuración de la calle y los materiales de construcción, en diez grandes ciudades de EE.UU: Boston, Filadelfia, Baltimore, Pittsburgh, Cincinnati, Atlanta, Houston, Denver, Seattle y Sacramento. La metodología se inicia a partir de cuatro categorías principales (áreas no urbanas, construcciones unidas, construcciones poco distanciadas y construcciones separadas), las cuales son subdivididas en diecisiete subtipos según su función (Oke, 2006). Ellefsen (1987) en unos de sus trabajos

expone que la extrapolación sugiere que las zonas de terreno urbano utilizados son aplicables en todas partes.

Por otra parte Davenport *et al* (2000) establecen otra clasificación del paisaje urbano en relación a su estructura. Esta clasificación parte de la base de una serie de mediciones empíricas realizadas por diferentes investigadores en distintas unidades de paisaje, que observaron la relación existente entre la rugosidad del terreno y la turbulencia que se produce en la circulación del viento. Sobre esta base proponen ocho categorías que van desde los paisajes más abiertos (menos rugosos) a los más cerrados. Cabe mencionar que esta clasificación se puede aplicar tanto al medio natural como al urbano dado que lo que se observa, es el efecto de intercepción del viento por parte de distintos elementos; es decir evalúa estructuras y no superficies (Irrarázaval, 2011).

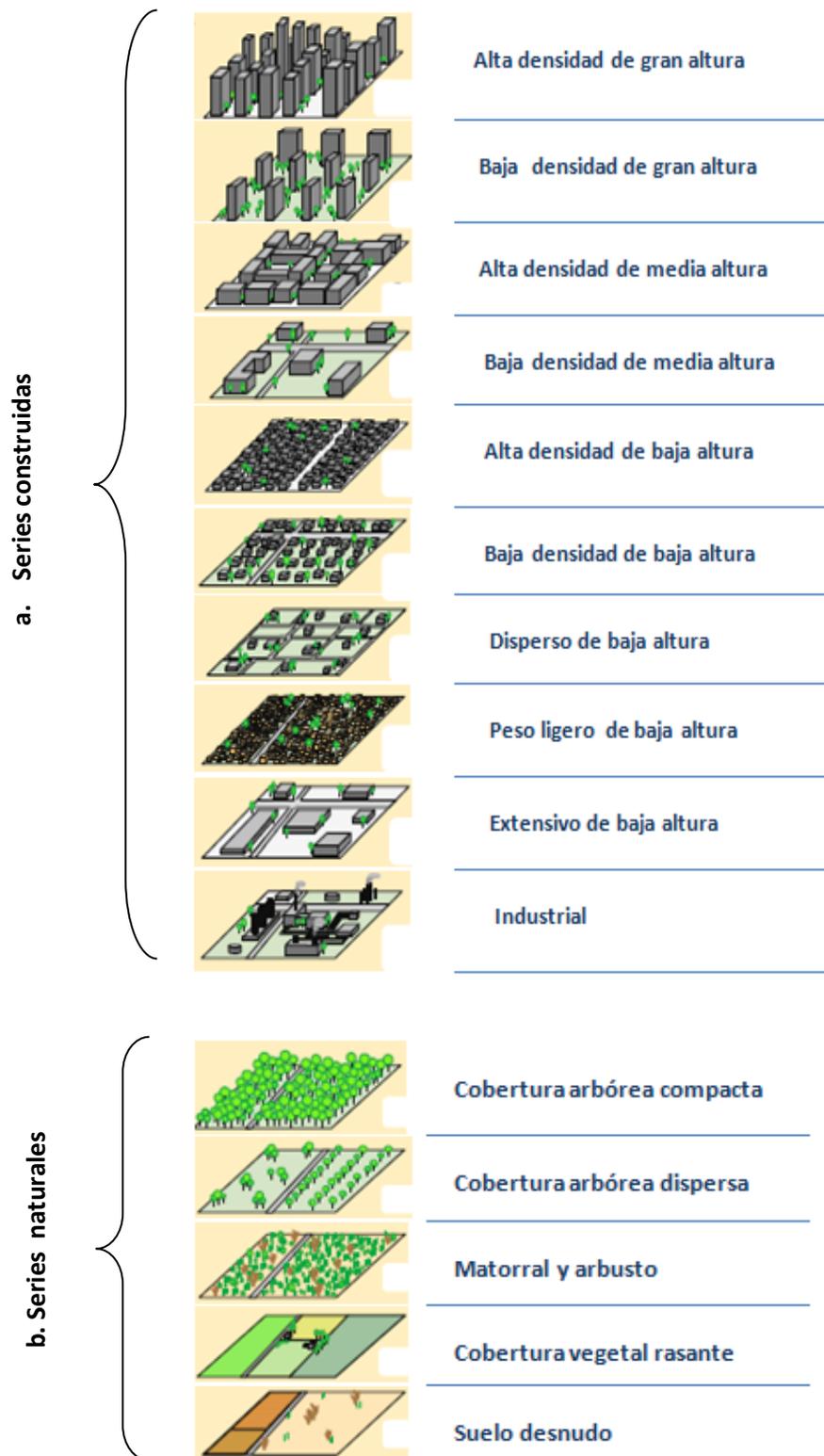
En el 2009 Stewart y Oke proponen una nueva metodología para clasificar los diferentes tipos de climas en áreas construidas denominadas como "zonas climáticas locales" con el fin de estandarizarlas y compararlas a escala global. La clasificación está basada en la capacidad de un sitio de modificar su microclima térmico, debido a su particular combinación de radiación, temperatura, rugosidad, humedad, factor visión de cielo y propiedades antropogénicas. Esta clasificación se basó en una muestra representativa de 180 estudios (1950-2007).

El sistema de Zonas Climáticas Locales consta de dos series: "construida" y "natural". La serie de construcción consta de 10 zonas (figura 5.a) y que se relaciona estrechamente con lo expuesto por Oke (2004) sobre las zonas climáticas urbanas. La serie natural consta de 5 zonas (figura 5.b)

Las zonas construidas por definición tienen por lo menos 25 por ciento de cubierta impermeable. La serie natural, en contraste, es más pequeña, pero climatológicamente más sensibles a las condiciones de superficie húmeda y seca debido a su alto porcentaje de cubierta permeable. Por lo tanto, las zonas naturales se pueden diferenciar aún más en criterios de humedad superficial.

El esquema propuesto es universal en su alcance y está diseñado para capturar la continuidad de la superficie de tipo natural y construido que determinan la magnitud de las islas de calor urbano, siendo aplicable o en cualquier ciudad del mundo a una escala local o micro local.

Figura N° 5. Clasificación de las zonas climáticas locales (Stewart y Oke, 2009).



Fuente: elaboración propia en base a Stewart, 2009.

2.5 MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO EN ZONAS ÁRIDAS.

Al igual que la escasez de estudios sobre islas de calor urbano en un tipo especial de ciudades, como lo son las ciudades áridas, la cantidad de trabajos e investigaciones sobre mitigación de ICU o consolidación de IFU son exiguos. Entre ellos, se destaca el rol de la vegetación (infraestructura verde) y la evaluación de las propiedades termofísicas de los materiales de las construcciones (techos, fachadas y superficies).

La aplicación de medidas para contrarrestar o mitigar la ICU puede depender de muchos factores, algunos de los cuales se pueden incorporar a las estrategias de planificación, mientras que otros se escapan del control del uso y geometría de los espacios. En general en los procesos de planificación el proyectista tiene que considerar los diferentes factores y promover un desarrollo eco-compatible con el medio, que promueva la eficiencia y el ahorro energético, además de la funcionalidad y la salubridad para los ciudadanos (Tumini, 2009).

El uso de espacios verdes y árboles es la primera y más efectiva medida que se puede poner en marcha para reducir la isla de calor urbano. La sustitución del manto vegetal por superficies artificiales tiene efectos directos e indirectos sobre la isla de calor urbano. Se definen como efectos directos aquellos relacionados con los edificios y su contexto, debido a la protección solar de fachadas, la reducción de la absorción y la creación de vientos. Indirectos son aquellos que afectan al entorno urbano principalmente mediante la evapotranspiración, que en general influye en el flujo latente del balance energético del espacio (Tumini, op.cit).

Un concepto que deriva de los usos de espacios verdes en áreas urbanas como medida de mitigación de ICU, es la aplicación de la Infraestructura Verde, concepto que aparece en el año 1900, pero que toma fuerza durante la última década enfocándose principalmente en el diseño y planificación de ambientes urbanos y periurbanos y que tienen por objetivo reconciliar el crecimiento urbano, bienestar social y protección ambiental, enfatizando los servicios ecológicos y sociales provistos por los espacios verdes (Tzoulas et al., 2007; Eisenman; 2013 Benedict y McMahon, 2006 en Vásquez, 2014).

En la actualidad, la infraestructura verde tiene propósitos muy diferentes y que varían en cuanto al nivel de tecnología incorporado y las escalas que involucran:

- A micro escala es posible encontrar entre otras soluciones techos verdes, jardines verticales y plazas.
- A escala de paisaje es posible encontrar infraestructura verde tal como humedales, bosques, parques intercomunales, corredores ribereños y líneas de costa. Son precisamente estos tipos de infraestructura verde las que permiten mantener o restaurar procesos ecológicos clave para el funcionamiento a largo plazo de los ecosistemas y maximizar los beneficios sociales que se obtienen de ellos (Vásquez, 2014).

Por otra parte, un estudio realizado en Mendoza, Argentina, relacionó la morfología forestal y el confort térmico (Correa *et al.*, 2010). En este trabajo se evalúa el comportamiento térmico y el grado de confort alcanzado en canales viales típicos de la trama urbana de baja densidad, forestados con especies de segunda magnitud (especies de 10 a 15 metros de altura) en condición de homogeneidad y heterogeneidad o diversidad, durante el verano. El análisis incluye una relación entre el ancho de las calles o canales viales de 16 metros y 20 metros con el tipo de vegetación de segunda magnitud (moreras y fresnos). Entre las combinaciones la mejor opción, que presenta mayor confort térmico en el periodo de calentamiento, fue el canal vial de 20 metros con forestación de moreras y en periodo de enfriamiento muestra mejor funcionamiento el canal vial de 20 metros con forestación de fresnos. Las principales conclusiones que se obtuvieron plantean que si se tomase en cuenta que el control de la radiación solar resulta determinante del confort térmico para el tipo de clima árido, se podrían aportar soluciones mediante la forestación en el esquema de una ciudad oasis, pero además, que la combinación de forma y permeabilidad de la copa afecta tanto las posibilidades de enfriamiento radiativo como convectivo, modificando el grado de visión de cielo y la rugosidad del espacio. Este trabajo contribuye a los beneficios de las estructuras verdes urbanas. Otro caso de estudio sobre la vegetación como medida de mitigación es también la Ciudad de Beer Sheba (Potchter *et al.*, 2011). Allí se analiza el impacto de la vegetación urbana sobre las condiciones micro-climáticas de la ciudad, examinado en dos tejidos urbanos: las calles bordeadas de árboles y los parques urbanos.

También es considerada como medida de mitigación, la implementación de métodos para la evaluación de materiales y superficies, con el fin de disminuir el impacto térmico en la ciudad (De Schiller & Evans, 2006). Los techos, fachadas de edificios, calles, plazas, etc. representan una importante masa de acumulación de calor, volviendo a emitirlo al ambiente en forma de radiación de onda larga y con un desfase en el tiempo. La intensidad de las ondas depende, además de la porción de superficie visible del cielo, de las características de los materiales, como el albedo, la emisividad, la inercia térmica, etc. (Grey & Finster, 1999).

Alchapar *et al* (2012) se dedican al estudio de las propiedades termofísicas de los materiales (techos, pavimentos y fachadas) de la Ciudad de Mendoza, como una estrategia de mitigación viable para disminuir las temperaturas de la ciudad. El estudio analiza la capacidad de 80 revestimientos para fachadas disponibles regionalmente, mediante el cálculo del Índice de Reflectancia Solar (SRI) de los materiales, basado en la medida de su reflectividad solar, su emisividad térmica y su temperatura superficial. El SRI cuantifica el calor que acumularía un material en relación a una superficie patrón de colores blanco y negro, bajo condiciones ambientales estándar. Se define como patrón negro a un material con una reflectancia de 0.05 y una emitancia 0.90, cuyo valor es igual a 0. El patrón blanco equivale a 1 (o 100%), con una reflectancia 0.80 y una emitancia 0,90. Este método se utiliza para superficies con emisividades mayores a 0.01 y temperaturas superficiales menores a 150 °C. En su trabajo concluyen que el material que posee el comportamiento más eficiente es el Acrílico Rulato Travertino fino marfil (SRI = 100%, Temp. Sup.= 35 °C), mientras el más ineficiente es el Acrílico Llaneado fino gris plomo (SRI = 29%, Temp. Sup.= 74 °C). No obstante existen alternativas intermedias que resultan del efecto combinado de la

composición del material, su color y textura. Esta situación demuestra que es posible mitigar el efecto de isla de calor a partir de una adecuada selección de revestimientos verticales.

Otra medida de mitigación de las ICU son los colores de los materiales de las construcciones, donde los claros, como el blanco, en general poseen un mayor albedo, por lo tanto un mejor comportamiento térmico, siendo esta una estrategia de enfriamiento pasivo. Los colores claros presentan beneficios en cuanto a su comportamiento térmico. Por su parte, Alchapar también analiza 15 muestras de pinturas para fachadas de tres tipos de composición látex, acrílico e impermeable, donde concluye que las diferencias térmicas encontradas en las pinturas blancas (Δ SRI en pinturas acrílicas= 9% y Δ SRI en pinturas impermeables= 13%) ponen de manifiesto que no es suficiente la selección sólo del color para garantizar el mejor funcionamiento térmico. Es por ello, que las prestaciones térmicas de las pinturas deben estar asociadas al comportamiento simultáneo de color y composición. Por otro lado, Meyn y Oke (2009) en Irarrázaval (2011) investigaron el flujo de calor presente en los techos, asumiendo que su capacidad de almacenamiento térmico es menor que paredes y superficies. Los resultados señalan que los techos de pizarreño son los que almacenan menos temperatura ($a^1=0.06$), en contraste con los de arcilla ($a^1=0.07$) y asfalto ($a^1=0.09$).

2.6 PLANIFICACIÓN URBANA SUSTENTABLE.

En la década del 60', caracterizada por la política de "modernización" o modelo económico basado en la sustitución de las importaciones, se inicia un proceso acelerado de industrialización y como consecuencia, los países experimentan un aumento significativo de la población urbana, producto de las migraciones campo/ciudad en busca de oportunidades laborales, que va dejando como saldo migratorio a cientos de personas sumergidas en absoluta pobreza (Cárdenas, 1999). En este contexto las corrientes ecológicas comienzan a discutir con mayor énfasis el concepto de crisis ambiental como un cuestionamiento a la racionalidad y los paradigmas teóricos que han impulsado y legitimado el crecimiento económico, soslayando a la naturaleza. La crisis ambiental se muestra como un proceso de valorización de la naturaleza e internalización de las externalidades socio ambiental comprendiendo a esta como la inclusión de todos los aspectos bióticos, abióticos y socio-culturales del ecosistema al sistema económico. Al incorporar a las externalidades al discurso de sustentabilidad se reconoce la función que cumple la naturaleza como soporte, condición y potencial del proceso de producción (Leff, 1998). La tesis de crisis medioambiental viene siendo desde un punto de vista teórico, la racionalización o pseudo racionalización ambiental del paradigma económico actual.

Es así es como se desarrollaron varias discusiones en torno al tema, pero la más trascendente fue la Conferencia de la Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo celebrada en 1992 en Río de Janeiro, en base al informe Bruntland. En este marco se elabora y aprueba un programa global conocido como Agenda 21, con el fin de normar el proceso de desarrollo en base los principios de sustentabilidad, orientado hacia una escala local. El informe define el término como "... satisfacer las

necesidades de la presente generación sin comprometer la habilidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades..."

Por otra parte, el concepto de planificación juega un rol importante en el desarrollo sustentable de las ciudades. Se entiende la planificación como un proceso deliberado y continuo, con objetivos propuestos donde la comunidad puede participar, el cual se desarrolla en el tiempo por medio de acciones controladas y apuntaladas por la asignación de recursos (administración, humanos, legales y económicos), que pretende organizar el desarrollo territorial para una mejor eficiencia y equidad hacia los habitantes, teniendo presente el medioambiente (Ortúzar, 2010). Fernández (2000) sostiene que la sustentabilidad urbana, es una especie de conciencia acerca de la finitud de los recursos ambientales disponibles para la subsistencia y desarrollo de la sociedad.

La planificación urbana contemporánea está orientada hacia el paradigma de la "sustentabilidad como proceso" (Barton, op.cit). Este nuevo enfoque de planificación integra tres ámbitos: a) la equidad urbana y participación (sustentabilidad social) b) el equilibrio ambiental (sustentabilidad ambiental) c) el desarrollo económico (sustentabilidad económica), con un objetivo en común: la calidad de vida (Bresciani, 2010). En el caso de Chile la implementación de este nuevo paradigma, según Bresciani constaría de cinco dimensiones:

1. Desarrollo Urbano Sustentable (planificación suelo)

- Regulación Desarrollo Urbano Compacto (Limites Urbanos)
- Densidades mayores, para soportar servicios
- Capacidad de adaptabilidad de usos del suelo

2. Acceso a Bienes Públicos (focalización)

- Transporte público de calidad y reducción de congestión/contaminación
- Regeneración de barrios y espacios públicos (inversiones)

3. Reducción de Impacto (condicionamiento)

- Incremento de áreas verdes (Inversiones y regulación)
- Reducción consumo energético (LEED u otros mecanismos)
- Baja Huella Ecológica y recuperación de suelo agrícolas (regulación)

4. Desarrollo Social (derecho a la ciudad)

- Mecanismos de integración social (Regulación)
- Descentralización local y participación ciudadana

5. Imagen Urbana (diseño urbano)

- Planificación con diseño urbano (Normas)

En cuanto a las debilidades:

1. **Inexistencia de Planificación Integrada:** planificación es sectorial (Usos del Suelo, Transporte, Medio Ambiente, Desarrollo Económico, etc.), centralizada y sin evaluación de indicadores.
2. **Débiles instrumentos de internalización de impactos:** debilidad legal, metodológica y de cobertura, no modifica comportamientos.
3. **Inexistencia de normas explícitas de construcción sustentable** (ej. LEED): con la sola excepción de normas de aislación térmica y aguas lluvias en urbanización.
4. **Pocas políticas sociales focalizadas en territorios:** mayoría están centradas en personas, lo que dificulta políticas de equidad territorial.
5. **Débil institucionalidad local:** gobernabilidad local es limitada, desprovista de recursos, competencias y participación ciudadana.
6. **Falta de sistema de indicadores:** no existen en el Estado definiciones de indicadores o formas de evaluación de sustentabilidad urbana para políticas y programas urbanos.

Como desafíos plantea la gobernabilidad y los instrumentos. Para la **governabilidad** propone el reforzamiento de la escala local y la participación ciudadana, la creación de gobiernos metropolitanos, la integración de la planificación intercomunal y la creación de sistemas de indicadores de sustentabilidad y evaluación pública. Respecto a los **instrumentos**, la creación de planes urbanos integrados de ordenamiento del suelo, infraestructura y medio ambiente. La planificación condicionada (*Impact-Zoning*), regulación urbana sujeta a obligaciones de mitigación y compensaciones. Por último la regulación sustentable de la construcción, referido a los tipos materiales, consumo de energía, manejo de residuos y aguas, etc.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. MATERIALES.

Se utilizará información extraída de fuentes bibliográficas tales como investigaciones, memorias, manuales, así como también datos e informaciones resultantes del tratamiento digital de imágenes satelitales y geoprocursos empleando información vectorial y raster por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) principalmente a través del programa ArcGis 9.3 y Google Earth pro. Además la manipulación estadística de los datos fue trabajada por medio del programa SPSS 21.

En términos generales este trabajo se sustenta en la información elaborada por el Laboratorio de Medioambiente y Territorio de la Universidad de Chile concerniente al Proyecto Fondecyt N°1130305, que incluye la disponibilidad de información de temperaturas atmosféricas, provenientes de 9 estaciones fijas o dataloggers ubicados en la ciudad de Copiapó. Además se trabaja con la información sistematizada de las Zonas Climáticas Locales (ZCL) en el área de estudio. La información de las ZCL está basada en la clasificación de Stewart & Oke (2009), confeccionada a través de fotointerpretación con imágenes QuickBird del año 2012 a escala 1:10.000.

Para el desarrollo de esta investigación, también se empleó información acerca de la condición sinóptica, en este caso la nubosidad de los meses a estudiar, la cual fue importante al momento de escoger los días a trabajar. Por medio de imágenes satelitales GOES-13 y datos metares (Informe meteorológico corriente para la aviación) se llevó a cabo la filtración de días. Esta información fue otorgada por el Centro Nacional del Medioambiente (CENMA).

Por otra parte, se incorpora información respecto de la velocidad del viento de los meses a estudiar, así como la inclusión de 2 estaciones agroclimáticas que proporcionan datos de temperaturas atmosféricas: una de ellas se ubica en zona rural y la otra al interior del límite urbano de la ciudad. Esta información fue facilitada por la Red de Agroclima FDF-INIA-DMC.

Por último se utiliza una imagen falso color capturada por el satélite Resouceat-1 a través del sensor LISS-III, la cual posee cuatro bandas de la firma espectral (2, 3, 4 y 5) que cubre la región del visible y el infrarrojo cercano, con 23,5 metros de resolución espacial, Este satélite fue puesto en órbita en octubre del 2003 y hace parte del programa de monitoreo de la Agencia Espacial India. Las imágenes del sensor LISS-III son capturadas para un mismo punto de la tierra cada 24 días. La imagen que se utilizó fue captada el 28 agosto 2012. para fines de representación cartográfica y dispuesta gratuitamente por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE), Brasil.

3.2. MÉTODOS.

3.2.1. Análisis de distribución de las temperaturas atmosféricas e intensidad de ICU e IFU.

El comportamiento de la temperatura atmosférica durante el año 2012, se analiza considerando 11 estaciones fijas, de las cuales 9 pertenecen al proyecto FONDECYT 1130305 y 2 a la RED AGROCLIMA (figura 6).

Cabe señalar que el tipo de temperatura que se desea analizar corresponde a la capa de dosel urbano (CDU) que es la más cercana a la superficie de la ciudad y que se extiende hacia arriba aproximadamente hasta la altura media de las edificaciones (Voogt, 2008).

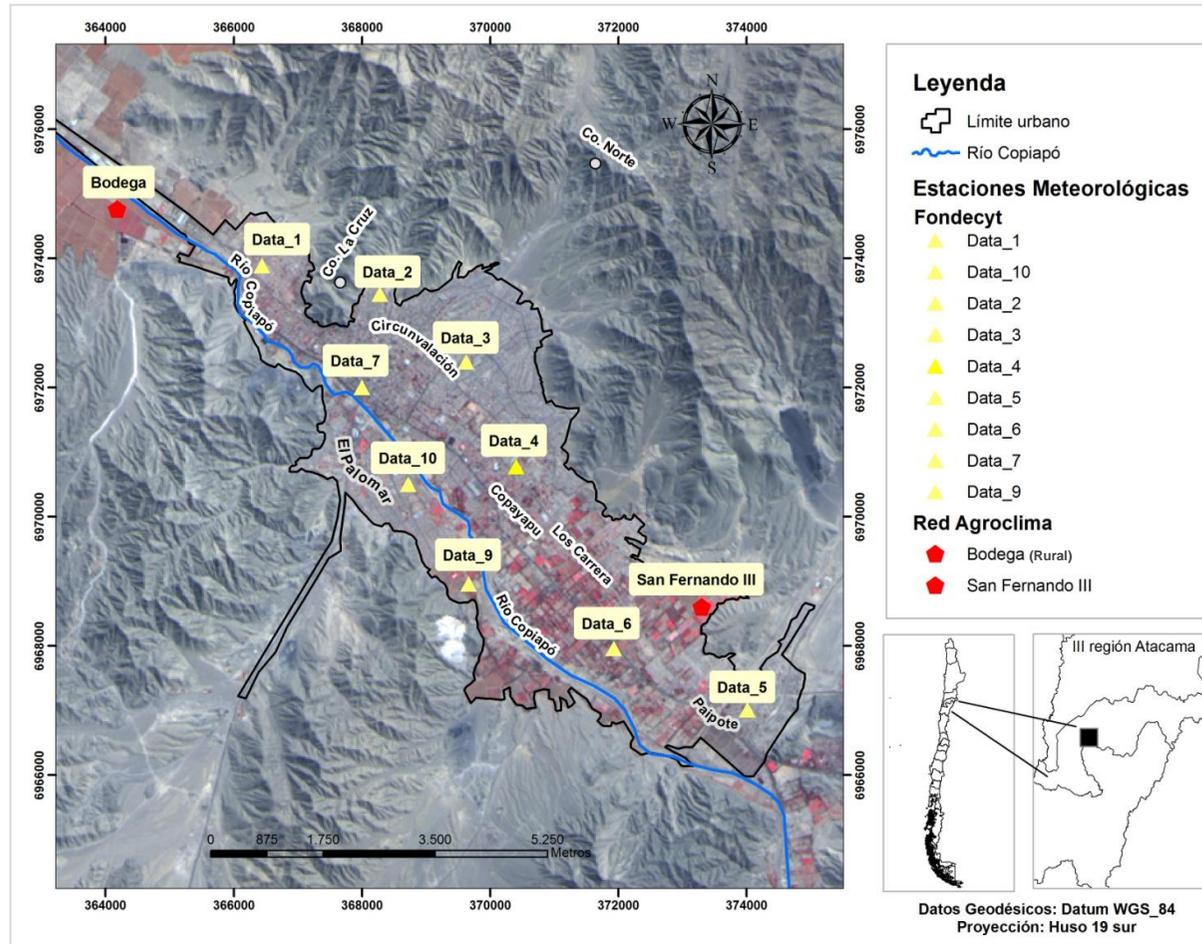
A partir del análisis anterior, se escogieron los meses de Enero y Julio (mes más cálido y más frío respectivamente). Ya con los meses de estudios determinados se procedió a la elección de los días a analizar, para lo cual se consideraron los siguientes criterios:

A. Velocidad del Viento: Según Romero *et al.*, 2011 el estudio de las islas de calor en las ciudades, es propicio realizarlo en condiciones de calma, permitiendo velocidades de hasta 2 m/seg. Por medio de los datos facilitados por Red AGROCLIMA se obtuvo la velocidad del viento por hora en la ciudad de Copiapó.

B. Condiciones sinópticas: Oke en 1996 expone que en situaciones de cielos despejados es cuando las diferencias entre las temperaturas del interior de la ciudad y las de la periferia no urbanizada llegan a ser mayores. La información sobre la nubosidad de los días de enero y julio (figura 7) se obtuvo de imágenes satelitales del sensor GOES 13 en su banda infrarroja, completada con los datos Metares de la Dirección Meteorológica de Chile, información entregada por el Centro Nacional del Medioambiente (CENMA).

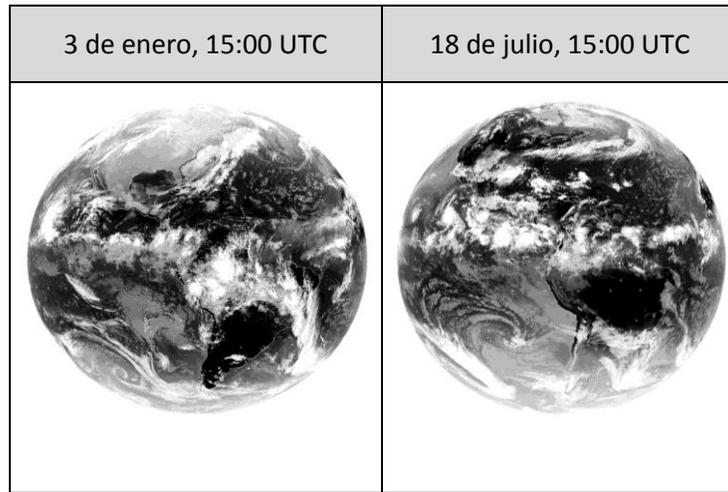
Los días que presentaron tales condiciones (Velocidad del viento menor a 2 m/seg y cielos despejados) correspondieron al 3 de enero para el periodo estival y 18 de julio para el periodo invernal, tal como se ve en la tabla 1 y 2. En cuanto al análisis diario del comportamiento térmico se consideraron los registros de las 9 am, 16 pm y 22 pm (Molina, 2007).

Figura N° 6. Localización de las estaciones fijas en la Ciudad de Copiapó.



Fuente:elaboración propia.

Figura N° 7. Condición de nubosidad a través del sensor GOES 13.



Fuente: elaboración propia

Tabla N° 1. Elección del día para Enero. Promedio diario de la velocidad del viento y condición sinóptica.

Día	Nº día	Velocidad viento promedio	Condición Sinóptica (*)
Martes	3	0,9	Despejado
Miércoles	4	1,1	Cubierto
Jueves	5	1,1	Cubierto
Martes	10	1,0	Parcialmente despejado
Miércoles	11	1,0	Nublado
Jueves	12	0,9	Parcialmente despejado
Martes	17	1,0	Parcialmente despejado
Miércoles	18	1,0	Parcialmente despejado
Jueves	19	1,0	Parcialmente despejado
Martes	24	1,0	Parcialmente despejado
Miércoles	25	0,9	Parcialmente despejado
Jueves	26	1,0	Parcialmente despejado

(*) datos Metares.

Fuente: elaboración propia, en base a datos de Red AGROCLIMA Y CENMA.

Tabla N° 2. Elección del día para Julio. Promedio diario de la velocidad del viento y condición sinóptica.

Día	Nº día	Velocidad viento promedio	Condiciones Sinópticas (*)
Miércoles	4	0,9	Nublado
Jueves	5	1,2	Parcialmente despejado
Martes	17	1,2	Despejado
Miércoles	18	1,3	Despejado
Jueves	19	1,0	Despejado
Martes	24	1,1	Despejado
Miércoles	25	1,2	Despejado

(*) datos Metares.

Fuente: elaboración propia, en base a datos de Red AGROCLIMA Y CENMA.

Para conocer la distribución espacial de las temperaturas atmosféricas en los días seleccionados se aplicó una interpolación entre los datos registrados a las horas seleccionadas en los puntos de mediciones a través del método Kriging Ordinario con 30 metros por pixel. El método consiste esencialmente en estimar un valor desconocido de la variable en estudio como una combinación lineal de n valores conocidos (registros de campo), dando lugar a un sistema de ecuaciones con una solución única. Si la matriz de covarianzas es definida como positiva, debe cumplirse el hecho que la función de variabilidad espacial sea apropiada y no haya datos repetidos o que generen redundancia en el sistema.

La Técnica de Kriging Ordinario tiene la propiedad de exactitud, es decir, la superficie obtenida retiene los datos de partida, evalúa la variabilidad espacial regionalizada, realiza una interpolación óptima de la variable en estudio y una estimación de la dependencia de los interpoladores. El término “Interpolaciones óptimas” se refiere a una interpolación insesgada, no tiene prejuicios y provee la mínima varianza del error en los estimativos. (Mejía *et al.*, 1999)

Además se generó un buffer de 1350 metros a partir de las distancia media de las estaciones fijas, con el fin de delimitar un área de influencia, donde la interpolación sea aún más certera.

Finalmente se definen e identifican las intensidades de las Islas de Calor y Frescor Urbano en la ciudad de Copiapó. Para realizar este análisis es necesario identificar primero, la estación rural, que en este caso corresponde a la estación fija Bodega, localizada en las afueras del límite urbano (figura 6), mientras que las estaciones restantes se distribuyen dentro del límite urbano de la ciudad. Con posterioridad se calcula la diferencia de temperaturas atmosféricas entre la estación rural Bodega con las

restantes estaciones urbanas ($\Delta T = T_u - T_r$), con el fin de obtener la intensidad de la isla de calor y frescor urbano. De acuerdo a Alonso *et al.*, 2004, la intensidad de la ICU e IFU puede ser clasificada de la siguiente manera:

- Alta intensidad si la diferencia entre la temperatura urbana y rural es mayor a 4°C.
- Moderada si la diferencia entre la temperatura urbana y rural está entre 2°C a 4°C.
- Débil si la diferencia entre la temperatura urbana y rural es menor a 2°C.
- Islas de frescor urbano si la diferencia entre la temperatura urbana y rural es menor a 0°C.

3.2.2. La relación de las Zonas Climáticas Locales y la Temperatura Atmosférica.

Zonas climáticas locales

El modelo de zonas climáticas locales de Stewart & Oke (2009) clasifica los diferentes tipos de climas de áreas construidas. Cada categoría describe y estima la magnitud de las islas de calor urbano y da cuenta de la relación existente entre las variables asociadas al diseño urbano y la variabilidad de las temperaturas atmosféricas a escala del dosel urbano.

Se consideró la tipología propuesta en el modelo de Stewart & Oke, aplicándola a una escala de trabajo 1:10.000, definida por Oke (2004). Luego se fotointerpretaron las tipologías por medio de imágenes QuickBird del año 2012 proporcionadas por el software Google Earth. Con estas imágenes se construyó un mosaico que cubrió la totalidad de la ciudad y que fue procesado con el programa Google Earth pro, el cual en su extensión Stichmaps realiza estas tareas de manera automática. Posteriormente se precisó la georreferenciación, cuya información fue trabajada en el sistema de proyección UTM, datum WGS84 huso 19S. En el anexo N°1, es posible observar una breve descripción y ejemplo gráfico, de las características asignadas a cada una de las ZCL, que orientaron la fotointerpretación de las mismas.

Diferencias y similitud estadísticamente significativa de temperaturas atmosféricas.

En esta etapa se utiliza como base los resultados de las interpolaciones de las temperaturas atmosféricas y las tipologías de las zonas climáticas locales. En un trabajo de dos etapas, en la primera se procesó la información por medio del Sistema de Información Geográfica y en la segunda, se realizó el análisis estadístico a través del Programa SPSS 21.

Procesamiento con Sistema de Información Geográfica

Primero, a través del programa ArcGIS 9.3 se creó un polígono vectorial que abarca toda el área de estudio, para generar una red de puntos cada 30 metros con la herramienta Create Fishnet del comando Data Management Tools. Las unidades de análisis espacial

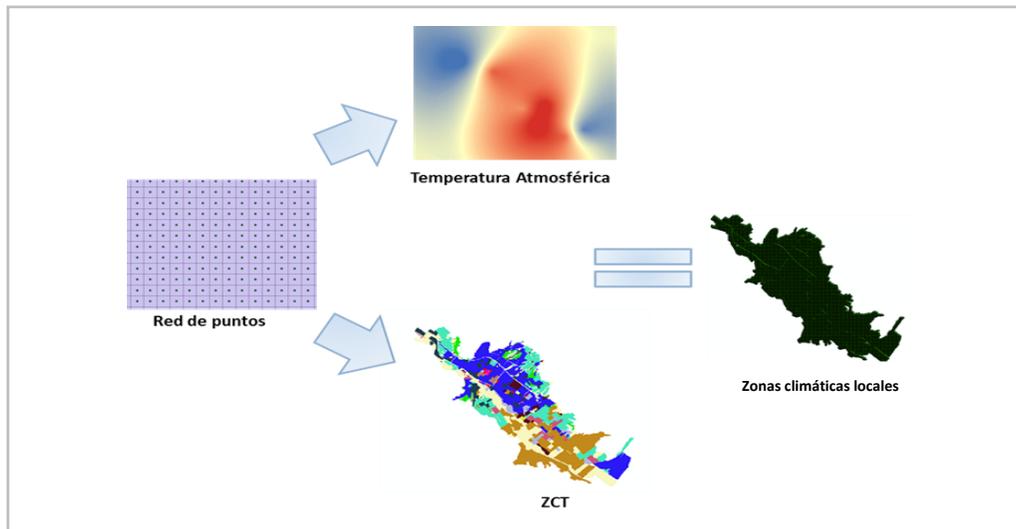
corresponden al formato raster asignado a las Temperaturas Atmosféricas que se aplica además a las Zonas Climáticas Locales mediante la herramienta Convert polygon to raster.

Posteriormente se ejecuta la extracción de la información (Temperatura del aire y ZCL) a través de la herramienta Extract Values to Points del comando Spatial Analyst Tools, con el fin de que ambas variables en los dos días y horas escogidos queden contenidas en la tabla de atributos (figura 8)

Análisis estadístico

En este ítem se analizan y comparan las temperaturas atmosféricas distribuidas en las zonas climáticas locales por medio de métodos estadísticos aplicados por el programa SPSS 21. Se trabaja con la tabla de atributos arrojada por el proceso anterior. El primero es el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov, el cual actúa bajo la hipótesis nula (H_0), plantea que las mediciones tienen una distribución normal o Gaussiana, con un nivel de confianza del 99% y de significancia de un 0,01. Si el nivel de significancia (P) es menor al 0,01 la premisa o hipótesis nula no se rechaza, y si el valor P es menor o igual 0,01 la hipótesis nula se rechaza dando paso a la hipótesis alternativa (H_a), la cual se traduciría en que los datos no tienen una distribución normal (Zar, 1999 en Vásquez, 2008).

Figura N° 8. Procesamiento de los datos en ArcGIS 9.3.



Fuente: elaboración propia

Cuando los datos presentan una condición no normal, se les aplica el test no-paramétrico de Kruskal-Wallis, que permite comparar tres o más grupos independientes y determinar que la diferencia sea estadísticamente significativa (Berlanga y Rubio, 2011).

El test actúa bajo la premisa:

- Hipótesis nula (H_0): Los datos no presentan diferencias estadísticamente significativas.
- Hipótesis alternativa (H_a): Los datos son diferentes.

Con un nivel de confianza del 99% y de significancia de un 0,01 la hipótesis nula no se rechaza. Si el valor P es menor o igual 0,01 la hipótesis nula se rechaza dando paso a la hipótesis alternativa (H_a).

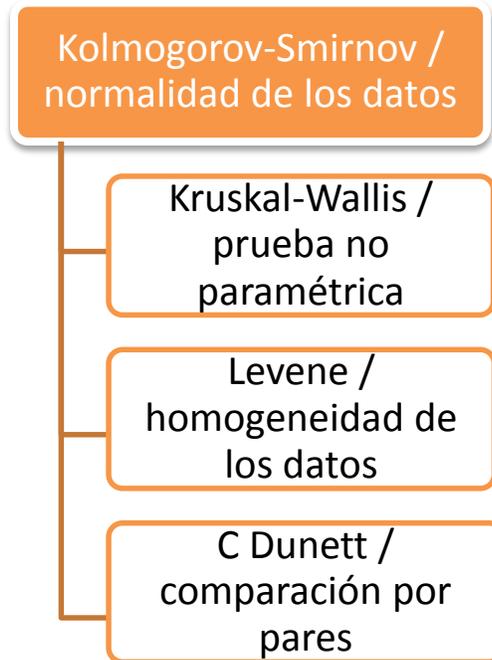
Posteriormente se aplicó el test de ANOVA, para relacionar una variable dependiente cuantitativa respecto a varias variables independientes cualitativas denominadas factores. En este caso la primera de ellas corresponde a la temperatura atmosférica, mientras que los factores son resumidos en las zonas climáticas locales (Smith, 2011).

Dentro del test de ANOVA se utilizaron dos métodos estadísticos, el primero es el test de Levene, el cual realiza una comparación de medias para estimar la homogeneidad de las varianzas. El resultado tiene un nivel de confianza del 95% y con una significación estadística o valor "p" de 0,05. Si el valor "p" es menor a 0,05 quiere decir que los datos no son homogéneos.

El segundo método es el post-test C Dunnett, que supone que los datos tienen una distribución anormal y que se caracterizan por ser diferentes. Lo que se necesita saber es entre cuáles zonas climáticas locales existe diferencia o similitud en la varianza de las temperaturas atmosféricas. El post-test realiza la comparación por pares, arrojando como resultado intervalos o rangos.

Existen dos alternativas de resultado: si entre el límite inferior y superior existe el valor 0, no se puede asumir que exista diferencia entre los grupos, en este caso zonas climáticas. Por el contrario, en aquellos casos donde no se cruce dicho valor, se puede establecer que existen diferencias significativas respecto del promedio y varianza de los datos de temperatura atmosférica (Smith, 2011). En la figura N°9 se observa el procedimiento de las pruebas no paramétricas.

Figura N° 9. Pruebas no paramétricas aplicadas a las temperaturas atmosféricas y zonas climáticas locales.



Fuente: elaboración propia

3.2.3. La relación intensidad de islas de calor y frescor urbano y las zonas climáticas locales.

Como primer paso, se utilizaron las estaciones fijas que contienen la información de las categorías de las zonas climáticas locales y de la intensidad de la isla de calor y frescor en tres momentos del día (9, 16 y 22 horas) y los dos periodos de estudio (3 de enero y 18 de julio). A continuación se seleccionaron las zonas climáticas locales que mejor se ajustan a lo postulado por Stewart y Oke (2009) en cuanto a las características morfológicas del cañón urbano. Posteriormente, los datos fueron trabajados en el programa Excel, donde se realizaron los gráficos con la distribución de las intensidades tanto de la isla de calor urbano como de frescor por zona climática local.

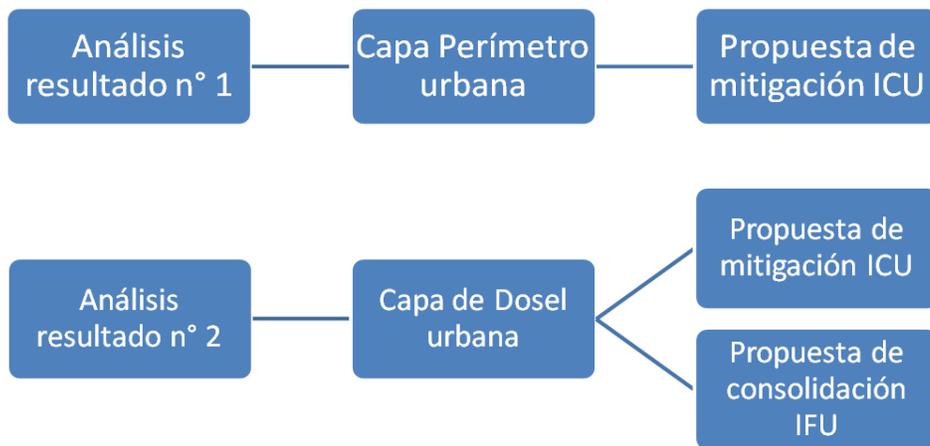
3.2.4. Proposición de lineamientos para medidas de mitigación de las islas de calor y la consolidación de las islas de frío.

Esta sección comprendió la identificación espacial de las ICUs e IFUs y el análisis de la relación entre estas formas y las zonas climáticas locales, con la finalidad de considerarlas respecto a los estudios de casos de medidas de mitigación de islas de calor y consolidación de islas de frescor en zonas áridas sobre la base de fuentes bibliográficas (Dankhe, 1986 en Sampieri *et al.*, 2006 (figura 10).

El análisis de este resultado se desarrolla en base a dos escalas definidas por Oke (1985) la Capa de Perímetro y Capa de Dosel Urbana. La primera se divide en dos partes, una de ellas aborda las posibles áreas de expansión urbana en la ciudad de Copiapó, tomando en cuenta sus características topoclimáticas (dirección del viento, altitud, cobertura vegetal y temperatura), a partir de lo cual se proponen medidas que tienen que ver con la construcción de nuevas áreas y por lo tanto, con la orientación y disposición de las edificaciones, además de la implementación de diseños eco-urbanos. La otra, se refiere a la eventual intervención de los usos de suelo urbano, que se relacionan con la mitigación de las ICU, principalmente sustituyendo los suelos asfaltados por espacios públicos verdes.

La capa de dosel urbana incluye las zonas climáticas locales que se asocian al registro del fenómeno islas de calor y frescor urbano, por lo que las propuestas de mitigación de islas de calor y consolidación de la isla de frescor, apuntan hacia las transformaciones de los cañones urbanos, desde el punto de vista de las medidas de enfriamiento pasivo y diseños bioclimáticos.

Figura N° 10. Pasos para formular lineamientos de mitigación de ICU y consolidación de IFU.



Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA URBANO DE LA CIUDAD DE COPIAPÓ

4.1.2 Análisis de las temperaturas atmosféricas e Intensidad de la ICU de la ciudad de Copiapó.

4.1.2.1. Intensidad de las islas de calor y frescor urbano de verano e invierno.

Como se observa en la figuras 11 y 12, las islas de calor y frescor urbano tanto en verano como en invierno poseen formas heterogéneas en las tres horas del día. Se puede apreciar que en verano desde la mañana hasta la noche se manifiesta el fenómeno de isla de calor urbano. A las 9:00 hrs las islas de calor se manifiesta en forma de ameba, registrando una intensidad promedio de 4,3°C (tabla 3).

Por la tarde, también se manifiesta el fenómeno de la isla de calor urbano, pero a diferencia de lo que ocurrió en la mañana su intensidad promedio es mucho menor, alcanzando a 1,5°C. A esta hora del día se registraron además islas de frescor, con una intensidad promedio de -0,6°C. Ambas islas, tanto de calor como de frescor urbano, se presentan en forma de archipiélagos o concéntricas, principalmente en zonas con mayor cobertura vegetal. Finalmente, por la noche es posible observar únicamente islas de calor urbano, con una intensidad promedio de 3,5°C.

Al contrario, en invierno se puede observar que las islas de frescor urbano predominan en la ciudad tanto en la mañana como en la tarde. Por la mañana, se presentan en forma de ameba y las más frías se desplazan por las zonas de alta densidad urbana (ladera norte). Como se muestra en la tabla 4 la isla de frío registra una intensidad promedio de alrededor de -2°C. No obstante, en las áreas agrícolas del sector nor-este se observa un archipiélago de calor de intensidad promedio de 0,9°C, en todo caso muy por debajo de lo que se registra en verano.

A las 16:00 hrs la isla de frescor urbano se mantiene, pero su forma cambia completamente, mostrándose más aplanada hacia las laderas norte y sur, disminuyendo su intensidad promedio (-1°C) respecto a la mañana pero siendo mayor que los valores registrados en verano. Por otro lado, las islas de calor presentan una intensidad promedio de 0,8°C, también muy por debajo de lo que se observó en verano.

Por último a las 22:00 hrs existe un comportamiento similar a lo que ocurrió en verano, ya que únicamente se manifiestan islas de calor, sumado a ello el aumento de la intensidad promedio (3,8°C) en comparación a verano.

Tabla N° 3. Intensidad promedio de las islas de calor y frescor urbano.

Verano	Intensidad promedio	Intensidad promedio
Hora	Isla de calor urbano	Isla de frescor urbano
09:00	4,3°C	-
16:00	1,5°C	-0,6°C
22:00	3,5°C	-

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 4. Intensidad promedio de las islas de calor y frescor urbano.

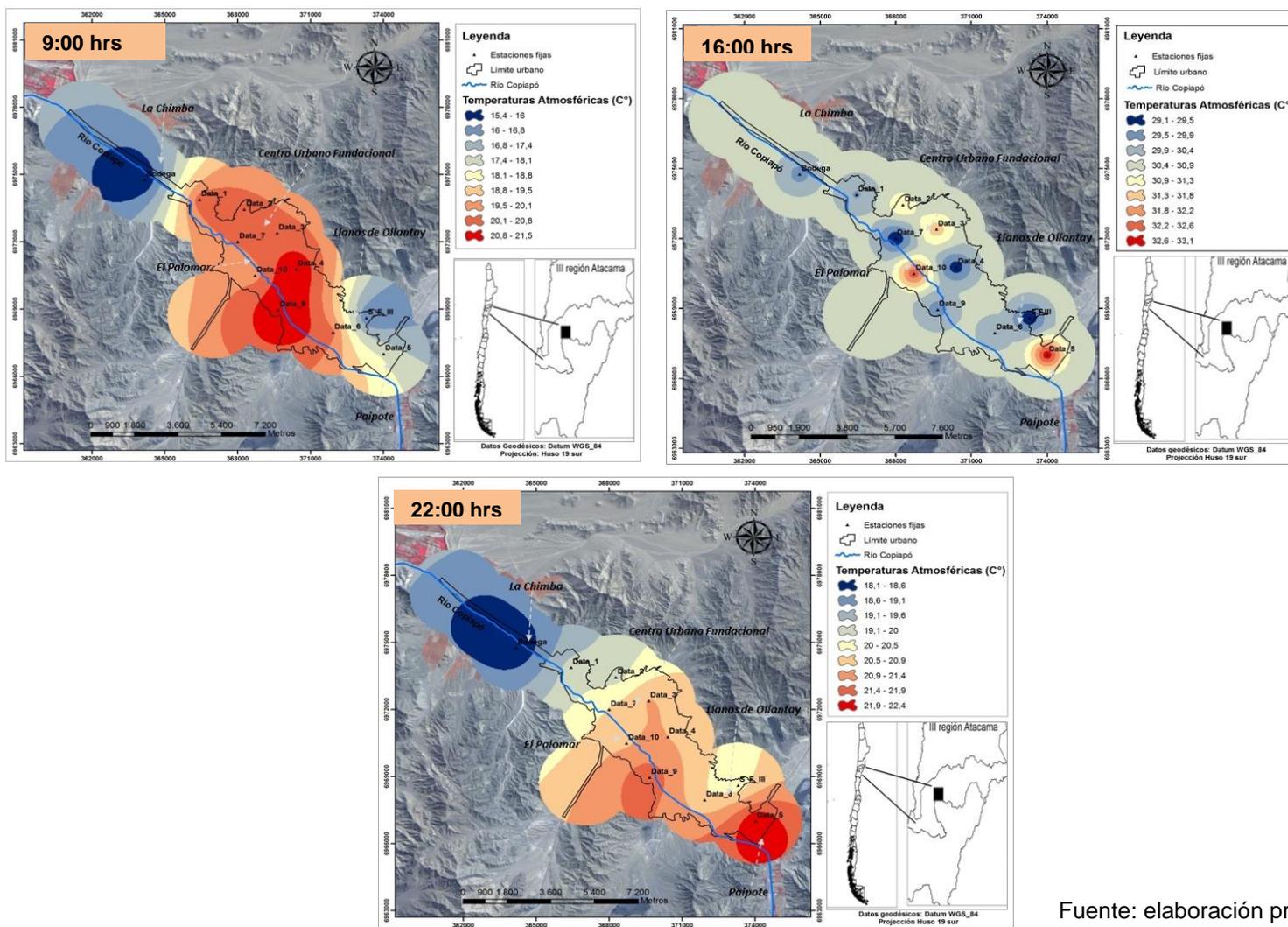
Invierno	Intensidad promedio	Intensidad promedio
Hora	Isla de calor urbano	Isla de frescor urbano
09:00	0,9°C	-2°C
16:00	0,8°C	-1°C
22:00	3,8°C	-

Fuente: elaboración propia

Se puede concluir que la isla de calor urbano se manifiesta tanto en época estival como invernal, pero su intensidad varía. En verano la ICU es más intensa en horas de la mañana. Al contrario en época invernal la ICU presenta mayor intensidad durante la noche.

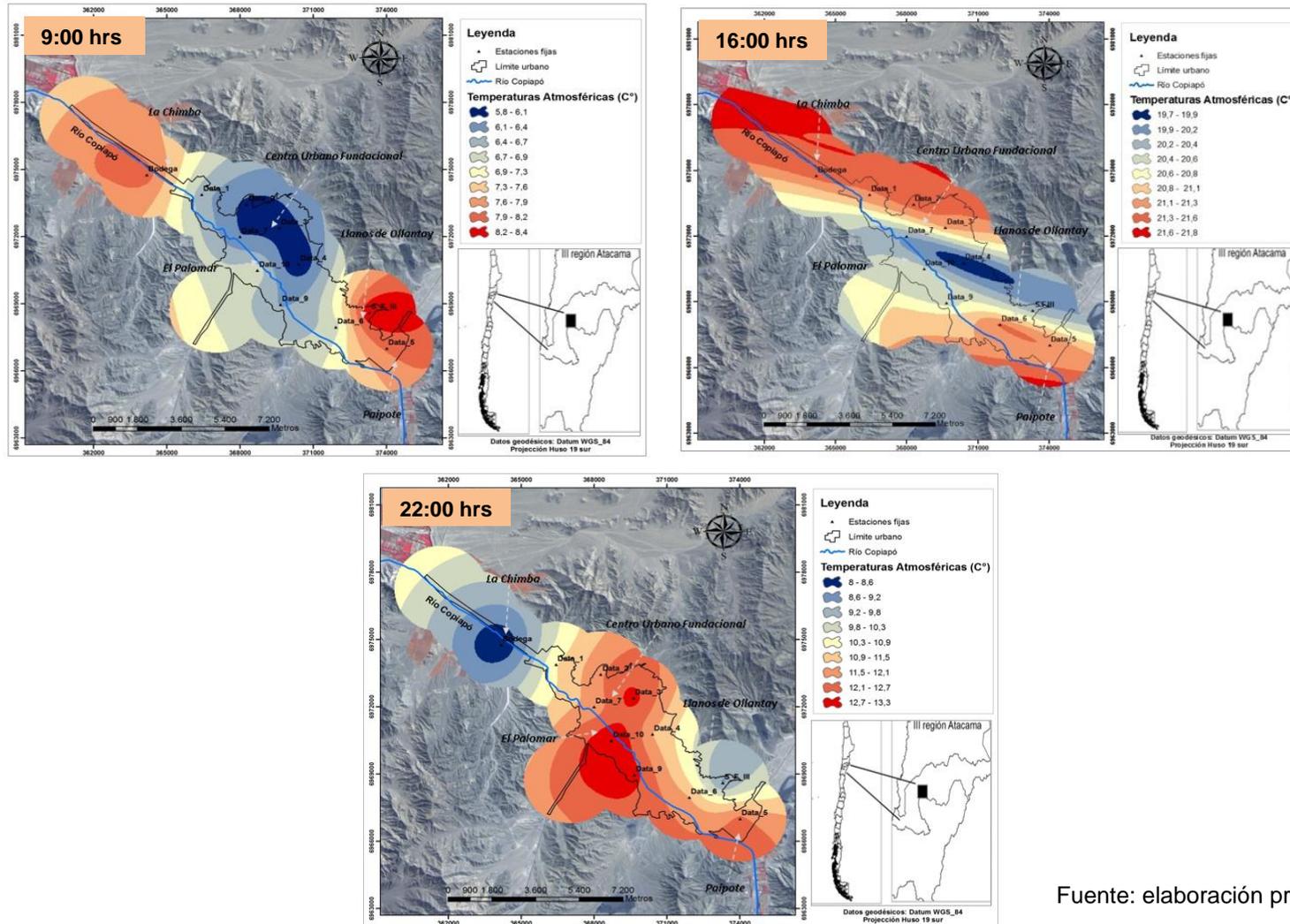
La ciudad de Copiapó presenta un comportamiento propio de las ciudades áridas o también denominadas como "oasis" debido al registro de islas de frío principalmente durante la tarde en ambas estaciones estudiadas.

Figura N° 11. Temperaturas atmosféricas de la ciudad de Copiapó el día 3 de enero.



Fuente: elaboración propia

Figura N° 12. Temperaturas atmosféricas de la ciudad de Copiapó el día 18 de julio



Fuente: elaboración propia

4.1.2.2. Temperatura del aire e Intensidad de ICU a las 9:00 horas en verano e invierno.

En verano se puede observar (figura 13.a) que las temperaturas más cálidas (19,5 - 21,5°C) registradas a las 9 de la mañana se despliegan por casi toda la ciudad, desde la zona más ancha del límite urbano (noroeste) hasta Paipote (este) y Llanos de Ollantay (noreste). Las temperaturas disminuyen hacia los sectores periféricos, como por ejemplo La Chimba, Llanos de Ollantay y Paipote, además del área rural Bodega, donde se observan temperaturas que fluctúan entre los 15,4°C a los 17,4°C.

Cabe señalar que las áreas más cálidas, se relacionan directamente con el uso de suelo, en este caso vivienda y equipamiento mixto (anexo 2). También el área agrícola ubicada al sur del sector El Palomar registró un peak de temperatura de 21,5°C, lo que concuerda con los valores matinales más altos asignados a las áreas vegetadas por la literatura (molina, 2007)

Por otro lado, contrariamente también se observó que zonas de mayor cobertura de vegetación ubicadas cerca de Llanos de Ollantay, la Chimba y el área rural Bodega, que se caracterizan por ser áreas de cultivo, registraron las menores temperaturas, convirtiéndose en zonas frías. Esta situación se explica debido a su ubicación geográfica y mayor influencia de la circulación de los vientos noreste y noroeste respectivamente. Finalmente a las 9:00 hrs la variabilidad térmica del aire registrada es de alrededor de 6,1°C al interior del área urbana, lo que se considera como relativamente homogénea.

Por otra parte, el comportamiento de las temperaturas atmosféricas en invierno a las 9.00 hrs. es muy distinto a la época estival. Al observar la figura 13.b, las bajas temperaturas a esta hora del día se ubican en el centro o casco antiguo de la ciudad con temperaturas de 5,8 °C a 6,7°C, lo que completamente diferente al verano, cuando el mismo sector registraba las más altas temperaturas. Esta diferencia térmica se debería al rol jugado por los pavimentos y paredes de concreto en el almacenamiento del calor estacional.

Es posible destacar que las áreas urbanas y rurales ubicadas en la ciudad registran las más altas temperaturas (7,6°C a 8,4°C) en invierno, en comparación al análisis realizado en época estival donde estas mismas zonas presentaban un comportamiento térmico mucho menor.

También es posible estimar que al igual que en verano, en invierno se registra una marcada influencia del río Copiapó, jugando un efecto enfriador en gran parte de la ciudad, al actuar como corredor de viento. La variabilidad térmica del aire en esta estación del año es de alrededor de 2,6°C, muy por debajo de lo que observa en verano. Es posible observar que es en este momento del día cuando existe una clara diferencia de temperaturas entre la ciudad y las áreas periféricas y rurales en las dos estaciones.

En cuanto al análisis de la intensidad de las islas de calor y frescor urbano, se pudo observar que en verano gran parte de la ciudad se comporta como una gran isla de calor

urbano, es decir, que la diferencia entre la temperatura del aire del área urbana y la rural es significativamente positiva. Además es posible observar la variabilidad espacial de los distintos niveles de intensidad de la isla de calor urbano, como se muestra en la figura 14, donde la intensidad más baja y categorizada como débil ($0,2^{\circ}\text{C}$) se registra en el área agrícola donde se ubica la estación San Fernando III. Las áreas de vivienda y equipamiento mixto, puntualmente ubicadas en el límite urbano noroeste y noreste, presentan intensidades moderadas que van entre los $2,9^{\circ}\text{C}$ y $3,7^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Por último se aprecia una isla de calor de alta intensidad, representada por áreas de baja y alta densidad de construcciones (pero que poseen cobertura vegetal a su alrededor) y áreas agrícolas. En estas últimas se registró el valor más alto, alcanzando a alrededor de $6,1^{\circ}\text{C}$.

En general la isla de calor urbano para esta hora del día se muestra en forma de ameba y de archipiélago cubriendo gran parte de la ciudad de Copiapó.

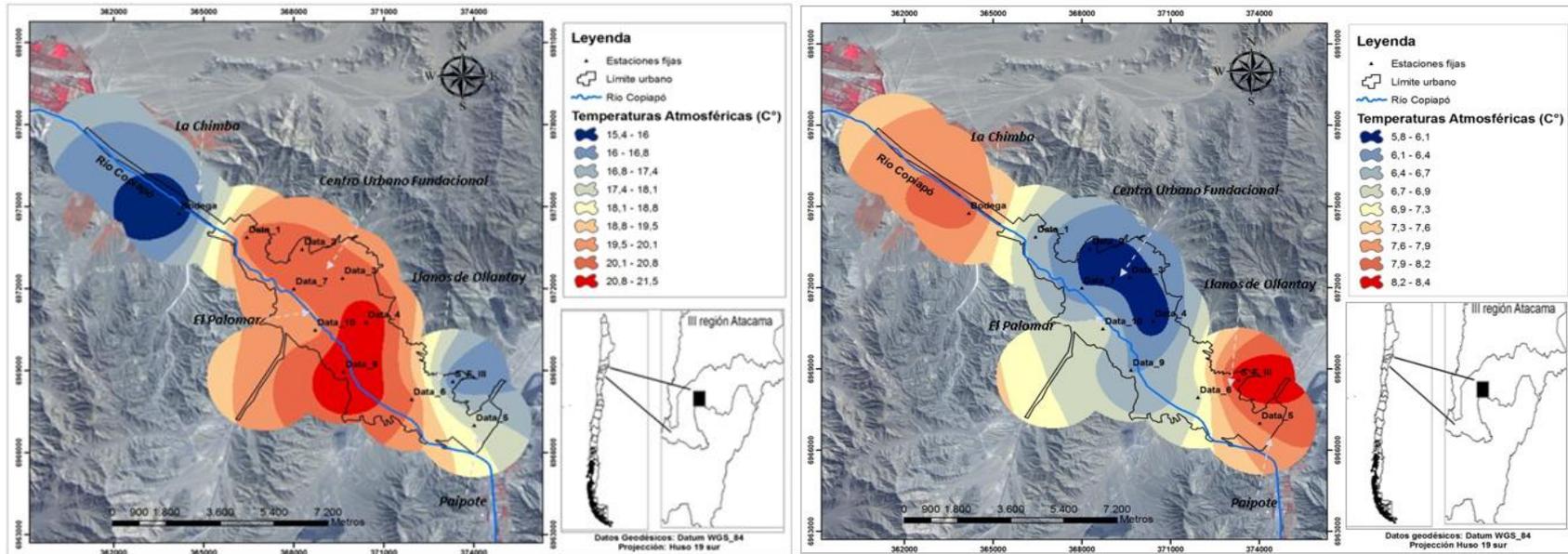
Al contrario, en invierno los rasgos más prominentes del clima ya no son las islas de calor sino que las islas de frescor urbano, es decir, registrándose diferencias negativas entre las temperaturas atmosféricas del área urbana y la rural. La isla de frescor toma forma de ameba o islote extendiéndose en gran parte de la ciudad, alcanzando su más baja intensidad con alrededor de $-3,2^{\circ}\text{C}$ sobre el casco urbano antiguo de la ciudad (figura 15). La isla de frescor urbano presenta una intensidad promedio de -2°C .

Aunque, la isla de frescor urbano es predominante espacialmente, también se manifiesta una isla concéntrica de calor en la zona periurbana de Llanos de Ollantay cuya intensidad es baja, llegando solo a $0,9^{\circ}\text{C}$.

Figura N° 13. Islas de calor y frescor a las 9:00 horas.

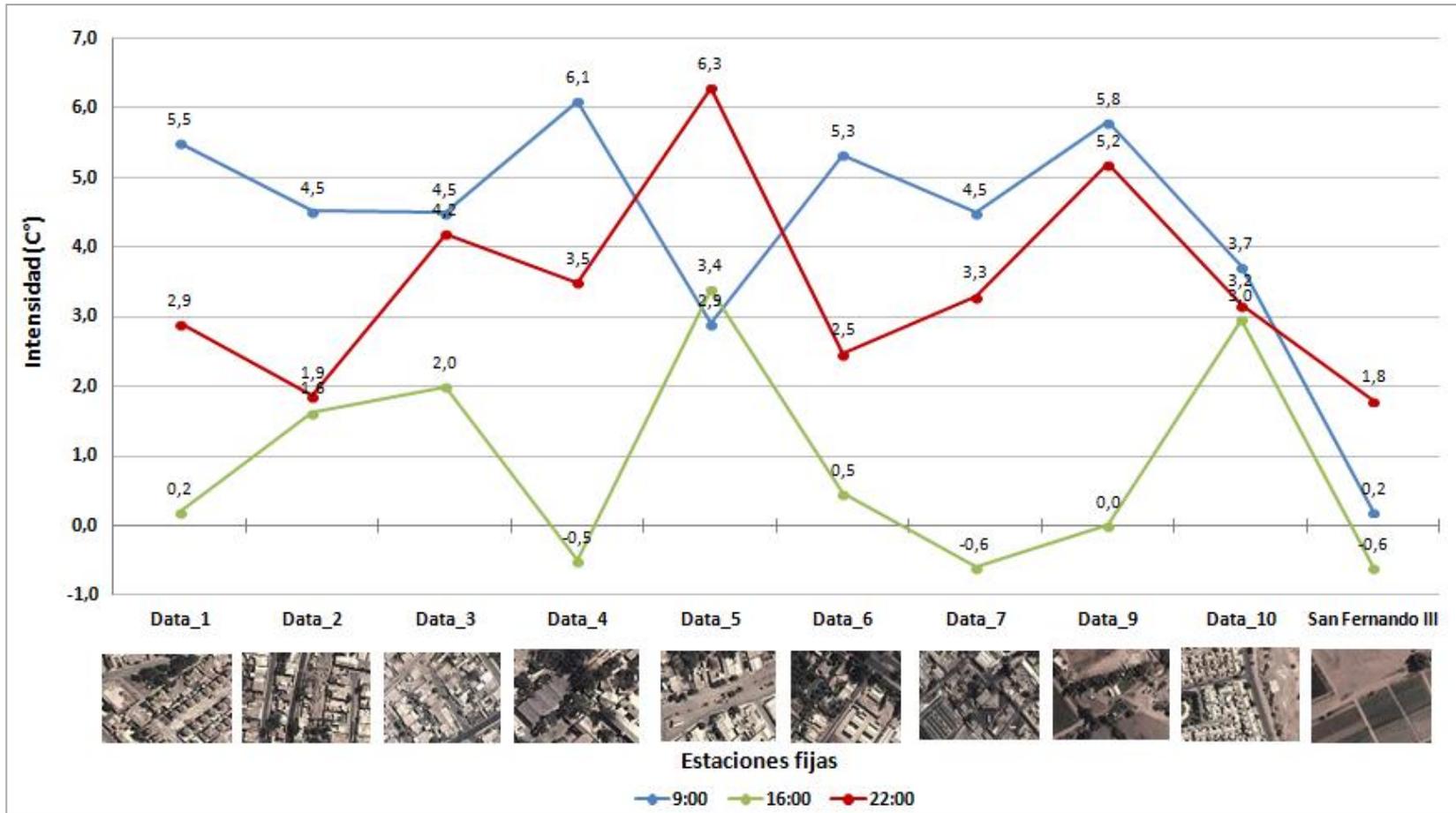
a. 3 de enero.

b. 18 de julio.



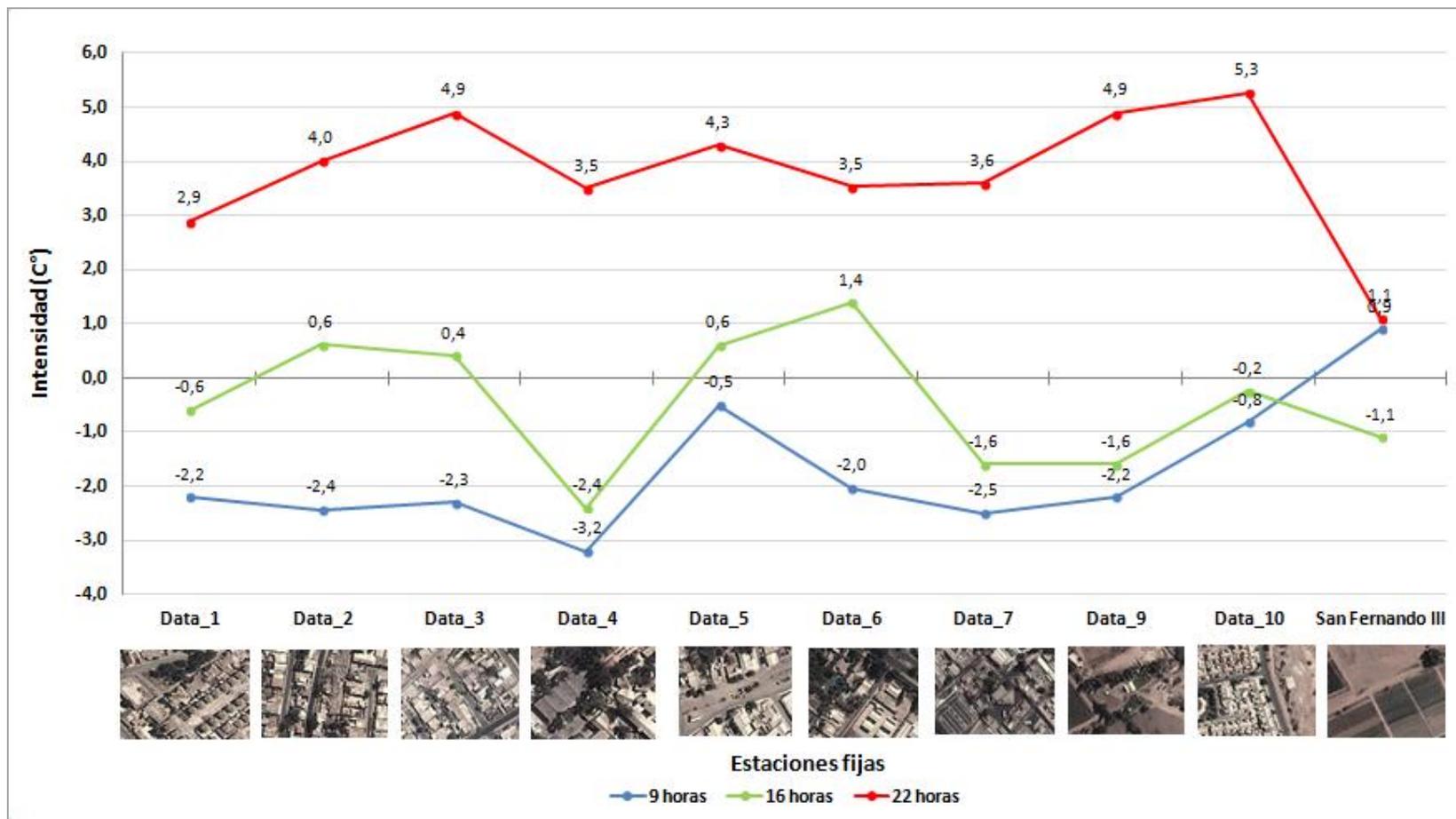
Fuente: elaboración propia

Figura N° 14. Distribución de la intensidad de las islas de calor y frescor urbano en las tres horas del día 3 de enero por puntos de observación.



Fuente: elaboración propia

Figura N° 15. Distribución de la intensidad de las islas de calor y frescor urbano en las tres horas del día 18 de julio por puntos de observación.



Fuente: elaboración propia

4.1.2.3. Temperatura del aire e Intensidad de ICU a las 16:00 horas en verano e invierno.

En verano a esta hora del día la distribución espacial de las temperaturas atmosféricas de la ciudad de Copiapó cambia radicalmente en relación a la mañana, como se observa en la figura 16.a. Los registros fríos comienzan a desaparecer, siendo los valores más bajos temperaturas entre 29,1°C y 30,4°C. Las temperaturas templadas van desde los 30,4°C hasta los 31,8°C, mientras que las temperaturas altas a esta hora fluctúan entre 31,8°C a los 33,1°C.

Es importante señalar que algunas zonas que en horas de la mañana presentaron altas temperaturas, en la tarde se convirtieron en áreas relativamente más frías, debido a que las estaciones de medición se ubican en lugares que poseen áreas verdes ya sean privadas (antepatio y paños de cultivo) como públicas (plazas), como sucedió principalmente en las áreas ubicadas en el límite noroeste de la ciudad, el casco urbano fundacional y Llanos de Ollantay. Al contrario, hubo zonas que continuaron siendo cálidas, en sectores como El Palomar y Paipote, lugares que presentan escasa vegetación en su entorno. También se pudo observar el carácter templado de las áreas ubicadas en el margen noroeste de la ciudad.

Cabe destacar la influencia que ejerce el río Copiapó sobre las temperaturas menores de sus zonas cercanas. Por otra parte, a esta hora del día la variabilidad térmica del aire es de alrededor de 4°C al interior del área urbana. También cabe destacar que para este momento del día la distribución de las temperaturas del aire en la ciudad de Copiapó es heterogénea, ya que se pueden encontrar bajas temperaturas tanto en las zonas rurales como urbanas que poseen cobertura vegetal significativa y altas temperaturas en zonas urbanas desprovistas de vegetación.

Al contrario en invierno las temperaturas son radicalmente menores en relación al comportamiento térmico de verano como se observa en la figura 16.b. Las temperaturas altas fluctúan entre los 21,1°C y 21,8°C, las templadas entre 20,4°C y 21,1°C y las bajas desde 19,7°C hasta 20,4°C.

Las bajas temperaturas se concentran principalmente desde el centro urbano fundacional hasta Llanos de Ollantay. En comparación, durante el verano las áreas frías abarcaban mayor extensión. Además se pudo apreciar que las mayores temperaturas dominan los bordes extremos del límite urbano en lugares como Paipote y la Chimba e incluso el área rural (estación Bodega).

Finalmente a las 9:00 hrs la variabilidad térmica atmosférica registrada fue de alrededor de 2,1°C al interior del área urbana, muy por debajo de lo registrado en verano. Es posible determinar también para este momento del día que la distribución de las temperaturas del aire es relativamente homogénea, ya que se pueden encontrar temperaturas altas tanto en la zona rural como en la urbana. Mientras las áreas naturales se encuentran en un

proceso de pérdida de temperatura, el área construida comienza a elevarlas, llegando a igualar las temperaturas no urbanas.

Desde el punto de vista de la morfología de las islas de calor y frescor cabe señalar que en verano el resultado de la interpolación de las temperaturas del aire arroja que ambas presentan formas concéntricas o pequeños archipiélagos, es decir isotermas nucleares cerradas, conocidas como ojos de buey. A pesar de que en las horas anteriores y en las dos estaciones estudiadas, se pudo observar una distribución más o menos convencional de la ICU e IFU, en esta ocasión las islas toman estas formas, lo que se puede deber a la cantidad de estaciones utilizadas, que serían insuficientes.

Respecto a la intensidad de la isla de calor e islas de frío urbano en el interior de la ciudad, la primera registra intensidades que van entre débil y moderada. La mayor intensidad se registra en el sector de Paipote con $3,4^{\circ}\text{C}$. A esta hora del día la ciudad adopta un comportamiento típico de ciudad-oasis. Las islas de frescor muestran una intensidad promedio de $-0,6^{\circ}\text{C}$, ubicadas en las áreas fundacionales y en el sector de Llanos de Ollantay (figura 14). La mayor cobertura vegetal de estas áreas sería su explicación.

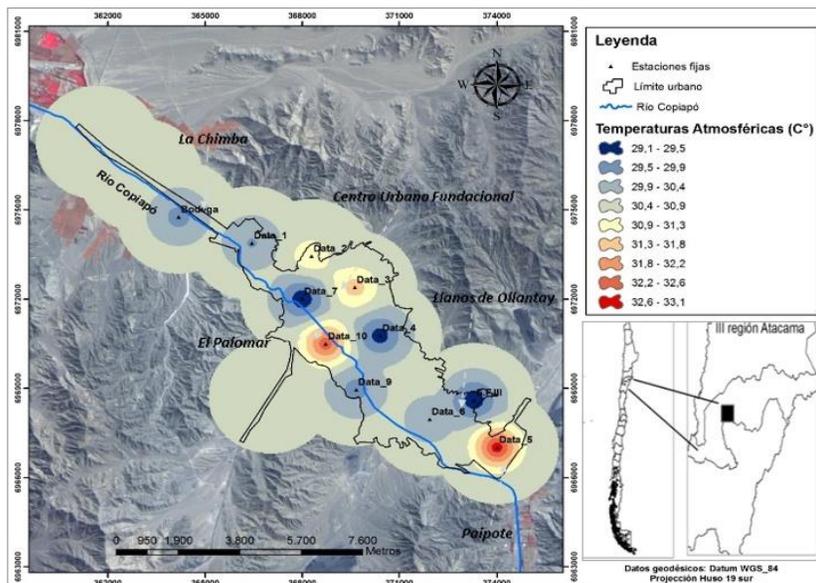
Por otro lado, en invierno también se identificaron islas de frescor urbano registrando una intensidad promedio de $-1,3^{\circ}\text{C}$. Estas islas se ubican en zonas de baja densidad urbana y suelo de explotación agrícola. La más baja intensidad fue de $-2,4^{\circ}\text{C}$ (punto 4 de medición). (Figura 15).

La forma de la isla de frescor urbano es concéntrica y aplanada, orientándose hacia las laderas norte y sur, cubriendo los sectores de Llanos de Ollantay y El Palomar.

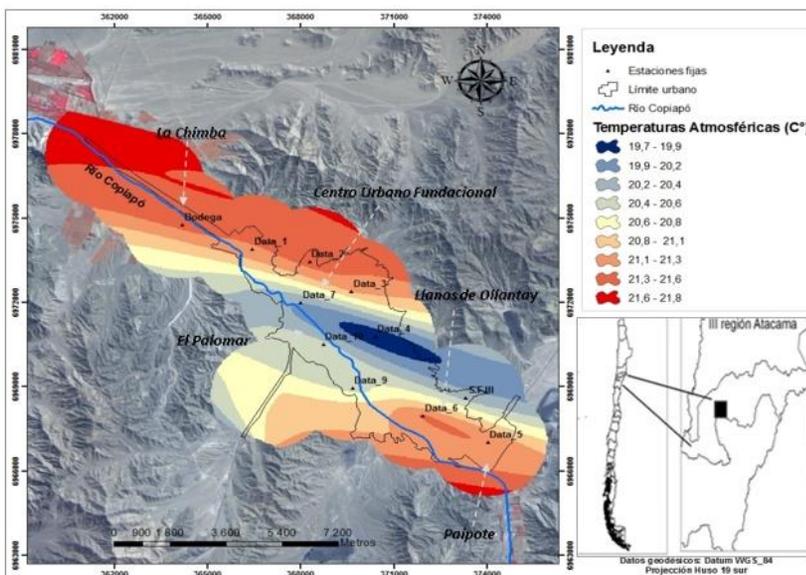
En cuanto a la isla de calor urbano se puede clasificar como débil ya que su intensidad fluctúa entre los $0,4^{\circ}\text{C}$ y los $1,4^{\circ}\text{C}$. Las islas de calor se desplazan desde la periferia hacia el centro de la trama urbana, manifestándose principalmente en los sectores nor-oeste y sur-este de la ciudad.

Figura N° 16. Islas de calor y frescor a las 16:00 horas.

a. 3 de enero



b. 18 de julio



Fuente: elaboración propia

4.1.2.4. Temperatura del aire e Intensidad de ICU a las 22:00 horas en verano e invierno.

En verano a esta hora de la noche las temperaturas descendieron por lo menos 12°C respecto a las temperaturas registradas a las 16 horas. A través de la figura 17.a se aprecia que las temperaturas aumentan hacia el oriente. Los valores más bajos fluctúan entre los 18,1°C y los 19,6°C. Las temperaturas medias varían entre los 19,6°C y 20,9°C, mientras que las altas lo hacen entre los 20°C y los 22,4°C.

Es importante destacar que durante la noche el sector periurbano de la Chimba y el área rural (Bodega) se muestran como zonas frías debido a su abundante vegetación. Además es posible observar que las temperaturas templadas se localizan en el centro fundacional y en los sectores de El Palomar y Llanos de Ollantay. Las temperaturas más elevadas se localizan desde el centro de la ciudad hasta el sector de Paipote.

Se observa la diversa temperatura que registra un mismo uso de suelo localizado en un lugar diferente, como se aprecia comparando las áreas de cultivos de Llanos de Ollantay que registran temperaturas moderadas y aquellos ubicados en el límite sur de la ciudad, que registran altas temperaturas.

La temperatura del aire alcanza una diferencia de 4,3°C al interior del área urbana y es en este momento del día cuando existe una diferencia más marcada entre la ciudad y la zona rural.

Es importante señalar aquí que la trama urbana también condiciona el comportamiento térmico de las áreas vegetadas localizadas al interior de la ciudad, como es el caso de los paños de cultivo de Llanos de Ollantay y cercanos a Paipote, los que registran altas temperaturas debido a su posición geográfica y a los usos del suelo que se encuentran a su alrededor. Las zonas verdes ubicadas fuera de la ciudad alcanzan menores temperaturas.

En el invierno, naturalmente las temperaturas descienden para alcanzar valores como los representados en la figura 17.b. En esta estación del año, las temperaturas altas fluctúan entre los 11,5°C y los 13,3°C; las medias varían entre los 9,8°C y los 11,5°C y las bajas lo hacen desde los 8,0°C a los 9,8°C.

Las bajas temperaturas se localizan principalmente en las zonas periurbanas de la ciudad como la Chimba y el sector de Llanos de Ollantay y en el área rural de Bodega. Es importante señalar que el sector de Llanos de Ollantay en esta estación es una zona fría en comparación a lo que se observó en verano.

La mayor parte de la ciudad presenta temperaturas relativamente elevadas, principalmente en el centro urbano fundacional, El Palomar y Paipote.

Tal como ocurrió en verano, en invierno existen zonas con el mismo tipo de uso de suelo (agrícola) que presentan distinto comportamiento térmico.

También, es importante mencionar que los sectores urbanos consolidados con escasa o abundante vegetación registran altas temperaturas, sin que este factor introduzca diferencias.

Por otro lado, la variabilidad térmica del aire es de alrededor de $5,3^{\circ}\text{C}$ al interior del área urbana, lo que es mayor a lo observado en verano.

Al igual que en verano, la distribución de las temperaturas del aire en la ciudad de Copiapó varía para un mismo uso del suelo, como es el caso de los paños de cultivo en Llanos de Ollantay y en el margen sur de la Ciudad.

Desde el punto de vista de la intensidad y morfología de la isla de calor, se pudo observar que en verano gran parte de la ciudad se comporta como tal, aunque con distintos niveles de intensidad, como se muestra en la figura 14, donde la intensidad más débil ($1,8^{\circ}\text{C}$) se registra en la zona agrícola de Llanos de Ollantay y en el área nor-poniente de la ciudad.

Las áreas de vivienda y equipamiento mixto, puntualmente ubicadas en el límite urbano noroeste, en el centro urbano fundacional y en El Palomar presentan intensidades moderadas que van entre los $2,5^{\circ}\text{C}$ y $3,5^{\circ}\text{C}$.

Por último se aprecian pequeñas islas de calor de alta intensidad, correspondientes a áreas con alta densidad de construcciones y paños de cultivo, que varían entre $4,2^{\circ}\text{C}$ y $6,3^{\circ}\text{C}$.

En la ciudad, la isla de calor adquiere una combinación de formas, pues en el margen sur y sur-este se manifiesta de manera concéntrica, mientras que en el área central lo hace como una ameba.

En invierno se revela la presencia generalizada de islas de calor. Los núcleos de calor presentan diferentes niveles de intensidad tal como lo demuestra la figura 15, donde por ejemplo el área agrícola de Llanos de Ollantay registra la intensidad más baja de la ciudad con un $1,1^{\circ}\text{C}$ formando una pequeña isla concéntrica a su alrededor.

El área del centro urbano fundacional y los sectores localizados en los márgenes norte y nor-poniente registran intensidades moderadas que van desde los $2,9^{\circ}\text{C}$ hasta los $3,6^{\circ}\text{C}$. Estas áreas se caracterizan por poseer áreas verdes en su entorno.

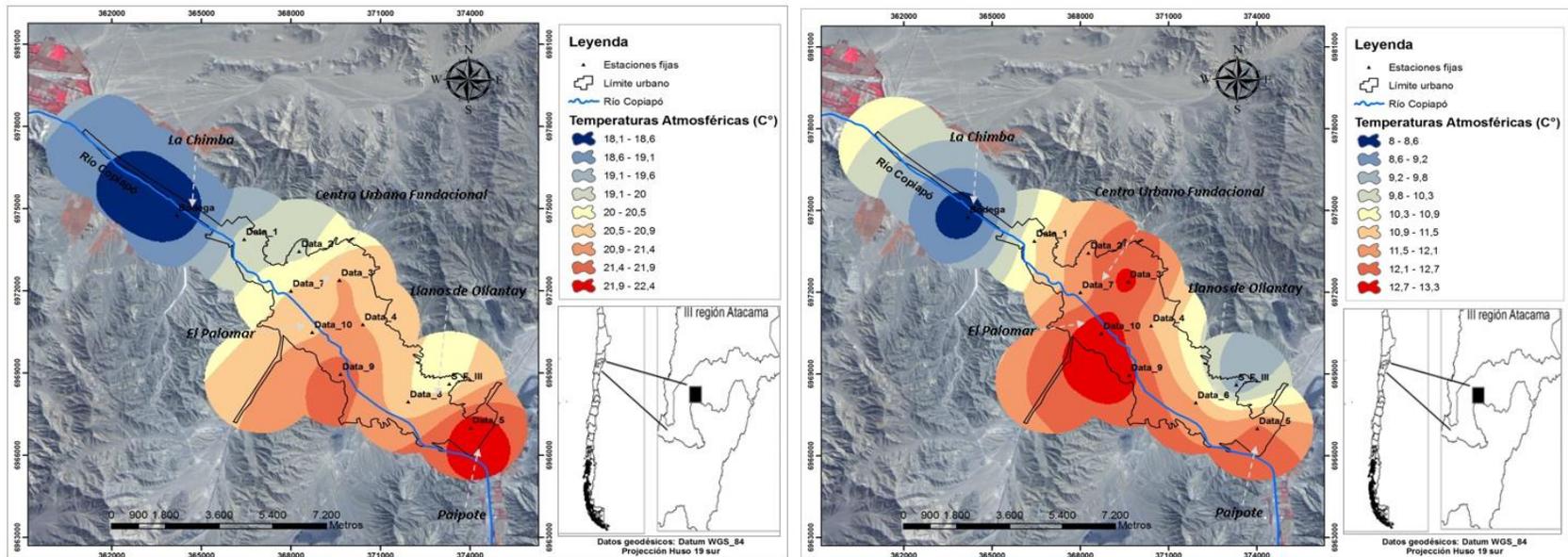
Por último, se aprecian islas de calor urbano de alta intensidad, localizadas hacia la ladera norte, prolongándose hacia El Palomar y Paipote, donde se registran intensidades que varían entre los 4°C y $5,3^{\circ}\text{C}$. El peak de intensidad se observó en El Palomar. Cabe destacar, que la isla de calor urbano se muestra en ciertas áreas como archipiélago de calor y en otras como una isla o ameba.

A esta hora del día y en ambas estaciones es posible establecer que la ciudad de Copiapó se aproxima más al modelo clásico de los climas urbanos mediterráneos. Las islas de calor urbano se concentran en las áreas centrales quedando y se desarrollan luego de la puesta del sol.

Figura N° 17. Islas de calor y frescor urbano a las 22:00 horas.

a. 3 de enero

b. 18 de julio



Fuente: elaboración propia

4.2. RELACIÓN ENTRE LAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES Y LAS TEMPERATURAS ATMOSFÉRICAS.

4.2.1. Tipología zonas climáticas locales.

La zonificación de la Ciudad de Copiapó abarca la extensión de 2829 hectáreas. A modo general se puede observar que las zonas de alta densidad (B2-B3) localizadas en gran parte de la ciudad, principalmente en el área central, son de baja altura (B3).

Por otro lado, las tipologías de baja intensidad de ocupación de suelo (B4-B6) se distribuyen de manera heterogénea, en el centro, margen noroeste, noreste y sur del área de estudio, correspondiendo a baja altura (B4).

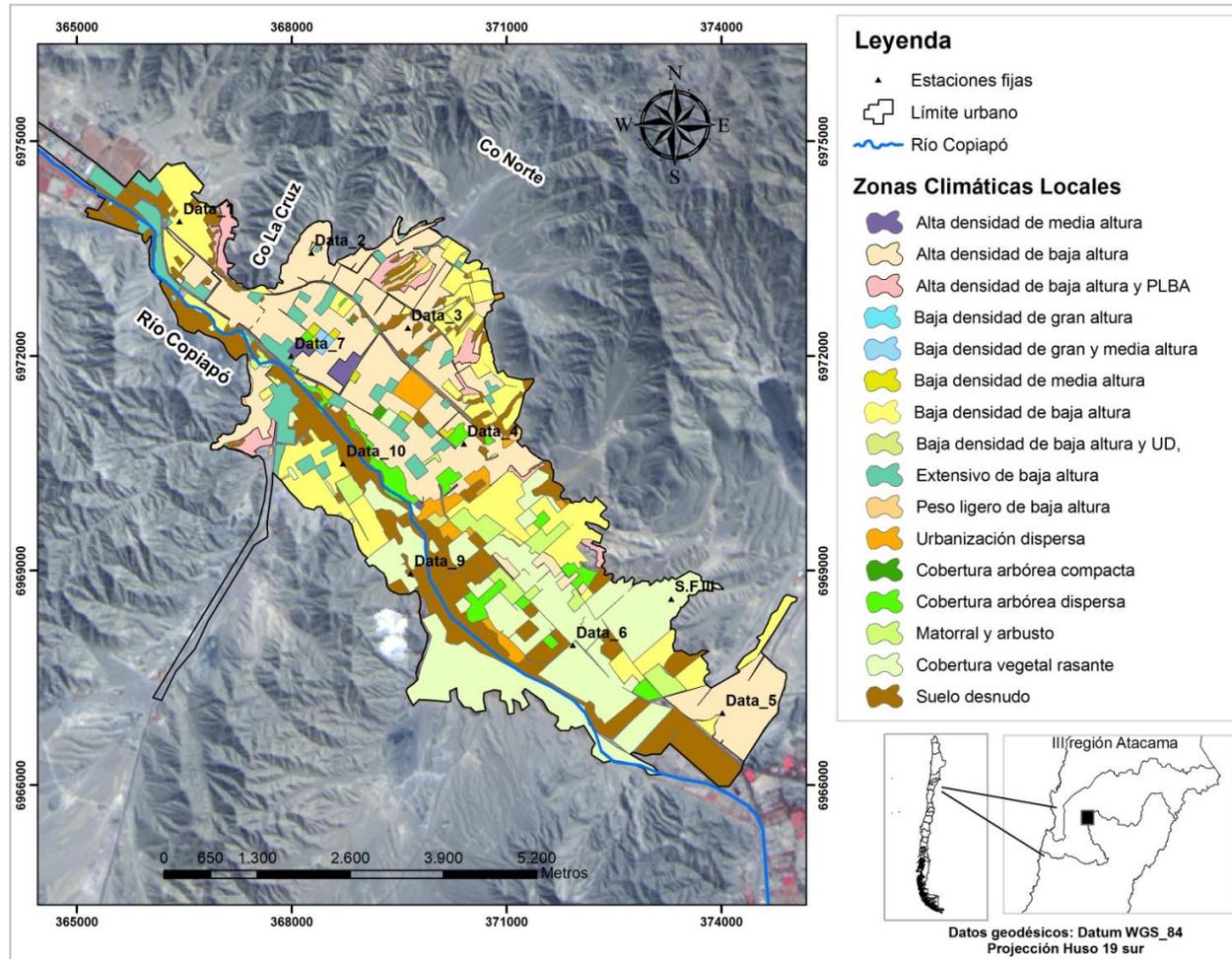
En la Tabla 5 se indica la superficie que abarca cada zona climática y posteriormente se describen sus características así como su distribución espacial (figura 18).

Tabla N° 5. Superficies zonas climáticas locales.

Zona climática local	Abreviatura	Hectáreas
Alta densidad de media altura	B2	16,4
Alta densidad de baja altura	B3	765,5
Alta densidad y Peso ligero baja altura	B3-B8	66,7
Baja densidad de gran altura	B4	0,5
Baja densidad de gran y media altura	B4-B5	4,9
Baja densidad de media altura	B5	12,9
Baja densidad de baja altura	B6	459,4
Baja densidad de baja altura y U. dispersa	B6-B9	3,8
Extensivo de baja altura	B7	148,6
Peso ligero de baja altura	B8	11,2
Urbanización dispersa	B9	57,2
Cobertura arbórea compacta	N1	2,9
Cobertura arbórea dispersa	N2	79,3
Matorral y arbusto	N3	78,1
Cobertura vegetal rasante	N4	607,2
Suelo desnudo	N5	512,9

Fuente: elaboración propia

Figura N° 18. Distribución espacial de las zonas climáticas locales.



Fuente: elaboración propia en base a datos del Laboratorio de Medioambiente y Territorio.

Descripción de las zonas climáticas locales

-B2: Corresponde a urbanización de alta densidad de mediana altura y se observa en el centro de la ciudad de Copiapó. Sus edificaciones están muy próximas unas de otras separadas por calles estrechas, se distribuyen de manera uniforme, posee calles pavimentadas, cuyo tráfico vehicular es moderado. Las edificaciones poseen en promedio de tres a ocho pisos, por lo que el factor de visión de cielo, es reducido. Las áreas verdes, se remiten a plazas y antejardines y el uso de suelo predominante es de vivienda y equipamiento mixto (figura 19).

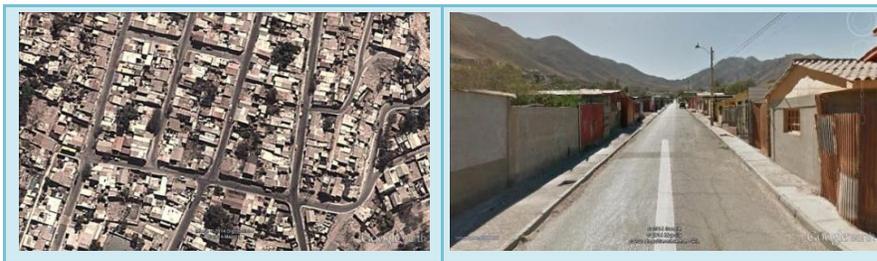
Figura N° 19. Imágenes tipología B2



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B3: Corresponde a urbanización de alta densidad de baja altura y es la zona climática local que mejor representa el tipo de urbanización que se da en la ciudad. Se caracteriza por la presencia de viviendas de uno a tres pisos, las cuales se emplazan muy cercanas unas de otras. El acceso a ellas, está dado por las principales avenidas, pero además por calles estrechas, por lo que el flujo vehicular va de moderado a leve. La vista del cielo desde los cañones de las calles está significativamente reducida. Las áreas verdes identificadas representan principalmente plazas, antejardines, patios y especies arbóreas ubicadas en la red vial. Según lo planteado por Stewart y Oke, este tipo de urbanización debiera favorecer, la presencia de temperaturas más elevadas con respecto a sectores de urbanización dispersa. El uso de suelo predominante es de vivienda y equipamiento mixto (figura 20).

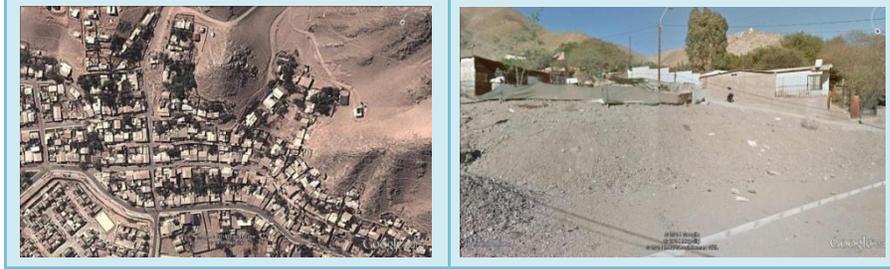
Figura N° 20. Imágenes tipología B3.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B3-B8: zonas de transición entre la urbanización de alta densidad de baja altura y la zona de peso ligero de baja altura como se observa en la figura 21.

Figura N° 21. Imágenes tipología B3-B8.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B4: Corresponde a urbanización de baja densidad de gran altura y se localiza en una pequeña porción de esta categoría, localizada en el área central de la ciudad. Las construcciones son de fines turísticos, poseen alturas superiores a 10 pisos, presenta espacios abiertos entre las edificaciones, existe vegetación en los jardines, estacionamientos y en la plaza de armas de Copiapó. Se ubican entre las calles Manuel Rodríguez por el norte, Salas por el oriente, Bernardo O'Higgins por el sur y Colipi por el poniente. La vista al cielo desde el nivel del suelo está significativamente reducida y el flujo de tráfico moderado. Para los autores del modelo, este tipo de urbanización debiese generar un clima con temperaturas elevadas en relación al resto de las zonas climáticas locales.

-B5: Corresponde a una urbanización de baja densidad de media altura que se encuentra en el área central de la ciudad y representa una pequeña porción de las áreas impermeabilizadas. Se trata de conjuntos de edificios de 3 a 8 pisos de altura. Esta categoría posee entre un 20% y un 40% de cobertura vegetal y el uso de suelo es de vivienda y equipamiento. La vista al cielo desde el nivel del suelo está ligeramente reducida (figura 22).

Figura N° 22. Imágenes tipología B5.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B4-B5: Zonas de transición entre, que tiende a concentrar edificaciones entre tres y ocho pisos, las que se presentan como la matriz dominante (figura 23).

Figura N° 23. Imágenes tipología B4-B5.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B6: Corresponde a urbanización de baja densidad y baja altura. Es la segunda zona climática local más representativa de la ciudad y se localiza principalmente en las zonas periféricas del límite urbano, por ejemplo La Chimba, El palomar, ladera norte del Cerro Norte y en áreas colindantes a Llanos de Ollantay. Se caracteriza por los pequeños edificios de uno a tres pisos, separados pero cercanos. Edificaciones dispuestas a lo largo de calles de anchura media, a menudo en modelo de rejilla. Flujo de tráfico bajo a moderado. En ciudades europeas esta zona posee un 40 a 60% de cobertura vegetal entre los edificios, pero en el caso de Copiapó no supera el 20%. El uso de suelo es principalmente de vivienda y equipamiento mixto. Posee alto factor de visión de cielo, favoreciendo ello, que las temperaturas sean más bajas en comparación a las zonas urbanas de alta densidad (figura 24).

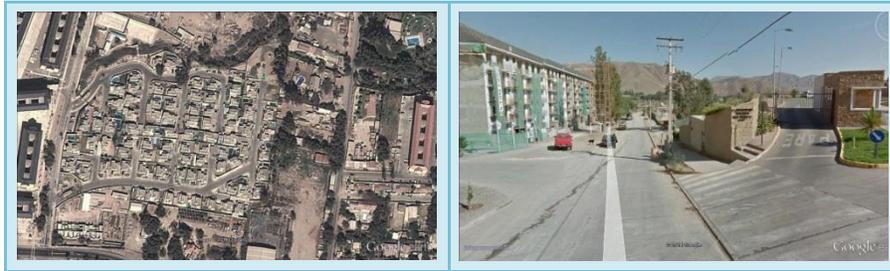
Figura N° 24. Imágenes tipología B6



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B6-B9: Corresponde a la transición entre urbanización de baja densidad de baja altura y urbanización dispersa (figura 25).

Figura N° 25. Imágenes tipología B6-B9.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B7: Corresponde a urbanización extensiva de baja altura y es la tercera zona que posee mayor extensión. Se ubica en diversas partes de la ciudad, pero principalmente en zonas de mayor urbanización. Los edificios se extienden horizontalmente, tienen uno a tres pisos de altura y están bien separados por superficies abiertas pavimentadas. La cobertura vegetal es escasa. Uso de suelo industrial y comercial. Es una zona de baja demanda de calefacción y/o refrigeración y posee factor visión de cielo mayor a 0,9. Por lo tanto, las temperaturas debieran ser más bajas en comparación a las otras ZCL urbanizadas (figura 26).

Figura N° 26. Imágenes tipología B7.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B8: Corresponde a urbanización de peso ligero de baja altura que se localizan principalmente en las laderas poniente, norte y sur del cordón montañoso que rodea a la ciudad. Son principalmente viviendas de un piso, fabricadas con materiales ligeros como paja, madera y de paredes y techos delgados. Separados por calles estrechas y callejones, de poco o ninguna infraestructura consolidada, sobre todo superficies sin pavimentar y desprovista de vegetación. Espacio de insignificante demanda de calefacción y/o refrigeración. Nada de flujo de tráfico. El factor visión de cielo es muy bajo. El uso de suelo es netamente residencial, caracterizado por campamentos ilegales o informales (figura 27).

Figura N° 27. Imágenes tipología B8.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-B9: Corresponde a urbanización dispersa o escasamente desarrollada, ubicada en áreas cercanas a los paños de cultivo. Las edificaciones son pequeñas, de baja y mediana altura, menores a ocho pisos, pocos y estrechos caminos. Espacios de insignificante demanda por calefacción y/o refrigeración. Densidad de tráfico moderada a ligera, Posee abundante vegetación y factor de visión de cielo mayor a 0,9. Estas características, debieran favorecer la aparición de bajas temperaturas definidas por las condiciones preexistentes del paisaje (figura 28).

Figura N° 28. Imágenes tipología B9.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-N1: Corresponde a la serie natural, cobertura arbórea compacta o densa, que se encuentra en el área central de la ciudad. Abarcan 2,9 hectáreas de extensión donde se ubican el Parque Schneider y al área circundante a una cancha de tierra ubicado entre las calles Diego Portales por el sur, Joaquín Vallejos por el poniente, Portales por el oriente y Circunvalación por el norte. Esta zona debiese favorecer la amortiguación de temperaturas atmosféricas altas, debido a la alta presencia de humedad (figura 29).

Figura N° 29. Imágenes tipología N1.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-N2: Corresponde a la serie natural de cobertura arbórea dispersa que se encuentra en el área central y en zonas agrícolas al interior de la ciudad. Cubre 79,3 hectáreas que corresponden a vegetación de plazas, de estacionamientos no pavimentados y áreas agrícolas (figura 30).

Figura N° 30. Imágenes tipología N2.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-N3: Corresponde a la serie natural matorral y arbusto, que se encuentra en la ladera sur del cordón montañoso, en el sector El Palomar, en el área agrícola y en Paipote. Cubre 78,1 hectáreas de extensión (figura 31).

Figura N° 31. Imágenes tipología N3.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-N4: Corresponde a la serie natura con, cobertura vegetal rasante, que integra principalmente a los paños de cultivo, canchas de fútbol, escasas a inexistentes

construcciones, y por lo general presenta la mayoría de superficie con cobertura herbácea y en menor grado arbustivas. La zona abarca mayor extensión con 607,2 hectáreas en comparación a las demás zonas climáticas locales naturales. Se localiza en los márgenes nor-oriente y nor-poniente del límite urbano (figura 32).

Figura N° 32. Imágenes tipología N4.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

-N5: Corresponde a la serie natural con suelos desnudos. Cubre 512,9 hectáreas al interior de la ciudad. Se puede observar en sitios eriazos, terrenos al borde de autopistas, borde de río, descanso y barbecho agrícola. Se encuentra desprovisto de vegetación y con un alto grado de degradación (figura 33).

Figura N° 33. Imágenes tipología N5.



Fuente: elaboración propia en base a imágenes Google Earth, 2013.

4.2.2. Análisis de las relaciones entre las temperaturas atmosféricas de las zonas climáticas locales.

4.2.2.1. Temperaturas promedios de las zonas climáticas locales.

Para el día 3 de enero las temperaturas atmosféricas promedio, tanto de los sitios urbanos como de los naturales presentaron similitud a las 9:00 horas y 16:00 horas, registrándose diferencias mínimas de 0,4 C a las 22:00 horas (figura 34). Desde el punto de vista de las zonas climáticas locales, las mayores temperaturas se observan en las siguientes categorías:

- Baja densidad de baja altura y urbanización dispersa (B6-B9)
- Cobertura arbórea dispersa
- Alta densidad de baja altura

Por otra parte, existen menores temperaturas en las categorías:

- Alta densidad de media altura
- Baja densidad de media altura
- Extensivo de baja altura.

En cuanto al 18 de julio las temperaturas atmosféricas promedio, muestran diferencias mínimas (0,3°C) entre los sitios urbanizados y los naturales, tanto a las 9:00 como a las 22:00 horas. A las 16:00 horas las temperaturas tanto de las categorías urbanas como naturales son iguales (figura 35).

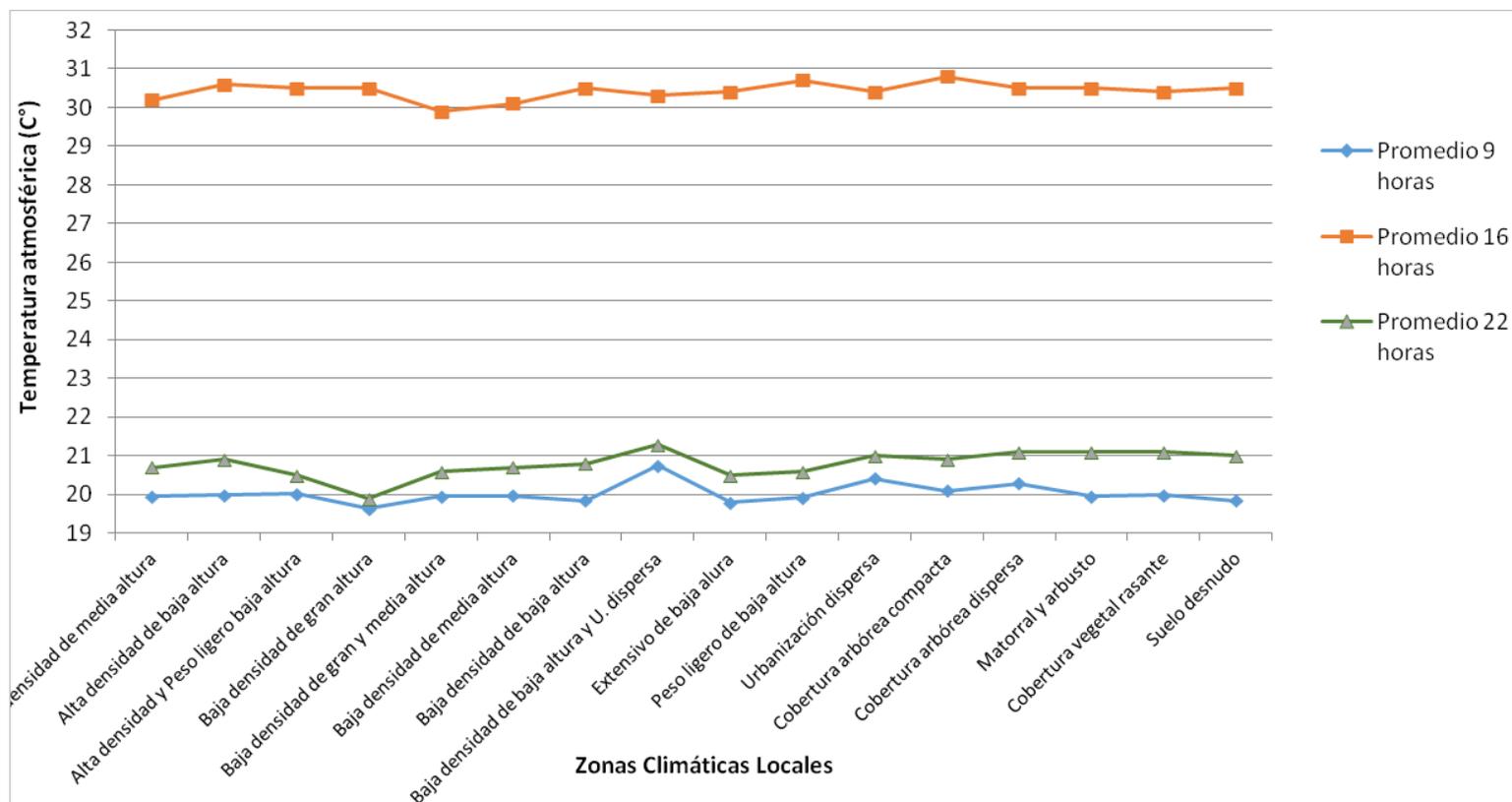
Las mayores temperaturas se observaron en las siguientes categorías:

- Peso ligero de baja altura (B8)
- Cobertura vegetal rasante (N4)
- Alta densidad de baja altura (B3)
- Alta densidad y Peso ligero de baja altura (B3-B8)
- Suelo desnudo (N5).

Por otro lado, las menores temperaturas se registran en las categorías;

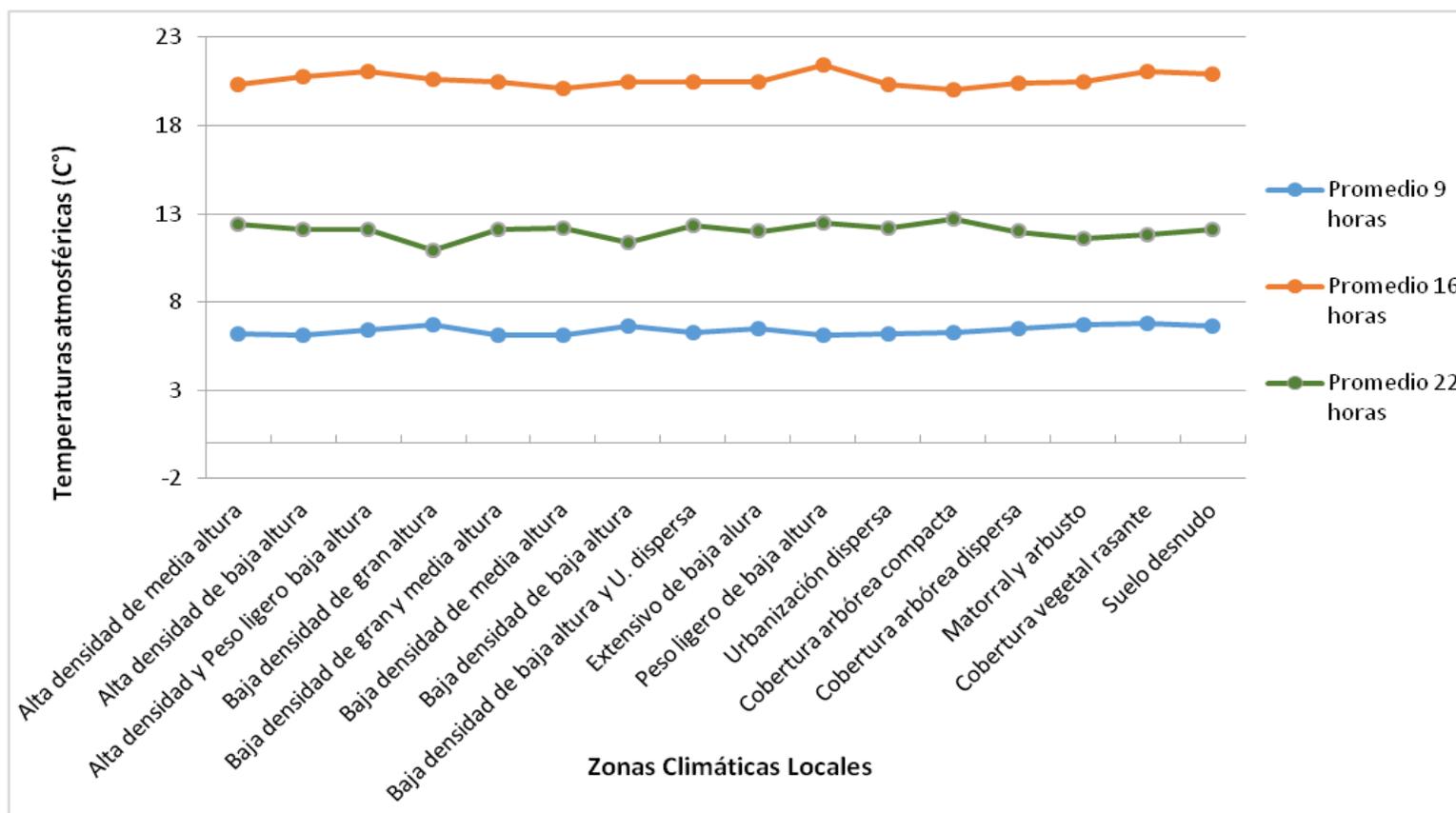
- Matorral y arbusto (N3)
- Baja densidad de gran y media altura (B4-B5)
- Urbanización dispersa (B9)
- Baja densidad de baja altura (B6).

Figura N° 34. Temperaturas atmosféricas promedios de las zonas climáticas locales, el día 3 de enero.



Fuente: elaboración propia.

Figura N° 35. Temperaturas atmosféricas promedios de las zonas climáticas locales, el día 18 de julio.



Fuente: elaboración propia.

4.2.2.2 Diferencias entre las temperaturas atmosféricas de las zonas climáticas locales.

Verano

Respecto de las diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas atmosféricas de las zonas climáticas locales, es posible establecer que estas son escasas a las 9:00 hrs. Vale decir que hubo zonas climáticas locales que presentaron temperaturas atmosféricas similares, en comparación con los valores registrados a las 16:00 y 22:00 hrs. En general, se registraron en total 38 casos de ZCL con semejanza de sus temperaturas. A continuación se especifican los casos de similitud de temperaturas del aire por horas (figuras 36 y 37). Para mayor detalle en el anexo 3 se muestran las temperaturas de cada tipología a través de un boxplot.

A las 9:00 hrs se contabilizaron 17 casos de zonas climáticas locales que registraron temperaturas atmosféricas semejantes, que se desglosan de la siguiente manera:

- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos, se registraron 7 casos de similitud, por ejemplo: alta densidad de media altura con baja densidad de media altura (ambos registraron 19,7°C de temperatura). También entre zonas de alta densidad de baja altura y extensivo de baja altura, con 19,9°C y 19,8°C, respectivamente, y alta densidad de media altura con peso ligero de baja altura.
- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos y los naturales se detectaron 8 casos de similitud de temperaturas, por ejemplo: alta densidad de baja altura con matorral y arbusto registran 19,9°C de temperatura.
- ✓ Entre las categorías de los sitios naturales, se registraron solo 2 casos de similitud de sus temperaturas, ejemplo de ello son las categorías de cobertura arbórea compacta y cobertura arbórea dispersa; ambas registran 20°C, y matorral y arbusto con suelo desnudo, que registran 19,9°C

En cuanto a las 16:00 hrs es posible observar que existen 12 casos de similitud de temperaturas entre las zonas climáticas locales, que se desglosan de la siguiente manera:

- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos se presentaron 4 casos de similitud, por ejemplo: entre alta densidad de media altura con baja densidad de gran y de media altura con alrededor de 30°C; o baja densidad de baja altura con peso ligero de baja altura con alrededor de 30,5°C.
- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos y los naturales, se registraron 7 casos de similitud, entre ellos se mencionan, peso ligero de baja altura con cobertura arbórea dispersa con alrededor de 30,6°C o baja densidad de baja altura con suelo desnudo registran 30,5°C.

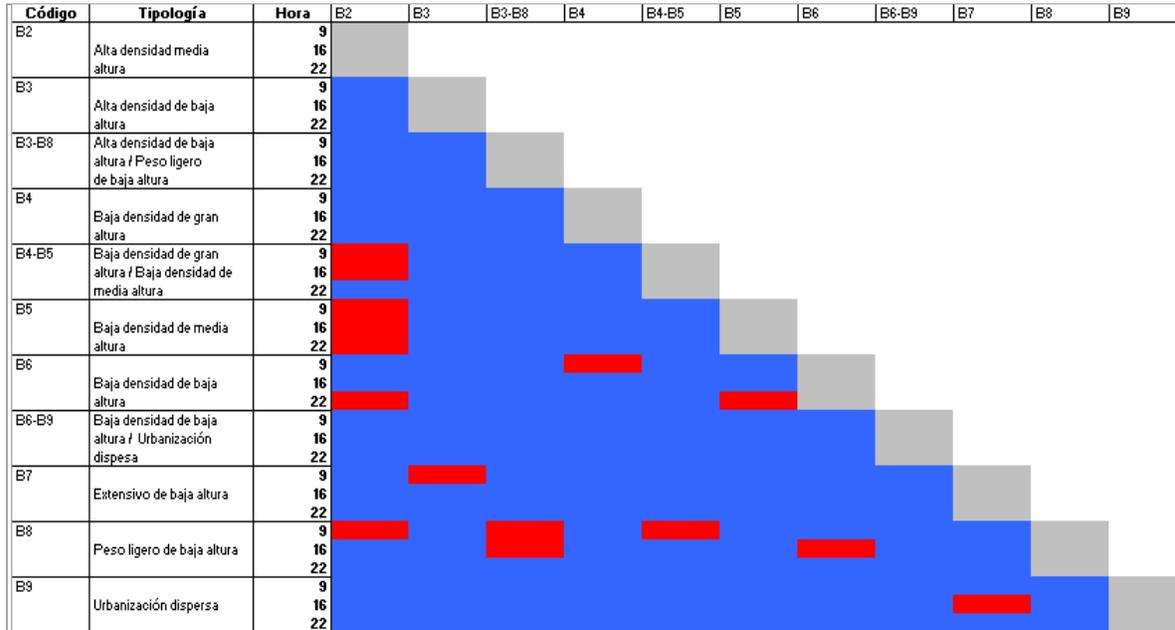
- ✓ Entre las categorías de sitios naturales se observa solo un caso, entre matorral, arbusto y suelo desnudo.

A las 22:00 hrs se contabilizaron 9 casos de zonas climáticas locales que registraron temperaturas atmosféricas similares:

- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos se registran 3 casos de similitud de sus temperaturas atmosféricas, por ejemplo: alta densidad de media altura con baja densidad de media altura (20,7°C), alta densidad de media altura con baja densidad de baja altura y baja densidad de media altura con baja densidad de baja altura (20,6°C)
- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos y los naturales se registran un caso de similitud de sus temperaturas atmosféricas, entre alta densidad de baja altura y cobertura arbórea compacta (20,9°C).
- ✓ Entre las categorías de sitios naturales existen 5 casos de similitud, entre ellos se mencionan: cobertura arbórea compacta con matorral y arbusto y entre cobertura arbórea dispersa con cobertura vegetal rasante.

Cabe señalar que existen categorías que presentan temperaturas semejantes durante todo el día, como es el caso de la alta densidad de media altura con baja densidad de media altura y matorral y arbusto con suelo desnudo. También se presenta este comportamiento similar desde la mañana hasta la tarde, en el caso de la alta densidad de media altura con baja densidad de gran y media altura y por último, entre peso ligero de baja altura con alta densidad de baja altura y peso ligero de baja altura. No obstante, hay zonas climáticas locales que mantienen durante todo el día sus diferencias de temperaturas, como las zonas de baja densidad de baja altura-urbanización dispersa (B6-B9), la cual se presenta como la única zona que no tienen similitud con ninguna de las restantes categorías.

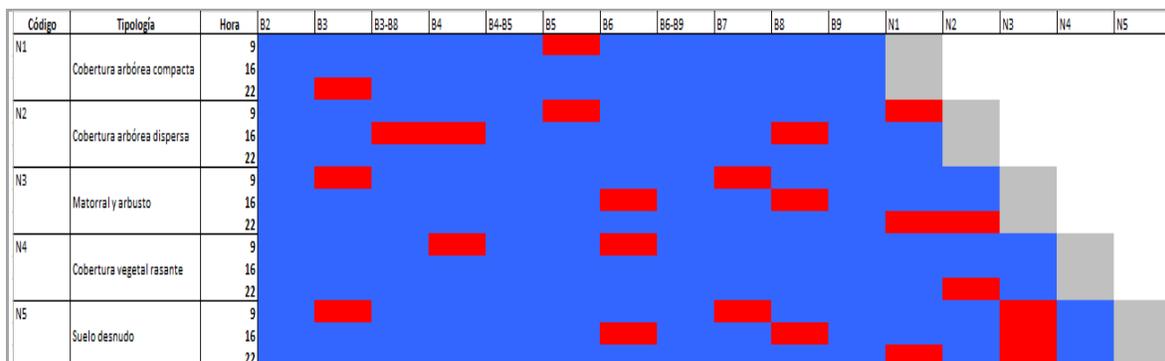
Figura N° 36. Diferencias y homogeneidad entre zonas climáticas locales (sitios construidos) en relación a su temperatura atmosférica, el día 3 de enero.



Color azul: diferencias estadísticamente significativas
 Color rojo: no hay diferencias estadísticamente significativas

Fuente: elaboración propia.

Figura N° 37. Diferencias y homogeneidad entre zonas climáticas locales (sitios naturales) en relación a su temperatura atmosférica, el día 3 de enero.



Color azul: diferencias estadísticamente significativas
 Color rojo: no hay diferencias estadísticamente significativas

Fuente: elaboración propia.

Invierno

En la estación de invierno, las mayores diferencias estadísticamente significativas se observaron a las 9:00 hrs, lo que es opuesto a lo que ocurre en verano. Las menores diferencias estadísticamente significativas se produjeron por su parte a las 22:00 hrs, también situación opuesta a lo que ocurre en verano. Por otro lado, en total se observaron 45 casos de zonas climáticas locales que presentan igual temperatura, lo que es comparativamente mayor (figuras 38 y 39). En el anexo 4 se muestran las temperaturas de cada tipología a través de un boxplot. A continuación se especifican los casos de similitud de temperaturas del aire por horas.

A las 9:00 hrs se registraron 10 casos de semejanza que se distribuyen de la siguiente manera:

- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos se registraron 5 casos de igualdad de temperaturas del aire, por ejemplo entre la zona de alta densidad de media altura con peso ligero de baja altura; baja densidad de media altura con peso ligero de baja altura y baja densidad de gran altura y baja densidad de baja altura.
- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos y naturales se registran 4 casos de homogeneidad de temperaturas del aire, entre ellos se mencionan, peso ligero de baja altura con cobertura arbórea compacta y baja densidad de media altura con cobertura arbórea compacta.
- ✓ Entre las categorías de los sitios naturales solo se observa un caso de homogeneidad entre matorral y arbusto y suelo desnudo (6,6°C).

A las 16:00 hrs. se observaron 16 casos de zonas de homogeneidad térmica, correspondientes a zonas climáticas locales, lo que es comparativamente mayor a lo que ocurrió en verano, distribuyéndose de la siguiente manera:

- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos hubo 6 lugares semejantes, entre los que se mencionan, alta densidad de media altura con baja densidad de media altura, alta densidad de baja altura con baja densidad de baja altura y alta densidad de media altura - peso ligero de baja altura con peso ligero de baja altura.
- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos y los naturales se observaron 10 semejanzas, por ejemplo entre zonas de baja densidad de gran altura con matorral y arbusto, alta densidad de media altura con cobertura arbórea compacta, extensivo de baja altura con matorral y arbusto y peso ligero de baja altura con cobertura vegetal rasante.

- ✓ Entre las categorías de los sitios naturales solo se observaron temperaturas con diferencias estadísticamente significativas.

A las 22:00 hrs se observaron 19 casos de homogeneidad térmica, un poco más del doble de lo que se registró en verano, distribuyéndose de la siguiente manera:

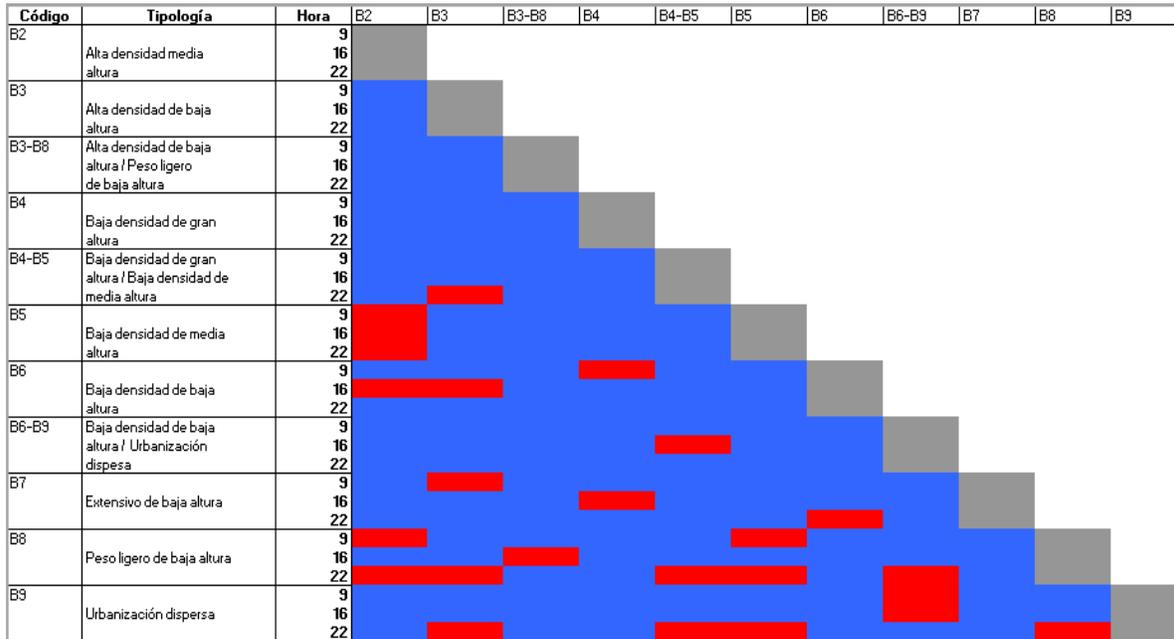
- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos se detectaron 12 casos de similitud de temperaturas del aire entre los que se observaron: alta densidad de media altura con baja densidad de baja altura, baja densidad de baja altura con extensivo de baja altura, alta densidad de media altura con peso ligero de baja altura, entre otras.
- ✓ Entre las categorías de los sitios construidos y los naturales es posible observar que existen 5 casos de homogeneidad, por ejemplo: extensivo de baja altura con matorral y arbusto, baja densidad de media altura con cobertura vegetal rasante y extensivo de baja altura con cobertura vegetal rasante.
- ✓ Entre las categorías de sitios naturales solo hubo 2 casos, entre ellas se encuentran: cobertura arbórea dispersa con cobertura vegetal rasante y cobertura arbórea compacta con suelo desnudo.

Es posible concluir que existen zonas climáticas locales que registran similitud entre ellas durante todo el día, como es el caso de las áreas de baja densidad de media altura con aquellas de cobertura arbórea compacta. Además se observan casos de similitud desde la mañana hasta la tarde, como por ejemplo, entre la zona de urbanización dispersa y cobertura arbórea compacta, como también se registran similitudes desde la tarde hasta la noche, por ejemplo entre la zona de alta densidad de media altura con la de baja densidad de media altura, extensivo de baja altura con matorral y arbusto y por último baja densidad de baja altura-urbanización dispersa con urbanización dispersa.

En general, es posible vislumbrar la tendencia a la similitud que existe entre las categorías de los sitios urbanos y de éstos con los sitios naturales. Al contrario, entre las categorías de sitios naturales se observa mayor diferencia estadísticamente significativa.

A través de los resultados se puede concluir, que en general, el día 3 de enero se observaron mayores diferencias estadísticamente significativas entre las zonas climáticas locales (38 casos), en comparación con el día 18 de julio, cuando se registraron 45 casos de similitud.

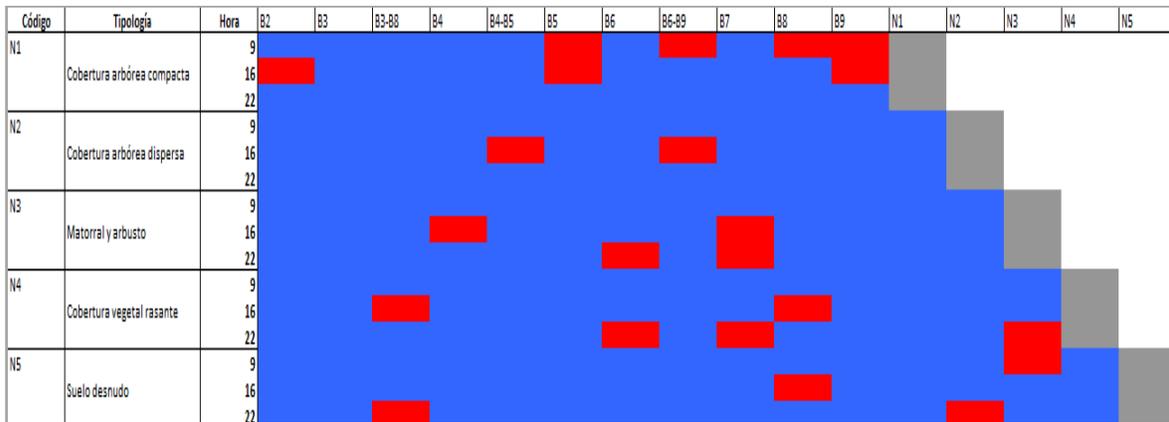
Figura N° 38. Diferencias y homogeneidad entre zonas climáticas locales (sitios urbanos) en relación a su temperatura atmosférica, el día 18 de julio.



Color azul: diferencias estadísticamente significativas
 Color rojo: no hay diferencias estadísticamente significativas

Fuente: elaboración propia.

Figura N° 39. Diferencias y homogeneidad entre zonas climáticas locales (sitios naturales) en relación a su temperatura atmosférica, el día 18 de julio.



Color azul: diferencias estadísticamente significativas
 Color rojo: no hay diferencias estadísticamente significativas

Fuente: elaboración propia.

4.3. ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y LAS TIPOLOGÍAS DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCALES.

4.3.1. Intensidad de las ICU y su relación con las zonas climáticas locales para el 3 de enero.

La figura 40 muestra la distribución de la intensidad de las Islas de Calor Urbano (ICU) e Islas de Frescor Urbano (IFU) en relación a las zonas climáticas locales, el día 3 de enero.

A las 9 horas las zonas urbana y natural registraron islas de calor. Las zonas de alta densidad de baja altura y extensivo de baja altura presentaron intensidades elevadas, alcanzando a 4,5°C. La zona de baja densidad de baja altura registró una intensidad moderada, con 3,7°C. Por último, la categoría cobertura vegetal rasante registró una intensidad muy baja, de tan solo 0,2°C.

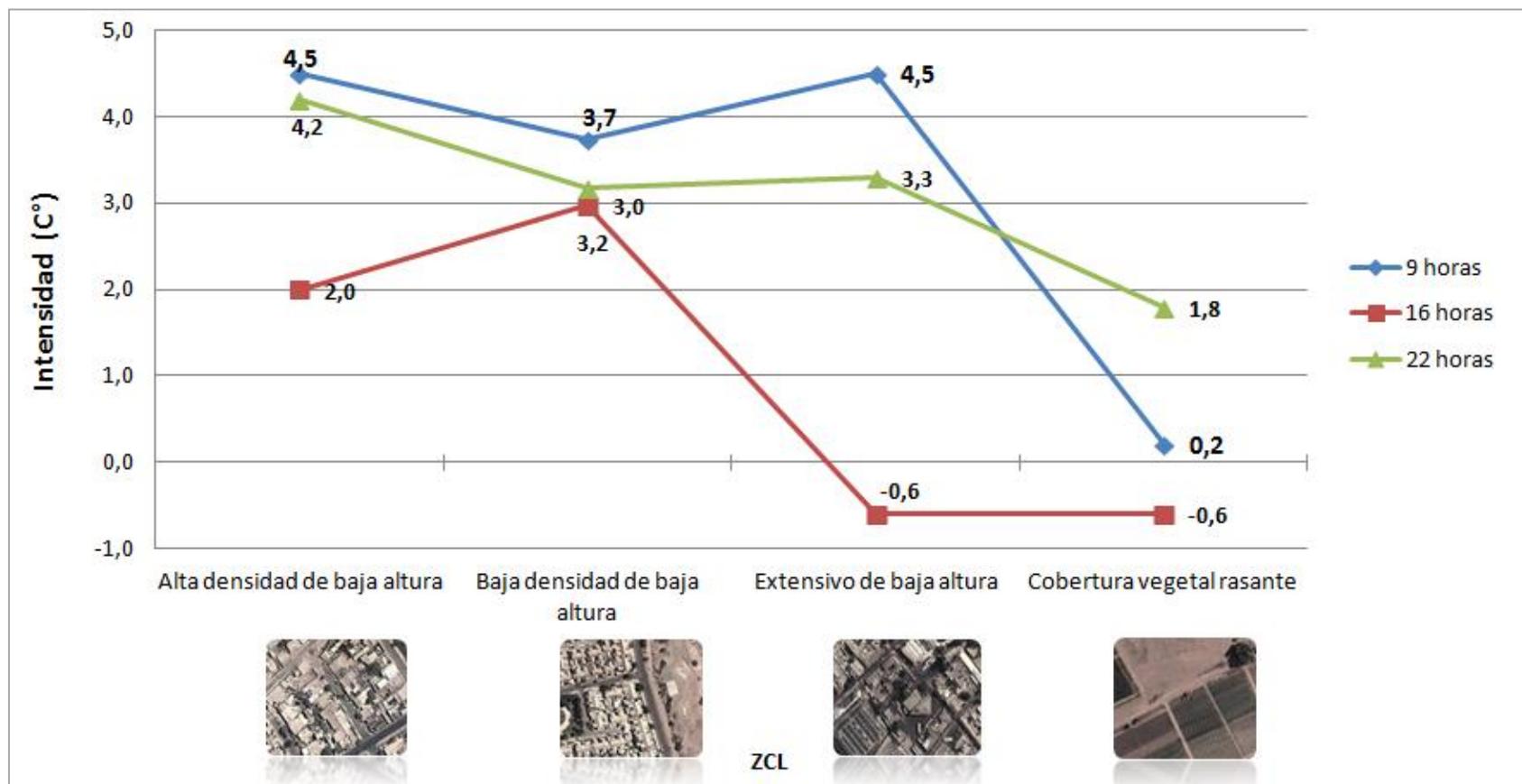
En horas de la tarde, la mayoría de las zonas climáticas locales registran descenso en sus intensidades. Las zonas de alta y baja densidad de baja altura presentan intensidades moderadas, entre 2°C y 3,2°C. Al contrario, las zonas extensiva de baja altura y cobertura vegetal rasante manifiestan la presencia de islas de frescor, con una intensidad de -0,6°C.

En el periodo nocturno, las islas de calor aumentan su intensidad. El peak se localiza sobre la zona de alta densidad de baja altura con 4,2°C, mientras que la menor intensidad se registra en la zona de cobertura vegetal rasante.

En general las zonas construidas de alta y baja densidad y baja altura se relacionan estrechamente con la generación de islas de calor, debido a que captan y mantienen la energía emitida y no la reflejan adecuadamente- También dice relación con el factor de visión de cielo (FVC), pues estas zonas alcanzan valores entre 0,3-0,6 y 0,6-0,9. Tanto mayor sea el FVC, el cañón podrá retener más calor durante el día y liberarlo durante la noche, además de presentar escasa cobertura vegetal.

Por otro lado, la manifestación de islas de frescor se asocia con zonas climáticas de construcciones extensivas de baja altura y cobertura vegetal rasante, lo que demuestra el rol de la vegetación como regulador de la temperatura, principalmente a horas de mayor insolación.

Figura N° 40. Distribución de la intensidad de ICU e IFU por zona climática local el 3 de enero.



Fuente: elaboración propia

4.3.2. Intensidad de las ICU y su relación con las zonas climáticas locales para el 18 de julio.

En cuanto al día de invierno correspondiente al 18 de julio se puede observar en la figura 41 que a horas de la mañana las zonas climáticas de alta densidad de baja altura, baja densidad de baja altura y extensivo de baja altura, generaron islas de frescor con intensidades de $-2,3^{\circ}\text{C}$, $-0,8^{\circ}\text{C}$ y $-2,5^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

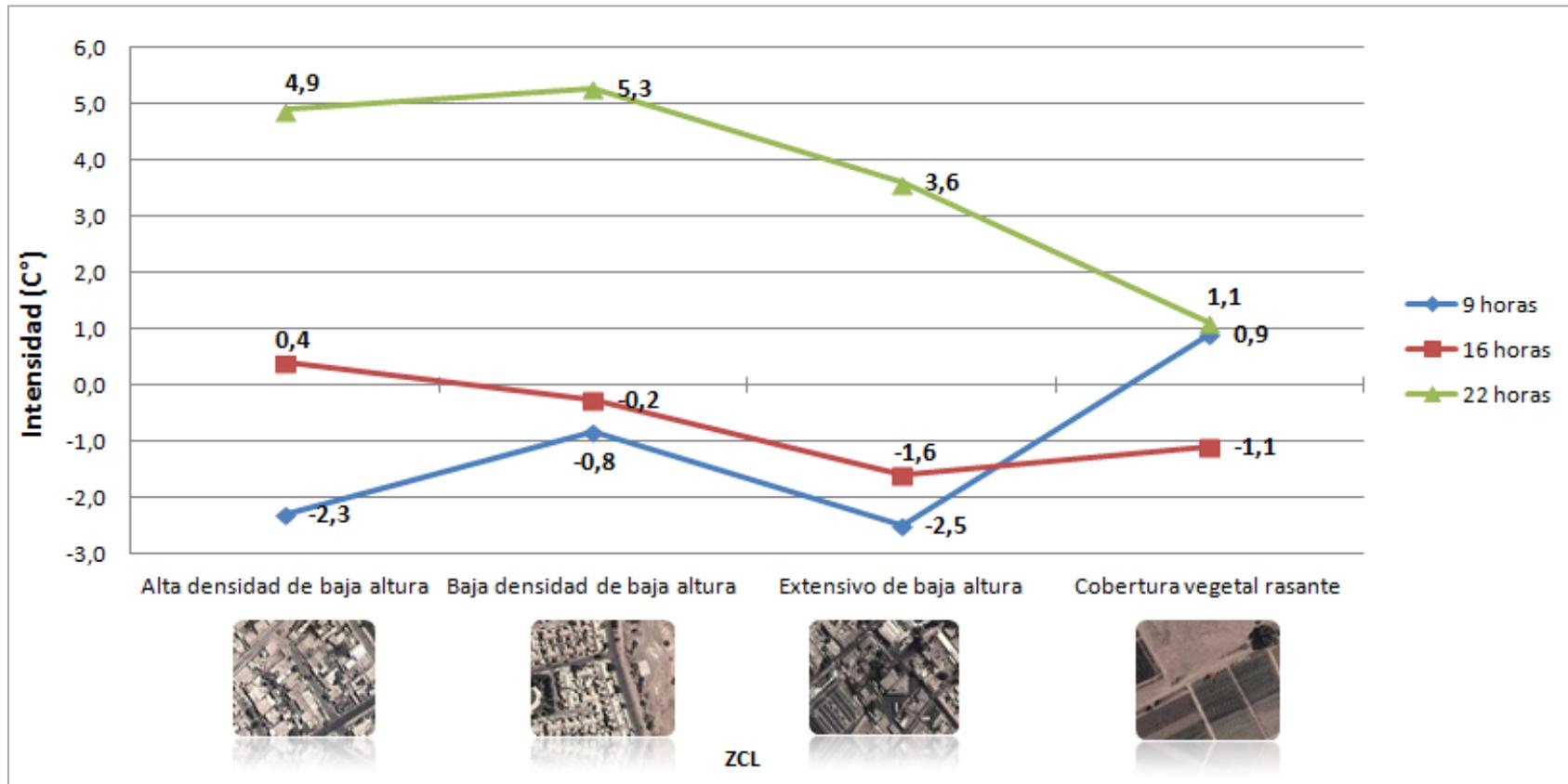
Al contrario, la zona climática local cobertura vegetal rasante manifiesta la presencia de una isla de calor de intensidad baja ($0,9^{\circ}\text{C}$).

Al avanzar la tarde las zonas de baja intensidad de baja altura y extensivo de baja altura mantiene la condición de isla de frescor, con valores entre $-0,2^{\circ}\text{C}$ a $-1,6^{\circ}\text{C}$. Cabe señalar, que la zona cobertura vegetal rasante se convierte en una isla de frescor con intensidad de $-1,1^{\circ}\text{C}$, mientras que la zona de alta intensidad de baja altura, que en la mañana era una isla de frescor, por la tarde se transforma en una isla de calor ($0,4^{\circ}\text{C}$).

Para el periodo nocturno la manifestación de la isla de calor es generalizada en todas las categorías de usos del suelo. Las mayores intensidades se registran en las zonas de alta y baja densidad de baja altura con $4,9^{\circ}\text{C}$ y $5,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Por otra parte la categoría de sitio natural registra la menor intensidad con $1,1^{\circ}\text{C}$.

Para este día de invierno, a diferencia del de verano, es menos claro establecer asociaciones, principalmente debido a la variabilidad que registran algunas de las zonas locales. En horas de la mañana y de la tarde, todas las zonas climáticas locales se asocian a la generación de islas de frescor. Por el contrario, por la noche todas las categorías se asocian a la generación de isla de calor urbano.

Figura N° 41. Distribución de la intensidad de ICU e IFU por zona climática local el 18 de julio.



Fuente: elaboración propia

4.4. ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LA ISLA DE CALOR URBANO Y CONSOLIDACIÓN DE ISLAS DE FRESCOR EN LA CIUDAD DE COPIAPO.

La atención puesta en los últimos años en el estudio de los climas urbanos, principalmente el control del fenómeno de isla de calor urbano, ha producido muchos avances en el conocimiento del problema y de las posibles soluciones o medidas de atenuación (Gray & Finster, 2000).

El efecto conocido como isla de calor urbana (ICU) produce mayores temperaturas del aire en el centro de las ciudades comparado con sus áreas suburbanas circundantes. Este fenómeno se relaciona principalmente con la alta densidad edilicia (mayor masa de acumulación), la alta absorción de los materiales presentes en la ciudad, la escasez de espacios verdes, las características morfológicas de los cañones urbanos, y el calor antropogénico liberado (Oke, 1992).

Voogt (2008) también afirma la importancia de la comprensión de los mecanismos físicos subyacentes a la formación de las islas de calor y que provee la base para el desarrollo de controles que pueden promoverlas o aliviarlas, pero considerando que en algunos casos la aplicación de esos controles es difícil.

Diversos estudios científicos permiten distinguir dos métodos principales. El primero se concentra en la morfología urbana y en la búsqueda de una relación entre forma, disposición y orientación de los edificios que permita asegurar las mejores condiciones microclimáticas (Johansson, 2006; Higuera, 2006) y el segundo lo hace en el estudio del espacio intersticial entre edificaciones, proponiendo medidas para mitigar las islas de calor principalmente con el aumento de la vegetación en el espacio urbano, el uso de materiales con alto albedo, uso de cubiertas verdes o materiales fríos (Tumini, 2012; Villanueva *et al.*, 2012; Voogt, 2008; Potchter *et al.*, 2011; Alchapar *et al.*, 2012).

En esta sección se abarcarán posibles soluciones al efecto de las islas de calor urbano, desde dos escalas: capa de perímetro y dosel urbana.

4.4.1. Medidas de mitigación a escala Capa de Perímetro Urbana “Urban boundary layer”

Áreas de expansión urbana.

En Copiapó las áreas que posiblemente serán ocupadas urbanamente corresponden primordialmente a la ladera norte de los cerros que encajonan la ciudad y a lo largo del valle, en sectores como La Chimba, reemplazando así los suelos agrícolas por suelos construidos. En cuanto al área de posible expansión hacia los faldeos del Cerro La Cruz y Cerro Norte, cabe señalar, que en la actualidad es habitado por los grupos socioeconómicos más pobres de Copiapó (grupo D y E), que concentran el 56% de las viviendas (ATISBA, 2005 en GEOCopiapó, 2009). En dichas áreas de expansión, la altitud de los cerros va desde los 500 a 860 msnm.; la dirección del viento predominante es

desde el oeste (CENMA, 2013) y la temperatura promedio diaria para el 3 de enero es de 26°C y presenta escasa o nula vegetación.

Bajo estas condiciones naturales, se debiesen tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Localización de las zonas de expansión urbana en áreas que no concentran las cargas de radiación solar y que sean ventiladas naturalmente.
- Evitar la localización de áreas urbanas en zonas contaminadas.
- Protección de las áreas naturales y cultivadas que concentran la vegetación debido a la necesidad de mantener el “efecto de oasis”.
- Protección de cauces y riberas fluviales para asegurar ventilación y proteger a la población de inundaciones.
- Reverdecer la cuenca tanto como sea posible para optimizar los servicios ambientales.
- El diseño de las calles debe ser más anchas de lo que actualmente son, para permitir una mayor reflexión de la energía, además guarda estrecha relación con el factor de visión de cielo.
- Utilización de material frío en la creación de calles y aceras, principalmente pintarlas de color blanco para aumentar el albedo y emitancia (Nahar *et al.*, 1997; Takebayashi & Moriyama, 2007).
- Creación de un corredor de brisas o de enfriamiento a lo largo de las avenidas.

En el caso de la expansión urbana a lo largo del valle, especialmente a lo largo del río Copiapó se recomienda lo siguiente:

- No obstaculizar con edificaciones la circulación de los vientos y brisas sobre el cauce y márgenes fluviales.
- No pavimentar y favorecer la conservación de franjas riparianas verdes para asegurar servicios ambientales tales como moderación de temperaturas, ventilación, humidificación del aire y protección ante inundaciones.
- Potenciar la relación entre los flujos de valle con la dirección de las calles
- Las edificaciones deben tener orientación sur.

- Pintar con colores claros los pavimentos (Alchapar, 2011).
- Las edificaciones deben incorporar cubiertas o techos verdes con vegetación extensiva, este tipo de vegetación se caracteriza por ser livianas, de bajo mantenimiento (Agencia de protección ambiental, 2012). A menudo se plantan en ellas especies con poco requerimiento de humedad, necesitan solamente de 5 a 15 cm de sustrato y suelen subsistir con agua de lluvia, por ejemplo; cactáceas.
- Como se menciona anteriormente, los techos verdes en un contexto de clima árido suelen subsistir con agua de lluvia, por lo que las edificaciones también deberían incluir colector de aguas lluvias para almacenar el agua caída escasamente en el año, para posteriormente utilizarla para regar la vegetación (Salas, 2013).

Por último, cabe destacar que en esta escala es primordial la definición y creación de áreas más frías cerca de zonas cálidas no solo con el fin de atenuar las altas temperaturas de dichas zonas, si no que enfatizar el carácter de ciudad “oasis” que posee la ciudad de Copiapó.

Intervención de los usos de suelo.

En Copiapó, en general los usos residenciales y equipamiento mixto se asocian al fenómeno ICU, primordialmente en áreas de mayor densidad de estos usos es donde se acentúa su efecto, la forma de atenuarlo se debería abordar de la siguiente manera:

- Creación de plazas o parques en los diversos sectores, pues diversos estudios demuestran el efecto enfriador de los parques ya sea porque las hojas verdes de las plantas, tienen mayor capacidad de reflejar la luz solar que el asfalto y por ello ayudan a enfriar el ambiente, como además por el efecto de su sombra que ejercen. Adicionalmente, los vegetales consumen el calor sensible acumulado en la atmósfera mediante el proceso de evapotranspiración o transformación de dicho calor en calor latente. Por otro lado los parques y plazas urbanos contribuyen a temperar las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica en general (Bowler *et al.*, 2010; Andrade & Vieira, 2007; Potcher *et al.*, 2006).

La captura de dióxido de carbono y la liberación de oxígeno es un servicio ambiental de importancia global que prestan los ecosistemas, incluidos los parques y plazas. Es claro que la extensión en hectáreas de una plaza no tiene el mismo alcance que un parque (Correa *et al.*, 2010).

Los sectores que se deben intervenir se ubican en los faldeos del cerro La Cruz y Norte, las poblaciones que allí habitan son Pedro León Gallo, San Lorenzo y Arturo Prat. También la población El Palomar ubicada en la periferia sur. Estos sectores se

caracterizan por estar habitados por sectores pertenecientes al estrato socioeconómico bajo y muy bajo (grupo D y E), por lo que las medidas de mitigación térmica pueden contribuir además a mejorar la calidad de vida en general.

Otro de los sectores a intervenir es la Villa El Palomar (sector sur) y Paipote (sector poniente) donde se ubica el estrato social medio bajo (grupo C3), lo que nuevamente debiera significar un mejoramiento de la calidad de vida de sus sectores residenciales.

La creación de plazas o parques debe incrementarse para sustituir el suelo asfaltado, ya que no solo trae beneficios en cuestiones de confort térmico sino que también en el aspecto psicológico y social ligado al verde urbano, que proporciona lugares de descanso, de socialización y de ocio a los habitantes (Tumini, 2012). La posibilidad de acceder a espacios abiertos naturales es algo fundamental para el bienestar de los ciudadanos. En definitiva el uso de la vegetación en la ciudad mejora la calidad del espacio y en consecuencia, la calidad de vida.

4.4.2. Medidas de mitigación a escala Capa de dosel urbana “Urban canopy layer”

A continuación se presentan algunas medidas de mitigación para contrarrestar los efectos de la isla de calor urbano y medidas para la consolidación de islas de frescor urbano, en especial en zonas climáticas locales tales como “Alta densidad de baja altura”, “baja densidad de baja altura”, “Extensivo de baja altura” y “Cobertura vegetal rasante”, abordando el problema a nivel de cañón urbano.

Propuesta de medidas para contrarrestar o mitigar la ICU.

En el caso de la Ciudad de Copiapó ya se han identificado las Zonas Climáticas Locales que se relacionan con la generación de las islas de calor urbano, a continuación se caracterizarán las zonas de Alta densidad de baja altura (B3) y Baja densidad de baja altura (B6), con el fin de plantear medidas de mitigación que sean acordes a la trama urbana de cada zona.

La zona de alta densidad de baja altura (figura 42) se caracteriza por ser un sector residencial de alta densidad (viviendas de una sola unidad) y comercial (pequeñas tiendas de venta al por menor). Por otro lado, presenta las siguientes propiedades a escala local según lo señalado por Stewart y Oke (2009):

- Bajo factor de visión de cielo (*Sky View Factor*) por lo que los cañones urbanos puede retener más calor durante el día y liberarlo en las noches.
- Alto índice de rugosidad
- Elevada fracción del área construida
- Escasas superficies naturales

La morfología del lugar se caracteriza por calles y aceras estrechas.

Para este caso específico las medidas de mitigación más factibles de realizar serían:

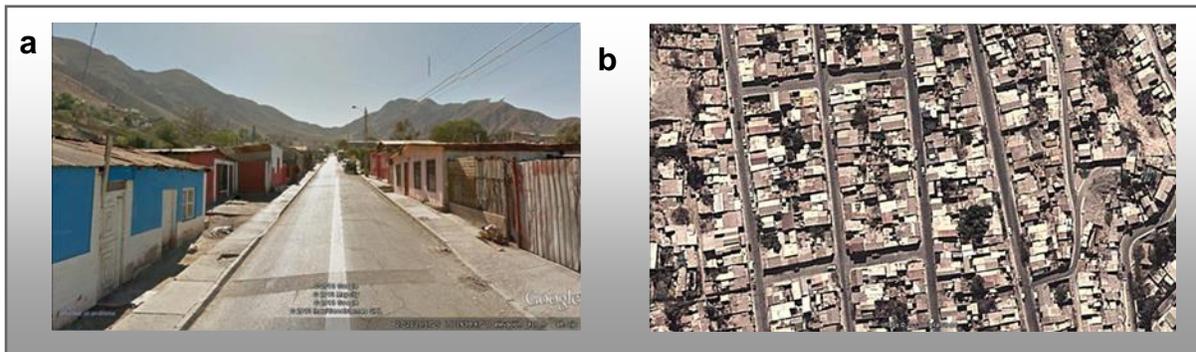
Desde el punto de vista de la propiedades termofísicas de los materiales

- Utilización de pinturas de color blanco o claro en los revestimientos verticales (paredes, fachadas), por lo menos en un 60% de las edificaciones.
- Utilización de pintura de color blanco en áreas asfaltadas principalmente en las veredas o aceras.
- Utilización de pintura color blanco en los techos o cubiertas de las edificaciones.

Desde el punto de vista del uso de la vegetación

- Instalación de especies arbóreas tales como Molle (*Schinus Latifolia*), Visco (*Acacia Visco*) y Pimiento (*Schinus Molle*), por lo menos en un 10-20% de la zona ya que queda restringida por la morfología singular del lugar, calles y aceras estrechas.

Figura N° 42. Imágenes zona alta densidad de baja altura. a) Imagen panorámica b) Imagen vertical.



Fuente: Google Earth, 2013.

Por otro lado la zona de baja densidad de baja altura (figura 43) se caracteriza por el uso residencial y comercial, en cuanto a sus propiedades posee lo siguiente:

- Tiene un *Sky View Factor* que oscila entre 0,7-0,9, es decir su capacidad de enfriamiento es mayor que la zona de alta densidad de baja altura.
- El terreno se clasifica como rugoso a muy rugoso (5-6).

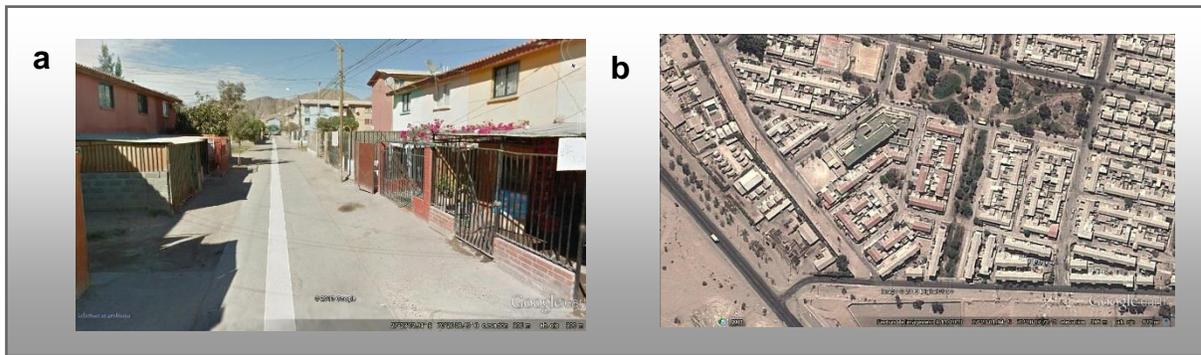
- La fracción del área construida corresponde a un 20-40%.
- La porción de vegetación fluctúa de un 20-60%.

En este caso las medidas de mitigación para contrarrestar el efecto de la isla de calor urbano serían similar desde la estrategia de las propiedades termofísicas de los materiales pues sería factible la aplicación de:

- Utilización de pinturas de color blanco o claro en los revestimientos verticales (paredes, fachadas).
- Utilización de pintura de color blanco en áreas asfaltadas principalmente en las veredas o aceras.
- Utilización de pintura color blanco en los techos o azoteas de las edificaciones.

Se debería ampliar el uso de la vegetación existente, desarrollando áreas como por ejemplo plazas comunitarias, aumentando las plantaciones de árboles nativos como el Molle (*Schinus Latifolia*), Visco (*Acacia Visco*) y Pimiento (*Schinus Molle*) y especies arbustivas como el *Myoporum Laetum*.

Figura N° 43. Imágenes zona baja densidad de baja altura. a) Imagen panorámica b) Imagen vertical.



Fuente: Google Earth, 2013.

Propuesta de medidas para consolidar la IFU.

La zona de generación de las islas de frescor urbano corresponde a las áreas “Extensivo de baja altura” (B7) se proponen medidas de consolidación.

La zona Extensivo de baja altura (figura 44) se caracteriza por presentar edificaciones horizontales y de gran extensión cuya función principal es de uso industrial liviano (almacenaje moderno, distritos de venta al por mayor) y comercial. Según Stewart y Oke (2009) esta zona posee las siguientes propiedades:

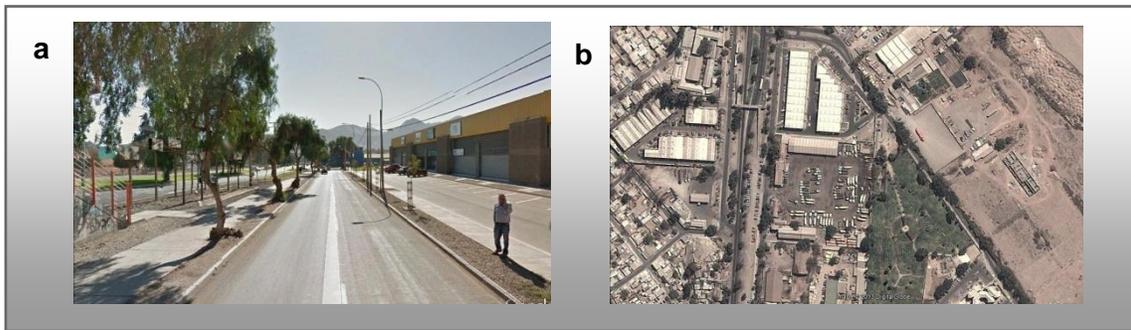
- El factor de visión de cielo fluctúa entre 0,9 – 1.
- El terreno se clasifica como rugoso.
- La porción de la superficie construida es del 30 -50%
- La porción de vegetación es mayor a un 20%.

En este escenario la estrategia para consolidar la isla de frescor urbano se relaciona con la sustitución de las azoteas o techos convencionales (con baja reflectancia y albedo) por techos verdes o blancos. Esta medida ayudaría al aumento del albedo y por lo tanto incrementaría la energía reflejada. En cuanto a los techos verdes las especies que se pueden utilizar son principalmente cactáceas (que no necesitan de abundante agua) y gramíneas como el césped, para este último está el caso de la fabricación de un colector de aguas lluvias en las edificaciones, tal como se aplica en la Ciudad de Chihuahua, México.

El uso de las pinturas blancas en azoteas sería la medida de más bajo costo y estaría cumpliendo con el fortalecimiento de las islas de frescor urbano, aunque los techos verdes además cumplen además con la función de limpieza del aire.

El incremento de la vegetación, principalmente de árboles como el Molle (*Schinus Latifolia*), Visco (*Acacia Visco*) y Pimiento (*Schinus Molle*) contribuiría a generar sombra y mejorar la calidad del aire.

Figura N° 44. Imágenes zona extensivo de baja altura. a) Imagen panorámica b) Imagen vertical.



Fuente: Google Earth, 2013.

Es urgente que las instituciones tanto públicas como privadas tomen en cuenta el conocimiento ambiental y territorial que aporta el estudio del clima urbano local, particularmente de regiones áridas, su conocimiento singular aportará nuevas

herramientas de gestión y planificación. Con el fin de mejorar la calidad de vida de los habitantes y mejorar la sustentabilidad del territorio.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. DISCUSIÓN

Los estudios acerca del fenómeno de isla de calor han aumentado en estas últimas décadas; el análisis de este fenómeno concentra un volumen mayor de investigaciones en ciudades de clima templado o mediterráneo, como por ejemplo las ciudades de Nueva York, Madrid, Tel-Aviv y Santiago entre otras (Carreras *et al.*, 1990). En cambio, las investigaciones en ciudades insertas en contextos áridos o semiáridos son exiguas como es el caso de Mendoza, San Juan, Juárez, Tucson y Beer-Sheba.

Oke (1978) plantea la existencia de diferencias o particularidades en el comportamiento de las islas de calor en distintos climas y ciudades del mundo e indica que la forma e intensidad de este fenómeno varía con el tiempo y el espacio, siendo el resultado de las características meteorológicas, geográficas y urbanas. Por otro lado, Voogt (2008), expone que la intensidad de la isla de calor de la capa dosel varía durante el día, partiendo desde la salida del sol hasta un máximo que oscila entre un punto que sucede unas pocas horas después de la puesta del sol y las horas previas a la madrugada. Generalmente durante el día la intensidad de la ICU de capa dosel es bastante débil, y a veces es negativa (generando una isla fría) en algunas partes de la ciudad, donde altos edificios u otras estructuras proveen sombra extensa, y donde hay una carencia de calentamiento debido al almacenamiento de calor en los materiales de construcción. Por ejemplo en ciudades de clima mediterráneos Sarricolea & Romero (2010) sostienen que en Valparaíso, a pesar de su posición costera y su orografía, la ciudad presenta islas de calor con intensidades de hasta 5° C y son observables durante la noche, al igual que en la ciudad de Santiago (Molina, 2007). En el caso de las ciudades áridas Correa *et al.*, 2010; Besson *et al.*, 2006; Potchter *et al.*, 2011, sostienen que en horas de la tarde se comportan como una isla de frescor, también conocido como efecto “oasis”.

Este trabajo señala la existencia de islas de calor y de frescor urbano en la ciudad de Copiapó. En verano las mayores intensidades de la ICU se manifiestan en horas de la mañana y en horas de la tarde la ciudad se presenta como un sumidero de calor. En cambio en invierno, tanto en la mañana como en la tarde la ciudad se comporta como una isla fría, mientras que en la noche se observa una ameba cálida en comparación al área rural. Por tanto estos resultados respaldarían a lo expuesto por Correa, Besson y Potchter, al indicar que las ciudades áridas, en horas de mayor insolación se convierten en zonas más frescas que su entorno no urbano, debido a su condición de oasis.

En la literatura, existen múltiples investigaciones que muestran las distintas estacionalidades que presenta la máxima intensidad de la isla de calor urbano, aunque según plantean Romero *et al.*, 2011, no existen suficientes informaciones que permitan afirmar que sean más intensas en verano que en invierno. Eliasson, en 1994 señala que es más intensa en verano, pero por el contrario, Liu *et al.*, 2007 mencionan que lo son en invierno. Este trabajo comprueba que la mayor intensidad promedio de isla de calor se registra en época estival, alcanzando a 4,3°C a las 9:00 horas, lo que se reduce a 3,8°C

en las noches de invierno (22:00 horas). Es difícil llegar a un acuerdo respecto a la estacionalidad de la intensidad de la Isla de calor, debido a que la configuración de este fenómeno es muy dinámica y depende de múltiples factores, como tipo de clima, localización geográfica, hora y día de la estación, forma y funciones de la ciudad (Voogt, 2008; Sailor & Lu, 2004; Taha, 1997; Oke, 1995).

En términos generales, la ciudad de Copiapó se configura como una isla de frescor en las tardes y como una isla de calor por las noches. No obstante, a menor escala, se puede apreciar que los diferentes usos del suelo registran temperaturas distintas, por ejemplo el uso residencial respecto al suelo agrícola.

Por otro lado, desde el punto de vista metodológico cabe mencionar que el método de interpolación “kriging ordinario” empleado en este trabajo permite obtener errores de predicción más pequeños que otros interpoladores, al considerar no solo la distancia de un punto al valor muestral, sino que también, la correlación espacial que existe entre los valores de los puntos, considerando además, la dirección (Andrade, 2013). Otro motivo por el cual se utilizó fue porque evita el efecto “ojo de buey” en comparación al interpolador IDW (Smith, 2011). No obstante, el comportamiento espacial de los datos arroja núcleos concéntricos u ojos de buey, que son característicos de las islas de calor en ciudades de clima árido, por ejemplo el Área Metropolitana de Mendoza (Correa *et al.*, 2005; 2006). Por tanto, al realizar estudios sobre configuración de islas de calor y frescor urbano, especialmente en este tipo de clima, es preciso tomar en cuenta esta singularidad.

También, es preciso mencionar la imperiosa necesidad de aumentar la cantidad de estaciones fijas para la medición de temperaturas a escala de dosel urbano, dada la extraordinaria complejidad y variabilidad que presenta el comportamiento térmico de la ciudad de Copiapó.

Por otro parte, Stewart y Oke (2009) proponen una metodología para clasificar los diferentes tipos de climas en áreas construidas como “Zonas Climáticas Locales” con el fin de estandarizarlas y compararlas global. La clasificación está basada en la capacidad de un sitio de modificar su microclima térmico, debido a su particular combinación de radiación, temperatura de emisión superficial, rugosidad, humedad, factor visión de cielo, porcentaje de cobertura vegetal y propiedades antropogénicas. La comparación de temperaturas atmosféricas entre zonas climáticas locales revela que en un día de verano los sitios construidos registran 14 casos de homogeneidad estadísticamente significativa entre sus pares. Entre los sitios construidos y naturales exhiben 16 casos de semejanzas estadísticamente significativas y por último solo entre sitios naturales se registraron 8 casos de similitud. En cuanto al día de invierno, las diferencias disminuyen, ya que en el caso de las áreas construidas aumentan a 23 las de similitud significativa, a 19 entre las construidas y naturales, y por último a solo 3 casos entre zonas naturales. En resumen, en época estival las diferencias estadísticamente significativas de las temperaturas

atmosféricas entre las zonas climáticas locales son mayores, lo que es semejante al resultado obtenido por Smith (2011) en la Ciudad de Santiago.

Por otro lado, Stewart & Oke (2009) señalan que las zonas naturales, sobre todo en horas de mayor insolación, presentan una disminución de sus temperaturas en comparación a las zonas construidas, por lo que los resultados anteriormente mencionados no se ajustarían al modelo. Esto podría deberse a la especificidad introducida por ciudades ubicadas en medio ambientes áridos.

Una vez observado a nivel local la variabilidad de las temperaturas atmosféricas de cada una de las zonas climáticas locales de la ciudad, esta investigación ahonda en la especificidad en la generación de las islas de calor y frescor, incluyendo aspectos como la geometría de las calles y la densidad de las edificaciones. Voogt (2008) manifiesta la importancia de los mecanismos físicos subyacentes a la formación de las islas de calor que proveen las bases para el desarrollo de controles que pueden promover o aliviar las islas de calor. Algunos autores plantean que no es menester de la Geografía el estudio y la aplicabilidad de medidas de mitigación de las islas de calor puesto que el grado de especificidad impediría que las instituciones encargadas de la planificación urbana logren intervenir en dichas zonas. Pero otros autores, como Gray & Finster (2000), avalan el avance en el conocimiento del problema (fenómeno isla de calor) y de las posibles soluciones o medidas de atenuación que se pueden tomar.

Cuadrat *et al.*, 2005 comparten el pensamiento de Gray & Finster (2000) afirmando la importante trascendencia económica y social que en la actualidad tiene el fenómeno urbano y su incidencia sobre el confort y la calidad de vida, además explican el lugar privilegiado que ocupa como tema de estudio y la utilidad de su conocimiento para la gestión ambiental de la ciudad.

Por otro lado, Rosenfeld *et al* (1995) sostienen que las islas de calor en periodo estival pueden aumentar la demanda de energía para aire acondicionado, lo cual libera más calor al aire y también gases de efecto invernadero, degradando así la calidad del aire local. Este fenómeno también afecta en forma directa la salud humana, donde las elevadas temperaturas aumentan el estrés por calor, creando condiciones adecuadas para que se distribuyan las enfermedades transmitidas por vectores (Changnon *et al.*, 1996). Otro de los problemas que afectan al ser humano incluye el bienestar físico y psicológico del individuo, el denominado confort humano, definido por las condiciones del ambiente que rodea al ser humano y que deben ser adecuadas para la actividad que desarrolla. Para Carrieri *et al* (2009) un confort térmico agradable oscila entre los 21°C y 26°C con humedad relativa entre 35 y 70%.

La tarea de controlar los efectos negativos de los climas urbanos áridos obliga a tomar en cuenta en la planificación y construcción de estas ciudades, la consideración especial de la vegetación y las áreas verdes, pero además y dada su ausencia o escasez, otras medidas como diseños acoplados con vientos y brisas, consolidación y construcción de

corredores de enfriamiento, áreas de máxima contrastación térmica para generar brisas, áreas de sombra, colores de los materiales, pavimentos fríos, etc (Contreras, 2008; Correa, 2010; Villanueva *et al.*, 2013).

Por último, el clima urbano de regiones áridas es un tipo singular de climatología de ciudades. Su conocimiento particular aportará nuevas herramientas de gestión a las áreas urbanas consolidadas y de planificación a las futuras áreas de expansión.

5.3. CONCLUSIONES

En esta investigación ha sido posible evidenciar que la ciudad de Copiapó presenta un comportamiento típico de ciudades-oasis, tanto en enero como en julio y en horas de la tarde (mayor insolación) es posible observar islas de frío o frescor urbana, contrariando la teoría general que reserva para los espacios urbanos la generación de ICUs. Por otro lado, la isla de frescor urbana adopta forma concéntrica. Sin embargo, durante la noche las islas de frío son reemplazadas por islas de calor muy intensas, adoptando el comportamiento habitual de las ciudades de climas mediterráneos.

Por otra parte, se logra vislumbrar el comportamiento térmico atmosférico de las zonas climáticas locales (ZCL). En época estival es donde las diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas atmosféricas de las ZCL, se intensifican, en comparación a lo observado en invierno.

También es posible comprobar que las zonas climáticas locales no son totalmente homogéneas, pues existe similitud entre categorías y heterogeneidad intra categoría debido a la gran dispersión de los datos, lo cual insta a readecuar el uso de esta clasificación en ciudades localizadas en climas áridos.

En verano hay algunas zonas climáticas locales que se encuentran estrechamente asociadas al origen de las islas de calor urbano como por ejemplo la categoría alta densidad urbana de baja altura (B3). Por otro lado, el sitio natural cobertura vegetal rasante (N4) se relaciona con el registro de islas de frescor urbano. Para invierno es menos claro establecer asociaciones, principalmente debido a la variabilidad que registran algunas de las zonas climáticas locales. En horas de la mañana y de la tarde, todas las zonas climáticas locales se asocian a la generación de islas de frescor. Por el contrario, por la noche todas las categorías se asocian a la generación de isla de calor urbano.

Por último, es urgente que las instituciones tanto públicas como privadas tomen en cuenta el conocimiento ambiental y territorial que aporta el estudio del clima urbano local, particularmente de regiones áridas, considerando que su conocimiento singular aportará nuevas herramientas de gestión y planificación, con el fin de mejorar la calidad de vida de los habitantes y la sustentabilidad del territorio.

BIBLIOGRAFÍA

ALEXANDRIA. E & PHIL.J. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*. Vol. 43, No. 4, p 480-493.

ALCHAPAR. N, CORREA. E & CANTÓN. M. (2012). Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: potencial para la mitigación de la isla de calor urbana. *Ambiente Construido, Porto Alegre*. Vol. 12, No. 3, p. 107-123.

ALCHAPAR. N, CORREA. E & LESINO. G. (2012). Estrategias de enfriamiento pasivo urbano. Índice de reflectancia solar y relación costo-beneficio en pinturas para fachadas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 16, No. 2, p. 05.67-05.74

ALONSO. M, FIDALGO. M & LABAJO, L. (2004). El clima de las ciudades: Isla de calor en Salamanca. *Revista Salud y Ambiente*. Vol. 4. No 3, p 25-29.

ANDRADE. H & VIERA. R. (2007). A climatic study of an urban green space: the gulbenkian park in lisbon (portugal). *Finisterra*,. Vol. XLII. No. 84, p. 27-46.

ANDRADE. X. (2013). Temperaturas atmosféricas en el área urbana de la ciudad de Valparaíso: aproximaciones a su comportamiento, distribución y factores explicativos. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Universidad de Chile.

BARTON. J. (2006). Sustentabilidad urbana como planificación estratégica. *Revista EURE*. Vol. 32, No. 96, p 27-45

BESSON. C, BLUMBERG. D, BRAZEL. A & SHASHUA-BAR. L. (2005). Combined methods of thermal remote sensing and mobile climate transects in Beer Sheva, Israel. *Proceedings of the ISPRS Joint Conferences 3*.

BERLANGA. V & RUBIO. M. (2012). Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas en SPSS. *REIRE*. Vol.5, No. 2, p 101-113.

BORDERIAS. M & MARTIN. E. (2006). Medio ambiente urbano.

BOWLER. D, BUYUNG-ALI. L, KNIGHT. T & PULLIN. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 97, No. 3, p 147–155.

BRESCIANI. L. (2010). Planificación urbana sustentable en Chile: Políticas, avances y debilidades. Centro de cambio climático. Pontificia Universidad Católica de Chile. Universidad Nacional de Educación a distancia, p 25-67.

CAPELLI. A, PICCOLO. M, CAMPO. A. (2005). Clima urbano de Bahía Blanca. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad del Sur, Argentina. En línea: <http://books.google.cl/books?id=nn5xZdv8jlcC&printsec=frontcover&dq=clima+urbano&hl=es&sa=X&ei=kyU-UefqA4T1qAHlkoC4Ag&ved=0CC0Q6AEwAA> >

CARDENAS. L. (1999). Definición de un marco teórico para comprender el concepto del desarrollo sustentable. Revista de urbanismo No 1, p 1-15

CARDELIN. C & CHAMEIDES. W. (1990). Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone. Journal of Geophysical Research. Vol. 95, p 13971-13979.

CARRASCO. P. (2009). Crecimiento urbano de Copiapó. Causales, patrones y perspectivas. En línea: [Http://issuu.com/nodo-atacama/docs/crecimiento_urbano](http://issuu.com/nodo-atacama/docs/crecimiento_urbano)

CARRERAS. C, MARÍN. M, VIDE. J, MORENO. M & SABÍ. J. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la Isla de calor en Barcelona. Documentos de análisis geográficos. Vol. 17, p 51-73

CARRIERI. S, CODINA. R, MANZANO. E, VIDELA. R, VESPA. M, KOCSIS. C, FERRO. M & FIORETTI. S. (2009). Propuesta de metodología para la calificación bio-ambiental de espacios verdes mediante coeficientes ecofisiológicos. Revista Ciencias Agrarias. Universidad de Cuyo. Tomo XLI. No 1, p 1-2.1

CHANGNON. S, KUNKEL. K & REINKE. B. (1996). Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 77. No. 7, p 1497-1506.

COMRIE. A. (2000). Mapping a Wind-Modified Urban Heat Island in Tucson, Arizona. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 81, No. 10, p 2417- 2426

CORREA. E, RUIZ. M & CANTÓN. M. (2010). Morfología forestal y confort térmico en "ciudades oasis" de zonas áridas. Ambiente construido. Porto Alegre. Vol. 10. No. 4, p 119 -127

CORREA. E, DE ROSA, C & LESINO. G. (2006). Isla de calor urbana. Distribución espacio-temporal de temperaturas dentro del área Metropolitana de Mendoza. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10, No. 11, p 121-128.

CORREA. E, DE ROSA. C & LESINO. G. (2005). Isla de Calor Urbana. Monitoreo y análisis del impacto de la configuración de los espacios sobre la temperatura del aire en la ciudad de Mendoza. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9, No. 11, p 49-54.

CONTRERAS. A, SALAS. J, VELÁSQUEZ. G & QUEVEDO. H. (2008). Determinación de Islas de Calor Urbana en Ciudad de Juárez mediante programa de cómputo. En línea: <http://www.dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2734188.pdf>

CUADRAT. J, DE LA RIVA. J. & MARTÍ, A. (1993). El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre las "islas de calor". Anales de Geografía de la Universidad de Complutense. Ed comp. Madrid. Vol.13, p 127-138.

ELIASSON. I. (1994). Urban-suburban-rural air temperatura differences, related to street geometry. Physical. Geography. Vol. 15, p 11-22.

EVANS. J & DE SCHILLER. S. (2005). La isla de calor en ciudades con clima cálido-húmedo el caso de Tampico, México. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 9, p 11.37-11.42.

FAHMY. M & SHARPLES. S. (2009). On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. Building and Environment. Vol. 44, No. 9, p 1907-1916.

FERNÁNDEZ. F & MARTILLI. A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. Revista Índice. No. 50, p 21.25.

FERNÁNDEZ. R. (2000). Gestión ambiental de ciudades. Teoría crítica y aportes metodológicos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe.

GAGO. E, ROLDAN. J, PACHECO-TORRES. R ,ORDÓÑEZ, J. (2013). The city and urban heat islands: Are view of strategies to mitigate advers eeffects. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 25, p 749-758.

GIRARDET. H. (1995) The Gaia Atlas of Cities. New directions for sustainable urban living. En línea: http://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=V6lFvQaSHtAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=The+Gaia+Atlas+of+Cities.+New+directions+for+sustainable+urban+living&ots=0zQjLB7cxx&sig=2Zhdt-risYY_7r1U_Xq5xyRCIXc

GUERRA. J. (2003). Habitar el desierto: Transición energética y transformación de proyecto habitacional colectivo en la ecología del Desierto de Atacama, Chile. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

GRAY. K & FINSTER. M. (2000). The urban heat island, Photochemical smog, and Chicago: Local features of the problem and polution. Department of Civil Engineering. Northwestern University Evanston. Atmospheric Pollution Prevention Division. U.S. Environmental Protection Agency, p 3-11.

GRIMMONDA, ROTHB, OKE ,AUD, BESTE, BETTSE, CARMICHAELF, CLEUGHG, DABBERDTH, EMMANUELJ, FREITASJ,. FORTUNIACK,. HANNAL,. KLEINM, KALKSTEINN, LIUO, NICKSONP, PEARLMUTTERQ, SAILORR & VOOGTS. (2010). Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). Procedia Environmental Sciences. Vol. 1, p 247- 274.

INSTITUTO INTERAMERICANO PARA LA INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO GLOBAL. (2007). Urbanización, Cambios Globales en el Ambiente y Desarrollo Sustentable en América Latina, p 33-61.

IRARRÁZVAL. F. (2011). Clasificación y evaluación ambiental de zonas termales en el transecto entre las comunas de Pudahuel y Las Condes y su relación con el mercado inmobiliario. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Universidad de Chile.

JONSSON. P. (2004). Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborone, Botswana. International journal of climatology. Vol. 24, No. 10, p 1307-1315.

JULIÁ. C, MONTECINOS. S & MALDONADO. A. (2008). Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Atacama. Capitulo 3: características climáticas de la Región de Atacama. Ediciones Universidad de la Serena, p 25-42.

KRÜGER. E, PEARLMUTTER. D & RASIA. F. (2010). Evaluating the impact of canyon geometry and orientation on cooling loads in a high-mass building in a hot dry environment. Applied Energy. Vol. 87, No. 7, p 2068-2078.

LEFF. E. (1998). Saber ambiental: Sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder. PNUMA. En línea:
<http://books.google.es/books?hl=en&lr=&id=k5LtOJyQIIQC&oi=fnd&pg=PA225&dq=saber+ambiental&ots=jZOC5Yd198&sig=QvDtGwRKYZCo2ljc2wqAiRqudyE#v=onepage&q=saber%20ambiental&f=false>

LIU. W, JI. C, ZHONG. X, JIANG. X & ZHENG. Z. (2007). Temporal characteristics of the Beijing urban heat island. Theoretical and Applied Climatology. Vol. 87. No 1-4, p 213-221.

MEJÍA. F, MESA. F, POVEDA. G, VÉLEZ. J, HOYOS, C, MANTILLA. R, BARCO. J, CUARTAS. A, MONTOYA. M, & BOTERO. B. (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. Revista DYNA. Vol. 1, p 7-26.

MOLINA. M. (2007). Efectos de los tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área metropolitana de Santiago sobre la generación y comportamiento de micro islas de calor. Memoria para optar al título de Geógrafa, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, p 13-24.

MORENO. M. (1999). Climatología urbana. Texto docente. N° 160. Ediciones de la Universidad de Barcelona. Cap IV, p 29-40.

NAHAR. N, SHARMA. P & PUROHIT. M. (1999). Studies on solar passive cooling techniques for arid areas. PERGAMON. Energy Conversion & Management. Vol. 40, No. 1, p 89-95.

NARITA.K, SUGAWARA. H, YOKJOYAMA. H, MISAKA. I & MATSUSHIMA. D. (2009). Cold air seeping from an urban Green space, Imperial Palace, in central Tokyo. The seventh International Conference on Urban Climate.

OLTRA. C & MARÍN. R. (2013). Los retos en la adaptación al cambio climático en entornos urbanos. Revista de Sociología. Vol. 98, No 2, p 311-330.

OKE. T. (1982). The energetic basis of the urban heta island. Quart. J. Roy. Meteorological society. En línea: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49710845502/abstract>

OKE. T. (2004) Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and observing methods, Report N°81, World Meteorological Organization (2004).

ORTÚZAR. S. (2010). Introducción a la planificación territorial. Universidad Central. En línea: <http://www.ucentral.cl/fid/pdf/Introduccion%20a%20la%20planificacion.pdf>

PAPPARELLI. A, KURBÁN. A, CÚNSULO. M & MONTILLA. E. (1998). Interdependencia entre isotermas e isohumas con la modalidad de la estructura urbana. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 2, No. 2, p 11.17-11.20.

PAPPARELLI. A, KURBÁN. A & CÚNSULO. M. (2011). Isla de calor y ocupación espacial urbana en San Juan, Argentina: análisis evolutivo. Cuadernos de Vivienda y Urbanismo. Vol. 4, No. 7, 110-120.

PEÑA. L. (2010). Diseño bioclimático en espacios abiertos para zonas áridas urbanas en el Desierto Chihuahuense. Revista sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto. Vol. 3, No. 3, p 9-29.

POTCHTER. O, YAAKOV. Y, OREN. G, 2006. The Magnitude of the Urban Heat Island of a City in an Arid Zone: The Case of Beer Sheva, Israel. Proceeding of the 6th International Conference on Urban Climate, Gothenburg, Sweden, p 450-453.

POTCHTER. O, YAAKOV. Y, SHASHUA-BAR. L, COHEN.S, TANNY. J & BAR.TUKIEL. P. (2011). The use of urban vegetation as a tool for heat stress mitigation in hot and arid

regions, case study: Beer Sheva, Israel. *Climate Science and Urban Design – a Historical and Comparative Study* funded by the ESRC under grant, p 1-13.

POTCHTER. O, COHEN. P & BITAN. A. (2006). Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*. Vol. 26, No. 12, p 1695–1711.

ROMERO. H, IRARRÁZVAL. F, OPAZO. D, SALGADO. M & SMITH. P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *Revista EURE*. Vol. 36, No. 109, p 36-41.

ROMERO. S, MORALES. C & NÉMIGA. X. (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de Climatología*. Vol.11, p 1-10.

ROSENFELD. A, AKBARI. H, BRETZ. S, FISHMAN. B, KURN. D, SAILOR. D & TAHA. H. (1995). Mitigation of urban heat islands: Materials, utility programs, *Energy and Buildings*. Vol. 22, No. 3, p 255-265.

ROSENFELD. A, HASHEM , JOSEPH & ROMM (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*. Vol. 28, No.1, p 51-62.

SALAS. C. 2013. La cosecha de agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas. Tesis para optar al título de Ingeniero en restauración Forestal, Universidad de Chapingo, México

SAARONI. H & ZIV. B. 2010. Estimating the Urban Heat Island Contribution to Urban and Rural Air Temperature Differences over Complex Terrain: Application to an Arid City. *American Meteorological Society. Journal of applied meteorology and climatology*. Vol. 49, No. 10, p 2159- 2166.

SAMPIERI. R, FERNÁNDEZ. C & BAPTISTA. P. (2003). Metodología de la Investigación. Editorial McGraw-Hill Interamericana. México, D. F. Tercera Edición, p 343-391.

SÁNCHEZ. J, SALMERÓN, SÁNCHEZ. F, ÁLVAREZ. S & MOLINA. J. (2012). Ventilación natural: estudio aerodinámico mediante CFD de extractores pasivos y captadores de viento. *Revista Ingeniería de Construcción*. Vol. 27, No. 1, p 40-56.

SARRICOLEA. P & ROMERO. H. (2008). Análisis de la sustentabilidad ambiental del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago: Relaciones espaciales entre temperaturas superficiales y niveles socioeconómicos de la población. *Revista Anales. Sociedad chilena de ciencias geográficas*.

SARRICOLEA. P, ALISTE. E, CASTRO. P Y ESCOBEDO. C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*. Vol. 8, p 71-84.

SARRICOLEA. P, ROMERO. H, (2010). Isla de calor urbanas confort climático y justicia socioambiental en la ciudad de Valparaíso. Revista Anales. Sociedad chilena de ciencias geográficas.

SILLMAN. S & SAMSON. P. (1995). The impact of temperature on oxidant formation in urban, polluted rural and remote environments. Journal of Geophysical Research. Vol.100, No. D6, p 11497-11508.

SMITH. P. (2011). Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental, Universidad de Chile, Programa interfacultades.

SMITH. P & MÉNDEZ. M. (2010). Análisis comparativo de la isla de calor urbana de invierno y verano de la ciudad de Santiago, años 2007 y 2009. Anales. Sociedad chilena de ciencias geográficas.

STEWART. I. (2009). urban climate field sites by “local climate zones”. Urban Climate News. No 34, p 8-11.

STEWART. I & OKE. T. (2009). Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: The case of Nagano, Japan. The Seventh International Conference on Urban Climate. University of British Columbia, Vancouver, Canada.

STEWART. I & OKE. T. (2009). Newly developed “thermal climate zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. 8th Symposium on Urban Environment, p 1-6.

SUSCA. T, GAFFIN. S & DELL’OSSO. G. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. Environmental Pollution. Vol. 159, No. 8-9, p 2119-2126.

TAHA. H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. Energy and Buildings. Vol. 25, No. 2, p 99-103.

TAKEBAYASHI. H & MORIYAMA. M. (2007). Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. Building and Environment. No. 42, p 2971–2979.

TUMINI. I. (2009). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. Ponencia Sustainable building conference.

TUMINI. I. (2012). El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudios de casos en Madrid. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, España, p 15- 58.

TYLER MILLER G. (2007). Ciencia ambiental. Desarrollo sostenible. Un enfoque integral. Octava edición. Thomson, p 100-108.

VÁSQUEZ. A. (2008). Vegetación urbana y desigualdades socioeconómicas en la comuna de Peñalolén, Santiago de Chile. Una perspectiva de justicia ambiental. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental, Universidad de Chile, Programa interfacultades, p 16-23.

VÁSQUEZ, A. (2014). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: El caso del corredor ribereño del Río Mapocho en Santiago de Chile. Enviada a Revista de Geografía Norte Grande.

VILLANUEVA. J, RANFLA. A & QUINTANILLA. A. (2013). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. En línea: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642013000100003&script=sci_arttext

VOOGT. J & OKE. T. (2003). Thermal remote sensing of urban areas. Remote Sensing of Environment. Vol. 86, No. 3, p 370–384.

VOOGT. J. (2008). Islas de calor: Ciudades más calientes. American Institute of Biological Sciences. En línea: <http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/voogt.html#primer>

YEVES. A. (1993). La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Climatología y desertificación. Fundamentos de climatología. En línea: <http://books.google.es/books?id=KBP4UfsRytMC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>>

ZINZI. M & AGNOLI. S. (2012). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. Energy and Buildings. Vol. 55, p 66–76.

ANEXOS

Anexo 1. Tipología de clasificación ZCL.

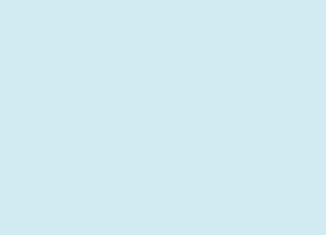
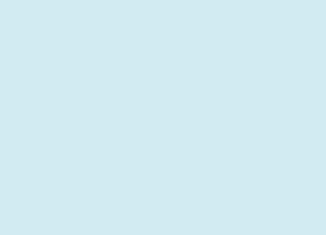
Nombre	Abreviatura	Descripción	Ejemplo
Alta densidad de media altura	B2	Sus edificaciones están muy próximas unas de otras separadas por calles estrechas, se distribuyen de manera uniforme, posee calles pavimentadas, cuyo tráfico vehicular es moderado	
Alta densidad de baja altura	B3	Presencia de viviendas de uno a tres pisos, las cuales se emplazan muy cercanas unas de otras. El acceso a ellas, está dado por las principales avenidas, pero además por calles estrechas.	
Alta densidad de baja altura / peso ligero de baja altura	B3-B8	Zonas de transición entre la urbanización de alta densidad de baja altura y la zona de peso ligero de baja altura.	
Baja densidad de gran altura	B4	Las construcciones son de fines turísticos, poseen alturas superiores a 10 pisos, presenta espacios abiertos entre las edificaciones.	
Baja densidad de media altura	B5	Conjuntos de edificios de 3 a 8 pisos de altura. Esta categoría posee un 20% a un 40% de cobertura vegetal.	
Baja densidad de gran altura/ Baja densidad de media altura	B4-B5	Zonas de transición que tiende a concentrar edificaciones de entre tres y ocho pisos, las que se presentan como la matriz dominante.	

Nombre	Abreviatura	Descripción	Ejemplo
Baja densidad de baja altura	B6	Se caracteriza por los pequeños edificios de uno a tres pisos, separados pero cercanos. Edificaciones dispuestas a lo largo de calles de anchura media, a menudo en modelo de rejilla.	
Baja densidad de baja altura/urbanización dispersa	B6-B9	Corresponde a la transición urbanización de baja densidad de baja altura y urbanización dispersa.	
Extensivo de baja altura	B7	Los edificios se extienden horizontalmente no hacia arriba, tienen uno a tres pisos de altura y son bien separados por superficies abiertas pavimentadas.	
Peso ligero de baja altura	B8	Son principalmente viviendas de un piso, fabricadas con materiales ligeros como paja, madera y de paredes y techos delgados.	
Urbanización dispersa	B9	Las edificaciones son pequeñas de baja y mediana altura menores a ocho pisos, pocos caminos y estrechos.	
Cobertura arbórea compacta	N1	Representa concentraciones vegetales de alta densidad con especies arbóreas y arbustivas de copa desarrollada.	

Nombre	Abreviatura	Descripción	Ejemplo
Cobertura arbórea dispersa	N2	Homologable a parques Urbanos compuestos por especies arbóreas y césped	
Matorral y arbusto	N3	Por lo general son relictos de espacios naturales.	
Cobertura vegetal rasante	N4	Integra principalmente a los paños de cultivo, canchas de fútbol, presenta escasas a inexistentes construcciones	
Suelo desnudo	N5	Corresponde a sitios eriazos, terrenos al borde de autopistas, borde de río, descanso y barbecho agrícola. Se encuentran desprovistos de vegetación y con un alto grado de degradación.	

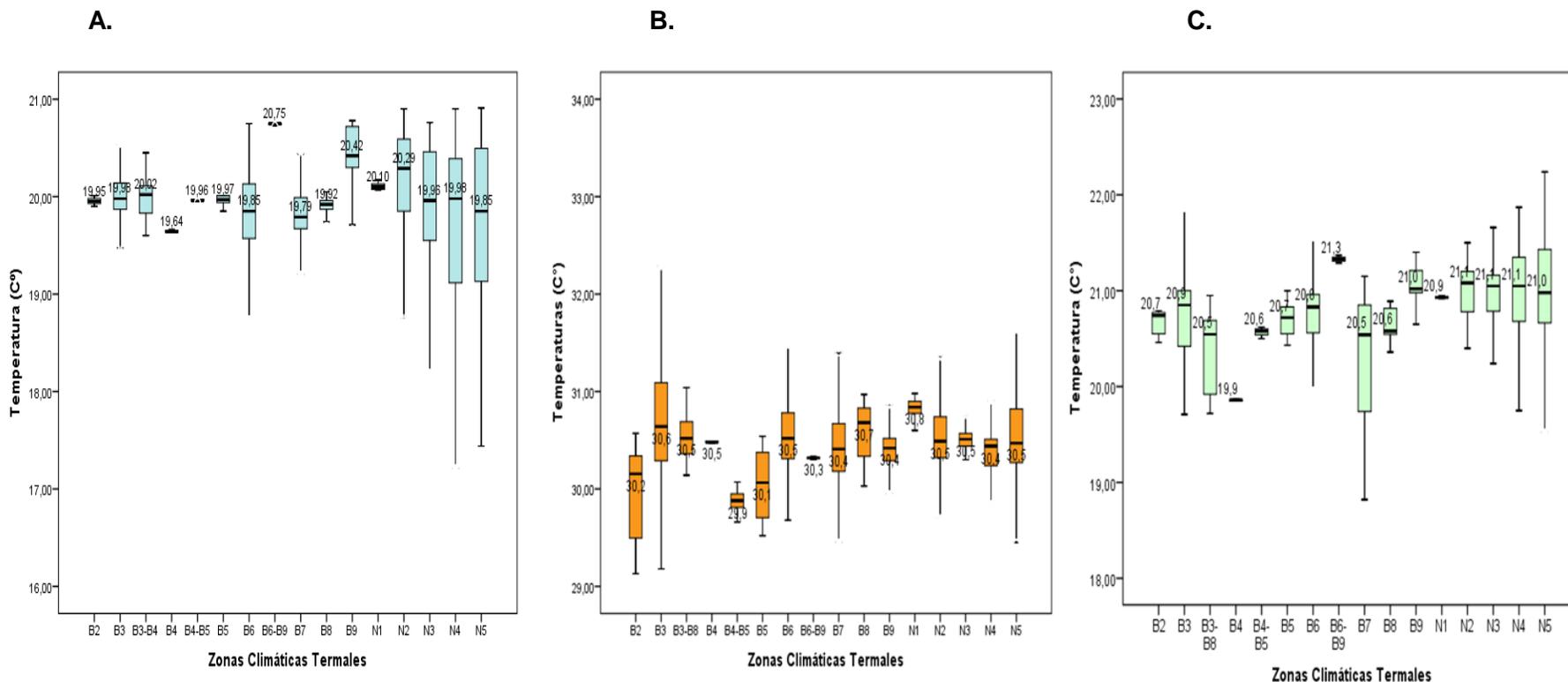
Anexo 2. Caracterización de las estaciones fijas.

NOMBRE ESTACIONES	USO DE SUELO	IMAGEN PANORAMICA	IMAGEN OBLICUA
DATALOGGER 1	VIVIENDA Y EQUIPAMIENTO		
DATALOGGER 2	VIVIENDA Y EQUIPAMIENTO MIXTO		
DATALOGGER 3	VIVIENDA Y EQUIPAMIENTO MIXTO		
DATALOGGER 4	VIVIENDA Y EQUIPAMIENTO MIXTO		
DATALOGGER 5	VIVIENDA Y EQUIPAMIENTO MIXTO		

NOMBRE ESTACIONES	USO DE SUELO	IMAGEN PANORAMICA	IMAGEN OBLICUA
DATALOGGER 6	VIVIENDA Y EQUIPAMIENTO		
DATALOGGER 7	ÁREA CENTRAL		
DATALOGGER 9	AGRÍCOLA		
DATALOGGER 10	VIVIENDA Y EQUIPAMIENTO MIXTO		
ESTACIÓN SAN FERNANDO	AGRÍCOLA		
ESTACIÓN BODEGA	AGRÍCOLA		

Anexo 3. Distribución de las temperaturas atmosféricas por ZCL el 3 de enero.

A) Temperatura del aire a las 9:00 horas. B) Temperatura del aire a las 16:00 horas. C) Temperatura del aire a las 22:00 horas



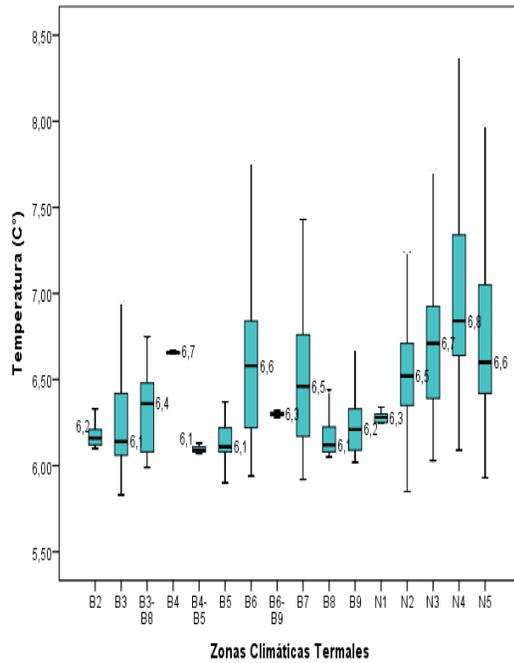
Código	Nombre	N° muestra (n)	Código	Nombre	N° muestras (n)
B2	Alta densidad de media altura	184	B7	Extensivo de baja altura	1651
B3	Alta densidad de baja altura	8495	B8	Peso ligero de baja altura	127
B3-B8	Alta densidad de baja altura y peso ligero de baja alt.	746	B9	Urbanización dispersa	643
B4	Baja densidad de gran altura	5	N1	Cobertura arbórea compacta	31
B4-B5	Baja densidad de gran y media altura	53	N2	Cobertura arbórea dispersa	878
B5	Baja densidad de media altura	140	N3	Matorral y arbusto	871
B6	Baja densidad de baja altura	5102	N4	Cobertura vegetal rasante	6707
B6-B9	Baja densidad de baja altura y Urbanización dispersa	43	N5	Suelo desnudo	5468

Fuente: elaboración propia

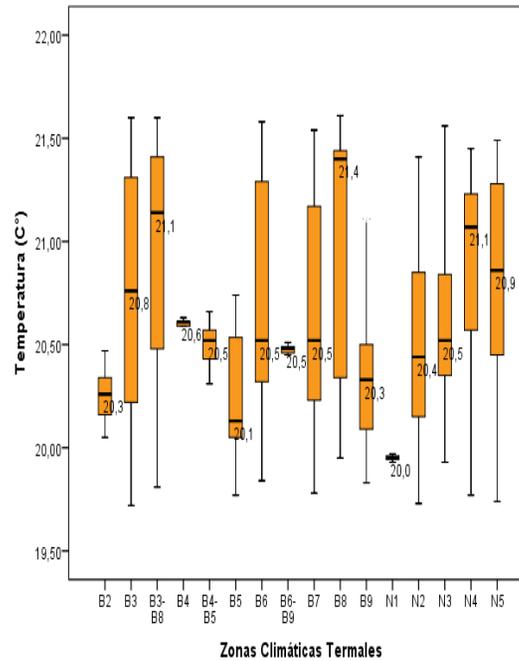
Anexo 4. Distribución de las temperaturas atmosféricas por ZCL el 18 de julio.

A) Temperatura del aire a las 9:00 horas. B) Temperatura del aire a las 16:00 horas. C) Temperatura del aire a las 22:00 horas.

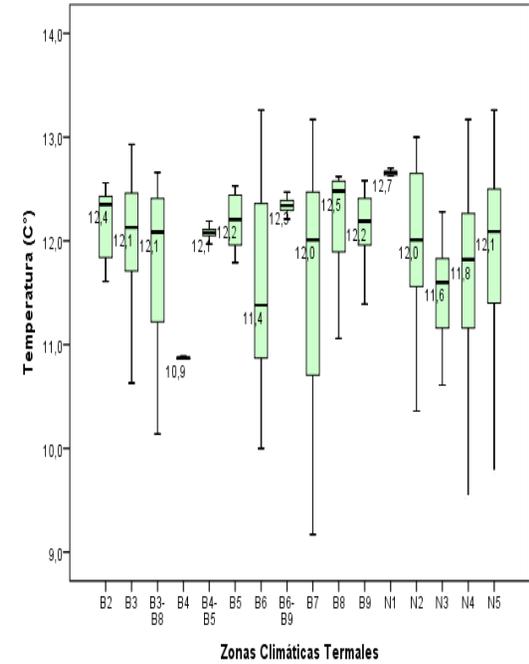
A.



B.



C.



Código	Nombre	N° muestra (n)	Código	Nombre	N° muestras (n)
B2	Alta densidad de media altura	184	B7	Extensivo de baja altura	1651
B3	Alta densidad de baja altura	8495	B8	Peso ligero de baja altura	127
B3-B8	Alta densidad de baja altura y peso ligero de baja alt.	746	B9	Urbanización dispersa	643
B4	Baja densidad de gran altura	5	N1	Cobertura arbórea compacta	31
B4-B5	Baja densidad de gran y media altura	53	N2	Cobertura arbórea dispersa	878
B5	Baja densidad de media altura	140	N3	Matorral y arbusto	871
B6	Baja densidad de baja altura	5102	N4	Cobertura vegetal rasante	6707
B6-B9	Baja densidad de baja altura y Urbanización dispersa	43	N5	Suelo desnudo	5468

Fuente: elaboración propia

