

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y
MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



**Análisis entre la Temperatura Superficial y
Temperatura Atmosférica en la Formación de
Islas de Calor Urbano y Efectos de las
Coberturas Naturales en la Ciudad de
Concepción**

Carlos Felipe Cifuentes Verdugo

Habilitación Profesional
Para optar al Título de Geofísico

Concepción Chile
Agosto 2017

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y
MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**Análisis entre la Temperatura Superficial y
Temperatura Atmosférica en la Formación de
Islas de Calor Urbano y Efectos de las
Coberturas Naturales en la Ciudad de
Concepción**

Carlos Felipe Cifuentes Verdugo

Habilitación Profesional
Para optar al Título de Geofísico

Profesor Guía:
Dra. Carolina Rojas Quezada

Comisión:
Dr. Arturo Belmonte, Cristóbal Lamarca, Francisco de la Barrera



Agosto 2017

Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a mis padres María y Juan por el apoyo y confianza que depositaron en mí desde el primer día en que decidí partir este largo camino. Agradecer a mis abuelos por estar siempre preocupados de mi persona, y a mis hermanos que me soportaban cuando llegaba estresado desde Concepción.

Agradecer infinitamente a mi profesora guía, la Dra. Carolina Rojas, quién primeramente me dio la posibilidad de realizar la práctica profesional junto a ella y ahora la habilitación profesional, siempre con una muy buena disposición y por sobre todo empatía.

Agradecer al proyecto FONDECYT N° 1150459 por la orientación y contactos que facilitaron en enorme medida la adquisición de información relevante para llevar a cabo esta investigación.

Además, agradecer a Matías Volke y Cristián Reyes por la buena amistad que entablamos desde el primer día en que nos conocimos, fueron de gran ayuda para soportar los estresantes días de certámenes.

Por último, agradecer a Viviana Hernández por facilitar de manera desinteresada los datos de temperaturas que utilizamos en este trabajo.

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 construidos, 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.

El presente trabajo tiene como objetivo identificar y analizar las islas de calor urbano presentes en el Gran Concepción en un día caluroso de verano, mediante el uso de estaciones meteorológicas y herramientas de percepción remota, de manera de poder comprender la relación existente entre temperaturas superficiales y temperaturas atmosféricas. Para finalmente discernir los efectos que acarrea el proceso de urbanización y cómo contribuye al fenómeno de isla de calor urbano en las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén.

El trabajo se realizó en primera instancia mediante el uso de imágenes satelitales Landsat de los años 2000, 2014 y 2017. Estas imágenes fueron corregidas radiométricamente con el objetivo de poder realizar un análisis de coberturas sobre ellas. En base a estas imágenes, se realizó una clasificación de coberturas del área de estudio, con la cual se elaboró un análisis de coberturas en términos de dimensiones espaciales y temperaturas superficiales. Además, se desarrolló el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) con el objeto de estimar la cantidad de vegetación presente en la zona. Así, mediante la implementación de seis perfiles tipo transectas sobre el área de estudio, se calculó la correlación existente entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial, cuyos resultados muestran una fuerte anticorrelación.

Posteriormente, se trabajó con datos de temperatura por hora provenientes de una red de estaciones meteorológicas, localizadas en las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén. Estos datos datan desde el 1 de septiembre de 2010 al 30 de septiembre de 2011, se escogió un día dentro de este conjunto de datos para realizar nuestro estudio. La elección del día se realizó en base a evidencias de estudios pasados y la fecha de adquisición de nuestras imágenes satelitales.

Una de las principales contribuciones de este estudio es la realización de mapas de isotermas para cada hora del día, los que posteriormente se correlacionaron con la temperatura superficial, de modo de establecer la relación entre la temperatura del suelo y la temperatura del aire, para determinar el efecto que produce la sustitución de coberturas naturales como ocurre en el proceso de urbanización. La correlación máxima fue de 0.42 a las 19:00 horas, esto conlleva a que las magnitudes máximas de la isla de calor atmosférica perduren dos horas más, ayudando a sostener el fenómeno por un mayor tiempo sobre la zona.

Logramos identificar una isla de calor superficial con una magnitud de 5°C y una isla de calor atmosférica emplazada principalmente en los sectores del aeropuerto Carriel-Sur y Nonguén con una intensidad máxima de 4.6°C a las 14 horas en Concepción. También identificamos una isla de frescor urbano a las 8:00 y 20:00 horas. Esta última posee una temperatura de 5°C menos, a la que se registra en el aeropuerto Carriel-Sur en la misma hora.

Los principales resultados del estudio indican que un decremento de la vegetación, genera un aumento de la temperatura superficial, contribuyendo a la formación de islas de calor superficiales, las cuales ayudan a mantener por mayor tiempo las intensidades máximas de la isla de calor atmosférica presente en el área de estudio. Por lo tanto, la vegetación juega un rol fundamental en la atenuación temporal de este fenómeno, lo que debería ser considerado en las planificaciones de las futuras construcciones urbanas, para así contribuir tanto a la protección del medio ambiente como a la calidad de vida de los habitantes.

Índice de contenidos

Índice de figuras	IX
Índice de tablas.....	XII
Índice de anexos.....	XIV
1. Presentación	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Área de estudio	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
1.5 Hipótesis.....	7
2. Marco Teórico.....	8
2.1 Crecimiento urbano y sus efectos.....	8
2.1.1 Efectos del crecimiento urbano	9
2.1.2 Medio ambiente urbano	9
2.2 Clima Urbano: Fenómeno de las islas de calor urbano (ICU)	10
2.2.1 Islas de calor urbano (ICU)	10
2.2.2 Tipos de islas de calor	10
2.2.3 Causas de las islas de calor	12
2.2.4 Efectos de las islas de calor urbano	15
2.3 Teledetección aplicada al estudio de la superficie terrestre	17
2.3.1 Teledetección.....	17
2.3.2 Conceptos básicos de la teledetección.....	19
2.3.3 Teledetección aplicada al estudio de la ciudad y su clima	20
2.3.4 Misión Landsat.....	21
2.3.5 Clasificación de imágenes	23
3. Marco metodológico	26
3.1 Materiales.....	26
3.1.1 Imágenes Landsat.....	26
3.1.2 Datos de temperatura	27
3.2 Metodología	29
3.2.1 Selección de la información	29
3.2.2 Ajuste de las imágenes satelitales.....	31
3.2.3 Estimación de la temperatura superficial.....	35

3.2.4 Clasificación supervisada.....	36
3.2.5 Clasificación de la temperatura superficial	39
3.2.6 Análisis de coberturas.....	39
3.2.7 Estimación de la magnitud de la isla de calor urbano superficial	40
3.2.8 Análisis de temperaturas atmosféricas	41
3.2.9 Estimación de la magnitud de la isla de calor urbano atmosférica.....	41
3.2.10 Correlaciones	42
4. Resultados	44
4.1 Corrección de imágenes satelitales	44
4.2 Estimación de la temperatura superficial	45
4.3 Clasificación de coberturas mediante clasificación supervisada.....	46
4.3.1 Clasificación supervisada imagen del año 2000	46
4.3.2 Clasificación supervisada imagen del año 2014	48
4.3.3 Clasificación supervisada imagen del año 2017	49
4.3.4 Análisis de coberturas.....	51
4.4 Clasificación de temperaturas superficiales	52
4.5 Análisis de coberturas.....	54
4.5.1 Análisis de áreas	54
4.5.2 Análisis de temperaturas superficiales por cobertura.....	57
4.5.3 Estimación de la ICU superficial del Gran Concepción	59
4.6 Análisis espacial de la isla de calor atmosférica.....	60
4.6.1 Mapa Isotermas 8:00 horas	61
4.6.2 Mapa Isotermas 12:00 horas	62
4.6.3 Mapa Isotermas 14:00 horas	63
4.6.4 Mapa Isotermas 18:00 horas	65
4.6.5 Mapa Isotermas 20:00 horas	66
4.6.6 Mapa Isotermas 23:00 horas	67
4.6.7 Magnitud de la ICU atmosférica por hora, en un día caluroso de verano ...	68
4.7 Correlación entre temperatura superficial y temperatura atmosférica	69
4.8 Correlación entre temperatura superficial y cantidad de vegetación.....	73
4.8.1 Año 2014.....	73
4.8.2 Año 2017.....	79
4.8.3 Comparación entre perfiles 2014-2017	86
5. Discusión y Conclusiones.....	88
5.1 Discusión.....	88
5.2 Conclusiones	91

5.2.1 Limitantes.....	93
Bibliografía.....	96
Anexos	101
Anexo 1: Clasificación de temperaturas superficiales año 2014	101
Anexo 2: Mapa de isothermas de las 1:00 horas	102
Anexo 3: Mapa de isothermas de las 3:00 horas	102
Anexo 4: Mapa de isothermas de las 10:00 horas	103
Anexo 5: Mapa de isothermas de las 16:00 horas	104

Índice de figuras

Figura 1: Área de estudio.	6
Figura 2: Ilustración que muestra la reducción de la evapotranspiración que presentan las zonas urbanas en relación a zonas vegetadas.	13
Figura 3: Energía Solar versus longitud de onda que llega a la superficie terrestre.	13
Figura 4: Variación del consumo eléctrico en la ciudad de Nueva Orleans con respecto al incremento de la temperatura.	16
Figura 5: Espectro electromagnético de la luz.	18
Figura 6: Estructura general de los procesos involucrados en la aplicación de técnicas de percepción remota.	19
Figura 7: Características de las bandas espectrales de OLI y TIRS de Landsat 8 comparadas con las bandas espectrales de ETM+ de Landsat 7.	22
Figura 8: Ubicación espacial de las estaciones meteorológicas consideradas en el presente trabajo.	28
Figura 9: Ejemplo de una imagen del satélite Landsat 8 en bruto, perteneciente a la banda 3.	31
Figura 10: Resultado de las correcciones especificadas en la sección 3.2.2.3 aplicadas a una imagen del satélite Landsat 8 con fecha enero de 2017.	35
Figura 11: Estimación de la temperatura superficial de la figura 10.	36
Figura 12: Resultado de las correcciones aplicadas a las tres imágenes satelitales utilizadas en el presente estudio.	44
Figura 13: Temperaturas superficiales del Gran Concepción, de izquierda a derecha podemos observar la imagen del satélite Landsat 7, siguiendo con las dos imágenes del satélite Landsat 8.	45
Figura 14: Clasificación supervisada aplicada a la imagen del satélite Landsat 7 con fecha el 18 de Enero de 2000.	47
Figura 15: Tabla entregada por el software IBM SPSS, la cual nos muestra el valor del coeficiente Kappa que posee la clasificación supervisada de la imagen del año 2000.	47
Figura 16: Tabla de tabulación cruzada entregada por el software IBM SPSS para la clasificación supervisada de la imagen del año 2000.	47

Figura 17: Clasificación supervisada realizada a la imagen del satélite Landsat 8 con fecha el 1 de Febrero de 2014.	48
Figura 18: Tabla entregada por el software IBM SPSS, la cual nos muestra el valor del coeficiente Kappa que posee la clasificación supervisada de la imagen del año 2014.	49
Figura 19: Tabla de tabulación cruzada entregada por el software IBM SPSS para la clasificación supervisada de la imagen del año 2014.....	49
Figura 20: Clasificación supervisada aplicada a la imagen Landsat 8 adquirida el 24 de enero de 2017.	50
Figura 21: Tabla generada por el software IBM SPSS, la cual nos muestra el valor del coeficiente Kappa que posee la clasificación supervisada de la imagen del año 2017.	50
Figura 22: Tabla de tabulación cruzada entregada por el software IBM SPSS para la clasificación supervisada de la imagen del año 2017.....	51
Figura 23: Se muestra a la izquierda de la imagen la clasificación supervisada del año 2000 (figura 14). A la derecha se muestra la clasificación de temperaturas superficiales de la imagen del satélite Landsat del año 2000. .	53
Figura 24: La imagen de la izquierda muestra la clasificación supervisada del año 2017 (figura 19). A la derecha se muestra la clasificación de temperaturas superficiales realizada a la imagen del satélite Landsat 8 del año 2017.	53
Figura 25: Gráfico de barras que muestra el área total de superficie urbana registrada por las clasificaciones supervisadas de los años 2000 y 2017, las cuales poseen un 87% y 97% de confiabilidad, Respectivamente.	54
Figura 26: Gráfica que muestra la transformación espacial que ha experimentado la cobertura suelo desnudo en el periodo 2000-2017	55
Figura 27: Gráfica que muestra la transformación espacial que ha experimentado la cobertura humedal en el periodo 2000-2017.	56
Figura 28: Mapa de Isotermas del día 24 de Enero del 2011 a las 8:00 horas en el centro de Concepción sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de Febrero de 2014.....	62
Figura 29: Mapa de Isotermas del día 24 de Enero del 2011 a las 12:00 horas en el centro de Concepción sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de Febrero de 2014.....	63
Figura 30: Mapa de Isotermas del día 24 de Enero del 2011 a las 14:00 horas en el centro de Concepción sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de Febrero de 2014.....	65

Figura 31: Mapa de Isotermas del día 24 de Enero del 2011 a las 18:00 horas en el centro de Concepción sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de Febrero de 2014.....	66
Figura 32: Mapa de Isotermas del día 24 de Enero del 2011 a las 20:00 horas en el centro de Concepción sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de Febrero de 2014.....	67
Figura 33: Mapa de Isotermas del día 24 de Enero del 2011 a las 23:00 horas en el centro de Concepción sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de Febrero de 2014.....	68
Figura 34: Comportamiento de la magnitud de la ICU atmosférica a lo largo de un día caluroso (24/01/2011) en el centro de Concepción.	69
Figura 35: Mapa que muestra la ubicación espacial de las estaciones meteorológicas y los setenta puntos aleatorios que se ocuparon para extraer la temperatura superficial y la temperatura atmosférica del área de estudio.	70
Figura 36: Comportamiento que experimenta la correlación entre la temperatura superficial de una hora específica del día y la temperatura atmosférica a lo largo de un día de verano.	72
Figura 37: Mapa NDVI y mapa de clasificación de temperaturas superficiales del año 2014.....	73
Figura 38: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 1 (Año 2014).	75
Figura 39: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 2 (Año 2014).	76
Figura 40: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 3 (Año 2014).	76
Figura 41: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 4 (Año 2014).	77
Figura 42: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 5 (Año 2014).	78
Figura 43: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 6 (Año 2014).	79
Figura 44: Mapa NDVI y mapa de clasificación de temperaturas superficiales del año 2017.....	80

Figura 45: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 1 (Año 2017).	82
Figura 46: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 2 (Año 2017)	82
Figura 47: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 3 (Año 2017).	83
Figura 48: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 4 (Año 2017).	84
Figura 49: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 5 (Año 2017).	85
Figura 50: Gráfico superior presenta valores de NDVI y el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el perfil 6 (Año 2017).	86
Figura 51: Mapa que muestra el área de estudio que tuvimos que ocupar para realizar la interpolación de las temperaturas atmosféricas.....	95

Índice de tablas

Tabla 1: Principales diferencias entre las islas de calor superficiales e islas de calor atmosféricas.	12
Tabla 2: Resumen de las características principales de los satélites Landsat 7 y Landsat 8.....	23
Tabla 3: Datos de las imágenes adquiridas desde la USGS.	27
Tabla 4: Nombre, comuna y comienzo de mediciones de las estaciones meteorológicas que se utilizaron en el presente estudio.....	28
Tabla 5: Coordenadas Path y Row del Gran Concepción.	29
Tabla 6: Porcentaje de nubosidad que posee cada imagen adquirida.	29
Tabla 7: Patrones meteorológicos del día 24 de enero del 2011 para el Gran Concepción.	31

Tabla 8: Valores de las constantes termales para los satélites Landsat 7 y Landsat 8.....	36
Tabla 9: Áreas de entrenamiento escogidas para realizar la clasificación supervisada.....	37
Tabla 10: Tabla utilizada como ejemplo para observar como realizamos el proceso de validación para cada punto aleatorio.	38
Tabla 11: Interpretación del coeficiente Kappa según Douglas Altman (1991).	39
Tabla 12: Área total de superficie urbana en los años 2000 y 2017.	54
Tabla 13: Área total de cobertura vegetal en los años 2000-2014-2017.	55
Tabla 14: Área total de cobertura suelo desnudo en los años 2000-2014-2017.	56
Tabla 15: Área total de cobertura humedal en los años 2000-2014-2017.	56
Tabla 16: Área total de cobertura arena en los años 2000-2014-2017.....	57
Tabla 17: Variables estadísticas de la temperatura superficial con respecto a la clasificación de coberturas del año 2000.	58
Tabla 18: Variables estadísticas de la temperatura superficial con respecto a la clasificación de coberturas del año 2014.	58
Tabla 19: Variables estadísticas de la temperatura superficial con respecto a la clasificación de coberturas del año 2017.	59
Tabla 20: Estimación de la intensidad de la ICU superficial registrada en el centro de Concepción por las tres imágenes satelitales.	60
Tabla 21: Factores meteorológicos relevantes en la formación de islas de calor urbano presentes en el área de estudio los días en que fueron capturadas las imágenes satelitales.....	60
Tabla 22: Magnitudes de la ICU atmosférica de la capa dosel, alcanzadas sobre el área de estudio a cada hora del día 24 de Enero de 2011.	68
Tabla 23: Coeficientes de correlación existentes entre la temperatura superficial de una hora específica del día (1 de febrero de 2014) y la temperatura atmosférica para cada hora del día 24 de enero de 2011.....	71
Tabla 24: Valores de correlación entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial para cada uno de los seis perfiles en el año 2014.	74
Tabla 25: Características de longitud y alcance de comunas que poseen los tres perfiles en análisis.	74

Tabla 26: Magnitudes de las correlaciones existentes entre cantidad de vegetación y temperatura superficial para cada uno de los perfiles sobre la imagen del 24 de enero del 2017. 80

Tabla 27: Valores de correlación entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial para los perfiles 1, 2 y 3 en el año 2017..... 81

Tabla 28: Comparación de los valores de correlación entre cantidad de vegetación y temperatura superficial en los años 2014-2017 para perfiles en estudio..... 87

Tabla 29: Tabla de comparación de los valores de NDVI promedio, de todos los perfiles en estudio entre los años 2014-2017. 87

Índice de anexos

Anexo 1: Mapa de clasificación de temperaturas superficiales del año 2014, junto al mapa de clasificación supervisada del mismo año. 101

Anexo 2: Mapa de Isotermas a las 10:00 horas en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, sobre mapa de clasificación supervisada del año 2014. 102

Anexo 3: Mapa de Isotermas de las 3:00 horas en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, sobre mapa de clasificación supervisada del año 2014. 103

Anexo 4: Mapa de Isotermas de las 10:00 horas en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, sobre mapa de clasificación supervisada del año 2014. 104

Anexo 5: Mapa de Isotermas de las 16:00 horas en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, sobre mapa de clasificación supervisada del año 2014. 105

1. Presentación

1.1 Introducción

Las ciudades constituyen el hábitat por excelencia para los seres humanos (Romero *et al.*, 2008), por ende tenemos que ser conscientes de lo que ello significa y trae como consecuencias. La alteración del medio ambiente para la creación de ciudades, asoma como uno de los principales puntos negativos de la urbanización, ya que como veremos conlleva una serie de efectos no deseados que afectan tanto al medio ambiente como a las personas.

El desarrollo y crecimiento urbano es una realidad que se presenta en todas ciudades del mundo. Según datos de las naciones unidas, en 1960 el 30% de la población mundial vivía en ciudades, esta cifra aumentó considerablemente al 54% en el año 2014 y se espera que para 2050 el 66% de población mundial viva en una zona urbana. Norte América lidera el porcentaje de personas viviendo ciudades con un 82%, seguido por América latina con un 80% y Europa con un 73% (ESA, 2014). Edificaciones, carreteras e infraestructuras de todo tipo, reemplazan los suelos naturales y la vegetación. Este proceso no es ajeno a la ciudad de Concepción en Chile, la cual ha desarrollado una expansión urbana de 4377 [ha] entre los años 1961 y 2006 (Almendras, 2009). Entonces, las superficies que fueron alguna vez permeables y húmedas se convierten en impermeables y secas, generando así que el desarrollo urbano no solo se limite a cambiar la morfología del terreno, sino que además modifica las condiciones climáticas y ambientales, debido principalmente a la modificación de los balances de radiación entre el suelo y el aire. Este impacto antropogénico, conduce a la formación de las llamadas islas de calor urbano (ICU). La isla de calor urbano es el fenómeno que experimenta una ciudad, la cual presenta un exceso de calor en su atmósfera urbana y/o en su superficie, en relación a su entorno rural circundante no urbanizado (Hernández, 2013).

Las islas de calor urbano han sido estudiadas por científicos en todo el mundo, de hecho a fines del siglo XIX, Luke Howard ya hablaba del clima de las ciudades en su libro “sobre el clima de Londres deducido de observaciones meteorológicas”, en 1818 descubrió que la ciudad estaba más caliente en comparación al campo, esto tras registrar las temperaturas medias mensuales entre el centro de la ciudad y el área rural de Londres (Fernández, 2009). De este modo, comprobó la existencia de una isla de calor que atribuyó al uso intensivo de los combustibles fósiles de la época: carbón y leña (Capelli *et al.*, 2005), pero fue en 1958 cuándo Manley utilizó por primera vez el concepto de isla de calor urbano (“the urban heat island”) (Romero *et al.*, 2011).

El fenómeno de isla de calor urbano en sí es un fenómeno no estático, puesto que varía en el tiempo, ya que depende de algunos factores tales como, el clima de la zona urbana, posición geográfica, geometría de ciudad, intensidad del viento, estacionalidad, hora del día y la morfología de la ciudad (Gómez, 2014).

Las islas de calor urbano comienzan a tomar relevancia cuando se demuestra que existe una clara relación entre los factores atmosféricos y la calidad de vida urbana. Actualmente, más del 50% de la población mundial vive en una zona urbana, y aunque el área ocupada por las ciudades es apenas el 2% de la superficie total del planeta, consumen más del 75% de los recursos naturales y de ellas proceden más del 80% de las emisiones de gases contaminantes hacia la atmosfera (Fernández, 2012). 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, 2012).

Por tanto, este proyecto se centra en el análisis de la isla de calor urbano superficial y atmosférica del área metropolitana de Concepción, mediante la utilización de técnicas de percepción remota, utilizando imágenes del satélite Landsat y una red de estaciones meteorológicas instaladas en el área de estudio. Mediante las mencionadas imágenes satelitales, se determina la evolución temporal de las diferentes coberturas superficiales presentes en el área de estudio, dado el análisis temporal de las imágenes entre los años 2000 y 2017 del mismo periodo estival (enero-febrero), esto porque es en verano en donde se puede apreciar de mejor manera el fenómeno de isla de calor urbano. Además, con las bandas termales de los satélites, podremos observar de qué manera las diferentes coberturas presentes en la zona, contribuyen a la generación de islas de calor superficiales y/o atmosféricas. Además, esta investigación aporta en el análisis de la correlación entre las temperaturas superficiales y las temperaturas del aire de dicha zona, con el objeto de identificar el periodo y los lugares en donde se producen las tasas de transferencias de calor más elevadas de la ciudad, para así determinar la contribución de estas zonas en la generación de las islas de calor urbano. Finalmente se calculó la correlación entre cantidad de vegetación y temperatura superficial, con el fin de determinar el aporte que genera el reemplazo de coberturas vegetadas por construcciones urbanas a la formación de islas de calor urbano.

1.2 Planteamiento del problema

América Latina es una de las regiones mayormente urbanizadas del mundo. En tres décadas la casi totalidad de la población rural ha pasado a vivir en las metrópolis, ciudades intermedias y pequeñas, de tal manera que el medio ambiente urbano, constituye hoy el principal nicho ecológico para la población del continente (Romero *et al.*, 2008). En Chile, según las cifras del último Censo de Población y Vivienda, realizado en el año 2002, el 87% de la población se encuentra viviendo en zonas urbanas (INE, 2003) siendo una de las áreas más urbanizadas Concepción Metropolitano.

El aumento de la población es una de las causas de la expansión espacial de la ciudad, la cual provoca una serie de cambios en los usos y coberturas del suelo, donde prevalece el avance de las superficies artificiales sobre superficies

naturales, desencadenando una serie de alteraciones en el medio ambiente: aumento de la temperatura superficial, degradación de hábitats, alteraciones en el ciclo hidrológico, por nombrar sólo algunas (Moscoso, 2007). Si bien, la ciudad cumple un rol fundamentalmente ligado al desarrollo y crecimiento económico de un país, además de ser el espacio donde confluyen múltiples relaciones sociales y productivas, inevitablemente genera efectos adversos sobre el paisaje que la contiene, lo que deriva en numerosos desafíos en términos ambientales (Hernández, 2013).

Estos efectos a su vez afectan la calidad de vida, debido a que el medio ambiente urbano funciona como un sistema híbrido y heterogéneo (Pickett et al., 1997). Entonces por lo anterior es que Fernández García (2009) sostiene que la ciudad, constituye la forma más radical de transformación del paisaje natural. Su aparición da lugar a un espacio eminentemente antropizado, en el que la actuación del hombre se manifiesta en una doble vertiente; por un lado, las modificaciones que introduce directa y conscientemente con su mayor manifestación en el plano y la morfología urbana, mientras que por otro lado, las que indirectamente derivan de este mismo espacio construido y cuyas manifestaciones más significativas son la contaminación de la atmósfera urbana y el aumento térmico en relación a las zonas próximas, fenómeno conocido como islas de calor urbano (García et al., 2009).

Las islas de calor urbano (ICU) son las áreas de la ciudad que registran la diferencia de temperaturas más elevadas que se observen, 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). La isla de calor se forma cuando el aire caliente tiende a acumularse en el centro de la ciudad, debido a la concentración de edificios y de calles pavimentadas. Este aire caliente se eleva, arrastrando consigo la carga de contaminación; luego se expande hacia los bordes de la ciudad, y se enfría. De este modo, en los bordes de la ciudad el aire más frío fluye de nuevo hacia el centro, cerca de la superficie del suelo, formando así un sistema circulatorio autocontenido, que sólo se podrá alterar o romper por el efecto de un viento fuerte (Kenneth y Warner, 2004 en Romero, 2011).

En las ciudades con clima relativamente frío, o una estación fría, la isla de calor puede producir beneficios tales como menores costos de calefacción, menor riesgo en las carreteras, derivado de la formación del hielo superficial o niebla, y condiciones favorables para el crecimiento de plantas y hábitat animal. Sin embargo, las islas de calor en climas o estaciones relativamente cálidas, aumentan el malestar y potencialmente la amenaza del estrés térmico y mortalidad, incrementando la utilización de aire acondicionado y con ello, la demanda de energía (Oke, 2012).

Es importante tener en cuenta que las islas de calor urbano se pueden clasificar en dos tipos: Islas de calor urbano superficial (ICUs) e islas de calor urbano atmosféricas (ICU), ambas directamente relacionadas. Sin embargo, existen diferentes técnicas para identificarlas, en este sentido las islas de calor urbano superficial se identifican generalmente con sensores remotos, mientras que las islas de calor atmosférico se identifican mediante estaciones meteorológicas,

localizadas tanto en el núcleo de la ciudad como en la periferia de la zona urbana (Environmental Protection Agency, 2008).

Las mediciones tradicionales de la isla de calor han sido principalmente mediante pares de estaciones meteorológicas que representan las áreas urbana y rural (Kukla et al., 1986; Karl et al., 1988 en Sarricolea, 2014), es por ello que existe escasa información de la configuración espacial de las temperaturas en las ciudades, lo cual implica un desafío en cuanto a poseer una mayor cobertura y resolución de las temperaturas urbanas. Es por ello que los estudios de climatología urbana a alta resolución (espacial) son escasos (Trujillo, 2012). Sin embargo, con el advenimiento del sistema de información geográfica (SIG y GIS, por sus siglas en inglés) y los satélites de percepción remota se ha hecho posible el estudio de la temperatura superficial de ciudades desde escalas locales a globales. Los sensores remotos proveen una excelente metodología para analizar espacial y temporalmente la distribución de la temperatura superficial, ya que las imágenes satelitales pueden abarcar extensas áreas de la superficie terrestre (Trujillo, 2012).

La mayoría de los estudios que han examinado el efecto de la vegetación sobre zonas urbanas en la temperatura superficial ha sido mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), han demostrado una correlación negativa entre la temperatura superficial y vegetación urbana abundante (Weng et al., 2004; Chen et al., 2006; Mallik et al., 2008; Sundara Kumar et al., 2012 en Baca, 2014). Sin embargo, es importante señalar que la relación entre la temperatura del aire y de la superficie, no está completamente consensuada. Así, por citar casos extremos, están aquellos que señalan la estrecha y positiva relación entre las temperaturas del aire y de superficie (Arnfield, 2003; Weng, 2009; Nichol, 1994 en Hernández, 2013), y otros que se refieren a nulas relaciones entre ellas (Weller y Thorne, 2001 en Hernández, 2013).

Según la Agencia de Protección Medio Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), en un día caluroso de verano, la temperatura de las superficies urbanas, como techos, concreto y asfalto pueden ser entre 27°C a 50°C más calientes que el aire circundante sobre ellas. Es por esto que existe una transferencia de calor sensible entre la superficie terrestre y el aire circundante a la superficie (Taha, 1997). Pero existe otro factor situado, justo sobre la superficie que también genera una transferencia de calor hacia la atmósfera, el llamado calor antropogénico el cual es originado por medios de transporte, calefacción y todo tipo de instrumentos que liberen calor, los cuales se centran principalmente en las ciudades. En este estudio despreciaremos el calor antropogénico, ya que según Taha (1997) el calor antropogénico es pequeño y hasta despreciable en comparación al calor emitido por las coberturas terrestres.

En el caso del área metropolitana de Concepción, Hernández (2013) ha identificado una isla de calor atmosférica situada en el centro de Concepción. Sin embargo, el análisis de dicho trabajo se realiza en torno a las cuatro estaciones del año, por lo que a nuestro criterio se hace necesario realizar un análisis temporal más detallado, con el objetivo de discernir el comportamiento del fenómeno durante un espacio temporal más acotado, como en un día

caluroso de verano, el cual exacerbe los efectos de la ICU. Otro aspecto importante es incorporar información satelital en el análisis de dicho fenómeno, puesto que nos ayudará a comprender de qué manera el cambio de uso de suelos aporta a las ICU y cómo los espacios naturales nos ayudan a atenuar dicho fenómeno. Por lo tanto, esta investigación se centra en el análisis tanto superficial como atmosférico de la zona de estudio, generando un análisis que no solo se limita a la identificación de la ICU, sino que entregue entendimiento de las causas y efectos de dicho fenómeno, para así desarrollar conocimientos que permitan enfrentarnos a este fenómeno urbano.

1.3 Área de estudio

Este estudio se localiza geográficamente en el área metropolitana de Concepción (AMC) o también llamado Gran Concepción, localizado al noroeste de la octava región, es una de las tres áreas metropolitanas de Chile. Está compuesta por doce comunas con un total de 902,712 habitantes, de los cuales el 97% corresponde a población urbana (INE, 2003). Donde, las comunas de Talcahuano, Concepción, Hualpén, Penco, Chiguayante y San Pedro de la Paz, presentan el sector de mayor centralidad del sistema urbano Gran Concepción, concentrando los servicios públicos y privados de jerarquía regional y nacional (Romero et al., 2006). El estudio solo se centrará en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, debido a la acotada cobertura espacial que posee la red de estaciones meteorológicas y las imágenes satelitales.

Talcahuano destaca por ser uno de los centros pesqueros e industriales más importantes del país, mientras que Concepción es la capital de la región del Biobío, constituyendo uno de los centros de servicios educacionales, financieros, comerciales y turísticos más relevantes de Chile. Hualpén por su parte, está fuertemente dominada por el complejo industrial de la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) (Hernández, 2013).

Según datos del censo del año 2002, la comuna de Concepción contaba con un total de 216,061 habitantes, de los cuales el 98.1% vivía en la ciudad. Talcahuano por su parte contaba con un total de 163,626 habitantes, donde el 99.6% de ellos habitaban la zona urbana. Hualpén es la comuna en estudio con menos habitantes, contabilizando en el año 2002 un total de 86,722 personas, de las cuales el 99.1% habitaba en la zona urbana (INE, 2002). Estos datos reflejan una zona de estudio cuya urbanización está casi completa.

La zona de estudio está fuertemente marcada por un intenso desarrollo industrial relacionado con la actividad forestal, pesquera, petroquímica, energética, agroindustrial y metal-mecánica (INE, 2012). Desde el punto de vista geomorfológico el área de emplazamiento del Gran Concepción se caracteriza por la presencia de la cordillera de Nahuelbuta, el río Bío-Bío, el borde costero, humedales, acantilados, lagunas y cerros islas. Estas características del territorio le otorgan un importante grado de complejidad a la relación entre la ciudad y su entorno (Romero et al., 2006).

Un factor importante para el fenómeno de isla de calor es el clima, el cual se caracteriza por ser templado marítimo de costa oeste con Influencia mediterránea. Posee una temperatura promedio de 17°C en enero (verano) y 8°C durante julio (invierno), con una precipitación media anual de 1332.6 mm, concentrándose un 70% de éstas entre los meses de mayo y agosto (Azócar y Sanhueza, 2000).

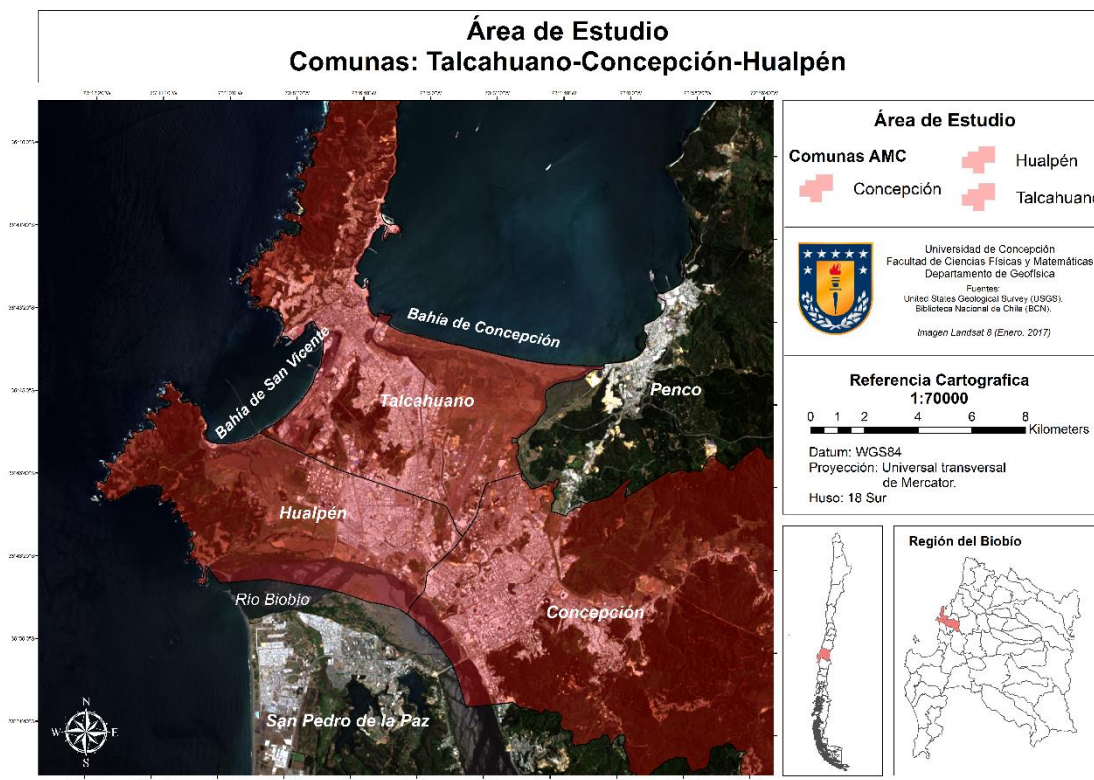


Figura 1: Área de estudio (Fuente: Elaboración propia con imagen Landsat 8, Enero 2017).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la temperatura superficial y atmosférica de las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción de modo de establecer una relación entre el tipo de cobertura superficial y la temperatura atmosférica, para así determinar la relevancia que posee el reemplazo de coberturas naturales en la generación de las islas de calor urbano y al mismo tiempo cuantificar la magnitud de dicho fenómeno.

1.4.2 Objetivos específicos

- Adquirir información de sensores remotos adecuados para determinar un rango de análisis temporal de imágenes satelitales Landsat de diferentes años, en la base de datos gratuito del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).
- Realizar las correcciones necesarias de las imágenes satelitales Landsat de tal modo de ajustar la información espacial.
- Determinar y realizar la estimación de la temperatura superficial de las imágenes Landsat.
- Realizar una clasificación supervisada de tipo pixel semilla para cada imagen Landsat, con el objetivo de establecer las categorías de uso de suelos.
- Analizar la distribución de temperaturas atmosféricas en la zona de estudio.
- Analizar el comportamiento de la temperatura superficial con respecto al uso de suelos, principalmente vegetación y humedales por cada imagen.
- Analizar el comportamiento de la temperatura atmosférica con respecto a la temperatura superficial, mediante el uso de estaciones meteorológicas y bandas termales de las imágenes satelitales.
- Analizar el comportamiento de la temperatura superficial con respecto a la cantidad de vegetación, mediante la implementación de perfiles tipo transectas sobre áreas específicas de la zona de estudio que logren exacerbar la correlación entre estas dos variables.
- Determinar el rol que juega el proceso de urbanización en la generación de islas de calor superficiales y atmosféricas en el área de estudio.

1.5 Hipótesis

El reemplazo de coberturas naturales como vegetación y humedales por coberturas artificiales ligadas al proceso de urbanización en el área metropolitana de Concepción propicia la generación de islas de calor superficiales y atmosféricas. Además, existirá una fuerte correlación entre la temperatura superficial y la temperatura del aire, especialmente en un día caluroso de verano, de modo que las islas de calor superficiales influyen en la generación de las islas de calor atmosféricas en el Gran Concepción.

2. Marco Teórico

2.1 Crecimiento urbano y sus efectos

Las áreas urbanas constituyen un dinámico vínculo entre las sociedades locales y los procesos sociales, económicos, políticos y ambientales globales. En las ciudades finalmente se concentran los mayores capitales financieros, la manufactura de bienes de consumo y producción y los principales comercios y servicios (Hernández, 2013). A lo largo de la historia, la formación y expansión de las ciudades ha obedecido a diversos factores, en los que el crecimiento natural de la población, la migración rural-urbana y el incremento económico de los países han sido los principales motores que han impulsado su crecimiento desmesurado (Moscoso, 2007).

La expansión espacial de las ciudades es un proceso que no tiene límites físicos claros e incluso se puede definir como ilimitada, y afecta a las metrópolis, ciudades grandes, intermedias y pequeñas en todo el país. Dicha expansión responde a factores que son parte de componentes naturales y del espacio cultural (Romero, 2006). Las ciudades se expanden incesantemente alrededor de todo su perímetro. Se expanden masivamente de manera atomizada a muy baja densidad. La expansión no es perceptible a simple vista sino que con los años esos terrenos se van densificando y los asentamientos de la periferia van, gradualmente, anexándose a la mancha urbana de la ciudad. Pero no son grandes extensiones territoriales las que repentinamente se incorporan a la ciudad, sino pequeñas porciones de terreno –unas cuantas manzanas semipobladas– las que día a día, a lo largo de todo el año, se van aglutinando a la ciudad (Pineda, 2011).

Los procesos de expansión espacial de las ciudades, sin importar su forma, causan daños irreversibles al medio ambiente natural. Esta es la razón por la cual el crecimiento descontrolado de las ciudades se asocia a la insustentabilidad ambiental. Las áreas urbanas implican pérdidas de importantes suelos agrícolas o el desaparecimiento de áreas naturales que prestan valiosos servicios ambientales. Las mayores y crecientes distancias entre los hogares, lugares de trabajo y centros de servicios aumentan crecientemente las distancias y los tiempos de recorrido y con ello, la producción de contaminantes atmosféricos provocados por el combustible que se requiere para sostener complejos sistemas de transporte. El paisaje se cubre con cemento, cambiando completamente los flujos de energía y materia (Moscoso, 2007). Entonces el proceso de expansión de la ciudad es un hecho inevitable que no puede ser dejado al azar. De lo contrario, se acentuarán los efectos indeseados que este proceso conlleva, afectando la calidad de vida de las personas (Hernández, 2013).

2.1.1 Efectos del crecimiento urbano

La altísima concentración de habitantes y actividades económicas hace que el Gran Concepción se constituya en uno de los núcleos urbanos más importantes del país, lo que se ha manifestado en la necesidad cada vez mayor de contar con áreas para localizar actividades residenciales, comerciales, industriales y de infraestructura. Dicho proceso generalmente se basa en la ocupación de sectores naturales, semi-naturales, forestales o agrícolas, los cuales desempeñan valiosos servicios ambientales (Vásquez, 2005).

El desarrollo de las ciudades implica la artificialización de los suelos en desmedro de espacios vegetacionales, lo que provoca anomalías en el sistema natural, que afectan al hombre y a la naturaleza. Esto se debe esencialmente a las “conexiones mecanicistas entre lo humano y lo natural” ya que la riqueza existente en la diversidad de las interrelaciones entre los componentes naturales y antrópicos le dan una complejidad importante al ecosistema, lo que finalmente se traduce en una degradación de éste (PICKETT et al., 1997).

Vásquez, Riveros y Romero (2005) señalan que los efectos ambientales observados en ciudades chilenas muestran que cada ciudad posee rasgos característicos como consecuencia de su tamaño, sus sitios de emplazamiento, evolución histórica, estructura y funciones urbanas, también se aprecian rasgos comunes, indistintamente de las características mencionadas. Todas ellas presentan complejos y variados procesos de crecimiento espacial, altos niveles de segregación socio-ambiental; importantes concentraciones de contaminantes en el aire, agua y suelos; islas y archipiélagos de calor, ventilación y humedad; y un relevante proceso de degradación de la ecología de sus paisajes como consecuencia de la ilimitada expansión de las áreas construidas sobre parches y corredores vegetales.

Estos efectos pueden ser monitoreados y evaluados de diversas formas, que van desde campañas de terreno al uso de la teledetección. Varios autores (entre ellos Pauleit et al., 2005, y Romero, 2005 en Vásquez et al., 2005), han propuesto el uso de imágenes satelitales como un método relativamente de bajo costo para obtener información ambiental de grandes superficies y con una buena resolución temporal. Los trabajos se han centrado en la utilización de indicadores extraídos del procesamiento de imágenes de satélite que se relacionen con características ambientales relevantes. Dentro de los efectos ambientales negativos causados por la urbanización que se han detectado de esta forma, se encuentran la generación de isla de calor, debido a la sustitución de superficies vegetadas por superficies construidas, pérdida de islas frías, y homogeneización de las cubiertas, pérdida de humedad en los suelos, urbanización de los paisajes, y desaparición de superficies cubiertas con altas concentraciones de biomasa y productividad biológica (Vásquez et al, 2005).

2.1.2 Medio ambiente urbano

El medio ambiente urbano se define como el lugar donde se llevan a cabo las relaciones entre el medio físico (agua, aire, suelo), el medio construido (edificaciones, plazas, parques), los elementos biológicos y la sociedad (población) (Moscoso, 2007).

Por ende, el medio ambiente urbano corresponde al lugar en donde se desarrollan los flujos entre el medio natural y el hombre. Se trata de aquellas áreas en las cuales la población vive en altas densidades o donde la infraestructura construida logra cubrir grandes extensiones de la superficie natural (Hernández, 2013).

2.2 Clima Urbano: Fenómeno de las islas de calor urbano (ICU)

2.2.1 Islas de calor urbano (ICU)

La principal modificación que causa la ciudad sobre el clima es el fenómeno denominado “Isla de Calor Urbano” (Urban Heat Island) (Gómez, 2014).

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, 1982). Otros autores definen la isla de calor urbano como la “diferencia entre la temperatura del área urbana y del área no urbana” (Gómez, 2014), y como un “oasis invertido”, donde las temperaturas del aire y de las superficies urbanas son más cálidas que aquellas en sus entornos rurales” (Gómez, 2014).

2.2.2 Tipos de islas de calor

Voogt (2008), establece que las ICU se forman debido a las diferencias en las tasas de calentamiento y enfriamiento de las ciudades con relación a sus entornos.

Dentro de la amplia gama de estudios realizados, se distinguen tres tipos de Islas de Calor:

2.2.2.1 Isla de calor superficial (ICS)

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 (Trujillo, 2012).

2.2.2.2 Isla de calor de la capa de dosel (ICCD)

Primero es importante aclarar qué es la capa de dosel. 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 (Voogt, 2008).

Así, la isla de calor de la capa de dosel (ICCD), es el fenómeno de islas de calor que se produce en el espacio comprendido entre el suelo y los tejados de los edificios. 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 (Gómez, 2014).

2.2.2.3 Isla de calor de la capa de perímetro (ICCP)

Este tipo de isla de calor alude a lo que ocurre en la capa límite urbano (Urban Boundary Layer). Este tipo de isla de calor 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 (Gómez, 2014). Ósea este tipo de isla de calor se genera producto de la ICS y ICCD.

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 (Tabla 1) que permiten generar lo que se conoce como temperatura de emisión superficial (Smith, 2011).

Característica	Isla de Calor Superficial	Isla de Calor Atmosférica
Desarrollo Temporal	• Presente todo el día y la noche. • Más intensa durante el día y en verano.	• Puede ser pequeña o no existir durante el día. • Intensa durante la noche, el amanecer y el invierno.
Mayor intensidad	Mayor variación espacial y temporal: • Día: 10 a 15°C • Noche: 5 a 10°C	Menor Variación: • Día: -1 a 3°C • Noche: 7 a 12°C
Método de identificación más utilizado	Medición Indirecta: • Percepción Remota	Medición Directa: • Estaciones meteorológicas fijas. • Atravesadores móviles.
Representación	• Imagen Termal	• Mapa de Isotermas • Gráfico de Temperaturas

Tabla 1: Principales diferencias entre las islas de calor superficiales e islas de calor atmosféricas (Fuente: Elaboración propia desde U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2008).

2.2.3 Causas de las islas de calor

Las islas de calor urbanas son causadas por el desarrollo de los centros urbanos y los cambios en las propiedades térmicas e irradiantes de su infraestructura. Por ejemplo, los edificios altos disminuyen la velocidad a la cual las ciudades se enfrían en las noches. A diferencia del calentamiento global, las islas de calor son cambios climáticos locales y no globales, ya que sus efectos se limitan a una escala mucho menor, pero los efectos de ambos fenómenos son similares, ya que pueden inducir a un mayor consumo energético, afectar la salud y perjudicar los elementos ambientales de un lugar (EPA, 2008).

Aquí nombraremos los principales factores que gatillan el desarrollo de las islas de calor urbano según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA):

2.2.3.1 Reducción de la vegetación

Los árboles y la vegetación proveen sombra que ayuda a mantener la temperatura superficial baja. Adicionalmente, por medio de un proceso llamado evapotranspiración, donde las plantas liberan vapor de agua al ambiente, regulan la temperatura del aire. Como consecuencia de la pérdida de cobertura vegetal y su sustitución por superficies impermeables como andenes, techos y

vías, el agua se dirige directamente a acueductos y alcantarillados evitando que esta se evapore para mantener la humedad en el ambiente, lo que contribuye a la regulación de la temperatura del aire. Consecuentemente, esto origina un crecimiento en las temperaturas tanto superficiales como atmosféricas (Ver figura 2).

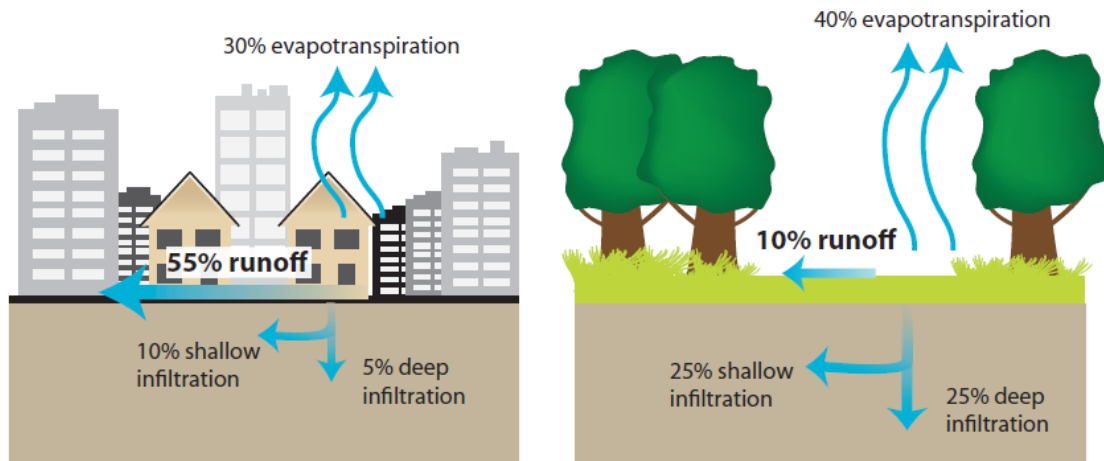
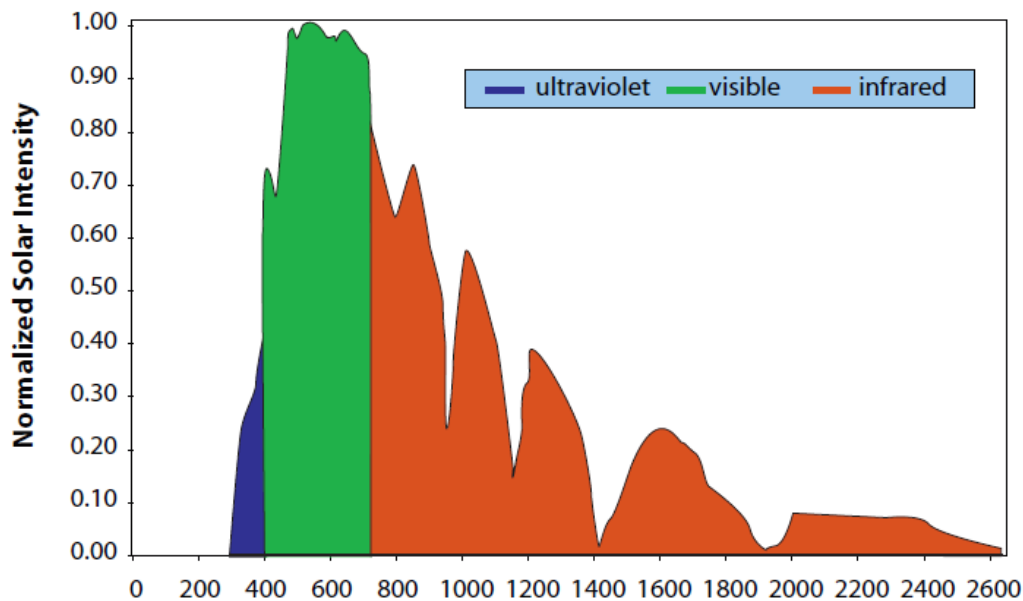


Figura 2: Ilustración que muestra la reducción de la evapotranspiración que presentan las zonas urbanas en relación a zonas vegetadas (Fuente: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2008).

2.2.3.2 Propiedades de los materiales de construcción

Propiedades como la reflectividad solar (albedo), emisividad térmica y capacidad calórica influyen enormemente en las islas de calor, ya que definen la forma en que la energía solar es reflejada, emitida o absorbida por la estructuras. La energía solar que llega a la tierra tiene una longitud de onda que varía entre los 250 y 2500 nm, se compone de rayos ultra violeta (5%), luz visible (43%) y rayos infrarrojos (52%), siendo estos últimos los que se perciben en forma de calor (ver figura 3) (EPA, 2008).



Solar energy intensity varies over wavelengths from about 250 to 2500 nanometers.

Figura 3: Energía Solar versus longitud de onda que llega a la superficie terrestre (Fuente: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2008).

Las superficies urbanas tienen un albedo menor que las superficies presentes en las zonas rurales por lo que tienden a absorber mayor cantidad de calor (Taha, 1997). Además de la radiación reflejada también está la emitida por las superficies (emisividad térmica), que es la capacidad que éstas tienen de eliminar calor o de emitir radiación infrarroja de onda larga. Mientras mayor sea la emisividad térmica, la temperatura superficial será menor. Por último, está la capacidad calórica de un material, que se refiere a la cantidad de calor que es capaz de almacenar. Materiales como el metal o la roca tienen una capacidad calórica alta en comparación con materiales encontrados en zonas rurales, como la arena y la tierra, alcanzando a almacenar hasta dos veces más calor que los materiales de las zonas rurales (EPA, 2008).

2.2.3.3 Geometría urbana

La geometría urbana hace referencia a la distribución y las dimensiones de la infraestructura. Esto influye en el flujo del viento, en la absorción de la energía y en la capacidad de emisividad térmica debido a que los edificios altos actúan como barrera que evitan el flujo de calor convirtiendo estas zonas en islas de calor. La geometría urbana tiene mayor influencia en las noches, ya que un elemento conocido como “cañón urbano” (corredores viales entre altos edificios) previene que el calor liberado por las estructuras durante la noche alcance una altura donde su efecto no se sienta, sino que lo atrapa calentando el aire en el proceso. Durante el día el cañón urbano tiende a actuar de manera positiva, ya que provee sombra en esa zona (EPA, 2008).

2.2.3.4 Fuentes antropogénicas

Las fuentes antropogénicas afectan principalmente a las islas de calor atmosféricas y hace referencia a todo lo que emite calor que fue producido por el hombre. Por ejemplo, los medios de transporte, los procesos industriales, calefacción y la ventilación. Las ciudades son más sensibles a este efecto en las épocas de invierno y cuando son densamente pobladas, aunque no es una de las principales causales de la formación de las islas de calor (EPA, 2008).

2.2.3.5 Clima y localización geográfica

El viento y la nubosidad afectan el desarrollo de las islas de calor, ya que estas se potencializan cuando el viento es débil y el cielo está despejado, puesto que por efecto de la convección los vientos fuertes y la nubosidad evitan que gran parte de la radiación solar alcance la superficie. La localización geográfica y la topografía de un lugar definirán gran parte del clima, puesto que series de montañas aledañas podrían bloquear el viento o bien pueden dirigirlo por una vía específica, o grandes cuerpos de agua pueden moderar la temperatura por medio de la evaporación (EPA, 2008). La geografía también determina el tiempo que ese lugar se encuentra expuesto a la radiación solar puesto que en algunos lugares podrá variar durante el año (lugares con estaciones) mientras que en otros es constante (cerca del ecuador) (EPA, 2008).

2.2.4 Efectos de las islas de calor urbano

Toda modificación en el clima local urbano conlleva tanto efectos negativos como positivos en diversos ámbitos:

2.2.4.1 Confort humano: positivo (invierno), negativo (verano)

El incremento en las temperaturas en el periodo estival, tanto de día como de noche, puede afectar la salud humana al ocasionar situaciones de estrés, dificultades respiratorias, calambres, cansancio, deshidratación, ataques de calor y hasta muertes. En 1995, en el medio oeste, murieron más de 1.000 personas debido a una oleada de calor (EPA, 2008). En el verano de 2003 una anomalía meteorológica proporcionó las condiciones necesarias para experimentar las temperaturas más altas y el ambiente más seco que se haya visto desde 1540 en Europa (World Meteorological Organization, 2010). Este evento fue tan intenso que ocasionó la muerte de por lo menos 70,000 personas y otra gran cantidad de impactos como la pérdida de sembrados evaluados en US\$12.3 billones, US\$1.6 billones en daños ocasionados por incendios forestales, el incremento del precio de la energía a más de US\$ 130 por MWh y el derretimiento de gran parte de los glaciares en los Alpes (Robine *et al.*, 2008 en Trujillo, 2012). Lo contrario ocurre en invierno en donde el confort humano se ve beneficiado debido a que las ICU generan una temperatura atmosférica más cálida, contribuyendo así a la disminución en la utilización de energía para calefacción y generando temperaturas más agradables.

2.2.4.2 Uso de energía: positivo (invierno), negativo (verano)

El incremento de temperatura en las oficinas, hogares e industrias produce un aumento en el consumo energético debido al uso de sistemas de aire acondicionado (EPA, 2008). Durante el verano, con el incremento de la temperatura, el consumo energético se incrementa considerablemente (ver figura 4) sumado a que en muchos lugares del mundo la energía proviene de hidroeléctricas, las cuales, durante la época de sequía, no pueden garantizar la máxima generación teniéndose que utilizar otros medios como las plantas termoeléctricas contribuyendo a la contaminación. La figura 4 es un ejemplo de la ciudad de Nueva Orleans, donde se observa que cuando la temperatura aumenta de 20°C a 35°C también lo hace el consumo promedio de energía (EPA, 2008).

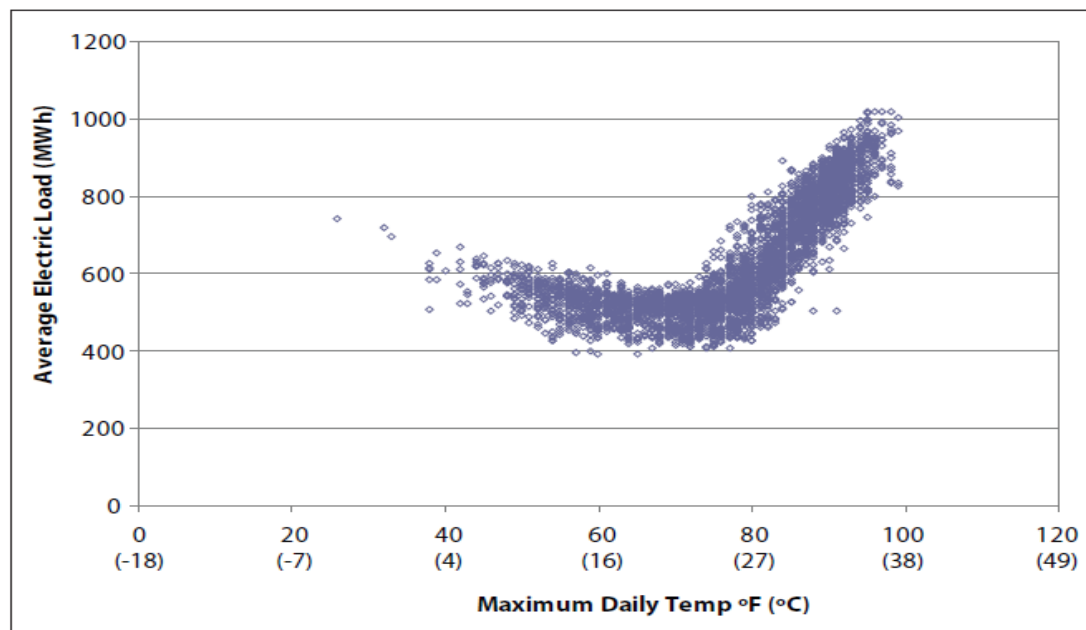


Figura 4: Variación del consumo eléctrico en la ciudad de Nueva Orleans con respecto al incremento de la temperatura. Se puede apreciar un fuerte aumento del consumo de la electricidad cuando la temperatura aumenta sobre los 20-25°C. (Fuente: Environmental Protection Agency, 2008).

Lo contrario ocurre en el periodo invernal en donde las islas de calor urbano generan una temperatura un poco mayor a la que existiría sin la ICU, lo que se traduce en un menor consumo de energía para calefaccionar hogares, centros comerciales y oficinas (Trujillo, 2012).

2.2.4.3 Calidad del aire y Gases de Efecto Invernadero (GEI):

Como ya se ha mencionado, al incrementarse el consumo energético, dependiendo de qué tan “limpia” sea la energía de la ciudad, se incrementará la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica por la emisión de compuestos como dióxido de azufre (SO₂), óxidos nitrosos (NO_x), material particulado (PM), dióxido de carbono (CO₂) y otros. Estos gases pueden contribuir al calentamiento global, ocasionar lluvia ácida y afectar la salud de las personas de manera directa. Adicionalmente, el incremento en las temperaturas aumenta la formación de ozono al nivel del suelo, el cual se genera cuando los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COV's) reaccionan en la presencia de luz solar (Rosenfeld, et al., 1998 en Trujillo, 2012).

2.2.4.4 Uso de agua: Negativo

Las islas de calor contribuyen a la polución térmica del agua, lo que afecta todos los aspectos de la vida acuática, afectando especialmente el metabolismo y la reproducción de las especies acuáticas, en caso de que esta agua llegue a un río, un lago, un humedal o el mar (EPA, 2011).

2.3 Teledetección aplicada al estudio de la superficie terrestre

2.3.1 Teledetección

La teledetección es la técnica que permite obtener información a distancia de los objetos, sin que exista un contacto con ellos. El concepto se extiende al procesamiento e interpretación de los datos. De modo particular, la teledetección registra las características espectrales y texturales de los recursos naturales, sus efectos y las consecuencias de las actividades humanas (Muñoz, 2016).

La reflexión es la forma más importante en teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras; dicho flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética (Hernández et al., 2014).

Los sensores ópticos que se incluyen en los satélites captan amplias áreas de la superficie terrestre, de manera continua, en diferentes rangos de frecuencia o longitud de onda del espectro electromagnético (Figura 5), lo cual permite diferenciar los diferentes elementos de la superficie de la tierra y la extensión que ocupan. También permite recoger información de los elementos de la superficie terrestre mediante la detección y análisis de la energía radiada por ellos. Las imágenes multiespectrales proporcionan datos estrechamente relacionados con varios atributos biofísicos y bioquímicos de la vegetación, permitiendo interpolar y extrapolar mediciones de terreno sobre áreas vastas e inaccesibles (Muñoz, 2016).

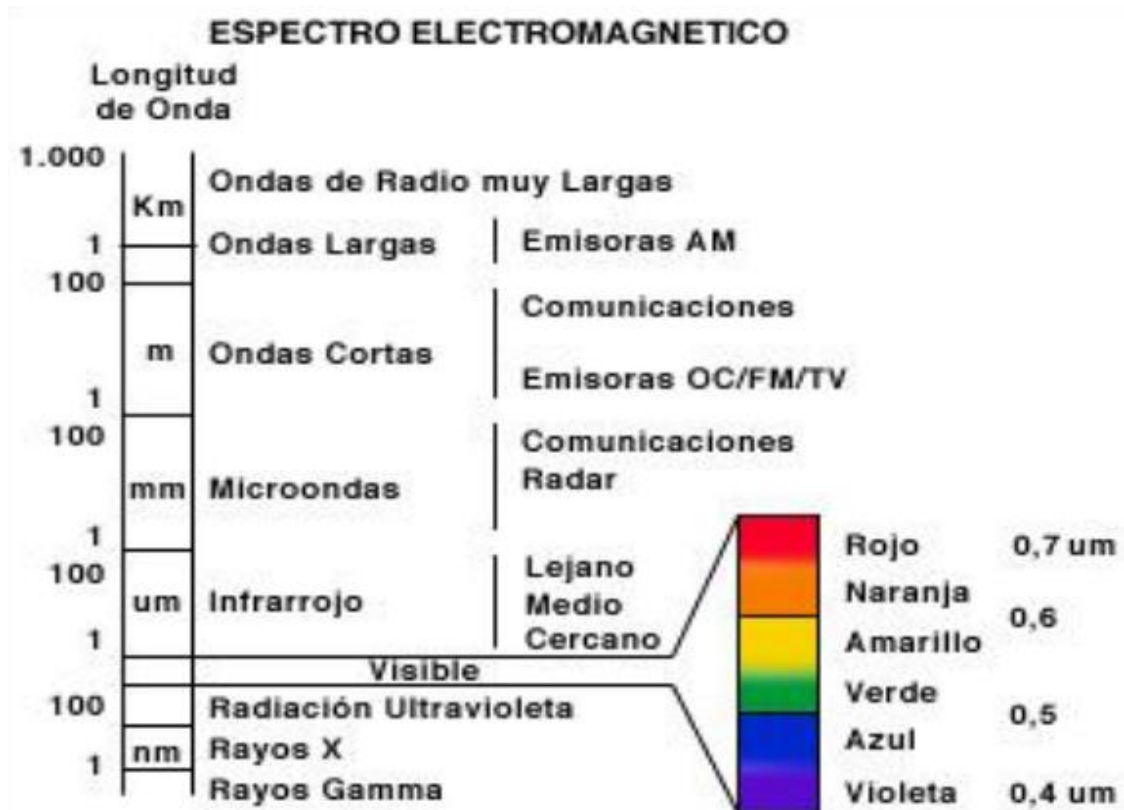


Figura 5: Espectro electromagnético de la luz (Fuente: García et al, 2014).

Las técnicas de teledetección tienen muchas ventajas sobre otras técnicas de información basadas solo en trabajo de campo o en el ámbito de los sistemas de información geográfica. A un bajo costo económico se destaca un alcance global de la superficie de la tierra, adquisición de información en zonas no visibles del espectro electromagnético, uso de diferentes escalas de trabajo, alta frecuencia e información homogénea y datos históricos (Muñoz, 2016). El proceso de recolección de datos requiere una serie de pasos que se describen en la figura 6.



Figura 6: Estructura general de los procesos involucrados en la aplicación de técnicas de percepción remota (Fuente: Avalos, 2012).

2.3.2 Conceptos básicos de la teledetección

El conjunto de los datos adquiridos mediante procedimientos de teledetección desde aviones o naves espaciales comprenden siempre al menos cinco tipos de información (Avalos, 2012):

Resolución espacial: La resolución espacial se refiere al tamaño del objeto o característica del terreno de menor tamaño que se puede distinguir en una imagen. Se trata de una de las características más importantes que hay que considerar a la hora de elegir imágenes, porque determina de forma directa qué rasgos del terreno pueden cartografiarse (Avalos, 2012).

Resolución espectral: Este término define las longitudes de onda en las que el sensor es capaz de medir la energía reflejada. Las longitudes de onda se expresan en micras. El número de bandas se utiliza así mismo para explicar cómo mide el sistema la reflectancia de varias longitudes de onda distintas. Por ejemplo, un sensor multispectral de cuatro bandas mide la energía en cuatro longitudes de onda diferentes. Hay que tener en cuenta, no obstante, que una imagen multispectral se compone casi siempre de tres bandas como mínimo

porque una imagen a color sólo puede crearse adicionando los tres colores fundamentales (rojo, verde y azul) (Avalos, 2012).

Resolución Temporal: está definida por el tiempo en que un satélite vuelve a operar o adquirir datos en un mismo sector de la superficie terrestre, existe una variada gama de satélites con diferentes tiempos de re-visita, que van desde horas a mensuales (Olave, 2011).

Tamaño de la escena/cobertura: Cada sensor del satélite posee una anchura de franja o campo de visión que determina el tamaño de una escena de imagen (Avalos, 2012).

Resolución radiométrica: Se la llama a veces también resolución dinámica, y se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente. Esto depende del conversor analógico digital usado y va a dar como resultado el color o valor de cada píxel en la imagen (Olave, 2011).

2.3.3 Teledetección aplicada al estudio de la ciudad y su clima

La información espacial está comenzando a jugar rol clave en muchos estudios que se presentan en la tierra (Zhao, 2016). A un bajo costo económico se destaca un alcance global de la superficie de la tierra, adquisición de información en zonas no visibles del espectro electromagnético, uso de diferentes escalas de trabajo, alta frecuencia e información homogénea y datos históricos (Muñoz, 2016).

Las técnicas de teledetección son una poderosa herramienta para el estudio de procesos urbanos (Pineda, 2011), el uso de imágenes de satélite ha permitido numerosas investigaciones en este ámbito, como la modelación y dispersión del crecimiento y el análisis de las densidades urbanas (Helmer, 2004; Wilson et al., 2003; Yang et al., 2003; Martinuzzi et al., 2007; Herrera, 2001 en Rojas, 2009). Así, mediante la teledetección se proporciona información relevante para el estudio de los procesos de urbanización que ocurren en las ciudades, ayudando a generar una planificación y diseño urbano sustentable, que no se observa en ciudades latinoamericanas, cuya urbanización es aproximadamente de un 80% (De la Barrera, 2017).

Voogt y Oke (2003) sugieren tres aplicaciones relevantes que la teledetección termal (banda infrarroja) posee en el estudio de climas urbanos. Dos de ellas se centran en estudiar las relaciones entre la estructura espacial de patrones termales urbanos y las características de la superficie urbana o la relación entre las islas de calor atmosféricas y las islas de calor superficiales; la tercera se centra en estudiar los balances de energía de la superficie urbana. Nuestro estudio se focalizará en la segunda aplicación. Para realizar esta aplicación necesitaremos datos de sensores multiespectrales, los cuales obtienen información en diferentes anchos de banda del espectro electromagnético.

Entre estos sensores, están los sensores térmicos infrarrojos, que logran detectar la temperatura superficial de un cuerpo por medio de la radiación solar reflejada y el calor emitido.

2.3.4 Misión Landsat

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite, gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inició en 1972 (Landsat 1), es la más larga de la historia y continua registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general cada pixel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol (USGS, 2016).

2.3.4.1 Satélites Landsat 7 y Landsat 8

En nuestro caso contamos con imágenes del satélite Landsat 7 (LS7) y Landsat 8 (LS8), ambos poseen a bordo un sensor multiespectral y un sensor térmico. En el caso de Landsat 7 posee el sensor multiespectral Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), mientras que Landsat 8 posee el sensor multiespectral Operational Land Imager (OLI), las características de ambos sensores se pueden apreciar en la figura 7, en la cual se puede apreciar que las bandas espectrales del sensor OLI, aunque son similares a las del sensor ETM+, proporcionan una mejora en relación a las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente, una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve. Mientras que la resolución espacial es la misma, para ambas misiones es de 30 metros, solo son distintas en las bandas termales.

Cabe destacar que el satélite LS7 fue lanzado el 15 de abril de 1999 mientras que el satélite LS8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 (USGS, 2016).

Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

Figura 7: Características de las bandas espectrales de OLI y TIRS de Landsat 8 comparadas con las bandas espectrales de ETM+ de Landsat 7 (Fuente: USGS, Landsat 8 data users handbook, 2016).

Los sensores termal que poseen Landsat 7 y Landsat 8 son diferentes, ya que en LS7 el sensor termal se encuentra incorporado al sensor multiespectral (ETM+), mientras que en LS8 el sensor termal es independiente del sensor multiespectral y es llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). La principal diferencia que se puede apreciar de los sensores térmicos de ambos satélites es su resolución espacial, ya que para LS7 es de 60 metros mientras que para LS8 es de 100 metros. Sin embargo, esto no significa que las imágenes termal de LS7 sean de mejor calidad que las imágenes de LS8, puesto que la calidad de los datos (relación de la señal en función del ruido) y la resolución radiométrica del OLI (12 bits) es más alta que las anteriores misiones Landsat (8 bits para TM y ETM+), proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre (resolución radiométrica) (USGS, 2016).

Otra diferencia que se puede observar de los satélites LS7 y LS8 son la forma de adquisición de las imágenes o la forma en que “barren” la superficie terrestre para recopilar los datos, por un lado LS7 lo hace con el sistema whisk-broom el cual consiste en que los espejos (detectores) del sensor ETM+ tienen un movimiento independiente a lo largo de la trayectoria del satélite lo que produce que los espejos “barran” la superficie terrestre, mientras que LS8 posee el sistema push-broom el cual consiste en un arreglo de sensores perpendiculares a la dirección de vuelo del satélite, a diferencia del sistema de LS7 en este sistema los detectores están fijos. La gran ventaja del sistema push-broom con respecto al whisk-broom es que puede absorber mayor cantidad de luz debido a que está observando una escena por una mayor cantidad de tiempo (USGS, 2016).

La altura de vuelo para LS7 y LS8 es de 705 km, ambos poseen una inclinación de 98.2°, las dos misiones poseen una órbita geocéntrica que consiste básicamente en que los satélites pasan por el mismo punto de la superficie terrestre a la misma hora solar. Además, las resolución temporal para ambas

misiones es de 16 días (USGS, 2016). La tabla 2 muestra un resumen de las principales características de los satélites LS7 y LS8.

Características	Landsat 7	Landsat 8
Tipo de sensor multiespectral	ETM+	OLI
Tipo de sensor termal	ETM+	TIRS
Resolución espectral	8	11
Resolución espacial sensor multiespectral	30 m	30 m
Resolución espacial sensor termal	60 m	100 m
Resolución radiométrica	8 bits	12 bits
Resolución temporal	16 días	16 días
Tipo de barrido	Whish-broom	Push-broom
Escenas por día	~450	~650
Inclinación	98.2°	98.2°
Orbita	Geocéntrica (Sun-Sync)	Geocéntrica (Sun-Sync)
Altura	750 km	750 km

Tabla 2: Resumen de las características principales de los satélites Landsat 7 y Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia desde Landsat 8 data users handbook, 2016).

2.3.5 Clasificación de imágenes

La clasificación es un concepto del procesamiento digital de imágenes, que contempla los procedimientos mediante los cuales una computadora puede agrupar los píxeles de una imagen, en categorías o clases, dentro de un espacio multiespectral (Hernández, 2014).

La clasificación digital, sigue un procedimiento similar a la fotointerpretación visual: se identifican primeramente las coberturas según tono, textura, forma, modelos, etc. Y luego se expande al resto de la fotografía el modelo o patrón determinado. Es decir, se asigna determinada categoría a determinada superficie en función del patrón establecido. Si se traduce esto a un análisis digital, se obtiene el esquema de la clasificación digital, que comprende las siguientes fases (Hernández et al, 2014):

1. Definición digital de las categorías: fase de entrenamiento.
2. Asignación de los píxeles de toda la imagen a una de esas categorías: fase de asignación, comprobación y verificación de resultados
3. Corrección de errores.

La fase de entrenamiento, es la que define digitalmente las categorías temáticas a efectos de que posteriormente, el software las reconozca

automáticamente. Según se realice esta fase de entrenamiento, es que se dividen las clasificaciones en dos métodos: el supervisado y el no supervisado. En el primero, se parte de un conocimiento previo del terreno en cambio en el segundo, es el software quien delimita las clases, en función de su homogeneidad (Hernández et al., 2014). En nuestro estudio trabajaremos con la clasificación supervisada puesto que se tiene un conocimiento a priori de la superficie del área de estudio.

2.3.5.1 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada es el procedimiento más usado para un análisis cuantitativo de la imagen y es controlado por la persona que realiza la clasificación. Este tipo de clasificación usa algoritmos adecuados para etiquetar píxeles que se usan como representantes de cada tipo de cobertura o clase seleccionada; estos píxeles etiquetados forman campos de entrenamiento (reconocimiento de la firma espectral) que sirven para identificar a los miembros de cada clase. Esta asociación de clases se basa en un modelo de distribución probabilística de las clases de interés. El espacio multispectral es partido dentro de clases específicas usando una localización óptima de las superficies. En la clasificación supervisada es necesario contar con información adicional como son fotografías aéreas, mapas temáticos, etc. para poder definir la asignación de los píxeles de la imagen a una clase previamente seleccionada (Olave, 2011).

Uno de los algoritmos más utilizados de la clasificación supervisada es el de máxima verosimilitud, el cual asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El píxel se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca. Este método puede usarse de forma automática, o puede establecerse algún criterio que permita asignar píxeles a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Permite por otro lado definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación, por ejemplo la diferencia entre la máxima probabilidad y la siguiente. Sin embargo, la hipótesis de que los datos de reflectividad siguen una distribución normal no siempre se cumple y debería verificarse siempre (Pineda, 2014).

2.3.5.2 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Uno de los índices más utilizados para estimar la intensidad de vegetación es el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). El NDVI, o índice de vegetación de diferencia normalizada, es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia de dos partes del espectro electromagnético. Es utilizado para determinar la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación (Trujillo, 2012).

El NDVI actúa como un clasificador de la imagen, puesto que una vez aplicamos el NDVI a la imagen cada pixel adquiere un valor entre -1 y 1, estos valores indicarán la cantidad de vegetación presente en cada pixel de la imagen.

Este índice se calcula utilizando la longitud de onda roja (0.6 a 0.7 μm) y la cercana al infrarrojo (0.7 a 1.1 μm). La razón por la cual se utilizan estas dos longitudes de onda, es porque las plantas más sanas tienden a absorber gran cantidad de la onda roja y a reflejar la mayor parte de la onda cercana al infrarrojo (Trujillo, 2012).

La ecuación que se utiliza para realizar el cálculo del NDVI arroja como resultado valores entre -1 y 1, los valores más cercanos a 1 indican vegetación sana, aquellos por encima de 0 representan tierra o vegetación con muy baja capacidad fotosintética y los valores por debajo de cero y muy cercanos a -1 representan cuerpos que no tienen la capacidad de reflejar la onda cercana al infrarrojo y al mismo tiempo absorber la luz roja, lo que significa ausencia de vegetación. La ecuación utilizada para el cálculo del índice NDVI se presenta a continuación:

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \quad (2.1)$$

Donde, NIR es la banda del infrarrojo cercano (banda 5 en Landsat 8) y Rojo es la banda del rojo (banda 4 en Landsat 8).

3. Marco metodológico

3.1 Materiales

3.1.1 Imágenes Landsat

Tres imágenes Landsat fueron utilizadas en el desarrollo de este trabajo, cabe destacar que las imágenes de esta misión no poseen un costo económico, ya que son totalmente gratuitas desde los servidores del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en ingles).

Como muestra la tabla 3 se adquirieron imágenes desde los satélites Landsat 7 y Landsat 8, esto se debe a que uno de los objetivos de este trabajo es realizar un análisis temporal de cómo el desarrollo urbano ha ido evolucionando en el tiempo y cómo esto afecta en la magnitud de la isla de calor urbano presente en dicha zona, es por eso que adquirimos imágenes de los años 2000, 2014 y 2017. El satélite Landsat 7 proporciona la imagen del año 2000, ya que este satélite está en operación desde el año 1993, mientras que las imágenes de los años 2014 y 2017 fueron adquiridas por el satélite Landsat 8.

Debemos señalar que las fechas de adquisición de las imágenes satelitales no fueron seleccionadas al azar, ya que la selección de las imágenes estuvo sujeta a varios factores que actuaron como filtro de selección. Nombraremos a continuación los factores considerados al seleccionar las imágenes que detallaremos en la sección de metodología:

- Imágenes del área de estudio.
- Imágenes con una nubosidad menor al 10%.
- Imágenes del periodo estival, específicamente del mes de enero y febrero.
- Imágenes que no pertenecieran al satélite Landsat 7 desde el 2003 en adelante.

Es necesario señalar que las imágenes de la misión Landsat al ser gratuitas solo vienen con una corrección geométrica, por ende solo nos entregan valores en bruto llamados niveles digitales los cuales necesitamos transformar en valores de interés para nuestro análisis.

	Landsat 7	Landsat 8
Fecha de adquisición	18/01/2000	01/02/2014 24/01/2017
Hora de adquisición (local)	11:33:49	11:41:43 11:40:44
Resolución espacial	30 m	30 m
Resolución termal	60 m	100 m

Resolución Radiométrica	8 bits	12 bits
Nubosidad	0%	0.01% 5.21%

Tabla 3: Datos de las imágenes adquiridas desde la USGS (Fuente: Elaboración propia).

3.1.2 Datos de temperatura

Los datos de temperatura fueron facilitados por los proyectos FONDECYT N° 1100657 “Evidencias del cambio climático en centros urbanos en Chile: Implicancias sobre los riesgos naturales y la capacidad adaptativa” y FONDECYT N° 1130305, titulado: “Estudio y modelación del clima urbano a escala local, como base para la proposición de lineamientos de adaptación frente al cambio climático, en una red de ciudades chilenas”. Estos proyectos adquirieron los datos de temperatura desde estaciones meteorológicas a cargo del Laboratorio de Medioambiente y Territorio de la Universidad de Chile, dicho laboratorio comenzó las mediciones en septiembre del año 2010 y se prolongaron hasta el mes de septiembre del año 2011.

En este trabajo se usan los datos de temperatura de un día y hora representativo a las fechas de las imágenes satelitales Landsat (periodo estival), de tal forma de poder correlacionar las temperaturas superficiales con las temperaturas atmosféricas, medidas por la red de estaciones meteorológicas. El día escogido fue un día que reuniera una serie de condiciones que exacerben el fenómeno de ICU. Las condiciones más importantes para la elección del día fueron (serán explicadas en la siguiente sección):

- Baja velocidad del viento, con respecto a otros días
- Alta temperatura atmosférica, con respecto a otros días
- Baja humedad relativa, con respecto a otros días
- Alta temperatura mínima, con respecto a otros días
- Nula precipitación.
- Fecha similar a una de las imágenes satelitales.

Así, escogimos el día 24 de enero del año 2011 para analizar la correlación entre la temperatura superficial y la temperatura atmosférica en el área de estudio.

La tabla 4 presenta la totalidad de estaciones meteorológicas con viabilidad de datos de temperatura.

Nombre estación monitoreo	Comuna	Inicio fecha mediciones
Carriel Sur	Concepción	01/09/2010 0:00
TIGO	Concepción	01/09/2010 0:00
Colegio Kingston	Concepción	01/09/2010 0:00
FEPASA	Talcahuano	01/09/2010 0:00
Gran Bretaña	Talcahuano	01/09/2010 0:00
Los limoneros	Talcahuano	01/09/2010 0:00
Idiem	Hualpén	01/09/2010 0:00
Panadería Calle 7	Talcahuano	01/09/2010 0:00
Lomas de San Andrés	Concepción	01/09/2010 0:00
Brasil	Concepción	01/09/2010 0:00
Pedro del Río	Concepción	01/09/2010 0:00
Vegas Nonguén	Concepción	01/09/2010 0:00
Universidad de Concepción	Concepción	01/09/2010 0:00

Tabla 4: Nombre, comuna y comienzo de mediciones de las estaciones meteorológicas que se utilizaron en el presente estudio (Fuente: Elaboración propia).

La figura 8 presenta la ubicación espacial de cada estación meteorológica presente en la tabla 4.

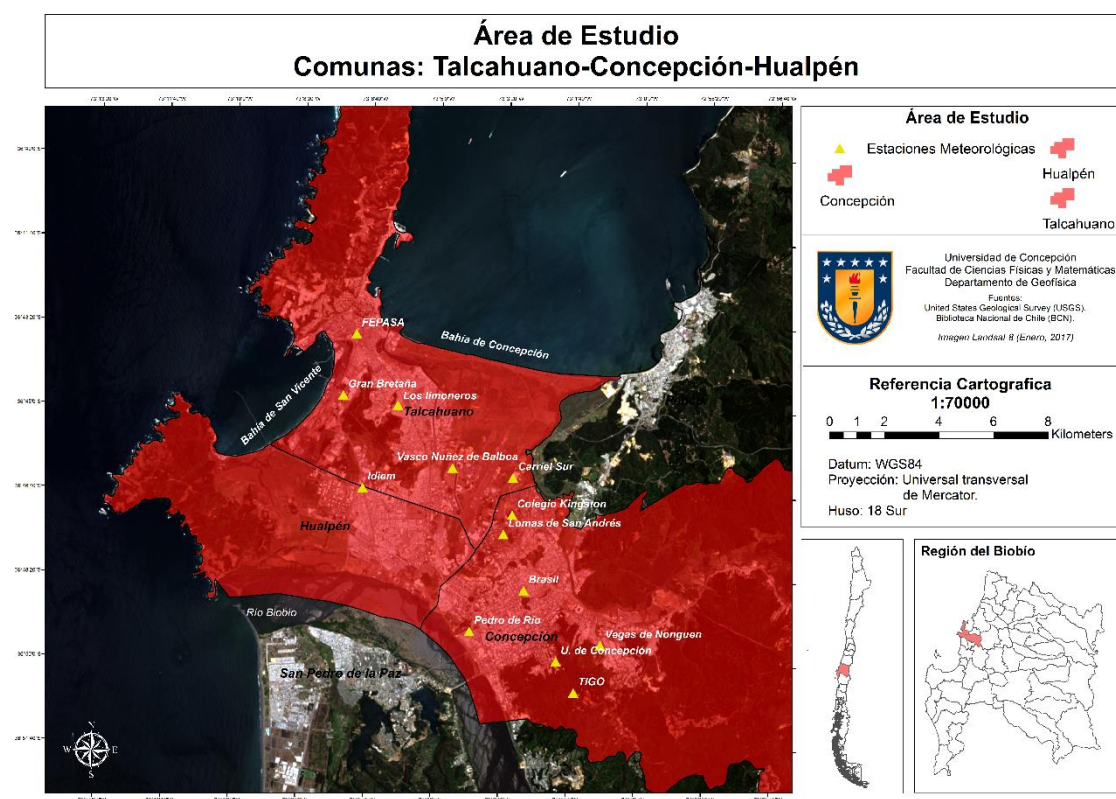


Figura 8: Ubicación espacial de las estaciones meteorológicas consideradas en el presente trabajo (Fuente: Elaboración propia).

3.2 Metodología

3.2.1 Selección de la información

3.2.1.1 Selección de las imágenes espaciales

La selección de las imágenes satelitales es un proceso que debe contar con una serie de filtros, de tal modo de aprovechar de la mejor forma posible la información espacial, para que de esta manera las imágenes nos permitan desarrollar un análisis espacial fidedigno. Los criterios para seleccionar las imágenes satelitales fueron los siguientes:

- **Imágenes del área de estudio**

Los satélites Landsat orbitan la tierra en orbitas geocéntricas, cada lugar del planeta posee una ubicación geográfica con respecto a la trayectoria del satélite denominadas “Path” y “Row”, las cuales están referidas al Sistema de Referencia Mundial (WRS, por sus siglas en inglés). Estas coordenadas representan el centro de una determinada área de la superficie terrestre, la cual es finalmente la imagen satelital que adquiere el satélite (USGS, 2007). Para los satélites Landsat, Concepción está contenido en las coordenadas “Path” y “Row” que se muestran en la tabla 5.

Landsat	Path	Row
Gran Concepción	001	086
	001	085

Tabla 5: Coordenadas Path y Row del Gran Concepción (Fuente: Elaboración propia desde información de la USGS, 2013).

- **Nubosidad**

La nubosidad es un problema al momento de capturar una imagen satelital, ya que entorpece la visión de la superficie terrestre y no se pueden captar de buena manera los patrones superficiales. Existen métodos que intentan eliminar la nubosidad de las imágenes satelitales, pero no son totalmente efectivos. Es por eso que se aplica un filtro de nubosidad menor al 10% al momento de seleccionar las imágenes satelitales. La tabla 6 muestra el porcentaje de nubosidad que poseen nuestras imágenes.

Imagen	Porcentaje nubosidad
Landsat 7	0%
Landsat 8	0.01%
Landsat 8	5.21%

Tabla 6: Porcentaje de nubosidad que posee cada imagen adquirida (Fuente: Elaboración propia)

- **Imágenes del periodo estival**

Las islas de calor urbano se exacerban en el periodo de verano para las zonas de latitud media como Concepción (Taha, 1997). Es por eso que se adquieren imágenes del periodo estival, específicamente de los meses de enero y febrero de manera de apreciar de mejor manera los efectos de las ICU en Concepción.

- **Imágenes que no pertenezcan a la misión Landsat 7 desde el año 2003 en adelante**

La NASA informó en el año 2003 que el corrector de la línea de escaneo (SLC, por sus siglas en inglés) del satélite Landsat 7 había fallado, por ende todas las imágenes del 31 de mayo del 2003 en adelante presentaban errores que se traducen en vacíos o nula información de las imágenes (USGS, 2007). Existen métodos para corregir este error mediante interpolación que completa esta información inexistente en las imágenes. Sin embargo, se decidió no contar con esas imágenes en el estudio, debido al porcentaje de error.

3.2.1.2 Selección de los datos de temperatura atmosférica

Se cuenta con datos de temperatura de una red de 13 estaciones meteorológicas repartidas en tres comunas del Gran Concepción (Figura 8) entre septiembre del 2010 y septiembre del 2011. Seleccionamos un día para analizar la temperatura atmosférica, siguiendo una serie de factores que según los investigadores exacerban los efectos de las ICU.

- **Tiempo meteorológico**

Uno de los principales factores que atenúan los efectos de las islas de calor urbano es la velocidad del viento (Hernández, 2013), puesto que el viento enfría los materiales de la superficie urbana como el concreto y el asfalto. Las magnitudes de las ICU son mayores bajo condiciones climáticas calmadas y despejadas. A medida que los vientos aumentan, mezclan el aire reduciendo la isla de calor. En este sentido, altas temperaturas, baja humedad y nula precipitación exacerban los efectos de las ICU, generando efectos más visibles para poder llevar a cabo los objetivos propuestos en nuestro trabajo.

- **Fecha y hora similares a las imágenes satelitales**

Otro factor importante es obtener los datos de temperatura atmosférica en fecha y hora similares a la fecha y hora en la que el satélite adquirió las imágenes, ya que así la ubicación del sol con respecto a la tierra será similar tanto en los datos meteorológicos como en los datos satelitales. Así, podremos correlacionar de mejor manera los datos satelitales con los datos atmosféricos y realizar un mejor análisis.

Así, por todo lo anterior seleccionamos los datos de temperatura del día 24 de enero del año 2011 para realizar nuestro análisis, puesto que reúne la mayoría de los factores mencionados anteriormente, como velocidad del viento baja, alta temperatura, nula precipitación y fecha similar a la fecha de las imágenes

satelitales. Las características meteorológicas del día escogido para el Gran Concepción se pueden ver en la tabla 7.

Día	Velocidad Media Viento [Km/h]	Velocidad Máxima Sostenida del Viento [Km/h]	Temperatura Máxima [°C]	Temperatura Mínima [°C]	Humedad Relativa [%]	Precipitación [mm]
24/01/2011	7.4	8.9	25.9	14.8	8700%	0.0

Tabla 7: Patrones meteorológicos del día 24 de enero del 2011 para el Gran Concepción (Fuente: Tu tiempo network [base de datos], 2011).

3.2.2 Ajuste de las imágenes satelitales

3.2.2.1 Cambio de proyección de las imágenes

Las imágenes Landsat traen por defecto una proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) norte, por lo que debemos cambiar esa proyección hacia el sur. Este proceso se hizo con el software ARCGIS, con la herramienta “Project Raster”.

3.2.2.2 Delimitar el área de estudio

Las imágenes Landsat en bruto abarcan una gran extensión de la superficie terrestre (Figura 9) por lo que se hace necesario delimitar solo a nuestra área de estudio, para realizar un análisis más detallado conforme a nuestros objetivos. Para ello se creó un archivo vectorial (Shapefile) en ARCGIS el cual delimita nuestra área de estudio (Figura 9), luego con la herramienta “Extract by Mask” se extrajo el área de estudio.

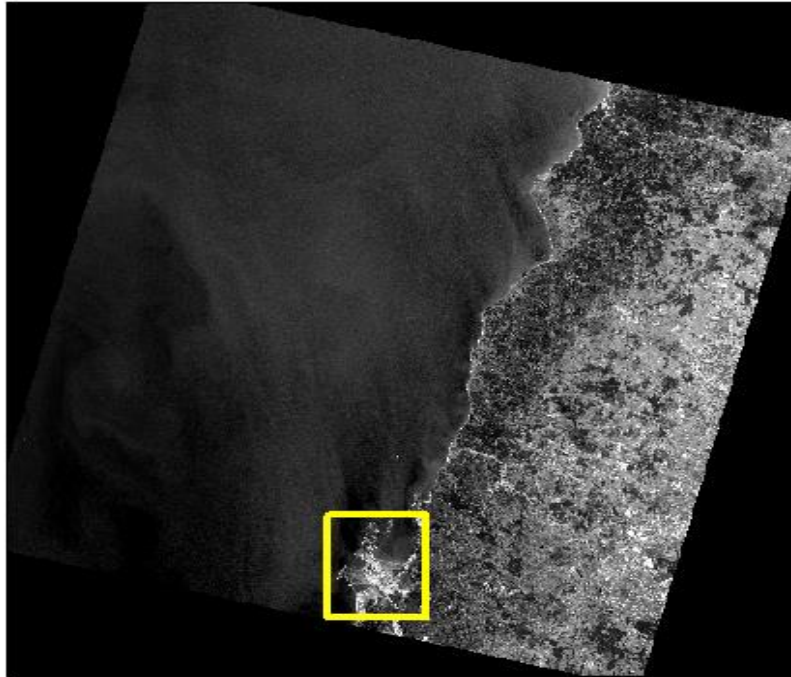


Figura 9: Ejemplo de una imagen del satélite Landsat 8 en bruto, perteneciente a la banda 3. En la imagen se puede apreciar el archivo vectorial creado para delimitar nuestra área de estudio, el cual es visualizado como un rectángulo de color amarillo (Fuente: Elaboración propia).

3.2.2.3 Correcciones de los datos satelitales

Las imágenes satelitales descargadas desde la base de datos de la USGS están lejos de tener alguna utilidad sin antes aplicar correcciones, ya que las imágenes Landsat descargadas son simplemente un arreglo o matriz de píxeles, cuyos valores son definidos como valores digitales, los cuales son valores numéricos enteros, asignados a cada píxel y es la traducción de la cantidad de radiancia recibida por el sensor del satélite. Es por ello que necesitamos transformar estos valores digitales en valores que sean útiles para el análisis espacial. La USGS proporciona un manual en el cual se señala el procedimiento para realizar todas estas transformaciones, además todas las imágenes Landsat poseen un archivo de metadatos en los cuales está toda la información y parámetros para realizar dicho proceso.

3.2.2.3.1 Transformación de niveles digitales (ND) a valores de radiancia

Tanto para Landsat 7 como para Landsat 8, debemos recurrir a sus respectivos archivos de metadatos y buscar los coeficientes radiométricos los cuales aparecen con el nombre “RADIOMETRIC_RESCALING”. Estos coeficientes serán ocupados en la siguiente ecuación entregada por la USGS:

$$L_{\lambda} = M * ND + A \quad (1)$$

Donde, L_{λ} es la radiancia, ND son los valores digitales o el valor de los píxeles de la imagen sin corregir, y por último M y A son los coeficientes radiométricos

que se pueden encontrar en el archivo de metadatos con el nombre de RADIANCE_MULT_BAND_x y RADIANCE_ADD_BAND_x, respectivamente.

Para aplicar la ecuación (1) utilizamos la herramienta “Raster Calculator” de ARCGIS en la cual podemos realizar desde operaciones matemáticas sencillas a funciones de mayor complejidad sobre las imágenes.

3.2.2.3.2 Transformación a reflectancia

Para el caso de las imágenes del satélite Landsat 8 podemos hacer la transformación desde niveles digitales a reflectancia por medio de los coeficientes de reflectancia que vienen incluidos en el archivo de metadatos de cada imagen. La USGS nos proporciona una ecuación lineal de primer grado (Ecuación 2) para realizar esta transformación ocupando los coeficientes mencionados.

$$\rho = M_{\rho} * ND + A_{\rho} \quad (2)$$

Donde, ρ es la reflectancia, ND son los valores digitales, M_{ρ} y A_{ρ} son los coeficientes de reflectancia del archivo de metadatos con el nombre de REFLECTANCE_MULT_BAND_x y REFLECTANCE_ADD_BAND_x, respectivamente.

Para el caso de las imágenes del satélite Landsat 7, la transformación a reflectancia es diferente, puesto que en estas imágenes no existen los coeficientes de reflectancia, pero la USGS nos entrega el procedimiento de transformación a reflectancia mediante una sencilla ecuación (Ecuación 3) que debemos aplicar a los valores de radiancia.

$$\rho = \frac{\pi L_{\lambda}}{E_{sun}} \quad (3)$$

Donde, ρ es la reflectancia y E_{sun} son los valores de Irradiancia solar (Entregados por la USGS).

Desde la siguiente etapa en adelante las imágenes de Landsat 7 y Landsat 8 se trabajan de la misma manera.

3.2.2.3.3 Corrección ángulo de elevación solar

La corrección del ángulo de elevación solar tiene como objetivo mitigar los efectos producidos por el ángulo de elevación solar al momento en que se capturó la imagen, la cual influye en los valores de reflectancia. La ecuación que realiza esta corrección es la siguiente:

$$\rho' = \frac{\rho}{\sin\theta} \quad (4)$$

Donde, ρ' es la reflectancia corregida por el ángulo de elevación solar, ρ es la reflectancia y θ es el ángulo de elevación solar el cual es proporcionado por el archivo de metadatos con el nombre SUN_ELEVATION.

3.2.2.3.4 Corrección distancia tierra-sol

La corrección distancia tierra-sol tiene por objetivo reducir los efectos provocados por la distancia que existe entre la tierra y el sol, que influye en la cantidad de radiación incidente en la superficie terrestre. Esta corrección se puede realizar mediante la siguiente ecuación,

$$\rho'' = d^2 * \rho' \quad (5)$$

Donde, ρ'' es la reflectancia con corrección distancia tierra-sol y ángulo de elevación solar, d es la distancia entre la tierra y el sol en unidades astronómicas (ver ecuación 6) y ρ' es la reflectancia corregida por el ángulo de elevación solar.

$$d = 1 - 0.0167 * \cos(0.9856 * (\text{día} - 4)) \quad (6)$$

Donde, “día” es el día juliano del año en el cual se capturó la imagen y viene dado en el archivo de metadatos de la imagen.

3.2.2.3.5 Corrección atmosférica

- **Método de Chávez (1988)**

El método de Chávez consiste básicamente en sustraer el pixel de menor valor a cada pixel de la imagen, con el objetivo de eliminar de mejor manera la radiación que es reflejada por la atmósfera, y que por ende afecta o altera en la reflectancia de cada objeto que se encuentra en la superficie terrestre de nuestro planeta.

Este método se basa en el hecho de que en alguna parte de la imagen (de cada banda) debe existir un material que posea una reflectancia nula, ya sea agua, vegetación, etc. Eso dependerá de cada banda espectral de la imagen por ejemplo, en la banda del infrarrojo cercano, el agua posee una reflectancia menor que todos los materiales presentes en una imagen, por ende el pixel de menor valor estará ubicado en algún cuerpo de agua, si sustraemos el valor de ese pixel a los demás pixeles de la imagen (en la banda del NIR) estaremos diciendo que ese pixel posee una reflectancia nula, como ese pixel en la imagen no posee realmente una reflectividad nula supondremos que ese valor no nulo es provocado por la reflectividad que producen las partículas de la atmósfera en la imagen, por ende al sustraer el pixel de menor valor a los demás pixeles de la imagen para cada banda estaremos eliminando de buena manera los efectos reflectivos de la atmósfera y nos quedaremos solo con las reflectividades de la superficie terrestre.

Los pasos para realizar esta corrección en ARCGIS son identificar el pixel de menor valor en la imagen para luego con la herramienta “Raster Calculator” sustraer dicho pixel a los demás pixeles que conforman la imagen.

La figura 10 es una imagen del satélite Landsat 8 a la cual se aplicaron todas las correcciones mencionadas anteriormente, luego se realizó una composición de bandas de acuerdo a las bandas espectrales de dicho satélite y a los colores primarios de tal manera de poder observar la imagen en las mismas tonalidades en las que el ojo humano las capta.



Figura 10: Resultado de las correcciones especificadas en la sección 3.2.2.3 aplicadas a una imagen del satélite Landsat 8 con fecha enero de 2017 (Fuente: Elaboración propia).

3.2.3 Estimación de la temperatura superficial

En los manuales tanto de Landsat 7 como de Landsat 8 viene descrito el procedimiento para transformar los valores de radiancia espectral a valores de temperatura superficial.

En el caso de Landsat 8 las bandas termales son las bandas 10 y 11 mientras que en Landsat 7 las bandas termales son las bandas 6 VCID_1 y 6 VCID_2. A pesar de ello, el procedimiento para calcular la temperatura superficial es el mismo, cambiando solamente los parámetros termales que posee cada satélite (K_1 y K_2).

Así, la ecuación (Ecuación 7) que permite transformar la radiancia espectral en temperatura superficial es la misma para ambos satélites y es la siguiente (USGS, 2007):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (7)$$

Donde, T es la temperatura en grados Kelvin, L_λ es la radiancia espectral, K_1 y K_2 son las constantes termales que posee cada satélite y que se pueden encontrar en el archivo de metadatos de cada imagen satelital. Las constantes termales de cada satélite se pueden observar en la tabla 8.

	Banda	K1	K2
Landsat 8	Banda 10	774,89	1321,08
	Banda 11	480,89	1201,14
Landsat 7	Banda 6 VCID_1	666,09	1282,71
	Banda 6 VCID_2	666,09	1282,71

Tabla 8: Valores de las constantes termales para los satélites Landsat 7 y Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia desde USGS, 2007).

En la figura 11 se puede apreciar la estimación de la temperatura superficial de la figura 10 ocupando la ecuación (7).

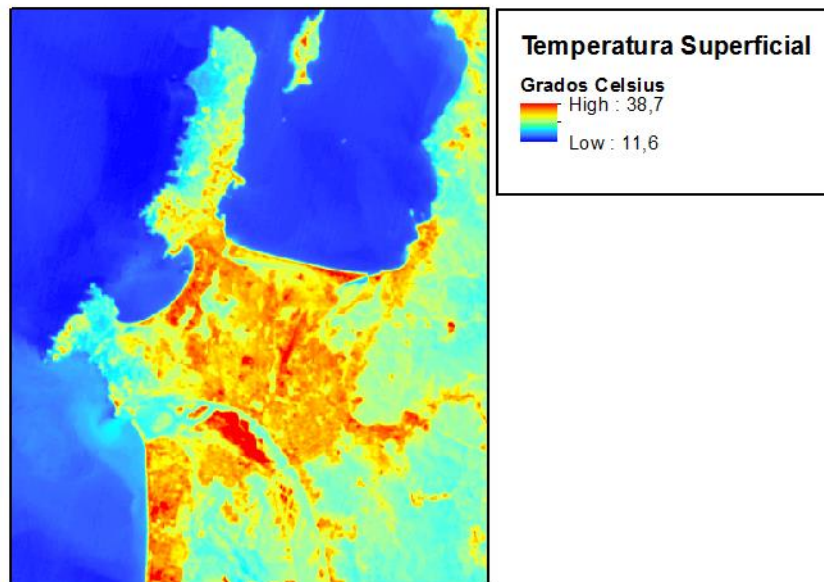


Figura 11: Estimación de la temperatura superficial de la figura 10 utilizando el procedimiento descrito por los manuales de Landsat (2016) otorgados por la USGS (Fuente: Elaboración propia).

3.2.4 Clasificación supervisada

Como se mencionó anteriormente la clasificación supervisada consiste en seleccionar áreas de entrenamiento, las cuales son áreas en las que se conoce a priori la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una signatura espectral característica de cada una de las clases.

El objetivo de este apartado es clasificar los diferentes tipos de uso de suelo del área de estudio, para así poder correlacionar los usos de suelo con las temperaturas superficiales y atmosféricas. Trabajaremos con seis tipos de

suelos o coberturas: Cuerpos de agua, vegetación, construcciones urbanas, arena, humedal y suelo desnudo o semidesnudo. A continuación describiremos la metodología que se ocupó para realizar la clasificación supervisada a cada imagen satelital.

3.2.4.1 Creación de las áreas de entrenamiento

Para la creación de las áreas de entrenamiento se creó un archivo vectorial de puntos en ARCGIS, en donde cada punto estaba ubicado en una determinada cobertura superficial de la imagen satelital que se conocía a priori. Para realizar este procedimiento nos ayudamos de combinaciones de bandas espectrales como el “falso color” y Google Earth. Las áreas de entrenamiento se muestran en la tabla 9.

Clase	Cobertura
1	Agua
2	Vegetación
3	Zona urbana
4	Arena
5	Humedal
6	Suelo desnudo

Tabla 9: Áreas de entrenamiento escogidas para realizar la clasificación supervisada (Fuente: Elaboración propia).

3.2.4.2 Creación de firmas espectrales

Este procedimiento consiste en la creación de grupos o conjuntos de píxeles llamados firmas espectrales, estos grupos de píxeles poseen un comportamiento espectral similar entre ellos, los cuales ya fueron clasificados en una respectiva clase espectral mediante la creación de las áreas de entrenamiento (sección 3.2.4.1). Para realizar este apartado se utilizó la herramienta “Create Signatures” de ARCGIS, la cual realiza este procedimiento automáticamente ingresando la imagen y el archivo vectorial de puntos creado en la sección anterior.

3.2.4.3 Método de la máxima verosimilitud

En este paso se busca clasificar los píxeles que no fueron clasificados en un área de entrenamiento, ósea los píxeles que hasta el momento no pertenecen a ninguna clase. Para ello utilizamos el método de máxima verosimilitud el cual se basa en encontrar grupos de píxeles con valores parecidos para asignarlos a alguna de las clases creadas (agua, vegetación arena, etc.). Este método de clasificación lo podemos encontrar en ARCGIS como una herramienta llamada “Maximum Likelihood”, en la cual debemos ingresar la imagen a la cual le

deseamos realizar la clasificación de sus píxeles, y las clases espectrales generadas en la sección 3.2.4.2.

3.2.4.4 Validación de la clasificación supervisada

Luego de realizar la clasificación necesitamos saber si nuestro clasificador está realmente clasificando de buena manera, para ello necesitamos hacer una validación de la clasificación. Para ello realizamos el siguiente procedimiento:

Lo primero fue crear un archivo vectorial de treientos puntos aleatorios sobre la clasificación supervisada, esto lo realizamos con la función “Create Ramdon Points” de ARCGIS en donde podemos especificar la cantidad de puntos y la distancia mínima que puede existir entre cada punto, en nuestro caso escogimos un número de treientos puntos, separados como mínimo una distancia de quinientos metros para cada imagen satelital.

Luego, modificamos la tabla de atributos de los puntos creados y añadimos dos campos llamados “Clasificado” y “Realidad”. El campo “Clasificado” corresponde al número de la clase espectral (tabla 9) en la que el clasificador clasificó a un determinado punto aleatorio, mientras que el campo “Realidad” corresponde al número de la clase espectral (tabla 9) a la que realmente pertenece un determinado punto aleatorio. Así, creamos una tabla similar a la que se muestra en la tabla 10, en donde cada punto aleatorio creado se le verifica de manera visual la clase a la cual fue clasificado y la clase a la que realmente pertenece, mediante la ayuda de Google Earth y la combinación de bandas espectrales útiles para identificar los diferentes tipos de coberturas.

Punto Aleatorio	Clasificado	Realidad
1	1	1
2	5	6
3	2	2
4	3	3
5	4	3
6	3	3

Tabla 10: Tabla utilizada como ejemplo para observar como realizamos el proceso de validación para cada punto aleatorio (Fuente: Elaboración propia).

3.2.4.4.1 Índice o coeficiente Kappa

El coeficiente kappa de Cohen mide la concordancia entre dos examinadores en sus correspondientes clasificaciones de N elementos en C categorías mutuamente excluyentes. Por lo tanto, el índice Kappa nos ayudará a estimar la fiabilidad del clasificador en la clasificación supervisada, estimando la

concordancia entre la clase en la que fue asignado el pixel y la clase a la que realmente pertenece ese pixel. En la mayoría de las ocasiones el índice Kappa toma valores entre 0 y 1, y solo en raras ocasiones puede tomar valores negativos. Para Douglas Altman (1991) el índice Kappa se puede interpretar de la siguiente manera (tabla 11):

Índice Kappa	Interpretación
0.2	Pobre Concordancia
0.2 - 0.4	Razonable Concordancia
0.4 - 0.6	Moderada Concordancia
0.6 - 0.8	Buena Concordancia
0.8 - 1	Muy Buena Concordancia

Tabla 11: Interpretación del coeficiente Kappa según Douglas Altman (1991) (Fuente: Elaboración propia desde Practical Statistics for Medical Research. (1991) London England: Chapman and Hall)

Para calcular el índice Kappa ocupamos el software IBM SPSS Statistics, al cual debemos ingresar la tabla de atributos generada en la sección anterior (ejemplo tabla 10) y el software automáticamente nos entregará el valor de índice Kappa, además nos entrega un análisis acerca de cómo funciona el clasificador frente a los diferentes tipos de coberturas presentes en la clasificación, mostrando las principales falencias del clasificador empleado.

3.2.5 Clasificación de la temperatura superficial

Se realizó una clasificación sobre las imágenes termale, de tal manera de potenciar el análisis de las temperaturas superficiales. La clasificación fue realizada mediante el método de quiebres naturales ("Natural Breaks") de ARCGIS en su herramienta "Classified". Este método es sencillo, ya que el software genera grupos de pixeles con valores similares, separados por un cierto umbral designado por el software, que depende del número de grupos o clases en que se clasificará la imagen. Así, podemos generar una clasificación de temperaturas superficiales, en donde podremos observar de manera más clara, las zonas en donde el calor se concentra de mejor manera o es más similar, y así enfocar el análisis hacia determinadas localidades del área de estudio.

3.2.6 Análisis de coberturas

Una vez validada la clasificación supervisada de cada imagen satelital y obtenidas las imágenes termale, será necesario realizar un análisis entre las distintas temperaturas superficiales y los diferentes tipos de coberturas presentes en el área de estudio. Para ello recurrimos a la herramienta "Zonal

Statistics as Table”, esta herramienta permite generar una tabla resumen con distintas variables estadísticas de una imagen raster, a partir de otra imagen raster o archivo vectorial. Por ejemplo, para nuestro caso “Zonal statistics as Table”, genera una tabla con variables estadísticas de cada cobertura de nuestra clasificación supervisada, respecto a la temperatura superficial (imagen termal), por ende podremos saber la temperatura media de cada cobertura, temperatura máxima, temperatura mínima, desviación estándar, etc.

3.2.7 Estimación de la magnitud de la isla de calor urbano superficial

Con la obtención de la temperatura promedio de cada cobertura presente se puede calcular la magnitud de la isla de calor urbano superficial del Gran Concepción. Entonces, se propone hacer la diferencia entre la temperatura promedio de las coberturas consideradas no-urbanizadas con la temperatura promedio de la zona urbana, para sí obtener la diferencia de temperaturas entre las áreas urbanas y no-urbanas.

Para la estimación de la magnitud de la ICU superficial se hizo necesario clasificar las coberturas presentes en la tabla 9 en coberturas urbanas y coberturas no-urbanas. Esta clasificación la realizamos de manera visual, teniendo en cuenta los efectos provocados por la intervención humana en el suelo, principalmente el reemplazo de los suelos naturales por suelos urbanos (asfalto, concreto, techos, etc.). Es por eso que clasificamos como cobertura urbana a toda la zona urbana presente en la clasificación supervisada, mientras que clasificamos como coberturas no-urbanas a la vegetación y humedales. Las coberturas suelo desnudo y arena no las clasificamos en ninguna de las dos clases, puesto que el suelo desnudo y la arena pueden pertenecer a las dos clases (Cobertura urbana; Cobertura no-urbana), puesto que ellas aún son superficies naturales pero intervenidas de alguna manera por el hombre como por ejemplo, con la agricultura, incendios forestales, centrales termoeléctricas, deforestación, etc. Pero no tenemos una exactitud de la magnitud y espacialidad de dicha intervención para clasificar de manera fidedigna dichas coberturas. La cobertura agua la ignoraremos en este apartado puesto que nos estamos centrando en el uso de suelos.

Así, calcularemos la magnitud de la ICU superficial del Gran Concepción mediante la siguiente expresión:

$$CICS = (\bar{T}_{zu} - (\frac{\bar{T}_v + \bar{T}_h}{2})) \quad (8)$$

Donde, CICS es el coeficiente de la isla de calor superficial, $\bar{T}_{zu}$ es la temperatura promedio de la cobertura urbana, $\bar{T}_v$ es la temperatura promedio de la cobertura vegetal y $\bar{T}_h$ es la temperatura promedio de la cobertura humedal.

3.2.8 Análisis de temperaturas atmosféricas

El análisis de temperaturas atmosféricas fue realizado mediante la creación de isothermas (líneas de igual temperatura), puesto que las isothermas mostrarán la distribución espacial de las temperaturas sobre el área de estudio.

Para la creación de las isothermas comenzamos importando a ARCGIS los datos de temperatura de un día y hora específicos, que se encontraban en un archivo Excel, este procedimiento se realiza mediante la herramienta “Add xy Data”. Luego convertimos esos datos a un archivo vectorial con la herramienta “Export Data”.

En la generación de las isothermas se realiza una interpolación de las temperaturas sobre el área de estudio de tal forma de abarcar todo nuestro lugar de trabajo, para ello ocupamos la herramienta “Spline”, la cual realiza una interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (ESRI, 2016). Se escogió este tipo de interpolación debido a que necesitamos una superficie de salida lo más plana y lisa posible, ya que no se consideran las alturas a las que se encuentran las estaciones meteorológicas. La herramienta “Spline” nos conduce a una imagen raster que proporciona la temperatura atmosférica sobre toda nuestra área de estudio.

Finalmente, utilizamos la herramienta “Contour” para crear las isothermas, esta herramienta crea una clase de entidad de línea de curvas de nivel (isolíneas) a partir de una superficie raster (ESRI, 2017).

3.2.9 Estimación de la magnitud de la isla de calor urbano atmosférica

Para realizar la estimación de la magnitud de la ICU atmosférica se seleccionaron las temperaturas de las estaciones meteorológicas (Ver figura 8) que se encontraban en el interior de la ciudad y las estaciones que se encontraban en zonas no-urbanas. Las estaciones las seleccionamos conforme a nuestra clasificación supervisada, de manera que las estaciones que se encontraban sobre y rodeadas de cobertura urbana fueron clasificadas como estaciones urbanas, mientras que las estaciones situadas sobre y rodeadas de cobertura vegetal fueron clasificadas como estaciones no-urbanas.

Las estaciones meteorológicas consideradas como urbanas fueron las estaciones: Los limoneros, Pedro del río, Brasil y Lomas de San Andrés (ver figura 8), las cuales consideramos que estaban mejor posicionadas para captar de buena manera el fenómeno de ICU. Mientras, que la estación TIGO fue la

única estación meteorológica considerada como no-urbana, puesto que era la única que cumplía con los requisitos mencionados anteriormente.

Así, para calcular la magnitud de la ICU atmosférica, calculamos la temperatura promedio de las estaciones meteorológicas consideradas como urbanas y restamos a ese valor la temperatura registrada por la estación TIGO. Esto lo hicimos para cada hora, por lo que obtendremos la magnitud de la ICU atmosférica para cada hora del día (24 Enero de 2011), lo que es una ventaja en comparación a la estimación de la magnitud de la ICU superficial, ya que solo podemos calcular la magnitud de la ICU superficial para una hora del día, debido a la resolución temporal del satélite.

3.2.10 Correlaciones

3.2.10.1 *Correlación entre temperatura superficial y temperatura atmosférica*

Se crea un archivo vectorial de setenta puntos aleatorios cercanos a las estaciones meteorológicas (figura 8) sobre la interpolación spline generada en la sección 3.2.8, para así extraer la temperatura atmosférica para cada punto a cada hora del día. De este modo tendremos setenta puntos sobre el área de estudio con una temperatura atmosférica, correspondiente al lugar geográfico en el que se sitúa cada punto a cada hora.

Con el archivo vectorial de setenta puntos aleatorios, extraeremos la temperatura superficial dada por la imagen satelital del 2014, puesto que esta imagen es la que temporalmente está mejor situada para realizar esta correlación, ya que las otras imágenes son de los años 2000 y 2017, y nuestros datos meteorológicos son del año 2011.

Luego, se exportan los datos de temperatura atmosférica y superficial de cada uno de los setenta puntos a un archivo Excel. Esta operación la realizamos 24 veces para cada hora del día 24 de enero de 2011.

Con el Software MATLAB, importamos los datos para cada hora del día y realizamos una interpolación lineal tanto para la temperatura atmosférica como para la temperatura superficial, de tal modo de transformar los setenta puntos de temperatura en curvas de temperaturas, para así poder correlacionar dichas curvas. Para realizar dicha correlación se utilizó el comando “corr” de MATLAB el cual entrega el coeficiente de correlación entre dos curvas. Hicimos estos pasos para cada hora del día, y luego creamos una matriz con los coeficientes de correlación para cada hora, para posteriormente graficar estos coeficientes a cada hora del día y observar el comportamiento que posee la correlación entre la temperatura superficial y atmosférica a lo largo del día.

Así, además de observar la magnitud de la correlación existente entre la temperatura superficial y atmosférica podremos analizar cómo esta correlación varía a lo largo de un día caluroso de verano.

3.2.10.2 Correlación entre cantidad de vegetación y temperatura superficial

Es interesante observar el comportamiento de la temperatura superficial frente a la cantidad de vegetación en el área de estudio. Para realizar esta correlación se crearon 6 perfiles o transectas. Estos perfiles se crearon siguiendo la siguiente lógica, los perfiles 1, 2 y 3 comienzan en una zona que presenta una vegetación densa, luego pasan por el centro de Concepción y culminan en una zona con una buena cantidad de vegetación, de esta manera podemos observar el comportamiento de las variables en estudio en zonas urbanas y en zonas no-urbanas, teniendo por objetivo responder la pregunta ¿Cómo afecta la presencia del centro de Concepción a la relación entre la temperatura superficial y la cantidad de vegetación? Los perfiles 4, 5 y 6 tienen por objetivo medir el comportamiento que posee la temperatura superficial y la cantidad de vegetación en zonas de interés, como por ejemplo en los humedales Rocuant-Andalién, Los Batros y el río Biobío, por lo tanto son perfiles para realizar un análisis más específico.

Para observar la cantidad de vegetación calculamos el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para la imagen del año 2014 y 2017, mediante la herramienta “Raster Calculator” de ARCGIS, en donde debemos ingresar las bandas 4 y 5 del satélite Landsat 8.

Se comenzó creando un archivo vectorial tipo línea (transecta) y un archivo vectorial vacío tipo punto en ARCGIS. Luego, con la herramienta “Construct Points” se crearon puntos sobre la línea espaciados a 31 metros de distancia uno con respecto del otro, esta distancia fue escogida en relación a la resolución espacial que posee el satélite Landsat 8 (30 metros). Luego, estos puntos creados sobre la transecta se guardaron en el archivo vectorial tipo punto que al inicio fue creado. Luego, con la herramienta “Extract Values to Point” extrajimos los valores de NDVI y temperatura superficial hacia el archivo vectorial tipo punto que se encontraba vacío. Finalmente, importamos los datos al software MATLAB con el cual realizamos la correlación entre las dos curvas. Este procedimiento se realizó seis veces, para realizar un total de seis perfiles por año (2014-2017) y así obtener una correlación más consistente.

4. Resultados

4.1 Corrección de imágenes satelitales

La figura 12 muestra las tres imágenes satelitales corregidas. En primer lugar se muestra de izquierda a derecha las imágenes de los años 2000-2014-2017. Se puede observar que el área que abarca la imagen del 2000 es diferente a las otras imágenes, puesto que dicha imagen fue adquirida en una trayectoria satelital [01, 086] por el satélite Landsat 7, mientras las imágenes del 2014 y 2017 fueron adquiridas en la trayectoria satelital [01, 085] mediante el satélite Landsat 8.

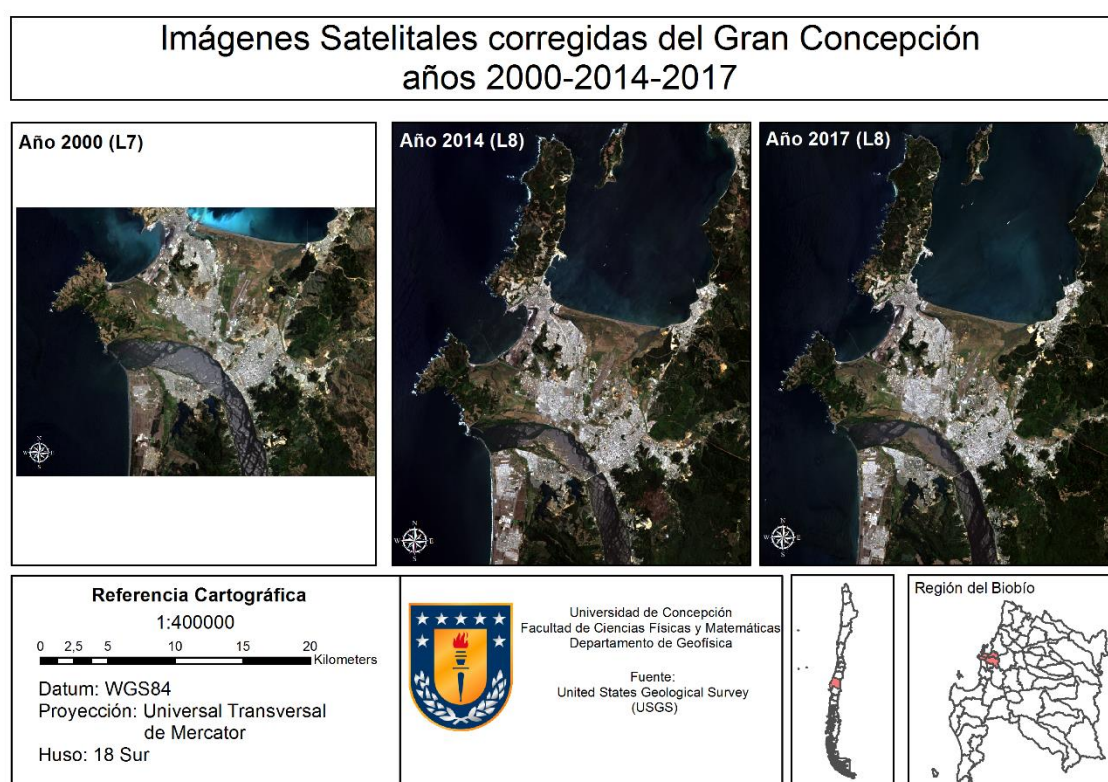


Figura 12: Resultado de las correcciones aplicadas a las tres imágenes satelitales utilizadas en el presente estudio (Fuente: Elaboración propia).

A pesar que adquirimos otra imagen satelital de Landsat 7 con la misma trayectoria que poseían las imágenes de los años 2014 y 2017, se percibe que Landsat 7 no cubre la misma área de Landsat 8. Es por ello que al trabajar con Landsat 7 en una trayectoria satelital [01, 085] (igual a las otras imágenes) debíamos cortar casi en su totalidad la comuna de San Pedro de la Paz, abarcando una menor extensión del Gran Concepción, pese a que no trabajamos directamente con dicha comuna, es bueno observar el comportamiento termal de la mayor extensión posible de superficie del Gran Concepción.

4.2 Estimación de la temperatura superficial

En la figura 13, se muestra el resultado de la estimación de la temperatura superficial, mediante la utilización de las bandas termales de cada imagen satelital adquirida. Principalmente existe una coherencia en los valores mínimos de las tres imágenes, sin embargo en la imagen del año 2000, se puede observar una temperatura superficial máxima superior (valores) en relación a las otras imágenes. Esto se debe a que la imagen del año 2000 fue adquirida por el satélite Landsat 7, el cual posee un sensor termal diferente a Landsat 8 (TIRS). Sin embargo, para los objetivos de este trabajo, estas diferencias de valores no son relevantes, puesto que se busca analizar las diferencias de temperatura superficial entre las coberturas.

En las tres imágenes es posible identificar claramente la ubicación de las zonas urbanas del Gran Concepción, mediante la temperatura superficial asociada a dicha cobertura, las cuales poseen temperaturas superficiales mayores en relación a su entorno, en las secciones posteriores se hablará en mayor detalle sobre este tema.

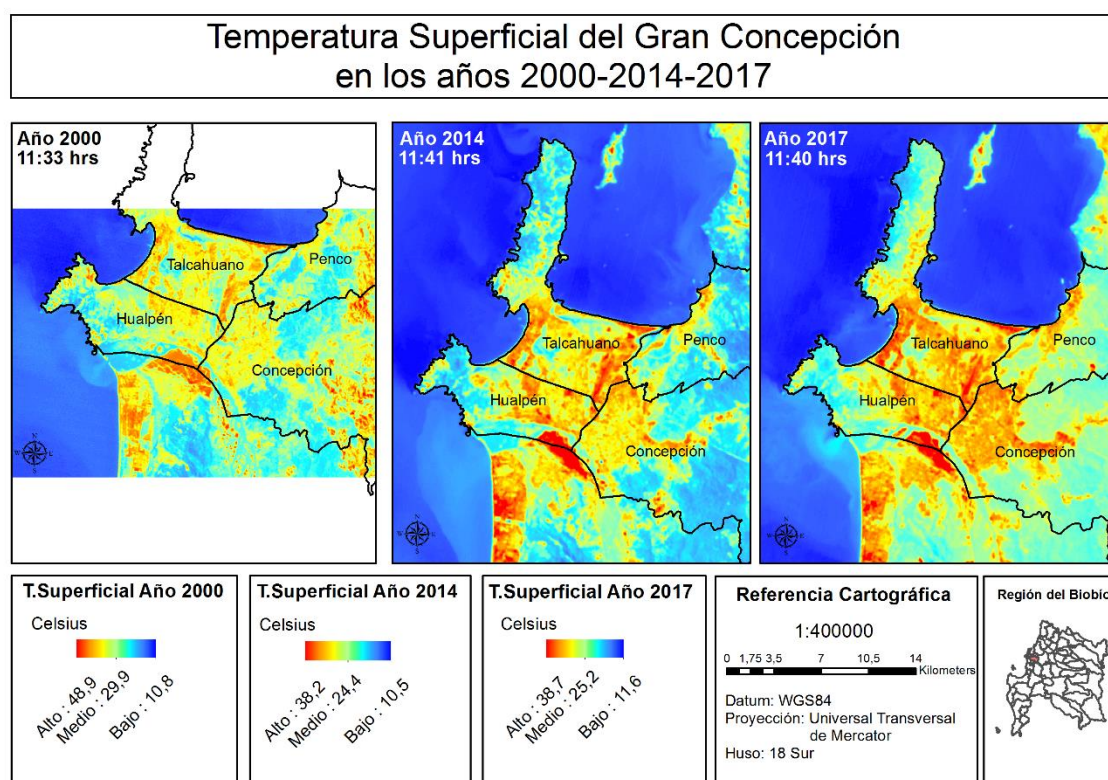


Figura 13: Temperaturas superficiales del Gran Concepción, de izquierda a derecha podemos observar la imagen del satélite Landsat 7 con fecha de adquisición el 18 de enero del año 2000 mediante la banda espectral 6 VCID 2, siguiendo con las dos imágenes del satélite Landsat 8, la primera adquirida el 1 de febrero del año 2014 mediante la banda espectral número 10 y la segunda adquirida el 24 de enero de 2017 utilizando la banda número 10.

4.3 Clasificación de coberturas mediante clasificación supervisada

4.3.1 Clasificación supervisada imagen del año 2000

Al realizar la validación de la clasificación supervisada de la imagen del año 2000 (Figura 14) se obtuvo como resultado un índice Kappa de 0.873, ósea nuestra clasificación posee un 87.3% de fiabilidad al clasificar las coberturas presentes en el área de estudio (Figura 15).

En la figura 16, podemos observar la tabla de tabulación cruzada, esta entrega el resumen del proceso de validación, mediante un recuento de la frecuencia del número de sujetos en cada categoría, mostrando las principales falencias del clasificador para distinguir los diferentes tipos de coberturas. En nuestro caso la principal falencia del clasificador fue confundir la cobertura “Suelo Desnudo” con “Humedal” en veinticuatro oportunidades de un total de setenta y seis puntos. Existen otros errores del clasificador pero son menores, como por ejemplo clasificar “Suelo Desnudo” por “Ciudad” (2 veces), “Vegetación” por “Humedal” (2 veces) y “Arena” por “Ciudad” (2 veces). Esta falencia se ratifica en el dendrograma de la clasificación, donde la menor distancia espectral se presenta entre las coberturas “Humedal” - “Suelo Desnudo” con un valor de 3, siguiendo con una distancia espectral de 5 entre las coberturas “Zona Urbana” - “Humedal”. Sin embargo, por lo mencionado en secciones anteriores nuestro índice Kappa posee una muy buena concordancia (Altman, 1991), por lo que trabajaremos con esta clasificación.

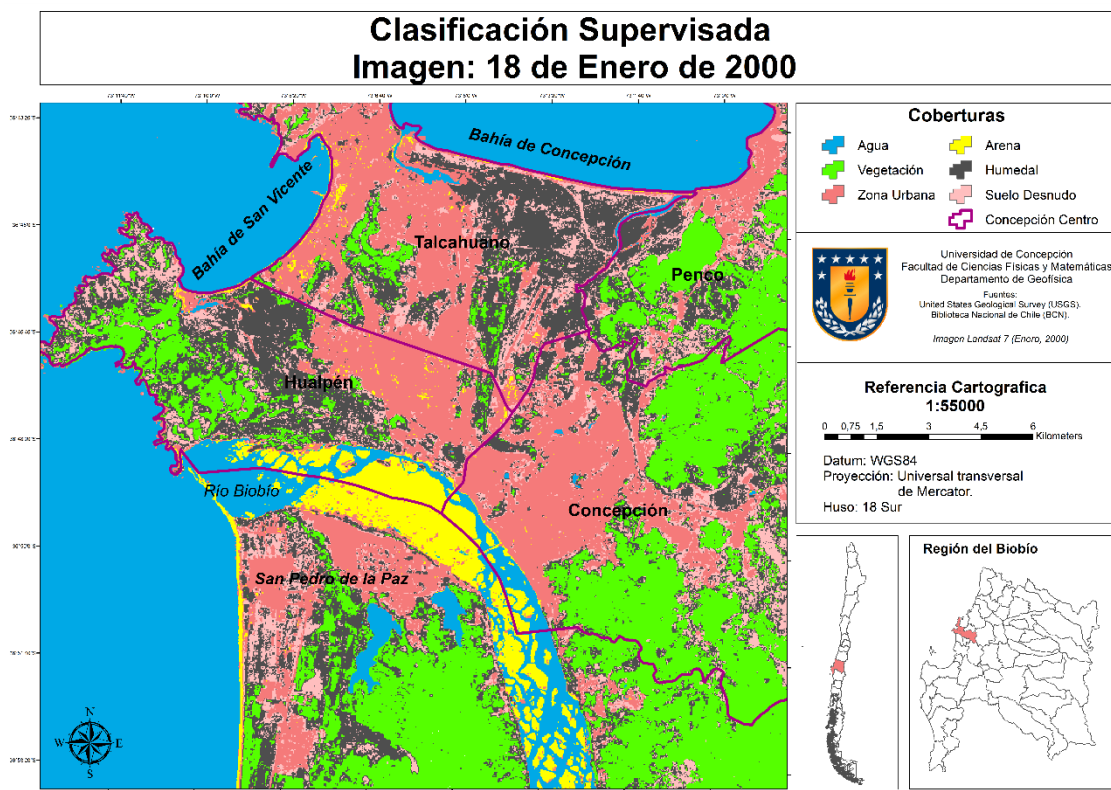


Figura 14: Clasificación supervisada aplicada a la imagen del satélite Landsat 7 con fecha el 18 de enero de 2000, se clasificaron los píxeles en 6 tipos de clases agua, vegetación, zona Urbana, arena, humedal y suelo desnudo. El clasificador posee 87.3% de confiabilidad (Fuente: Elaboración propia).

Symmetric Measures

		Value	Asymp. Std. Error ^a	Approx. T ^b	Approx. Sig.
Measure of Agreement	Kappa	,873	,021	30,602	,000
N of Valid Cases		300			

a. Not assuming the null hypothesis.

b. Using the asymptotic standard error assuming the null hypothesis.

Figura 15: Tabla entregada por el software IBM SPSS, la cual nos muestra el valor del coeficiente Kappa que posee la clasificación supervisada de la imagen del año 2000. Además, se muestra el número total de puntos que ayudaron a realizar la validación (N=300), el error estándar asintótico (0.021), la aproximación de los valores T y la significancia estadística, los cuales carecen de interés para efectos de nuestro estudio (Fuente: Elaboración propia).

Count

		Clasificad						Total
		1	2	3	4	5	6	
Realidad	1	100	0	0	0	0	0	100
	2	0	51	0	0	2	0	53
	3	0	0	42	0	0	0	42
	4	0	0	2	9	0	0	11
	5	0	0	0	0	18	0	18
	6	0	0	2	0	24	50	76
Total		100	51	46	9	44	50	300

Figura 16: Tabla de tabulación cruzada entregada por el software IBM SPSS para la clasificación de la imagen del año 2000, la cual contiene un recuento de la frecuencia del número de sujetos de cada

categoría permitiendo realizar un análisis de cómo se comporta el clasificador frente a los diferentes tipos de coberturas (Fuente: Elaboración propia).

4.3.2 Clasificación supervisada imagen del año 2014

La clasificación supervisada realizada a la imagen del año 2014 (Figura 17) presenta una fiabilidad del 95.6% puesto que el coeficiente Kappa tiene un valor de 0.956 (Figura 18), de modo que nuestra clasificación presenta una muy buena concordancia (Altman, 1991).

El análisis realizado al clasificador está resumido en la tabla de tabulación cruzada de la figura 19, la cual muestra que el clasificador solo confunde “Suelo Desnudo” con “Humedal” en cuatro oportunidades. Esta falencia se ve reflejada en el dendrograma de la clasificación, puesto que la distancia espectral entre las coberturas “Humedal” - “Suelo Desnudo” es de 3 (al igual que en la clasificación del año 2000), la sigue una distancia espectral de 7 entre las coberturas “Arena” - “Humedal” y una distancia de 10 entre las coberturas “Zona Urbana” - “Arena”. Estas son las distancia espectrales de menor valor entre las clases.

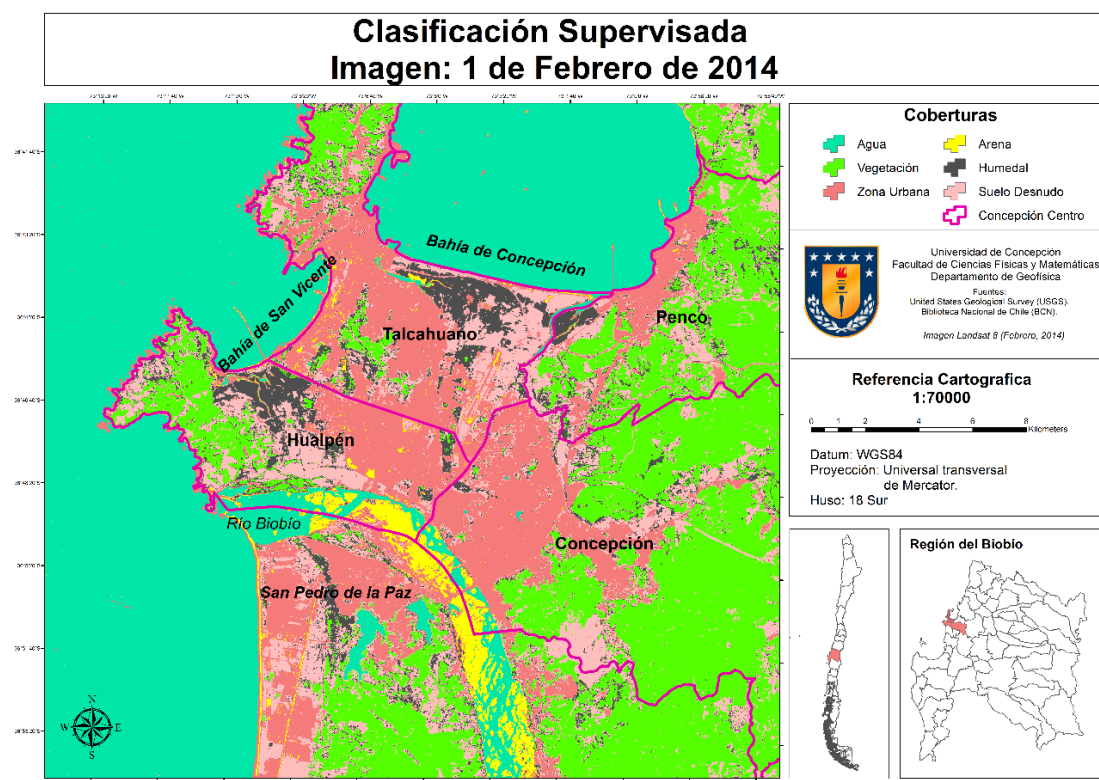


Figura 17: Clasificación supervisada realizada a la imagen del satélite Landsat 8 con fecha el 1 de febrero de 2014. La clasificación se efectuó en torno a 6 clases, agua, vegetación, zona urbana, arena, humedal, y suelo desnudo sobre la mayor parte del Gran Concepción. El clasificador posee 95.6% de confiabilidad (Fuente: Elaboración propia).

Symmetric Measures

	Value	Asymp. Std. Error ^a	Approx. T ^b	Approx. Sig.
Measure of Agreement Kappa	,956	,014	28,663	,000
N of Valid Cases	300			

a. Not assuming the null hypothesis.

b. Using the asymptotic standard error assuming the null hypothesis.

Figura 18: Tabla entregada por el software IBM SPSS, la cual nos muestra el valor del coeficiente Kappa que posee la clasificación supervisada de la imagen del año 2014. Además, se muestra el número total de puntos que ayudaron a realizar la validación (N=300), el error estándar asintótico (0.014), la aproximación de los valores T y la significancia estadística, los cuales carecen de interés para efectos de nuestro estudio (Fuente: Elaboración propia).

Realidad * Clasificad Crosstabulation

Count		Clasificad						Total
		1	2	3	4	5	6	
Realidad	1	147	0	4	0	0	0	151
	2	0	61	0	0	0	0	61
	3	0	0	41	0	0	0	41
	4	0	0	0	4	0	0	4
	5	0	0	0	0	10	0	10
	6	0	0	1	0	4	28	33
Total		147	61	46	4	14	28	300

Figura 19: Tabla de tabulación cruzada entregada por el software IBM SPSS para la clasificación de la imagen del año 2014, la cual contiene un recuento de la frecuencia del número de sujetos de cada categoría permitiendo realizar un análisis de cómo se comporta el clasificador frente a los diferentes tipos de coberturas (Fuente: Elaboración propia).

4.3.3 Clasificación supervisada imagen del año 2017

La clasificación supervisada realizada a la imagen del año 2017 (Figura 20) arrojó un coeficiente Kappa de 0.97 (Figura 21), ósea nuestro clasificador posee un 97% de confiabilidad al discriminar entre los diferentes tipos de coberturas presentes en la imagen.

El principal error que comete el clasificador es confundir la cobertura “Arena” con la cobertura “Zona Urbana” en cuatro oportunidades sobre cinco (Figura 22), si bien el error al discriminar estas coberturas es grande, no es relevante para utilizar esta imagen en los futuros análisis, puesto que como se verá en secciones posteriores el área comprendida por la cobertura “Arena” es pequeña comparado con las otras coberturas presentes en la imagen.

El dendrograma de esta clasificación muestra que la menor distancia espectral entre coberturas es de 6 (mayor que las clasificaciones 2000 y 2014) y se produce entre las coberturas “Humedal” - “Suelo Desnudo” y “Arena” - “Humedal” (ambos pares presentan la misma distancia espectral de 6). Luego sigue una distancia espectral de 9 entres las coberturas “Zona Urbana” - “Arena”.

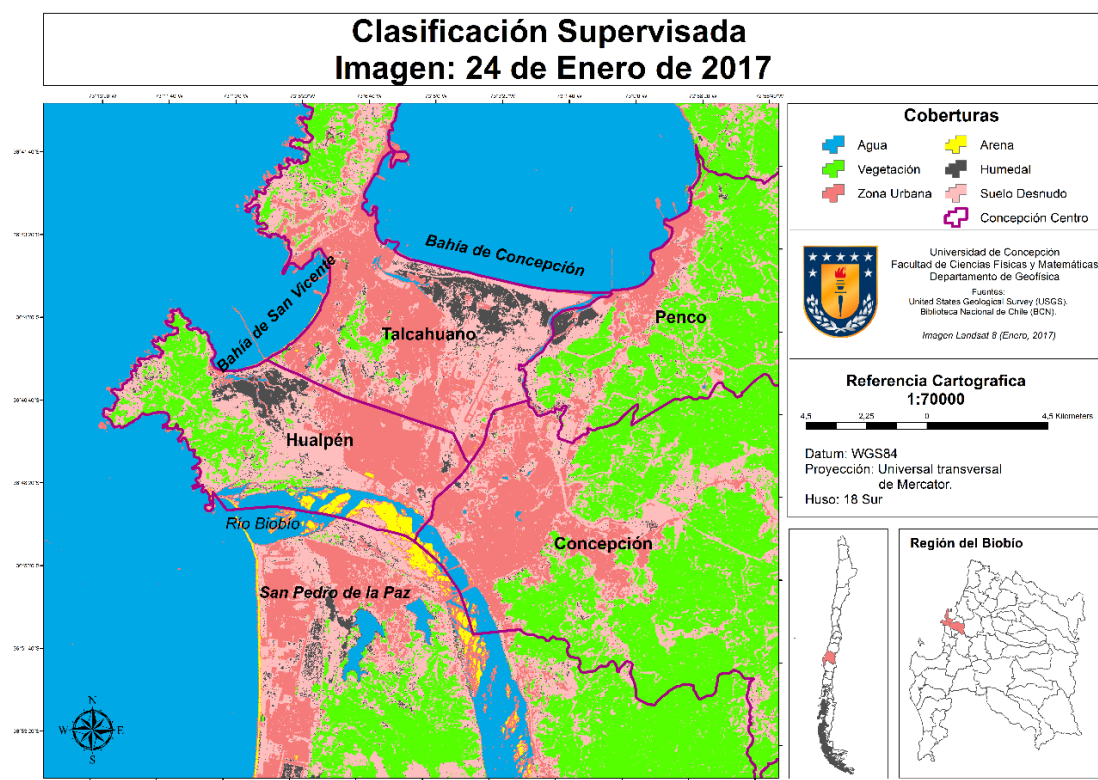


Figura 20: Clasificación supervisada aplicada a la imagen Landsat 8 adquirida el 24 de enero de 2017. Se clasificaron los píxeles de la imagen en seis clases, agua, vegetación, zona urbana, arena, humedal y suelo desnudo. El clasificador posee 97% de confiabilidad (Fuente: Elaboración propia).

Symmetric Measures

		Value	Asymp. Std. Error ^a	Approx. T ^b	Approx. Sig.
Measure of Agreement	Kappa	,970	,012	28,334	,000
N of Valid Cases		300			

a. Not assuming the null hypothesis.

b. Using the asymptotic standard error assuming the null hypothesis.

Figura 21: Tabla generada por el software IBM SPSS, la cual nos muestra el valor del coeficiente Kappa que posee la clasificación supervisada de la imagen del año 2017. Además, se muestra el número total de puntos que ayudaron a realizar la validación (N=300), el error estándar asintótico (0.012), la aproximación de los valores T y la significancia estadística, los cuales carecen de interés para efectos de nuestro estudio (Fuente: Elaboración propia).

Realidad * Clasificado Crosstabulation

Count

		Clasificado						Total
		1	2	3	4	5	6	
Realidad	1	148	0	0	0	0	0	148
	2	0	64	0	0	0	0	64
	3	0	0	33	0	0	0	33
	4	0	0	4	1	0	0	5
	5	0	0	0	0	5	1	6
	6	0	0	0	1	0	43	44
Total		148	64	37	2	5	44	300

Figura 22: Tabla de tabulación cruzada entregada por el software IBM SPSS para la clasificación de la imagen del año 2017, la cual contiene un recuento de la frecuencia del número de sujetos de cada categoría permitiendo realizar un análisis de cómo se comporta el clasificador frente a los diferentes tipos de coberturas (Fuente: Elaboración propia).

4.3.4 Análisis de coberturas

Observando las figuras 14, 17 y 20 se infiere que la zona urbana no ha experimentado una expansión espacial que se pueda visualizar de manera clara. De hecho Almendras (2009) concluyó que la expansión urbana en Concepción estaba limitada por condiciones geográficas propias del lugar, estas impiden un aumento de la mancha urbana hacia la periferia, puesto que Concepción limita con el océano pacífico al norte y oeste, mientras que al sur se encuentra el río Biobío y al este la cordillera de las costa, todos ellos se convierten en límites naturales que impiden una expansión urbana del centro del Gran Concepción.

Sin embargo, podemos apreciar por las figuras 14 y 20, una mancha urbana más densa que paulatinamente ha ido reemplazando el suelo desnudo por zona urbana, principalmente en la comuna de Concepción y San Pedro de la Paz entre los años 2000 y 2017. En secciones posteriores cuantificaremos estos cambios de coberturas.

Otro aspecto importante que se puede observar con las clasificaciones supervisadas generadas, es la disminución espacial considerable que han experimentado los humedales entre los años 2000 y 2017, siendo reemplazados principalmente por suelo desnudo. Estimaremos cuánto han disminuidos estos humedales en secciones posteriores.

Podemos observar que la cobertura vegetal no ha experimentado cambios notorios en la periferia del Gran Concepción, sin embargo se puede observar pequeños reemplazos de cobertura vegetal por suelo desnudo, producidos por la deforestación y la construcción de caminos.

4.4 Clasificación de temperaturas superficiales

Las figuras 23 y 24, contienen las clasificaciones de las temperaturas superficiales en 5 clases, de los años 2000 y 2017, respectivamente. Además, cada clasificación de temperaturas está acompañada por su respectiva clasificación supervisada del año correspondiente, de manera de facilitar la interpretación de los resultados. El anexo 1 contiene la clasificación de las temperaturas superficiales y clasificación supervisada del año 2014, ya que no existe una diferencia notoria entre los años 2014 y 2017 respecto al cambio de coberturas.

Así, podemos observar de manera clara en las figuras 23 y 24 que las temperaturas superficiales máximas se registran en las zonas urbanas, y la arena que es una cobertura que posee propiedades que le permiten almacenar de buena manera el calor, estas dos coberturas están directamente ligadas, ya que las zonas urbanas están construidas principalmente por hormigón, el cual está compuesto en gran medida de arena.

Las temperaturas intermedias se registran principalmente en el suelo desnudo, cobertura que como se puede observar ha ido reemplazando principalmente a los humedales y en menor escala a la vegetación. Las temperaturas mínimas son registradas principalmente en los cuerpos de agua y la vegetación, la cual por sus propiedades retiene de buena manera la humedad, lo cual conlleva a diferenciarse claramente del suelo desnudo.

Espacialmente podemos observar que las temperaturas superficiales máximas en la zona urbana han ido en aumento, de hecho se aprecian en la imagen del año 2017 islas de calor superficiales bien definidas a diferencia del año 2000, en donde las manchas de temperatura superficial máxima son menos densas.

Siguiendo con el análisis de las figuras 23 y 24, encontramos que la temperatura superficial de los humedales ha ido claramente en aumento, pasando de tener temperaturas superficiales características de vegetación y agua a temperaturas superficiales, propias de suelo desnudo. Este cambio se puede observar de manera clara en el humedal los batros, el cual en el año 2000 poseía temperaturas superficiales similares a las del río Biobío y en el año 2017 tiene temperaturas similares al suelo desnudo.

Es interesante observar el aumento de la temperatura superficial que ha experimentado el río Biobío. Este fenómeno se puede observar de manera clara en el área de su desembocadura, en donde se aprecia el contraste que existe entre las temperaturas superficiales del océano pacífico y el río Biobío, el área de dicho contraste ha experimentado un aumento considerable en los últimos 17 años, lo que se puede interpretar como un aumento de la temperatura superficial del río Biobío o un decremento de la temperatura superficial del océano pacífico.

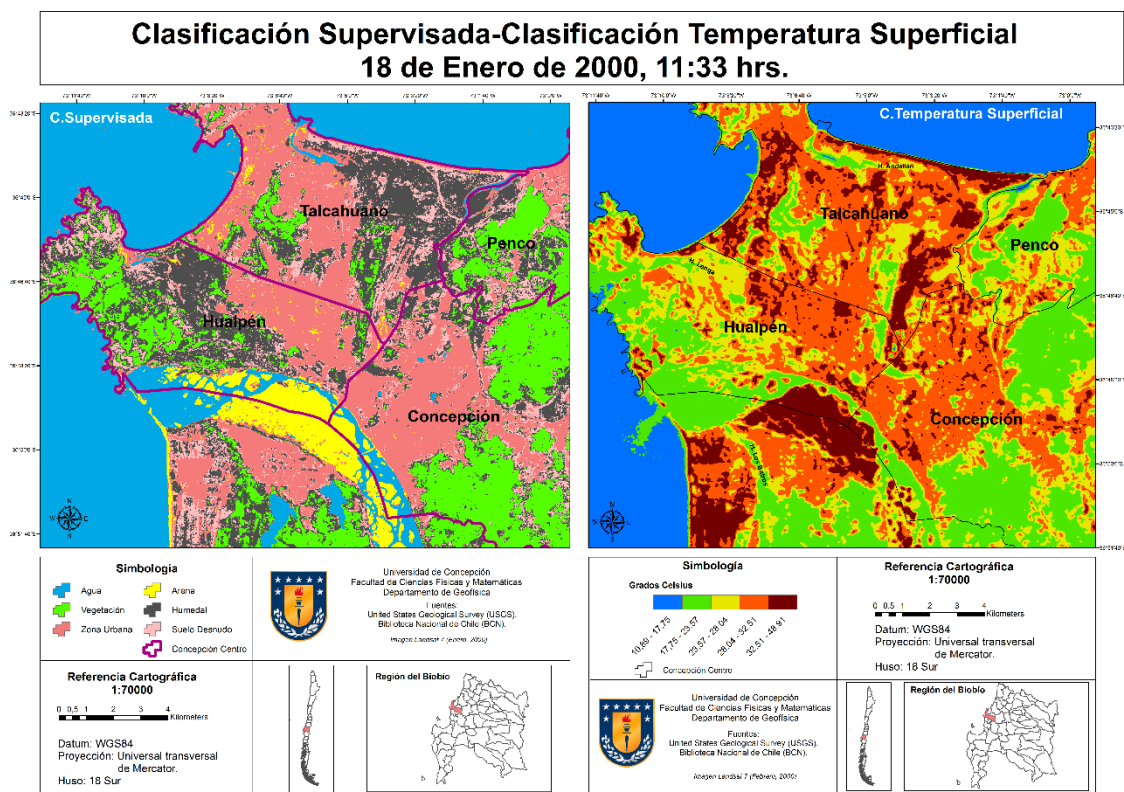


Figura 23: Se muestra a la izquierda de la imagen la clasificación supervisada del año 2000 (figura 14). A la derecha se muestra la clasificación de temperaturas superficiales de la imagen del satélite Landsat 7 del año 2000, se clasificaron las temperaturas en 5 clases mediante el método de quiebres naturales, estas temperaturas superficiales están contenidas en los intervalos 10.89-17.75; 17.75-23.57; 23.57-28.04; 28.04-32.51; 32.51-48.91.

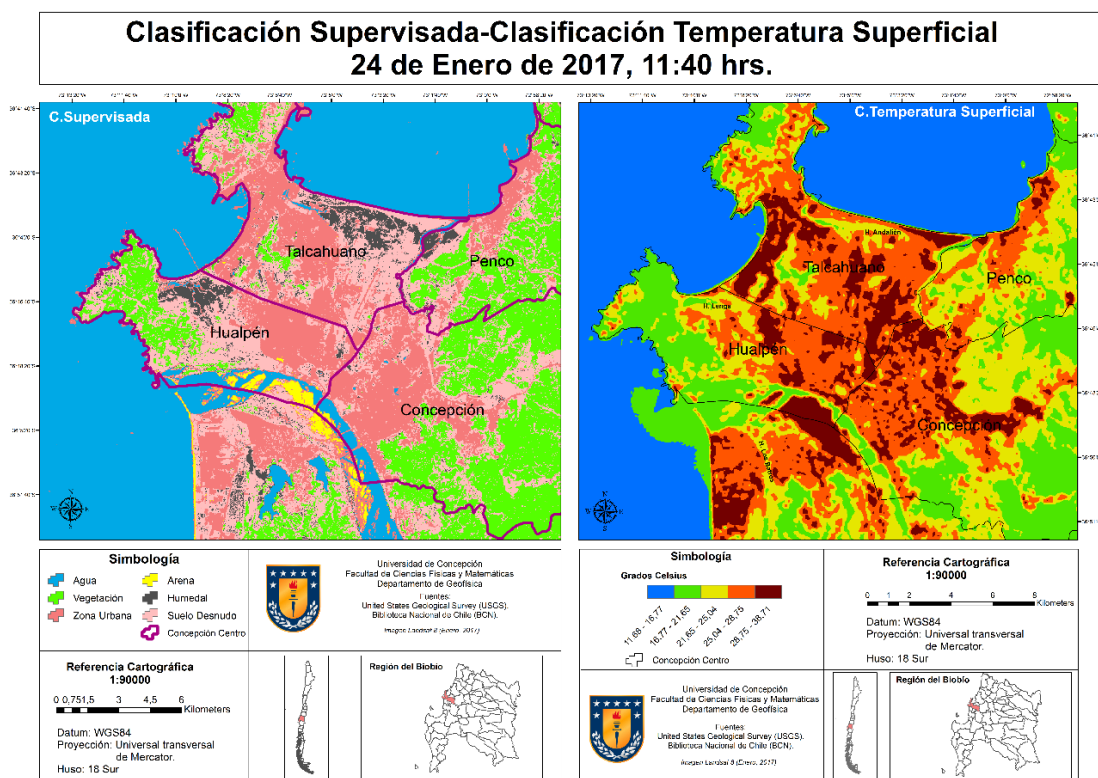


Figura 24: La imagen de la izquierda muestra la clasificación supervisada del año 2017 (figura 20). A la derecha se muestra la clasificación de temperaturas superficiales realizada a la imagen del satélite

Landsat 8 del año 2017, se clasificaron las temperaturas en 5 clases mediante el método de quiebres naturales, estas temperaturas superficiales están contenidas en los intervalos 11.68-16.77; 16.77-21.65; 21.65-25.04; 25.04-28.75; 28.75-38.71.

4.5 Análisis de coberturas

Es importante destacar que para realizar esta sección se restringieron las dos imágenes de Landsat 8 a los mismos límites espaciales que posee la imagen Landsat 7, con el objetivo de realizar un análisis comparativo de la zona de estudio en diferentes periodos de tiempo.

4.5.1 Análisis de áreas

Zona urbana

En la tabla 12 podemos apreciar la estimación del área total de la superficie urbana en los años 2000 y 2017. Podemos decir que la zona urbana ha experimentado un crecimiento de alrededor del 20% en los últimos 17 años, esto equivale a 1558 [ha] de superficie. Cabe destacar que nos estamos centrando solamente en las comunas de Concepción, Hualpén, San Pedro de la Paz y Talcahuano.

Año	Área Total [ha]
2000	7580,8
2017	9138,67

Tabla 12: Área total de superficie urbana en los años 2000 y 2017. Estimación hecha mediante la herramienta "Zonal Statistics" y las clasificaciones supervisadas de los años 2000 y 2017, las cuales poseen un 87% y un 97% de confiabilidad, respectivamente (Fuente: Elaboración propia).

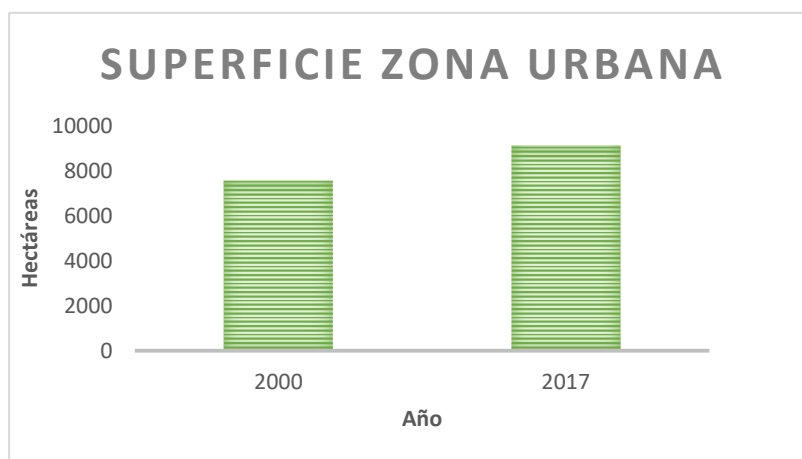


Figura 25: Gráfico de barras mostrando el área total de superficie urbana registrada por las clasificaciones supervisadas de los años 2000 y 2017, las cuales poseen un 87% y 97% de confiabilidad, respectivamente (Fuente: Elaboración propia).

Vegetación

La vegetación como podemos observar en la tabla 13 ha ido claramente en aumento en los últimos 17 años, experimentando un crecimiento de alrededor

de un 26% en el periodo 2000-2017, esto se puede apreciar de buena manera en la figura 14, en la cual se aprecia una clara ausencia de cobertura vegetal en la zona de estudio. Esto puede deberse a factores externos excepcionales que ocurrieron en un periodo anterior a la fecha de adquisición de la imagen satelital del año 2000, como incendios forestales, sequia o tala indiscriminada de árboles. Debido a la escasa cobertura temporal que poseen nuestras imágenes satelitales no podemos entrar en detalles, por lo que solo nos limitamos a realizar un análisis general de las coberturas. Sin embargo, analizando el periodo 2014-2017, tenemos una mejor cobertura temporal, en este periodo la vegetación también experimentó un aumento espacial en alrededor de un 0.5% lo que se traduce en un aumento aproximado de 68 [ha] de vegetación. Por ende el aumento de vegetación en positivo en ambos periodos.

Año	Área Total [ha]
2000	10952,55
2014	13757,68
2017	13819,1

Tabla 13: Área total de cobertura vegetal en los años 2000-2014-2017. Esta estimación fue realizada con la herramienta "Zonal Statistics" y las clasificaciones supervisadas de los años 2000-2014 y 2017, con una confiabilidad del 87%-96%-97%, respectivamente (Fuente: Elaboración propia).

Suelo Desnudo

El suelo desnudo ha ido claramente en aumento como lo muestra la tabla 14 y la figura 26. Analizando el periodo 2000-2017, esta cobertura ha aumentado su superficie en un 63% equivalente a 4400 [ha] de terreno. Sin embargo, lo más interesante es analizar el periodo 2014-2017, en donde se observa (Figura 26) un fuerte aumento espacial de suelo desnudo equivalente a unas 3600 [ha]. Esta cifra es tremenda puesto que equivale al 81% de la expansión experimentada por el suelo desnudo en los últimos 17 años.



Figura 26: Grafica que muestra la transformación espacial que ha experimentado la cobertura suelo desnudo en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2017 (Fuente: Elaboración propia).

Año	Área Total [ha]
2000	7050,53
2014	7800,68
2017	11485,8

Tabla 14: Área total de cobertura suelo desnudo en los años 2000-2014-2017. Esta estimación fue realizada con la herramienta "Zonal Statistics" y las clasificaciones supervisadas de los años 200-2014 y 2017 con una confiabilidad del 87%-96%-97%, respectivamente (Fuente: Elaboración propia).

Humedales

Los humedales es la cobertura que ha experimentado mayores cambios en los últimos 17 años (Figura 27), perdiendo una superficie cercana al 84% desde el año 2000 al 2017 (Tabla 15), lo que equivale en promedio a 440 [ha] perdidas al año. Analizando el periodo 2014-2017 podemos observar que en los últimos tres años en promedio se han perdido alrededor de 580 [ha] al año, lo que nos comprueba que la estimación entre los años 2000-2017 no se aleja en demasía a lo estimado en el periodo 2014-2017, el cual es analizado mediante dos imágenes del satélite Landsat 8, así desestimamos los errores comparativos que se pueden producir por la comparación de imágenes de diferentes satélites.

Año	Área Total [ha]
2000	8984,37
2014	3230,28
2017	1444,3

Tabla 15: Área total de cobertura humedal en los años 2000-2014-2017. Esta estimación fue realizada con la herramienta "Zonal Statistics" y las clasificaciones supervisadas de los años 2000-2014 y 2017 con una confiabilidad del 87%-96%-97%, respectivamente (Fuente: Elaboración propia).

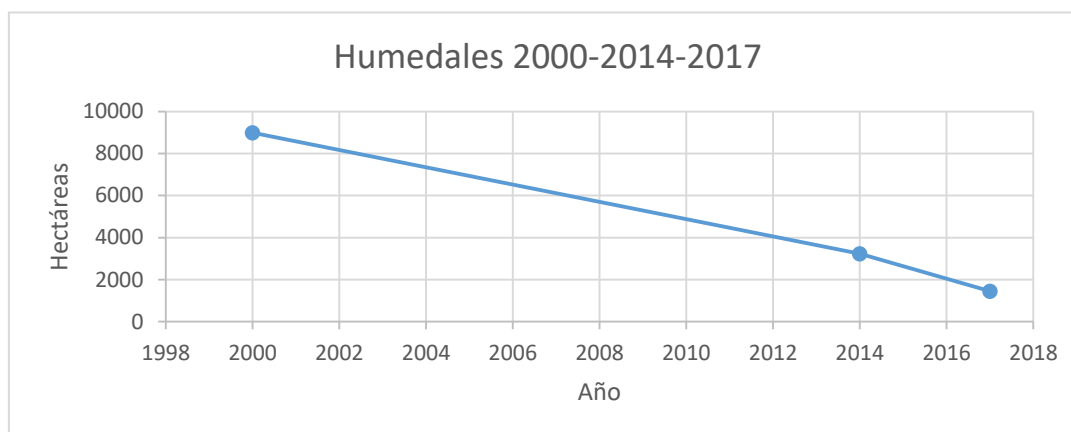


Figura 27: Gráfica que muestra la transformación espacial que ha experimentado la cobertura humedal en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2017 (Fuente: Elaboración propia).

Arena

La cobertura arena es la cobertura que menos superficie abarca en nuestra zona de estudio. En la tabla 16 podemos observar que la arena ha experimentado una disminución de su área. Si observamos el periodo 2000-2014 la disminución es muy pequeña de 295 ha, al ser un valor pequeño este resultado podría estar siendo afectado por la confiabilidad de la clasificación supervisada. Sin embargo, analizando el periodo 2014-2017 existe una

disminución considerable de la cobertura arena en el área de estudio, puesto que disminuyó en alrededor de 932 [ha] en tres años, registrando una pérdida del 64% de su área, este periodo en análisis posee una buena fiabilidad puesto que las clasificaciones supervisadas de los años 2014 y 2017 poseen un índice kappa del 96% y 97%, respectivamente.

Año	Área Total [ha]
2000	1745,95
2014	1450,46
2017	518

Tabla 16: Área total de cobertura arena en los años 2000-2014-2017. Esta estimación fue realizada con la herramienta "Zonal Statistics" y las clasificaciones supervisadas de los años 2000-2014 y 2017 con una confiabilidad del 87%-96%-97%, respectivamente (Fuente: Elaboración propia).

4.5.2 Análisis de temperaturas superficiales por cobertura

4.5.2.1 Año 2000

Las variables estadísticas de temperatura superficial de cada cobertura presente en el área de estudio se muestran en la tabla 17.

Las mayores temperaturas superficiales promedio se registran en la arena, cobertura en la cual se registra la temperatura superficial máxima registrada por la imagen térmica. La zona urbana posee la segunda mayor temperatura superficial promedio, solo un grado Celsius por debajo de la arena, podemos observar que el rango en el cual se mueve la temperatura superficial de la zona urbana es el mayor con respecto a las otras coberturas presentes, esto se debe a que no todas las construcciones urbanas están expuestas al sol alrededor de las 11:30 horas (hora de adquisición de la imagen satelital del año 2000), originándose sombras generadas por edificaciones más altas que su entorno y generando así zonas urbanas frías (Lamarca, 2016).

La vegetación es la cobertura que posee la temperatura superficial promedio más baja (exceptuando el agua), esto producto de las propiedades que posee la vegetación la cual retiene de buena manera la humedad. Además, la vegetación posee el rango de temperaturas superficiales más acotado.

Los humedales poseen una temperatura superficial promedio similar a la del suelo desnudo pero su rango de temperatura es acotada en casi 10°C menos que dicha cobertura, esto es debido a que dentro de la cobertura suelo desnudo pueden existir zonas con poca o nula vegetación lo que genera que se registren temperaturas superficiales contenidas en un rango más amplio. Por ejemplo, dentro de la cobertura vegetal solo encontramos vegetación por lo que el rango de temperaturas superficiales de dicha cobertura es acotado solo a vegetación, mientras que dentro del suelo desnudo pueden estar presentes más de un tipo

de cobertura, como suelo totalmente desnudo y suelo semi-desnudo, lo que genera un aumento en el rango de temperaturas que se observan.

COBERTURA	T. Mínima	Máxima	Rango	T. Promedio
Agua	10,89	32,09	21,19	14,95
Vegetación	11,83	33,92	22,08	21,95
Zona Urbana	11,52	48,91	37,38	30,16
Arena	13,69	41,24	27,55	31,78
Humedal	11,83	38,76	26,92	27,33
Suelo Desnudo	13,38	48,91	35,52	30,65

Tabla 17: Variables estadísticas de la temperatura superficial con respecto a la clasificación de coberturas del año 2000, obtenidas con el satélite Landsat 7, el día 18 de enero de 2000 a las 11:33 horas. (Fuente: Elaboración propia).

4.5.2.2 Año 2014

La tabla 18 muestra las variables estadísticas de temperatura superficial presentes en cada cobertura del área de estudio en el año 2014.

El análisis es similar al realizado para la imagen del año 2000, puesto que los valores de temperatura superficial solo disminuyen en algunos grados pero las proporciones entre coberturas son muy similares. Esto es debido a que la imagen del año 2014 fue adquirida por el satélite Landsat 8, mientras que la imagen del año 2000, fue adquirida por el satélite Landsat 7. Los cuales poseen diferentes sensores térmicos y radiométricos. Sin embargo, para efectos de nuestro estudio la diferencia entre las variables estadísticas de temperatura superficial en las coberturas presentes, guardan prácticamente las mismas proporciones entre ambos satélites, por ende el análisis es el mismo.

COBERTURA	Mínima	Máxima	Rango	T. Promedio
Agua	10,69	30,32	19,63	14,00
Vegetación	13,70	31,54	17,83	17,96
Zona Urbana	10,85	38,15	27,30	26,02
Arena	11,37	38,26	26,88	26,55
Humedal	14,32	35,29	20,97	22,65
Suelo Desnudo	13,38	36,95	23,57	24,50

Tabla 18: Variables estadísticas de la temperatura superficial con respecto a la clasificación de coberturas del año 2014, obtenidas con el satélite Landsat 8, el día 1 de febrero de 2014 a las 11:41 horas. (Fuente: Elaboración propia).

4.5.2.3 Año 2017

Observando la tabla 19 podemos interpretar que al igual que en los años 2000 y 2014, la arena posee la temperatura superficial promedio más elevada entre las diferentes coberturas del área de estudio, además es en esta cobertura donde se registran las temperaturas superficiales máximas.

La zona urbana posee la segunda temperatura superficial promedio más elevada, pero al igual que en las imágenes de años anteriores es la cobertura que posee el mayor rango de temperaturas superficiales (26.4°C), esto producto de las sombras generadas por las construcciones urbanas más altas que el entorno, produciendo zonas urbanas más frías (Lamarca, 2016).

El análisis que se puede hacer de la vegetación, suelo desnudo y humedales es el mismo hecho para la imagen del 2000, ya que solamente cambian los valores de temperatura superficial pero las proporcionalidades entre las clases siguen siendo las mismas (ver tablas 17, 18 y 19).

COBERTURAS	Mínima	Máxima	Rango	T. Promedio
Agua	11,89	29,87	17,98	14,86
Vegetación	15,19	29,71	14,51	21,17
Zona Urbana	12,09	38,53	26,44	27,48
Arena	17,42	38,71	21,29	30,24
Humedal	15,53	34,67	19,13	24,90
Suelo Desnudo	13,00	38,19	25,19	25,42

Tabla 19: Variables estadísticas de la temperatura superficial con respecto a la clasificación de coberturas del año 2017, obtenidas con el satélite Landsat 8, el día 24 de enero de 2017 a las 11:43 horas. (Fuente: Elaboración propia).

4.5.3 Estimación de la ICU superficial del Gran Concepción

Como explicamos en secciones anteriores para calcular la magnitud de la isla de calor urbano superficial, sustraeremos la temperatura superficial promedio de las zonas consideradas como no-urbanas y no intervenidas por el hombre a la temperatura superficial promedio de la zona urbana. Así, calculamos el promedio entre la temperatura superficial promedio de las coberturas humedales y vegetación, para posteriormente sustraer este resultado a la temperatura superficial promedio de las zonas urbanas.

La tabla 20 muestra la magnitud de la ICU superficial registrada en el centro de Concepción a eso de las 11:30 horas. Se puede observar que en el año 2014 se registra la ICU superficial de mayor magnitud alcanzando los 5.7°C, siguiendo con el año 2000, donde se alcanzó una magnitud de 5.5°C, mientras que en la imagen del año 2017 se registró una magnitud de 4.4°C.

La magnitud de la ICU superficial puede estar influenciada por diversos factores meteorológicos, principalmente el viento y la nubosidad. El viento en contacto con la superficie urbana hace disminuir su temperatura, es por ello que la velocidad del viento es un atenuador de la temperatura superficial. En tanto la humedad que mide la cantidad de vapor de agua presente en el aire, también actúa como un atenuador de la temperatura superficial, por lo tanto a mayor humedad relativa menor será la temperatura superficial, puesto que los rayos del sol deben atravesar una capa de vapor de agua (agua) más gruesa, la cual se

encuentra a temperaturas más bajas con respecto a la temperatura superficial urbana.

Por lo anterior y por la tabla 21, podemos interpretar que la diferencia que existe entre la magnitud de la ICU superficial del año 2017 y las de los años 2000 y 2014 se puede explicar debido a la mayor humedad relativa, la mayor velocidad máxima del viento sostenida y la mayor velocidad media del viento que existieron el día 24 de enero del 2017 con respecto a los días 01/02/2014 y 18/01/2000, fechas en las cuales fueron adquiridas las imágenes satelitales del área de estudio. Sin embargo, consideramos que los resultados de la estimación de la magnitud de la ICU superficial son coherentes, principalmente en los años 2000 y 2014.

Día	Magnitud ICUs [°C]
18/01/2000	5,7
01/02/2014	5,5
24/01/2017	4,4

Tabla 20: Estimación de la intensidad de la ICU superficial registrada en el centro de Concepción los días 18/01/2000 a las 11:33 horas, 01/02/2014 a las 11:41 horas y el 24/01/2017 a las 11:40 horas. Estimación realizada mediante el sensor térmico de los satélites Landsat 7 (año 2000) y Landsat 8 (años 2014 y 2017) (Fuente: Elaboración propia).

Día	Velocidad Media	Velocidad Máxima	Temperatura Máxima	Temperatura Minina	Humedad Relativa	Precipitación
	Viento [Km/h]	Sostenida del Viento [Km/h]	[°C]	[°C]	[%]	[mm]
18/01/2000	16,1	31,3	24	9,7	71	0
01/02/2014	18,1	33,5	22,9	8,8	65	0
24/01/2017	17,6	33,5	26,2	13	68	0

Tabla 21: Factores meteorológicos que juegan un rol clave en la intensidad de las islas de calor superficiales, registrados en los días en que fueron capturadas las imágenes satelitales (Fuente: Elaboración propia mediante la base de datos de Tutiempo Network).

4.6 Análisis espacial de la isla de calor atmosférica

Generamos 24 mapas de isotermas mediante la interpolación de las temperaturas atmosféricas para nuestra área de estudio, se optó por analizar los mapas de las 8:00, 12:00, 14:00, 18:00, 20:00 y 23:00 horas, dado que en trabajos anteriores (Hernández (2013) y Gómez (2014)) y en base a nuestros resultados, estas son las horas en donde se exacerban los efectos de las ICU. En los anexos 2, 3, 4, 5 y 6 se presentan los mapas de isotermas de las 1:00, 3:00, 6:00, 10:00 y 16:00 horas, respectivamente. Puesto que sería repetitivo e innecesario para los objetivos del trabajo analizar todos los mapas de isotermas generados.

4.6.1 Mapa Isotermas 8:00 horas

La figura 28 muestra el mapa de isotermas presentes en el área de estudio a las 8:00 horas. Se puede observar que las temperaturas a esta hora son prácticamente homogéneas a lo largo de nuestra zona de estudio. Se puede observar que hacia la periferia de la zona urbana existe un decremento de las temperaturas, principalmente hacia el humedal Rocuant-Andalién y los cerros posicionados hacia el sureste de la Universidad de Concepción.

Cabe señalar que las temperaturas más cálidas están directamente relacionadas al uso de suelos puesto que estas se sitúan sobre construcciones urbanas.

Aplicamos nuestra metodología mencionada en la sección 3.2.9, en la cual calculamos el promedio de la temperatura atmosférica en la zona urbana y sustraemos a dicho promedio el valor de la temperatura atmosférica de la estación meteorológica TIGO, la cual fue la única estación posicionada sobre y rodeada de cobertura considerada como no-urbana. El promedio de la temperatura urbana fue de 16.6°C a las 8:00 horas, mientras que a esa misma hora la estación TIGO registró una temperatura de 14.2°C, por lo que la magnitud de la isla de calor de la capa de dosel fue de 2.6°C.

Se puede observar en la figura 28, la existencia de una pequeña isla de frescor urbano que se localiza prácticamente en la intersección de las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano. Esta isla de frescor es pequeña, ya que su magnitud es de aproximadamente 1°C. Dicha isla de frescor urbano se origina como consecuencia del decremento de las temperaturas superficiales durante la noche debido a la nula radiación proveniente del sol, generando que la superficie urbana realice una transferencia de calor negativo hacia la atmósfera, generando así temperaturas atmosféricas menores en ciertos puntos de la ciudad.

En general las comunas de Talcahuano y Hualpén poseen temperaturas atmosféricas homogéneas en relación a la comuna de Concepción, en donde se registran temperaturas más heterogéneas. Esta heterogeneidad de las temperaturas en la comuna de Concepción tiene directa relación a los tipos de uso de suelos existentes en dicha comuna, puesto que se observa que la zona urbana está rodeada por una densa cobertura vegetal. Esto no ocurre en las otras comunas en estudio y por eso las diferencias.

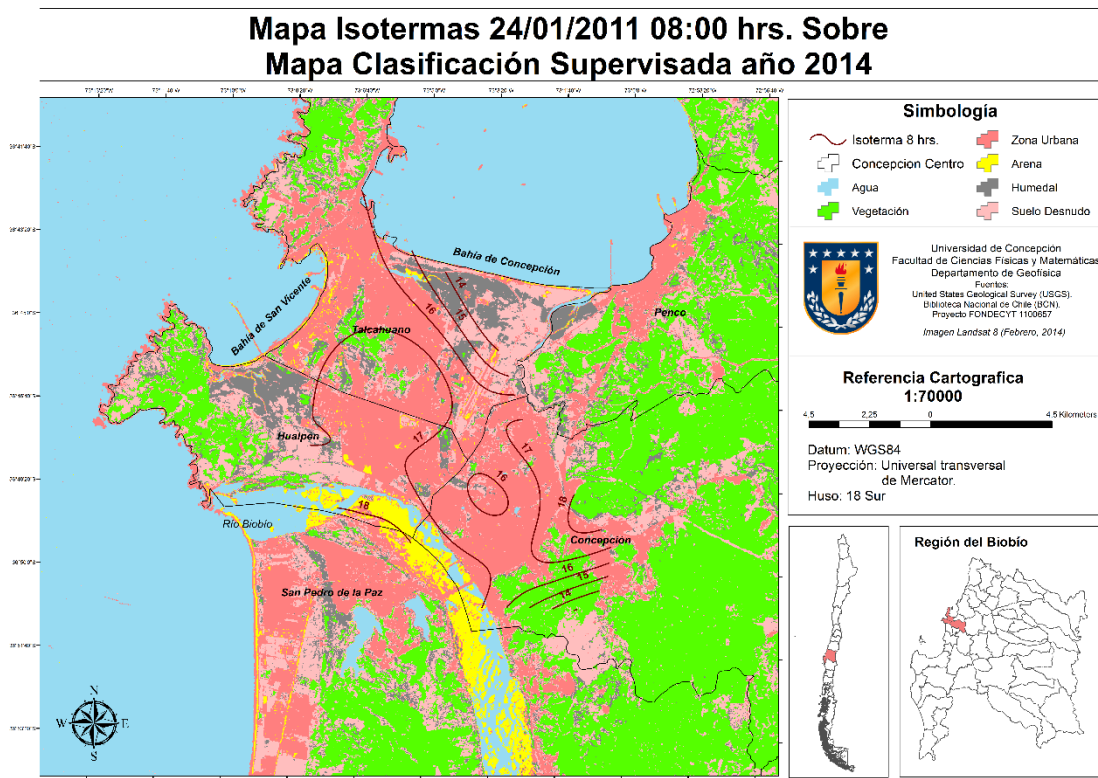


Figura 28: Mapa de isotermas del día 24 de enero de 2011 a las 8:00 horas en el centro de Concepción, sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de febrero de 2014. El objetivo es visualizar sobre qué tipo de coberturas se registran las diferentes temperaturas del aire, para así darnos una idea cómo el uso de suelos contribuye a la formación de las islas de calor urbano (Fuente: Elaboración propia).

4.6.2 Mapa Isotermas 12:00 horas

Podemos observar en la figura 29 que la distribución de las temperaturas atmosféricas a las 12:00 horas se modifica con respecto a lo que ocurre a las 8 horas, ya que a las 12:00 horas se presentan isotermas nucleares cerradas.

Se observan 2 isotermas cerradas ubicadas sobre la zona urbana del centro de Concepción, la isoterma cerrada que posee una mayor magnitud se emplaza en la intersección de las comunas de Talcahuano, Concepción y Hualpén al lado sur del aeropuerto Carriel-Sur. Mientras que la segunda isoterma cerrada se emplaza sobre el sector de Nonguén perteneciente a la comuna de Concepción.

Al igual como ocurre a las 8:00 horas las temperaturas atmosféricas de las 12:00 horas comienzan a decrecer hacia la periferia del centro de Concepción, específicamente hacia los humedales Lengua, Rocuant-Andalién y hacia los cerros ubicados al sureste de la universidad de Concepción.

La magnitud de la ICU atmosférica a esta hora del día es de 3.1°C , registrándose una diferencia de temperaturas máxima de 5.2°C entre la estación TIGO y la estación ubicada en el sector de Lomas de San Andrés.

Quisimos analizar esta hora del día con el objetivo de posteriormente realizar la correlación entre la temperatura superficial y la temperatura atmosférica a esta hora, ya que como mencionamos anteriormente la hora de adquisición de los satélites Landsat es de aproximadamente a las 11:40 horas.

Es interesante observar que la isla de frescor urbano observada a las 8:00 horas, posteriormente se transforma en una isla de calor urbano, ya que la isla de calor observada a las 12 horas se localiza en el mismo sitio donde se observó la isla de frescor urbano (ver figura 28).

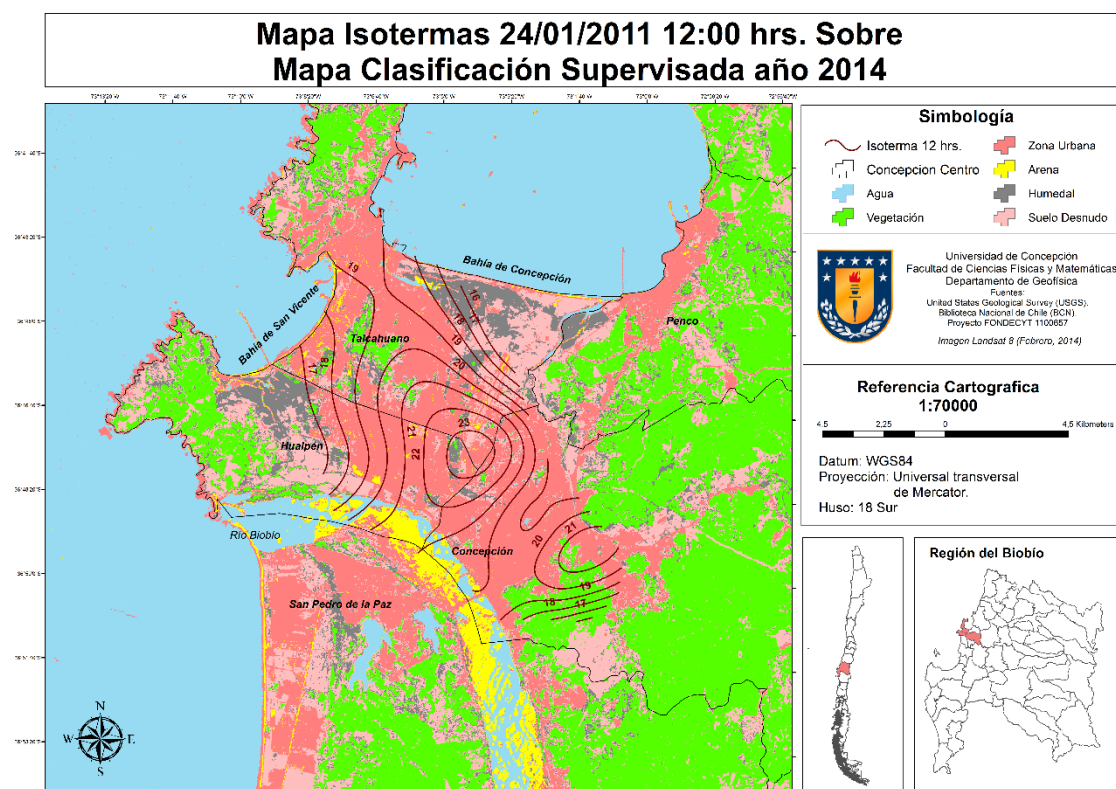


Figura 29: Mapa de isotermas del día 24 de enero de 2011 a las 12:00 horas en el centro de Concepción, sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de febrero de 2014. El objetivo es visualizar sobre qué tipo de coberturas se registran las diferentes temperaturas del aire, para así darnos una idea cómo el uso de suelos contribuye a la formación de las islas de calor urbano (Fuente: Elaboración propia).

4.6.3 Mapa Isotermas 14:00 horas

A esta hora del día es donde se exacerban los efectos de la ICU, ya que es a esta hora en donde se registra la magnitud máxima de la ICU atmosférica del Gran Concepción.

Podemos observar en el mapa de isotermas de la figura 30 la heterogeneidad que presentan las temperaturas atmosféricas en el área de estudio, sin embargo se sigue manteniendo el patrón de las 12:00 horas, en donde observamos dos isotermas nucleares cerradas. La isoterma nuclear cerrada que posee la mayor temperatura se localiza sobre la intersección de las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción, emplazándose muy cerca del

aeropuerto Carriel-Sur, mientras que la isoterma nuclear de menor magnitud se ubica sobre el sector de Nonguén en la comuna de Concepción.

Al igual que en horas anteriores las temperaturas atmosféricas disminuyen considerablemente hacia la periferia, en donde existe menos cobertura urbana y mayor cantidad de vegetación o humedales. Se puede apreciar de buena manera como hacia el humedal Lengua la temperatura disminuye considerablemente, lo mismo ocurre hacia el humedal Rocuant-Andalién, pero en menor medida, mientras que hacia el sector de Tucapel, perteneciente a la comuna de Penco en donde se registra un notable descenso de las temperaturas atmosféricas, esto debido a la densa cobertura vegetal presente en dicha zona. Los cerros ubicados al sureste de la Universidad de Concepción también generan una disminución de las temperaturas a esta hora del día pero a diferencia de horas anteriores esta disminución no es tan marcada.

La magnitud de la ICU atmosférica a las 14:00 horas en el centro de Concepción es de 4.6°C y es la hora del día en donde se registra la máxima intensidad de la ICU atmosférica. La menor temperatura atmosférica registrada a esta hora es de 18.5°C en la estación TIGO, la cual está ubicada en los cerros emplazados al sureste de la Universidad de Concepción, mientras que la temperatura máxima es de 26.5°C registrada en el sector de Lomas de San Andrés, por lo que tenemos una diferencia de temperatura de 8°C entre el centro de Concepción y su periferia, fenómeno que puede ser explicado por la abundante vegetación que rodea a la estación TIGO, mientras que la estación ubicada en Lomas de San Andrés está posicionada sobre y rodeada de cobertura urbana, lo que puede generar estas grandes diferencias de temperatura.

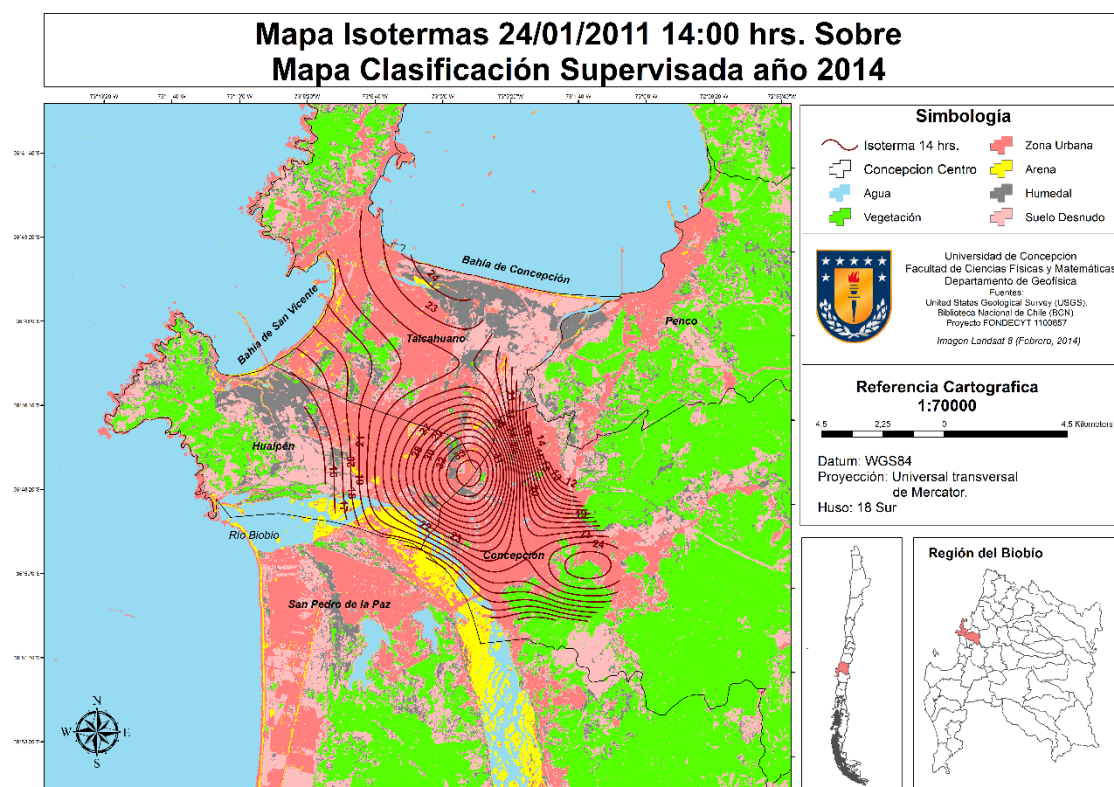


Figura 30: Mapa de isotermas del día 24 de enero de 2011 a las 14:00 horas en el centro de Concepción, sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de febrero de 2014. El objetivo es visualizar sobre qué tipo de coberturas se registran las diferentes temperaturas del aire, para así darnos una idea cómo el uso de suelos contribuye a la formación de las islas de calor urbano (Fuente: Elaboración propia).

4.6.4 Mapa Isotermas 18:00 horas

En mapa de isotermas de las 18:00 horas se presenta en la figura 31, podemos observar una distribución de temperaturas más homogeneizada en relación a lo que ocurre a las 14:00 horas.

Podemos observar que se repite el mismo patrón de horas anteriores con dos isotermas nucleares cerradas, pero ahora observamos un cambio de posición de estas isotermas. La isoterma cerrada de mayor magnitud ahora se posiciona más hacia el oeste, quedando casi completamente situada en la comuna de Hualpén muy cercana a la parte sur del aeropuerto Carriel-Sur. Mientras que la isoterma cerrada de menor magnitud también se desplaza hacia oeste, quedando ubicada sobre el sector Lo Pequen, ubicado a aproximadamente 1 kilómetro al noreste de la universidad de Concepción.

A pesar que las temperaturas disminuyen hacia la periferia del centro de Concepción, a esta hora del día este efecto es menor que en horas anteriores y la distribución de temperaturas se homogeneiza en el área de estudio, con excepción de los cerros ubicados hacia el sureste de la Universidad de Concepción (TIGO), en donde se sigue observando una clara disminución de las temperaturas, lo que puede ser explicado por la densa cobertura vegetal que cubre dichos cerros y que generan un microclima separado de la zona

urbana, puesto que es aquí en donde se sigue registrando la menor temperatura, 4°C por debajo de la temperatura máxima registrada en el área de estudio.

La magnitud de la ICU atmosférica a las 18:00 horas es de 3.2°C, por lo que la magnitud de la ICU disminuye considerablemente en 4 horas, esto producto de que a esta hora ya comienza a disminuir la intensidad en la que los rayos del sol llegan a la superficie terrestre.

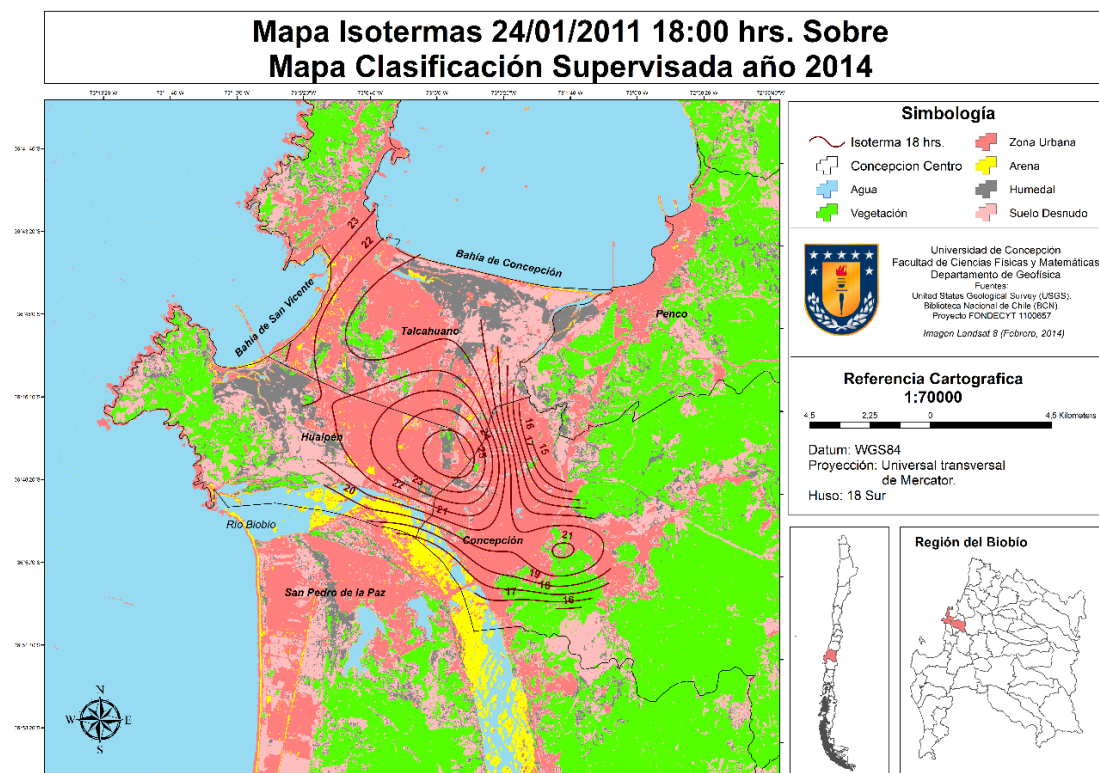


Figura 31: Mapa de isotermas del día 24 de enero de 2011 a las 18:00 horas en el centro de Concepción, sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de febrero de 2014. El objetivo es visualizar sobre qué tipo de coberturas se registran las diferentes temperaturas del aire, para así darnos una idea cómo el uso de suelos contribuye a la formación de las islas de calor urbano (Fuente: Elaboración propia).

4.6.5 Mapa Isotermas 20:00 horas

El mapa de isotermas de las 20:00 horas se puede apreciar en la figura 32. Es interesante observar la generación de una tercera isoterma nuclear cerrada en la comuna de Talcahuano, específicamente en el sector de Huachipato. Sin embargo, esta tercera isoterma cerrada presenta un comportamiento diferente a las otras dos isotermas cerradas presentes en el área de estudio.

Se puede observar que hacia la periferia de esta nueva isoterma nuclear cerrada las temperaturas incrementan, esto puede ser causado por la presencia de vegetación densa en el área, puesto que en dicha ubicación se emplaza una extensa cobertura vegetal dominada por los cerros Las Higueras y Denavi, registrando temperaturas atmosféricas en promedio 5°C menores a las que se registran el centro de Concepción. Este fenómeno es conocido como isla de

frescor urbano, puesto que se encuentra a una menor temperatura que su entorno, pero este fenómeno solo se mantiene por dos horas, puesto que como veremos a continuación desaparece.

La isoterma cerrada sobre el sector Nonguén tiende a homogenizarse con la isoterma cerrada presente en el aeropuerto Carriel-Sur, en el sector de los cerros ubicados posteriores a la Universidad de Concepción se siguen registrando las temperaturas atmosféricas más bajas, 10°C por debajo de las temperaturas registradas en la intersección de las comunas de Talcahuano, Concepción y Hualpén.

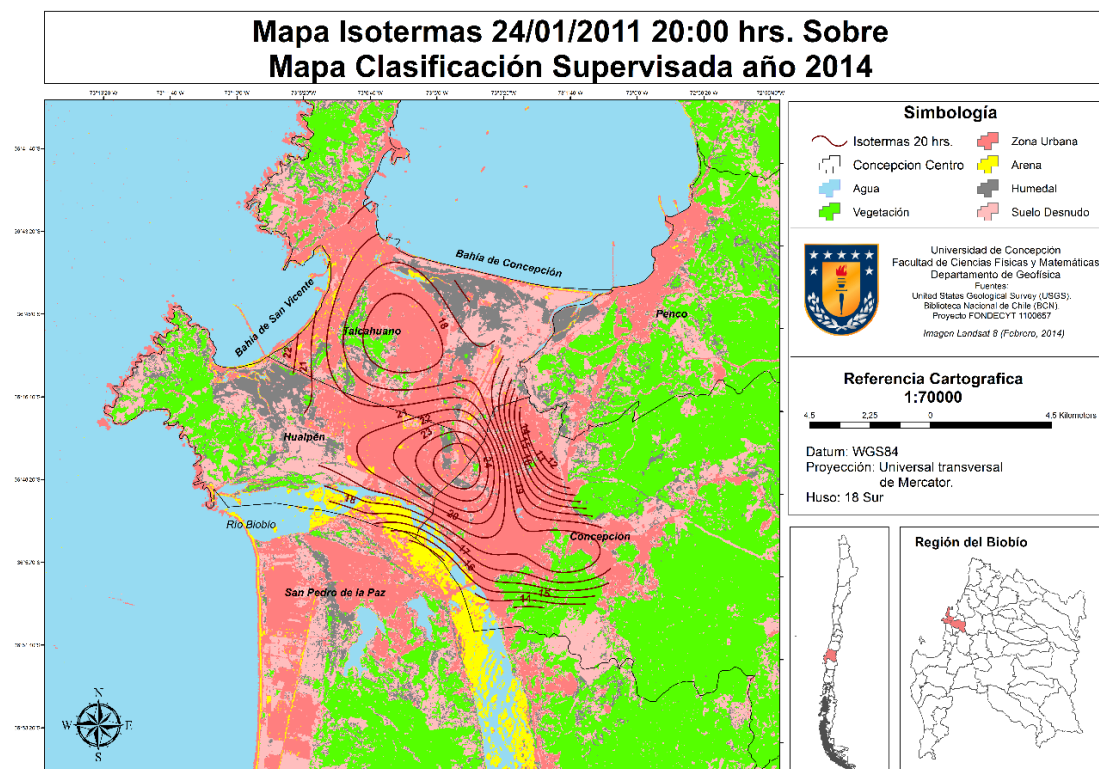


Figura 32: Mapa de isothermas del día 24 de enero de 2011 a las 20:00 horas en el centro de Concepción, sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de febrero de 2014. El objetivo es visualizar sobre qué tipo de coberturas se registran las diferentes temperaturas del aire, para así darnos una idea cómo el uso de suelos contribuye a la formación de las islas de calor urbano (Fuente: Elaboración propia).

4.6.6 Mapa Isothermas 23:00 horas

El mapa de isothermas de la última hora del día se puede observar en la figura 33. A esta hora del día ya no existen isothermas nucleares cerradas y las temperaturas atmosféricas son muy homogéneas.

Se puede apreciar que el centro de Concepción está cubierto por isothermas de 16°C, 17°C y 18°C, mientras que en los cerros en donde está ubicado el observatorio TIGO se registran temperaturas menores, entre 14°C y 16°C.

La magnitud de la ICU atmosférica a esta hora del día es de 2.2°C, y es la menor intensidad registrada a lo largo del día, junto con la ICU de las 1:00 horas

que posee igual magnitud. Por lo que en la noche la ICU atmosférica pierde magnitud en relación a las horas diurnas.

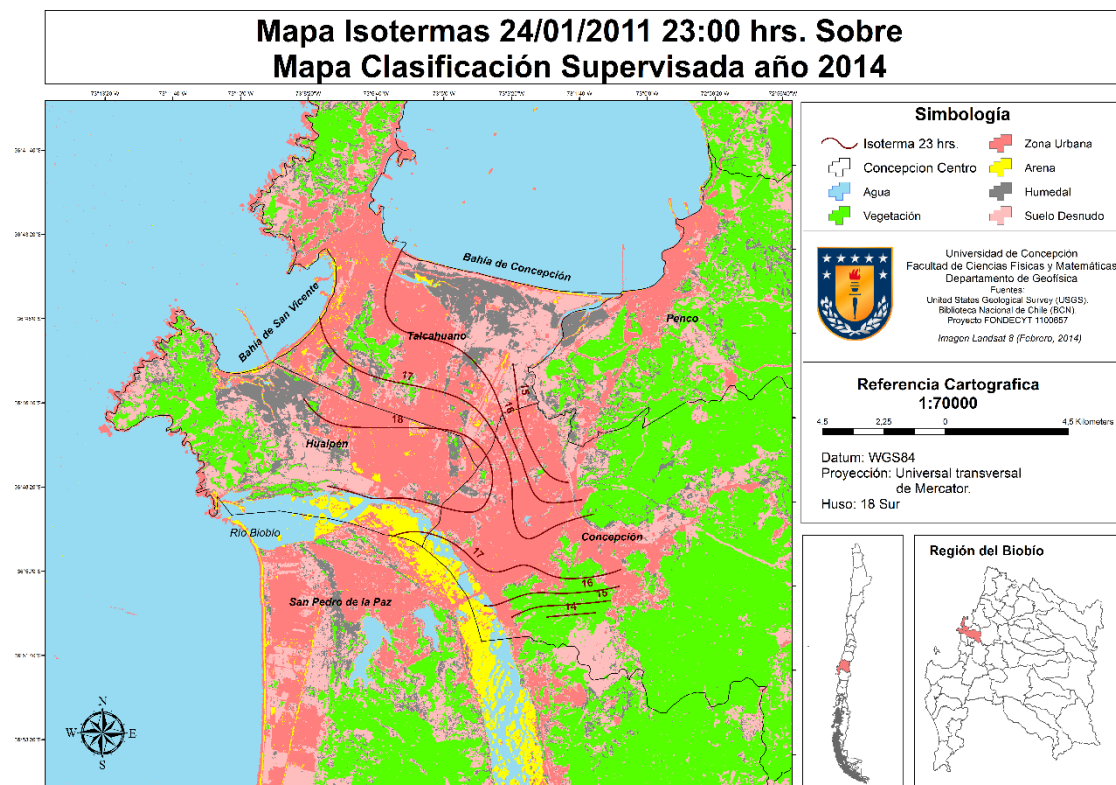


Figura 33: Mapa de isotermas del día 24 de enero de 2011 a las 23:00 horas en el centro de Concepción, sobre mapa de clasificación supervisada del día 1 de febrero de 2014. El objetivo es visualizar sobre qué tipo de coberturas se registran las diferentes temperaturas del aire, para así darnos una idea cómo el uso de suelos contribuye a la formación de las islas de calor urbano (Fuente: Elaboración propia).

4.6.7 Magnitud de la ICU atmosférica por hora, en un día caluroso de verano

En la tabla 22 se muestran las magnitudes de la ICU atmosférica alcanzadas en cada hora del día (24/01/2011).

Hora	0 hrs.	1 hrs.	2 hrs.	3 hrs.	4 hrs.	5 hrs.	6 hrs.	7 hrs.
ICU_ATM	2,5	2,2	2,2	2,4	2,3	2,3	2,4	2,3
Hora	8 hrs.	9 hrs.	10 hrs.	11 hrs.	12 hrs.	13 hrs.	14 hrs.	15 hrs.
ICU_ATM	2,3	2,6	3	2,8	3,1	3,4	4,6	4
Hora	16 hrs.	17 hrs.	18 hrs.	19 hrs.	20 hrs.	21 hrs.	22 hrs.	23 hrs.
ICU_ATM	3,6	3,2	3,2	2,9	3,2	2,9	2,4	2,2

Tabla 22: Magnitudes de la ICU atmosférica, alcanzadas sobre el área de estudio a cada hora, del día 24 de enero de 2011 (Fuente: Elaboración propia).

Graficando esta tabla como se presenta en la figura 34, podemos observar claramente la existencia de una oscilación que experimenta la magnitud de la ICU atmosférica, en donde su valor máximo se presenta a las 14:00 horas del día, mientras la menor magnitud se registra a las 1:00 y 23:00 horas del día.

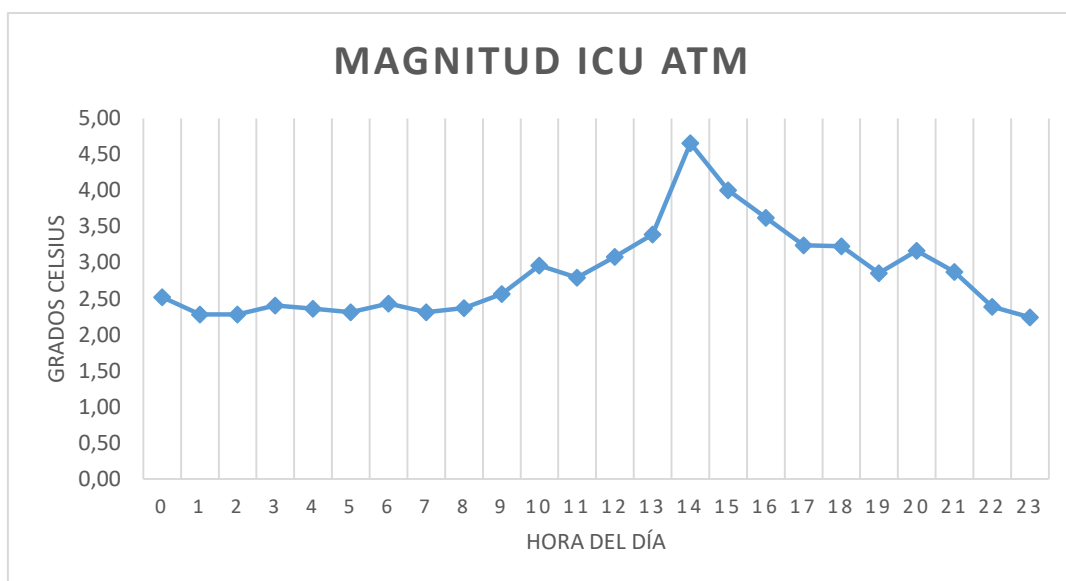


Figura 34: Comportamiento de la magnitud de la ICU atmosférica a lo largo de un día caluroso (24/01/2011) en el centro de Concepción (Fuente: Elaboración propia).

Podemos observar que el comportamiento de la curva que representa la magnitud de la ICU atmosférica a lo largo del día posee inestabilidades, que se traducen en magnitudes de la ICU que aumentan a cierta hora del día pero que en la hora siguiente disminuyen, y viceversa. Pero se observa claramente que a medida que nos acercamos a la magnitud máxima de la ICU existe una marcada tendencia positiva de estas magnitudes, y una vez que ocurre esta magnitud máxima observamos una clara tendencia negativa. Entre las 7:00 y 14:00 horas se observa claramente esta tendencia positiva, que representa un paulatino aumento de las magnitudes de la ICU atmosférica, mientras que desde las 14:00 a 1:00 horas se registra una tendencia negativa que representa un claro decremento de las magnitudes de la ICU. Sin embargo, entre las 1:00 y 7:00 horas no se puede apreciar una tendencia clara y el comportamiento de la curva de magnitudes es errática.

Por lo tanto, es el sol el que regula el comportamiento de la magnitud de la ICU atmosférica, puesto que el periodo entre el amanecer y la puesta de sol es donde se pueden apreciar marcadamente las tendencias que experimenta dicha variable, mientras que en el periodo nocturno esta variable se vuelve errática y no posee un patrón claro de comportamiento.

4.7 Correlación entre temperatura superficial y temperatura atmosférica

La ubicación de los setenta puntos aleatorios se muestra en la figura 35, los cuales se encuentran muy cercanos a las estaciones meteorológicas, con el objetivo de que la distancia no afecte en demasía los valores generados por la interpolación de las temperaturas atmosféricas, puesto que al alejarnos de las estaciones perdemos coherencia, lo que se traduce en que los valores de las

temperaturas atmosféricas interpolados sean poco confiables. Este problema se genera producto de la pobre resolución espacial que posee nuestra red de estaciones meteorológicas.

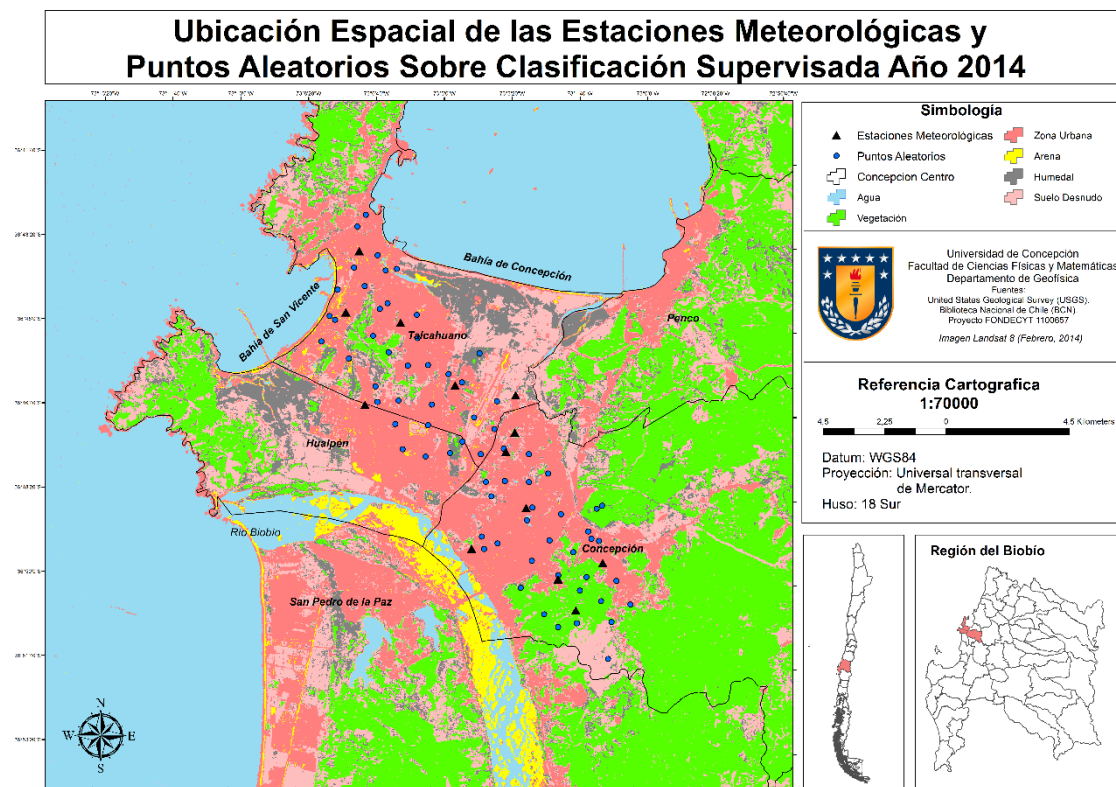


Figura 35: Mapa que muestra la ubicación espacial de las estaciones meteorológicas y los setenta puntos aleatorios que se ocuparon para extraer la temperatura superficial y la temperatura atmosférica de nuestra área de estudio, sobre el mapa de clasificación supervisada del año 2014 (Fuente: Elaboración propia).

Cabe destacar que correlacionamos la temperatura superficial que posee el centro de Concepción a las 11:41 horas del día 1 de febrero de 2014, con la temperatura atmosférica de la misma zona pero hora a hora del día 24 de enero de 2011. Consideramos que al realizar la correlación entre la temperatura superficial de solo una hora del día con la temperatura atmosférica por cada hora del día, igualmente estaremos extrayendo información importante, ya que a las 11:41 horas del día las coberturas superficiales alcanzan temperaturas que se diferencian claramente una con respecto a las otras, esto se puede apreciar en la sección 4.4, en donde es posible observar los diferentes usos de suelo solo realizando una clasificación temperaturas. Conforme avanza el día las coberturas superficiales solo experimentarán un alza en sus valores de temperatura pero la diferencia de temperaturas superficiales entre las coberturas seguirá manteniéndose, es por eso que nuestra correlación será representativa de lo que ocurre a lo largo de un día de verano, mostrándonos la dependencia de la temperatura atmosférica producto de la temperatura superficial o viceversa.

La magnitud de la correlación obtenida para cada hora del día se muestra en la tabla 23, en donde encontramos que a las 19 horas es donde la temperatura superficial y la temperatura atmosférica están mejor correlacionadas con una magnitud de 0.42. Es interesante observar que la máxima correlación del día se registra cinco horas después a la hora en donde se registran las temperaturas atmosféricas máximas, como vimos en la sección anterior (14 horas). Esto puede ser explicado por la variable calor específico que poseen tanto el aire como el asfalto, puesto que el calor específico del aire ($\approx 1012 \text{ J/Kg K}$) es mayor que el calor específico que posee el asfalto ($\approx 920 \text{ J/Kg K}$) o la arena ($\approx 290 \text{ J/Kg K}$) (materiales con los que se construyen las zonas urbanas), es por eso que el aire necesita más energía para elevar su temperatura que las superficies urbanas, un ejemplo claro es que a las 11:41 horas de la mañana se puede diferenciar claramente las zonas urbanas mediante las imágenes termales, en cambio el aire necesita mayor cantidad de calor, por ende mayor cantidad de tiempo para elevar su temperatura, lo que genera que en las primeras horas del día exista una baja correlación entre la temperatura superficial y la temperatura atmosférica, ya que como vimos en la sección anterior las temperaturas atmosféricas de las 12:00 horas son mucho más homogéneas que las temperaturas superficiales de las 11:41 horas que se presentan en la figura 13, que son visiblemente más heterogéneas.

Así podemos concluir que las propiedades de los materiales juegan un rol fundamental en la relación existente entre temperatura superficial y temperatura atmosférica (calor específico), ya que esta relación se hace más fuerte solo entre las 17 y 19 horas del día (Figura 36), puesto que en este periodo el aire posee temperaturas más similares a las que posee la superficie, esto producto de la transferencia de calor que genera la cobertura superficial hacia el aire a lo largo del día y que se manifiesta de manera más notoria entre las 17 y 19 horas. Por lo tanto, la tardanza para que se correlacione la temperatura superficial y la temperatura atmosférica queda determinada por el calor específico que poseen los materiales que componen la cobertura superficial (en su mayoría arena, asfalto) y el aire (gas).

Hora	0 hrs.	1 hrs.	2 hrs.	3 hrs.	4 hrs.	5 hrs.	6 hrs.	7 hrs.
Coeficiente Correlación	0,16	0,1	0,21	0,25	0,25	0,23	0,29	0,27
Hora	8 hrs.	9 hrs.	10 hrs.	11 hrs.	12 hrs.	13 hrs.	14 hrs.	15 hrs.
Coeficiente Correlación	0,25	0,21	0,24	0,23	0,18	0,2	0,2	0,27
Hora	16 hrs.	17 hrs.	18 hrs.	19 hrs.	20 hrs.	21 hrs.	22 hrs.	23 hrs.
Coeficiente Correlación	0,33	0,41	0,4	0,42	0,34	0,31	0,31	0,26

Tabla 23: Coeficientes de correlación existentes entre la temperatura superficial de una hora específica del día (1 de febrero de 2014) y la temperatura atmosférica para cada hora del día 24 de enero de 2011 (Fuente: Elaboración propia).

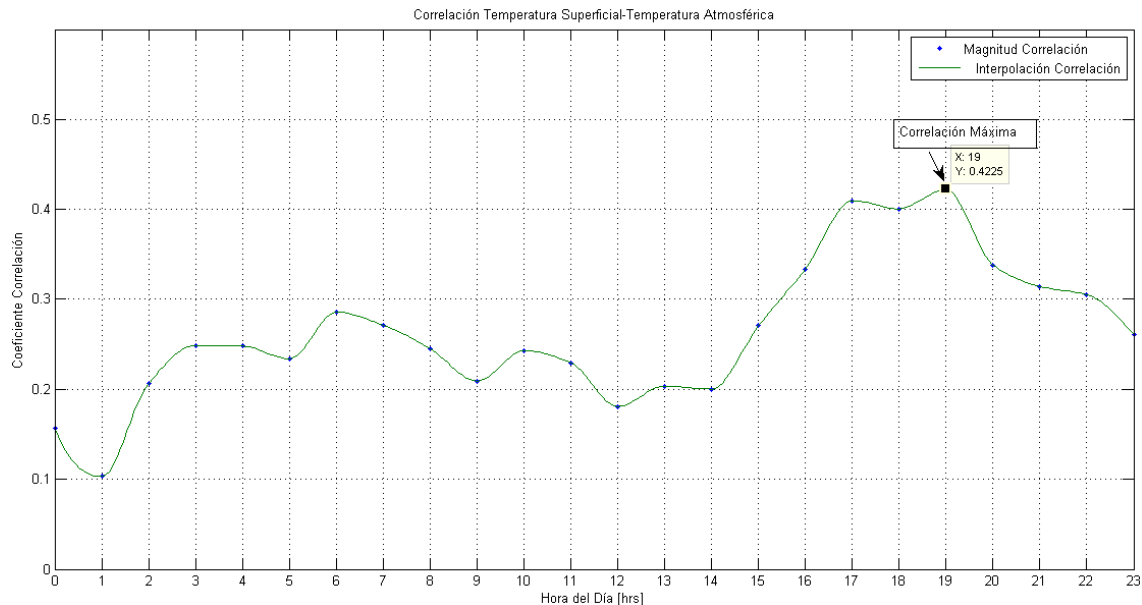


Figura 36: Comportamiento que experimenta la correlación entre la temperatura superficial de una hora específica del día y la temperatura atmosférica a lo largo de un día caluroso de verano (Fuente: Elaboración propia).

Es importante destacar que tanto en el día como en la noche la correlación entre la temperatura superficial y la temperatura atmosférica es positiva, esto significa que el comportamiento de la temperatura del aire no se comporta de manera distinta a la temperatura superficial, incluso durante la noche, en donde suponemos que las transferencias de calor superficiales mantendrían esta correlación positiva durante la noche, ya que las zonas urbanas retienen por mucho más tiempo el calor que el aire, esto producto a que materiales como el asfalto y hormigón poseen una mayor capacidad calorífica que el aire ($0,29 \text{ Kcal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Otro aspecto fundamental para los objetivos de este trabajo, es que según estos resultados la temperatura superficial no tiene una relación marcada en exacerbar la magnitud de la isla de calor urbana atmosférica en el Gran Concepción, puesto que la magnitud máxima de la ICU atmosférica se registra a las 14 horas y la máxima correlación entre la temperatura superficial y la temperatura atmosférica se registra a las 19 horas. Sin embargo, según estos resultados la temperatura superficial ayudaría a mantener por mayor tiempo la alta intensidad de la ICU atmosférica. Esto se puede apreciar claramente en la figura 36, en la cual se aprecia que entre las 18 y 19 horas la magnitud de la ICU atmosférica disminuye, sin embargo entre las 19 y 20 horas la magnitud de la ICU atmosférica aumenta, este comportamiento errático de la intensidad de la ICU a estas horas del día en las cuales la temperatura atmosférica disminuye constantemente hora tras hora y que por consecuentemente debería disminuir la magnitud de la ICU atmosférica, son explicadas por la transferencia de calor que genera la superficie urbana hacia el aire, lo que trae como consecuencia que se mantenga la ICU atmosférica por más tiempo en la zona de estudio.

Por lo tanto, la isla de calor urbano superficial ayuda a conservar la magnitud de la isla de calor urbano atmosférica por más tiempo en el área de estudio.

4.8 Correlación entre temperatura superficial y cantidad de vegetación

4.8.1 Año 2014

En la figura 37 podemos observar el mapa de NDVI, temperatura superficial y la ubicación espacial de los perfiles que fueron utilizados para estimar la correlación existente entre la cantidad de vegetación y la temperatura superficial de diferentes sectores de nuestra área de estudio en el año 2014. Cabe señalar que todos los perfiles fueron creados de izquierda a derecha a excepción de los perfiles 4 y 6 que fueron realizados de derecha a izquierda.

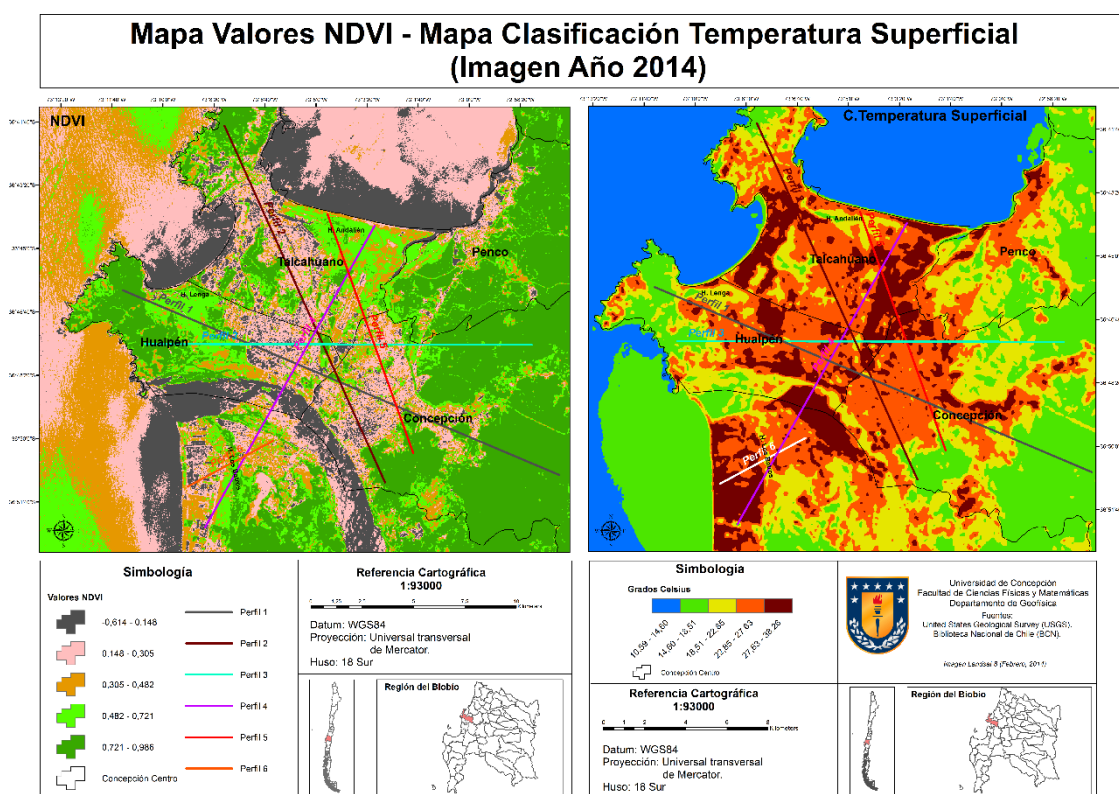


Figura 37: En la figura de la izquierda observamos el mapa del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de nuestra área de estudio en el año 2014, y en la figura de la derecha observamos la clasificación de temperaturas superficiales en 5 clases sobre nuestra área de estudio en el año 2014. Cabe destacar que ambas figuras son de la misma fecha y hora. Sobre cada una de estas figuras se encuentran los perfiles utilizados para generar la correlación entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial (Fuente: Elaboración propia).

La tabla 24 muestra la magnitud de la correlación existente entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial para cada uno de los seis perfiles que se encuentran situados sobre el área de estudio.

Perfiles	Magnitud Correlación
Perfil 1	-0,7489
Perfil 2	-0,7515
Perfil 3	-0,7944

Perfil 4	-0,3628
Perfil 5	-0,6135
Perfil 6	-0,6634

Tabla 24: Valores de la magnitud de correlación entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial para cada uno de los seis perfiles en el año 2014 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.1.1 Perfiles 1, 2 y 3

La particularidad que poseen estos tres perfiles es que comienzan en una cobertura vegetal, luego atraviesan la ciudad para finalmente llegar a cubierta vegetal. La correlación entre vegetación y temperatura superficial en estos perfiles es negativa con valores similares en los tres perfiles. Las características de estos tres perfiles se muestran en la tabla 25.

Perfiles	Longitud [metros]	Pasando por Comunas
Perfil 1	23061,96	Hualpén, Concepción
Perfil 2	19006,81	Talcahuano, Hualpén, Concepción
Perfil 3	18812,00	Talcahuano, Hualpén, Concepción

Tabla 25: Características de longitud y alcance de comunas que poseen los tres perfiles en análisis (Fuente: Elaboración propia).

El perfil 1 posee una orientación NW-SE cubriendo una longitud de 23061 metros. Este perfil comienza muy cercano a Caleta Lengua, continua pasando por el humedal Lengua, luego por el centro de Concepción, para finalizar en los cerros ubicados entre el sector de Nonguén y Santa Graciela.

El perfil 2 en cambio comienza en el sector Litral de la comuna de Talcahuano, continua atravesando el centro de Concepción con una orientación NNW-SSE, para finalizar en el cerro caracol. El perfil 2 posee una longitud de 19006 metros. Pasando por las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción.

El perfil 3 comienza en el sector comprendido entre Hualpencillo y Boca Norte, sector ubicado unos metros al norte de la desembocadura del río Biobío, luego pasa por sobre una pequeña parte del humedal Lengua, para continuar atravesando el centro de Concepción y finalizar unos 6 kilómetros al oeste del sector Las Pataguas, con una orientación prácticamente W-E de 18812 metros de longitud.

La magnitud de la correlación para estos perfiles es alta pero negativa, esto significa que a medida que la superficie disminuye su cantidad de vegetación la temperatura superficial aumenta y si la cantidad de vegetación en superficie aumenta la temperatura superficial disminuye. Esta relación entre vegetación y temperatura superficial está muy bien marcada, puesto que la correlación negativa cae en el rango de fuerte según la interpretación de Sofía Karadimitriou de la Universidad de Sheffield (2007).

En las figuras 38, 39 y 40 se presentan las gráficas de los valores de NDVI y temperatura superficial de los perfiles 1, 2 y 3 del año 2014, respectivamente. En donde podemos apreciar claramente en el inicio y termino de los perfiles los altos valores de NDVI (en relación a los centros de los perfiles) puesto que estos inicios y términos de los perfiles están posicionados sobre densa cobertura vegetal, y por consecuencia de la fuerte anti-correlación existente entre cantidad de vegetación y temperatura superficial, los inicios y términos de los perfiles de temperatura superficial poseen valores bajos en relación a los centros de los perfiles. Esto se debe principalmente a los diferentes tipos de uso de suelos presentes en cada uno de los perfiles, los cuales están dominados al inicio por una densa cobertura vegetal, luego en su mayoría por construcciones urbanas para finalizar en cobertura vegetal, coberturas que quedan bien representadas en los valores de NDVI y temperatura superficial.

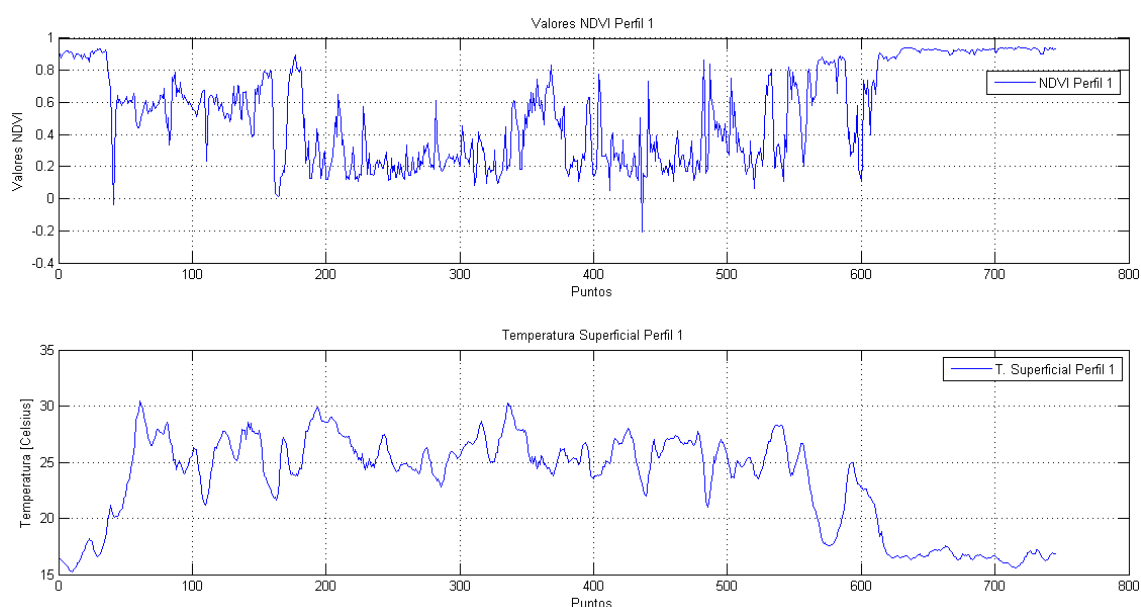


Figura 38: El gráfico de la parte superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 1, el cual cubre una distancia de 23061 metros, pasando sobre las comunas de Hualpén y Concepción, con una orientación noroeste-sureste. Mientras que el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial adquiridos por el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 1 de febrero del año 2014 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

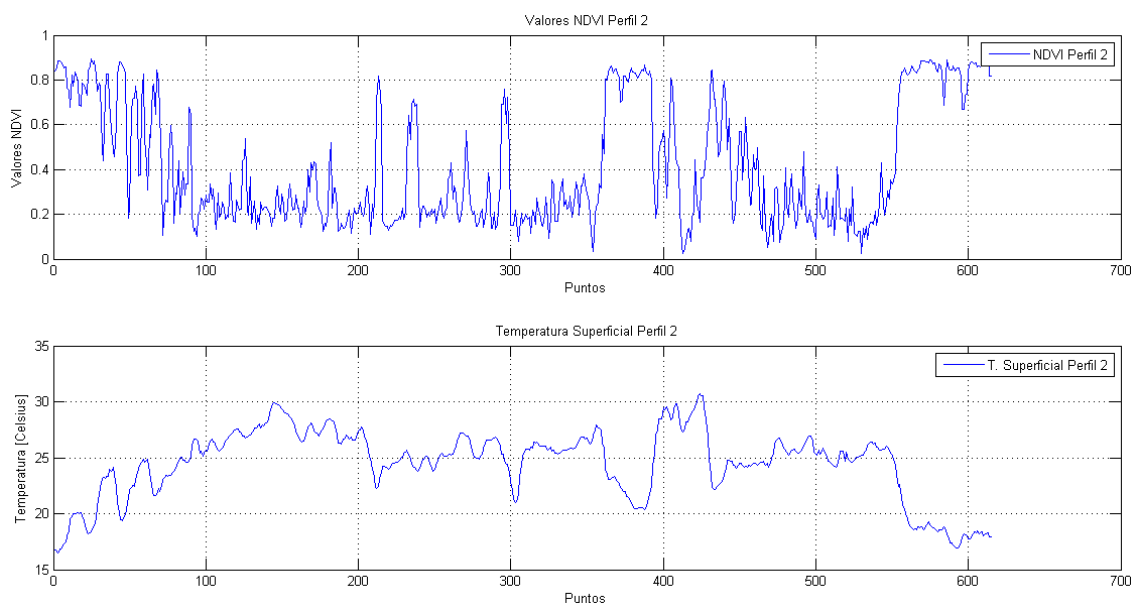


Figura 39: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 2, el cual cubre una distancia de 19006 metros, pasando sobre las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción, con una orientación noroeste-sureste. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 1 de febrero del año 2014 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

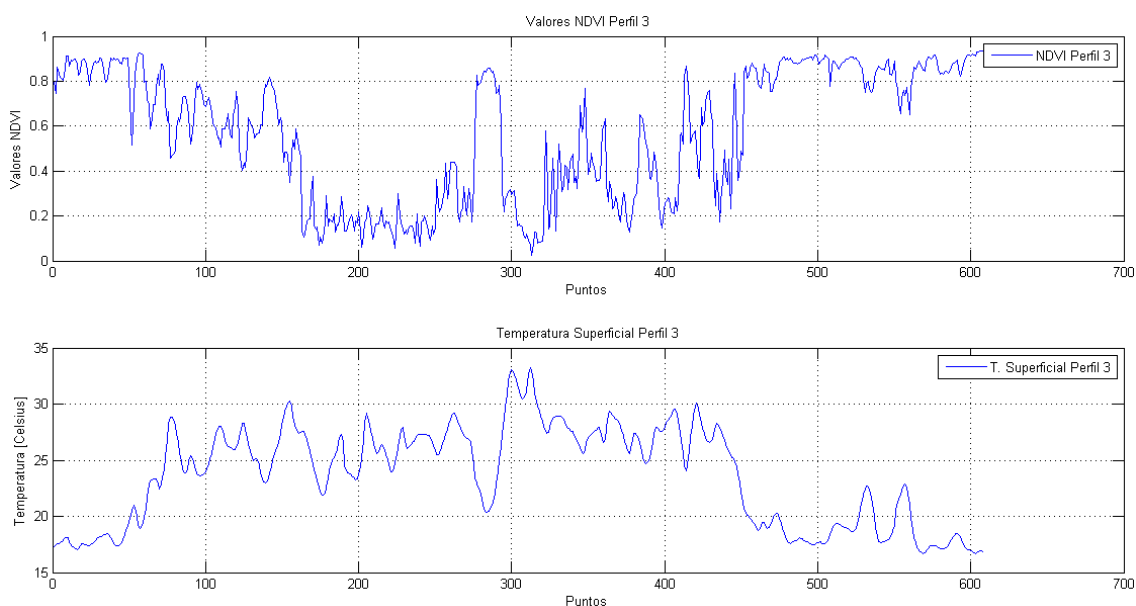


Figura 40: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 3, el cual cubre una distancia de 18812 metros, pasando sobre las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción, con prácticamente una orientación oeste-este. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 1 de febrero del año 2014 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.1.2 Perfil 4

Es conveniente analizar el perfil 4 individualmente, puesto que este perfil posee la particularidad de comenzar atravesando el humedal Rocuant-Andalién, luego el centro de Concepción, el río Biobío, para finalmente terminar pasando sobre la comuna de San Pedro. El perfil 4, posee una orientación NNE-SSW

cubriendo una extensión de 16807 metros, pasando por las comunas de Talcahuano, Hualpén y San Pedro de la Paz.

Como se puede apreciar en la tabla 26 este perfil posee una correlación débil (-0.3628) comparado a los demás perfiles en estudio, esto producto del paso sobre el río Biobío, ya que los valores de NDVI sobre agua son bajos (negativos) y los valores de temperatura superficial sobre agua también son bajos, por lo que se produce una correlación positiva que atenúa la anti-correlación existente entre cantidad de vegetación y temperatura superficial.

La figura 41 presenta los gráficos de los valores de NDVI y temperatura superficial del perfil 4, en donde se puede apreciar que los valores iniciales de NDVI (primeros 100 puntos) correspondientes al humedal Rocuant-Andalién corresponden a valores en su mayoría entre 0.4 y 0.6, lo que significa que el humedal en su mayoría está compuesto por vegetación mediana, lo que genera que la temperatura superficial sea menor a los 30°C.

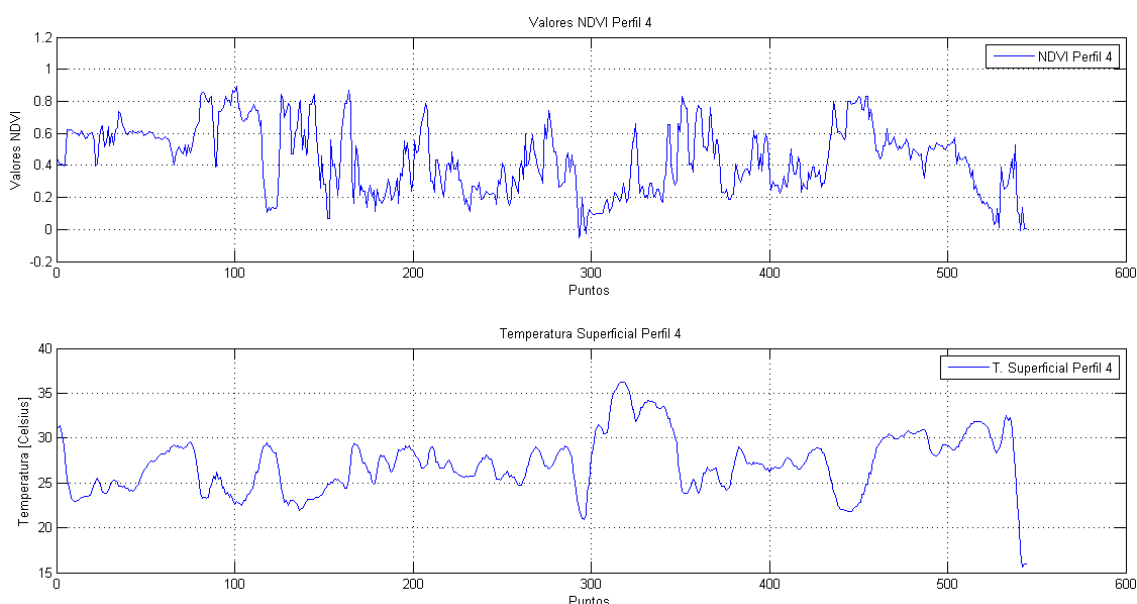


Figura 41: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 4, el cual cubre una distancia de 16807 metros, pasando sobre las comunas de Talcahuano, Hualpén y San Pedro de la Paz. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 1 de febrero del año 2014 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.1.3 Perfil 5

El perfil 5 tiene la particularidad de comenzar atravesando el humedal Rocuant-Andalién, para luego pasar sobre el aeropuerto Carriel-Sur, el centro de Concepción y finalizar en los cerros ubicados al sureste de la Universidad de Concepción, por lo que el perfil pasa por las comunas de Talcahuano y Concepción, con una orientación NW-SE cubriendo una longitud de 12333 metros.

Se puede observar en la figura 42 que el comportamiento que posee el NDVI al inicio son valores típicos para vegetación mediana y suelo desnudo, los

cuales corresponden al humedal Rocuant-Andalién, se puede observar claramente que una vez se llega al sector de suelo desnudo la temperatura superficial asciende hasta aproximadamente 30°C, luego llegando al aeropuerto Carriel-Sur se puede observar claramente un decremento de los valores del NDVI y como consecuencia valores de temperatura superficial por sobre los 30°C, luego el perfil continua sobre zona urbana por lo que la temperatura superficial se mantiene con temperaturas por sobre los 25°C. Para finalmente terminar sobre cobertura vegetal densa ubicada en los cerros posteriores a la Universidad de Concepción, lo que trae un decremento significativo de la temperatura superficial con valores inferiores a los 20°C.

Cabe destacar que la correlación de este perfil fue de -0,6135 que es un valor más bajo en relación a los perfiles 1, 2 y 3, pero que igualmente sigue manteniendo una fuerte anti-correlación.

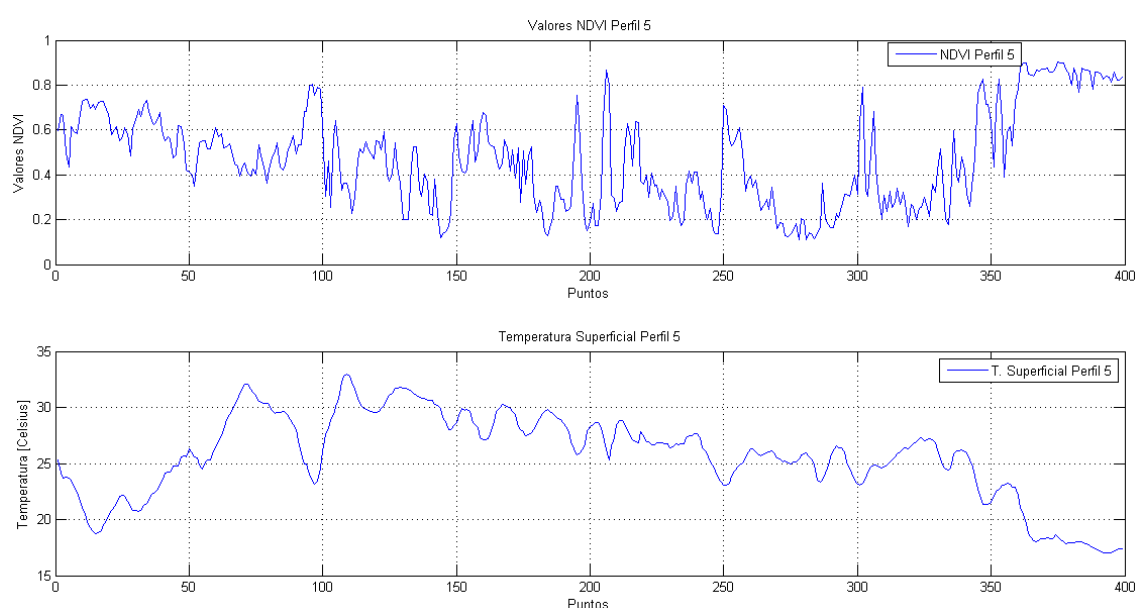


Figura 42: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 5, el cual cubre una distancia de 12333 metros, pasando sobre las comunas de Talcahuano y Concepción. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 1 de febrero del año 2014 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.1.4 Perfil 6

El perfil 6 es el perfil que cubre una menor extensión en relación a los demás perfiles, cubriendo una distancia de 4717 metros. Posee una orientación NE-SW y se encuentra presente solo en la comuna de San Pedro de la Paz.

El perfil comienza en pleno centro de la comuna de San Pedro, para luego continuar atravesando el humedal Los Batros y finalizar en el sector de Lomas Coloradas.

La figura 43 muestra el comportamiento de los valores de NDVI y temperatura superficial que posee el perfil 6. Cabe destacar que los valores de NDVI en el centro de San Pedro de la Paz son valores entre 0.2 y 0.6, convirtiendo a esta zona urbana como la que posee mayor presencia de vegetación con respecto a las comunas de Talcahuano, Concepción y Hualpén. Lo que se traduce en que la temperatura superficial no supere los 28°C (primeros 100 puntos). Siguiendo con el grafico, se puede apreciar claramente el aumento de los valores de NDVI que representa el paso del perfil por sobre el humedal Los Batros, el cual posee en su mayoría valores de NDVI superiores a 0.7, lo que se traduce en temperaturas superficiales menores a 24°C. Finalmente, los gráficos muestran los valores de NDVI y temperatura superficial del sector de Lomas Coloradas, sector en el cual se registran valores de NDVI entre 0.2 y 0.4, que en promedio son menores a los del centro de San Pedro de la Paz. Este hecho se traduce en un aumento significativo de la temperatura superficial, superando claramente la barrera de los 28°C presente en el centro, incluso llegando a valores superiores de 32°C.

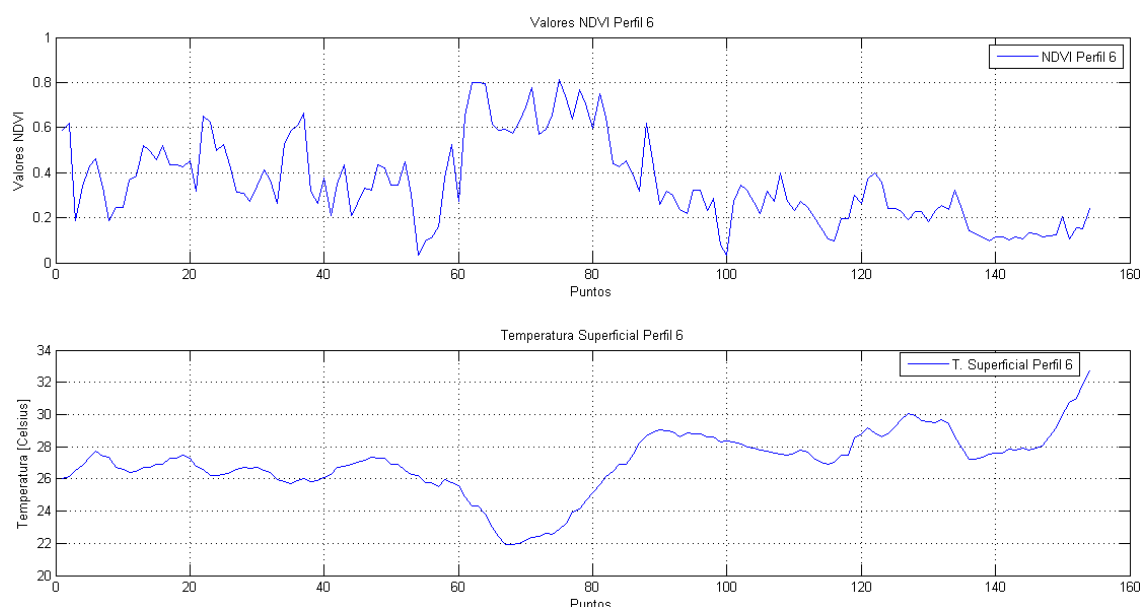


Figura 43: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 6, el cual cubre una distancia de 4717 metros, quedando totalmente contenido en la comuna de San Pedro de la Paz. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 1 de febrero del año 2014 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.2 Año 2017

La figura 44 presenta el mapa de NDVI, temperaturas superficiales y ubicación espacial de cada perfil ocupado para generar la correlación entre cantidad de vegetación y temperatura superficial del año 2017. Cabe destacar que los perfiles utilizados son los mismos que utilizamos en el año 2014, por ende evitaremos referirnos a características de los perfiles que anteriormente ya fueron mencionadas.

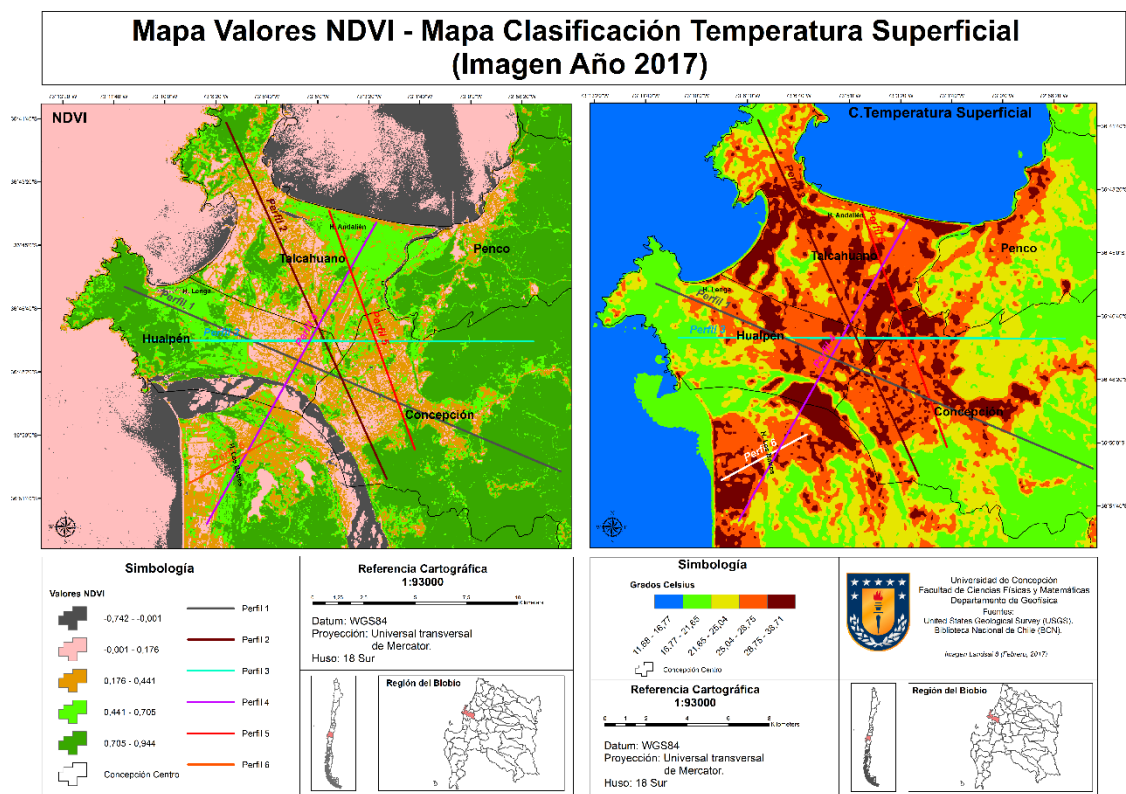


Figura 44: En la figura de la izquierda observamos el mapa del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de nuestra área de estudio en el año 2017 y en la figura de la derecha observamos la clasificación de temperaturas superficiales en 5 clases sobre nuestra área de estudio en el año 2017. Cabe destacar que ambas figuras son de la misma fecha y hora. Sobre cada una de estas figuras se encuentran los perfiles utilizados para generar la correlación entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial (Fuente: Elaboración propia).

Las magnitudes de las correlaciones entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial para cada perfil se muestran en la tabla 26.

Perfiles	Magnitud Correlación
Perfil 1	-0,7775
Perfil 2	-0,8096
Perfil 3	-0,8321
Perfil 4	-0,4786
Perfil 5	-0,6488
Perfil 6	-0,6492

Tabla 26: Magnitudes de las correlaciones existentes entre cantidad de vegetación y temperatura superficial para cada uno de los perfiles sobre la imagen del 24 de enero de 2017 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.2.1 Perfiles 1, 2 y 3

Al igual que para el año 2014 agruparemos los perfiles 1, 2 y 3, puesto que poseen características similares. En general estos tres perfiles comienzan en

cobertura vegetal densa, atraviesan el centro de Concepción y finalizan en cobertura vegetal.

En la tabla 27 se presentan las magnitudes de las correlaciones entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial de los perfiles 1, 2 y 3.

Perfiles	Magnitud Correlación
Perfil 1	-0,7775
Perfil 2	-0,8096
Perfil 3	-0,8321

Tabla 27: Valores de la magnitud de correlación entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial para los perfiles 1, 2 y 3 en el año 2017 (Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar la presencia de una fuerte anticorrelación existente entre la cantidad de vegetación y temperatura superficial sobre los perfiles, la cual puede ser clasificada como una anti-correlación fuerte, siguiendo con la interpretación de Sofía Karadimitriou de la Universidad de Sheffield (2007).

Las figuras 45, 46 y 47 muestran los gráficos de NDVI y temperatura superficial de los perfiles 1, 2 y 3, respectivamente. Podemos observar las mismas características del año 2014, en donde los perfiles comienzan con valores muy altos de NDVI. Además producto de la vegetación densa y por consecuencia de la fuerte anti-correlación existente, se registran temperaturas superficiales bajas en relación al resto del perfil. Luego, existe un decremento de los valores de NDVI producto de la cobertura urbana lo que genera un aumento de las temperaturas superficiales manteniéndose siempre sobre los 25°C en los tres perfiles. Finalmente, se registra un aumento de los valores de NDVI y por consecuencia una disminución de la temperatura superficial.

Es interesante observar desde el perfil 1 que los valores de NDVI pertenecientes al humedal Lengua se encuentran entre 0.5 y 0.7 lo que a su vez genera que las temperaturas superficiales se contengan en intervalos más bajos comparado a la cobertura urbana.

En general, las curvas de NDVI y temperatura superficial de los perfiles 1, 2 y 3 registran el mismo comportamiento observado en el año 2014. Realizaremos una comparación entre los años 2014 y 2017 en la siguiente sección.

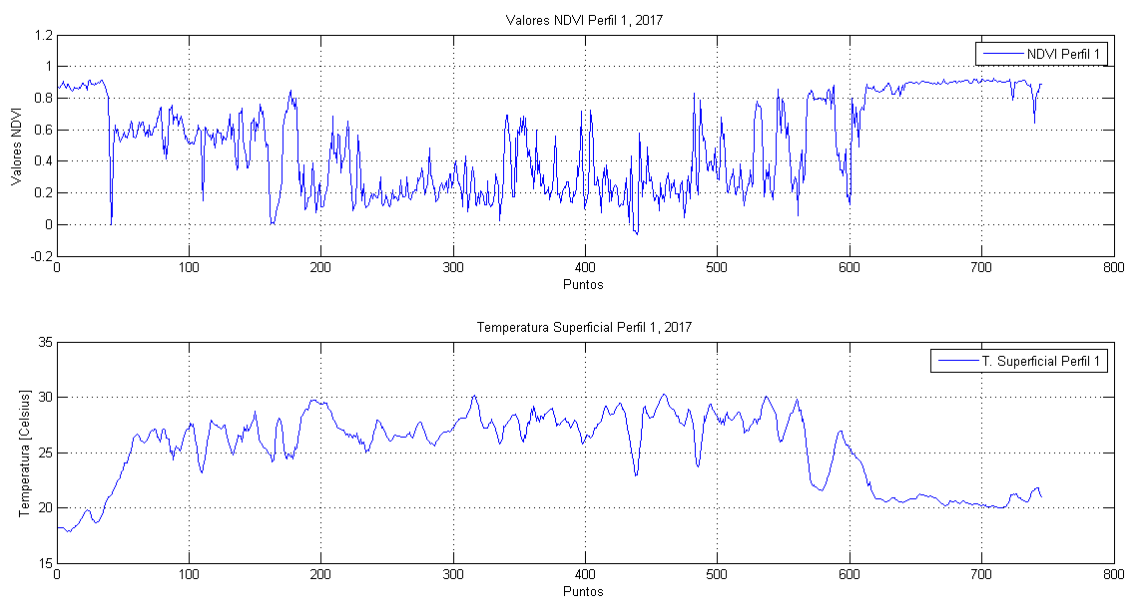


Figura 45: El gráfico de la parte superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 1, el cual cubre una distancia de 23061 metros, pasando sobre las comunas de Hualpén y Concepción, con una orientación NW-SE. Mientras que el gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial adquiridos por el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 24 de enero del año 2017 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

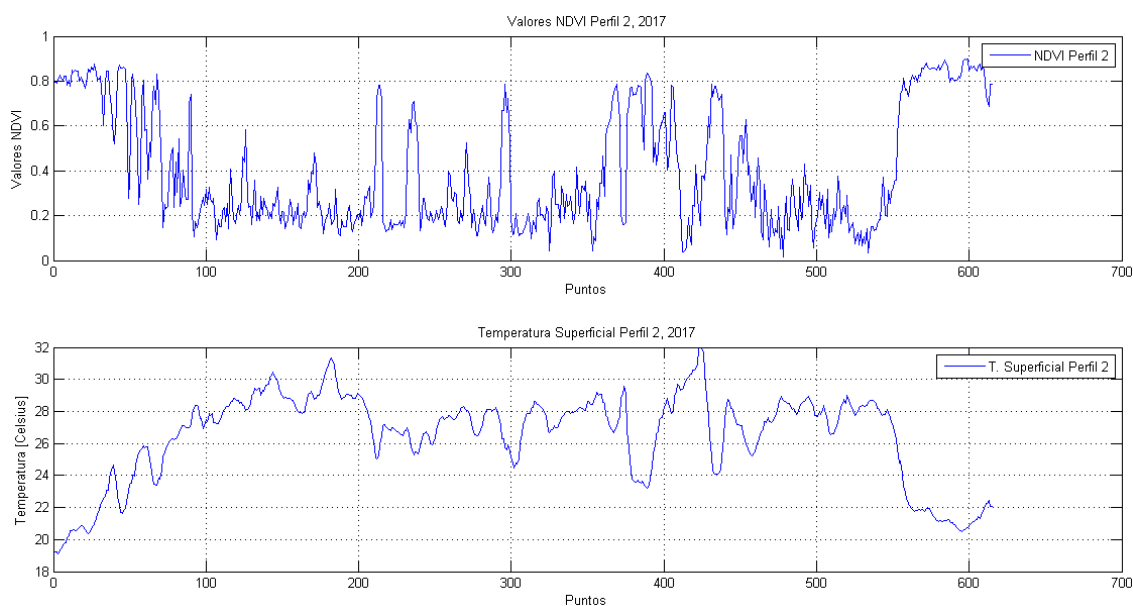


Figura 46: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 2, el cual cubre una distancia de 19006 metros, pasando sobre las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción, con una orientación NNW-SSE. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 24 de enero del año 2017 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

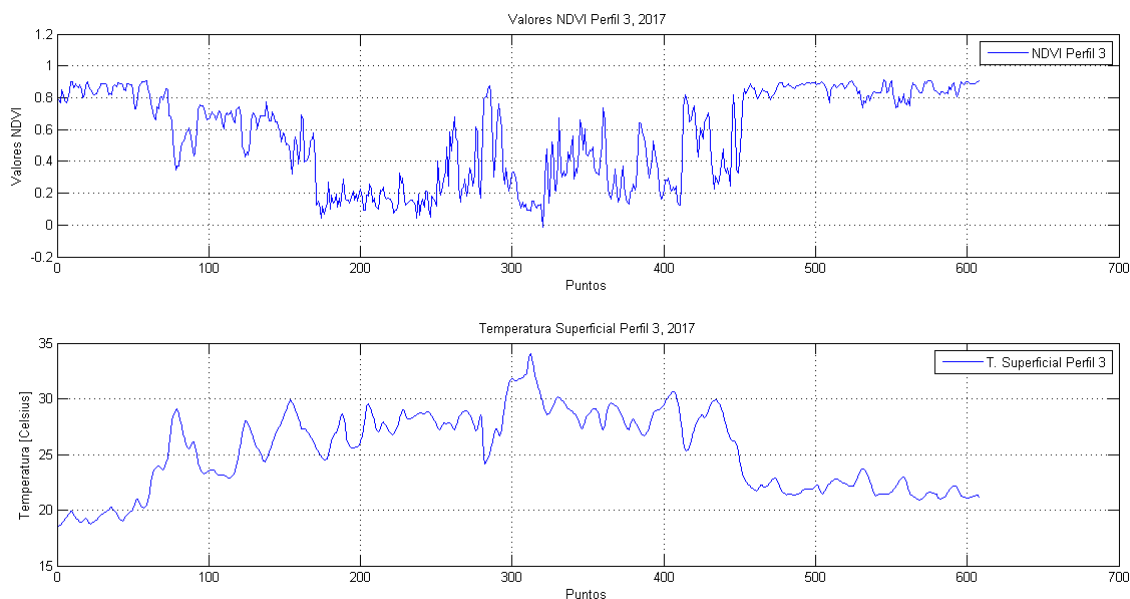


Figura 47: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 3, el cual cubre una distancia de 18812 metros, pasando sobre las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción, con prácticamente una orientación W-E. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 24 de enero del año 2017 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.2.2 Perfil 4

La magnitud de la correlación existente entre cantidad de vegetación y temperatura superficial en el perfil 4 es de -0.4786, lo que convierte al perfil 4 en el perfil que registra la menor correlación (año 2017), la que puede ser explicada al igual que en el año 2014 por el paso de este perfil por sobre el río Biobío.

En general no se pueden observar grandes diferencias de NDVI entre los años 2014-2017 en el humedal Rocuant-Andalién (perfil 4). En la figura 48 se muestran los gráficos de NDVI y temperatura superficial del perfil 4.

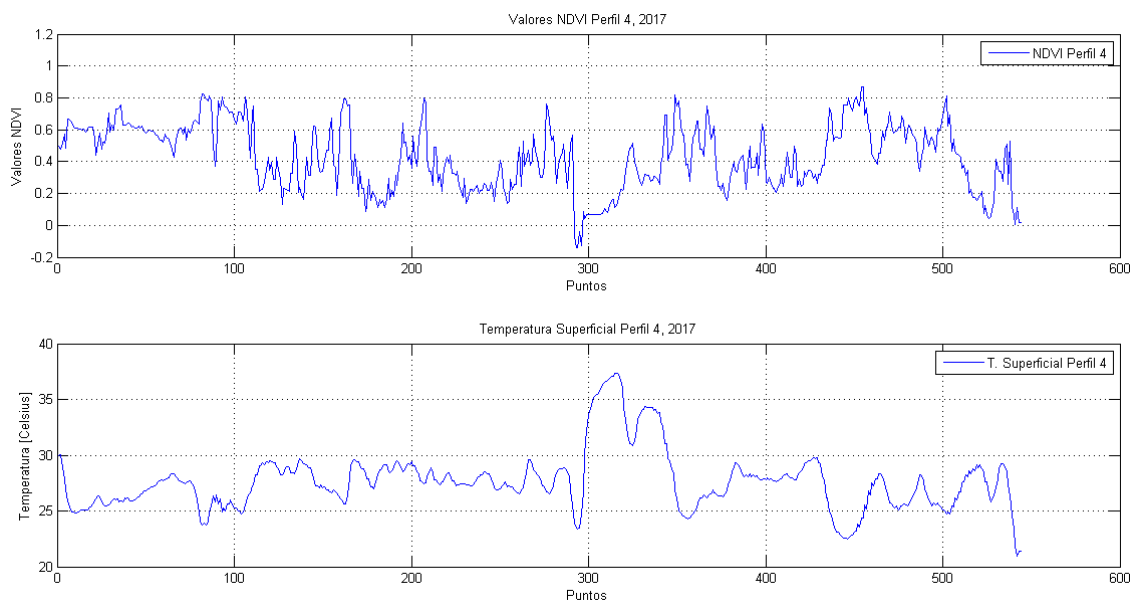


Figura 48: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 4, el cual cubre una distancia de 16807 metros, pasando sobre las comunas de Talcahuano, Hualpén y San Pedro de la Paz. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 24 de enero del año 2017 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.2.3 Perfil 5

El perfil 5 registra una correlación de -0.6488, la figura 49 muestra el comportamiento del NDVI y la temperatura superficial del perfil 5 en el año 2017. Realizando una comparación entre los valores de NDVI en los años 2014-2017 para el perfil 5, se puede observar que los valores de NDVI bajaron considerablemente en el humedal Rocuant-Andalién, llegando incluso a valores menores de 0.3, esto no ocurría en el año 2014 en donde los valores de NDVI siempre se mantuvieron superiores a 0.4, lo que se traduce en un aumento promedio de la temperatura superficial de aproximadamente 2°C.

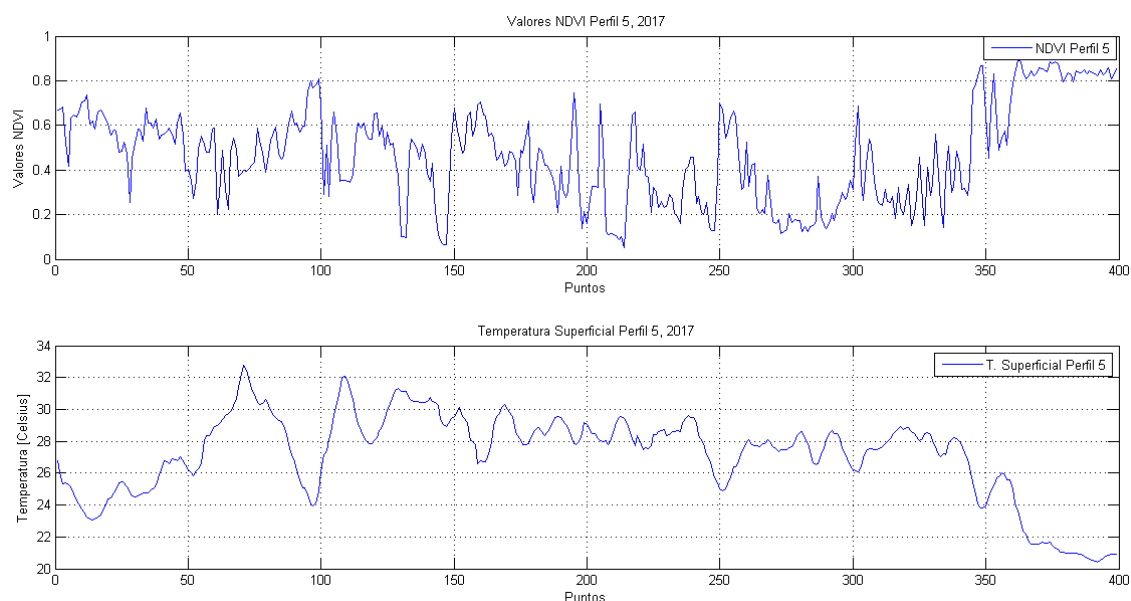


Figura 49: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 5, el cual cubre una distancia de 12333 metros, pasando sobre las comunas de Talcahuano y Concepción. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 24 de enero del año 2017 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.2.4 Perfil 6

La magnitud de la correlación existente entre la cantidad de vegetación y la temperatura superficial en el perfil 6 fue de -0.6492, menor a la existente en el mismo perfil en el año 2014. Diferencia que puede ser explicada observando la figura 50, la cual muestra el comportamiento de los valores de NDVI y temperatura superficial del perfil 6 en el año 2017, y la figura 43 que muestra lo mismo pero para el año 2014. Se puede observar mediante las dos figuras que existe una pérdida de vegetación en el humedal Los Batros en el año 2017, lo que claramente se puede observar en el comportamiento de la curva de NDVI entre los puntos 60 y 80. Al principio, se debe a la presencia de una zona muy húmeda, puesto que los valores de NDVI caen y lo mismo ocurre con la temperatura superficial, pero luego el NDVI cae fuertemente y los valores de temperatura superficial aumentan, por lo que se trata de una clara pérdida de vegetación.

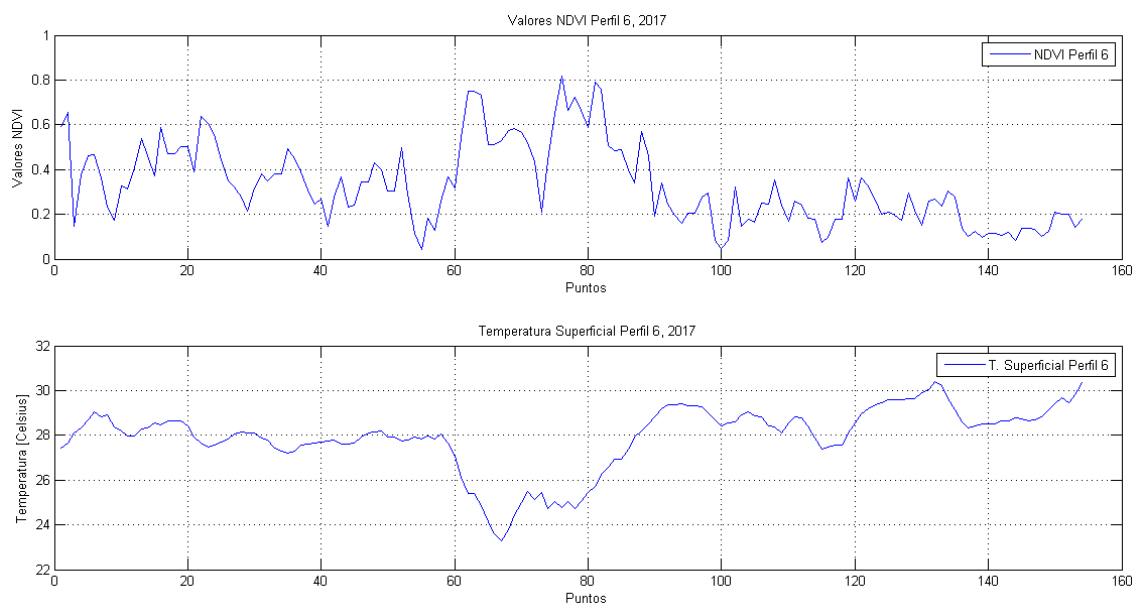


Figura 50: El gráfico superior muestra los valores de NDVI presentes en el perfil 6, el cual cubre una distancia de 4717 metros, quedando totalmente contenido en la comuna de San Pedro de la Paz. El gráfico inferior muestra los valores de temperatura superficial presentes en el mismo perfil. Cabe destacar que este perfil corresponde a la imagen del 24 de enero del año 2017 adquirida por el satélite Landsat 8 (Fuente: Elaboración propia).

4.8.3 Comparación entre perfiles 2014-2017

Es interesante observar los cambios de vegetación que se han experimentado en el área de estudio entre los años 2014 y 2017. Solo nos limitaremos a realizar este análisis en dichos años, puesto que la imagen del año 2000 fue adquirida por un satélite diferente, por lo tanto realizar una comparación ocupando dicha imagen nos podría llevar a conclusiones poco confiables.

Las magnitudes de las correlaciones de todos los perfiles en los años 2014-2017 se presentan en la tabla 28. Se puede observar que en todos los perfiles a excepción del perfil 6, la magnitud de la correlación entre cantidad de vegetación y la temperatura superficial ha aumentado, lo que consecuentemente implica una pérdida de vegetación y un aumento de la temperatura superficial entre los años 2014-2017.

Perfiles	Correlación NDVI - TS	
	2014	2017
Perfil 1	-0,7489	-0,7775
Perfil 2	-0,7515	-0,8096
Perfil 3	-0,7944	-0,8321
Perfil 4	-0,3628	-0,4786
Perfil 5	-0,6135	-0,6488
Perfil 6	-0,6634	-0,6492

Tabla 28: Comparación de los valores de las magnitudes de correlación entre cantidad de vegetación y temperatura superficial en los años 2014-2017 para perfiles en estudio (Fuente: Elaboración propia).

Realizamos el ejercicio de calcular el NDVI promedio de cada perfil para cada año, los resultados se presentan en la tabla 29.

Perfiles	Promedio Valores NDVI	
	2014	2017
Perfil 1	0,529	0,502
Perfil 2	0,414	0,402
Perfil 3	0,568	0,564
Perfil 4	0,441	0,429
Perfil 5	0,472	0,467
Perfil 6	0,356	0,331

Tabla 29: Tabla de comparación de los valores de NDVI promedio de todos los perfiles en estudio entre los años 2014-2017 (Fuente: Elaboración propia).

Se puede observar claramente que los valores de NDVI promedio en todos los perfiles han experimentado un decremento en relación al año 2014, eso implica que la cantidad de vegetación en el área de estudio ha disminuido.

Estos resultados pueden explicar el hecho de que el perfil número 6 haya experimentado un decremento en la magnitud de la anti-correlación entre cantidad de vegetación y temperatura superficial, puesto que el perfil 6 también experimentó una disminución de la vegetación, pero según los resultados de la tabla 28 este perfil no experimentó un alza de temperatura superficial, debido al decremento de su anti-correlación. Por lo tanto, esto implica que en el perfil 6 existió un aumento de agua o humedad que trajo como consecuencia el decremento de la temperatura superficial, lo que a su vez genera una correlación positiva entre NDVI y temperatura superficial, y así se produce una disminución de la anti-correlación existente en el año 2014 para dicho perfil.

Por lo tanto, la disminución de la anti-correlación entre cantidad de vegetación y temperatura superficial entre los años 2014 y 2017 para el perfil 6, se explica por la existencia de agua o humedad que no existía en el año 2014, específicamente en el área del humedal Los Batros.

En general, podemos apreciar claramente una disminución de la cantidad de vegetación en nuestra zona de estudio, puesto que todos los perfiles registraron una pérdida de vegetación entre los años 2014-2017.

5. Discusión y Conclusiones

5.1 Discusión

Existen una variedad de estudios sobre islas de calor urbano en ciudades chilenas, como en Valparaíso (Sarricolea y Romero, 2010), Copiapó (Gómez, 2014), Concepción (Hernández, 2013) y Santiago (Sarricolea, 2014). Todos estos estudios se enfocan en el análisis de las islas de calor, mediante estaciones meteorológicas o técnicas de percepción remota, pero no mediante la conjunción de ambos métodos, siendo esto último un aporte de esta investigación.

De acuerdo al trabajo de Hernández (2013) en relación a los resultados se identifica la formación de una isla de calor urbano en el centro de Concepción. En este caso, Hernández (2013) plantea la existencia de una isla de calor urbano en la capa dosel existente en las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén de una intensidad máxima de 9.14°C a las 14:00 horas en verano, aunque existen discrepancias metodológicas, fundamentalmente en la estimación de la magnitud de la isla de calor, básicamente se realiza la sustracción entre la estación meteorológica que registra la temperatura mínima a cierta hora del día y la estación meteorológica que registra la temperatura máxima a la misma hora. En consecuencia, las magnitudes de la isla de calor se exacerban y dejan de representar lo que ocurre en gran parte del centro de Concepción, ya que las estaciones meteorológicas que registran las temperaturas máxima y mínima, pueden estar influenciadas por diversos factores específicos del área, donde se localicen dichas estaciones (Taha, 1997), como la cobertura por las que están rodeadas, viento, calor antropogénico, orientación del sol, etc.

En este estudio en cambio, utilizamos una metodología que a nuestro criterio es más representativa de la situación del centro de Concepción, en específico y como se detalló, se calculó la temperatura promedio entre las estaciones meteorológicas que estaban situadas sobre y rodeadas por cobertura urbana, posteriormente se restó a dicho promedio la temperatura promedio de la estaciones consideradas como no-urbanas. Así, se obtuvo una magnitud máxima de la isla de calor urbano de 4.6°C , que es bastante menor a la magnitud estimada por Hernández (2013), pero si se coincide en que la magnitud máxima se registra a las 14:00 horas en verano.

En relación a los cambios de usos de suelos, este es el principal factor de generación de las islas de calor superficiales, nuestros resultados indican que las mayores temperaturas superficiales se registran en las zonas urbanas, excluiríamos la cobertura arena, ya que esta cobertura no es artificial. Mientras que las menores temperaturas superficiales se registran en la cobertura vegetal, suelo semi-desnudo y humedales. Esto, indica que un reemplazo de

cobertura natural por construcciones artificiales, en definitiva genera un aumento significativo de la temperatura superficial, resultando en la generación de islas de calor urbano superficiales, que son muy bien identificadas por las imágenes termales. Otro resultado a discutir es la fuerte anticorrelación existente entre la cantidad de vegetación y la temperatura superficial, ya que demostramos que a medida que disminuye la cantidad de vegetación presente en la superficie, la temperatura superficial sufre en fuerte incremento. Por lo que el cambio de uso de suelos con fines de urbanización, ayuda de buena manera a la generación de islas de calor superficiales.

La metodología empleada para calcular la magnitud de la isla de calor superficial estuvo referenciada por el trabajo de Trujillo (2012), con la diferencia que en ese trabajo no existe una previa clasificación de coberturas, por lo que se realiza la sustracción entre la temperatura superficial de la zona urbana y la temperatura superficial que rodea dicha zona. Así, se adaptó la metodología de Trujillo (2012) en base al área de estudio y la metodología que utilizamos para estimar la magnitud de la isla de calor atmosférica, llegando a una metodología que bajo nuestro criterio es una buena manera de estimar la magnitud de la diferencia existente entre las temperaturas superficiales de zonas urbanas y temperaturas superficiales de zonas no-urbanas (vegetación-humedales), puesto que así realizamos una estimación de la magnitud de la isla de calor superficial que es representativa de lo que ocurre en el área de estudio, abarcando a todas las comunas presentes en la imagen satelital (Concepción-Talcahuano-Hualpén-Penco y San Pedro de la Paz), aprovechando de mejor manera la cobertura espacial otorgada por la imagen satelital. Obteniendo así una estimación de la magnitud de la isla de calor superficial que posee una mejor representatividad de la que posee la estimación de la magnitud de la isla de calor atmosférica, la cual está determinada por la resolución espacial de la red de estaciones meteorológicas.

En relación a las clasificaciones supervisadas, estas muestran una evidente expansión urbana en el Gran Concepción, comparando con el trabajo de De la Barrera y Henríquez (2017), quienes utilizan las mismas fuentes de datos, llegan a resultados similares. Aunque sus resultados están orientados a la pérdida de vegetación. En específico De la Barrera y Henríquez (2017) ocupan el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para llegar a esa conclusión, estimando una pérdida de vegetación en todos sus periodos de análisis en alrededor del 2%, resultados muy similares de los obtenidos por nuestros perfiles, ya que si calculamos la pérdida de vegetación, esta es de alrededor de un 3% (2014-2017). En resumen se concuerda en la pérdida de vegetación producto de la urbanización (De la Barrera y Henríquez, 2017).

Respecto a la correlación no se identificaron estudios relevantes entre temperatura superficial y temperatura atmosférica en la generación de islas de calor urbano. Según los resultados, la correlación entre las temperaturas superficiales y temperaturas atmosféricas no es tan marcada, llegando a un valor máximo de 0.42 a las 19:00 horas.

Los resultados de la generación de isotermas, muestran la presencia de dos isotermas nucleares cerradas en casi todas las horas del día sobre la zona urbana, específicamente en el sector Nonguén y en la intersección de las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén. Estas isotermas representan áreas con temperaturas más cálidas con respecto a su entorno. Coincidiendo con las elaboradas por Hernández (2013). Las isotermas nucleares cerradas (cálidas) se desplazan a medida que transcurre el día sobre el área urbana, en sentido este-oeste, al igual como lo muestra Hernández (2013) en su trabajo, agregándose una tercera isoterma nuclear cerrada sobre el sector de Huachipato en la comuna de Talcahuano, la cual está presente entre las 19:00 y 22:00 horas del día. Sin embargo, esta tercera isoterma cerrada es más fría que su entorno, convirtiéndose en una isla de frescor urbano, generada tanto por la presencia de cobertura vegetal densa en dicho sector y la correlación de mayor magnitud entre las temperaturas superficiales y atmosféricas en esas horas del día. Si bien los datos ocupados por Hernández (2013) son los mismos, la metodología es distinta, puesto que en dicho trabajo se calcula un promedio de temperaturas atmosféricas de todas las estaciones meteorológicas presentes en el área, para las cuatro estaciones del año. En el presente estudio en cambio se generan isotermas para un día representativo de las imágenes satelitales, por ende es interesante observar que llegamos a resultados similares a los encontrados por Hernández (2013). En cuanto a los horarios específicos, las 8:00, 12:00, 14:00, 18:00, 20:00 y 23:00 horas, son las mejores horas para mostrar los mapas de isotermas generados, puesto que al adicionar otras horas del día caeríamos en lo repetitivo y no agregaríamos información adicional a nuestros resultados. Las 8:00 y 14:00 horas fueron escogidas debido a los resultados del trabajo de Hernández (2013), quién postula que las 8:00 horas es una hora representativa de lo que ocurre en la mañana, y las 14:00 horas es el momento donde la isla de calor urbano, experimenta su mayor magnitud. Se agrega las 12:00 horas, debido a que en esta hora fueron capturadas las imágenes satelitales, suponiendo que en ese horario del día se puede presentar la máxima correlación existente entre la temperatura del aire y superficial. Mientras que las 18:00 y 23:00 horas se seleccionaron como horas representativas de la tarde y noche, respectivamente. Además se incluye el mapa de isotermas de las 20:00 horas, puesto que en esta hora se forma una tercera isoterma nuclear cerrada en el sector de Huachipato, lo que la convierte en una hora de importancia para nuestros análisis, ya que como se mencionó anteriormente en ese sector de genera una isla de frescor urbano.

Finalmente este trabajo aporta información adicional a trabajos previos realizados en ciudades chilenas como los de Hernández (2013), Gómez (2014), De la Barrera et al., (2017) y Lamarca et al., (2016), quienes señalan la importancia que cobran las planificaciones urbanas, en el sentido de la importancia de las áreas verdes como agentes para atenuar los efectos provocados por la urbanización, como es el caso de las islas de calor. Lamarca et al., (2016) señalan la importancia de la vegetación en zonas urbanas, puesto que provee de sustentabilidad a la ciudad y al mismo tiempo provee confort en

los habitantes. Por ejemplo, Capelli et al., (2005) 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. Por lo tanto, compartir estos tipos trabajos con las autoridades pertinentes se debe hacer necesario para la implementación de una urbanización sustentable que respete tanto el medio ambiente como la calidad de vida de los habitantes.

5.2 Conclusiones

En esta investigación ha sido posible identificar y estimar la existencia de una isla de calor urbana, tanto superficial como atmosférica en las comunas de Talcahuano, Concepción y Hualpén, cuyas magnitudes máximas se encuentran en promedio cercanas a los 5°C para la ICU superficial, y 4.6°C para la ICU atmosférica. Las magnitudes máximas de la ICU atmosférica se localizan muy cercanas al lado sur del aeropuerto Carriel-Sur, ubicado en la comuna de Talcahuano muy cercano al límite existente entre las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén. Otro sitio donde se registran las magnitudes máximas de la isla de calor atmosférica es en el sector de Nonguén, hacía al sector Collao, ubicado en la comuna de Concepción.

Un aspecto a destacar de este estudio es visualizar la dinámica temporal que posee la isla de calor atmosférica hora a hora, puesto que determinamos que este fenómeno se desplaza primeramente en dirección este-oeste (E-W) y al finalizar la luz del día, se agrega al desplazamiento una componente norte, lo que genera que el fenómeno en su mayoría culmine en la comuna de Talcahuano y Hualpén.

Es interesante observar lo que ocurre en el sector de Huachipato, donde el fenómeno de ICU atmosférica se hace presente entre las 19:00 y 22:00 horas, pero con un comportamiento diferente al de otros sectores, puesto que se registran temperaturas atmosféricas menores, en relación a su entorno. Esto puede estar fuertemente relacionado a la presencia de una densa cobertura vegetal presente en los cerros Las Higueras y Denavi, cerros que poseen temperaturas superficiales bajas, debido a la presencia de vegetación, generando una transferencia de calor negativa al aire, que se acentúa debido a la mayor correlación existente entre las temperaturas superficiales y atmosféricas a esa hora del día (19:00 horas), generando así una isla de frescor urbano.

Mediante la creación de perfiles de temperaturas superficiales, NDVI y la clasificación del uso de suelos, se pudo apreciar claramente el comportamiento térmico que poseen las diferentes coberturas presentes en el área de estudio, pudiendo observar el aporte que genera cada cobertura en la formación de las ICU superficiales. Podemos concluir que en las últimas dos décadas la

urbanización ha generado un aumento de la temperatura superficial, debido al reemplazo de cobertura vegetal por construcciones urbanas (De la Barrera et al., 2017) y esto trae como consecuencia un aporte a la formación de islas de calor superficiales en el centro de Concepción.

Por lo tanto, mediante los resultados del presente trabajo, podemos decir que el cambio de uso de suelos generado por el proceso de urbanización, genera el fenómeno de isla de calor superficial, sin embargo no se puede concluir que la urbanización genera la isla de calor atmosférica, puesto que los resultados dicen que la isla de calor superficial, solamente ayuda a mantener la isla de calor atmosférica por un par de horas más durante la tarde, ya que la correlación máxima entre la temperatura superficial y la temperatura del aire se registra en horas de la tarde, específicamente entre las 18:00 y 19:00 horas. Este fenómeno se debe a las propiedades físicas que poseen los materiales de la superficie y el aire, puesto que el aire posee un calor específico mayor que los materiales que componen la cobertura superficial del área de estudio, por lo que a la transferencia de calor generada por la superficie (la cual está a mayor temperatura que el aire) le toma un mayor tiempo producir un aumento en la temperatura atmosférica, solo viéndose reflejada esta transferencia de calor a las 19 horas (hora de correlación máxima entre temperatura superficial y temperatura atmosférica).

La correlación entre la temperatura superficial y la temperatura del aire fue uno de los puntos en donde esta investigación llega a aportar, siendo un enfoque novedoso ante la falta de referencias sobre este tema, aunque en definitiva no se tiene una certeza absoluta de cómo y cuánto la urbanización contribuye a la generación de las islas de calor urbano. En esta investigación, no se puede concluir que el proceso de urbanización de los últimos 20 años es el precursor de la formación de las islas de calor en el Gran Concepción, ya que se necesitarían datos anteriores a dicho proceso, pero sí podemos concluir que esta urbanización es el sostenedor de que el fenómeno de isla de calor atmosférica perdure por más horas en dicha zona. Para demostrar que la urbanización es el fenómeno precursor de la formación de la isla de calor urbano en el Gran Concepción, necesitaríamos contar con datos científicos antes y después de ocurrido dicho proceso. Por lo tanto, para poder cuantificar la importancia que posee la urbanización en la formación de islas de calor urbano, sería interesante realizar este mismo estudio aplicado a una zona urbana construida recientemente, de modo de poder adquirir imágenes satelitales y datos de temperaturas atmosféricas antes y después del proceso de urbanización, de esta forma se podría estimar la relevancia que posee este proceso antropogénico en la formación de dicho fenómeno climático.

La metodología de clasificar las temperaturas superficiales en el área de estudio no la encontramos en ningún otro trabajo sobre islas de calor urbanas. Sin embargo, consideramos que esta metodología es una buena herramienta para comparar de manera rápida y sencilla el comportamiento termal que poseen dos o más imágenes satelitales de una misma área de estudio, puesto que al clasificar las imágenes termales en un mismo número de clases,

obtendremos eficazmente las diferencias termale entre las imágenes, ayudándonos a realizar un análisis raudo, que nos permita darnos cuenta dónde tendremos que focalizarnos para realizar un análisis más detallado.

Otro aspecto importante en el que aporta esta investigación, es la cuantificación de cómo la pérdida de vegetación genera un aumento de la temperatura superficial, puesto que logramos demostrar una fuerte anticorrelación existente entre la cantidad de vegetación y la temperatura superficial. Esto es relevante a la hora de diseñar las futuras construcciones urbanas, puesto que se hace necesaria la presencia de vegetación en los sectores urbanos, ya que la temperatura superficial posee una fuerte dependencia de la cobertura vegetal.

La relevancia de la vegetación se puede observar claramente en el sector Huachipato entre las 19:00 y 20:00 horas, donde existe una isla de frescor urbano producto de la extensa vegetación existente en los cerros Las Higueras y Denavi, que generan una transferencia de calor negativa al aire. Es interesante observar la hora en que se produce este efecto, puesto que es a las 19:00 horas, hora en la cual se llega a la correlación máxima entre la temperatura superficial y la temperatura del aire, por ende todos los otros sectores situados sobre y rodeados de cobertura urbana poseen transferencias de calor positivas entre la superficie y el aire, mientras que en Huachipato ocurre el proceso contrario, atenuando el fenómeno de isla de calor urbano temporalmente. Este fenómeno puede ser comprendido debido a que a partir de las 19:00 horas la radiación del sol comienza a atenuarse, entonces cobran mayor relevancia las transferencias de calor entre el suelo y el aire. Por lo tanto, este resultado demuestra que a partir de las 19:00 horas del día, la temperatura del aire posee una mayor dependencia de la temperatura superficial, por lo que la presencia de vegetación es relevante para atenuar las islas de calor a partir de dicha hora, pudiendo acotar así la duración de este fenómeno.

Se concluye que la urbanización genera una pérdida de vegetación, que conlleva a un aumento de la temperatura superficial, lo que a su vez genera la formación de islas de calor superficiales, produciendo que las magnitudes máximas de las islas de calor atmosféricas se mantengan por más horas sobre las comunas de Hualpén, Talcahuano y Concepción. Sin embargo, podemos atenuar temporalmente este fenómeno, mediante la implementación de áreas verdes en distintos puntos de la ciudad, trayendo como consecuencia un decremento de la durabilidad de las islas de calor atmosféricas, y en general produciendo una atenuación del fenómeno en la zona de estudio.

5.2.1 Limitantes

Cabe destacar que la correlación estimada entre la temperatura superficial y la temperatura atmosférica no es la óptima, puesto que contábamos con imágenes termale de una hora específica del día, dependiendo exclusivamente de la resolución temporal con la que cuentan los satélites Landsat (16 días), lo que nos condujo a realizar la correlación entre la temperatura del aire, a cada hora del día con la temperatura superficial en una hora específica del día (11:41 horas, hora en la cual pasa el satélite sobre el

área de estudio). Sin embargo, consideramos que nuestra metodología posee lógica, puesto que a las 11:41 horas del día, en un día despejado de verano las diferentes coberturas superficiales llevan varias horas recibiendo la radiación del sol, convirtiendo a esta hora en una hora representativa de lo que ocurre con las temperaturas superficiales el resto del día, debido a que las coberturas solo seguirán aumentando su temperatura. Por ejemplo, la cobertura vegetal no poseerá una temperatura mayor a la zona urbana en horas de la tarde, puesto que las temperaturas superficiales quedan determinadas por las propiedades físicas de las coberturas, las cuales no varían a lo largo del día, por lo que en horas de la tarde deberíamos observar el mismo comportamiento térmico que observamos a las 11:41 horas. Sin embargo, consideramos que la metodología óptima al momento de correlacionar temperaturas superficiales y temperaturas atmosféricas de una misma zona, sería teniendo datos de estaciones meteorológicas con una buena resolución espacial y temporal (por hora) en el área de estudio e imágenes termales a cada hora del día, con el objetivo de correlacionar ambos datos a cada hora del día.

La utilización de diferentes satélites en los periodos de estudio genera la limitante de no poder realizar una comparación fidedigna de las coberturas presentes y las temperaturas superficiales, puesto que las características técnicas de los satélites (Landsat 7 – Landsat 8) son diferentes, lo que conlleva a que no sea adecuado realizar comparaciones entre imágenes de satélites distintos. Lo óptimo es adquirir imágenes de un solo satélite con el objetivo de poder realizar comparaciones sin caer en errores, si bien se pudo realizar para los años 2014-2017 el período es muy pequeño y no aportó información relevante acerca de la expansión urbana en el Gran Concepción. Sin embargo, este periodo fue de importancia a la hora de calcular la pérdida de vegetación experimentada entre los años 2014-2017, cálculo que habría sido muy interesante de realizar para el periodo 2000-2017.

Otro aspecto que limita los resultados de nuestro trabajo es la pobre cobertura espacial que poseen las estaciones meteorológicas, puesto que contábamos con solo trece estaciones que abarcaban las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén, lo que conlleva a que los valores de temperatura interpolados en el área de estudio pierdan veracidad a medida que nos alejamos de la red de estaciones meteorológicas, por ende tuvimos la necesidad de limitar nuestra área de estudio aún más, como se muestra en la figura 51, con el fin de que la interpolación no arrojará valores irreales debido a la pobre resolución espacial que posee la red de estaciones ocupada. Así, no pudimos aprovechar de buena manera la cobertura espacial que poseían las imágenes satelitales, ya que habría sido muy provechoso analizar lo que ocurre en las comunas de San Pedro de la Paz, Penco y los efectos que provoca la presencia del río Biobío en las temperaturas atmosféricas en la zona de estudio.

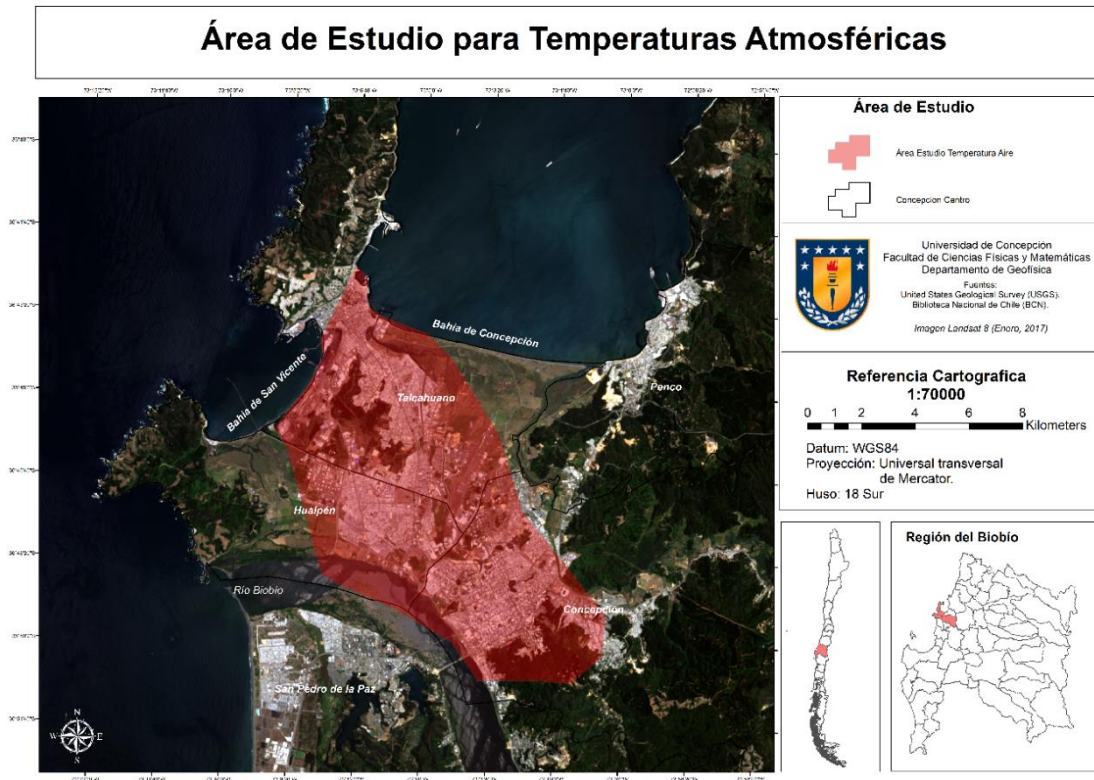


Figura 51: Mapa que muestra el área de estudio que se ocupó para realizar la interpolación de las temperaturas atmosféricas, con el fin de que ellas no adquirieran valores alejados de la realidad y pudieran ser utilizados para posteriores análisis (Fuente: Elaboración propia).

Bibliografía

ALMENDRAS, A. (2009): Expansión urbana, cambios de uso de suelo y transformaciones espaciales en la conurbación Concepción-Talcahuano. Análisis desde el año 1950 al 2006. Tesis para optar al título profesional de Geógrafo. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Santiago, Chile.

AVALOS, K. (2012): Percepción remota y sus aplicaciones a la evaluación de la calidad del agua. Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Ciudad de México, México.

AZÓCAR, G., SANHUESA, R., HENRIQUEZ, C. (2003). Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central. Revista EURE Santiago 2003, 29 (87), 79-22.

ALTMAN, D. (1991). Practical Statistics for Medical Research. London: Chapman and Hall.

BACA, A. (2014): Identificación y comportamiento de la isla de calor en la zona conurbada de Veracruz-Boca del Río en el año 2011. Tesis para optar al título de Ingeniero en Instrumentación Electrónica. Universidad Veracruzana. Facultad de instrumentación electrónica y ciencias atmosféricas. Veracruz, México.

CAPELLI, A., PICCOLO, M.C., CAMPO DE FERRERAS, A. (2005). El clima urbano de Bahía Blanca. Departamento de Geografía y Turismo de Universidad Nacional del Sur. En línea: [https://books.google.cl/books?id=nn5xZdv8jlcC&pg=PA6&lpg=PA6&dq=CAPELLI,+A.,+PICCOLO,+M.C.,+CAMPO+DE+FERRERAS,+A.+\(2005\).+El+clima+urbano+de+Bah%C3%ADa+Blanca.+Ensayo+argentino&source=bl&ots=gYAnBfpJqb&sig=4-hQHBFx_h8lgPUwf4da6-eZCBY&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjI59fNh-HVAhWCI5AKHbhBCrAQ6AEIJDA#v=onepage&q=CAPELLI%2C%20A.%2C%20PICCOLO%2C%20M.C.%2C%20CAMPO%20DE%20FERRERAS%2C%20A.%20\(2005\).%20El%20clima%20urbano%20de%20Bah%C3%ADa%20Blanca.%20Ensayo%20argentino&f=false](https://books.google.cl/books?id=nn5xZdv8jlcC&pg=PA6&lpg=PA6&dq=CAPELLI,+A.,+PICCOLO,+M.C.,+CAMPO+DE+FERRERAS,+A.+(2005).+El+clima+urbano+de+Bah%C3%ADa+Blanca.+Ensayo+argentino&source=bl&ots=gYAnBfpJqb&sig=4-hQHBFx_h8lgPUwf4da6-eZCBY&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjI59fNh-HVAhWCI5AKHbhBCrAQ6AEIJDA#v=onepage&q=CAPELLI%2C%20A.%2C%20PICCOLO%2C%20M.C.%2C%20CAMPO%20DE%20FERRERAS%2C%20A.%20(2005).%20El%20clima%20urbano%20de%20Bah%C3%ADa%20Blanca.%20Ensayo%20argentino&f=false) (Consultado: 7 de mayo de 2017)

DE LA BARRERA, F., HENRÍQUEZ, C. (2017). Vegetation cover change in growing urban agglomerations in Chile. Ecological Indicators, 81 (2017), 265-273.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. (2017). Cómo funciona Spline. ESRI. En línea: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm> (Consultado: 3 de mayo de 2017)

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. (2017). Curva de nivel. ESRI. En línea: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/contour.htm> (Consultado: 3 de mayo de 2017)

DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS (ESA). (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352). ESA. En línea: <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.Pdf> (Consultado: 14 de agosto de 2017)

FERNÁNDEZ, F y MARTILLI, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. Revista Índice, (50), 21-25.

FERNÁNDEZ, GARCÍA, F. (2009): "Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área Metropolitana de Madrid", Investigaciones Geográficas, (49), 173-195

GÓMEZ, N. (2014): Climatología urbana de Copiapó como ciudad localizada en un medio ambiente árido. Tesis para optar al título profesional de Geógrafo. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Santiago, Chile.

HERNÁNDEZ, V. (2013): Sistema de clasificación del clima urbana a través de zona climática en la conurbación Concepción-Talcahuano-Hualpén. Tesis para optar al título profesional de geógrafo. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Santiago, Chile.

HERNÁNDEZ, A., GARCÍA, D. (2014). Análisis de cambio en la cobertura espacial del manglar en el área de protección de flora y fauna Laguna de Términos. Tesis para obtener el título de Ingeniero Geomático. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Ciudad de México, México.

INE. (1992): Instituto Nacional de Estadística. Censo de 1992. Resultados generales 748 pp. En línea: http://www.ine.cl/canales/usuarios/cedoc_online/censos/pdf/censo_1992.pdf (Consultado: 7 de abril de 2017).

INE. (2003): Instituto Nacional de Estadística. Censo del 2002. Síntesis de Resultados 9 pp. En línea: <http://www.ine.cl/cd2002/sintesis censal.pdf> (Consultado: 7 de abril de 2017).

INE. (2012): Instituto Nacional de Estadística. Síntesis geográfica regional. Compendio estadístico 2012. 70 pp. En línea: http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/compendio_estadistico/pdf/2012/_sint_regional.pdf (Consultado: 7 de abril de 2017).

KARADIMITRIOU, M. (2007). Correlation in R. University of Sheffield. En línea: https://www.sheffield.ac.uk/polopoly_fs/1.536458!/file/MASH_Correlation_R.pdf (Consultado: 30 de mayo de 2017).

LAMARCA, C., QUENSE, J., HENRÍQUEZ, C. (2016). Thermal comfort and urban canyons morphology in coastal temperate climate, Concepción, Chile. Urban Climate. En línea: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.10.004>

MOSCOSO, C. (2007): Cambios en los usos y coberturas de suelo y sus efectos sobre la escorrentía urbana. Valparaíso y Viña del Mar, período 1980-2005. Tesis para optar al título profesional de Geógrafo. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Santiago, Chile.

MUÑOZ, J., CUASQUER, E., MONCAYO, O., DELGADO, D. (2016). Aplicación de percepción remota para la detección de cambios en la cobertura boscosa de la reserva ecológica Mache-Chindul. La Técnica, (16), 76-93

OKE, T.R. (1973). City Size The Urban Heat Island. Atmospheric Environment, 7, 769-779.

OKE, T.R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 108 (455), 1-24

OLAVE, C. (2011): Uso de tecnología satelital como herramienta de apoyo al manejo sustentable de predios de producción ovina en Tierra del Fuego. Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Agropecuario. Universidad de Magallanes. Facultad de ciencias, Escuela de ciencia y tecnología en recursos agrícolas y acuícolas. Punta Arenas, Chile.

ONU. (Organización de las Naciones Unidas) (2006): Previsiones demográficas mundiales. Revisión de 2006. En línea: <http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2006/Spanish.pdf> (Consultado: 7 de abril de 2017).

PICKETT, S., BURCH, W., FORESMAN, T., MORGAN, J., ROWNTREE, R. (1997). A conceptual framework for the study of human ecosystems in urban areas. Urban Ecosystems, 1 (4), 185-199

PINEDA, O. (2011): Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago. Tesis para obtener el grado de maestra en geomática. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo A.C." (CentroGeo). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Ciudad de México, México.

ROJAS, C., OPAZO, S., JAQUE, E. (2009). Dinámica y patrones de crecimiento del área metropolitana de Concepción. Tendencias de las últimas décadas. Serie Geolibros. En línea: http://geografia.uc.cl/images/serie_GEOlibros/del_pais_urbano/CRojas_Opazo_EJaque.pdf (Consultado: 13 de mayo de 2017).

ROMERO, H., MOLINA, M., VASQUEZ, A., SMITH, P. (2008): El clima urbano del Puerto de Valparaíso: construcción social del espacio en ciudades costeras Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio. Departamento de Geografía.

Universidad de Chile, Santiago de Chile. Proyecto Fondecyt 1080080. Revista da Faculdade de Letras, Geografia, Universidade do Porto, 2 (2008), 103-122

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

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, (2009), 71-77

SARRICOLEA, P., VIDE, J. (2014). El estudio de la isla de calor urbana de superficie del área metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y análisis de componentes principales. Revista de Geografía del Norte Grande. 57, 123-141.

SMITH, P. (2011): Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte de 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. Facultad de ciencias forestales y conservación de la naturaleza. Santiago, Chile.

STEWART, I.D., y OKE, T.R. (2012): Local Climate Zones for urban temperatures studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900

TAHA, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. Energy and Buildings. 25 (2), 99-103.

TRUJILLO, S. (2012): Estimación de temperatura superficial en el valle de Aburrá mediante técnicas de percepción remota. Tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental. Escuela de ingeniería de Antioquia. Facultad de ingeniería. Envigado, Colombia.

TUTIEMPPO NETWORK, S.L. (2000). El tiempo [Base de datos]. En Línea: <https://www.tutiemppo.net/clima/01-2000/ws-856820.html> (Consultado: 23 de marzo de 2017).

TUTIEMPPO NETWORK, S.L. (2011). El tiempo [Base de datos]. En Línea: <https://www.tutiemppo.net/clima/01-2011/ws-856820.html> (Consultado: 23 de marzo de 2017).

TUTIEMPPO NETWORK, S.L. (2014). El tiempo [Base de datos]. En línea: <https://www.tutiemppo.net/clima/02-2014/ws-856820.html> (Consultado: 23 de marzo de 2017).

TUTIEMPPO NETWORK, S.L. (2017). El tiempo [Base de datos]. En línea: <https://www.tutiemppo.net/clima/01-2017/ws-856820.html> (Consultado: 23 de marzo de 2017).

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). (2007). Landsat 7 Science Data Users Handbook. En línea: https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf (Consultado: 23 de febrero de 2017)

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2008). "Urban Heat Island Basics" In: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Draft. En línea: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium> (Consultado: 13 de febrero de 2017).

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). (2016). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. En línea: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf> (Consultado: 23 de febrero de 2017).

VÁSQUEZ, A., RIVEROS, S., ROMERO, H. (2005): Sustentabilidad del desarrollo urbano del Gran Concepción: Efectos ambientales del crecimiento urbano 1975-2001. Ponencia presentada en el XXVI congreso nacional y XVI congreso internacional de Geografía, sociedad chilena de ciencias geográficas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Octubre de 2005.

VOOGT. J y OKE. T. (2003). Thermal remote sensing of urban areas. Remote Sensing of Environment, 86 (3), 370-384.

VOOGT. J. (2008). Urban Heat Islands: Hotter cities. Washington D.C. American Institute of Biological Sciences. En línea: <http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/voogt.html#primer> (Consultado: 1 de abril de 2017).

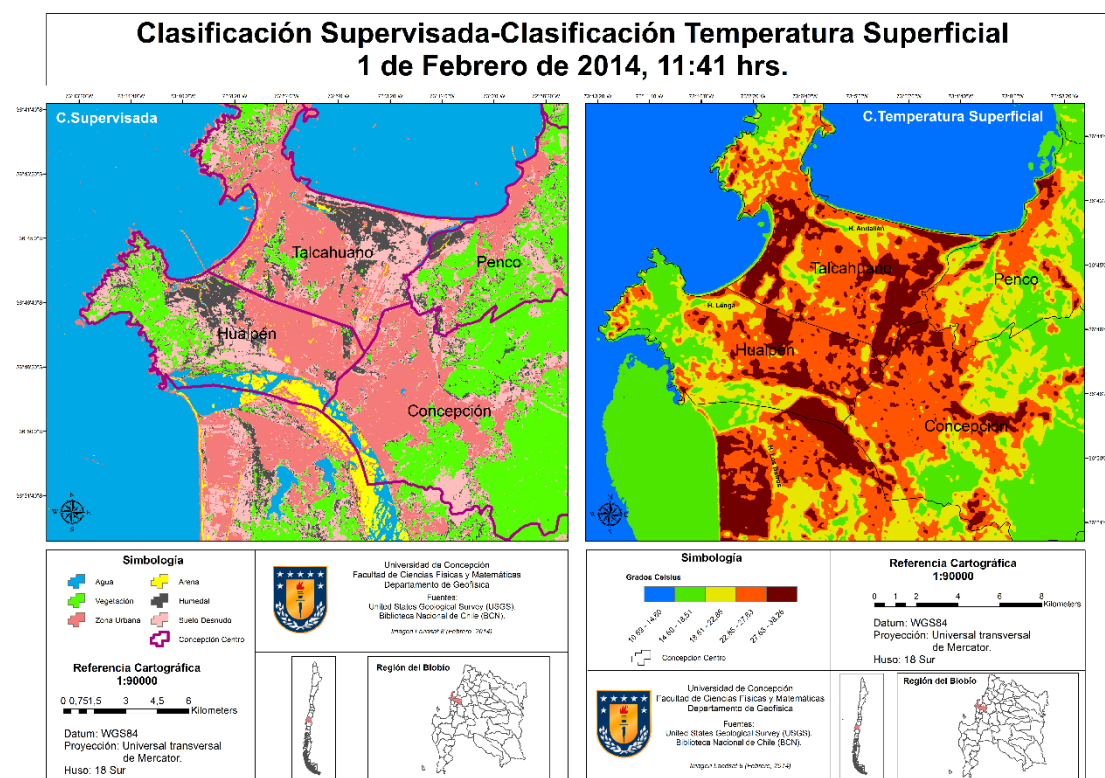
WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (11 de Agosto de 2010). Prevention web. En línea: <http://www.preventionweb.net/news/view/14970> (Consultado: 3 de marzo de 2017).

Anexos

Anexo 1: Clasificación de temperaturas superficiales año 2014

Comparando las clasificaciones de temperaturas del año 2014 con los años 2000 y 2017, podemos observar que en el año 2014 existe una importante diferencia entre la temperatura con la que desemboca el río Biobío, puesto que se logra apreciar una extensa área de océano en donde queda reflejada esta diferencia de temperaturas superficiales.

Comparando lo que ocurre en el centro de Concepción entre los años 2014-2017 logramos apreciar que las temperaturas superficiales no son muy diferentes. Las principales diferencias se registran comparando la imagen del 2014 con la del año 2000, principalmente cerca del aeropuerto Carriel-Sur, en donde se logra apreciar un gran incremento de temperaturas superficiales, pasando de tener temperaturas propias de cobertura vegetal a temperaturas de zonas urbanas. En general, se puede realizar el mismo análisis ya descrito en secciones anteriores.

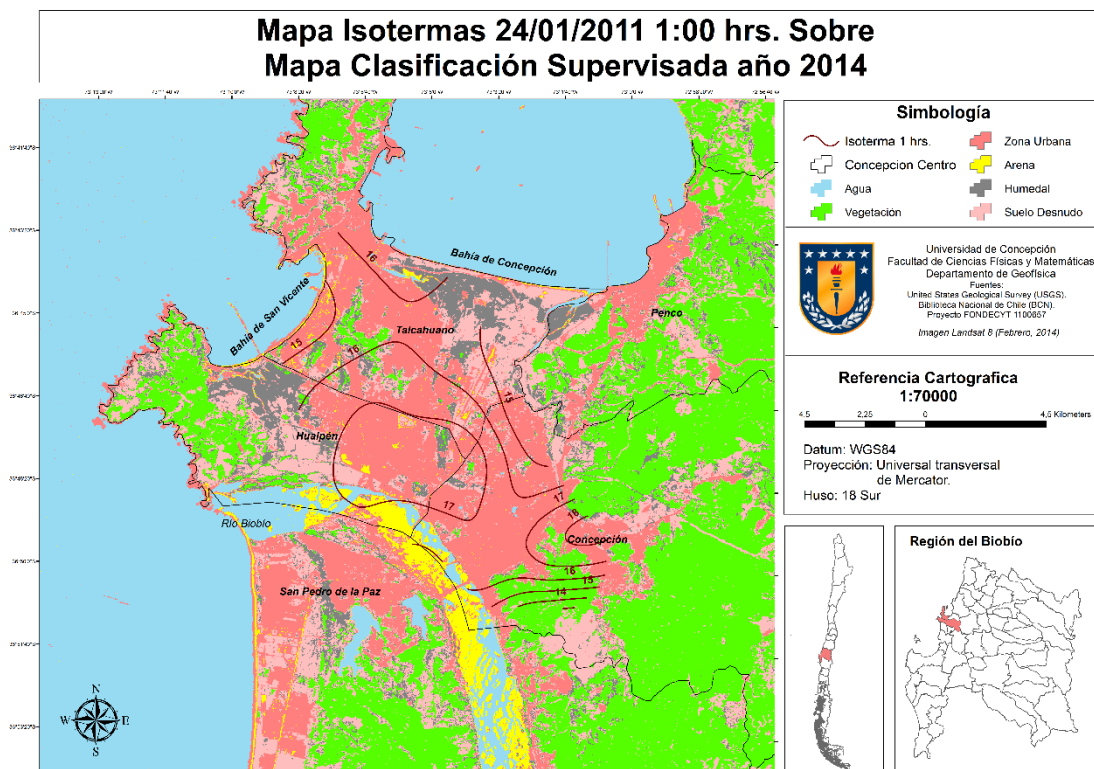


Anexo 1: Mapa de Clasificación de temperaturas superficiales del año 2014, junto al mapa de clasificación supervisada del mismo año (Fuente: Elaboración propia).

Anexo 2: Mapa de isotermas de las 1:00 horas

El anexo 2 muestra el mapa de isotermas de las 1:00 horas, podemos observar temperaturas atmosféricas homogeneizadas en el centro de Concepción, registrándose temperaturas superiores en los sectores de Nonguén y en la intersección de las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén, pero solo superiores en 1 a 2°C en relación a la periferia de la ciudad. Al igual que en las otras horas las temperaturas atmosféricas disminuyen hacia los alrededores de la ciudad, siendo la estación TIGO ubicada en los cerros localizados al sureste de la Universidad de Concepción la que registra la temperatura mínima, que es de 14°C, a esa misma hora la estación Pedro del Río registra una temperatura de 16.7°C.

Estimamos que la magnitud de la isla de calor atmosférica a esta hora del día es de 2.2°C, la cual es la menor intensidad registrada durante el día.

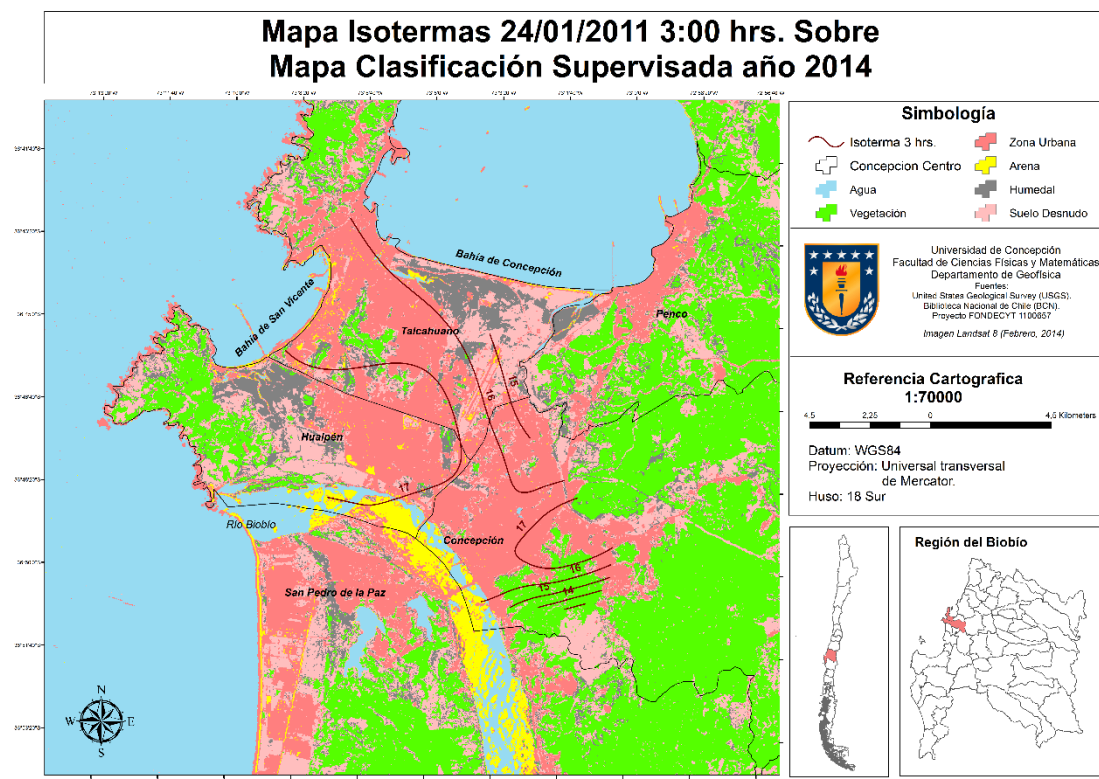


Anexo 2: Mapa de isotermas a las 1:00 horas en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, sobre mapa de clasificación supervisada del año 2014 (Fuente: Elaboración propia).

Anexo 3: Mapa de isotermas de las 3:00 horas

En el anexo 3 se presenta el mapa de isotermas a las 3:00 horas, se puede apreciar que las temperaturas sobre el área de estudio se comportan de la misma manera que a las 1:00 horas, de hecho seguimos registrando la misma diferencia entre la temperatura máxima y mínima de 2.7°C, entre la estación Pedro del Río donde se registra la máxima y TIGO que registra la mínima.

La intensidad de la isla de calor atmosférica es de 2.3°C , casi igual que la intensidad de las 1:00 horas. Las temperaturas atmosféricas se mantienen muy similares durante la noche, por lo que las intensidades de la isla de calor atmosférica nocturna presentan valores muy similares a lo largo de la noche.

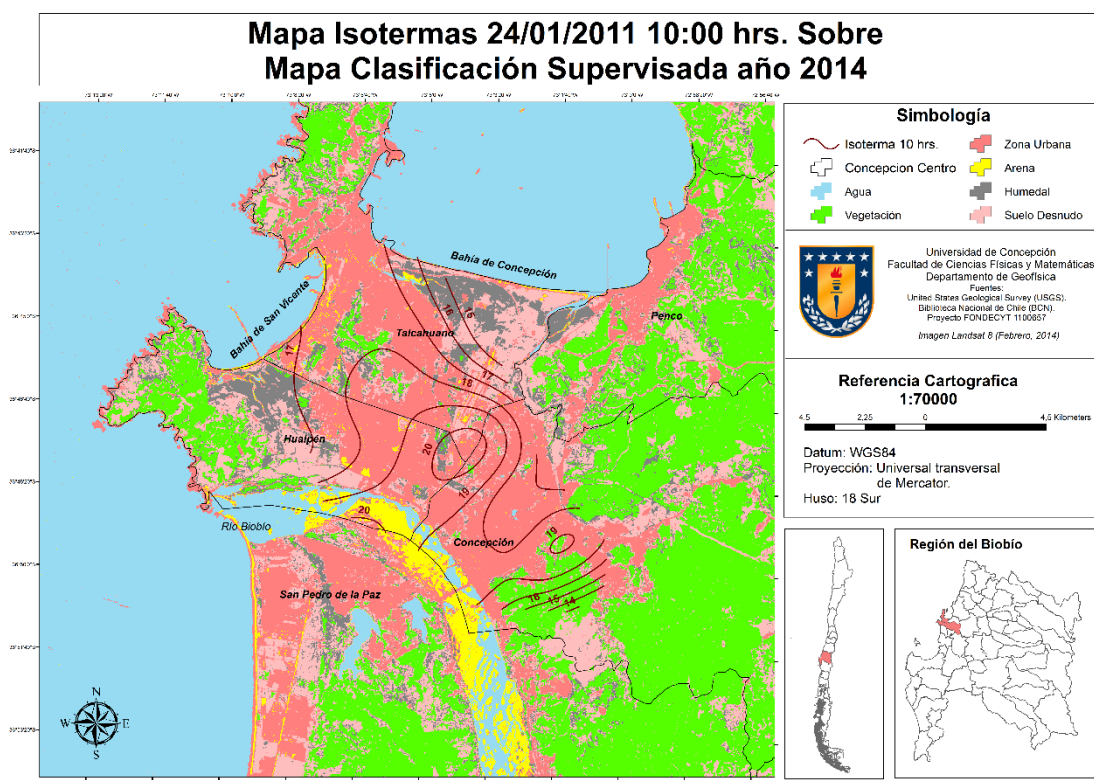


Anexo 3: Mapa de isotermas de las 3:00 horas en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, sobre mapa de clasificación supervisada del año 2014 (Fuente: Elaboración propia).

Anexo 4: Mapa de isotermas de las 10:00 horas

El anexo 4 muestra el mapa de isotermas de las 10:00 horas, sobre las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén. A esta hora del día se pueden visualizar claramente 2 isotermas nucleares cerradas. La isoterma de mayor magnitud se sitúa en la intersección de las comunas en estudio, mientras que la segunda isoterma cerrada se sitúa en el sector Collao, muy cerca de la “plaza de los dinosaurios”. Al igual que en las otras horas en estudio la temperatura comienza a disminuir a medida que nos alejamos de las zonas urbanas.

La temperatura mínima se registra en los cerros aledaños a las Universidad de Concepción, mientras que la temperatura máxima se registra en el sector de Lomas de San Andrés, generándose una diferencia de 4.4°C entre la temperatura mínima y máxima. Sin embargo, estimamos que la magnitud de la isla de calor atmosférica a esta hora del día es de 3.0°C .



Anexo 4: Mapa de isotermas de las 10:00 horas en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, sobre mapa de clasificación supervisada del año 2014 (Fuente: Elaboración propia).

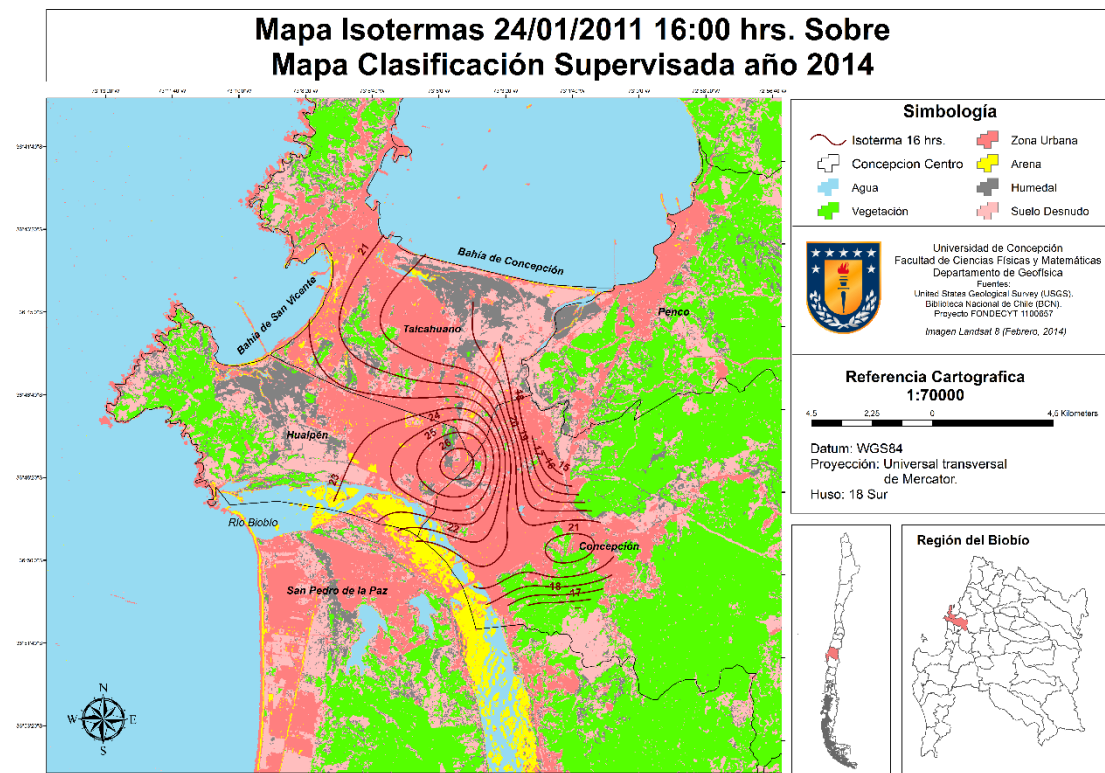
Anexo 5: Mapa de isotermas de las 16:00 horas

El anexo 5 presenta el mapa de isotermas a las 16:00 horas, continuamos observando la presencia de 2 isotermas nucleares cerradas, sin embargo estas isotermas presentan pequeños cambios en relación a lo que ocurre a las 10:00 horas. Lo primero es que la isoterma cerrada de mayor magnitud se sigue posando sobre la intersección de las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén, pero posee un leve desplazamiento hacia el noroeste. La isoterma cerrada de menor magnitud se sigue posando sobre el sector Collao, pero a esta hora del día incrementa de tamaño, abarcando un área más extensa en relación a lo que ocurriría en la hora estudiada anteriormente (10:00 horas).

La temperatura máxima a esta hora del día se registra en el sector de Lomas de San Andrés con 22.5°C , mientras que la temperatura mínima se sigue registrando en la estación TIGO, localizada en los cerros posicionados hacia el sureste de la Universidad de Concepción, registrando una temperatura de 19.7°C , generando una diferencia de 5.1°C entre el centro de Concepción y la periferia. Sin embargo, la intensidad de la isla de calor atmosférica la estimamos en 3.6°C .

Es importante destacar que a esta hora del día las temperaturas atmosféricas disminuyen hacia la periferia, al igual como ocurre en todas las horas del día. Por ende, es importante observar mediante la clasificación supervisada que la

periferia del centro de Concepción está compuesta por cobertura natural como humedales y vegetación, que generan esta disminución en las temperaturas del aire.



Anexo 5: Mapa de isotermas de las 16:00 horas en las comunas de Concepción, Hualpén y Talcahuano, sobre mapa de clasificación supervisada del año 2014 (Fuente: Elaboración propia).