

ANÁLISIS DE LOS FACTORES CONDICIONANTES SOBRE LAS TEMPERATURAS DE EMISIÓN SUPERFICIAL EN EL ÁREA METROPOLITANA DE VALPARAÍSO (AMV)¹

Pablo Sarricolea Espinoza

Magister en Geografía, Profesor ayudante. Estudiante de Doctorado de la U. de Barcelona.

psarrico@uchile.cl

Hugo Romero Aravena

Doctor en Geografía y Profesor asociado

hromero@uchile.cl

Departamento de Geografía, Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio, Universidad de Chile

Portugal 84 torre chica 2º piso, Región Metropolitana, Santiago, Chile

Teléfono + 56 2 9783095

Fax + 56 2 2229522

Palabras clave: topoclimatología, reflectividad de suelo, isla de calor urbana de superficie, modelos de regresión múltiple por pasos.

Key words: topoclimatology, the reflectivity of the ground, surface urban heat island, models of multiple regression step by step.

Resumen

Se investiga e indaga sobre los rasgos geográficos y urbanos que determinan la distribución de las temperaturas de emisión superficial en el Área Metropolitana de Valparaíso, la cual presenta topoclimas en su interior que afectan notablemente el campo térmico de la ciudad. Entre dichos rasgos destacan los referidos a la mayor o menor influencia que ejercen sobre las temperaturas la proximidad oceánica, la posición altitudinal, la exposición de laderas, la humedad de suelo, la presencia de áreas verdes, la reflectividad del suelo y las construcciones, los cuales son correlacionados con las temperaturas a través de modelos de regresión múltiple por pasos. La consideración de las estaciones astronómicas de invierno y verano permite establecer notables diferencias entre cómo los factores modifican las temperaturas en ambos periodos del año. Las oscilaciones máximas al paso del satélite Landsat evidencian diferencias de temperatura de emisión superficial de hasta 17,4°C en verano, mientras que ellas se reducen a 8,8°C en invierno. En verano los factores que explican mejor la distribución de las temperaturas corresponden a la humedad, reflectividad de suelo, cercanía al mar y las áreas verdes (estas últimas medidas a partir del índice normalizado de diferencias vegetales, NDVI), quedando las comunas de Quilpué y Villa Alemanas sometidas a mayores temperaturas al conformar una macro isla de calor urbana de superficie (ICUs), mientras que el resto de la ciudad se muestra más fría que dicha zona, con excepción del barrio puerto de Valparaíso y Las dunas de Concón; las áreas más frescas de la ciudad coinciden con grandes áreas verdes y naturales situadas en Viña del Mar (Club de Golf Granadilla, Sporting Club y sobre la laguna Sausalito y el Club Naval) y las cumbres de los cerros porteños. Durante el invierno, los factores más representativos de las temperaturas son la reflectividad de suelo, exposición de laderas y densidad de población, concentrándose las ICUs principalmente en el centro de Valparaíso, Concón y los barrios de exposición norte de Viña del Mar (destacando el barrio Gómez Carreño) quedando las comunas de Quilpué y Villa Alemana menos cálidas que el resto de la ciudad.

Abstract

The geographic and urban characteristics are investigated that determine the distribution of the temperatures of superficial emission in the Metropolitan Area of Valparaíso, the one that presents/displays topoclimatology in its interior which they remarkably affect the thermal field of the city. Between the characteristics they emphasize the referred ones to the greater one and smaller influence than exerts on the temperatures the proximity to the sea, the elevation, the aspect, the ground humidity, the presence of green areas, the reflectivity of the ground and the constructions, those that are correlated with the

¹ Investigación parte de un proyecto financiado por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología. (FONDECYT 1080080)

temperatures through models of multiple regression stepwise. One analyzes in the astronomical stations of winter and summer, and significant differences between the factors settle down that modify the temperatures in both periods of the year. The maximum amplitude of urban temperature according to the Landsat satellite demonstrate until 17,4°C in summer and 8,8°C in winter. In summer the factors that explain better the distribution of the temperatures correspond to the humidity, the green reflectivity of ground, proximity to the sea and areas (these last measures from the Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), being the zones of Quilpué and Villa Alemana put under greater temperatures when conforming a Surface Urban Heat Island (SUHI), and the rest of the city are colder than this zone, with exception of the district port of Valparaíso and the dune fields of Concón; the freshest areas of the city agree with the green and natural areas located in Viña del Mar (Club of Golf Granadilla, Sporting Club, Sausalito lagoon and the Naval Club) and summits of hills. During the winter, the most representative factors of the temperatures are the ground reflectivity, aspect and density of population, concentrating themselves the SUHI mainly in the center of Valparaíso, Concón and the districts of North exhibition of Viña del Mar (emphasizing the district Gómez Carreño) being the zones of Quilpué and Villa Alemana less warm than the rest of the city.

1. Introducción

Los impactos que producen las ciudades sobre el medio ambiente están estrechamente relacionados con los montos de población que albergan y el tamaño físico de ellas. El consumo de suelos por extensión de las urbes modifica artificialmente las condiciones climáticas locales a través del aumento de las temperaturas, disminución de la humedad y reducción de la velocidad del viento, todo lo cual favorece la consolidación de islas de calor urbana, las cuales pueden diferenciarse en dos tipos: La isla de calor urbana (ICU), que se define por las mayores temperaturas que registra la capa de aire que cubre la ciudad respecto a su entorno rural como consecuencia del calor acumulado por las edificaciones, calles y avenidas, sitios eriazos, industriales y estacionamientos; caracterizadas por estar construidas con materiales que almacenan y conducen gran cantidad de calor cuando reciben la insolación directa y que devuelven a la atmósfera, especialmente durante la noche. La isla de calor urbana de superficie (ICUs), por el contrario, corresponde a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y cuerpos urbanos y que son captados directamente por sensores infrarrojos (Sarricolea y Romero, 2006). La ICUs no está sometida directamente a las compensaciones térmicas que realizan los flujos de aire, desde las superficies más cálidas a las más frías y que regulan la temperatura del aire de las ciudades, por lo que cabe esperar rasgos más marcados, e incluso, mayor intensidad durante el día. La Tabla 1 presenta las principales características de ambas islas de calor según su desarrollo temporal, su máxima intensidad en periodos del día, métodos de estudio y representación grafica.

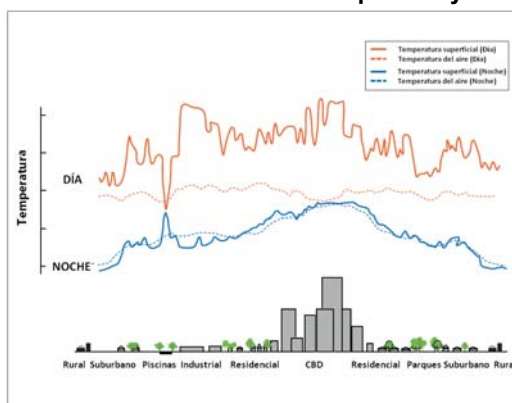
Tabla 1. Características de las islas de calor urbanas de superficie y atmosféricas

Características	Isla de calor urbana de superficie (ICUs)	Isla de calor urbana atmosférica (ICU)
Desarrollo temporal	<ul style="list-style-type: none"> • Presente en el día como la noche • Más intensa en los días de verano 	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeña o inexistente durante el día • Más intensa en las noches de invierno
Condiciones para el desarrollo de la máxima intensidad	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor variación espacio-temporal <ul style="list-style-type: none"> ▪ Día: 10 a 15°C ▪ Noche: 5 a 10°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Escasa variación espacio-temporal <ul style="list-style-type: none"> ▪ Día: -1 a 3°C ▪ Noche: 7 a 12°C
Método típico para su estudio	<ul style="list-style-type: none"> • Mediciones indirectas ▪ Sensores remotos 	<ul style="list-style-type: none"> • Mediciones directas ▪ Estaciones meteorológicas fijas y transectos móviles
Representación gráfica típica	<ul style="list-style-type: none"> • Imagen térmica 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapa de isotermas • Imagen térmica

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 1 se desprende que las ICUs son más intensas en verano y durante el día, con intensidades de 10 a 15°C. Además, existen altas correlaciones espaciales entre las islas de calor de superficie y del aire (Arnfield, 2003) durante el periodo diurno (Figura 1).

Figura 1. Relaciones entre las ICU de superficie y atmosféricas.



Fuente: Elaboración propia en base a EPA (compendio sobre la isla de calor urbana)

La Figura 1 evidencia las altas correlaciones en las temperaturas superficiales y del aire durante la noche (tanto en magnitud como distribución), la casi nula existencia de ICU durante el día; y lo más destacable para este estudio, la existencia de la ICUs durante el día muy sometida a las superficies construidas y con dos núcleos: el centro de la ciudad y las zonas industriales periféricas.

Respecto a la estacionalidad de la isla de calor de superficie, la mayoría de los autores concuerda que es más intensa en verano (Eliasson, 1994; Klysiak y Fortuniak, 1999; Kolokotroni y Giridharan, 2008), pero algunos estudios han encontrado bi-estacionalidad, con máximos entre otoño-verano (Yagüe et al., 1991; Gedzelman *et al.*, 2003) y otoño-invierno (Kim y Baik, 2002). Esto demuestra que la estacionalidad de la máxima intensidad de ICUs depende de las condiciones propias de localización geográfica del emplazamiento de la ciudad y su entorno (Sarricolea *et al.*, 2008).

Respecto a la morfología de la isla de calor urbana de superficie, se ha establecido que está condicionada, entre otros factores, por la densidad de las edificaciones y la existencia de parques. Yuan y Bauer (2007) indican la importancia de la composición de las grandes áreas verdes, las cuales aparecen como zonas relativamente frías en comparación con las superficies construidas de su entorno; en este sentido, Oke (1995) señala que la capa límite urbana (*urban boundary layer*) se diluye hasta desaparecer en las áreas verdes (especialmente arbóreas), y su importancia es más evidente en el periodo diurno. Se han encontrado también relaciones importantes entre la distribución de las temperaturas en la ciudad y la topografía (Beral-Guyonnet, 1997; Cuadrat *et al.*, 2003 y 2005 y Romero y Sarricolea, 2006) las cuáles se acentúan al interior de las ciudades, debido al menor dominio de los vientos.

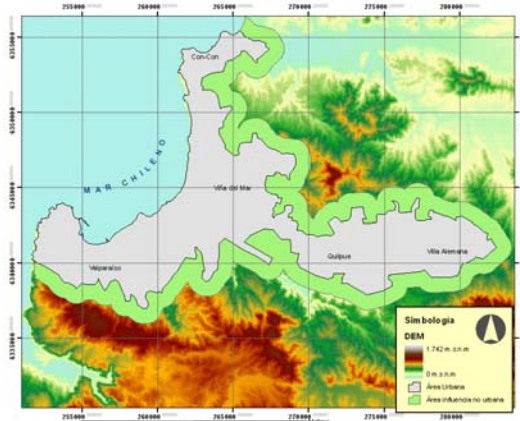
No obstante, se debe indicar que las relaciones más modeladas corresponden a aquellas que comparan la intensidad de la isla de calor con su entorno rural a partir de los tamaños poblacionales y estructura espacial de las ciudades. Así Oke (1982, 1987) ha propuesto que las diferencias de las temperaturas urbanas y rurales ($\Delta t = t_u - t_r$) corresponden a una función logarítmica del número de población, encontrando diferencias en la relación para grupos de ciudades europeas de tipo mediterráneas (compactas) y las fragmentadas y extensas ciudades de carácter anglosajón. Por otra parte, Yamashita et al. (1986) destacaron que la densidad de edificación y la rugosidad de las ciudades influyen fuertemente en el factor de visión del cielo (*sky view factor*), aumentando la intensidad de las temperaturas.

Sin embargo, la configuración espacial que adquiere la ICUs no es estable y su variabilidad temporal puede ser muy importante, estando relacionados estos cambios con la dinámica atmosférica regional y por determinadas condiciones meteorológicas, como lo han puesto de relieve Lowry (1977) y Landberg (1981) al relacionar las diferentes formas de la isla de calor con los flujos de viento y las condiciones sinópticas.

El conocimiento de la configuración y transformaciones del patrón térmico de superficie de la metrópolis de Valparaíso es un tema que no se había abordado hasta ahora. El Gran Valparaíso es la segunda metrópolis más importante de Chile y reúne a un millón de habitantes en un conjunto conurbado de

ciudades que anexan espacialmente en el borde costero del Océano Pacífico a Valparaíso y Viña del Mar (700.000 habitantes) y a ciudades interiores como Quilpué y Villa Alemana (Figura 2). Bajo un clima mediterráneo subtropical, este conjunto urbano localizado a 33°S, ocupa valles y arroyos que descienden desde terrazas de abrasión marina que pueden alcanzar 500 m de altura. Las lluvias anuales alcanzan a 500 mm en promedio y se registran casi exclusivamente en los meses de invierno (mayo a agosto), presentándose años secos (que alcanzan al 50% del promedio) cuando ocurren los fenómenos Niña y años lluviosos (que duplican los montos anuales promedio) asociados a El Niño. Las temperaturas máximas en verano fluctúan entre los 25° y 30°C en los cerros más apartados del mar y en las comunas interiores. En el invierno, las temperaturas máximas suelen oscilar entre los 13° y 18°C. El mes más lluvioso es julio (111 mm.).

Figura 2. Mapa del área de estudio. Gran Valparaíso.



Fuente: Elaboración propia

En esta investigación, se intenta demostrar la existencia y características de la ICUs y las causas que intervienen en su forma e intensidad. Para ello, se establecen relaciones estadísticas entre las temperaturas superficiales y algunas variables explicativas, enumerando medidas de mitigación que deberían ser incorporadas en la planificación urbana. Como método de análisis, se aplican modelos de regresión múltiple por pasos sucesivos.

El propósito general entonces, corresponde a determinar y analizar la distribución de las temperaturas de emisión superficial, la conformación de la isla de calor urbana de superficie y establecer su relación con variables condicionantes de carácter geográfico-urbano en la metrópolis de Valparaíso. Las hipótesis que sustentan esta investigación señalan que la configuración térmica de la metrópolis de Valparaíso debe presentar diversos núcleos de calor que se relacionan con los diversos núcleos fundacionales de alta densidad de las comunas del área metropolitana, la que en consecuencia debe tender a ser policéntrica, con mayores temperaturas en los centros urbanos y menores valores en sus periferias.

Además, dichas temperaturas deben estar muy influenciadas por el régimen de brisas de mar a continente y los grados de continentalidad, generándose núcleos interiores de calor en verano y núcleos litorales en invierno. Las temperaturas de emisión superficial y la conformación de ICUs deben alcanzar mayor intensidad durante el verano (entre 10 y 15°C) y menores intensidades en invierno.

No obstante las diferencias térmicas entre la ciudad y su entorno, deben ser similares a las magnitudes típicas de islas de calor encontradas por Oke (1982 y 1987) para ciudades como el Gran Valparaíso, que debieran estar entre 7,9° a 11,3°C, lo cual será corroborado con los datos obtenidos de las imágenes térmicas Landsat. Las variables que explicarían de mejor manera la distribución térmica de la ciudad deben corresponder a la densidad de población, la topografía y exposición de laderas, la cercanía al mar, entre otras, muy similar a los resultados encontrados por Romero y Sarricolea (2006) y Sarricolea (2008) para la metrópolis de Santiago de Chile.

2. Materiales y métodos

Los métodos aplicados se sustentan en el uso de análisis espacial y técnicas geoestadísticas. Los datos de las temperaturas, fueron obtenidas a partir de imágenes Landsat TM de Febrero y Agosto del año 2007, sobre las cuales se efectuaron correcciones geométricas y radiométricas que permitieron obtener la temperatura de emisión superficial. El soporte de análisis espacial fue el Sistema de Información Geográfica (SIG) *ArcGis desktop 9.2.*, el cual permitió incorporar en una única *geodatabase* todas las variables explicativas consideradas aplicando modelos de Regresión Múltiple *paso a paso*, ingresando sucesivamente las variables hasta cubrir la mayor parte de la varianza total y conseguir el menor error estándar posible. De esta manera, se logra construir una ecuación que representa el mejor ajuste posible de la distribución de las temperaturas superficiales, respecto al comportamiento espacial de variables tales como:

1. *Topografía de la metrópolis*: Se define como la distancia vertical sobre, o bajo, una superficie de referencia. La elevación del terreno se expresa con relación a la altitud media del nivel del mar. Esta variable debiera estar estrechamente relacionada de manera inversa con las temperaturas superficiales (Jo *et al.*, 2001), pero debido a la latitud de la ciudad -bajo el predominio permanente del Anticiclón del Pacífico Sur- y a la presencia de las aguas frías del mar, se registran inversiones térmicas de subsidencia y de radiación.
2. *Exposición de laderas*: Está estrechamente relacionada con la cargas de energía solar recibidas por las superficies terrestres. Se utilizan las 8 exposiciones básicas de la rosa de los vientos (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO) más las zonas planas.
3. *Distancia al mar y fuentes húmedas*: Representa la posibilidad que las áreas sean alcanzadas por las masas de aire locales que se generan sobre el mar y sobre los ríos y humedales, que regulan el comportamiento térmico y favorecen la circulación de los vientos (Romero y Vinagre, 1985).
4. *Humedad de suelo*: Representa el resultado obtenido por la transformación tasseled cap (TTC) y se relaciona con el contenido de agua en las cubiertas terrestres (vegetación y suelo). Se calcula del siguiente modo:

$$\text{Humedad} = B1 * 0.1509 + B2 * 0.1973 + B3 * 0.3279 + B4 * 0.3279 + B5 * -0.7112 + B7 * -0.4572$$
5. *Brillo de suelo*: Variable derivada a igual que a humedad de suelo por la TTC y refleja los cambios espaciales de la reflectividad total de una imagen Landsat, siendo la ecuación usada la siguiente:

$$\text{Brillo} = B1 * 0.3037 + B2 * 0.2793 + B3 * 0.4743 + B4 * 0.5585 + B5 * 0.5082 + B7 * 0.1863$$
6. *NDVI*: Esta variable está estrechamente relacionada y en forma inversa (función negativa), con las temperaturas superficiales. La forma de cálculo fue a través de la construcción del índice denominado NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) sobre las imágenes Landsat TM 2007. El NDVI se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = (\text{IRC} - R) / (\text{IRC} + R)$$
7. *Densidad de población*: La forma de cálculo de la densidad de población fue a través de los datos del Censo de Población y Vivienda del año 2002 a nivel de manzanas, utilizando filtros *Kernel*, los cuales permiten obtener distribuciones que reducen la variabilidad de los datos reteniendo la estructura espacial de los mismos.

3. Resultados

3.1 Distribución de las temperaturas en verano e invierno en el AMV

En la Tabla 2 es posible apreciar que las temperaturas promedios son más altas sobre el área urbana de Valparaíso, tanto en febrero (verano) como agosto (invierno) del año 2007, alcanzando diferencias de +4,4°C en verano y +2,8°C en invierno, respecto al área rural circundante de la ciudad. En cuanto a la distribución de las temperaturas extremas, la temperatura mínima no muestra variación según se trate de áreas urbanas o rurales. Sin embargo, las temperaturas máximas son mayores en el área rural en verano en +1,2°C (isla de calor no urbana, según Peña y Romero 2006 y Peña 2008).

En invierno el área urbana registra mayores temperaturas (+0,8°C). Al considerar los máximos valores urbanos y mínimos rurales de temperatura se observan diferencias de 17,4°C en verano y 8,8°C en invierno.

Tabla 1 Temperaturas superficiales calculadas para verano e invierno (°C).

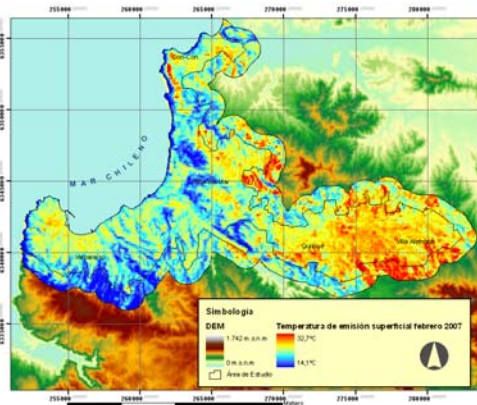
Estación	Posición	Temp. media	Temp. Mínima	Temp. Máxima	Desv. estándar
Verano, imagen Landsat	Urbano	24,6	14,1	31,5	2,2
	Rural	20,2	14,1	32,7	2,7
Invierno, imagen Landsat	Urbano	17,3	11,4	20,2	1,6
	Rural	14,5	11,4	19,4	1,7

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la distribución espacial de las temperaturas de verano se puede observar en la Figura 3 que los núcleos de mayor calor del Gran Valparaíso se registran en las ciudades interiores de Villa Alemana y Quilpué, las cuales se encuentran alejadas de las brisas de verano que refrescan las temperaturas de la bahía. También se aprecia que las grandes áreas verdes de Viña del Mar se comportan como islas frías y que sus menores temperaturas penetran por los sistemas de quebradas de los cerros, agregándose sus efectos a los resultantes de las menores cargas de radiación de las laderas de exposición sur.

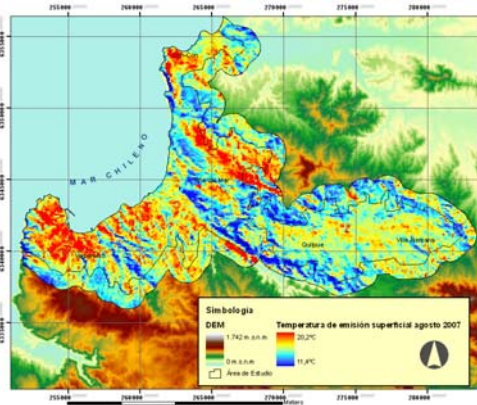
La distribución espacial de las temperaturas cambia radicalmente en invierno (Figura 4), situando ahora los núcleos de mayor calor en las cercanías de la bahía, destacando los núcleos de calor localizados sobre los barrios del Plan, Bordemar y en los talwegs de las quebradas, en el caso de Valparaíso. En Viña del Mar tales núcleos se localizan en el barrio Gómez Carreño, área urbana de alta densidad ubicada sobre las terrazas marinas más altas, y en el centro de la ciudad de Concón, ubicada más al Norte. En esta estación, las ciudades interiores de Villa Alemana y Quilpué, debido a la continentalidad, se muestran más frías que el resto de la ciudad.

Figura 3. Distribución de las temperaturas de febrero del 2007 en el AMV



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Distribución de las temperaturas de agosto del 2007 en el AMV



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Distribución de las variables explicativas de las temperaturas

Como se ha señalado anteriormente, el área metropolitana de Valparaíso posee en su interior y su entorno rural, una compleja distribución de temperaturas de emisión superficial que dan origen a islas y archipiélagos térmicos que se deben a múltiples factores, tanto urbanos, atmosféricos y relacionados con la configuración topográfica de sus cuencas. Sin embargo, los factores más importantes en dicha distribución parecen ser la acción reguladora de las brisas de mar y las modificaciones al paisaje por el crecimiento urbano, debido al reemplazo de las coberturas naturales de suelo por coberturas construidas artificialmente que concentran y almacenan calor.

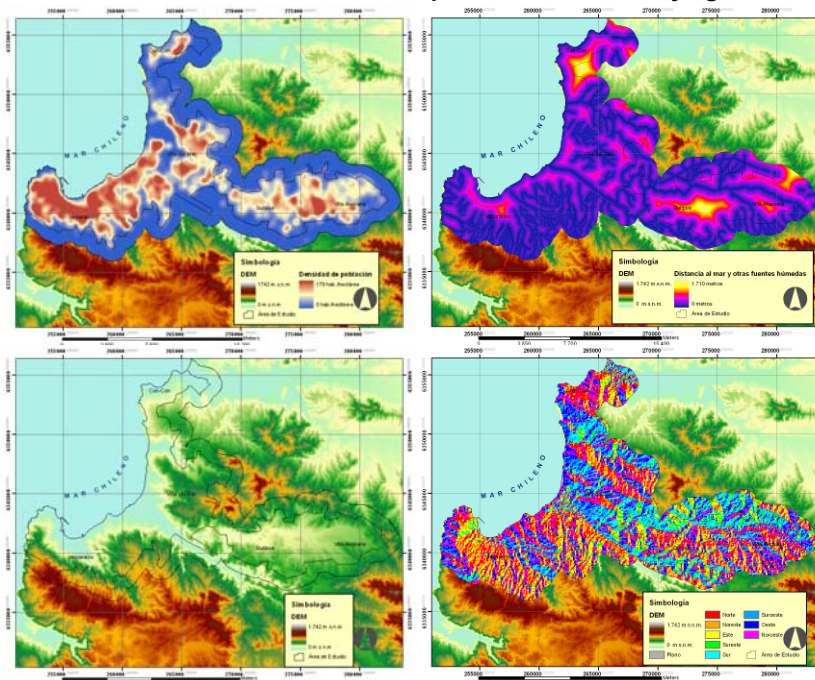
Estos factores son representados por variables explicativas, que, como lo indican Beral-Guyonnet (1997), Cuadrat et al., (2003 y 2005); Hogan y Ferrick, (1998), corresponden a condiciones topográficas y de exposición de laderas del sitio de emplazamiento de la ciudad, distancias al mar y a otras fuentes húmedas, brillo y humedad del suelo, densidades de población y coberturas vegetales. Se puede señalar, que ninguna de estas variables explica por sí sola la distribución espacial de las temperaturas, lo que requiere que sean consideradas en su conjunto. Las estadísticas promedios resultantes de las variables explicativas consideradas se observan en la Tabla 3. La distribución espacial de las variables explicativas, en verano e invierno, se puede observar en la Figura 5.

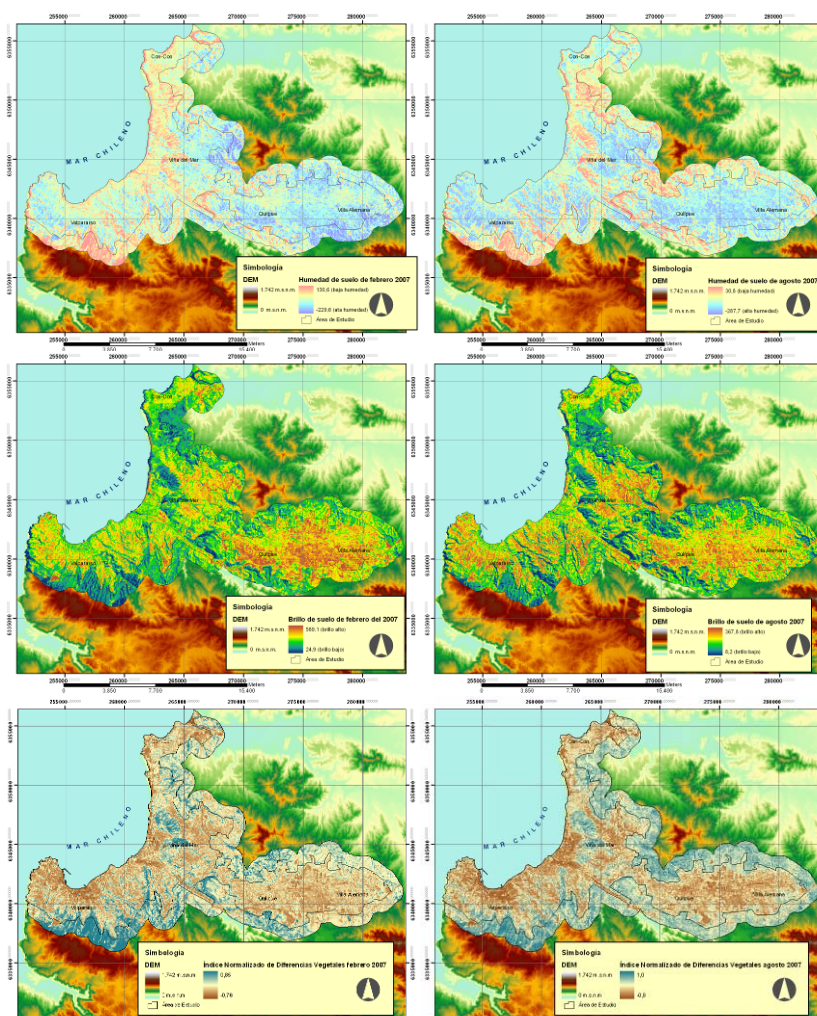
Tabla 2. Valores medios de las variables explicativas de las temperaturas en el AMV

Variable	Valores medios de Febrero 2007	Valores medios de invierno 2007
Elevación topográfica	167,26 metros	167,26 metros
Exposición de laderas	Sur-Oeste	Sur-Oeste
Distancia a mar y fuentes húmedas	275,97 metros	275,97 metros
Humedad de suelo	-78,70	-156,75
Brillo de suelo	247,00	153,28
Índice de vegetación (NDVI)	0,29	0,39
Densidad de población	31,04 hab./hás	31,04 hab./hás

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Distribución de las variables explicativas en febrero y agosto del 2007





Fuente: Elaboración propia

3.3 Modelos para explicar la distribución de las temperaturas del AMV

Los rasgos urbanos-geográficos seleccionados como variables explicativas de la distribución de las temperaturas superficiales de febrero y agosto del 2007 se ingresaron paulatinamente a modelos de Regresión Múltiple Por Pasos, lo que permitió determinar cómo influyen en su configuración espacial. Respecto a la relación estadística entre la distribución de las temperaturas superficiales y el conjunto de variables explicativas, los resultados confirman que:

- En verano: La variable humedad de suelo es la más importante, pues por sí sola explica el 47% de la varianza total (Tabla 4), seguida del brillo, distancia al mar y fuentes húmedas, NDVI, exposición de laderas y densidad de población, alcanzando hasta el modelo 6 a explicar el 56% de las temperaturas. La variable elevación topográfica para las condiciones de verano es excluida del análisis debido a su nula influencia en el comportamiento de la varianza.
- En invierno: El brillo explica el 39% de la distribución de las temperaturas de agosto (Tabla 5), seguido por la exposición, densidad de población, elevación topográfica, humedad de suelo, NDVI y la distancia al mar y fuentes húmedas, alcanzando hasta el modelo 7 a explicar sólo el 46% de la varianza total. Ello significa que las áreas con mayor brillo, mayor densidad de población y exposición norte en general presentan mayores temperaturas en invierno, y se localizan en la ciudad de Valparaíso.

Tabla 3. Resultados del análisis de regresión múltiple entre las temperaturas y diferentes variables geográficas y urbanas. Febrero 2007

Modelo	R múltiple	R ² múltiple	R ² múltiple ajustado	Error típ. St.	Cambio en R ² múltiple
1	0,685	0,469	0,469	1,755	0,469
2	0,721	0,519	0,519	1,669	0,051
3	0,739	0,545	0,545	1,624	0,026
4	0,742	0,551	0,551	1,613	0,006
5	0,747	0,557	0,557	1,602	0,006
6	0,749	0,561	0,561	1,596	0,003
7	0,749	0,561	0,561	1,596	0

Modelos: (Const.), humedad de suelo, brillo de suelo, distancia al mar y fuentes húmedas, NDVI, exposición, densidad de población, elevación topográfica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Resultados del análisis de regresión múltiple entre las temperaturas y diferentes variables geográficas y urbanas. Agosto 2007

Modelo	R múltiple	R ² múltiple	R ² múltiple ajustado	Error típ. St.	Cambio en R ² múltiple
1	0,598	0,358	0,358	1,339	0,358
2	0,617	0,381	0,381	1,314	0,023
3	0,632	0,399	0,399	1,295	0,018
4	0,641	0,411	0,411	1,282	0,012
5	0,645	0,416	0,416	1,277	0,005
6	0,648	0,419	0,419	1,273	0,003
7	0,649	0,422	0,422	1,270	0,002

Modelos: (Const.), brillo de suelo, exposición, densidad de población, elevación topográfica, humedad de suelo, NDVI, distancia al mar y fuentes húmedas

Fuente: Elaboración propia

Los modelos 6 y 7 (Tabla 6) indican los signos de relación entre los factores explicativos de la distribución de las temperaturas de febrero y agosto del 2007 respectivamente.

Tabla 5 Regresión múltiple para el modelo 6 y 7, constantes y coeficientes Beta de las ecuaciones para febrero y agosto del 2007 respectivamente

Variables del modelo de regresión múltiple	β para coeficientes no estandarizados Febrero 2007	β para coeficientes no estandarizados Agosto 2007
(Constante)	19,964	13,766
Humedad de suelo	-0,025	0,009
Brillo de suelo	0,009	0,027
Distancia al mar y fuentes de humedad	0,001	0,001
NDVI	-1,847	0,675
Exposición de laderas	-0,079	-0,093
Densidad de población	-0,004	0,009
Elevación topográfica	-----	0,002

Fuente: Elaboración propia

Las relaciones positivas asocian en verano la distribución de las temperaturas superficiales con el brillo de suelo, distancia al mar y fuentes de humedad; y en agosto del 2007 para todas las variables explicativas a excepción de la exposición de laderas. Las correlaciones son negativas en febrero para humedad de suelo, NDVI, exposición de laderas y densidad de población.

Respecto a las correlaciones entre productividad vegetal (representada por NDVI) y distribución de temperaturas superficiales, son negativas en verano (a mayor vegetación menor temperatura) y positivas en invierno, lo que ha sido igualmente observado por Yuan y Bauer, 2007; Peña y Romero, 2006; Peña, 2008; Romero y Sarricolea, 2006; Sarricolea *et al.*, 2008 y Sarricolea, 2008, entre otros. Respecto a la humedad de suelo se observa en febrero una disminución tanto de ésta como de la temperatura, lo cual se contradice con lo señalado por Peña y Romero (2006) y Peña (2008) para la ciudad de Santiago. En agosto la situación vuelve a ser similar a la indicada en dichas investigaciones.

La sensibilidad de las ecuaciones a los cambios en las variables se puede observar en la Tabla 7. Para febrero, al aumentar en 100 metros la distancia al mar y a las fuentes húmedas, la temperatura aumenta 0,1°C, y al aumentar la densidad de población en 50 hab./hás la temperatura disminuye 0,2°C.

Tabla 6. Resultados de los modelos de regresión múltiple para febrero y agosto del 2007 y la reacción de la temperatura a los cambios de los valores en las variables explicativas

VARIABLES DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE	Cambios en la temp. (°C) de febrero	Cambios en la temp. (°C) de invierno
Aumento de la Humedad de suelo en -50 unidades	+1,25	+0,45
Aumento de la Brillo de suelo en 50 unidades	+0,45	+1,35
Aumento de la Distancia al mar y fuentes de humedad en 100 metros	+0,1	+0,1
Aumento en el NDVI en 0,5	-0,9	+0,34
Cambiar la exposición de laderas desde Este a Norte	+0,32	+0,37
Aumento de la densidad de población en 50 hab./hás	-0,2	+0,45
Aumento de la Elevación topográfica en 50 metros	-----	+0,02

Fuente: Elaboración propia

El brillo y la humedad de suelo son las variables que más modifican las temperaturas de verano e invierno, lo cual merece especial atención, pues la modificación de los albedos de las construcciones, específicamente las techumbres, puede modificar las temperaturas de la ciudad. Las características topo climáticas de la ciudad también influyen, ya que las exposiciones norte son en promedio 0,38°C más cálidas, mientras que el aumento en la elevación también determina un aumento de las temperaturas en invierno

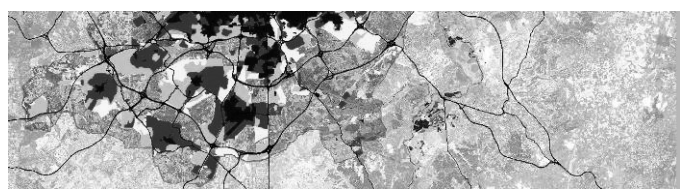
4. Conclusiones

La configuración espacial de las temperaturas superficiales del área metropolitana de Valparaíso en verano (febrero) e invierno (agosto) del año 2007 muestra notorias diferencias motivadas por la cercanía al mar y la acción de las brisas oceánicas. Ello reduce las temperaturas de la bahía en verano y las elevan en invierno. Sin embargo, la continentalidad de las ciudades interiores de Quilpué y Villa Alemana hace que esas relaciones sean inversas. En ambos casos las islas de mayor temperatura tienden a asociarse con el policentrismo de las áreas más densamente construidas. La estación del año es muy relevante en dicha distribución, tanto sobre la intensidad como localización de las islas de calor. La máxima intensidad de la isla de calor urbana de emisión superficial en la metrópolis de Valparaíso se alcanza en febrero y llega a 17,4°C mientras que se reduce a 8,8°C en agosto, valores superiores a los obtenidos por las ecuaciones de Oke (1987), que predicen 7,9°C y 11,3°C respectivamente. En verano los factores que explican mejor la distribución de las temperaturas corresponden a la humedad y reflectividad de suelo, cercanía al mar y a las áreas verdes (estas últimas medidas a partir del índice normalizado de diferencias vegetales, NDVI). Las ciudades interiores de Quilpué y Villa Alemanas conforman una macro isla de calor urbana de superficie (ICUs), mientras que el resto de la metrópolis se muestra más fría, con excepción del barrio puerto de Valparaíso y las dunas de Concón. Las áreas más frescas de la ciudad coinciden con grandes áreas verdes y de vegetación natural, situadas en Viña del Mar (Club de Golf Granadilla, Sporting Club y sobre la laguna Sausalito y el Club Naval) y las cumbres de los cerros porteños. Durante el invierno, los factores que mejor explican la variación espacial de las temperaturas superficiales son la reflectividad de suelo, exposición de laderas y densidad de población, concentrándose las ICUs principalmente en el centro de Valparaíso, Concón y los barrios de exposición

norte de Viña del Mar (destacando el barrio Gómez Carreño) mientras que las ciudades interiores de Quilpué y Villa Alemana son menos cálidas.

Bibliografía

- Arnfield, J.** 2003. Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. *International Journal of Climatology*, 23: 1-26.
- Berral-Guyonnet, I.** 1997. Analyse spatiale des températures mensuelles dans l'agglomération lyonnaise. *Revue de Géographie de Lyon* 72: 263-266.
- Cuadrat, J.M., M.A. Saz, S.M. Vicente-Serrano.** 2003. Surface wind direction influence on spatial patterns of urban heat island in Zaragoza (Spain). *Geophysical Research Abstracts*, 5: 02592. European Geophysical Society.
- Cuadrat, J.M., M.A. Saz, S.M. Vicente-Serrano.** 2005. Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): La Isla de Calor y sus factores condicionantes. *Boletín de la A.G.E.* N° 40 - 2005, págs. 311-327.
- Elliasson, I.** 1994. Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography*, 15: 1-22.
- Gedzelman, S.D., S. Austin, R. Cermak, N. Stefano, S. Partridge, S. Quesenberry and D.A. Robinson.** 2003. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theor. Appl. Climatol.* 75: 29-42.
- Hogan, A., M. Ferrick.** 1988. Observations in nonurban heat islands. *Journal of Applied Meteorology* 37: 232-236
- Jo, M., K. Lee, B. Jun, B. Kwon and Y. Jo.** 2001. The spatial topographic of urban surface temperature using remotely sensed data and GIS. 22nd Asian conference on remote sensing. Singapore. 5 pp.
- Kim, Y.H., J.J. Baik.** 2002. Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*. Volume 41:651-659.
- Klysiak, K., K. Fortuniak.** 1999. Temporal and spatial characteristics of urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric Environment* 33: 3885-3895.
- Kolokotroni, M., R. Girdharan.** 2008. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, volume 82: 986-998.
- Landsberg, H.** 1981. *The Urban Climate*. Academic Press: New York.
- Lowry, W.** 1977. Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology* 36: 1377-1391
- Oke, T.R.** 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 108: 1-24.
- Oke, T.R.** 1987. *Boundary Layer Climates*. Segunda Edición. London, Routledge.
- Oke, T.R.** 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In *Wind Climate in Cities*. Cermak J.E. (ed). Kluwer-Academic Publ. Norwell.
- Peña, M. y H. Romero.** 2006. Relación espacial y estadística entre las islas de calor de superficie, coberturas vegetales, reflectividad y contenido de humedad del suelo, en la ciudad de Santiago y su entorno rural. *Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas* 2005. Santiago de Chile, 2006: 107-117.
- Peña, M.** 2008. Relationships between remotely sensed surface parameters associated with the urban heat sink formation in Santiago, Chile. *International Journal of Remote Sensing*, 29:15 4385-4404.
- Romero, H. y J. Vinagre.** 1985. Topoclimatología de la cuenca del río Mapocho. *Revista Informaciones Geográficas* 32:3-30.
- Romero, H. y P. Sarricolea.** 2006. Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor de superficie. En *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Editado por J.M. Cuadrat, M.A. Saz, S.M. Vicente, S. Lanjeri, M. de Luis Arrillaga y J.C. González-Hidalgo. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A N°5 pp.827-837.
- Sarricolea, P. y H. Romero.** 2006. Cambios de uso y coberturas del suelo entre 1998 y 2004 y sus efectos sobre la configuración de la isla de calor urbana de superficie de Santiago. *Anales de la Sociedad chilena de ciencias geográficas* 2006. Págs. 207-210.
- Sarricolea, P.** 2008. Análisis de la sustentabilidad del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago y sus efectos sobre la configuración de las temperaturas superficiales. Tesis para optar al grado de magíster en geografía con mención en recursos territoriales. Universidad de Chile. pp. 122.
- Sarricolea, P., E. Aliste, P. Castro, C. Escobedo.** 2008. Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología* 8: 71-84.
- Yagüe, C., E. Zurita, A. Martínez.** 1991. Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment*, 25B:327-332.
- Yamashita, S., K. Sekine, M. Shoda, K. Yamashita, Y. Hara.** 1986. On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan. *Atmospheric Environment* 20: 681-686.
- Yuan, F., M. Bauer.** 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 106: 375-386.



SCTV

BARCELONA 2009