



La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes: El caso del área metropolitana de Santiago

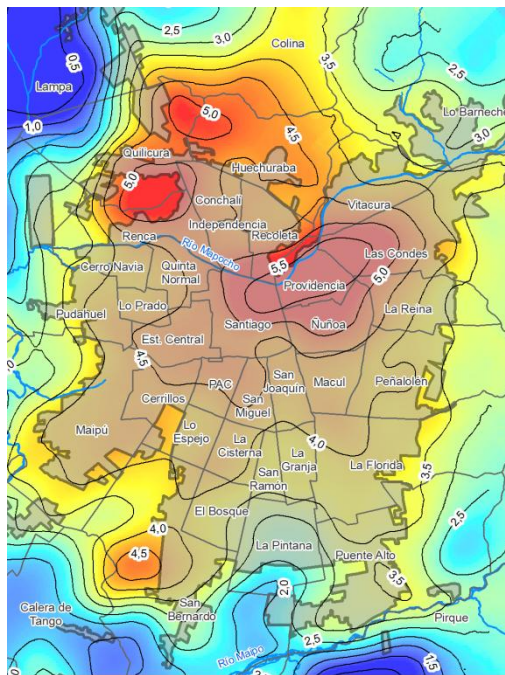
Pablo Sarricolea Espinoza

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes: El caso del área metropolitana de Santiago



Memoria presentada por
Pablo Sarricolea Espinoza
para optar al grado de Doctor

Director de tesis: Dr. Javier Martín-Vide

Barcelona-España, Julio 2012

Capítulo 3

La Isla de Calor Urbana
del AMS a partir de
diferencias térmicas de los
observatorios de Talagante
y Cerrillos

LA ISLA DE CALOR URBANA DEL AMS A PARTIR DE DIFERENCIAS TÉRMICAS DE LOS OBSERVATORIOS DE TALAGANTE Y CERRILLOS

3.1. Resumen

Se analiza, a partir de los registros de temperatura de dos observatorios meteorológicos, la intensidad de la isla de calor urbana de Santiago para el año 2010, y a una resolución horaria, mensual y estacional. El objetivo es conocer la hora en que la isla de calor urbana (ICU) se manifiesta con mayor intensidad, así como también la estación del año en que se alcanzan mayores diferencias entre la temperatura de la ciudad y la del ámbito rural. Con ello, finalmente se modela la intensidad de la ICU con un conjunto de parámetros meteorológicos, los cuales permiten predecir sus valores. Los resultados indican que la ICU en promedio es más intensa en verano y primavera, siendo el invierno la estación de menor intensidad. El máximo desarrollo de la ICU se consigue a medianoche (0:00 a. m.), con diferencias medias de temperatura de entre 2,8°C y 4,8°C. La máxima anomalía térmica a nivel estacional se alzó por encima de los 9°C, tanto en verano como en primavera. Las variables explicativas de la ICU fueron la nubosidad, la humedad relativa y la presión atmosférica, quedando la variable velocidad del viento excluida del modelo. Los niveles de explicación de la varianza están entre el 41% en invierno y el 74% en otoño. El cambio de condición despejada a cubierta implica una disminución de 1,33°C a la intensidad de la isla de calor, mientras que un aumento en un 50% de la humedad relativa reduce la ICU en más de 5,6°C. Destaca también la relación positiva entre la presión atmosférica y la intensidad de la ICU. Como conclusión, se puede señalar que, en general, es posible generar un sistema de pronóstico de la ICU mediante la obtención de los valores de humedad relativa, la presión atmosférica y la nubosidad, desde las predicciones sinópticas y meso-escalares.

3.2. *Introducción*

La ICU es un fenómeno que se ha estudiado de diversas maneras en función del desarrollo de la técnica. No obstante, la diversidad de herramientas y técnicas que han aparecido, en especial a partir del último tercio del siglo XX, no son sustitutorias de los «métodos tradicionales», sino más bien complementarias. En este sentido, una estrategia aún vigente para establecer la intensidad de la isla de calor urbana corresponde a la estimación de las diferencias termométricas de al menos dos observatorios, uno rural y otro urbano, los cuales deben cumplir las condiciones descritas por Lowry (1977), referidas a que los observatorios posean una localización comparable en términos geográficos y de Climatología regional, para así estimar el efecto urbano.

Las reglas establecidas por Lowry (1977) corresponden a condiciones mínimas en los estudios de la ICU, y particularmente, permiten establecer el efecto urbano, y así conocer la máxima intensidad de ella. Cabe destacar que, recientemente, Memon *et al.* (2008) han realizado una compilación de las últimas investigaciones de ICU. En dicho trabajo se recogen, entre otros, los estudios realizados con observatorios meteorológicos, destacando los casos de Fairbanks en Alaska, la cual presenta intensidades de hasta 1°C (Magee *et al.*, 1999), de Korea con 3,4°C (Kim y Baik, 2005), de ciudad de México y New York con más de 5°C (Jauregui, 1997 y Gedzelman *et al.*, 2003), Hong Kong con 10,5°C (Memon *et al.*, 2008) y Łódź con unos 12°C (Klysik y Fortuniak, 1999). El único caso que ofrece intensidades negativas de la ICU es la ciudad de Granada de Nicaragua, con -2°C (Montávez *et al.*, 2000).

Además de establecer la máxima intensidad de la isla de calor urbana (MIICU¹), es muy importante conocer la época del año en que logra su máximo, ya sea verano, otoño, invierno o primavera. No obstante, las diferentes investigaciones realizadas hasta ahora no consiguen consenso. En su mayoría los autores señalan el invierno como la estación donde la ICU es mayor, debido al uso de calefacción y, por ende, aporte de calor antropogénico al balance radiativo (Moreno, 1993; Montávez *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2007). Pero algunos indican que la ICU es más intensa en verano (Eliasson, 1994; Klysik y Fortuniak, 1999; Kolokotroni y Giridharan, 2008) y en otoño (Alonso *et al.*, 2003). También ciertas ciudades presentan bi-estacionalidad de la máxima intensidad de la ICU: estaciones de otoño-verano (Yagüe *et al.*, 1991; Gedzelman *et al.*, 2003) y otoño-invierno (Kim y Baik, 2002). Esto demuestra que es muy difícil establecer una pauta global respecto a la estacionalidad de la máxima intensidad de la isla de calor, y que ella dependerá de las condiciones propias de la localización geográfica del emplazamiento de la ciudad, su entorno y su clima (Sarricolea *et al.*, 2008).

Para la ciudad de Santiago de Chile, los primeros estudios de la ICU fueron llevados a cabo por Aceituno y Ulriksen (1981) y luego por Salinas (1982), todos ellos parte de la misma investigación, que, realizando transectos térmicos nocturnos con automóvil, detectaron diferencias de 3°C a 4°C e incluso de más de 10°C entre el centro y el entorno suburbano. Dos décadas más tarde se realizaron nuevos transectos por otro equipo de investigadores de la Universidad de Chile, y los resultados obtenidos por Molina (2007) fueron similares a los de décadas pasadas, pero esta vez se realizaron transectos en tres momentos del día (10:30 a. m., 14:30 p. m. y 22:30 p. m.), y se correlacionaron con usos de suelo. No obstante, ninguna investigación realizada para el AMS ha establecido la máxima intensidad del fenómeno, tanto en mes, hora, estación del año y condición

¹ Típicamente la máxima intensidad de la isla de calor como hemos mencionado en el capítulo 2 se manifiesta luego de la puesta de sol, con cielo despejado y vientos débiles.

sinóptica. Por lo tanto, este capítulo tiene como propósito dar respuesta, con la información de dos observatorios, a dichos interrogantes. Además, se espera construir un modelo que explique mediante variables meteorológicas la mayor intensidad de la isla de calor.

3.3. Materiales y métodos

Se han obtenido los datos oficiales de los observatorios de Cerrillos y Talagante para el año 2010. Ambas estaciones pertenecen al sistema nacional de información de calidad de aire del gobierno de Chile. Se considera que, dichos observatorios, son los que mejor se adecúan a los criterios de Lowry (1977). Además, los datos poseen una resolución horaria de las temperaturas, por lo cual permiten establecer la máxima intensidad de la isla de calor.

Metodológicamente, la consideración de sólo un año no es común en Climatología, pues es recomendable una serie de 30 años. No obstante, en estudios de Climatología urbana se admite que un año posee significación climática, pues el efecto urbano es un fenómeno de carácter estructural y no coyuntural. Además, tampoco se pudo contar con una serie larga, pues el observatorio de Talagante sólo está vigente desde fines de 2009. La figura 3.1 muestra la localización de ambas estaciones.

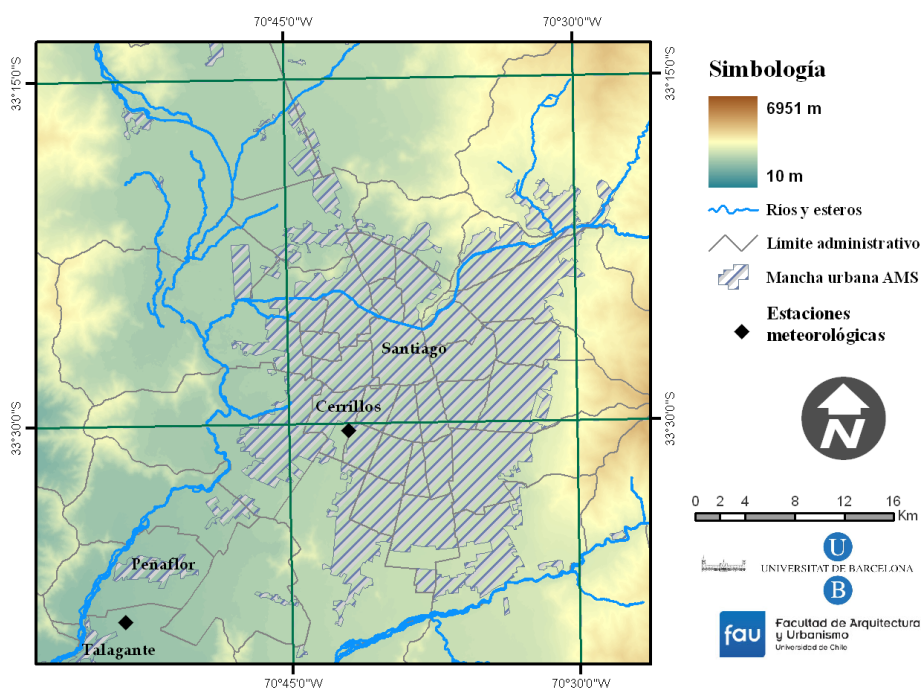


Figura 3.1. Mapa de localización de las estaciones meteorológicas.

La estación de Cerrillos y Talagante están a una altitud de 540 y 430 m.s.n.m respectivamente, y distan entre sí un total de 24 km. Ambas estaciones representan el clima urbano y el del entorno rural de Santiago, respectivamente. En total se procesaron 8.760 pares de datos, y para estimar la intensidad de la isla de calor se utilizó la siguiente expresión:

$$\Delta t = t_U - t_R$$

Dónde Δt representa la intensidad de la isla de calor urbana para distintas horas del día, siendo t_U la temperatura medida en la estación meteorológica de Cerrillos y t_R la correspondiente temperatura registrada en la estación de Talagante. Los valores, además de a resolución horaria, han sido agregados a resolución diaria, mensual y estacional. Para determinar la máxima intensidad de la ICU se procedió a seleccionar los máximos valores de Δt en el año 2010, para cada mes y estación, además de la franja horaria donde las diferencias fueron más

importantes. Con el propósito de categorizar las intensidades de la ICU se utilizó la propuesta de Fernández (1996) aplicada a la ciudad de Madrid, es decir:

- ICU débil, que es aquella que no supera los 2°C,
- ICU moderada, que registra entre 2 y 4°C,
- ICU fuerte, que alcanza entre 4 y 6°C, y
- ICU muy fuerte, la que sobrepasa los 6°C.

Cabe destacar que la información clasificada fue luego analizada en función de los tipos de tiempo, calculados mediante el método automático de Jenkinson y Collison. Con ello, fue posible conocer la relación entre los tipos de tiempo y las intensidades de la isla de calor. La clasificación de Jenkinson y Collison fue obtenida a partir de Sarricolea *et al.* (2011), que realizaron la clasificación de todos los días en Chile central desde 1950 hasta 2010.

Para la modelación de la ICU se optó por incorporar las variables de **día de la semana** con valores de 0 a 6 (0 representa al domingo, 1 al día lunes y así hasta el sábado con un número 6), **nubosidad en Octas** (0 a 8), **humedad relativa del aire** (en porcentaje), **velocidad del viento** (m/s), **horas de sol** (horas día) y **presión atmosférica** (hPa reducidos al nivel del mar), tal como se muestra en la figura 3.2. Además se modeló para cada una de las estaciones del año.



Figura 3.2. Variables que componen la modelación de la isla de calor urbana del AMS.

3.4. Resultados

En primer lugar se analizó si Cerrillos y Talagante son comparables desde el punto de vista estadístico. La tabla 3.1 muestra que, en efecto, los valores son significativamente diferentes en cuanto a sus valores de tendencia central, variabilidad y distribución (de asimetría positiva y de forma mesocúrtica). Cabe destacar que las temperaturas mínimas urbanas son mayores a las rurales en casi 2°C, mientras que las máximas temperaturas se alcanzan en las áreas rurales. Esto demuestra que la ciudad posee menor amplitud térmica por el efecto de isla de calor, lo cual queda reflejado en los 6°C de diferencia del rango. Adicionalmente, el promedio térmico de la ciudad es casi 3°C más alto que en el área rural, lo cual posee fuertes repercusiones en la suma de grados día.

Tabla 3.1. Resumen estadístico anual de la temperatura de las estaciones de Cerrillos y Talagante.

Resumen estadístico	Cerrillos	Talagante
Media (°C)	15,96	13,19
Varianza	46,36	52,43
Desviación típica	6,81	7,24
Mínimo (°C)	0,73	-3,33
Máximo (°C)	35,49	37,58
Rango	34,76	40,91
Asimetría tipificada	13,54	21,67
Asimetría	0,36	0,58
Curtosis	-0,54	-0,28
Curtosis tipificada	-10,12	-5,23

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.3 se muestra que la temperatura media de Talagante es menor que en Cerrillos. No obstante, las temperaturas mínimas y máximas son más extremas en Talagante. Ello, se podría atribuir al efecto isla de calor en Cerrillos, pues se aprecia una disminución de la amplitud térmica absoluta.

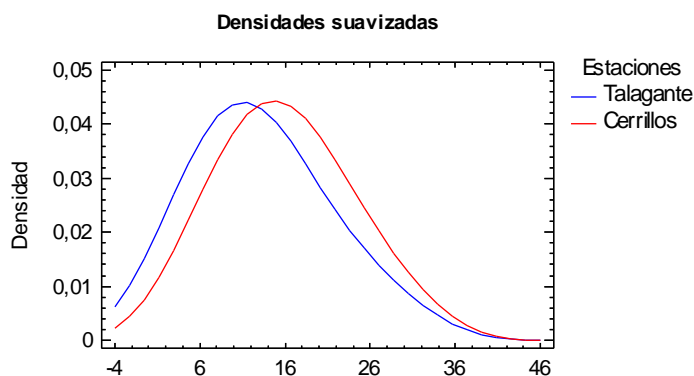


Figura 3.3. Densidades suavizadas de las temperaturas medias diarias de Talagante y Cerrillos durante el año 2010.

Ahora bien, luego de calcular $\Delta t = t_U - t_R$ se observa el comportamiento de las diferencias de temperatura entre Cerrillos y Talagante. En primer lugar, la isla de calor urbana promedio (ver figura 3.4) es mayor en la medianoche (0:00 a. m.) y más intensa en el verano, con diferencias medias de 4,8°C, seguida de primavera

con 4,4°C, otoño con 3,8°C y finalmente invierno con 2,8°C. Además, la diferencia de temperatura disminuye en el período diurno hasta ser negativa, pero sólo en primavera (con -0,3°C), y a las 13:00 p. m. Visto de otro modo, la ciudad de Santiago pasado el mediodía comienza a calentarse respecto a su entorno rural, alcanzando la máxima diferencia a medianoche; luego las diferencias comienzan a decaer. Dicho ciclo diario da origen a la isla de calor urbana nocturna.

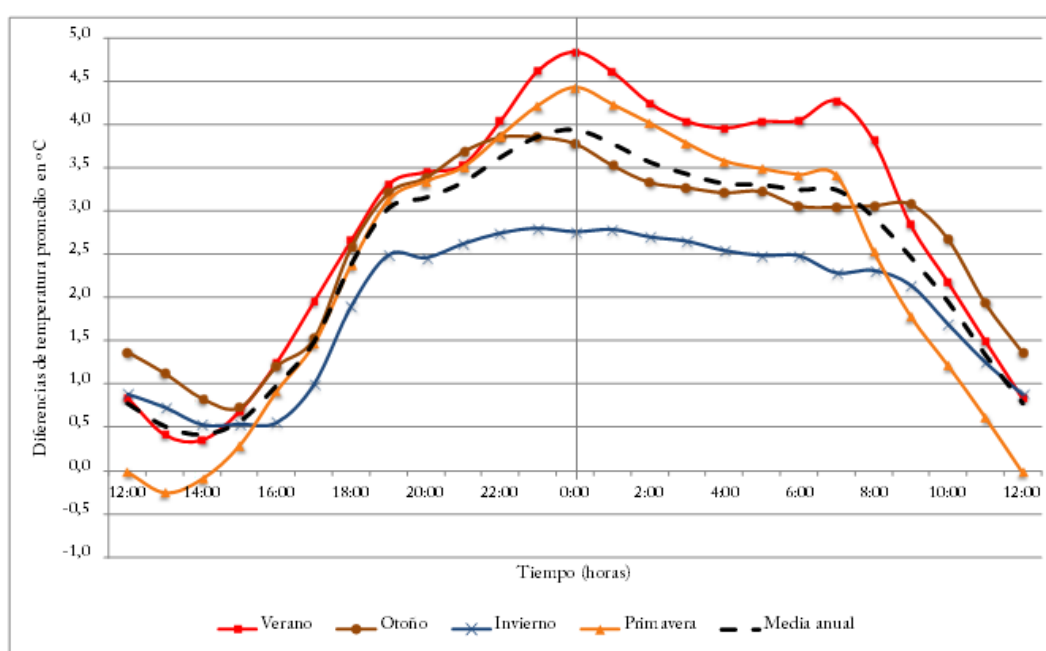


Figura 3.4. Intensidad promedio de la isla de calor de AMS según estaciones del año 2010.

Como se aprecia en la figura 3.4, la máxima isla de calor se alcanza entre las 22:00 p. m. y las 01:00 a. m. Se decide también graficar las diferencias máximas absolutas de temperatura, y así conocer la MIICU del área metropolitana de Santiago. En la figura 3.5 se observa que los valores absolutos más elevados corresponden a la primavera y el verano (9,6° y 9,4°C), seguidos de otoño con 8,5°C. En el invierno la MIICU se consigue a las 23:00 p. m. y con sólo 7,3°C.

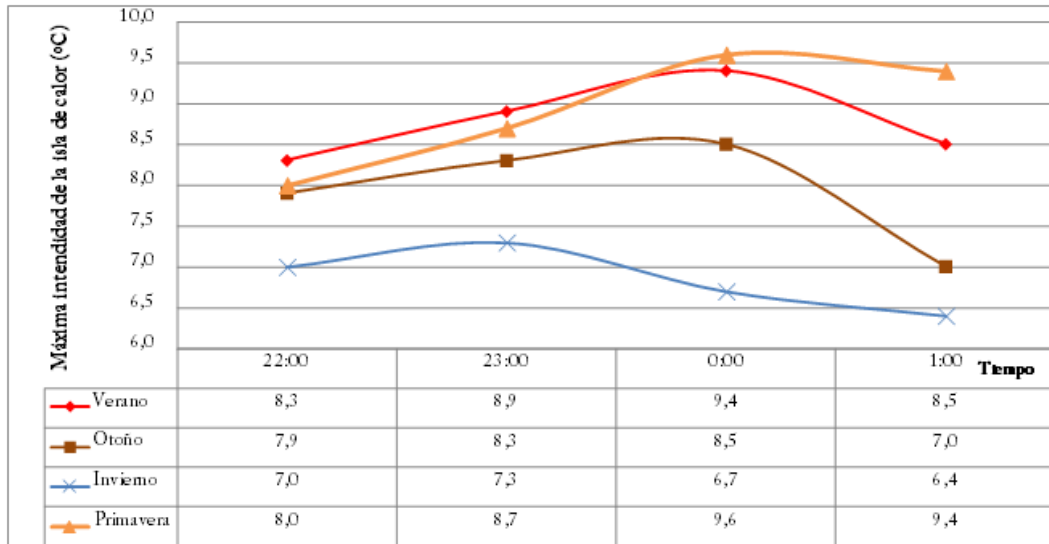


Figura 3.5. Máxima intensidad de la isla de calor de AMS según estaciones del año 2010.

Respecto a la máxima intensidad de la isla de calor se estableció la distribución que mejor ajusta a la muestra. Se realizaron pruebas con la distribución Normal, Log-normal, Gamma, Erlang y Weibull (ver figura 3.6). Los test de hipótesis que fueron calculados demuestran que la distribución que mejor ajusta a los valores de temperatura de la isla de calor es la Weibull, con parámetros de forma y escala de 2,4 y 4,8 respectivamente. El test de Kolmogorov-Smirnov indica una distancia máxima de 0,0259 entre la distribución acumulada de los valores de la ICU y la función de distribución. Dado que p -value más pequeño de los test realizados es inferior o igual a 0,10 no podemos rechazar que a la ICU le corresponda una distribución Weibull con un nivel de confianza de al menos un 90%.

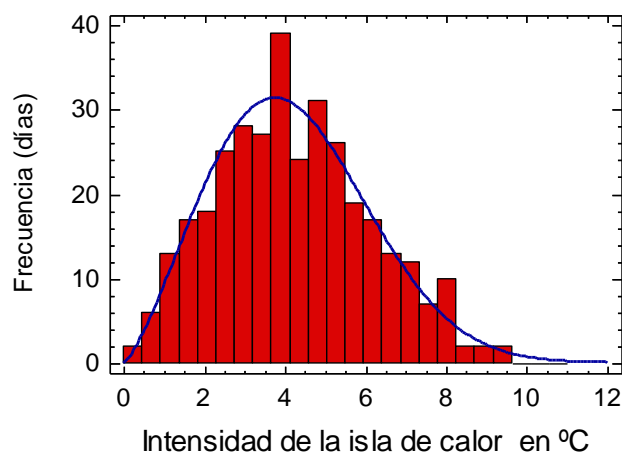


Figura 3.6. Histograma de la intensidad de la ICU para el año 2010.

Además, se consideró relevante graficar las intensidades de la isla de calor según las categorías de Fernández (1996). En la figura 3.7 se aprecia que son los meses de verano los que agrupan más días de intensidades muy fuertes, destacando el mes de enero con 14 días. Se puede señalar que la distribución sumada de días de intensidad débil y moderada es unimodal y con máximos en los meses de junio y agosto, mientras que los días con situaciones de isla de calor muy fuerte y fuerte poseen la misma distribución, pero centrada en verano.

La Isla de Calor Urbana del AMS a partir de diferencias
térmicas de los observatorios de Talagante y Cerrillos

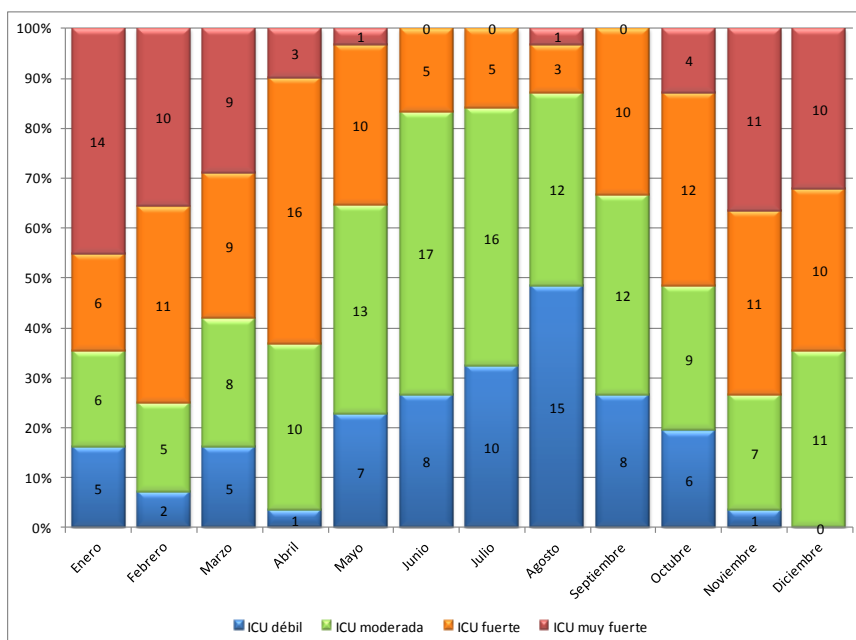


Figura 3.7. Número y porcentaje de días según meses y categorías de isla de calor urbana del año 2010

De la figura anterior se contabilizan en total, 63 días en los que se alcanzan intensidades superiores a 6°C. De ellos, 34 se presentaron en verano, 20 en primavera, 8 en otoño y 1 en invierno, tal como muestran la tabla 3.2 y la figura 3.8a.

Tabla 3.2. Días en que la ICU supera 6°C según estación del año y tipos sinópticos de Jenkinson y Collison (J&C)².

J&C	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Total
Anticiclónico (A)	5	1	1	2	9
Anticiclónico del Sureste (ASE)	1	0	0	1	2

² La Clasificación de Jenkinson y Collison, corresponde a un método automático y objetivo para establecer los tipos de circulación atmosférica de un lugar a una escala sinóptica. Posee 27 categorías, 1 anticiclónico, 1 ciclónico, 8 advectionales o direccionales puros, 16 híbridos (8 anticiclónicos advectionales y 8 ciclónicos advectionales) y un indeterminado.

J&C	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Total
Anticiclónico del Sur (AS)	9	0	0	6	15
Anticiclónico del Oeste (AW)	1	0	0	0	1
Ciclónico (C)	0	2	0	0	2
Ciclónico de del Sureste (CSE)	2	1	0	2	5
Adveectivo del Sureste (SE)	7	3	0	4	14
Adveectivo del Sur (S)	9	1	0	5	15
Total	34	8	1	20	63

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las configuraciones sinópticas para los días de isla de calor urbana muy fuerte (ver tabla 3.2 y figura 3.8b), se puede apreciar un predominio de las situaciones anticiclónicas y con advección de viento del sur y sureste, sumando un 87% de los casos; mientras que los días C, CSE y AW alcanzan una escasa representación.

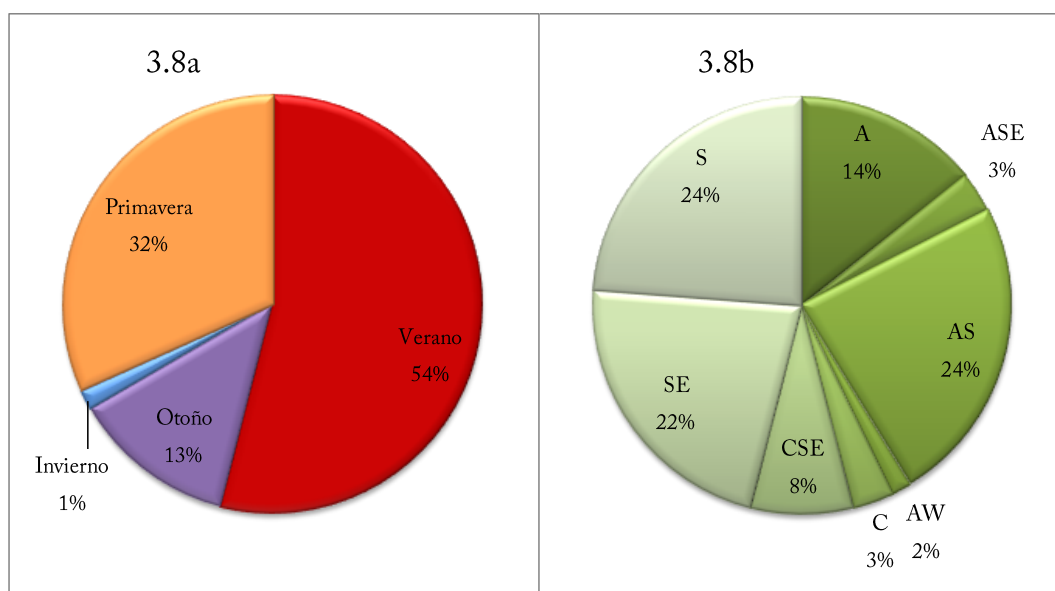


Figura 3.8. Total porcentual en que la ICU supera 6°C según estación del año (izquierda) y tipos Jenkinson Collison (derecha).

Ulteriormente, se realizó la modelación de la isla de calor urbana del AMS considerando las variables señaladas en la metodología de este capítulo, las cuales responden en general a parámetros meteorológicos, a saber: **nubosidad en octas, presión atmosférica, humedad relativa del aire, velocidad del viento, horas de sol y día de la semana**. Ellas fueron correlacionadas con la temperatura de cada uno de los días del año 2010 mediante un modelo de regresión múltiple por pasos sucesivos y de eliminación progresiva. Se realizó un modelo general y uno para cada estación climática: verano, otoño, invierno y primavera.

Al aplicar el modelo general para todo el año, se aprecia que las variables estadísticamente significativas en el modelo de regresión múltiple, con un *p-value* menor de 0,05, es decir, significativas con un nivel de confianza del 95%, son la nubosidad, la humedad relativa y la presión atmosférica.

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica un 61,05% de la varianza de la intensidad de la isla de calor urbana. El R^2 ajustado, que es más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es de un 60,43%, es decir, indica un coeficiente de correlación de Pearson de 0,78. El error estándar de la ecuación final para la estimación de la ICU muestra que la desviación estándar de los residuos es de sólo un 1,11. El error absoluto medio (MAE) es de 0,90, y se corresponde con el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW)³ indica que dado que el *p-value* es menor que 0,05, no hay indicios de una autocorrelación serial en los residuos, y ello, con un nivel de confianza del 95%. En la tabla 3.3 se observa la estimación de la ecuación final.

³ DW examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el cual se presentan los datos.

Tabla 3.3. Resultado del modelo general de regresión múltiple de la ICU

Variables	Estimación de la ecuación	Error estándar	Estadístico T	<i>p-value</i>
Constante	-36,5007	15,742	-2,3187	0,02
Nubosidad	-0,0667	0,0399	-1,6701	0,04
Humedad relativa	-0,0938	0,0069	-13,4674	0,00
Presión atmosférica	0,0461	0,0156	2,9576	0,00

Fuente: Elaboración propia

Para determinar si el modelo podía ser simplificado, se examinó la tabla 3.3. En ella se muestra que el *p-value* más alto de las variables independientes es de 0,04, y corresponde a la nubosidad. Puesto que el *p-value* es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%. Consecuentemente, no se debería eliminar ninguna variable del modelo, que genera la siguiente expresión.

$$ICU = -36,5007 - 0,0667 \times Nubosidad_{octas} - 0,0938 \times Humedad\ relativa_{\%} + 0,0461 \times Presión\ atmosférica_{hPa}$$

El análisis de las distintas estaciones climáticas sitúa al invierno con el menor R^2 , alcanzando un 41,33%, mientras que verano y primavera poseen un R^2 de 63,55% y 43,46%, respectivamente. La estación del año con el mayor valor del coeficiente de determinación es otoño con un 74,01%. A continuación, se presentan las ecuaciones que consideran las tres variables para cada estación.

$$ICU_{verano} = -193,88 - 0,0143 \times Nubosidad_{octas} - 0,1125 \times Humedad\ relativa_{\%} + 0,2026 \times Presión\ atmosférica_{hPa}$$

$$ICU_{otoño} = -103,81 - 0,1663 \times Nubosidad_{octas} - 0,0529 \times Humedad\ relativa_{\%} + 0,1096 \times Presión\ atmosférica_{hPa}$$

$$ICU_{invierno} = -56,62 - 0,0011 \times Nubosidad_{octas} - 0,0747 \times Humedad\ relativa_{\%} + 0,0640 \\ \times Presión\ atmosférica_{hPa}$$

$$ICU_{primavera} = -44,93 - 0,0084 \times Nubosidad_{octas} - 0,0886 \times Humedad\ relativa_{\%} \\ + 0,0539 \times Presión\ atmosférica_{hPa}$$

En las ecuaciones anteriores queda clara la relación inversa entre intensidad de la isla de calor y las variables nubosidad y humedad relativa, al igual que la relación positiva entre presión atmosférica e ICU. Con los resultados se puede ver la sensibilidad de la intensidad de la ICU a los cambios en las variables meteorológicas del modelo, que se puede apreciar en la tabla 3.4. En dicha tabla se observa que la nubosidad disminuya la IICU anual, tal como en el resto de las estaciones, siendo la estación de otoño la más afectada por el cielo cubierto, mientras que invierno es la estación menos sensible. Así por ejemplo, en otoño un cielo cubierto implica una disminución de $-1,33^{\circ}\text{C}$ y en invierno de sólo $-0,01^{\circ}\text{C}$. La variable más importante y sensible a los cambios es sin duda la humedad relativa, pues su aumento en 50% implica una disminución de la intensidad de la ICU entre $2,7^{\circ}\text{C}$ y $5,62^{\circ}\text{C}$. La presión atmosférica también tiene impactos en la temperatura urbana, sobre todo en verano, pues la acentuación de un anticiclón en 20 hPa implica un aumento de la IICU de hasta $4,05^{\circ}\text{C}$ en verano.

Tabla 3.4. Respuesta o sensibilidad de los cambios en las variables de los modelos de la Intensidad de la Isla de Calor Urbana del AMS.

Variabes del modelo de regresión múltiple	Δ ICU de verano en °C	Δ ICU de otoño en °C	Δ ICU de invierno en °C	Δ ICU de primavera en °C	Δ ICU anual en °C
Cambio desde condición despejada a cubierto (0 a 8 octas)	↘ -0,11	↘ -1,33	↘ -0,01	↘ -0,07	↘ -0,53
Aumento de la humedad relativa en un 50%	↘ -5,62	↘ -2,65	↘ -3,74	↘ -4,43	↘ -4,69
Aumento de la presión atmosférica en 20 hPa (desde 1013 hPa)	↗ 4,05	↗ 2,19	↗ 1,28	↗ 1,08	↗ 0,92

Fuente: Elaboración propia

3.5. Discusión

Los resultados indican que la isla de calor de AMS en promedio es más intensa en verano. Esto es bastante llamativo, pues en general se considera invierno como la estación de mayor desarrollo de la ICU. No obstante, esto no es atípico, pues hay evidencias en otras ciudades de mayor intensidad en verano (Eliasson, 1994; Klysiak y Fortuniak, 1999; Kolokotroni y Giridharan, 2008), e incluso la ciudad de Rancagua, localizada a 87 km de Santiago de Chile, también tiene al verano como la estación de mayor intensidad de la isla de calor (Sarricolea *et al.*, 2008). En contraparte, es el invierno la estación que presenta una menor magnitud de la isla de calor, lo cual permite plantear hipótesis de las causas, por ejemplo:

- La escasa radiación solar en las áreas urbanas en invierno, por causa del entramado de edificios y sombras, y el Sol bajo, no permite una suficiente acumulación de calor para ser liberado durante la noche.

- La zona más densamente construida está destinada a usos de oficinas y comercio, por lo cual, la utilización de calefacción en ella durante la noche no es tan alto como en otros sectores.
- La anulación de la isla de calor por brisas de montaña e inversión térmica de carácter radiativo, lo cual provoca a veces una periferia con temperaturas similares a las de la ciudad durante la noche.

La máxima intensidad de la isla de calor llega a 9,6°C en primavera, 9,4°C en verano; y 8,5°C y 7,3°C en otoño e invierno, respectivamente. Según Oke (1973) es de esperar por los montos de población de Santiago (6 millones de habitantes) que la ICU pueda alcanzar entre 9,6°C y 13,6°C, dependiendo de si su morfología urbana es más similar a las ciudades de Europa o de Norteamérica, tal como sugiere la figura 3.9, donde se ha situado a Santiago de Chile. Sin duda, los resultados muestran que el AMS posee una isla de calor que ajusta más a una ciudad europea, lo cual es consistente con el origen de las ciudades coloniales de América Latina, pero contradictorio con el actual modelo de ciudad dispersa que se ha instalado en nuestra capital.

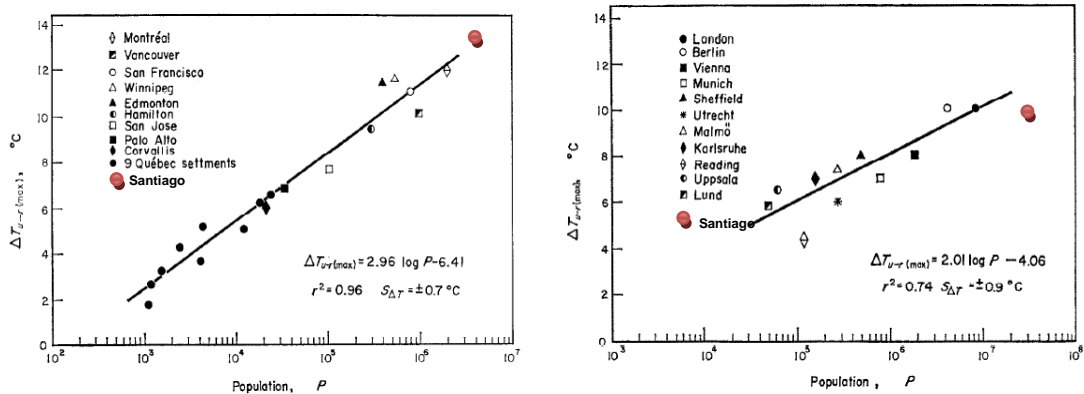


Figura 3.9. Máxima intensidad pronosticada para la ICU de Santiago según el tipo de ciudad y sus montos de población. Fuente: Oke, 1973.

La clasificación de Fernández (1996) referida a categorías de intensidades de la ICU confirman al verano como la estación con mayor frecuencia de situaciones de isla de calor que supera el umbral de 6°C. Y durante el año, los días de ICU muy fuerte están relacionados con situaciones de tiempo anticiclónico y advectivo. No obstante, hay días con una configuración sinóptica de carácter ciclónico que poseen ICU muy fuerte, lo cual merece ser estudiando, a pesar de su baja representación.

El conocimiento de las variables más influyentes sobre la intensidad de la isla de calor urbana ha sido un asunto de permanente interés de la investigación en Climatología urbana, y cada vez se poseen más herramientas estadísticas que permiten realizar mejores y complejos análisis que consideran un amplio conjunto de variables. No obstante, para estudios con dos observatorios, las variables clásicamente utilizadas han sido la presión atmosférica, las configuraciones sinópticas, la nubosidad, el viento y la humedad relativa. Para el caso del AMS se establece que sólo tres de ellas son significativas en explicar estadísticamente la ICU, y con valores del coeficiente de determinación en general moderados (R^2 entre 41,33% y 74,01%), pero con *p-value* que permite decir que los valores son significativos al 95%.

3.6. Bibliografía

Aceituno, P., & Ulriksen, P. (1981). Efecto de Isla Calórica en Santiago. Resultados preliminares. *Tralka*, 2 (1), 39-56.

Alonso, M., Labajo, J., & Fidalgo, M. (2003). Characteristics of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain. *Atmósfera*, 137-148.

Eliasson, I. (1994). Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography* (15), 1-22.

Fernández, F. (1996). *Manual de Climatología aplicada*. Madrid, España: Editorial Síntesis S.A.

Gedzelman, S., Austin, S., Cermak, R., Stefano, N., Partridge, S., Quesenberry, S., et al. (2003). Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theor. Appl. Climatol* (75), 29-42.

Jáuregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31, 3821-3831.

Kim, Y., & Baik, J. (2002). Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology* (41), 651-659.

Klysik, K., & Fortuniak, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of urban heat island of Łódz, Poland. *Atmospheric Environment* (33), 3885-3895.

Kolokotroni, M., & Giridharan, R. (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* (82), 986-998.

Lowry, W. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology* (36), 1377-1391.

Lui, W., Ji, C., Zhong, J., Jiang, X., & Zheng, Z. (2007). Temporal characteristics of the Beijing urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 213-221.

Magee, N., Curtis, J., & Wendler, G. (1999). The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*, 64, 39-47.

Memon, R., Leung, Y., & Chunho, L. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* (20), 120-128.

Molina, M. (2007). *Efectos de los tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área metropolitana de Santiago sobre la generación y comportamiento de micro islas de calor*. Memoria de título geografía, Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Santiago.

Montávez, J., Rodríguez, A., & Jiménez, J. (2000). A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology*, 20, 899-911.

Moreno, M. (1993). *Estudio del clima urbano de Barcelona: la isla de calor*. Vilassar de Mar: Oikos-tau.

Oke, T. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (7), 769-779.

Salinas, F. (1982). *Estudio experimental del efecto de isla calórica en la ciudad de Santiago*. Santiago: Memoria para optar al Título de ingeniero civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Inédita.

Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., & Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología* (8), 71-84.

Sarricolea, P., Meseguer, O., & Martín-Vide, J. (2011). Aplicación de la clasificación automática de Jenkinson y Collison a Chile Central. *Conferencia Geográfica Regional de la Unión Geográfica Internacional (UGI)*, (p. 10). Santiago.

Yagüe, C., Zurita, E., & Martínez, A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment*, B (25), 327-332.