



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

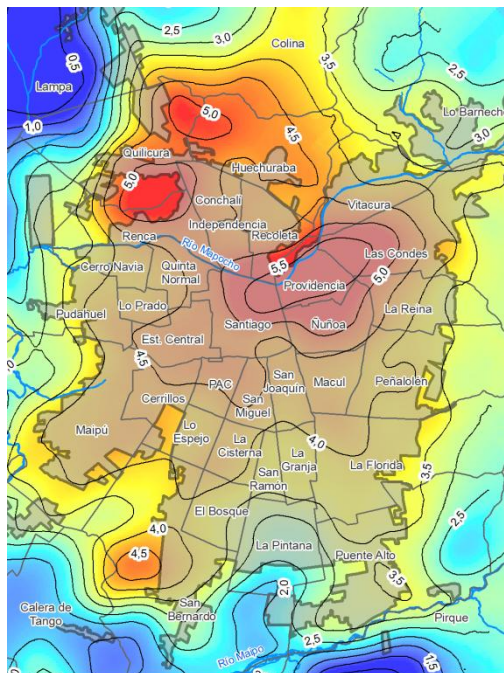
Pablo Sarricolea Espinoza

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 6

Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la Tesis. Se enumeran siguiendo el orden de los capítulos, y se valora en qué medida responden a las hipótesis de trabajo. Finalmente, se muestran las conclusiones principales y las consideraciones finales.

6.1. Capítulo 1

La ciudad de Santiago no debe seguir creciendo de modo extensivo tal como lo ha hecho en los últimos años. Ello, fundamentalmente, por las repercusiones ambientales que provoca y los altos costos sociales que conlleva. Un claro ejemplo es el elevado consumo de suelos de buena calidad para residencias en parcelas de agrado y urbanizaciones dispersas, que conlleva el uso del transporte privado por parte de los hogares de clases medias y altas, y, a la vez, largos viajes en transporte público para las familias de clases de bajos ingresos.

Es muy evidente que la urbanización altera significativamente el clima local, y que uno de sus rasgos más distintivos es la isla de calor urbana. No obstante, se debe tener muy en cuenta todos los impactos ambientales que la ciudad provoca. Es decir, hay que investigar los efectos sobre los distintos elementos climáticos, y no sólo la temperatura a la hora de realizar los estudios de impacto ambiental de las ciudades.

En los últimos 56 años, ha aumentado 1°C la temperatura media de las máximas y en 0,83°C la media de las mínimas en la ciudad de Santiago. Estas tendencias reflejan en alguna medida el calentamiento global, pero una parte importante es producto del efecto de la isla de calor urbana. Por consiguiente, se debe tomar conciencia que, si a nivel local afectamos las temperaturas, debemos mejorar la manera de planificar nuestras ciudades. En el caso de Santiago, se debe

atender a las causas de dichos aumentos térmicos, y a partir de ello, proponer medidas de mitigación y correctoras.

6.2. Capítulo 2

La evolución histórica de la Climatología urbana ha tenido dos momentos fundamentales en su desarrollo científico. La creación de los instrumentos meteorológicos, a finales del siglo XVI, y la aparición de la teledetección dotada de radiómetros infrarrojos, a mediados del siglo XX. Actualmente, los estudios aprovechan ambas fuentes de información para analizar la isla de calor. En el caso de ciudades grandes, que no cuentan con una densa red de estaciones meteorológicas, y que para realizar transectos se necesitan varios vehículos, el método de mayor factibilidad y con los mejores resultados es la teledetección.

No obstante, se estima que se debe implementar una red de estaciones meteorológicas para el Área Metropolitana de Santiago (AMS), pues ella permitiría, además, mejorar el sistema de predicción de alertas ambientales por contaminación del aire. También facilitaría el realizar estudios comparativos entre la isla de calor urbana del aire y superficial.

En relación a la planificación urbana, se debe aumentar el conocimiento del clima urbano, dado que hoy tiene una escasa importancia en el momento de decidir urbanizar. Por lo tanto, a modo de autocrítica a la disciplina, se debe dotar a los planificadores de un mayor y sólido conocimiento de los impactos de la ciudad en el clima, ya sea mediante trabajo interdisciplinario, como la implementación de instrumentos vinculantes que obliguen a su consideración.

6.3. Capítulo 3

La isla de calor urbana tendrá una mayor magnitud unas pocas horas después de la puesta de Sol, y en aquellos días de calma, cielo despejado y circulación anticiclónica.

Hipótesis confirmada parcialmente.

El análisis de la isla de calor urbana de Santiago mediante dos observatorios meteorológicos durante el año 2010 muestra que su máxima intensidad se manifiesta a medianoche (entre las 23:00 p.m. y las 00:00 a.m.), y con valores que sitúan al verano y la primavera como las estaciones de mayor intensidad del fenómeno. A partir de las 16:00 p.m. la ciudad aparece claramente más cálida que su entorno rural, aumentando la diferencia hasta las 18:00 p.m., y manteniéndose luego hasta las 20:00 p.m., para luego seguir aumentando hasta las 23:00 p.m. en invierno y las 00:00 a.m. en el resto de las estaciones. En consecuencia, para el AMS la isla de calor se manifiesta más cerca de la medianoche que unas horas después de la puesta de Sol. Los días de calma, con cielo despejado y circulación anticiclónica son los que presentan una mayor intensidad de la isla de calor.

La isla de calor urbana del aire de Santiago debería alcanzar según su población una máxima intensidad comprendida entre 9,6°C y 13,6°C, dependiendo de su morfología urbana y el tipo de tiempo de Jenkinson y Collison (J&C). **Hipótesis confirmada parcialmente.**

La máxima intensidad de la isla de calor del aire de Santiago es algo menor a la que debería tener según los montos de población que posee. En efecto, llega a 9,6°C en primavera, 9,4°C en verano, 8,5°C en otoño y 7,3°C en invierno. Sin duda, el AMS posee una isla de calor que se asemeja 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. De seguir esta tendencia de urbanismo disperso, del tipo de Norteamérica, no se descarta una intensificación importante de la magnitud de la isla de calor.

Los tipos de tiempo de J&C son muy efectivos a la hora de entender y pronosticar la intensidad de la isla de calor. Según el método, de los 63 días de ICU muy intensa ($> 6^{\circ}\text{C}$), un alto porcentaje corresponde a situaciones de circulación anticiclónica. Esto confirma que las situaciones favorables para la ICU son aquellas de carácter anticiclónico. Destacan, además, los días con advección del sur.

Las variables meteorológicas que mejor explican la isla de calor urbana del aire (ICU) deberán ser la intensidad del viento, la nubosidad, la presión atmosférica, la humedad relativa, y, en segundo lugar, las horas de sol y el día de la semana. Hipótesis confirmada parcialmente.

Las variables explicativas más relevantes de la ICU en el AMS son la nubosidad, la humedad relativa y la presión atmosférica. La variable viento, pese a quedar excluida del modelo, es de gran importancia en otras ciudades. Sin embargo, puede que se haya subestimado en nuestro caso la importancia del viento al utilizar sólo una estación meteorológica, por lo que se sugiere seguir indagando en ella como variable explicativa.

Los niveles de explicación de la varianza oscilan entre el 41% en invierno y el 74% en otoño. Dado que para la estación de invierno los niveles de explicación son bajos, hay que seguir indagando en cuáles son las variables que explican mejor la ICU en dicha estación.

El cambio de condición de cielo despejado a cubierto implica una disminución de 1,33°C en la intensidad de la isla de calor, mientras que un aumento en un 50% de la humedad relativa reduce la ICU en 5,6°C. Por lo tanto, si se aumenta la humedad relativa del aire mediante áreas verdes se podría reducir la ICU.

Es posible y recomendable generar un sistema de pronóstico de la intensidad de la isla de calor urbana, a partir de la información de las predicciones sinópticas y meso-escalares, que proporcionan valores de humedad relativa, presión atmosférica y nubosidad, que han sido las variables seleccionadas por el modelo. A partir de ellas, se podrá prevenir a la población y anticiparse a problemas ligados a las olas de calor, especialmente en verano.

6.4. Capítulo 4

El uso de la teledetección a una resolución espacial moderada es un procedimiento adecuado para el análisis y la caracterización espacial y temporal de la isla de calor urbana de superficie (ICUs). Hipótesis confirmada.

Los sensores de moderada resolución en ciudades como Santiago son muy adecuados, más aún al ser procesadas sus imágenes mediante Sistemas de Información Geográfica, lo que mejora bastante su calidad gráfica.

En especial, las imágenes Terra MODIS vienen listas para ser procesadas, son de resolución diaria y gratuitas. Por lo tanto, permiten caracterizar espacial y temporalmente la isla de calor. El único inconveniente que poseen es el hecho de no registrar la temperatura superficial en días nublados. No obstante, como la ICUs es un fenómeno estructural del clima urbano, una muestra de días despejados es suficiente para caracterizarla.

*Las temperaturas de emisión superficial nocturnas de suelo del AMS bajo condiciones de calma y cielo despejado deberían conformar en las áreas más densamente construidas de Santiago una marcada isla de calor de superficie (ICUs), debido a que los materiales de construcción absorben radiación de onda corta durante el día para luego, durante las primeras horas de la noche, comenzar a liberar energía, conservándose así más cálidas que el entorno rural. **Hipótesis confirmada.***

La isla de calor urbana de superficie y el máximo térmico de la ciudad de Santiago se localizan, efectivamente, en la zona más densamente construida. Sin embargo, también coincide con la zona industrial de Quilicura. Es decir, la hipótesis se confirma, pero se debe precisar que tanto las zonas más densamente construidas, como las industriales, de Santiago poseen una marcada ICUs.

*Como las áreas más densamente construidas de Santiago poseen un mayor número de áreas verdes, la ICUs es en gran parte mitigada en estos barrios, donde reside la población de mayores ingresos económicos. **Hipótesis confirmada.***

La intensidad de la isla de calor urbana de superficie es de mayor magnitud durante el otoño (7,4°C), seguida de verano (5,9°C), primavera (5,4°C) e invierno (5,0°C), y con un máximo en los barrios donde se localiza la población de mayores ingresos económicos. Pero las áreas verdes mitigan su intensidad, incluso el albedo de dicha zona, que es más bajo en comparación con el resto de la ciudad.

Otras conclusiones del capítulo 4 no asociadas a las hipótesis son las siguientes:

El análisis de componentes principales revela cuatro patrones típicos de ICUs, que explican el 90,6% de las situaciones, a saber: ICUs consolidada (44,5%), ICUs

del piedmont y cuña de altos ingresos (22,3%), un tipo sin isla de calor urbana (20,2%) e ICUs más intensa al sur (3,6%).

De las situaciones sin isla de calor, se ha sugerido la hipótesis de efecto sumidero de calor o «*urban heat sink*», asociado a fuerte brisa de la Cordillera de Los Andes, que barre la ICUs y la desplaza al poniente de la ciudad, lo que en días de contaminación por material particulado (PM10) tendría efectos nocivos sobre la salud de la población de esa parte de la ciudad.

6.5. Capítulo 5

Los factores que explican mejor los patrones térmicos nocturnos de la ciudad (y por ende la ICUs) son el albedo, la densidad construida y de población, la topografía de la cuenca, la existencia de áreas verdes, y, en segundo lugar, la radiación solar y las distancias euclídeas al centro, la costa y los ríos y estero. Hipótesis confirmada parcialmente.

La densidad de población y la topografía de la cuenca no son las variables que mejor expliquen los patrones de la ICUs. Es más, en su reemplazo aparecen dos variables que se habían considerado de menor importancia, como es la distancia al centro y la radiación solar.

Los modelos de regresión lineal múltiple por pasos indican coeficientes de determinación entre 47,39% y 80,08% (invierno y verano, respectivamente). Las variables explicativas más influyentes son el albedo y el NDVI (relación negativa), y la densidad construida (relación positiva).

Que la elevación topográfica no sea un factor explicativo más definido y concluyente se debe a que no forma parte del modelo de invierno, y que en el modelo anual y de otoño se relaciona positivamente con la ICUs, mientras que en verano y primavera lo hace de modo inverso. La situación de otoño revela que con la altura se da un aumento de la intensidad de la isla de calor; lo cual sugiere la posible existencia de una inversión térmica.

Todas las variables explicativas consideradas se pueden controlar, ya sea en áreas urbanizadas como urbanizables. Por ello, el planificador territorial y el gestor ambiental pueden orientar el desarrollo urbano en función del conocimiento de la Climatología urbana, y, a la vez, definir medidas de mitigación en los espacios ya urbanos para mejorar su gestión.

Cada variable permite mitigar los efectos de la isla de calor, y, con ello, pueden ser abordadas como indicadores de la ICUs en una Agenda local 21. Por ejemplo, a partir de la situación actual de las áreas construidas, se pueden plantear medidas para que aumenten las áreas verdes y el albedo, y, así, conseguir una reducción de las ICUs en una zona. En áreas no construidas se puede buscar la mejor combinación de las variables para afectar lo menos posible al campo térmico, es decir, controlar las áreas verdes, el albedo, y las densidades construidas y de población.

6.6. Conclusiones principales

Tanto la ICU como la ICUs del AMS poseen magnitudes mayores a 5,0°C, lo cual indica que el efecto urbano es evidente, siendo mayor en verano y primavera. Durante el invierno, la isla de calor es menor que en el resto de estaciones.

El uso de imágenes térmicas, de NDVI y albedo, del satélite Terra MODIS, que fue lanzado en 2001, es de una importancia indiscutible para estudiar el clima urbano, principalmente, la isla de calor de superficie y sus factores condicionantes.

Se ha probado la eficacia de las imágenes Terra MODIS para crear mapas de isla de calor de superficie, lo que en el caso de Santiago se ve favorecido por la hora de paso del satélite, que coincide con la máxima intensidad de la isla de calor del aire, según los dos observatorios seleccionados.

Durante el año, hay cuatro configuraciones de isla de calor detectadas por análisis de componentes principales que explican el 90,6% de la varianza. Un 44,5% de los días posee ICUs consolidada y concéntrica; un 22,3% muestra la ICUs localizada en el piedmont y la cuña de altos ingresos; un 20,2% de los días no posee una clara isla de calor urbana, la cual migra fuera de la ciudad, al poniente; y un 3,6% de días posee una configuración más intensa al sur.

Las variables que afectan más significativamente (en más de 1°C) a la temperatura de la isla de calor urbana de superficie del AMS corresponden a la densidad construida, el NDVI, el albedo, la distancia al centro y la radiación solar. De ellas, el NDVI y el albedo modifican sensiblemente la ICUs. En el caso del albedo, se ensayó incrementarlo al 90% (*cool roofs*), y se alcanzó una mitigación superior a 9°C. Y, además, implementando de áreas verdes un espacio sin vegetación, la isla de calor se verá reducida entre 1,2°C y 5,5°C.

Es fundamental que la ciudad de Santiago y su área metropolitana sean planificadas considerando los efectos que conlleva en todas las dimensiones del desarrollo sostenible, por lo que se sugiere aumentar la dotación de áreas verdes públicas, incrementar el albedo, y controlar de mejor manera el crecimiento expansivo de la ciudad mediante aumentos selectivos de la densidad construida.