

PATRONES Y FACTORES DE CRECIMIENTO ESPACIAL DE LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CHILE Y SUS EFECTOS EN LA GENERACIÓN DE ISLAS DE CALOR URBANAS DE SUPERFICIE¹

H. ROMERO^{*y**} y P SARRICOLEA^{*}

^{*}Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio
Departamento de Geografía de la Universidad de Chile

^{**}Centro EULA de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción, Chile

RESUMEN

El presente trabajo utiliza series temporales de imágenes satelitales LANDSAT obtenidas entre 1975 y 2004 para identificar las áreas de cambios de usos y coberturas del suelo, clasificándose las áreas agrícolas y cubiertas por vegetación abundante y dispersa que han sido ocupadas por usos urbanos. Este trabajo aporta un conjunto de análisis sobre las relaciones cuantitativas que se observan en Santiago de Chile entre las áreas de crecimiento urbano, las temperaturas superficiales y un conjunto de variables geográficas explicativas, tanto del ámbito natural como social.

Palabras clave: Isla de Calor, Clima Urbano, Usos del Suelo, Imágenes LANDSAT,

ABSTRACT

The present work uses temporary series of LANDSAT images obtained between 1975 and 2004 to identify the areas of changes of land uses, qualifying the areas agricultural and covered by abundant and dispersed vegetation that has been occupied by urban uses. This work contributes to the analysis on the quantitative relations that are observed in Santiago of Chile between the areas of urban growth, the superficial temperatures and a set of geographical explanatory variables, so much of the natural like social area.

Key words: Urban Heat Island, Urban Climate, Land Uses, LANDSAT Images.

1. INTRODUCCIÓN

Santiago de Chile presenta una de las atmósferas más contaminadas de las ciudades latinoamericanas y para poder contribuir a resolver este problema es importante aumentar el conocimiento sobre las características y comportamiento de su clima urbano. La capital de Chile ha duplicado su superficie construida entre 1975 y 2004, reemplazando con urbanizaciones tierras anteriormente cubiertas por cultivos y vegetación.

Los materiales del uso del suelo urbano se caracterizan por un bajo albedo, baja capacidad de absorción de agua y un comportamiento térmico propicio para el almacenamiento y la emisión de calor, contribuyendo con ello a elevar la temperatura atmosférica de una ciudad en relación con su entorno rural o menos urbanizado (Oke, 1987; Solecki *et al*, 2002). Para

¹ Proyecto financiado por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (Fondecyt) de Chile, N° 1050423

los ciudadanos, el efecto de Isla de Calor Urbana (ICU) produce discomfort térmico y aumenta la ocurrencia de enfermedades, especialmente respiratorias, durante los días más calurosos de verano, debido a la formación de Ozono (O₃). Además provoca un alza en la demanda energética destinada a sistemas de refrigeración y aire acondicionado, exacerbando la emisión de contaminantes atmosféricos (CO₂, NO, SO₂, PM) desde las plantas eléctricas. Para la ciudadanía y los gobiernos, la ICU implica un gasto de dinero adicional, producto del mayor consumo energético, mientras que para el planeta agudiza el calentamiento global, debido a que fomenta la emisión de gases de invernadero (Gorsevski *et al.*, 2000; Stone y Rodgers, 2001; Voogt, 2004). Por otro lado, la ICU genera un tiro convectivo (ascenso de aire cálido) sobre la ciudad, generando una baja presión atmosférica relativa, que acentúa la circulación local de aire proveniente de áreas más frías como la periferia rural. Con ello, se produce un desplazamiento de masas de aire contaminado, que arriban a otros sectores de la ciudad o a áreas rurales situadas a decenas de kilómetros de ésta, afectando lugares que carecen de fuentes fijas o móviles en su cercanía (Crutzen, 2004; Oke, 1987).

Las Islas de Calor Superficial (ICS) corresponden a las temperaturas que emiten los objetos que componen la superficie terrestre y presentan por lo general una alta correlación espacial con la ICU, principalmente con las temperaturas medidas en el volumen de aire próximo a la superficie urbana (capa de dosel urbano o *urban canopy layer*), lo que valida el empleo de imágenes satelitales térmicas como fuentes de datos fiables para inferir las características de la ICU (Arnfield, 2003; Lougeay, 1996; Stone y Rodgers, 2001).

Respecto a la morfología e intensidad de las islas de calor, se ha establecido que están condicionadas, entre otros factores, por la distribución y 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, mientras que Moreno (1994) indica que estas áreas modifican y alteran la forma de la isla de calor urbana, lo que ha sido comprobado en el caso de Santiago de Chile por Romero (2004). Se han establecido también relaciones importantes entre las islas de calor urbanas y la topografía, tal como lo señalan Beral-Guyonnet (1997) y Cuadrat *et al.* (2003) para las ciudades de tipo mediterráneo. Otras relaciones espaciales de interés han vinculado las islas de calor urbanas y la geometría de las calles, lo cual ha quedado de manifiesto en las investigaciones de Elliason (1994), quién señala que la influencia más notoria se encuentra en la orientación longitudinal y con poco cielo visible (*sky view factor*) dentro del cañón urbano. Este trabajo aporta un conjunto de análisis sobre las relaciones cuantitativas que se observan en Santiago de Chile entre las áreas de crecimiento urbano, las temperaturas superficiales y un conjunto de variables geográficas explicativas, tanto del ámbito natural como social.

2. METODOLOGÍA

El análisis y procesamiento de imágenes satelitales mediante sistemas de información geográfica se ha transformado en una de las principales herramientas para el tratamiento de los problemas ambientales que existen en las ciudades latinoamericanas, debido a la escasa información disponible y a la precariedad de los sistemas de monitoreo y observación de los cambios ambientales. El presente trabajo utiliza series temporales de imágenes satelitales LANDSAT obtenidas entre 1975 y 2004 para identificar las áreas de cambios de

usos y coberturas del suelo, clasificándose las áreas agrícolas y cubiertas por vegetación abundante y dispersa que han sido ocupadas por usos urbanos.

La energía radiada por la superficie terrestre es la causa principal de las islas de calor, particularmente cuando los procesos de advección y turbulencia, que favorecen los intercambios de calor entre la superficie y la atmósfera cercana a la superficie, se ven inhibidos. Por ello, la ocurrencia, intensidad y desarrollo de la ICU, pueden ser observadas a través de imágenes satelitales que codifican la radiación emitida por la superficie terrestre en la dimensión del infrarrojo térmico del espectro electromagnético (temperaturas superficiales), empleándose el concepto de isla de calor de superficie (ICS) para referirse a la elevación de la temperatura superficial de un área en relación con la de su entorno (Arnfield, 2003; Stone y Rodgers, 2001; Voogt, 2004; Voogt y Oke; 2003).

Para comprender los factores que permiten explicar los cambios en los usos y coberturas de los suelos se han empleado modelos de regresión múltiple en que la variable dependiente es el porcentaje de las áreas construidas y las variables explicativas corresponden a un conjunto de atributos espaciales, tales como la distribución de la población y las densidades urbanas, la distancia al centro histórico de la ciudad principal y a las ciudades que conforman la red metropolitana. Aplicando modelos de regresión *paso a paso*, se han incorporado sucesivamente las variables explicativas hasta considerar la mayor parte posible de la varianza total y conseguir el menor error estándar. De esta manera se ha logrado construir una ecuación que representa el mejor ajuste posible a la distribución de las superficies construidas, evaluándose comparativamente las diferencias entre las imágenes y regresiones de valores estimados y observados.

Se ha analizado la distribución de la isla de calor de superficie mediante la clasificación de una imagen termal, obtenida en diciembre de 2004. La distribución de la temperatura superficial también ha sido explicada mediante ecuaciones de regresión múltiple lineales paso a paso, respecto a variables tales como la densidad de población urbana, coberturas vegetales, elevación y rugosidad de las edificaciones existentes al interior de la ciudad.

El área de estudio comprende dos zonas, la zona urbana ocupada por superficies construidas continuas y su entorno rural cercano, que corresponde a una franja vecina de 3 Km., abarcando la totalidad de las 34 comunas que componen el llamado Gran Santiago (32 más las ciudades vecinas de San Bernardo y Puente Alto).

3. RESULTADOS

Entre 1975 y 2004 se produjo una gran expansión física de la ciudad, que alcanzó a las 30.000 has. , y significó que las áreas construidas aumentaran de 33.962 a 63.134 has. (figura 1). La expansión urbana se orientó en todas las direcciones, pero especialmente hacia las quebradas y cuencas superiores de los ríos que drenan el piedemonte andino en el sector oriental; hacia el poniente de la ciudad, a través de la ocupación de los bordes de calles y avenidas principales, y hacia el surponiente y sur mediante el relleno de intrusiones intersticiales previamente ocupadas por campos de cultivo y cubiertas naturales. Entre 1998 y 2004, se frenó el crecimiento hacia la cordillera andina debido a la inexistencia de áreas con aptitud urbana, pero se concentró en las comunas periféricas ubicadas al norte y sur de la ciudad.

La tabla 1 presenta el modelo de mejor ajuste estadístico entre las superficies construidas de Santiago en el año 2004 y un conjunto de variables explicativas. De acuerdo a este modelo, la distribución espacial de las áreas construidas se relaciona en primer lugar en

forma directa con la distribución de la densidad de población, lo que significa que el crecimiento de la ciudad se produce por acreción de nuevas residencias sobre los bordes de las áreas mayormente ocupadas en la actualidad. El segundo factor explicativo resulta ser la distancia al centro de la vecina ciudad de San Bernardo, lo que está indicando la importancia de los nuevos centros urbanos periféricos para atraer población, en detrimento del centro histórico principal. Ello se ratifica en la medida que el tercer factor señala que el área construida aumenta a medida que se aleja del centro histórico de la Ciudad de Santiago (inversión de las curvas de decaimiento-distancia). El área construida también aumenta en la medida que se aleja del centro de la ciudad vecina de Puente Alto, de los principales ejes viales y del límite del área construida que alcanzaba la ciudad en 1975.

La figura 2 compara las representaciones de la distribución observada de los porcentajes de las áreas construidas respecto a la distribución estimada por la aplicación de la ecuación de mejor ajuste, mientras que la figura 3 demuestra la relación que existe entre los valores observados y los valores estimados. Tal como se aprecia en ambas representaciones, los valores observados se aproximan significativamente a los estimados, lo que indicaría que se trata de una ecuación de regresión que permite predecir la realidad en un alto grado. Sin embargo, la linealidad entre el comportamiento de ambas variables se rompe cuando se alcanza aproximadamente el 30% de porcentaje urbanizado, lo que estaría indicando que las áreas construidas de densidades más altas –que corresponden a los sectores de ingresos medios y bajos en esta ciudad- responden a otros factores explicativos, además de los considerados en este análisis.

La figura 4.1 muestra la distribución de las temperaturas superficiales y permite dividir en general a la ciudad de Santiago en dos grandes áreas extraordinariamente bien delimitadas. La primera de ellas abarca el área oriente, que se extiende desde un eje que cruza la ciudad en dirección N-S (Av. Vicuña Mackenna), hasta el pie de monte andino. Esta área presenta temperaturas comparativamente más frías, incluyendo en su interior algunos núcleos de calor, que corresponden a aeropuertos, centros comerciales y grandes sitios sin construir. La segunda área, que concentra las más altas temperaturas superficiales, se ubica al poniente del eje N-S mencionado y abarca a las islas de calor no urbanas del sector norponiente de la ciudad, que se localizan sobre suelos desnudos formados por sedimentos volcánicos eólicos de gran capacidad térmica. Es relevante indicar que la Avenida Vicuña Mackenna es considerada generalmente como el límite entre las áreas de residencia de habitantes de sectores de ingresos medio-altos y medio-bajos de la ciudad.

Respecto a la topografía, se observa en la fig. 4.2 que se trata de una morfología de fondo de cuenca esencialmente plana con pendiente suaves que descienden desde el oriente hacia el poniente y que se observan más inclinadas hacia el piedemonte andino, sobresaliendo al interior de la ciudad la presencia de algunos cerros islas.

La distribución de la vegetación se observa en la fig. 4.3. Al interior de la ciudad existen también claras divisiones geográficas expresadas en la frecuencia y tamaño de los parches de vegetación. Las comunas del sector oriente de la ciudad, presentan las mayores frecuencias y tamaños de los parches vegetales. Más allá del límite urbano se encuentran los más altos índices vegetales asociados al pie de monte andino y sus estribaciones a través de las cuales la cordillera de los Andes avanza hacia el poniente, como es el caso del Cerro San Cristóbal, que alcanza al centro mismo de la ciudad. Por el contrario, las comunas urbanas ubicadas hacia el poniente de la ciudad, presentan nulas o muy escasas coberturas vegetales.

En cuanto a la distribución espacial de las densidades de población (fig.4.4), existen múltiples núcleos de alta concentración demográfica en las zonas sur y poniente de Santiago. Mientras en el sector central de la ciudad, las áreas con más altas densidades de población se encuentran al interior de la más importante circunvalación, al sur y suroriente de Santiago, ellas se localizan fuera de la mencionada vía, lo que demuestra su carácter más reciente.

Las relaciones estadísticas entre la distribución de las temperaturas superficiales y las variables explicativas se presentan en la fig. 5, siendo posible apreciar gráficamente que sólo los índices vegetales normalizados (fig.5.1) y las elevaciones (fig.5.2) se relacionan claramente en forma inversa con los valores térmicos. Las restantes variables explicativas de la distribución de las temperaturas superficiales, por ejemplo la distancia a los ríos (fig.5.3) y la densidad de población (fig.5.4), dan origen a nubes de puntos de las cuales no resulta posible inferir relaciones estadísticas significativas.

Respecto a la relación entre la distribución de las temperaturas superficiales y el conjunto de variables explicativas, los resultados confirman que la elevación es la variable con mayor peso, dado que por sí sola explica el 86% de la varianza total (ver tabla 1), seguida de la densidad de población, los índices vegetales, la distancia a los ríos y la rugosidad del terreno.

La tabla 2 muestra que la explicación de la varianza de las temperaturas superficiales urbanas no presenta variaciones significativas a partir de la ecuación de regresión que considera la acción conjunta de la densidad de población y la elevación. Más importante resulta ser la reducción del Error Estándar que ocurre al adicionar los índices vegetales y la distancia a los ríos.

La variable rugosidad del terreno puede ser excluida del análisis debido al predominio areal de las residencias de baja altura en la mayor parte de la ciudad, lo que le hace perder influencia sobre la distribución de las temperaturas superficiales. Sin embargo, debiera ser relevante en el comportamiento de las temperaturas superficiales de espacios más definidos, tales como los edificios de altura que se localizan en el Distrito Central de Negocios del centro histórico de la ciudad y su prolongación hacia el oriente a lo largo de la espina de edificios de altura que caracteriza la parte más moderna de la ciudad.

Es posible concluir de los análisis estadísticos de la distribución de la isla de calor urbana superficial de Santiago que la elevación es uno de los factores más influyentes en la distribución de las temperaturas en la ciudad de Santiago, junto con las densidades de población y el Índice Normalizado de Diferencias Vegetales. La varianza total explicada por este conjunto de variables alcanza al 89%, lo cual permite estimar la temperatura superficial con una alta precisión. A partir de la distribución de la temperatura superficial se espera correlacionar la temperatura del aire para tener un cuadro más completo del comportamiento de esta significativa variable ambiental y ecológica al interior de la ciudad.

Si bien clásicamente la rugosidad del terreno ha sido considerada una de las variables más interesantes para explicar la distribución de las temperaturas, en el presente trabajo eso no ha quedado demostrado

Modelo 7	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados
	B	Error Std.	Beta
Densidad de población (DENS)	0,1900	0,0070	0,9400
Distancia a San Bernardo (SNBER)	0,0005	0,0000	0,5110
Distancia al Centro (CENTRO)	-0,0004	0,0000	-0,2140
Distancia al límite urbano de 1975 (LIM1975)	0,0014	0,0000	0,1390
Distancia a Puente Alto (PTALTO)	-0,0002	0,0000	-0,2380
Distancia a ejes viales (VIAL)	-0,0064	0,0010	-0,0360
Cantidad de población (POB)	-0,0087	0,0020	-0,1790

Porcentaje de área urbanizada= $0,1900 \cdot \text{DENS} + 0,0005 \cdot \text{SNBER} - 0,0004 \cdot \text{CENTRO} + 0,0014 \cdot \text{LIM1975} - 0,0002 \cdot \text{PTALTO} - 0,0064 \cdot \text{VIAL} - 0,0087 \cdot \text{POB}$

TABLA 1. VARIABLES Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN DE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS INCLUIDAS EN LE MODELO DE MEJOR AJUSTE PARA LA DISTRIBUCIÓN DE LAS SUPERFICIES CONSTRUIDAS EN LA CIUDAD DE SANTIAGO

Modelo	R Múltiple	R ² Múltiple	R ² ajustado	Error Std.	Cambio en R ²
1	0,93	0,86	0,86	8,24	0,86
2	0,94	0,89	0,89	7,51	0,02
3	0,94	0,89	0,89	7,44	0,00
4	0,94	0,89	0,89	7,41	0,00
5	0,94	0,89	0,89	7,41	0,00

Modelo 1 Predictores: Elevación

Modelo 2 Predictores: Elevación, Densidad de población

Modelo 3 Predictores: Elevación, Densidad de población, NDVI

Modelo 4 Predictores: Elevación, Densidad de población, NDVI, Distancia a los ríos

Modelo 5 Predictores: Elevación, Densidad de población, NDVI, Distancia a los ríos, Rugosidad

TABLA 2. REGRESIONES MÚLTIPLES PASO A PASO ENTRE LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES DE LA CIUDAD DE SANTIAGO Y UN CONJUNTO DE VARIABLES EXPLICATIVAS

Modelo	Predictores	B	Error Std.
4	Elevación	0,02441	0,00008
	Densidad de población	0,04546	0,00038
	NDVI	8,36352	0,21622
	Distancia a los ríos	0,00090	0,00004

Tabla 3. MODELO DE MEJOR AJUSTE PARA PREDECIR LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ISLAS DE CALOR URBANAS DE SUPERFICIE DE LA CIUDAD DE SANTIAGO

4. CONCLUSIONES

La superficie ocupada por la ciudad de Santiago ha aumentado en 30.000 Há durante los últimos treinta años, sustituyendo cubiertas superficiales de vegetación densa y dispersa y suelos agrícolas, alterando significativamente las temperaturas superficiales. El crecimiento de la ciudad se ha realizado especialmente por acreción de bordes de áreas urbanas de alta densidad, aproximándose a los centros de las ciudades satelitales y alejándose del centro histórico de la ciudad, todo lo cual explica la extensión de las islas de calor. La distribución de las temperaturas superficiales se relaciona inversamente con la elevación topográfica de la ciudad y con la productividad de las áreas verdes, que se distribuyen alcanzando los valores más elevados en la zona oriente donde reside la población de más altos ingresos. La distancia a los ríos o la rugosidad de las edificaciones son menos relevantes que las anteriores variables explicativas, en la medida que no manifiestan variaciones espaciales significativas. La asociación espacial entre temperaturas superficiales, vegetación y elevación y la relación entre éstas y la división social del espacio urbano, representa la importancia de la segregación socio-espacial sobre las condiciones ambientales de la ciudad latinoamericana. La continuación de los procesos ilimitados de crecimiento de las áreas urbanas debiera acentuar la presencia y magnitud de las islas de calor de superficie y con ello, los efectos adversos sobre la salud y bienestar de la población en general y de los estratos de menores ingresos en particular.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ARNFIELD. J. A. (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.
- CRUTZEN. P. (2004). New Directions: The Growing Urban Heat and Pollution "Island" Effect – Impact on Chemistry and Climate. *Atmospheric Environment*. 38: 3539 – 3540.
- CUADRAT, J., MA. SAZ, S. 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.
- ELLIASSON, I., 1994. Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography*, 15: 1-22.

- GORSEVSKI. V. TAHA. H. QUATTROCHI. D. and LUVALL. J. (2000). Air Pollution Prevention Through Urban Heat Island Mitigation: An Update on the Urban Heat Island Pilot Project. Washington DC. U.S Environmental Protection Agency. 10 p.
- LILLESAND. T. M. KIEFER. R. W. and CHIPMAN. J. W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Madison. John Wiley & Sons. 763 p.
- LOUGEAY. R. (1996). Land Use, Land Cover, and Local Climate. Applications in Remote Sensing. Vol. 4. Remote Sensing Core Curriculum Project. New York. State University of New York. Department of Geography. (en línea). http://www.r-s-c-c.org/rscc/Volume4/lougeay1/left_defaultmasterborder.html (consulta 14 enero 2005).
- MORENO, M., 1994. Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology* 14: 705-710.
- OKE, T., 1987. *Boundary Layer Climates*. Segunda Edición. London, Routledge.
- OKE, T., 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In *Wind Climate in Cities*. Cermak JE. (ed). Kluwer-Academic Publ. Norwell.
- ROMERO, H. 2004. Crecimiento Espacial de Santiago entre 1989 y 2003 y la Pérdida de Servicios Ambientales. En *Hacer Ciudad*, Patricio Tupper (Ed), Centro Chileno de Urbanismo, Santiago: 179-201.
- SOLECKI W., ROSENZWEIG C., POPE G., PARSHALL L. AND WIENCKE M. 2002. *The Current and Future Urban Heat Island Effect and Potential Mitigation Strategies in the Greater Newark, New Jersey Region*. New Jersey. Department of Earth and Environmental Studies. Montclair State University. 51 p.
- STONE. B. and RODGERS. M. (2001). Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island. *Journal of the American Planning Association*. 67 (2): 186 - 198.
- VOOGT. J. A. (2004). Urban Heat Islands: Hotter Cities. Washington D.C. *American Institute of Biological Sciences*. 7 p.
- VOOGT. J. A. and OKE. T. R. (2003). Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*. 86: 370 - 384.