

# ANÁLISIS DE LA SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL DEL CRECIMIENTO URBANO DE LA CIUDAD DE SANTIAGO: RELACIONES ESPACIALES ENTRE TEMPERATURAS SUPERFICIALES Y NIVELES SOCIOECONÓMICOS DE LA POBLACIÓN\*

Pablo Sarricolea Espinoza<sup>12</sup>

Hugo Romero Aravena<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio, Departamento de Geografía de la Universidad de Chile,

<sup>2</sup> Magíster © en Geografía, Universidad de Chile y

Portugal 84, casilla 3387 Santiago

[psarrico@uchile.cl](mailto:psarrico@uchile.cl)

[hromero@uchile.cl](mailto:hromero@uchile.cl)

(56) 2-9783095

\*Investigación inserta dentro del proyecto FONDECYT N° 1050423

## Resumen:

En la presente investigación se analiza la configuración y distribución espacial de las temperaturas superficiales en la ciudad de Santiago, y se examinan los factores ambientales que influyen sobre ellas. Se consideran los factores del crecimiento urbano y sus relaciones espaciales con los cambios en el campo térmico y con los niveles socioeconómicos de la población urbana. Mediante análisis digitales de imágenes de satélite Landsat MSS y TM, se determina la extensión del área urbana, la concentración de vegetación verde expresada en el NDVI y las temperaturas superficiales. También se utilizan coberturas geográficas vectoriales y la base de datos del Censo de Población y Vivienda del año 2002, para estimar los factores explicativos, tales como distancias euclidianas a fuentes húmedas, topografía y los niveles socioeconómicos de la población urbana. La metodología empleada se basa principalmente en la aplicación de diferentes métodos estadísticos, de regresión bi-variada y múltiple, que se explican a través de modelos lineales y logarítmicos.

El propósito de esta investigación es analizar la sustentabilidad del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago, para contribuir a controlar y mitigar la generación, difusión y los efectos ambientales directos e indirectos de las islas de calor de superficie, y predecir la distribución futura entre las temperaturas y un conjunto de variables explicativas significativas. Entre los resultados obtenidos se tiene que el crecimiento urbano acelerado y expandido que experimenta la ciudad de Santiago ha acentuado la desigual distribución de las temperaturas superficiales en relación a los niveles socioeconómicos de su población. Esta ciudad, altamente fragmentada social y ambientalmente, evidencia que los grupos de altos ingresos (ABC1) presentan las temperaturas más bajas, asociadas a mejores condiciones ambientales, en desmedro de los grupos sociales que le siguen escalonadamente (C2, C3, D y E), que concentran las islas de calor y sus efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente. Lo anterior, permite señalar que, de no existir cambios en la distribución espacial del ingreso difícilmente se romperá con la segregación socio-ambiental, condición básica para la sustentabilidad del desarrollo de la ciudad de Santiago.

**Palabras Claves:** *Sustentabilidad ambiental, crecimiento urbano expandido, temperatura superficial, segregación socio-ambiental*

**Keywords:** *Environmental sustainability, Urban Sprawl, surface temperature, socio-environmental segregation*

## **Introducción:**

El fenómeno de urbanización altera artificialmente las condiciones climáticas a través del aumento de las temperaturas del aire (CUADRAT et al, 2005; OKE, 1987; YUAN y BAUER, 2007) y de emisión de superficie (ARNFIELD, 2003; CHEN et al., 2001; ROMERO y SARRICOLEA, 2006), lo cual favorece la generación y consolidación de islas de calor urbana (ICU).

La isla de calor urbana superficial (ICUs), corresponde a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y cuerpos urbanos y que son captadas directamente por sensores infrarrojos, tales como los que disponen los satélites de observación terrestre. Respecto a las relaciones entre variables que representan al medio ambiente urbano y socioeconómico de la ciudad, existen investigaciones recientes que correlacionan espacialmente la distribución de los niveles de ingresos familiares con la vegetación urbana y con otros componentes tales como las tasas de impermeabilización (ESCOBEDO et al., 2006; VÁSQUEZ y ROMERO, 2007), estableciendo que aquellas comunas de niveles socioeconómicos más altos poseen mayor porcentaje de superficies verdes y con mayor diversidad de especies que las comunas de niveles socioeconómicos medios y bajos. Respecto a las relaciones entre temperatura de emisión, vegetación urbana y niveles socioeconómicos, PRASHAD (2004), ha establecido para la ciudad de Phoenix, que la población de altos ingresos posee mejores condiciones ambientales, con bajas temperaturas y densa vegetación, lo cual es contrastado con las altas temperaturas y escasa vegetación que presentan las localizaciones de población de bajos ingresos.

## **Objetivos:**

**Objetivo General:** “Analizar la sustentabilidad del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago, para contribuir a controlar y mitigar la generación, difusión y los efectos ambientales directos e indirectos de las islas de calor de superficie, y predecir la distribución futura entre las temperaturas y un conjunto de variables explicativas significativas”

### **Objetivos Específicos:**

1. Proyectar hacia el 2020 el crecimiento urbano observado entre 1975 y 2004.
2. Analizar y explicar a través de un Modelo de Regresión Múltiple la Isla de Calor Urbana de Santiago registrada en diciembre de 2004.
3. Conocer y analizar la distribución espacial de la población de Santiago según sus niveles socioeconómicos.
4. Relacionar variables que representan el medio ambiente urbano natural (temperaturas superficiales) con el medioambiente socioeconómico (niveles de ingresos económicos) de la ciudad de Santiago.

## **Metodología:**

Para proyectar hacia el año 2020 el crecimiento observado de la ciudad de Santiago, se utilizarán simultáneamente Cadenas de Markov (CM) y Autómatas Celulares (AC), tal como ha sido realizado para Chillán y Los Ángeles por HENRIQUEZ (2005). Las Cadenas de Markov permiten estimar probabilísticamente las tendencias de cambios de los suelos que serían ocupados por la urbanización en el futuro, a partir de la consideración de los patrones espaciales de comportamiento obtenidos de las situaciones observadas. Los Autómatas Celulares, por su parte, se usan para simular arreglos espaciales futuros, por ejemplo respecto a los usos del suelo. Para ello se proyectan los usos del suelo a partir de las probabilidades de cambio de un conjunto de áreas vecinas.

Se han empleado también modelos de Regresión Múltiple Paso a Paso para estimar las temperaturas superficiales, incorporando sucesivamente variables explicativas tales como topografía de la ciudad, vegetación, densidad de población, etc. hasta dar cuenta de la mayor fracción posible de la varianza total explicada y conseguir el menor error estándar. 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 las variables explicativas consideradas.

En lo referido a la definición de niveles socioeconómicos (NSE) se procederá a utilizar la misma metodología propuesta por ADIMARK (2004), extrayendo del Censo de Población y Vivienda variables que definan dos dimensiones del hogar: nivel de educación del jefe de hogar y tenencia de una batería de bienes domésticos. Estos niveles socioeconómicos fueron correlacionados con las temperaturas superficiales por PRASHAD (2004) en Phoenix, Estados Unidos, demostrando que los niveles socioeconómicos altos poseen menor temperatura y que en los sectores más bajos las temperaturas de superficie son más elevadas.

**Resultados:**

La ciudad de Santiago en los últimos treinta años ha duplicado su superficie urbana. El crecimiento espacial de las áreas urbanas se ha realizado mediante el consumo de suelos agrícolas o coberturas naturales, a un ritmo acelerado, el cual se ha acentuado en la década reciente, hasta alcanzar una adición de cerca de 2.000 hectáreas cada año (tabla.1)

**Tabla 1. Crecimiento de la superficie urbana de Santiago entre 1975 y 2004.**

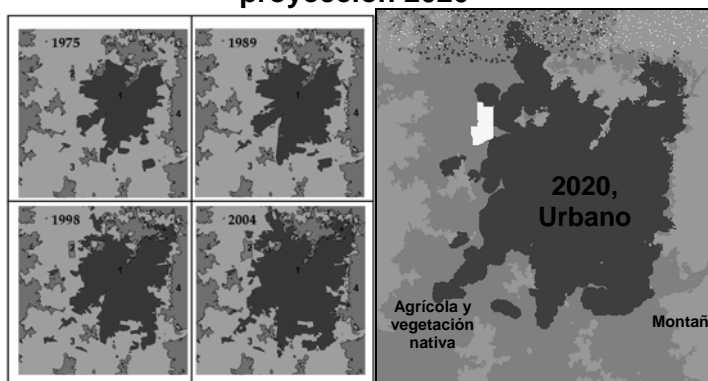
| Años | Superficie urbana (has) | Crecimiento inter-periodo (anual) |
|------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1975 | 33.685                  | -                                 |
| 1989 | 39.542                  | 418                               |
| 1998 | 51.735                  | 1.355                             |
| 2004 | 62.235                  | 1.750                             |

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de satélite Landsat.

Entre los años 1975 y 1989 el ritmo de crecimiento espacial de la ciudad fue el menos acelerado de los encontrados, incluso en la periferia discontinua, aumentando en sólo 6.000 hectáreas la superficie urbana. Entre 1989 y 1998 la superficie urbana creció a un ritmo acelerado, absorbiendo áreas y ciudades externas al límite urbano (Puente Alto) y creciendo hacia el oriente por el piedemonte andino, así como también hacia el poniente, en las comunas de Maipú y Quilicura, tal como se observa en la Figura Nº 1. Sin embargo, el periodo de mayor aumento de superficie urbana se observó entre los años 1998 y 2004, donde la mancha urbana continua creció a tasas promedio de 1.750 hectáreas por año.

Los usos de suelo considerados para modelar el crecimiento de la ciudad de Santiago al año 2020 muestran que esencialmente los suelos no urbanos (agrícolas y de vegetación nativa) aportan superficies para usos urbanos y de aeropuerto (ver Figura Nº1). Se evaluaron varias Cadenas de Markov en el periodo, validando por índices de Kappa los análisis de los periodos 1989-1998 y 1998-2004. Considerando el comportamiento espacial de la ciudad en dichos periodos, es posible proyectar el tamaño que alcanzará Santiago el año 2020, llegando a 90.235 hectáreas.

**Figura 1. Cambios en la superficie urbanizada de Santiago entre 1975 y 2004 y proyección 2020**



Fuente: Elaboración propia. 1= Urbano,

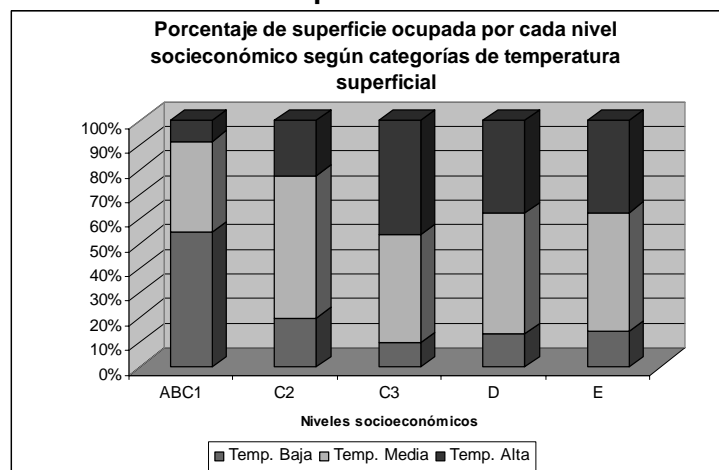
2=Aeropuerto, 3= Agrícola y vegetación nativa 4= Montaña

Por otra parte, la modelación de las temperaturas urbanas de la ciudad de Santiago indica que los factores más influyentes en su distribución, en orden decreciente son la topografía de la ciudad, la densidad de población, distancia a fuentes húmedas y la vegetación. Aplicando los resultados de la ecuación ( $R^2=0,92$ ) se pueden indicar las siguientes relaciones:

- La temperatura disminuye en  $1,3^{\circ}\text{C}$  al aumentar la altura en 50 metros
- El incremento del NDVI en un valor de 0,5 reduce la temperatura en  $2,15^{\circ}\text{C}$
- Si la densidad de población aumenta en 50 habitantes por hectárea la temperatura se incrementa en  $1,8^{\circ}\text{C}$ ;
- Cada 500 metros de mayor distancia a un curso de agua la temperatura se incrementa en  $0,6^{\circ}\text{C}$

Para analizar las relaciones entre los niveles socioeconómicos de la población urbana y las temperaturas registradas en la ciudad, se clasificaron estas últimas en tres grupos: bajas (menores a  $20^{\circ}\text{C}$ ), medias (entre  $20,1^{\circ}$  y  $23,31^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 1$  desviación estándar en torno a la media) y temperaturas altas (mayores a  $23,32^{\circ}\text{C}$ ), Los patrones espaciales de distribución de las temperaturas fueron correlacionados con la distribución espacial de los estratos socioeconómicos de la población (figura 2).

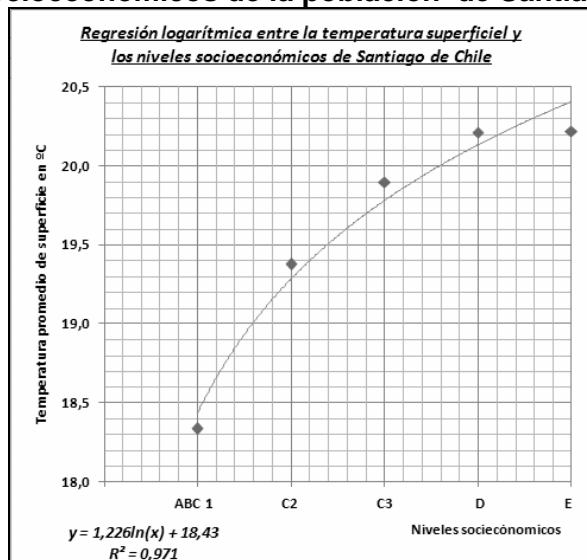
**Figura 2. Relación entre el porcentaje de área ocupada por cada NSE y las temperaturas superficiales.**



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con el fin de analizar la relación estadística entre los niveles socioeconómicos de la población de Santiago y la distribución del promedio de las temperaturas superficiales, se estableció una función logarítmica entre ellas. La ecuación alcanza una varianza explicada ( $R^2$ ) de 0,97 y sólo se alcanzan errores de  $0,2^{\circ}\text{C}$  entre el valor calculado y esperado, tal como se observa en la figura nº3.

**Figura 3. Regresión logarítmica entre las temperaturas superficiales y los niveles socioeconómicos de la población de Santiago.**



Fuente: Elaboración propia

Los niveles socioeconómicos se representan por valores numéricos de 1 a 5 (ABC1 igual 1, hasta E igual 5). El modelo de regresión logarítmica alcanza el 97,1% de explicación de varianza, mostrando que las áreas urbanas donde habita la población de mayores ingresos registra las menores temperaturas superficiales.

### Discusión y Conclusiones:

El crecimiento urbano observado para la ciudad de Santiago ha sido muy acelerado entre los años 1975 y 2004, duplicando su superficie, y acentuándose en el último periodo (1998-2004). Se advierte una disociación entre el crecimiento espacial de la ciudad y las tendencias demográficas, que indican un crecimiento lento y escaso de la población. Se han generado demandas elevadas por nuevos suelos ya sea por presión de las empresas inmobiliarias, que tratan de ampliar la oferta de hogares para los sectores de ingresos medios y altos, como también el déficit habitacional de los sectores más pobres. Es por ello que se plantea que, el crecimiento económico ligado a las actividades industriales y comerciales, mayor oferta de empleo y subsidios habitacionales ha traído consigo una presión en un recurso suelo cada vez más escaso. Hacia el futuro, se estima que las demandas del crecimiento espacial de bajas densidades se acentuarán, sobretodo si se considera que los planes reguladores del uso del territorio, aprobados el año 2006 consideraron a las 52 comunas de la región como urbanas.

Respecto a la relación entre la distribución espacial de las temperaturas superficiales y los niveles socioeconómicos se alcanzaron resultados similares a los de PRASHAD (2004), que indican que los sectores de mayores ingresos económicos mejoran sus terrenos, implementando áreas verdes privadas, mientras que los sectores donde residen los habitantes más pobres no pueden destinar parte de sus ingresos a ello, lo que explica las elevadas temperaturas urbanas registradas en sus áreas residenciales.

Respecto a la sustentabilidad del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago, se concluye que la ciudad enfrentará crecientes dificultades teniendo en cuenta las altas tasas de ocupación de suelos del entorno rural, lo que trae consigo mayores tiempos de viajes, mayor diferenciación socioeconómica y una mayor vulnerabilidad a condiciones ambientales adversas, tales como contaminación atmosférica, generación de islas de calor y reducción de espacios verdes.

## **Bibliografía referenciada:**

**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.

**ADIMARK, 2004.** Mapa socioeconómico de Chile. Nivel socioeconómico de los hogares de Chile basados en datos del Censo de Población y Vivienda 2002. 23pp. [www.adimark.cl/medios/estudios/Mapa\\_Socioeconomico\\_de\\_chile.pdf](http://www.adimark.cl/medios/estudios/Mapa_Socioeconomico_de_chile.pdf) consultada el 19 de Octubre del 2006.

**CHEN, P., S. LIEW, L. KWON, 2001.** Dependence of urban temperature elevation on land cover types. 22<sup>nd</sup> Asian conference on remote sensing. Singapore. 5 pp.

**CUADRAT, J., S. VICENTE-SERRANO y M. SAZ, 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.º 40 - 2005, págs. 311-327.

**ESCOBEDO, F., D. NOWAK, J. WAGNER, C. DE LA MAZA, M. RODRIGUEZ, D. CRANE, J. HERNANDEZ, 2006.** The socioeconomics and management of Santiago de Chile's public urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening* 4:105-114.

**HENRIQUEZ, C., 2005.** Modelación, impacto ambiental y sustentabilidad del crecimiento urbano en las ciudades intermedias de Chillán y Los Ángeles. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción. pp.310.

**OKE, T., 1987.** *Boundary Layer Climates*. Segunda Edición. London, Routledge.

**PRASHAD, L., 2004.** Urban Materials and Temperature in Phoenix: Connecting Land Use, Socioeconomics, and Vegetation and Relating Ground and Air Variables. M.S. Thesis Defense, Arizona State University, May 14, 2004.

**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.

**VAZQUEZ, A. y H. ROMERO, 2007.** El libremercado de las áreas urbanas y la falta de justicia ambiental en la disponibilidad de áreas verdes en Santiago de Chile. *Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, Universidad de Barcelona, (En Prensa).

**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.