



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

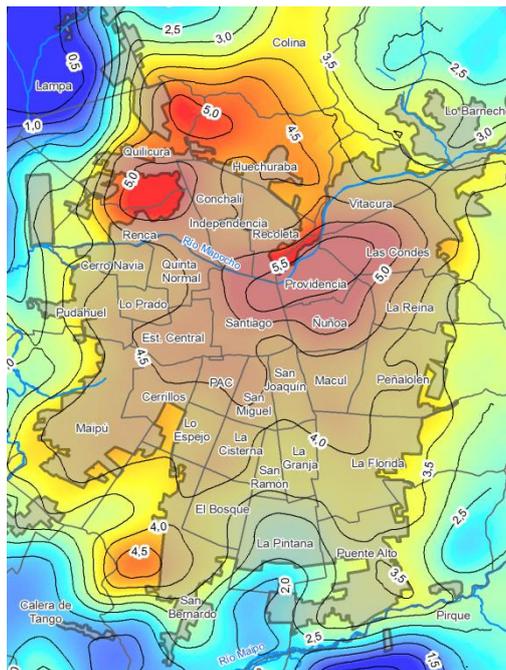
Pablo Sarricolea Espinoza

**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](http://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](http://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](http://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 5*

Modelación de la ICUs  
mediante un conjunto de  
variables explicativas



## *MODELACIÓN DE LA ICU<sub>s</sub> MEDIANTE UN CONJUNTO DE VARIABLES EXPLICATIVAS*

### *5.1. Resumen*

Se modela la isla de calor urbana de superficie (ICUs) en función de una serie de variables geográficas y urbanas, con el propósito de plantear alternativas para la mitigación de los efectos negativos que las ICUs provocan a los habitantes de la ciudad de Santiago. Además, se entregan algunas directrices para una planificación territorial más sostenible. En total se utilizaron 42 mapas de isla de calor del año 2010, los cuales se generaron con imágenes satelitales Terra MODIS. Ellos fueron sintetizados en cinco cartografías, un mapa anual y cuatro correspondientes a las estaciones del año. Las variables explicativas para predecir la isla de calor fueron nueve: densidad de población y construida, elevación topográfica, NDVI, albedo, radiación solar y las distancias euclidianas al centro, la costa y los ríos y esteros. Los resultados de 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). Al modificar las variables que explican la ICUs se podría variar la intensidad de ella, por ejemplo: al aumentar de 10.000 m<sup>2</sup> a 20.000 m<sup>2</sup> construidos por hectárea la temperatura deberá aumentar entre 1°C y 2°C; implementando de áreas verdes un espacio sin vegetación, la isla de calor se verá reducida entre 1,2°C y 5,5°C; y al modificar el albedo de la ciudad desde un 10% a un 20% se consigue una reducción de la ICUs entre 1,1°C y 2,7°C.

## 5.2. Introducción

Conocer cuáles son las variables que explican la intensidad y distribución espacial de la temperatura no es sólo una preocupación a escala urbana, sino que también lo es en las escalas local, regional, sinóptica y global. En este sentido, cuando mayor es el nivel de detalle espacial, la influencia de los usos del suelo y la configuración de la cubierta terrestre se hacen más relevantes.

Asimismo, si clasificamos los factores del clima como astronómicos (latitud y declinación solar), dinámicos (frentes, masas de aire y centros de acción) y geográficos (influencia marítima, continentalidad y relieve), observamos que podemos incluir, además, una serie de factores de carácter geográfico y urbano que no suelen ser considerados, y justamente ellos son los más relevantes en Climatología urbana.

Para Grimm *et al.* (2008) la isla de calor urbana es el mejor ejemplo documentado de la modificación del clima por origen antrópico. Las ciudades tienden a poseer una mayor temperatura del aire y de la superficie que su entorno rural (Oke, 1997), especialmente por la noche. También, muchas características urbanas alteran los balances energéticos, y por ello afectan a la forma e intensidad de la isla de calor. Según Grimm *et al.* (2008), ellas corresponden a:

- La distribución de los usos de suelo, el tamaño y forma de la ciudad, por lo general, relacionada con el número de habitantes, tal como advierte Oke (1973),
- El incremento de las superficies impermeables (que origina una reducción del albedo y un aumento de la capacidad calorífica),
- La disminución de las áreas cubiertas de vegetación y de humedad (lo que reduce la evapotranspiración),

- La modificación de la rugosidad de la superficie, y por consiguiente, un incremento de las superficies disponibles para la absorción de la energía solar (debido a los edificios y los cañones urbanos que atrapan el calor)

Como ya hemos señalado en el capítulo 2 de esta Tesis, existen diversos factores que explican la distribución e intensidad de la isla de calor urbana. Entre ellos se encuentran las variables meteorológicas, tales como humedad relativa, nubosidad, viento y presión atmosférica, en otras. También existe una estrecha relación entre la intensidad de la isla de calor y el tamaño de la ciudad, el cual es representado por el número de habitantes. Oke (1973) reveló mediante regresiones lineales, diferencias en la intensidad de la isla de calor en función de los tamaños y tipos de urbanización, especialmente entre las ciudades de características norteamericanas y europeas, las cuales en principio poseen formas y estructuras urbanas contrastadas. La cantidad de población y su distribución en las ciudades, además del modelo socioeconómico que establece una sociedad, tienen una estrecha relación con la generación de calor antropogénico (industria y modos de vida) y con la mayor o menor magnitud del tráfico rodado.

También se ha verificado que en la mitigación de la isla de calor existen variables que pueden ser intervenidas por el hombre, mientras que otras no son propensas a ser controladas (Memon *et al.*, 2008). Es así como se investiga sobre la relación entre la ICUs, las variables controlables de diseño urbano (áreas verdes, albedos, densidades de población, densidad edificada) y variables no controlables en áreas urbanizadas (pero que son muy importantes en el momento de decidir nuevas áreas de urbanización). Estas variables no controlables en áreas ya urbanizadas son de características geográficas, tales como la distancia a ríos y esteros, la distancia al centro urbano, la distancia a la línea de costa, la radiación solar y la elevación topográfica. En suma, se ha considerado un total de nueve variables para explicar la distribución de la ICUs en el AMS, y con ellas se espera

predecir la configuración e intensidad de la isla de calor, y con ello, proponer alternativas a un urbanismo más ambiental.

### ***5.3. Materiales y métodos***

Se utilizaron datos e información en formato digital, que han sido analizados mediante herramientas y técnicas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y estadística multivariada. Todas estas técnicas y herramientas en conjunto se integran para dar respuesta a los objetivos planteados.

En primer lugar, la teledetección es entendida como una técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados en la superficie terrestre (Chuvieco, 2002). Utilizamos el sensor Terra MODIS, para el cálculo de la isla de calor urbana de superficie, los índices normalizados de diferencias vegetales (NDVI en su sigla en inglés) y los albedos de las cubiertas.

Los SIG permitieron capturar, ingresar, analizar y desplegar información proveniente de sensores remotos, cartografía digital y otras fuentes. Igualmente, se realizaron análisis espaciales, y, además, se correlacionaron variables obtenidas. El *software* que se utilizó fue Arc-Gis 9.3, En él se construyó una base de datos con las 9 variables explicativas de la isla de calor del año 2010. Todo ello, a una resolución de 1 km, y para un total de 1.800 píxeles por variable.

Sobre dicha base de datos se realizó el análisis multivariado, en concreto, las regresiones múltiples paso a paso, con el *software* especializado en análisis y procesos estadísticos Statgraphics Centurium XVI. Así, se establecieron relaciones entre una única variable dependiente (criterio) y un conjunto de variables independientes (predictores). El objetivo fue predecir los cambios en la variable dependiente en respuesta a variabilidad de los predictores, lo cual es realizado para evaluar la configuración de la isla de calor urbana de superficie. Los

procedimientos aplicados con las regresiones múltiples por etapas (paso a paso o *stepwise*) son los siguientes:

1. Elaboración de un modelo estadístico de regresión, seleccionando una de las variables independientes que alcance la mayor correlación con la variable dependiente.
2. Se examinan los coeficientes de correlación parcial con el propósito de encontrar una variable adicional que disminuya el error y varianza no explicada que permanece después de la aplicación de la primera ecuación de regresión.
3. Realizar un nuevo cálculo de la ecuación de regresión utilizando dos variables independientes y examinando el valor parcial del estadístico F de la variable original del modelo para evaluar si realiza una contribución estadísticamente significativa (*p-value*). El test F define la probabilidad de aceptación o rechazo de cada una de las variables que ingresa en el modelo de regresión múltiple en función de las varianzas de cada una de ellas. El valor de aceptación debe poseer un *p-value* inferior a 0,05, es decir un nivel de confianza del 95%.
4. Se continúa este procedimiento con todas las variables independientes restantes para considerar si deberían incluirse en la ecuación de mejor explicación del comportamiento de la variable dependiente (hacia adelante). Si se incluye alguna, hay que examinar las variables previamente incorporadas para establecer si deben mantenerse.

### 5.3.1 *Conjunto de variables explicativas*

Las variables consideradas en el modelo han sido la densidad de población y construida, el índice NDVI, el albedo, la distancia a ríos y esteros, la distancia al centro urbano, la distancia a la línea de costa, la radiación solar y elevación topográfica. Su tratamiento y la relación con la isla de calor se detalla a continuación.

#### 1. La densidad de población

La densidad es una variable que indica la intensidad de la ocupación de suelo. Su forma de cálculo se realiza a partir del cociente de población y la unidad de superficie seleccionada (los km<sup>2</sup> y las hectáreas son las más utilizadas).

Es un indicador primordial de la sostenibilidad urbana, y su incremento selectivo contribuye a la conformación de ciudades sustentables. En este sentido, Escolano (2002) señala que los argumentos a favor de la ciudad compacta están sólidamente corroborados por los hechos. No obstante, en las urbes rara vez se presenta un modelo único de ciudad, y la tendencia actual se asemeja a una concentración dispersa (Blowers, 1993; Breheny, 1992 y 1996; Jenks *et al.*, 1996; McLaren, 1992; Newman, 1992; Naredo, 1998a y b; y Rueda, 1998 y 1999).

La densidad de población está correlacionada con diferentes variables, tales como la distancia al centro de la ciudad, los tamaños demográficos, el consumo de energía y la emisión de contaminantes (Shukla y Parikh, 1992), además de otras variables relativas al diseño del espacio urbano (Goodchild, 1994).

La densidad de población disminuye desde el centro hacia la periferia, siguiendo un modelo de función exponencial o potencia negativa de la distancia del núcleo urbano (Batty y Longley, 1994; Batty y Xie, 1994). Esta generalización presenta algunas anomalías empíricas, como el «cráter» originado por la despoblación de los centros de las ciudades; según Escolano (2002) este modelo aparece como una simplificación abusiva de la estructura espacial de la densidad. Es más, hace ya más de cinco décadas, Alonso (1964) fundamentó esta distribución en la teoría microeconómica de los usos de suelo.

La forma de cálculo de la densidad de población fue mediante los datos del censo de población y vivienda del año 2002, y con la utilización de los filtros *kernel* en SIG. Estos filtros permiten obtener distribuciones que reducen la variabilidad de los datos conservando la estructura espacial de los mismos. Más que localizaciones precisas de los fenómenos, el método revela las configuraciones espaciales articuladas por áreas sobresalientes y deprimidas en la superficie de densidades que genera (Escolano, 2002).

El procedimiento se lleva a cabo a partir de los datos localizados en un sistema de coordenadas (x, y), es decir, centroides de población por manzanas censales. Con los filtros se obtienen datos espacialmente continuos de la densidad de población.

El método permite eliminar problemas de estructura administrativa, dado que calcula la densidad efectiva por píxeles regulares de tamaño homogéneo, que para este caso son de 180x180 m; los filtros *kernel* poseen para este estudio un radio de 1.000 m. Posteriormente se filtraron a la rejilla de la ICUs (1 km).

## 2. *La densidad construida*

La densidad construida está fuertemente relacionada y de forma directa (con funciones positivas) con la intensidad de la isla de calor, tanto atmosférica como superficial. En este sentido, se calcula igual que las densidades de población, siendo su expresión «metros cuadrados construidos por hectárea». Cuando existe una baja densidad construida se espera una escasa influencia de esta sobre el clima local. De existir una alta densidad construida, deberán existir frecuentes cañones urbanos caracterizados por una acumulación de calor y una disminución de la ventilación.

Esta densidad reduce la circulación de los vientos y el factor de visión de cielo (Cuadrat *et al.*, 2005), concentrando calor entre los edificios (Oke, 1987; Moreno, 1993). La ciudad de Santiago posee una densidad menor que las ciudades europeas como Barcelona, con un predominio de construcciones de uno o dos pisos. No obstante, la concentración de edificios altos en algunas comunas como Providencia y Las Condes debiera aumentar la isla de calor. Esta variable se obtiene a partir de una base de datos de edificios georreferenciados, donde se calcula la densidad de ellos por pixeles de 1000x1000 m.

## 3. *La cobertura vegetal*

Esta variable se relaciona de forma inversa (función negativa) con la isla de calor. Por ello, una mayor cobertura vegetal reduce los efectos de la ICUs (Oke, 1987; Yuan y Bauer, 2007). Todavía más, en la planificación ambiental urbana se incorpora esta variable a través de áreas verdes públicas y techos verdes (*green roofs*, en inglés), y su potencial para reducir los efectos de la isla de calor son considerables. La forma de obtención de la cobertura de vegetación fue mediante el índice denominado NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que viene

en un producto de las imágenes Terra MODIS. El NDVI fue diseñado por Rouse *et al.* (1974) basado en el concepto de reflectividad vegetal. Este concepto surge del conocimiento de la respuesta espectral de la vegetación en las regiones del rojo e infrarrojo y se define como la fracción del espectro electromagnético en el que la vegetación posee un comportamiento diferenciado de las demás cubiertas existentes y con una menor cantidad de factores que sean perturbadores (ver figura 5.1).

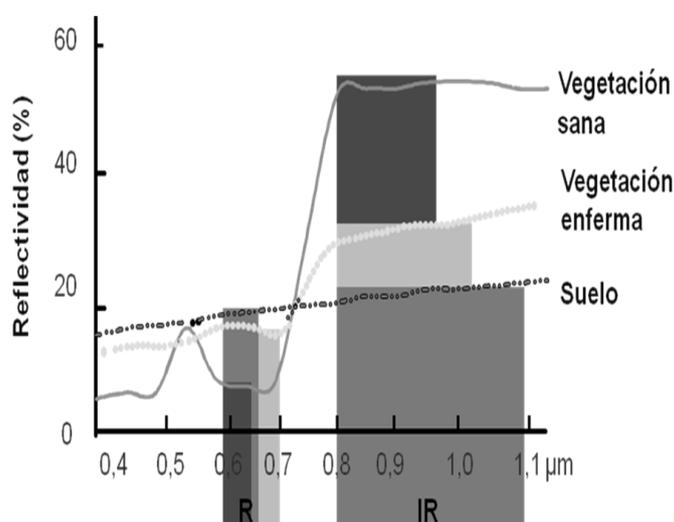


Figura 5.1. Respuesta espectral de la vegetación según el porcentaje de reflectividad.

Extraído de Chuvieco (2002)

Como se observa en la figura anterior, el espectro visible Rojo (R: entre los 0,63 y 0,69  $\mu\text{m}$ ) posee la mínima reflectividad vegetal, debido a que en esta banda se registra la absorción de la clorofila (Rouse *et al.*, 1974), y el espectro del Infrarrojo Cercano (IRC: entre los 0,76 y 0,90  $\mu\text{m}$ ) consigue la máxima reflectividad vegetal, debido a las dispersiones múltiples de la radiación por el interior de la estructura celular, que es controlado por el LAI (*Leaf Area Index* o índice de superficie foliar), según Rouse *et al.* (1974). El NDVI se calcula a partir de los valores digitales de los píxeles, codificados en valores entre 0 y 255, en una imagen de 8 bit (Chuvieco, 2002), aplicando la siguiente expresión.

$$NDVI = \frac{IRC-R}{IRC+R} \quad (1)$$

El índice posee valores entre -1 y 1; los valores positivos indican alta productividad vegetal y los negativos la mínima y nula productividad vegetal. Se utilizaron las imágenes Terra MODIS MOD13A1, que agrupan 16 días en cada escena, y a una resolución de 500 metros. Para transformar sus valores en NDVI, lo único que se debe hacer es multiplicar cada uno de sus píxeles por 0,0001. Las imágenes de NDVI utilizadas fueron 12, correspondientes a los siguientes días:

- 1 al 16 enero de 2010
- 17 de enero al 1 de febrero de 2010
- 7 al 22 de abril de 2010
- 23 de abril al 8 de mayo de 2010
- 12 al 27 de julio de 2010
- 28 de julio al 12 de agosto de 2010
- 13 al 28 de agosto de 2010
- 29 de agosto al 13 de septiembre de 2010
- 30 de septiembre al 15 de octubre de 2010
- 17 de noviembre al 2 de diciembre de 2010
- 3 al 18 de diciembre de 2010
- 19 de diciembre al 3 de enero de 2011

#### 4. El albedo

El albedo urbano (ver figura 5.2) influye notablemente en la reflectividad y la absorción de energía solar por parte de las cubiertas terrestres. Un mayor albedo implica una menor acumulación de calor, y, por consiguiente, una merma de la ICUs. En efecto, dentro de la planificación ambiental de las ciudades se ha introducido la alternativa de techos frescos (*cool roofs*, en inglés), que poseen un elevado albedo, para mitigar la intensidad de la isla de calor urbana. Los techos representan entre el 20 y 25% de las cubiertas urbanas (Zinzi y Agnoli, 2011), y

que ellos sean fríos (posean un mayor albedo) reporta otros beneficios indirectos, por ejemplo, una reducción en el uso de los sistemas de refrigeración (aire acondicionado). Se ha obtenido a partir del producto combinado Terra y Aqua MODIS, denominado MCD43B3. Sobre dicho producto, se seleccionó el albedo del espectro visible.

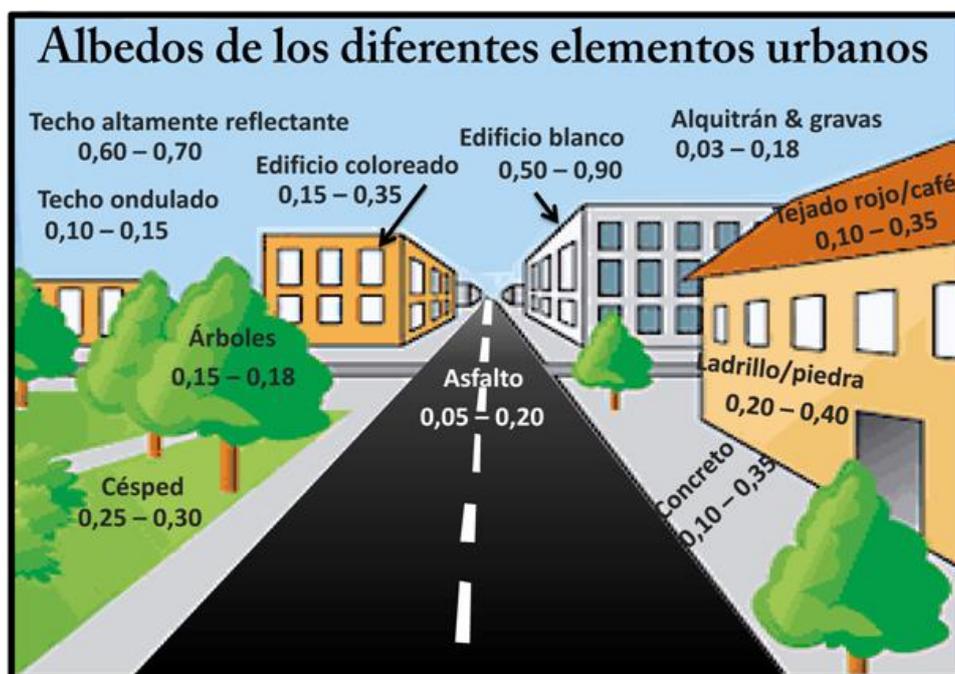


Figura 5.2. Albedos de los diferentes elementos urbanos. Fuente: EPA

(<http://www.epa.gov/hiri/strategies/coolroofs.html>) con modificaciones y traducción propia.

En total, se usaron 26 imágenes de albedo. Como el MCD43B3 es un producto combinado, se capturan imágenes cada 8 días, pero con promedios de 16 días, y con una resolución de 1 km. Las fechas de inicio de cada imagen de albedo que fueron válidas (sin nubes) son:

- 1 de enero de 2010
- 9 de enero de 2010
- 17 de enero de 2010
- 2 de febrero de 2010
- 30 de marzo de 2010
- 7 de abril de 2010
- 15 de abril de 2010
- 1 de mayo de 2010
- 21 de agosto de 2010
- 29 de agosto de 2010
- 30 de septiembre de 2010
- 25 de noviembre de 2010

- 10 de febrero de 2010
- 18 de febrero de 2010
- 6 de marzo de 2010
- 14 de marzo de 2010
- 22 de marzo de 2010
- 2 de junio de 2010
- 18 de junio de 2010
- 26 de junio de 2010
- 12 de julio de 2010
- 13 de agosto de 2010
- 3 de diciembre de 2010
- 11 de diciembre de 2010
- 19 de diciembre de 2010
- 27 de diciembre de 2010

Para obtener el albedo en valores entre 0 y 1 se debió aplicar un factor a cada imagen de 0,001.

### 5. La elevación topográfica

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. La altura está estrechamente relacionada y con una función negativa, con la isla de calor y las temperaturas superficiales (Jo *et al.*, 2001); en este sentido, a mayor altura, menor temperatura.

La ciudad de Santiago posee en su interior diferencias de altura de hasta 300 m, y si consideramos sus cerros puede alcanzar diferencias relativas de 1.200 m. La posición y la elevación topográfica de los territorios ejercen influencias sobre las temperaturas, aumentando o disminuyendo ella en algunos grados Celsius. Está relacionada con la topoclimatología urbana (Romero y Vinagre, 1985). Para considerar esta variable se utilizaron curvas de nivel de equidistancia 50 m, generando una red de triángulos irregulares (TIN, *Triangulated Irregular Network*), que corresponde a una estructura de datos vectorial para lograr una representación continua de la elevación. Una TIN se compone de triángulos, nodos y arcos en las dimensiones x, y, z (Shepard *et al.*, 2006), tal como se muestra en la figura 5.3.

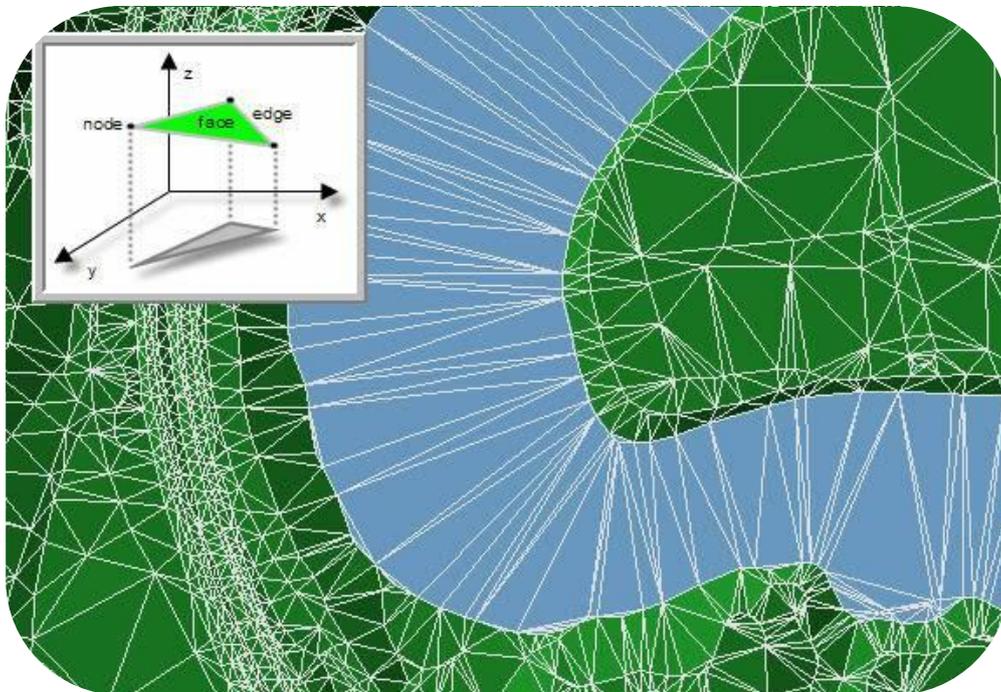


Figura 5.3. Red de triángulos irregulares. Fuente: Shepard *et al.*, 2006

Posteriormente, se transforma la información de las elevaciones de los triángulos irregulares a una retícula de análisis de 1 km, tal como muestra la figura 5.4.

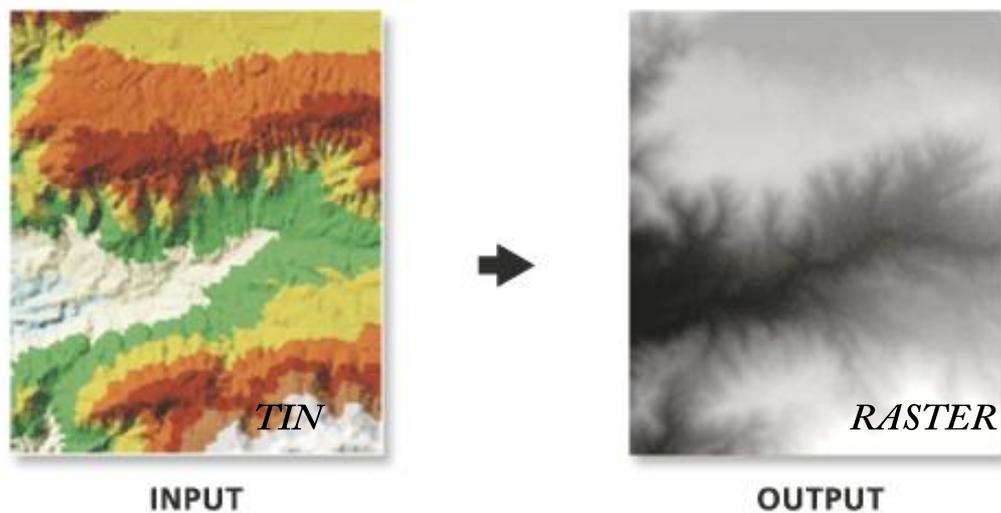


Figura 5.4. Transformación de una TIN en un Raster. Fuente: Shepard *et al.*, 2006

### 6. Las distancias al centro urbano, red hídrica principal y línea de costa

El uso de las distancias euclídeas en la explicación de la ICUs se ha hecho a partir de elementos urbanos (como el centro) y geográficos (como la red hídrica y línea de costa). Dicha información posee un valioso interés para la planificación de nuevas áreas urbanas. La teoría microeconómica de los usos de suelo (Alonso, 1964) establece relaciones que indican que los centros urbanos, principalmente el *central district business* (CDB), posee los precios de suelo más altos, los cuales disminuyen en función de la distancia. Ello influye en la distribución de los usos de suelo y la intensidad de ocupación de ellos en el interior de la ciudad, generando una estructura concéntrica. No obstante, la estructura urbana de Santiago es más compleja que lo señalado, dado que posee una mayor intensidad de ocupación en las comunas donde se localiza la población de mayor ingreso socioeconómico, y un elevado número de actividades dedicadas al comercio y los servicios. En definitiva, una mayor distancia al centro implicará una menor intensidad de la ICUs, es decir, hay una relación inversa entre isla de calor y distancia al centro. Respecto a las distancias a la red hídrica (representada por los ríos y esteros) y la línea de costa, ambas se relacionan de manera inversa con la ICUs, pues la cercanía a ellas está relacionada con brisas e influencia de la humedad como regulador térmico. Las fuentes de humedad son representadas por las redes de drenaje natural (ríos y quebradas), además de la distancia al mar. Cabe recalcar que las fuentes de humedad favorecen la circulación de los vientos, concentrando frío en ellos y sus alrededores más próximos (Romero y Vinagre, 1985). La ciudad de Santiago posee una importante red de dichas fuentes de humedad, representada principalmente por los ríos Mapocho y Maipo.

La forma de cálculo de las distancias euclidianas se realizó con el *software* Arc-Gis 9.3.1, y consiste en la construcción de una superficie o manto continuo de distancias euclídeas a dichos elementos, uno puntual (centro de Santiago) y otros dos, lineales (red hídrica y línea de costa).

### 7. *La radiación solar*

Representa la cantidad de energía calorífica que puede recibir una cubierta terrestre por unidad de superficie ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ ). En general, las ciudades reciben (en comparación con las áreas rurales) menor radiación solar (Landsberg, 1981), incluso un 20% menos en superficies horizontales, producto de las partículas contaminantes que posee la atmósfera urbana. Además, la duración de la insolación puede reducirse en un 15% por las sombras de los edificios.

Desgraciadamente no se dispuso de un modelo digital de terreno tipo LIDAR, en el cual se combinen las elevaciones topográficas y las edificaciones e infraestructuras, lo cual habría permitido conocer la radiación de manera más aproximada a la realidad.

Por lo tanto, sólo se utilizó el modelo digital de elevaciones topográficas, con el cual se calculó la radiación del año 2010. En este sentido, cada punto del mapa posee una latitud y una orientación, lo cual sumado a la declinación del sol nos permite conocer la radiación solar potencial que recibe la superficie durante un año. Se utilizó el *software* Arc-Gis 9.3 para calcular la radiación solar (*Spatial Analysis Tools*, herramienta *Solar Radiation*).

#### 5.3.2 *La modelación por regresión múltiple*

La figura 5.5 representa el esquema metodológico confeccionado para modelar la isla de calor urbana de superficie anual y la correspondiente a las cuatro estaciones. El objetivo del modelo es conocer las variables que más influyen en la distribución espacial de la ICUs. Nótese en la figura 5.5 que se ha clasificado las variables en dos categorías en función de la capacidad de control que se puede

ejercer sobre ellas; además, se marca el signo (positivo o negativo) de las hipotéticas relaciones entre cada variable y la ICUs. Se presentan dos variables que no poseen un signo preestablecido con la ICUs.

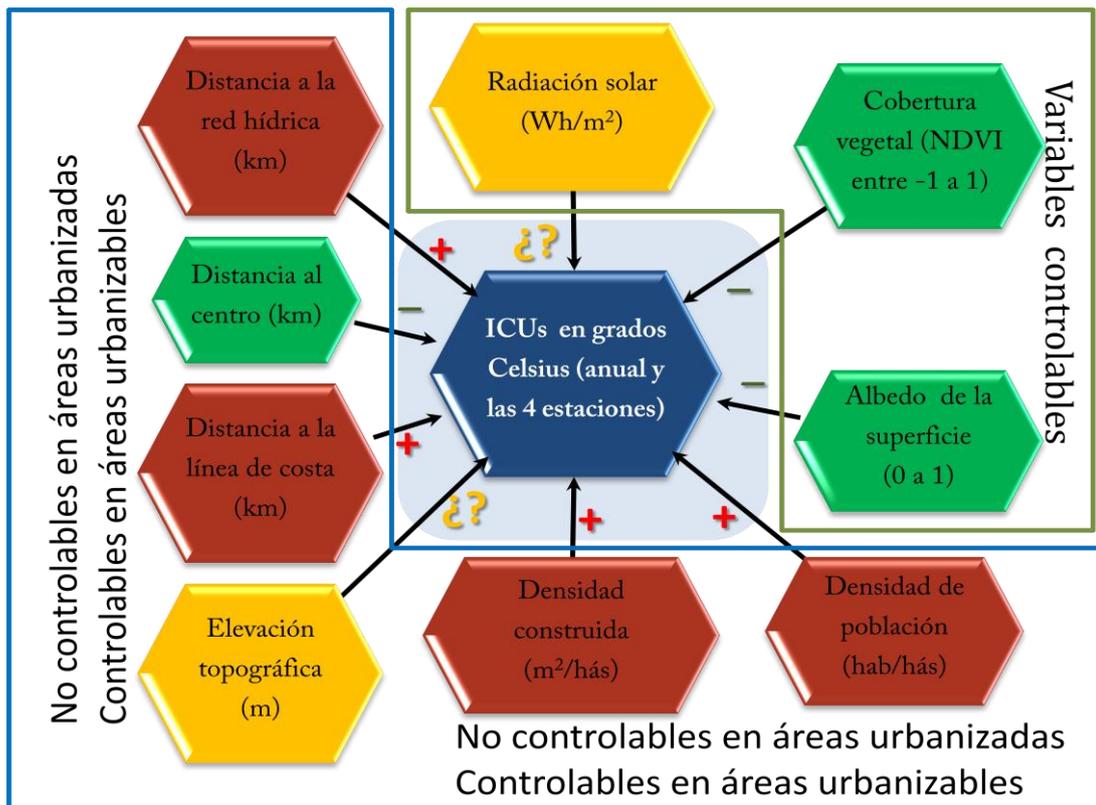


Figura 5.5. Modelo para explicar la isla de calor urbana de superficie del AMS, signos de correlación hipotéticos y clasificación de variables según posibilidad de control en áreas urbanas y urbanizables

## 5.4. Resultados

### 5.4.1. Descripción y representación espacial de las variables explicativas de la ICUS

Los factores que determinan la configuración de la ICUs son representados por variables explicativas que han sido señaladas por la mayoría de las investigaciones de Climatología urbana (Beral-Guyonnet, 1997; Cuadrat *et al.*, 2003 y 2005; Hogan y Ferrick, 1998). Entre ellas destacan las condiciones topográficas del sitio de emplazamiento de la ciudad, las densidades construidas y de población, las coberturas vegetales, el albedo, la distancia a fuentes húmedas (ríos, quebradas y mar), la distancia al centro de la ciudad y la radiación solar. Es ineludible señalar que ninguna de estas variables es capaz de explicar por sí sola la distribución espacial de la isla de calor urbana de superficie, por lo que deben ser consideradas en conjunto.

Las estadísticas promedios resultantes de las variables explicativas consideradas se observan en la tabla 5.1. En ella, se muestra que las áreas rurales y urbanas difieren en prácticamente todas las variables, con la excepción de la elevación topográfica, radiación solar, distancia a la línea de costa y los albedos de verano y otoño. Así, la densidad de población es mucho mayor en la zona urbana (83,3 en el área urbana / 5,3 en las áreas rurales), y la densidad construida también es notoriamente más alta en la ciudad. La vegetación, en cambio, es más importante en las áreas rurales (sobre un 36%).

Tabla 5.1. Promedios y diferencias porcentuales de las variables explicativas de las ICUs entre áreas urbanas y rurales en el AMS.

Variables explicativas	Rural	Urbano	Total general	Dif. urbano rural (%)
Albedo anual	0,063	0,079	0,068	26%
Albedo verano	0,067	0,081	0,072	20%
Albedo otoño	0,067	0,080	0,071	20%
Albedo invierno	0,054	0,077	0,061	45%
Albedo primavera	0,060	0,077	0,066	29%
NDVI anual	0,480	0,294	0,420	-39%
NDVI verano	0,468	0,300	0,414	-36%
NDVI otoño	0,429	0,273	0,378	-36%
NDVI invierno	0,507	0,286	0,436	-44%
NDVI primavera	0,489	0,312	0,432	-36%
Distancia ríos y esteros (km)	2,566	4,295	3,125	67%
Distancia a la costa (km)	82,851	90,133	85,205	9%
Distancia al centro (km)	23,121	10,857	19,156	-53%
Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	4.097,229	4.130,344	4.107,936	1%
Elevación topográfica (m)	554,870	582,045	563,657	5%
Densidad población (hab./hás)	5,257	83,317	30,496	1485%
Densidad construida (m <sup>2</sup> /hás)	133,977	2.463,153	887,077	1738%

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la distribución de la vegetación en el interior de la ciudad, se aprecia que es escasa, porque hay pocas áreas verdes, y, además, poseen un tamaño pequeño (ver figura 5.2), con excepción de algunos parches verdes de gran tamaño localizados en parques y canchas de golf del sector oriente. Hacia fuera del límite urbano la situación es contrapuesta, pues existe una alta concentración de parches vegetales destinados a cultivos (sur, norte y poniente de la ciudad) y vegetación arbustiva en el sector del piedemonte andino. Lo anterior se relaciona de manera inversa con el albedo, que es justamente más bajo en áreas con mayor cobertura de vegetación.

Las densidades de población posee, una configuración de múltiples núcleos de concentración demográfica en las zonas sur y poniente de Santiago, y principalmente fuera del anillo de circunvalación Américo Vespucio. El entorno rural posee bajas densidades. En cuanto a la densidad construida, se aprecia que la ciudad de Santiago presenta en su mayoría densidades entre 1.000 y 5.000 m<sup>2</sup> por hectárea, característica que indica la preferencia por el crecimiento en extensión de la ciudad (viviendas y construcciones de baja altura por lo general). De hecho, en la figura 5.2 se muestra que las zonas más densamente construidas se concentran en el área conformada entre el centro de la ciudad y las comunas del oriente, cuyos edificios alcanzan alturas promedios de unos 12 pisos, y densidades superiores a 20.000 m<sup>2</sup> por hectárea. Esta distribución reproduce en buena medida la variable de distancia euclidiana al centro, y se explica por los mayores precios del suelo del sector. Ello conlleva la presencia de actividades no residenciales, como oficinas profesionales y comercio, además de residencias derivadas de las políticas de renovación urbana en el centro de Santiago (Ortiz y Escolano, 2005).

Respecto a la topografía del emplazamiento del AMS, las diferencias altimétricas en el interior de la ciudad sólo alcanzan los 300 m, entre las áreas urbanizadas del piedemonte andino por el oriente y el límite urbano del poniente de la ciudad. El predominio de pendientes suaves en la cuenca responde a la escasa diferencia de altura. El plano inclinado que se establece entre el oriente más alto y el poniente más bajo se ve interrumpido por la presencia de algunos cerros aislados y estribaciones de la Cordillera de los Andes, específicamente los cerros San Cristóbal, Renca y Chena. Dichos accidentes del relieve afectan al clima interno de la ciudad, pues generan y bloquean la circulación de vientos de superficie. Esto a su vez influye directamente en la radiación solar potencial. En efecto, el piedemonte andino (fachada oriental) recibe más energía que las laderas de la Cordillera de la Costa. Además, es bastante similar en su patrón espacial con la distancia a la línea de costa.

Finalmente, las distancias a los ríos y esteros evidencian que el centro norte de Santiago y el oriente están más cercanos a algún curso de agua, quedando las comunas del centro sur más alejadas de ellos, y por más de 10 km (ver figura 5.6)

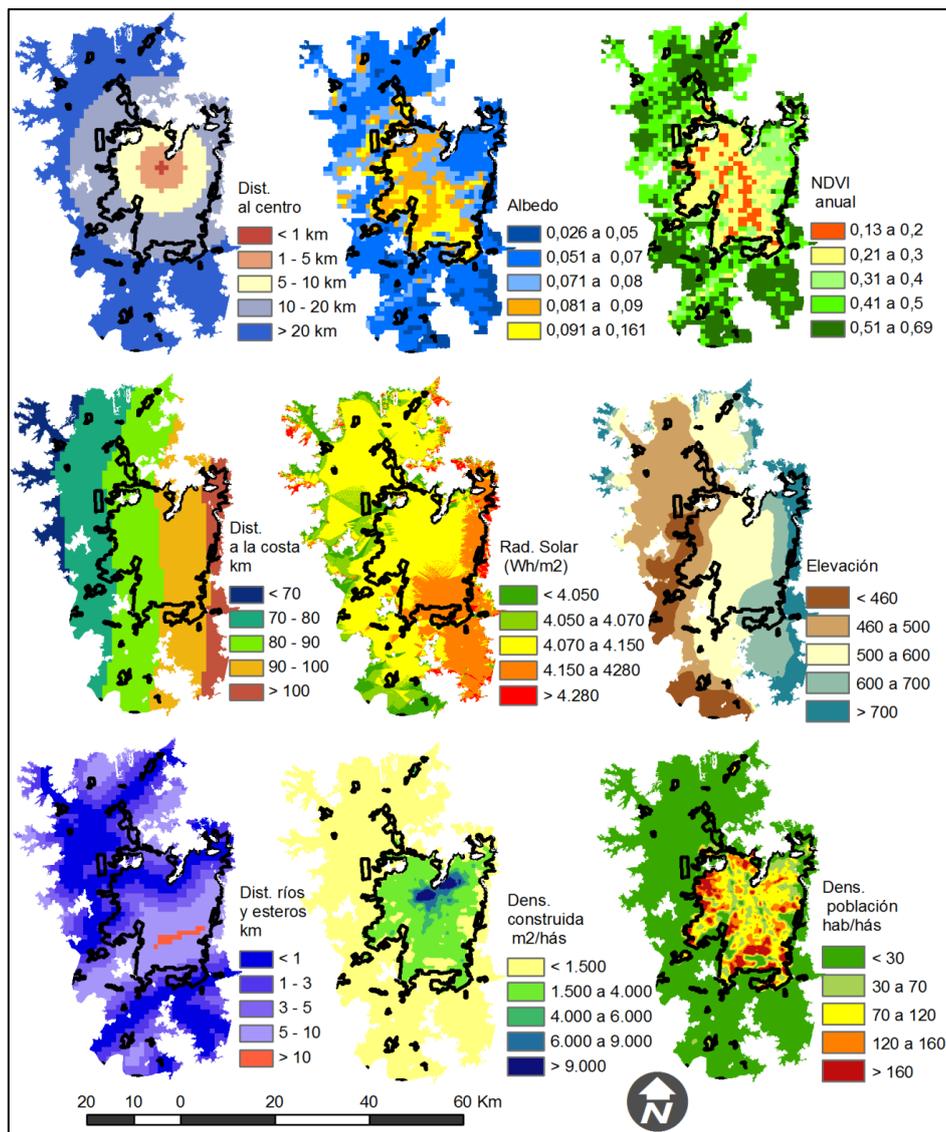


Figura 5.6. Mapas de las variables explicativas de la isla de calor urbana de superficie del AMS. En la figura se tienen de izquierda a derecha la distancia al centro, el albedo y el NDVI (arriba), la distancia a la costa, la radiación solar y la elevación (centro), y la distancia a ríos y esteros, la densidad construida y la densidad de población (abajo)

#### *5.4.2. Modelos de regresión múltiple por pasos para explicar la ICUS*

Se realizó la modelación de la isla de calor urbana de superficie del AMS considerando nueve variables explicativas. Ellas fueron correlacionadas de modo agregado para el año 2010 (42 de los 53 mapas iniciales presentaron ICUs), y además, para las 4 estaciones. El método de regresión múltiple utilizado fue de tipo lineal, y de pasos sucesivos hacia adelante.

##### *Modelo anual de la ICUs*

Al aplicar el modelo anual de la ICUs, se obtiene que 8 de las 9 variables son estadísticamente significativas con un *p-value* menor de 0,05, es decir, significativas con un nivel de confianza del 95%. La única variable descartada por el modelo anual es la densidad de población.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del modelo final alcanza un nivel de explicación de un 73,98% de la varianza de la ICUs anual. Y el  $R^2$  ajustado un 73,85%, siendo este último el apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes. El error estándar estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es sólo 0,64, y el error absoluto medio (MAE) de 0,5. El test estadístico de Durbin-Watson da un valor 0,592. Puesto que el *p-value* es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95%. En la tabla 5.2 se indican los valores y estadísticos de las diferentes variables de la ecuación final.

Tabla 5.2. Resultado del modelo general de regresión lineal múltiple de la ICUs anual

Variables	Estimación de la ecuación	Error estándar	Estadístico T	p-value
Constante	11,9945	0,7495	16,0036	0,0000
Elevación topográfica	0,0007	0,0003	2,8220	0,0048
Densidad construida	0,0001	0,0000	6,3296	0,0000
NDVI anual	-5,0040	0,2716	-18,4217	0,0000
Albedo anual	-15,3110	1,9739	-7,7567	0,0000
Distancia a ríos y esteros	0,0192	0,0062	3,0860	0,0020
Distancia a la línea de costa	0,0135	0,0032	4,1817	0,0000
Distancia al centro	-0,0628	0,0028	-22,1784	0,0000
Radiación solar	-0,0016	0,0002	-8,6390	0,0000

Fuente: Elaboración propia

Para determinar si el modelo podía ser simplificado, se examinó la tabla 5.2. En ella se muestra que el *p-value* más alto de las variables independientes es de 0,004, y corresponde a la elevación topográfica. Puesto que su *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 de las ocho variables del modelo, que genera la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 ICUs = & 11,995 + 0,000736 \times \text{Elevación} + 0,0000897 \times \text{Dens.construida} - 5,004 \\
 & \times \text{NDVI} - 15,311 \times \text{Albedo} + 0,01916 \times \text{Dist.ríos y esteros} + 0,01347 \\
 & \times \text{Dist.costa} - 0,06283 \times \text{Dist.centro} - 0,00159 \times \text{Rad.solar}
 \end{aligned}$$

Los signos indican correlación directa entre ICUs, y la elevación, la densidad construida, la distancia a ríos y esteros y la distancia a la costa. Mientras que la correlación es inversa entre ICUs, y el NDVI, el albedo, la distancia al centro y la radiación solar.

Modelo de la ICUs de verano

El modelo de la estación de verano para la ICUs considera un total de 7 variables explicativas, estadísticamente significativas, y un nivel de confianza del 95%. Las variables excluidas del modelo de la ICUs de verano corresponden a la densidad de población y la distancia a los ríos y esteros.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del modelo revela un nivel de explicación de un 80,16% de la varianza de la ICUs. Y el  $R^2$  ajustado es de un 80,08%. El error estándar estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es sólo 0,61, y el error absoluto medio (MAE) es de 0,48, es decir, existe un mejor ajuste que en el modelo anual en verano. El test estadístico de Durbin-Watson es de 0,693. Dado que el *p-value* es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95%. En la tabla 5.3 se recogen los valores y estadísticos de las diferentes variables para el verano.

Tabla 5.3. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple de la ICUs de verano

VARIABLES	Estimación de la ecuación	Error estándar	Estadístico T	p-value
Constante	9,5037	0,6970	13,6344	0,0000
Elevación topográfica	-0,0016	0,0002	-6,8013	0,0000
Densidad construida	0,0001	0,0000	6,0490	0,0000
NDVI de verano	-5,4786	0,2089	-26,2268	0,0000
Albedo de verano	-14,2087	1,7414	-8,1593	0,0000
Distancia a la línea de costa	0,0342	0,0030	11,3101	0,0000
Distancia al centro	-0,0680	0,0027	-25,5022	0,0000
Radiación solar	-0,0010	0,0002	-5,7209	0,0000

Fuente: Elaboración propia

No es necesario simplificar el modelo, pues los *p-value* alcanzan una confianza de las variables de un 99%. Así, con las siete variables se genera la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 ICUs_{\text{verano}} = & 9,504 - 0,00165 \times \text{Elevación} + 0,0000790 \times \text{Dens. construida} - 5,479 \\
 & \times \text{NDVI} - 14,209 \times \text{Albedo} + 0,0342 \times \text{Dist. costa} - 0,0680 \\
 & \times \text{Dist. centro} - 0,001 \times \text{Rad. solar}
 \end{aligned}$$

Los signos de la expresión muestran una correlación positiva entre ICUs, y la densidad construida y la distancia a la costa. Mientras que la correlación es inversa entre ICUs, y la elevación, en NDVI, el albedo, la distancia al centro y la radiación solar.

#### Modelo de la ICUs de otoño

Los resultados de otoño incorporan las 9 variables seleccionadas en la regresión por pasos sucesivos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) explica la ICUs entre un 72,93% y un 72,78%, este último, el ajustado. El error estándar estimado es sólo 0,78, y el error absoluto medio (MAE) es de 0,60. El test estadístico de Durbin-Watson fue de 0,692. Dado que el *p-value* es menor que 0,05, existe una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95%. En la tabla 5.4 se indican los valores y estadísticos de las diferentes variables para el otoño.

Tabla 5.4. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple de la ICUs de otoño

Variables	Estimación de la ecuación	Error estándar	Estadístico T	p-value
Constante	12,049	0,894	13,484	0,000
Elevación topográfica	0,003	0,000	9,257	0,000
Densidad de población	0,001	0,001	2,051	0,040
Densidad construida	0,000	0,000	9,974	0,000
NDVI de otoño	-5,279	0,284	-18,616	0,000
Albedo de otoño	-27,250	2,229	-12,223	0,000
Distancia a ríos y esteros	0,045	0,008	5,910	0,000
Distancia a la línea de costa	0,019	0,004	4,690	0,000
Distancia al centro	-0,061	0,003	-17,721	0,000
Radiación solar	-0,002	0,000	-7,586	0,000

Fuente: Elaboración propia

Al examinar la tabla 5.4, se muestra que el *p-value* más alto de las variables independientes es de 0,04, y corresponde a la densidad de población. Puesto que su *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 de las nueve variables del modelo, que genera la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 ICUs_{otoño} = & 12,049 + 0,00295 \times Elevación + 0,00105 \times Dens.población + 0,0001699 \\
 & \times Dens.construida - 5,279 \times NDVI - 27,250 \times Albedo + 0,0450 \\
 & \times Dist.ríos y esteros + 0,0187 \times Dist.costa - 0,0610 \times Dist.centro \\
 & - 0,00172 \times Rad.solar
 \end{aligned}$$

Los signos de la expresión muestran una correlación positiva entre ICUs, y la elevación topográfica, la densidad de población y construida, la distancia a los ríos y esteros y la distancia a la línea de costa. Mientras que la correlación es inversa entre ICUs, y el NDVI, el albedo, la distancia al centro y la radiación solar.

*Modelo de la ICUs de invierno*

Los resultados de invierno incorporan 7 de las 9 variables seleccionadas en la regresión lineal por pasos sucesivos, siendo descartadas la elevación y la densidad de población. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que explica la ICUs oscila entre 47,61% y un 47,39%, siendo este último valor el ajustado. El error estándar estimado es de sólo 0,69, y el error absoluto medio (MAE) es de 0,54. El test estadístico de Durbin-Watson da un valor de 0,489. Dado que el  $p$ -value del Durbin-Watson es menor que 0,05, existe una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95%. En la tabla 5.5 se recogen los valores y estadísticos de las diferentes variables para el invierno.

Tabla 5.5. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple de la ICUs de invierno

Variables	Estimación de la ecuación	Error estándar	Estadístico T	p-value
Constante	9,5571	0,7649	12,4943	0,0000
Densidad construida	0,0002	0,0000	12,7560	0,0000
NDVI de invierno	-1,1623	0,2260	-5,1422	0,0000
Albedo de invierno	-19,3269	1,8444	-10,4790	0,0000
Distancia a ríos y esteros	0,0500	0,0067	7,4914	0,0000
Distancia a la línea de costa	0,0249	0,0021	11,7700	0,0000
Distancia al centro	-0,0352	0,0029	-12,3328	0,0000
Radiación solar	-0,0017	0,0002	-9,1213	0,0000

Fuente: Elaboración propia

Dado que los  $p$ -value son menores a 0,05 en la tabla 5.5, no se debería eliminar ninguna de las siete variables del modelo, que genera la siguiente expresión:

$$ICUs_{invierno} = 9,557 + 0,000189 \times Dens. construida - 1,162 \times NDVI - 19,327 \\ \times Albedo + 0,0500 \times Dist. ríos y esteros + 0,0249 \times Dist. costa \\ - 0,0352 \times Dist. centro - 0,00174 \times Rad. solar$$

Los signos de la expresión muestran una correlación positiva entre ICUs, y la densidad construida, la distancia a los ríos y esteros y la distancia a la línea de costa. Mientras que la correlación es negativa entre ICUs, y el NDVI, el albedo, la distancia al centro y la radiación solar.

#### Modelo de la ICUs de primavera

Para primavera, el modelo de regresión múltiple por pasos sucesivos hacia adelante ha incorporado 8 de las 9 variables iniciales, quedando fuera la distancia a ríos y esteros. El  $R^2$  alcanza entre un 75,15% y un 75,03% de varianza explicada de la ICUs. El error estándar estimado es de 0,57, y el error absoluto medio (MAE) es de 0,45. El test estadístico de Durbin-Watson es de 0,65. Dado que el  $p$ -value del Durbin-Watson es menor que 0,05, existe una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95%. En la tabla 5.6 se indican los valores y estadísticos de las diferentes variables para la primavera.

Tabla 5.6. Resultado del modelo de regresión lineal múltiple de la ICUs de primavera

Variables	Estimación de la ecuación	Error estándar	Estadístico T	p-value
Constante	10,2249	0,6508	15,7118	0,0000
Elevación topográfica	-0,0018	0,0002	-7,9167	0,0000
Densidad de población	-0,0009	0,0004	-2,4527	0,0142
Densidad construida	0,0001	0,0000	5,1760	0,0000
NDVI de primavera	-4,3574	0,2175	-20,0294	0,0000
Albedo de primavera	-10,8515	1,7740	-6,1171	0,0000
Distancia a la línea de costa	0,0131	0,0028	4,6652	0,0000

Distancia al centro	-0,0670	0,0025	-26,8069	0,0000
Radiación solar	-0,0010	0,0002	-6,3720	0,0000

Fuente: Elaboración propia

Puesto que el *p-value* más alto de la tabla 5.6 es de sólo 0,01, no se debería eliminar ninguna de las 8 variables del modelo, que genera la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 ICUs_{primavera} = & 10,225 - 0,00184 \times Elevación - 0,000923 \times Dens. población \\
 & + 0,000063 \times Dens. construida - 4,357 \times NDVI - 10,8520 \times Albedo \\
 & + 0,0131 \times Dist. costa - 0,0670 \times Dist. centro - 0,00103 \times Rad. solar
 \end{aligned}$$

Los signos de la expresión anterior revelan que la correlación es positiva entre ICUs, y la densidad de construida y la distancia a la línea de costa. Mientras que la correlación es negativa entre ICUs, y la elevación topográfica, la densidad de población, el NDVI, el albedo, la distancia al centro y la radiación solar.

#### 5.4.3. Sensibilidad de las ecuaciones de regresión múltiple por pasos para explicar la ICUs

En general, son 5 las variables que afectan significativamente (en más de 1°C) a la temperatura de la isla de calor urbana de superficie del AMS. Ellas corresponden a la densidad construida, el NDVI, el albedo, la distancia al centro y la radiación solar (ver tabla 5.7). El resto de variables, no se presentan en todos los modelos (la elevación topográfica, la densidad de población, la distancia a ríos y esteros y la distancia a la línea de costa), y dos de ellas afectan de modo opuesto dependiendo de la estación del año. Es el caso de la elevación topográfica (que posee una relación con la ICUs inversa en verano y primavera y positiva en los modelos de otoño y anual) y la densidad de población (relación positiva en otoño e inversa en primavera).

Tabla 5.7. Respuesta o sensibilidad de los cambios en las variables de los modelos de la Isla de Calor Urbana de superficie del AMS

Cambios en las variables del modelo de regresión múltiple	$\Delta$ ICUs anual	$\Delta$ ICUs verano	$\Delta$ ICUs otoño	$\Delta$ ICUs invierno	$\Delta$ ICUs primavera
Aumento de la elevación en 300 m	! 0,21	! -0,48	! 0,90	-	! -0,54
Incremento de 100 a 200 habitantes por hectárea (densidad de población)	-	-	! 0,10	-	! -0,09
Duplicación de una densidad construida inicial de 10.000 m <sup>2</sup> /hás	✖ 1,00	✖ 1,00	✖ 1,70	✖ 2,00	✖ 1,00
Implementación de áreas verdes (NDVI de 0 a 1)	✔ -5,00	✔ -5,48	✔ -5,28	✔ -1,16	✔ -4,36
Duplicación del albedo desde un 10% a un 20%	✔ -1,53	✔ -1,42	✔ -2,73	✔ -1,93	✔ -1,09
Alejamiento de 5 km de un río o estero	! 0,10	-	! 0,23	! 0,25	-
Distanciamiento de 10 km de la línea de costa	! 0,14	! 0,34	! 0,19	! 0,25	! 0,13
Alejamiento del centro en 20 km	✔ -1,26	✔ -1,36	✔ -1,22	! -0,70	✔ -1,34
Aumento de una radiación solar de 3.000 Wh/m <sup>2</sup> a 4.000 Wh/m <sup>2</sup>	✔ -1,60	✔ -1,00	✔ -2,00	✔ -1,70	✔ -1,00

Fuente: Elaboración propia. ✔ Indica efectos muy positivos sobre la ICUs, ! señala impactos positivos moderados sobre la ICUs, ! indica efectos negativos sobre la ICUs, y ✖ significa repercusiones muy negativas sobre la ICUs.

En la figura 5.7 se puede apreciar el resultado contrastado entre la ICUs observada y la modelada. A pesar de que los patrones espaciales son similares y existen altas correlaciones, parece ser que la isla de calor del modelo sobrestima sus

valores en el centro de la ciudad y los subestima en las áreas frías rurales y en las áreas cálidas de las laderas de la Cordillera de la Costa.

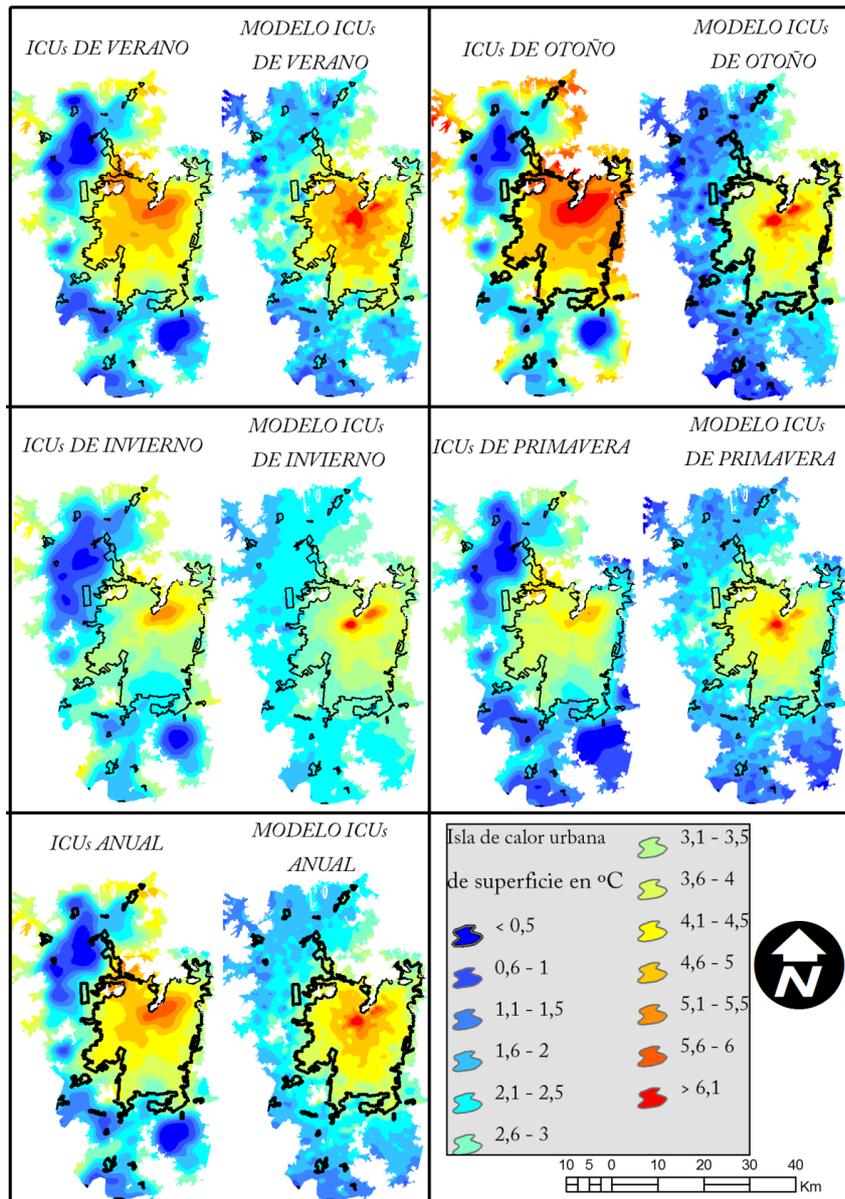


Figura 5.7. Mapas de la ICUs observada y de la estimación de los modelos de la ICUs para verano, otoño, primavera, invierno y anual, considerando 42 imágenes del año 2010

### 5.5. *Discusión*

El conocimiento de las variables más influyentes sobre el campo térmico de las ciudades ha sido asunto permanente de la Climatología urbana. En primera instancia, Oke (1987) plantea que la magnitud de las diferencias de temperatura entre la ciudad y su entorno rural depende de los tamaños poblacionales, ajustando modelos de regresión logarítmicos a tipos de ciudades europeas y norteamericanas. Sin embargo, no se debe desconocer que existen otras variables que intervienen en el campo térmico, como la topografía de la ciudad (Cuadrat *et al.*, 2003 y 2005), la humedad del aire y de la superficie (Peña y Romero, 2005), la presencia de vegetación (Yuan y Bauer, 2007; Romero y Sarricolea, 2006), el albedo (Peña, 2008), la distribución de las densidades de población y edificada (Cuadrat *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2001), entre otras. En este sentido, los análisis de Oke (1987) asumen una ciudad compacta, regular y homogénea, en que las densidades y los usos del suelo disminuyen su intensidad en forma sistemática y sostenida desde el centro a la periferia. Cabe destacar que ello es análogo a la variable distancia al centro de la ciudad.

La ciudad latinoamericana tipo es un mosaico complejo, donde a alta resolución (menos de 1 km) las variables explicativas de las islas de calor cambian rápidamente, predominando los archipiélagos de calor antes que la forma de domo típica. Pero, al trabajar a una resolución moderada (igual o mayor a 1 km) aparece un patrón bastante definido de la isla de calor, lo cual justifica incorporar variables que a escala de detalle (90 o 120 m) dan bajas correlaciones con la ICUs, como ocurre con las distancias a fuentes húmedas y al centro urbano.

Las investigaciones que abordan el tema de las relaciones entre los usos del suelo y las temperaturas han sido recientes, pues las primeras indagaciones en este sentido tenían su foco en el comportamiento radiativo de los materiales que

componen la ciudad (cemento, asfalto, ladrillo, etc.), tal como indicó Moreno (1993). Actualmente, el análisis plantea conocer sinérgicamente las formas de hacer ciudad, a lo cual Oke (2004) ha denominado distritos climáticos, y que han sido clasificados según la forma tridimensional de las edificaciones, materialidad, entorno y régimen de vientos. En este sentido, existen métodos menos sofisticados de lograr estas unidades de gestión a través de los usos de suelo (Chen *et al.*, 2001). Los resultados obtenidos por medio de la teledetección indican que la ciudad de Santiago está sometida a una isla de calor urbana concéntrica al centro de la ciudad y el sector oriente. Es decir, durante la madrugada, varias horas después de la puesta de sol, toda la ciudad, y específicamente el sector oriente, muestran un marcado desarrollo de la isla de calor de superficie, siendo la inercia térmica de los materiales y el reducido factor de visión de cielo algunas de las variables que explican esto, como sucede en la mayoría de las ciudades.

Los modelos de regresión múltiple generados para explicar los distintos patrones de la isla de calor urbana de superficie del año 2010 se ajustan a la teoría, pues la densidad construida es una variable que explica en buena medida la ICUs, como en los casos estudiados por Yamashita *et al.* (1986), Bello (1994) y Fernández *et al.* (2004). Debemos aclarar que al considerar densidad construida se encuentran explícitas otras dimensiones del urbanismo, tales como rugosidad (altura de edificios), proporción de áreas verdes y terrenos libres, así como, también, el factor de visión de cielo.

Otra variable muy influyente corresponde a la vegetación, calculada mediante el NDVI. El comportamiento de esta variable permite señalar que las áreas verdes tienden a estar más frescas que su entorno durante la noche, tal como afirman Yuan y Bauer (2007), y regula muy eficazmente la temperatura de las cubiertas. Por lo tanto, su aumento es una medida de mitigación estratégica para suavizar la ICUs, conjuntamente con el albedo. Cabe recordar que el albedo del AMS es en

promedio muy bajo, y sólo duplicándolo se alcanza una reducción importante de la isla de calor.

La densidad de población como variable explicativa en el AMS es un indicador menos importante de lo esperado inicialmente, pues la mayor densidad de población no se localiza en el centro de la ciudad, sino más bien se distribuye de modo peri-central (mayor en el entorno a la circunvalación Américo Vespucio), lo cual refuerza la consideración de la distancia al centro como una variable explicativa.

Merece una atención especial que la elevación topográfica no sea un factor explicativo de mayor peso, pues trabajos anteriores de Beral-Guyonnet (1997) y Cuadrat *et al.* (2003 y 2005) coincidían en que es una variable muy relevante, y relacionada de manera inversa con la isla de calor. Hemos encontrado que en el modelo de invierno no aparece, y que en el modelo anual y de otoño se relaciona positivamente con la isla de calor, es decir, a mayor altura mayor intensidad de la isla de calor; lo cual sugiere la existencia de inversiones térmicas.

La radiación solar es una variable que resultó estadísticamente significativa para explicar la ICUs, y de manera inversa (a mayor radiación menor isla de calor). Esto parece muy discutible, pero, si se profundiza en la relación, es fácil de entender por qué el modelo señala esta influencia. Las áreas rurales reciben mayor energía solar, pues no están sometidas a una atmósfera contaminada, y no existen edificios que generen sombras, es decir, se corresponden con las áreas más irradiadas por el sol, pero en la noche retornan rápidamente la energía al espacio. Mientras que las áreas urbanas (teóricamente con menos radiación solar recibida) por la inercia de sus materiales retienen el calor. Por lo tanto, esta variable se debe reinterpretar, considerando que da cuenta de usos de suelo, rugosidad de la superficie y contaminación.

Aplicando los resultados de las ecuaciones de la isla de calor urbana de superficie del año 2010, se puede afirmar que:

1. Al aumentar de 10.000 m<sup>2</sup> a 20.000 m<sup>2</sup> construidos por hectárea la temperatura deberá incrementarse entre 1°C y 2°C (tabla 5.7). Esta afirmación está sometida a conservar invariable los materiales y otros elementos urbanísticos típicos de Santiago. No obstante, sin promover un aumento o disminución de la densidad construida se pueden alcanzar variaciones térmicas similares cambiando normas urbanísticas asociadas a pavimentos porosos en las calles, modificaciones en el albedo, materiales con menor inercia, etc.
2. Implementando de áreas verdes (NDVI=1) un espacio sin vegetación (NDVI=0), la temperatura se verá reducida entre 1,2°C y 5,5°C (tabla 5.7). Santiago posee una desigual distribución de áreas verdes que en muchos casos genera desigualdades socio-climáticas. Se debe mejorar la distribución de áreas verdes, no sólo por sus benéficos efectos sobre las temperaturas, sino también como zonas de esparcimiento, reducción de la impermeabilización y aumento de la humedad en el aire.
3. Al duplicar la densidad de población de 100 a 200 habitantes por hectárea, la ICUs se ve muy escasamente afectada (entre -0,1°C y 0,1°C) (tabla 5.7). El AMS en promedio posee densidades menores a 100 habitantes por hectárea. Es recomendable favorecer el aumento de la densidad de población más que la expansión física de la ciudad, siempre y cuando se mejoren los criterios urbanísticos para mitigar los efectos de la isla de calor, creando áreas verdes públicas para mejorar la calidad de vida de las personas.

4. La distancia al centro afecta inversamente a la ICUs, es decir, un aumento en 20 km de la distancia al centro produce una reducción de 0,7°C y 1,4°C de la ICUs (tabla 5.7). Ello no debe ser una invitación a un tipo de urbanismo disperso, pues Oke (1987) señala que las ciudades más dispersas poseen una isla de calor más intensa que las urbes compactas. Por lo tanto, esta variable da cuenta de un hecho natural, pero no de los impactos de una ciudad expansiva desde el punto de vista territorial.
5. Un incremento en 300 m de altura en el AMS afecta a la ICUs entre -0,5°C y 0,9°C (tabla 5.7). Esta variable es sólo controlable en zonas no urbanizadas. Y pese a su escaso impacto en la isla de calor, parece ser muy importante en situaciones de inversión térmica.
6. Modificar el albedo de la ciudad en promedio desde un 10% a un 20% produce una reducción de la ICUs de entre 1,1°C y 2,7°C (tabla 5.7). Esto es muy significativo, dado que dicho aumento del albedo es bastante modesto. Se ensayó incrementarlo al 90% (*cool roofs*), y se alcanzó una mitigación superior a 9°C. Es decir, basta con hacer obligatorio el uso de colores claros en los tejados y paredes para que la isla de calor no sea tan intensa.

Todas las variables explicativas que han sido utilizadas se pueden controlar. El planificador territorial y el gestor ambiental pueden, a través de instrumentos específicos, orientar el desarrollo urbano en función del conocimiento de estos resultados, y, a la vez, definir medidas de mitigación en los espacios ya urbanos para mejorar la gestión. Cada variable que permita mitigar los efectos de la isla de calor puede ser considerada indicador de la ICUs en una Agenda local 21. Podemos, por ejemplo, a partir de la situación actual de las áreas construidas, proponer medidas para que aumenten las áreas verdes y el albedo, y así, conseguir

una reducción de las ICUs de 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, albedo, densidades construidas y de población.

## 5.6. Bibliografía

Alonso, W. (1964). *Location and land use: toward a general theory of land rent* (First ed.). Cambridge, England: Harvard University Press.

Batty, M., & Longley, P. (1994). *Fractal Cities. A Geometry of Form and Function* (First ed.). London, England: Academic Press.

Batty, M., & Xie, Y. (1994). Urban analysis in a GIS environment: population density modelling using ARC/INFO. In S. Fotheringham, & P. Rogerson, *Spatial Analysis and GIS* (pp. 189-219). London: Taylor and Francis.

Bello, V. (1994). La isla de calor y los usos del suelo en Guadalajara. *Serie geográfica* (4), 83-97.

Beral-Guyonnet, I. (1997). Analyse spatiale des températures mensuelles dans l'agglomération lyonnais. *Revue de Géographie de Lyon* (72), 263-266.

Blowers, A. (1993). *Planning for a sustainable environment. A Report by the Town and Country Planning Association*. London: Earthscan Publications Limited.

Breheny, M. (1996). Centrists, Decentrists and Compromisers: Views on the Future of Urban Form. En A. Jenks, I. Burton, & R. Williams, *The Compact City: A Sustainable Urban Form?* (First ed., págs. 13-35). London: Routledge.

Breheny, M. (1992). The Compact City: An Introduction. *Built Environment*, 4 (18), 241-246.

Chen, P., Liew, S., & Kwon, L. (2001). Dependence of urban temperature elevation on land cover types. *22nd Asian conference on remote sensing*, (p. 5). Singapore.

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde la tierra*. Barcelona, España: Ariel Ciencia.

Cuadrat, J., Saz, M., & Vicente-Serrano, S. (2003). *Surface wind direction influence on spatial patterns of urban heat island in Zaragoza (Spain)*. *Geophysical Research Abstracts*, 5: 02592. *European Geophysical Society*. Retrieved Agosto 14, 2007, from <http://www.cosis.net/>

Cuadrat, J., Vicente-Serrano, S., & Saz, M. (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.* (40), 311-327.

Escolano, S. (2002). Densidad de población y sustentabilidad en la ciudad de Zaragoza. En L. Longares Alardeen, & J. Peña Monné, *Aportaciones geográficas en memoria del profesor L. Miguel Yetano Ruiz*. (págs. 173-182). Zaragoza:

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.

Fernández, F., Montálvez, J., González, J., & Valero, F. (2004). La estructura espacial de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid. En J. García Codron, C. Diego Liaño, P. Fernández de Arróyabe, P. Garmendia, D. Rasilla, & A. E. Climatología (Ed.), *El clima entre el mar y la montaña* (Serie A nº4 ed., págs. 641-650). Santander: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.

Goodchild, B. (1994). Housing design, urban form and sustainable development. Reflections on the future residential landscape. *Town Planning Review*, 2 (65), 143-157.

Grimm, N., Faeth, S., Golubiewski, N., Redman, C., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. (2008). Global Change and the Ecology of Cities. *Science* 319: 756-760.

Hogan, A., & Ferrick, M. (1988). Observations in nonurban heat islands. *Journal of Applied Meteorology* (37), 232-236.

Jenks, A., Burton, I., & Williams, R. (1996). *The Compact City: A Sustainable Urban Form?* (First ed.). London: Routledge.

Jo, M., Lee, K., Jun, B., & Jo, Y. (2001). The spatial topographic of urban surface temperature using remotely sensed data and GIS. *22nd Asian conference on remote sensing*, (pág. 5). Singapore.

Landsberg, H. (1981). *The Urban Climate* (First ed.). New York: Academic Press.

Mclaren, D. (1992). Compact or Dispersed? Dilution is No Solution. *Built Environment*, 4 (18), 268-284.

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.

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

Naredo, J. (1998a). *Sobre la insostenibilidad de las actuales conurbaciones y el modo de paliarla*. Recuperado el 14 de Enero de 2007, de <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a007.html>

Naredo, J. (1998b). *Sostenibilidad, diversidad y movilidad horizontal en los modelos de uso del territorio*. Recuperado el 9 de Enero de 2007, de <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a006.html>

Newman, P. (1992). The Compact City: An Australian Perspective. *Built Environment*, 4 (18), 285-300.

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

Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climates* (Second ed.). London: Routledge.

Oke, T. (1997). Urban climates and global environmental changes, in Thompson, R.D., Perry, A., (eds), *Applied Climatology Principles and Practice*, Routledge, London & New York, 273-287

Oke, T. (2004). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. WMO. Genova: World Meteorological Organization.

Ortiz, J., & Escolano, S. (2005). Crecimiento periférico del Gran Santiago. ¿Hacia la desconcentración funcional de la ciudad? *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, IX(194 (4)).

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.

Peña, M., & Romero, H. (2005). 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. *XXV Congreso Nacional y X Internacional de Geografía* (págs. 107-117). Santiago: Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas 2005.

Romero, H., & Sarricolea, P. (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 J. Cuadrat, M. Saz, S. Vicente, S. Lanjeri, M. Luis Arrillaga, & J. González-Hidalgo (Edits.), *Clima, Sociedad y Medio Ambiente* (págs. 827-837). Zaragoza, España: Publicaciones de la Asociación Española de Climatología.

Romero, H., & Vinagre, J. (1985). Topoclimatología de la cuenca del río Mapocho. *Informaciones Geográficas* (32), 3-31.

Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In S. Freden, E. Mercanti, & M. Becker (Ed.), *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. I*, p. 1994. Washington D.C: NASA.

Rueda, S. (1999). Complejidad de los paisajes y sistemas urbanos. Bases para su reconversión hacia la sostenibilidad. *IX Jornadas sobre el paisaje. Asociación para el Estudio del Paisaje, Segovia.*, (págs. 13-28). Segovia.

Rueda, S. (1998). *La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa*. Recuperado el 25 de Marzo de 2007, de <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a009.html>

Shepard, N., Crawford, C., Bratt, S., & Booth, B. (2006). *Arcgis 3D Analyst Tutorial*. (ESRI, Ed.) United States.

Shukla, V., & Parikh, K. (1992). The environmental consequences of urban growth: cross-national perspectives on economic development, air pollution, and city size. *Urban Geography*, 5 (13), 422-449.

Yamashita, S., Sekine, K., Shoda, M., Yamashita, K., & Hara, Y. (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., & Bauer, M. (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.

Zinzi, M., & Agnoli, S. (2011). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings* (2011) doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.024 .