

# **Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección\*<sup>1</sup>**

**[Analysis of presence of heat islands in Santiago de Cali using remote sensing techniques]**

**MÓNICA PRECIADO VARGAS<sup>2</sup>, ARMANDO ALDANA OLAVE<sup>3</sup>**

**RECIBO: 16.01.2011 - AJUSTE: 13.03.2011 - AJUSTE: 27.05.2011 - APROBACIÓN: 10.06.2011**

## **Resumen**

*La temperatura de la superficie terrestre ha aumentado considerablemente en los últimos años, destacándose, como las regiones con los cambios más notables, las zonas urbanas con mayor concentración poblacional. La ciudad de estudio, Santiago de Cali, ha tenido un alto crecimiento urbanístico al suroccidente y al oriente de la ciudad donde limita con la ribera del Río Cauca. En este estudio se tomaron imágenes Landsat 4 TM 1989 y Landsat 7 ETM+ 2001 para calcular la temperatura superficial de la zona de estudio y comparar como el cambio del comportamiento del uso del suelo influye en la presencia de las islas de calor.*

---

\* Modelo para citación de este artículo científico  
 PRECIADO VARGAS, Mónica y ALDANA OLAVE, Armando (2011). Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. En: Ventana Informática. No. 24 (ene-jun., 2011). Manizales (Colombia): Universidad de Manizales. p. 95-114. ISSN: 0123-9678

- 1 Artículo procedente del proyecto de investigación realizado bajo la tutoría del Ing. Francisco Luis Hernández Torres, Director del grupo de Investigación en Percepción Remota GIPER, Universidad del Valle, Santiago de Cali (Colombia).
- 2 Ingeniera Topográfica, Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Especialista en Infraestructura de Datos Espaciales.  
 Docente, Universidad del Valle Facultad de Ingeniería, Santiago de Cali, (Colombia). Correo electrónico: mokinapre@gmail.com.
- 3 Ingeniero Electrónico, Especialista en Redes de Comunicación, Especialista en Procesos para Desarrollo de Software, Especialista en Sistemas de Información Geográfica.  
 Profesional en Telemática, Empresas Municipales de Cali EMCALI, Santiago de Cali, (Colombia). Correo electrónico: armando\_aldana@hotmail.com.

**Palabras Claves:** *Islas de Calor Urbano ICU, Temperatura, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado NDVI, Índice de Agua de Diferencia Normalizado NDWI, Índice de Construcción de Diferencia Normalizado NDBI, Índice Normalizado de Desnudez NDBal.*

## Abstract

*The Earth's surface temperature has increased considerably in recent years, noting that the most notable changes are in the areas of greatest urban concentration. City of Cali has a high urban growth in the southwest and east, which borders the banks of the Cauca River. In this study images Landsat 4 TM from 1989 and Landsat 7 ETM + from 2001 were used to calculate surface temperature of the study area and to compare how the change on land use influences the presence of heat islands.*

**Keywords:** *Urban Heat Islands ICU, Temperature, Index NDVI Normalized Difference Vegetation Index, Normalized Difference Water NDWI, Construction Index Normalized Difference NDBI, NDBal Nudity Standard Index.*

## Introducción

El fenómeno de Islas de Calor Urbano (ICU), es una consecuencia de las actividades humanas, «*representado por grandes cambios en propiedades radiactivas, térmicas, humedad y aerodinámicos en comparación con el entorno natural*» (Voogt, 2003).

Existen numerosos estudios en los que se calcula la temperatura superficial terrestre de una zona, con imágenes satelitales a partir de técnicas de teledetección, entre los que se destacan el realizado por Olave, et al. (2008), realizado en la región de Magallanes y Antártica Chilena; otro estudio que se destaca en la misma zona, es el elaborado por Romero Aravena (2005), en donde se identifica la relación estadística y espacial de los siguientes factores: la temperatura superficial, la cobertura del suelo, la reflectividad y el contenido de humedad del suelo, este último factor se analizó a partir del cálculo del Índice de Vegetación Normalizado NDVI. El estudio realizado por Chen (2005), en la ribera del Río Perla, en la ciudad de Shenzhen, al sur de China, muestra como el crecimiento urbanístico y la pérdida de vegetación van asociados a la presencia de las islas de calor, para analizar esta pérdida se tuvo en cuenta no solamente el cálculo del NDVI sino también su relación con diferentes índices como: Índice de Agua de Diferencia Normalizado NDWI, Índice

de Construcción de Diferencia Normalizado NDBI, índice Normalizado de Desnudez NDBal. Zahino (2008), realizó un proyecto en donde se aplicaron técnicas de tratamiento en imágenes Landsat 5 y Landsat 7 ETM+ (multiespectrales), el trabajo se realizó en la desembocadura del río Adour en la localidad Francesa de Biarritz, generando imágenes en donde se pueden identificar el fenómeno de Islas de Calor Urbana ICU, además incluye el cálculo del NDVI para clasificar zonas según el crecimiento, vigor y tipo de vegetación.

Los diferentes estudios aplican ecuaciones que permiten calcular la temperatura superficial terrestre, teniendo en cuenta parámetros de acuerdo con el tipo de sensor con el que se tomó la imagen.

Como zona de estudio se tomó la ciudad de Santiago de Cali la cual tuvo un crecimiento urbanístico muy notable en la década de los 90. El objetivo del estudio es mostrar como el crecimiento urbanístico, las pérdidas de humedad y la disminución del vigor de la vegetación, tienen como consecuencia la presencia de las ICU. Para llegar a este resultado se tomaron diferentes ecuaciones que permiten calcular la temperatura y comparar el resultado con los índices NDVI, NDWI, NDBI.

## **1. Fundamento teórico**

### **1.1 Definición**

En los últimos años existe una creciente preocupación por la relación entre los procesos que tienen lugar en la superficie del suelo y el clima, lo que ha llevado al estudio de los cambios medioambientales, profundizando en la interacción entre la biosfera y la atmósfera con información obtenida desde los satélites de observación de la Tierra (Soriano, 1994).

Se considera que las ICU, se producen debido a la contaminación atmosférica de un lugar determinado, dependiendo en gran medida de las características de la superficie, del número de habitantes, transformaciones urbanísticas de las emisiones de calor antropogénicas (Voogt, 2003).

El número de habitantes es un factor decisivo que condiciona la aparición de las ICU, en las ciudades con población de 500.000-1.000.000, la temperatura del aire suele aumentar de 1.1 a 1.2°C con respecto a las zonas rurales; para ciudades con más de 1.000.000 de habitantes el valor aumenta de 1.2 a 1.5°C, expresan Wypych y Bokwa (2004).

El fenómeno ICU está estrechamente relacionado con las emisiones de calor antropogénicas, la contaminación atmosférica y los cambios

de la cubierta vegetal, es decir, la diferencia de la temperatura del aire de las zonas urbanas y rurales depende de factores meteorológicos, como la velocidad del viento, nubosidad, evapotranspiración y de la intensidad de las ICU, es así como en invierno las emisiones de calor antropológica puede ser dos veces mayor que en verano para ciudades en donde el uso de la calefacción de edificios sea significativo, también se ha observado mayor intensidad de las ICU por la noche que durante el día, ya que durante la noche tiene lugar la radiación intensiva de la superficie de la atmosfera. Aparte de la escala horizontal, las ICU tienen cierta escala vertical, normalmente alcanzan 200-300m sobre el suelo, lo que equivale 3 a 5 veces la altura de los edificios.

De acuerdo con Chuvieco (2002), para la identificación de las ICU, es necesario calcular la temperatura terrestre. La investigación en este campo ha sido muy intensa en los últimos años, ya que se considera un elemento clave para el estudio del calentamiento global, de modo esquemático el proceso para el cálculo de la temperatura se inicia con los Niveles Digitales (ND) detectados del sensor. Al igual que en el espectro óptico esos valores codifican un valor de radiancia (*cantidad de energía radiada desde un objeto*), en este caso al infrarrojo térmico, cuyo objetivo es encontrar la relación entre el flujo emitido desde el suelo (LSU) y el recibido por el sensor (LSEN).

Los resultados obtenidos al calcular la temperatura se pueden comparar con los resultados aplicando diferentes índices, como: Índice Normalizado de Densidad de Vegetación (NDVI), Índice de Diferencia Normalizada de Agua (INWI), Índice de Diferencia Normalizada de Bloque o de Construcciones (INBI).

Según Marini (2008), el Índice Normalizado de Densidad de Vegetación (NDVI), es un cociente empleado para discriminar masas vegetales, se basa en que la firma espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste con las bandas visibles, especialmente la roja y la infrarroja, el contraste espectral entre la reflectividad de ambas bandas permite discriminar la vegetación sana de otro tipo de cubiertas, cuando mayor sea dicho contraste mayor vigor presentara la masa vegetal analizada.

El Índice de Diferencia Normalizada de Agua (INWI), de acuerdo con Gao, (1996), es un índice obtenido por satélite desde el infrarrojo cercano (NIR) y onda corta de infrarrojos (SWIR); según Ceccato et al, (2001), la reflectancia (SWIR) refleja los cambios tanto en el contenido de agua de la vegetación y la estructura del mesófilo esponjoso en doseles de vegetación, mientras que la reflectancia NIR se ve afectada por la estructura de la hoja interna y los contenidos de materia seca de hojas, pero no por el contenido de agua.

Zha et al. (2003), indican que el Índice de Diferencia Normalizada de Bloque o de Construcciones (INBI), refleja la respuesta espectral única de las zonas edificadas y de otras cubiertas, para el cálculo de este índice se emplea la onda corta de infrarrojos y el infrarrojo cercano.

## 1.2 Antecedentes

En los últimos años se han desarrollado múltiples proyectos orientados al cálculo de las ICU a partir de técnicas de teledetección, de los cuales se destacan:

- Xiao et al, (2006), examinaron los cambios de uso del suelo en la zona de Shenzhen, China. El objetivo del estudio era mostrar el cambio que ha tenido la zona de estudio en los años 1990 y 2000, identificando la aparición de las ICU y el efecto que estas producen en la región. Se utilizaron los índices de IDVI, NDWI, NDBI para extraer de las coberturas del suelo información a partir de imágenes de satélite Landsat TM 5, ETM+, luego se analizó la superficie de la temperatura encontrada en la banda del infrarrojo térmico.
- El trabajo realizado por Fei y Bauer, (2007), compara el INDV y el porcentaje de superficie impermeable, como indicadores de la superficie urbana de calor, identificando los efectos de las ICU en las imágenes Landsat (TM, ETM+), mediante las investigaciones de la temperatura de la superficie terrestre (LST), porcentaje de la superficie impermeable (ISA%) y el INDV, este estudio mostro que existe una fuerte relación lineal entre LST y NDVI.
- En los Estados Unidos, Hoffhine et al. (2002), realizaron un estudio cuantitativo de crecimiento urbano y su impacto sobre los recursos naturales, económicos, y la salud de la comunidad en general; para el desarrollo del estudio se emplearon imágenes Landsat TM, con las cuales se construyó un modelo de crecimiento urbano.
- Small (2006), realizó un análisis de las condiciones del medioambiente urbano y su estrecha relación con las propiedades biofísicas, considerando la reflectancia y la temperatura de la superficie urbana, y haciendo uso de imágenes Landsat ETM+.
- Qihao et al, (2003), investigaron la aplicabilidad de la fracción de vegetación derivada de un modelo de mezcla espectral como un indicador alternativo de la abundancia de vegetación, a partir de imágenes Landsat ETM +, de la ciudad de Indianápolis.
- Stathopoulou y Cartalis, (2009), analizaron la Temperatura de la Superficie Terrestre (LandSurface Temperature LST), a partir de imágenes sensor AVHRR, que tienen una alta resolución radiométrica, y cuyos resultados se compararon con los datos obtenidos con imágenes Landsat TM, ETM+.

- Santana, (2007), adelantó un trabajo orientado a calcular la temperatura de una ciudad y su relación con el NDVI.

De acuerdo con la búsqueda del estado del arte se evidencian pocas publicaciones sobre este tema realizadas en el ámbito colombiano, que incluyan estudios multitemporales y su comparación con los índices realizados empleados en el objeto de este estudio.

## 2. Metodología

### 2.1 Zona de estudio

Este trabajo analiza la ciudad de Santiago de Cali que se encuentra ubicada a 3 27'0"N, 76 32'0"W, al suroccidente de Colombia, es la capital del departamento del Valle del Cauca y la tercera ciudad más poblada del país, después de Bogotá y Medellín. Esta ciudad fue seleccionada teniendo en cuenta que su ubicación geográfica es una zona de poca nubosidad la mayor parte del tiempo; las imágenes objeto de este estudio alcanzaron una nubosidad máxima del 30%.

El estudio incluyó solo el comportamiento en la parte urbana de la ciudad. Para medir la temperatura de la superficie en las fechas de estudio (1989 y 2001), se tomaron dos imágenes: Landsat 4TM (7 de agosto de 1989), Landsat 7 ETM+ (24 de agosto de 2001), de cada una de las imágenes se seleccionaron las bandas 1-5 y 7, con una resolución espacial de 28.5m y la banda 6 del infrarrojo térmico para Landsat 7 con una resolución espacial de 57m.

Para el estudio se contaba con la base cartográfica, tipo vector como manzanas y vías principales de la ciudad, correspondiente al año 2009, con la cual se podía comparar el comportamiento urbanístico de acuerdo con los índices: *NDVI*, *NDWI*, *NDBI*, calculados.

### 2.2 Preprocesamiento

Las imágenes seleccionadas se encontraban georeferenciadas. Inicialmente se realizó un proceso para reducir los efectos atmosféricos con el cual se pueden corregir la nubosidad y otros factores que alteran la interpretación y el análisis espacial. Es conveniente mejorar la corrección atmosférica con que vienen las imágenes Landsat, para lo cual se utiliza el algoritmo conocido como *Valores mínimos de histograma* propuesto por Chávez, (1995), el cual genera un ajuste del histograma; en la figura 1, se pueden ver los histogramas inicial y corregido respectivamente, este proceso se realizó para cada una de las bandas de las imágenes Landsat 4 TM y Landsat 7 ETM+.

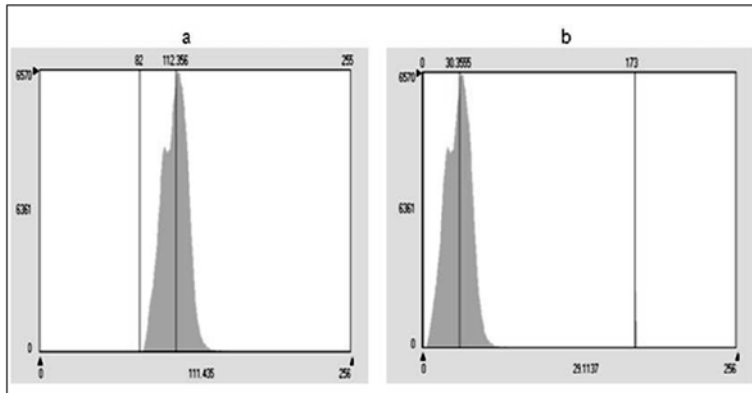


Figura 1. (a) Histograma inicial ETM+ Banda 1, (b) Histograma corregido por el algoritmo: Valores mínimos de histograma, imagen ETM+ 2001 Banda 1

## 2.3 Cálculo de la temperatura

**2.3.1 Cálculo de la temperatura Imágenes Landsat 4 TM y Landsat 7 ETM+.** Para el cálculo de la temperatura es necesario realizar una conversión de valores DN (Niveles Digitales) a radiancia espectral, tanto de la imagen TM como de la ETM+, empleando la ecuación 1 (Chander, 2009), de acuerdo con los valores de los metadatos de cada imagen, como se muestran en la Tabla 1:

$$L = \left( \frac{LMAX - LMIN}{Qcalmax - Qcalmin} \right) (Qcal - Qcalmin) + LMIN \quad (1)$$

Donde:

$L$  = Radiancia [ $W / (m^2 sr \mu m)$ ]

$Qcal$  = Imagen DN (Banda 6)

$LMAX$  = Radiancia espectral escalada de acuerdo con el sensor [ $W / (m^2 sr \mu m)$ ]

$LMIN$  = Radiancia espectral escalada de acuerdo con el sensor [ $W / (m^2 sr \mu m)$ ]

$Qcalmin$  = Mínimo valor de pixel de la imagen [DN]

$Qcalmax$  = Máximo valor de pixel de la imagen [DN]

Tabla 1. Datos para el cálculo de la radiancia

| Dato    | Imagen 1989 | Imagen 2001 |
|---------|-------------|-------------|
| Qcal    | Banda 6     | Banda 6.1   |
| Lmax    | 15.3032     | 17.040      |
| Lmin    | 1.2377996   | 0           |
| Qcalmin | 1           | 1           |
| Qcalmax | 255         | 255         |

La figura 2 representa las imágenes obtenidas al aplicar la ecuación de Radiancia.

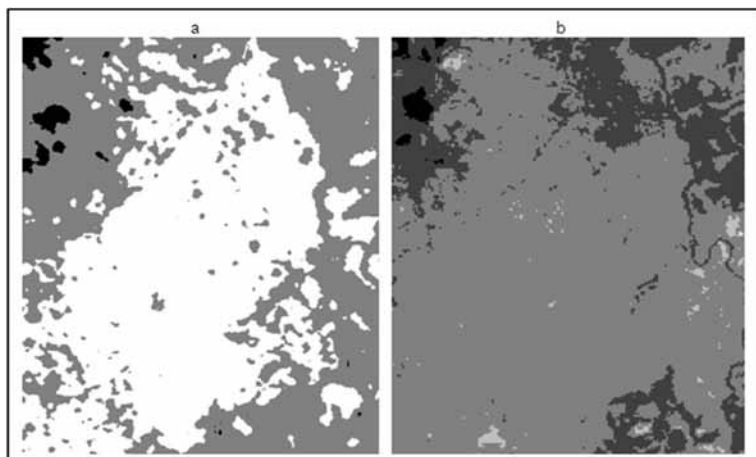


Figura2. Imagen (a). Radiancia imagen Landsat 4 TM 1989, Imagen (b). Radiancia imagen Landsat 7 ETM+ 2001

A continuación, se cálculo la temperatura de brillo emitida por la superficie terrestre mediante la ecuación de Planck, ecuación 2 (Olive, et al., 2008):

$$T_l = \frac{K1}{Ln(\frac{K2}{L} + 1)} \quad (2)$$

Donde:

- $T_l$ : Es la temperatura de brillo superficial [K]  
 $L$ : Es el valor de Radiancia [ $W / (m^2 sr \mu m)$ ]  
 $K_1$  = Es la constante de calibración 1 [ $W / (m^2 sr \mu m)$ ]  
 $K_2$  = Es la constante de calibración 2 [ $W / (m^2 sr \mu m)$ ]  
 $Ln$  = Logaritmo natural.

Se debe tener en cuenta que los valores de  $K_1$  y  $K_2$  varían de acuerdo con el tipo de imagen empleada, como se indica en la Tabla 2 (Chander et al, 2005).

Tabla 2. Constantes de las imágenes TM, ETM+

| Constante | K1                     | K2      |
|-----------|------------------------|---------|
| Unidades  | W / ( $m^2 sr \mu m$ ) | Kelvin  |
| L4 TM     | 671.62                 | 1284.30 |
| L7 ETM+   | 666.09                 | 1282.71 |



Para el cálculo de la temperatura se tuvo en cuenta la corrección de la emisividad espectral, ecuación 3, (Artis y Carnahan, 1982), en este estudio al área de vegetación se le dio valores de 0.95, reemplazando la superficie de emisividad.

$$Ts = \frac{T_l}{1 + \left(\frac{\lambda T_l}{\rho}\right) * Lne} \quad (3)$$

Donde:

- $T_s$ : Es la temperatura superficial [K]  
 $T_l$ : Es la temperatura de brillo superficial [K]  
 $\lambda$  = Es el centro de la longitud de onda [ $\mu m$ ]  
 $\rho$  =  $1.438 \times 10^{-2}$  [mk], ( $\sigma = hc/k$ ),  $h$  = constante de Planck ( $6.26 \times 10^{-34}$  Js<sup>-1</sup>),  
 $c$  = Velocidad de la luz ( $2.998 \times 10^8$  ms<sup>-1</sup>),  
 $k$  = constante de Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23}$  Jk<sup>-1</sup>)  
 $e$  = Superficie de emisividad

Los datos obtenidos de la temperatura superficial se encuentran en grados kelvin, para obtener los datos en grados centígrados (figura 3), es necesario incluir dentro del algoritmo del cálculo de la emisividad la conversión de grados kelvin a centígrados que consiste en restarle 273.15, expresado en la ecuación 4, (Xu y Chen, 2004):

$$Ts = \left( \frac{T_l}{1 + \left(\frac{\lambda T_l}{\rho}\right) * LnE} \right) - 273.15 \quad (4)$$

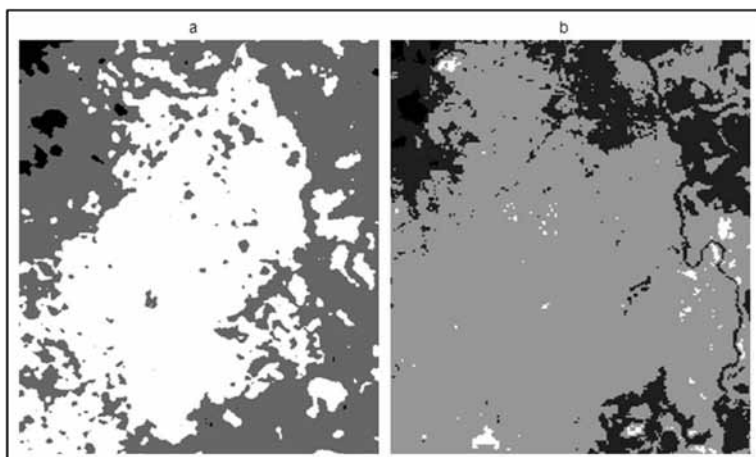


Figura 3. (a). Temperatura Superficial en grados centígrados, Santiago de Cali, imagen Landsat 4 TM 1989. (b). Temperatura Superficial en grados centígrados, Santiago de Cali, imagen Landsat 7 ETM+ 2001

De acuerdo con los valores obtenidos en las imágenes de la temperatura superficial (figura 3) se realizó una clasificación, como se muestra en la figura 4, donde (a), correspondiente Landsat 4 TM 1989, presenta una uniformidad en la temperatura, asociada a la fecha de toma y a los rangos obtenidos al calcular la temperatura, en los cuales no se evidenciaban temperaturas demasiado altas, como sí se evidencia en (b) (temperaturas mayores a 29°), que se clasifican como ICU.

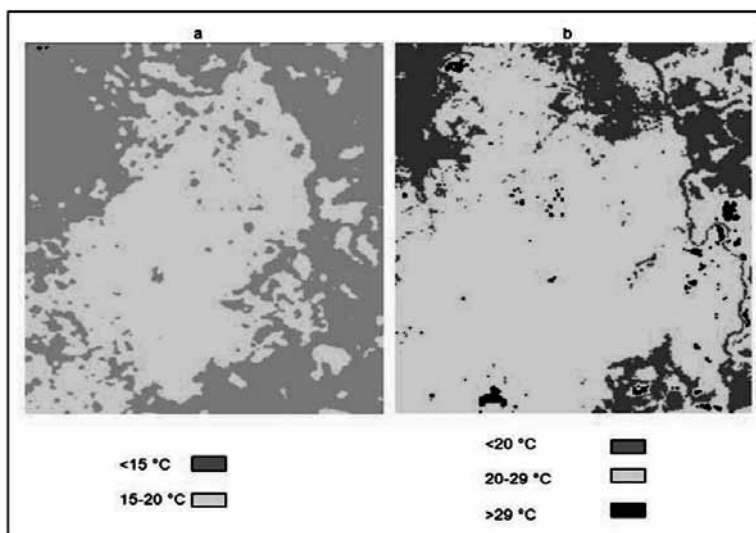


Figura 4. (a). Temperatura Superficial en Santiago de Cali Clasificada, imagen Landsat 4 TM 1989, (b). Temperatura Superficial en Santiago de Cali Clasificada, imagen Landsat 7 ETM+ 2001

## 2.4 Cálculo de NDVI, NDWI, NDBI de las imágenes Landsat 7 ETM+, Landsat 4 TM

Con el fin de realzar las áreas con mayor vigor vegetal y reducir el efecto de las sombras originado por el relieve se empleó el uso de los índices de vegetación.

Inicialmente se calculó el NDVI, ecuación 5, (Fey, 2006), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado:

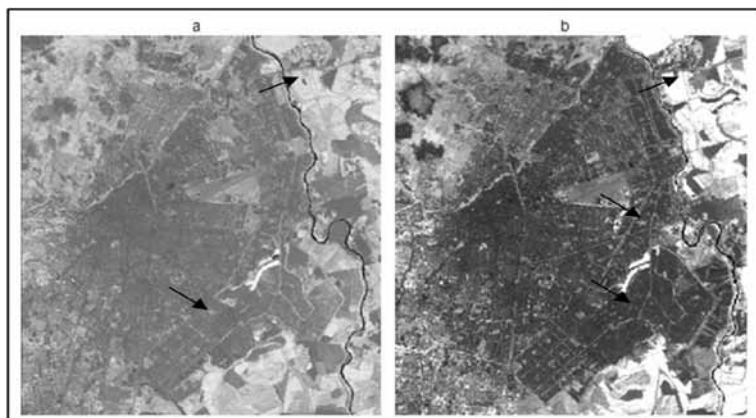
$$NDVI = \frac{BIRC - BR}{BR + BIRC} \quad (5)$$

Donde:

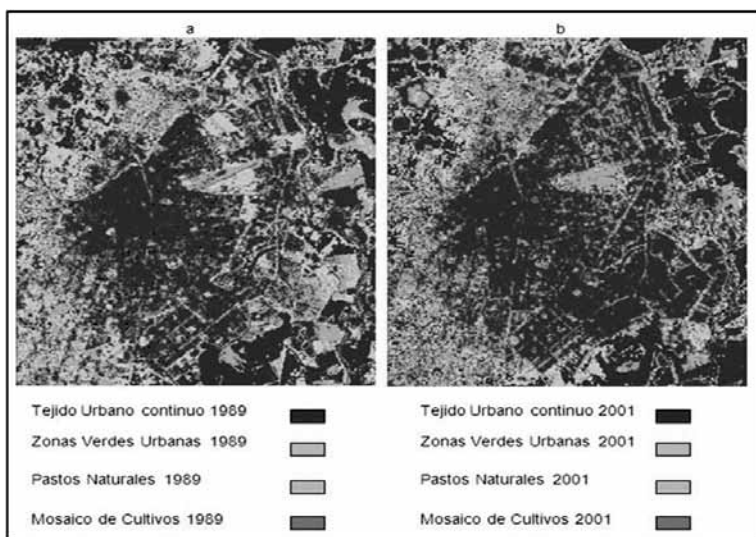
*BIRC* = Banda del Infrarrojo cercano

*BR* = Banda del Visible Rojo

En la figura 5, se puede observar las zonas en las que se presenta mayor vegetación, las cuales se encuentran en un valor de pixel cercano a los 255, que se perciben más brillantes (blanco). Para visualizar de manera más clara los resultados, se realizó una clasificación de estas imágenes obteniendo como resultado la figura 6.



*Figura 5. (a) Landsat 4 TM 1989 aplicando el algoritmo de NDVI.  
(b) Landsat 7 ETM+ 2001 aplicando el algoritmo de NDVI.*



*Figura 6. (a) NDVI Landsat 4 TM 1989, clasificada de acuerdo con la leyenda de Corine CLC 2000, (b) NDVI Landsat 7 ETM+ 2001, clasificada de acuerdo con la leyenda de Corine CLC 2000.*

Se puede visualizar en la figura 6, que las lagunas el Pondaje y Charco Azul, se encuentran en la clasificación de cultivos, esto se debe a que es-

tas lagunas presenta un alto índice de vegetación, producto del proceso de eutrofización, situación verificada en registros fotográficos de la época (figura 7).

El cálculo del NDWI, ecuación 6, (Chen, 2005), permite identificar la medida de cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo.

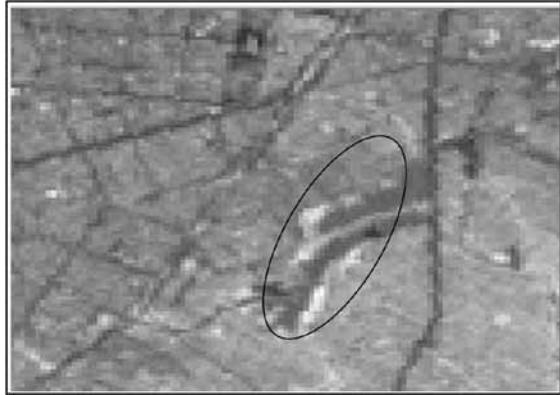


Figura 7. Imagen Landsat 7 ETM+ 2001, con combinación de bandas 4-3-2, donde se visualiza enmarcada la vegetación.

$$NDWI = \frac{(\rho(Banda4) - \rho(Banda5))}{(\rho(Banda4) + \rho(Banda5))} \quad (6)$$

En la figura 8, se destaca con mayor brillo los cuerpos que contengan mayor cantidad de agua, en esta imagen se observan con mayor facilidad los principales ríos de la ciudad.

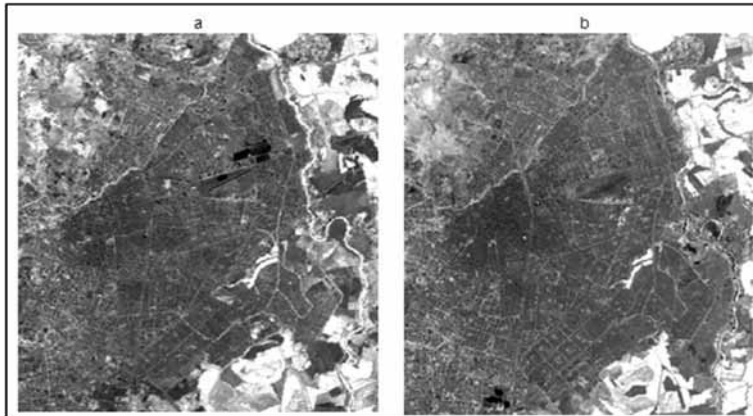


Figura 8. (a) Landsat 4 TM 1989 aplicando el algoritmo de NDWI, (b) Landsat 7 ETM+ 2001 aplicando el algoritmo de NDWI.

De acuerdo con los análisis de la clasificación, se puede apreciar como en el año 1989, figura 9 (a), la ciudad presentaba un porcentaje de área con bajo contenido de agua de 27.86%, con relación con el año 2001,

figura 9 (b), donde se obtuvo un 56.51%, mostrando un incremento de 28.65% en 11 años. Es necesario tener en cuenta que el índice de humedad en un ambiente urbano requiere de estudios más detallados que consideren: tipos de materiales de construcción, zonas verdes, áreas construidas y cuerpos de agua.

Dentro del estudio se incluyó el cálculo del NDBI, ecuación 7, (Chen, 2005), que permite identificar que tan sensible es el área urbanizada en la zona de estudio.

$$NDBI = \frac{(\rho(Banda5) - \rho(Banda4))}{(\rho(Banda5) + \rho(Banda5))} \quad (7)$$

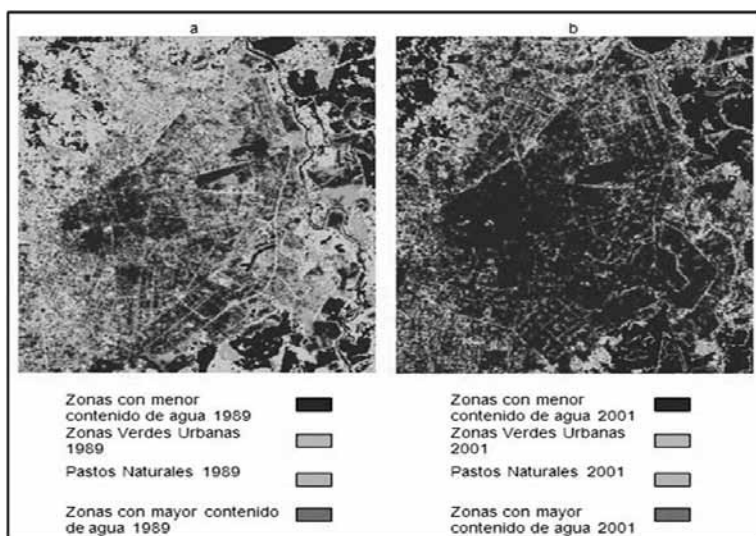


Figura 9. (a) clasificada NDWI Landsat 4 TM 1989,  
(b) clasificada NDWI Landsat 7 ETM+ 2001.

En la figura 10, se destaca con mayor brillo las áreas con construcciones y sin vegetación, en esta imagen se observa con mayor facilidad el casco urbano de la ciudad.

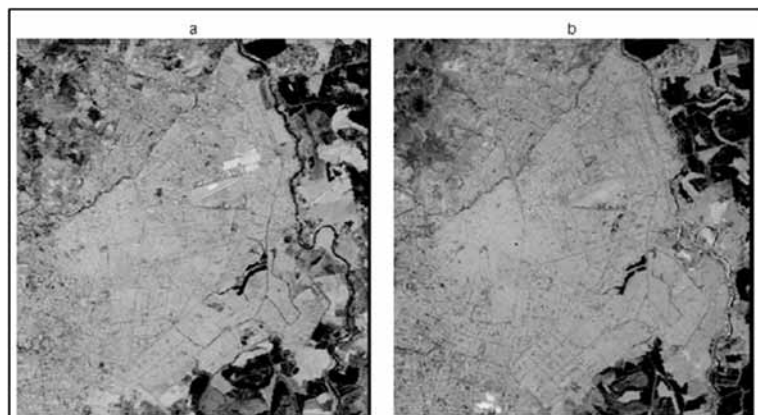


Figura 10. (a) Landsat 4 TM 1989 aplicando el algoritmo de NDBI, (b) Landsat 7 ETM+ 2001 aplicando el algoritmo de NDBI.

Realizando la clasificación sobre las imágenes resultantes (figura 11), se percibe el crecimiento urbano que ha tenido la ciudad en los 12 años de estudio (1989 a 2001).

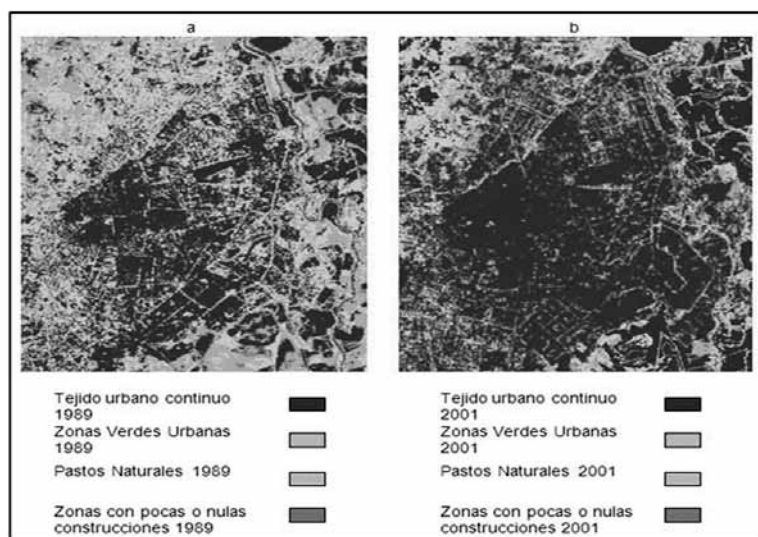


Figura 11. (a) clasificada NDBI Landsat 4 TM 1989, (b) clasificada NDBI Landsat 7 ETM+ 2001.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Relaciones entre la zona urbana y las islas de calor

En la figura 12, se muestra el comportamiento de la temperatura en los años 1989 y 2001.

De acuerdo con los datos obtenidos se observa una homogeneidad en la clasificación de la temperatura correspondiente al año 1989 (figura 12 (a)), esto se asocia a la fecha de la toma de la imagen. En el año 2001 el comportamiento es diferente (figura 12(b)), en esta imagen se logran identificar algunos puntos con una temperatura más alta, los cuales se conocen como Islas de Calor Urbano ICU, estas islas se presentan en la parte central de la ciudad especialmente donde existe una gran actividad industrial.

En la parte izquierda de la figura 12 (b) se visualizan concentraciones de calor correspondientes a áreas de quemadas, también se observa una concentración alta de calor donde se encuentra ubicado el basurero de Navarro, que para esta época se encontraba en funcionamiento. Por otro lado cabe resaltar que algunas áreas no corresponden a ICU ya que al superponer la imagen clasificada sobre la imagen original se identifican áreas con temperaturas superiores a 29°C, que corresponden a sombras de nubes, lo que distorsiona los valores de la temperatura para la determinación de las ICU, como se señala (flechas) en la imagen 12 (b).

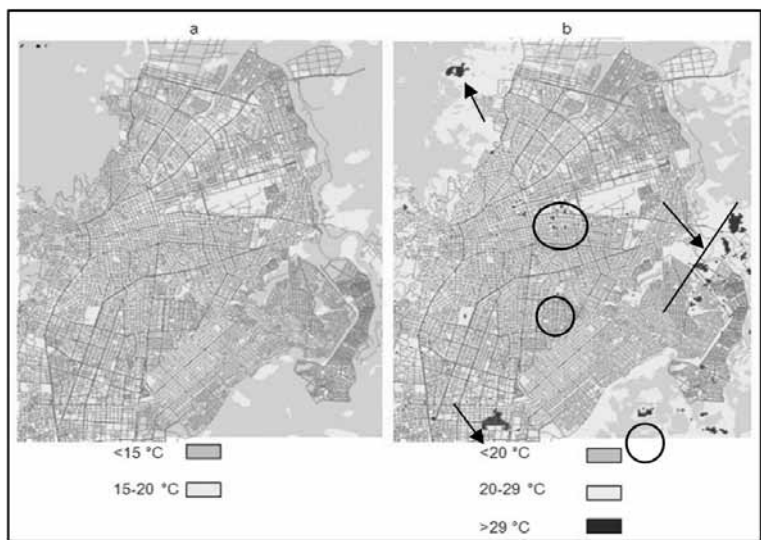


Figura 12. (a) Temperatura en la zona urbana 1989,  
(b) Temperatura zona urbana 2001

### 3.2 Variación de la temperatura en la zona de estudio

A continuación se compararan los resultados obtenidos con el cálculo de los índices NDVI, NDWI y NDBI. Comparando las imágenes de la figura 13, se aprecia la disminución de las áreas verdes urbanas en un periodo de 12 años, estas áreas han sido reemplazadas progresivamente por tejido urbano. En el año 1989 se encontró para estas áreas un porcentaje de 43 y para el año 2001 de 36.63, mostrando una disminución de 6.37% en el periodo de estudio. Este resultado es consecuente con el obtenido al aplicar el índice NDWI, en donde se asocia el crecimiento urbano con zonas de bajos contenidos de agua (Figura 14(b)).

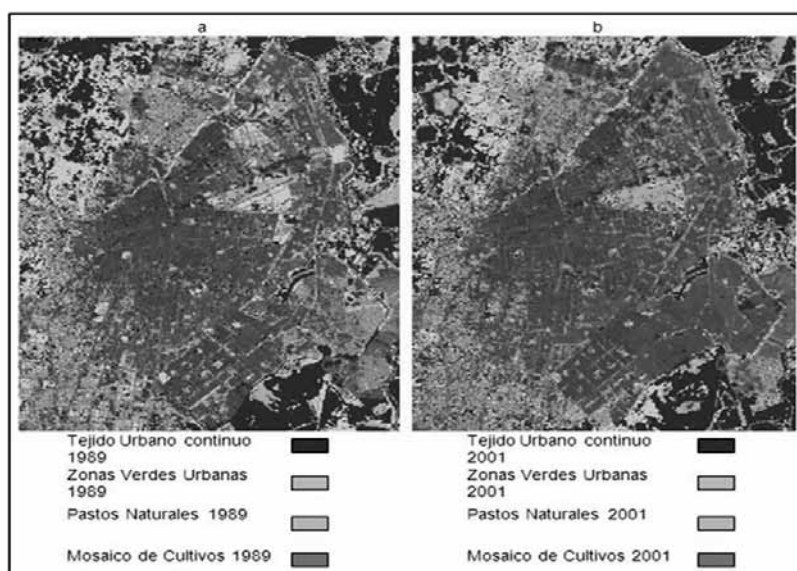


Figura 13. (a) Índice normalizado de vegetación 1989,  
(b) Índice normalizado de vegetación 2001

La figura 15, presenta el crecimiento urbanístico de la ciudad, que confirma la validez de los resultados obtenidos con los índices NDVI, NDWI y NDBI, aplicados a las imágenes de estudio. En el comparativo (a y b) de la figura 15, se visualiza que el crecimiento urbanístico ha tenido como consecuencia la disminución de las zonas verdes urbanas y de cultivos en la zona rural de la ciudad, En el año 1989 se encontró un porcentaje de Tejido Urbano de 40.40 y para el año 2001 de 57.69, mostrando un incremento de 17.29% en el periodo de estudio.

El incremento del tejido urbano de la ciudad en la zona oriente cerca al río Cauca, se puede visualizar con claridad en la comparación de las imágenes de la figura 15. En la imagen (a) (año 1989) se muestra



la ribera del río con una menor cantidad de asentamientos, diferente a lo que sucede en (b) (año 2001) donde se observa la poca visibilidad del río debido al incremento de la cantidad de asentamientos urbanos en esta área.

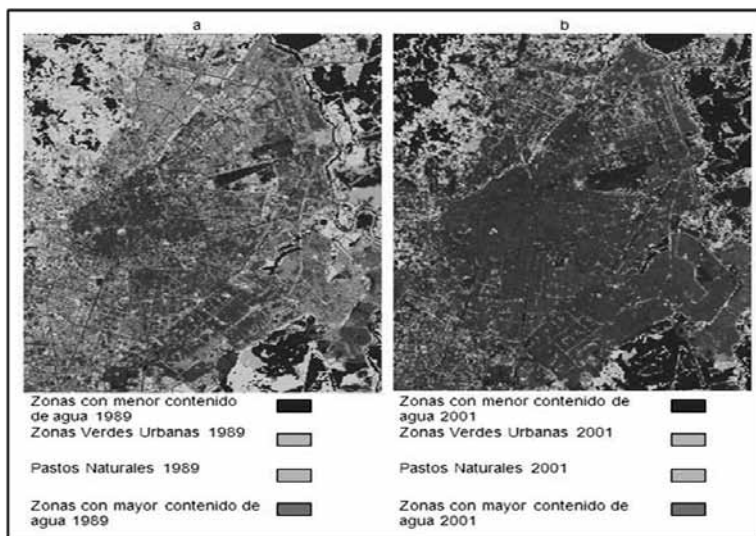


Figura 14. (a) Índice de agua de diferencia normalizada 1989, (b) Índice de agua de diferencia normalizada 2001

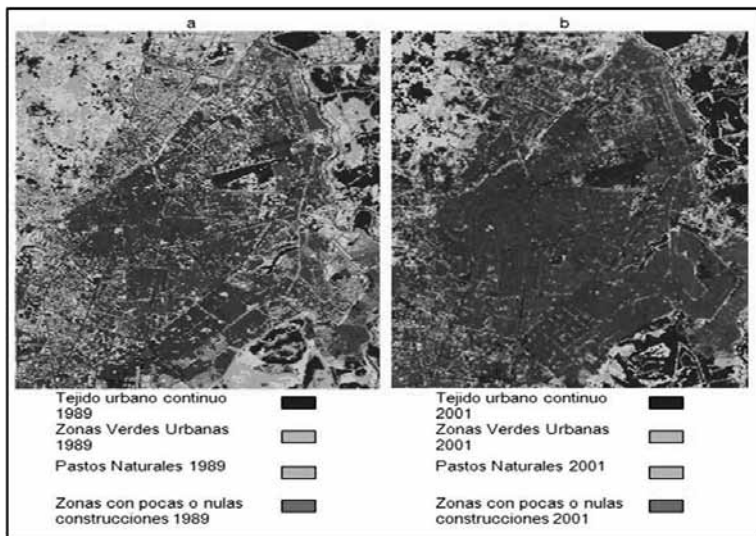


Figura 15. (a) Índice de construcciones de diferencia normalizada 1989, (b) Índice de construcciones de diferencia normalizada 2001

### 3.3 Cambio del uso de suelo

A finales de los 80 y en la década de los 90, Santiago de Cali tuvo un crecimiento urbanístico desordenado, este crecimiento se destaco en mayor proporción en las zonas suroccidental y oriental de la ciudad. Al oriente de la ciudad con la presencia de asentamientos suburbanos a lo largo de la ribera del río Cauca, producto del desplazamiento forzoso de las zonas rurales, en la zona suroccidental la ciudad tuvo una expansión urbanística que trajo consigo mano de obra no calificada incrementando los asentamientos suburbanos, (Velásquez, 1994).

Estas zonas pobladas, visualizadas en la figura 15 (b), eran zonas con presencia de vegetación (figura 13 (a)) y con altos contenidos de agua (figura 14 (a)). Estos cambios de uso del suelo como el presentado en la ciudad de estudio, evidencian un incremento en la temperatura de las zonas urbanas presentándose islas de calor urbano ICU, figura 12 (b).

El no contar con una directriz que regulara el uso del suelo de la ciudad originó un crecimiento del tejido urbano sin controles ambientales. (Velásquez, 1994). A finales de los años 90 (1997), se empezó a desarrollar en la ciudad el Plan de Ordenamiento Territorial POT, el cual contempla la protección y conservación del medio ambiente, de esta forma se pretende que la ciudad tenga un desarrollo sostenible ambientalmente. (POT, 2000)

## 4. Conclusiones

- Este artículo muestra como el cambio de uso del suelo, de zonas de vegetación a zonas de construcción (aumento de actividad humana), es una de las causas del incremento de la temperatura.
- Los resultados muestran la influencia de las emisiones de calor antropogénicas en la presencia de las ICU, es así como se identifica con gran facilidad el basurero de Navarro, que funcionaba en el año 2001, también se identifica sobre el área industrial de la ciudad puntos con temperatura más alta (figura 12 - círculos).
- Durante el desarrollo del artículo se evidenció la importancia de tener precaución con los parámetros propios de cada imagen de acuerdo con el sensor y la fecha de toma. Los errores que se presentan en el estudio, van asociados a la presencia de nubes, aunque se aplicó una corrección llamada Algoritmo de Valores Mínimos de Histograma a cada imagen mejorando notablemente la calidad de la imagen inicial. Los resultados se ajustan a la realidad de la zona de estudio.

## Bibliografía

- CECCATO, Pietro; FLASSE, Stéphane; TARANTOLA, Stefano; JACQUEMOUD, Stéphane and GRÉGOIRE, Jean-Marie (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol. 77, No. 1, (Jul), London (UK): Elsevier. p. 22-33. ISSN: 0034-4257
- CHUVIECO, Emilio. (2002). Teledetección ambiental la observación de la tierra desde el espacio. Barcelona (España): Ariel. 46-57 p. ISBN: 84-344-8047-6.
- DEL VAL RIAÑO, Juan Antonio y GONZALO CALDERÓN, Ana Belén (2006). Fundamentos físicos de la Teledetección Espacial. En: GUTIERREZ PÉREZ, Carlos y MUÑOZ NIETO, Ángel Luis (ed.) (2006). *Teledetección nociones y aplicaciones*. Salamanca (España): Universidad de Salamanca. p 17-26. ISBN: 86-611-1613-5.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN, SANTIAGO DE CALI (2000), Plan de Ordenamiento Territorial, Santiago de Cali. [en línea]. Santiago de Cali (Colombia): Alcaldía Municipal. <<http://www.cali.gov.co/publico2/pot/documentos/presentacion.pdf>>. [consulta: 05/26/2011].
- FEI, Yuan and BAUER Marvin E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol. 106, No. 3 (feb). London (UK): Elsevier. p. 375-386. ISSN: 0034-4257.
- GAO, Bo-cai (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. In: *Remote Sensing of Enviroment*, Vol. 58, No. 3 (dec.). London (UK): Elsevier. p. 257-266. ISSN: 0034-4257.
- GYANESH, Chander y BRIAN, Markham. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. [en línea]. En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 11 (nov.) Piscataway (NJ, USA): IEEE. p. 2674-2677. ISSN: 0196-2892 <<http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/L5TMLUTIEEE2003.pdf>> [consulta: 18/02/2010].
- GYANESH, Chander; BRIAN L., Markham and HELDER, Dennis (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for lansat MSS, TM, ETM+ and Eo-1 Ali sensors. [en línea]. NASA Technical Report Server, Hanover (MD, USA): NASA Center for AeroSpace Information. <[http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090027884\\_2009026987.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090027884_2009026987.pdf)> [consulta: 05/18/2010].
- HOFFHINE, Wilson, et al. (2002). Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. In: *Remote Sensing of Environment* No. 86, No. 3 (Aug.) London (UK): Elsevier. p. 275-285. ISSN: 0034-4257.
- LI, Juan-juan; WANG, Xiang-rong; MA, Wei-chun and ZHANG, Hao (2009). Remote sensing evaluation of urban heat island and spatial pattern of the Shanghai metropolitan area, China. En: *Ecological Complexity*, Vol. 6, No. 4 (dec.). London (UK): Elsevier. p. 413-420. ISSN: 1476-945X.
- MARINI, Fabián. (2008). Análisis del estado de la vegetación en el área de influencia de la EEA Bordenave mediante imágenes satelitales. [en línea]. En: Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria, Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (Argentina). <[http://www.inta.gov.ar/bordenave/contactos/autores/fabian/indice\\_verde\\_area\\_INTA\\_bordenave.pdf](http://www.inta.gov.ar/bordenave/contactos/autores/fabian/indice_verde_area_INTA_bordenave.pdf)>. [consulta: 10/07/2010]
- MISAKOVA, Anne, JACQUIN, Lucie and GAY, Michel. (2008). A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment. En: *ScienceDirect, Landscape and Urban Planning*, (Francia), p. 152-155. ISSN: 0169-2046.
- OLAVE-SOLAR, Carlos; SANTANA, Ariel; BUTOROVIC, Nicolás y ACUÑA, Paula. (2008). Variabilidad térmica en la región nororiental de la península de Brunswick, Magallanes, Chile, empleando datos Landsat [en línea]. En: *Anales del Instituto de la Patagonia (Chile)*, Vol. 36, No. 2. Punta Arenas (Magallanes, Chile): Universidad de Magallanes. p. 5-12 ISSN 0718-686X <<http://www.scielo.cl/pdf/ainpat/v36n2/art01.pdf>> [consulta: 15/05/2010].
- QIHAO, Weng, DESEGSHEG, Lu and SHUBRING, Jacquelyn. (2003). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* No. 89. (USA). p. 467-483. ISSN: 0034-4257

- SANTANA, Luis Marino. (2007). Landsat ETM+ image applications to extract information for environmental planning in a Colombian City. En: International Journal Remote sensing. (Colombia). ScienceDirect . p. 4225-4242. ISSN: 0034-4257
- SMALL, Christopher. (2006). Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. En: Remote Sensing of Environment 104. London (UK): Elsevier. p. 168-189. ISSN 0169-2046.
- SORIANO CARRILLO, Jesús (1994). Teledetección y climatología [en línea]. En: Mapping interactivo: Revista internacional de Ciencias de la Tierra Madrid (España): Revista Mapping, S.L. ISSN: 1.131-9.100 <[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1222](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1222)> [consulta: 08/08/2010].
- SOUSHI, Kato y YASUSHI, Yamaguchi. (2005). Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. [en línea]. En: gisws.media. (Japon) <<http://gisws.media.osaka-cu.ac.jp/gisideas04/viewpaper.php?id=34>> [consulta: 10/05/2010].
- STATHOPOULOU, Marina y CARTALIS constantinos,. (2009). Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation. Remote Sensing of Environment No. 113. London (UK): Elsevier. p. 2592-2605. ISSN: 0034-4257.
- UMAMAHESHWARAN, Rajasekar y QIHAO, Weng. (2009). Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: A case study of Indianapolis. En: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. (USA). ScienceDirect. p. 86-96. ISSN: 0034-4257
- VELÁSQUEZ, Andrés y MEYER Hansjurgen. (1994). Ofertas y amenazas ambientales en Cali. Publicaciones Ocasionales OSSO. Publicacion Observatorio Sismologico del Sur Occidente Colombiano. Universidad del Valle.
- VOOGT, A., and OKE, R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment. London (UK): Elsevier. p. 370-384. ISSN: 0034-4257.
- WYPYCH, Sebastian y BOKWA, Anita. (2004). Environment Science, Jagiellonian University - Cracovia / Polonia. Environment Science, Jagiellonian University. [En línea]. En: University. Cracovia. (Polonia). <[http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2\\_Clima\\_Urbano/\\_Efecto\\_isla\\_de\\_calor\\_3x6.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2_Clima_Urbano/_Efecto_isla_de_calor_3x6.html)> [Consulta: 10/ 07/2010]
- XIAO, Chen. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationships between urban heat island and land use/cover changes. En: Shenzhen. (China): ScienceDirect. p. 133-146. ISSN: 0034-4257.
- ZHA, Y., GAO, J. and NI, S. (2003). Application of Background Information Database in Trend Change of Agricultural Land Area of Guangxi. En: International journal of remote sensing. (China): p. 583-594. ISSN 0143-1161 código IJSEDK.
- ZHENGMIN, Wan, et al. (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. Remote Sensing of Environment. London (UK): Elsevier. p. 163-180. ISSN: 0034-4257