05-004

AN URBAN HEAT ISLAND STUDY OF SEVILLA CITY BASED ON LANDSAT DATA

Jadraque Gago, Eulalia⁽¹⁾; Pacheco Torres, Rosalía⁽²⁾; Etxebarría Berrizbeitia, Saioa⁽³⁾

⁽¹⁾Universidad de Granada, ⁽²⁾Universidad Politécnica de Madrid, ⁽³⁾Universidad del País Vasco

Under certain conditions, the heat from solar radiation and different urban activities can make city temperatures rise in certain areas, simply because of the way in which a city is structured. This effect is known as the urban heat island (UHI).

This article provides the basis for future investigation focused on the relationship of land surface temperature (LST) with social-ecological variables, namely land use/land cover (LULC), vegetation index, impervious surface index, population index, fossil-fuel CO2 emissions, etc.

During the progress of the investigation will be determined the correlation between mean LST and the rapid urbanization of the area. The formation and effects of UHI, including possible mitigation and adaptation measures, should be considered in the landscape and urban planning process for the future development of the city. Landsat data captured in 1987, 2002 and 2017 of Sevilla city were used to facilitate the analysis.

Keywords: Urban heat island; Land surface temperature; Remote sensing; Green space; Impervious surface

ESTUDIO DE LA ISLA DE CALOR URBANA DE LA CIUDAD DE SEVILLA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DATOS SATELITALES

Bajo ciertas condiciones, el calor proveniente de la radiación solar y de las diferentes actividades desarrolladas en los núcleos urbanos origina que la temperatura de las ciudades aumente en determinadas áreas, simplemente por la forma en que se estructura una ciudad. Este efecto es conocido como isla de calor urbana (ICU).

Esta comunicación sienta las bases para una futura línea de investigación centrada en el examen de la relación existente entre la temperatura de la superficie de la tierra (TST) y determinadas variables socio-ecológicas, tales como los usos del suelo, el índice de vegetación, la densidad de población, las emisiones de CO2, etc.

Durante el desarrollo de la investigación se determinará en qué medida la TST está influenciada por la rápida urbanización del área analizada. La formación y efectos de la ICU así como las medidas para su mitigación deberían ser consideradas en las distintas fases de la planificación urbana con el fin de conseguir el desarrollo de áreas urbanas sostenibles. Imágenes satelitales de la ciudad de Sevilla, de tres años 1987, 2002 y 2017 han sido utilizadas para realizar este análisis.

Palabras clave: Isla de calor urbana; Temperatura de la superficie terrestre; Espacios verdes; Densidad de poblacion; Imagenes satelitales

Correspondencia: Eulalia Jadraque Gago; ejadraque@ugr.es



1. Introducción

Las ciudades ocupan aproximadamente el 2% de la superficie de la tierra y se estima que para el año 2030 dos tercios de la población mundial vivirá en ciudades (United Nations, 2015). Los habitantes de las ciudades consumen más del 75% de los recursos energéticos totales como resultado de las actividades llevadas a cabo en el entorno urbano (Madlener y Sunak, 2011). En Europa, un 80% de la población es urbana y el 90% vive expuesta a unos niveles de contaminación del aire superiores a los que marca la legislación comunitaria y que provocan 400.000 muertes al año. Se calcula que en términos de salud humana, la contaminación supone un gasto para la economía europea de entre 427.000 y 790.000 millones de euros anuales (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2016). Uno de los mayores problemas causados por el rápido crecimiento de las urbes es el descenso de la cobertura vegetal debido a la expansión de las zonas urbanas (edificios, aparcamientos, pavimentos y otras construcciones). Otras consecuencias medioambientales incluyen la polución, cambio climático, emisiones de gases de efecto invernadero, deterioro de la calidad del agua y el aire y la ruptura del ciclo ecológico (Senanayake, Welivitiya y Nadeeka, 2013; Estoque, Murayama y Myint, 2017).

El fenómeno de la isla de calor urbana (ICU), fenómeno de origen térmico que se produce en áreas urbanas, es otro de los impactos negativos causados por el crecimiento urbano. Este fenómeno se caracteriza por la diferencia de temperatura entre el centro de las ciudades, donde se suele producir una edificación masiva, y las áreas de alrededor, como extrarradios o zonas rurales. Existen dos tipos de isla de calor urbana, una está basada en la temperatura del aire y es mayor durante la noche, mientras que la otra se basa en la temperatura de la superficie terrestre (TST) que tiende a ser más fuerte durante el día mientras el sol está brillando. Esta investigación se centra en esta última, conocida como isla de calor urbana de superficie (ICUs) basada en la TST (Estoque, Murayama y Myint, 2017).

El desarrollo de la tecnología de teledetección térmica ha traído importantes avances en el estudio de la ICUs. Muchos de los estudios previos de la ICUs han demostrado la utilidad de emplear técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG) para comprender la relación entre la TST y la composición y patrón del paisaje urbano (Estoque, Murayama y Myint, 2017; Kikon, Singh, Singh y Vyas, 2016; Weng, Lu, y Schubring, 2004; Bokaie et al., 2016; Liu y Zhang, 2011). El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de área edificada basado en el rojo visible (VrNIR-BI) se encuentran entre los índices más comúnmente utilizados para evaluar las variaciones espaciales y temporales de la TST (Kumar y Shekhar, 2015).

En el sur de España, Sevilla (capital de Andalucía) ha experimentado una rápida urbanización en los últimos años (Barrionuevo, 2003). En consecuencia, la cubierta vegetal se ha visto comprometida debido a esta expansión urbana, más específicamente durante los años 1987 al 2002. En este periodo, la ciudad de Sevilla experimentó un rápido desarrollo infraestructural y se implementaron diversos proyectos de desarrollo vial y de embellecimiento urbano que pueden haber influido en el patrón de urbanización y la formación de la ICUs.

2. Objetivos

Este estudio tiene como objetivo examinar los patrones espacio-temporales de la TST en el contexto de la ICUs en la ciudad de Sevilla, utilizando datos satelitales en el periodo

comprendido entre 1987 y 2017. Específicamente, este estudio incluye una relación entre la TST y algunas variables importantes del paisaje, como el NDVI y el VrNIR-BI.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

Sevilla es la provincia más extensa de Andalucía con aproximadamente 14.000 km² y la más poblada con 1,7 millones de habitantes. Limita al Norte con Badajoz, al Este con Córdoba, al Sur con Cádiz y Málaga, y al Oeste con Huelva (Figura 1). Está delimitada por la cordillera de Sierra Morena al norte y por la cordillera de las Sierras Subbéticas al sureste y entre ambas se encuentra la Depresión del Guadalquivir en la porción media y baja del curso del río, cuando el valle se abre hacia el Atlántico conformando un amplio espacio de campiña y marisma. La gama climática de Sevilla es muy amplia, pues abarca desde el clima subtropical en la depresión del Guadalquivir, hasta el clima mediterráneo templado, de inviernos húmedos y veranos largos y calurosos, pasando por las zonas de la Sierra Norte y al sur de la Provincia con características climáticas más duras. La temperatura media anual es 18.6°C, siendo el mes más cálido julio con 27.8°C de media y enero el mes más frío, con temperaturas medias de 10,3°C. La precipitación media es 576 mm, siendo el mes más seco julio con una precipitación media de 1mm y el más húmedo noviembre con 87 mm de precipitación media. Centrando el área de estudio (885,21 km²) a la ciudad de Sevilla y su entorno, el paisaje es un mosaico de tierras edificadas, matorrales, pastizales y parcelas de tierras de cultivo para la producción flores, cereales y frutas. Como puede observarse en la figura 2 las zonas edificadas aparecen en un color violeta-gris claro, mientras que la vegetación aparece con un color verde. Las zonas destinadas al cultivo aparecen con un color marrón-rosáceo y las zonas de agua aparecen en azul oscuro-negro. En blanco se pueden distinguir las nubes (Oficina de turismo de Andalucía, 2017).

Figura 1: Área de estudio: Sevilla y su área circundante (ESRI basemap cortesía de ArcGis)



Figura 2: Imágenes satelitales empleadas en este estudio. Composición de bandas RGB: 654 (Landsat 8 OLI/TIRS) y RGB: 543 (Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+)



0 2,5 5 10 15 20 N

3.2 Obtención de datos y pre-procesamiento de imágenes

Para este estudio se han utilizado imágenes satelitales obtenidas en la estación seca, concretamente en julio de 1987 (Landsat 5 TM), julio de 2002 (Landsat 7 ETM+) y julio de 2017 (Landsat 8 OLI/TIRS) (Tabla 1). En los satélites Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ las bandas multiespectrales (bandas 1-5 y 7) tienen una resolución espacial de 30 m, mientras que la banda termal (banda 6) tiene una resolución espacial de 120 m y 60 m, respectivamente, la cual ha sido remuestreada para 30 m. Para el satélite Landsat 8 OLI/TIRS, las bandas multiespectrales (bandas 1-7 y 9) tienen una resolución espacial de 30 m. Su banda pancromática (banda 8) tiene una resolución espacial de 15 m, mientras que las bandas termales (bandas 10 y 11) tienen una resolución espacial de 100 m, que han sido remuestreadas para 30 m. Para este estudio, se han considerado imágenes libres de nubes (<10%) (USGS, 2018).

Sensor	ID escena	Fecha de adquisición	Hora (GMT)	Estación
Landsat 5 TM	LT52020341987182XXX02	10 de julio de 1987	10:20:26	Seca
Landsat 7 ETM+	LE72020342002183NSG00	11 de julio de 2002	10:43:45	Seca
Landsat 8 OLI/TIRS	LC82020342017184LGN00	12 de julio de 2017	10:55:07	Seca

Tabla 1: Descripción de las imágenes satelitales utilizadas

3.2.1 Calibración radiométrica

La calibración radiométrica permite convertir la información de la imagen original (bruta) de cada pixel de las bandas multiespectrales y termales, de Niveles Digitales (ND) a Niveles de Reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmosfera (TOA) y temperatura de brillo, respectivamente. Estos valores son necesarios cuando se trata de usar los datos satelitales para el análisis cuantitativo de las propiedades biofísicas de los elementos de la superficie terrestre e identificar y evaluar los procesos que en esta ocurren mediante la comparación de diferentes escenas en estudios temporales.

Para la calibración radiométrica de las distintas bandas, se ha seguido el siguiente proceso:

1. <u>Calibración</u>: Convertir los ND de cada banda a valores de radiancia (L_{λ}) como medida de la cantidad de energía que llega al satélite.

Para los satélites **Landsat 5 TM** y **Landsat 7 ETM+**, los valores de radiancia, para las bandas multiespectrales y térmicas, se obtienen a partir de la ecuación (1) (Chander y Markham, 2003; USGS, 2018).

 $L_{\lambda} = G_{\text{rescale}}^{*} Q_{\text{CAL}} + B_{\text{rescale}}, \text{ la cual puede ser expresada como:}$

(1)

 $L_{\lambda} = ((L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda})/(Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN}))^{*}(Q_{CAL} - Q_{CALMIN}) + L_{MIN\lambda}$ donde:

 L_{λ} = radiancia espectral medida en valores de watts/m^{2*}srad*µm.

Q_{CAL}= producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (ND). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

 Q_{CALMIN} = producto estándar cuantificado y calibrado por los mínimos valores de pixel (ND) (ND=0) correspondiendo a $L_{MIN\lambda}$.

 Q_{CALMAX} = producto estándar cuantificado y calibrado por los máximos valores de pixel (ND) (ND=255) correspondiendo a L_{MAXA}.

 $L_{MIN\lambda}$ = radiancia espectral escalada a Q_{CALMIN} medida en valores de watts/m²*srad*µm.

L_{MAX} = radiancia espectral escalada a Q_{CALMAX} medida en valores de watts/m^{2*}srad*µm.

 $G_{rescale} = (L_{MAXA} - L_{MINA})/Q_{CALMAX}$ medida en valores de (watts/m²*srad*µm)/ND. $B_{\text{rescale}} = LMIN_{\lambda}$ medida en valores de watts/m²*srad*µm.

Para el satélite Landsat 8 OLI/TIRS los datos pueden ser convertidos a valores de reflectancia (TOA) en el techo de la atmosfera, utilizando para ello los coeficientes de reflectancia reescalados, suministrados en el archivo de metadatos MTL (Ariza, 2013). Se utiliza, en este caso, la ecuación (2)

 $\rho_{\lambda}' = M_{\rho} Q_{CAL} + A_{\rho}$

(2)

(3)

donde:

 ρ_{λ} '= reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar.

M_p= factor multiplicativo de escalado especifico por banda obtenido del metadato.

A_p= factor aditivo de escalado especifico por banda obtenido del metadato.

2. Calculo de reflectancias en el tope de atmosfera (TOA): El cálculo de reflectancias en el tope de la atmósfera indica la relación existente entre la energía incidente y la reflejada. No posee unidades al ser un cociente de irradiancias.

Para los satélites Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ (Chander y Markham, 2003; USGS, 2018), se utiliza la ecuación (3).

 $\rho_{TOA} = (\pi^* L_{\lambda}^* d^2) / (E_{SUN\lambda}^* \cos(\theta_s))$ donde:

p_{TOA}= reflectancia planetaria o en el techo de la atmosfera TOA, con corrección por ángulo solar.

d= distancia Sol-Tierra, en Unidades Astronómicas.

 E_{SUNA} = irradiancia solar espectral a tope de atmosfera medida en valores de watts/m²*µm. θ_s = ángulo cenital solar en grados (90º- ángulo de elevación solar). El ángulo de elevación solar del centro de la escena está disponible en el metadatos de la imagen.

Para el satélite Landsat 8 OLI/TIRS, la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA con una corrección por el ángulo solar viene dada por la ecuación (4) (Ariza, 2013):

 $\rho_{TOA} = \rho_{\lambda'} / \cos(\theta_s)$

3. Corrección radiométrica en el térmico. Para la obtención de radiancias en el espectro térmico se emplean las ecuaciones (5) y (6), usando los coeficientes de calibración del sensor térmico especificados en el metadatos de la imagen (Estoque y Muruyama, 2015).

 $L_{\lambda}=M_L Q_{CAL}+A_L$

donde:

M_L= factor multiplicativo de escalado especifico por banda obtenido del metadato. A_L= factor aditivo de escalado especifico por banda obtenido del metadato.

A partir del valor de la radiancia calculado anteriormente, la temperatura de brillo se calcula mediante la ecuación (6).

$$T=K_2/(ln(K_1/L_{\lambda} + 1))$$

donde:

T= temperatura de brillo en grados Kelvin.

K₁= constante de calibración 1 medida en valores de watts/m^{2*}srad*µm, obtenida del metadato de la imagen.

K₂= constante de calibración 2 (K), obtenida del metadato de la imagen.

(5)

(6)

(4)

3.2.2 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica se ha realizado mediante el modelo de sustracción de objetos oscuros (DOS) propuesto por Chaves (1988). Este modelo postula que la bruma atmosférica incrementa el ND en áreas de las imágenes de agua limpia, profunda y calma, donde las características físicas deben presentar reflectancia nula. El valor representativo de esa diferencia se sustrae, en cada banda, en todos los píxeles de la escena. La fórmula utilizada en este modelo es la ecuación (7).

 $\rho = \rho_{TOA} - (\rho_{SCATTER} - 0.01)$ (7) donde:

 ρ_{SCATTER} = radiancia recibida por el sensor en un área donde sólo hay contribución de la atmosfera (área de sombra o agua según la región espectral). Se calcula mediante la ecuación (8).

 $\rho_{\text{SCATTER}} = (\pi^* L_{\min}^* d^2) / (E_{\text{SUN}\lambda}^* \cos(\theta_s))$ (8)

Para el cálculo de L_{min} se aplica la ecuación (9).

L_{min}=M_L*D_{Nmin}+A_L donde: DN_{min}= valor más bajo valido de ND.

3.3 Estimación de la temperatura de la superficie terrestre (TST)

Para la estimación de la TST es necesario convertir los ND de cada una de las bandas termales a valores de radiancia (L_{λ}) como medida de la cantidad de energía que llega al satélite. Estos valores de radiancia son utilizados posteriormente para realizar la conversión a temperatura de brillo en la superficie, teniendo en cuenta para ello la emisividad (LSE), la fracción de vegetación (FV), el índice de vegetación normalizado (NDVI), así como las constantes de calibración. Para la estimación de NDVI se utilizan las bandas 3 y 4 en los satélites Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ y las bandas 4 y 5 para el satélite Landsat 8 OLI/TIRS. El proceso para la estimación de la TST queda esquematizado en la figura 3.

Mediante la ecuación 10, obtenemos la TST (Ranagalage, Esteque y Muruyama, 2017).

TST=TB/(1+(
$$\lambda$$
*TB/ ρ)ln ϵ)

(10)

(9)





donde:

TB= temperatura de brillo aparente de la banda 6 y 10 para Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS, respectivamente.

 λ = longitud de onda de radiación emitida λ =11,5 µm for Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ y λ =10,8 µm for Landsat 8 OLI/TIRS.

 ρ =h x c/σ (1,438 x 10⁻² mK), σ=constante de Boltzmann (1,38 x 10⁻² J/K), h= constante de Planck's (6,626 x 10⁻³⁴ Js), y c= velocidad de la luz (2,998 x 10⁸ m/s). ε=emisividad estimada utilizando la ecuación 11.

$$\epsilon = m^* Fv + n$$
 (11)
donde:
 $m = (\epsilon_V s_R) - (1 - \epsilon_R) Fs_V v n = \epsilon_R + (1 - \epsilon_R) Fs_V dondo se v sv son la omisividad del suelo v la$

m = $(\epsilon v - \epsilon s) - (1 - \epsilon s)F\epsilon v y n = \epsilon s + (1 - \epsilon s)F\epsilon v$, donde $\epsilon s y \epsilon v son la emisividad del suelo y la vegetación respectivamente. Para este estudio se han utilizado los valores de m=0,0004 y n=0.986 (Sobrino, Jiménez-Muñoz & Paolini, 2004).$

Fv = fracción de vegetación y se obtiene aplicando la ecuación (12).

Fv=((NDVI-NDVImin)/(NDVImax-NDVImin))²

(12)

(13)

donde:

NDVI= índice de vegetación normalizado calculado utilizando la ecuación 13 (Estoque, Murayama y Myint, 2017), (Kikon et al., 2016), (Liu y Weng, 2012).

NDVI= $(\rho_{NIR}-\rho_{Red})/(\rho_{NIR}+\rho_{Red})$ donde: ρ_{NIR} = banda del infrarrojo cercano. ρ_{Red} = banda roja.

3.4 Índice de vegetación normalizado (NDVI) e Índice de área edificada basado en el rojo visible (VrNIR-BI)

NDVI es un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Para el cálculo del NDVI es necesaria la información que se encuentra en las bandas roja e infrarrojo cercano de ese espectro electromagnético (ecuación 13). NDVI varía su valor entre -1 y 1, representando los valores positivos áreas con vegetación y los valores negativos áreas con escasa o ausencia de vegetación (Zhang, Odeh y Han, 2009), (Orhan, Ekercin y Dadaser-Celik, 2014). VrNIR-BI es un índice que se utiliza para la identificación de las áreas edificadas (ecuación 14). Este índice puede tomar tanto valores negativos como positivos. Cuanto más negativo es el valor del índice menos edificada está el área analizada. Valores próximos a cero o positivos indican áreas con un elevado desarrollo urbano (Estoque & Murayama, 2015).

(14)

3.5 Análisis estadístico

Se han desarrollado gráficos de dispersión y análisis de regresión lineal con el fin de determinar la relación existente entre la TST y el NDVI y entre la TST y el VrNIR-BI. Para ello, todos los pixeles de la zona estudiada se han convertido en puntos y se han extraído de cada uno de los mapas los valores de la TST, el NDVI y el VrNIR-BI. Un total de 0.083 millones de pixeles han sido utilizados para este análisis. Con el fin de simplificar el análisis,

para esta comunicación se ha seleccionado un número de pixeles representativos del total y se han creado los gráficos correspondientes.

4. Resultados y discusión

4.1 TST en 1987, 2002 y 2017

Los mapas de la TST de la ciudad de Sevilla en 1987, 2002 y 2017 se muestran en la figura 4. En julio de 1987 la temperatura media de la zona estudiada era de 29,91°C. En julio de 2002 la temperatura media era de 32,08°C mientras que la temperatura media en 2017 fue de 37,91°C. Por tanto, como puede observarse desde el año 1987 hasta el año 2017 la temperatura de la superficie terrestre ha experimentado un incremento de 8ºC, siendo el incremento más destacado, 5,83°C, en el intervalo de tiempo comprendido entre los años 2002 y 2017, mientras que en el intervalo entre los años 1987 y 2002 fue de 2,17°C. En general, los valores más altos fueron encontrados en el centro de la ciudad así como en las zonas destinadas al cultivo característico de la zona. En el primer periodo analizado (1987-2002) la ciudad de Sevilla experimentó diversos cambios tales como la conversión en capital administrativa y política de la nueva comunidad autónoma de Andalucía, y la celebración de la Exposición Universal de 1992 (EXPO 92). Durante este periodo se llevaron a cabo la construcción de infraestructuras de comunicación, puentes, eliminación de barreras ferroviarias, así como la urbanización de la Cartuja. Se produjo una gran expansión urbana sobre todo hacia el norte (Pino Montano) y sureste (Sevilla Este y Bermejales) de la ciudad. Así mismo se llevó a cabo una regeneración urbana en sectores históricos, que dieron lugar a una clara gentrificación, provocando una migración de la población y de ciertas actividades económicas hacia espacios más periféricos (Rodríguez, 2017).

En el segundo periodo de tiempo analizado (2002-2017), se produce un incremento generalizado de la temperatura de la superficie terrestre, intensificándose en los núcleos urbanos, aumento provocado por el desarrollo urbanístico de Sevilla en el periodo 1987-2002.



Figura 4: Mapas de TST de la ciudad de Sevilla en (a) 1987; (b) 2002; y (c) 2017

4.2 NDVI en 1987, 2002 y 2017

Los mapas del NDVI de la ciudad de Sevilla en 1987, 2002 y 2017 se muestran en la figura 5. En julio 1987 el NDVI tenía un valor medio de 0,34. En julio de 2002 el valor medio de NDVI era de 0,25 mientras que en el año 2017 descendía hasta un valor medio de 0,20. En

los tres años analizados, los valores más altos del NDVI fueron localizados al norte y sur de la ciudad de Sevilla, áreas donde el crecimiento urbano ha sido escaso o poco relevante. Sevilla es una ciudad donde se ha experimentado un crecimiento y expansión urbana en forma de abanico hacia el sureste, actividad que queda reflejada en los distintos mapas. La figura 6 muestra los gráficos de dispersión que relacionan el NDVI con la TST. El análisis de regresión revela que existe una correlación negativa entre el NDVI y la TST en los tres años analizados. Los valores de R² están muy próximos a 1, con lo cual se verifica la bondad en el ajuste del modelo, existiendo una fuerte correlación entre el NDVI y la TST, de tal forma que un aumento de la TST repercute negativamente en el NDVI.



Figura 5: Mapas de NDVI de la ciudad de Sevilla en (a) 1987; (b) 2002; y (c) 2017

4.3 VrNIR-BI en 1987, 2002 y 2017

Los mapas del VrNIR-BI son mostrados en la figura 7. Se confirma el crecimiento urbano hacia el sureste de la ciudad de Sevilla. En julio de 1987 el VrNIR-BI tenía un valor medio de -0,34. En julio de 2002 el valor medio de VrNIR-BI era de -0,25 mientras que en el año 2017 alcanza un valor medio de -0,20. En el primer año analizado, las áreas con valores de VrNIR-BI altos se concentraban en el área cercana al centro de la ciudad. En los años posteriores analizados, se observa que los valores altos de VrNIR-BI se van extendiendo hacia la periferia de la ciudad. La figura 8 muestra los gráficos de dispersión que relacionan el VrNIR-BI con la TST. El análisis de regresión revela que existe una correlación positiva entre el VrNIR-BI y la TST en los tres años analizados. Los valores de R² están muy próximos a 1, con lo cual se verifica la bondad en el ajuste del modelo, existiendo una fuerte correlación entre el VrNIR-BI y la TST, de tal forma que a valores mayores del VrNIR-BI un mayor incremento de la TST.

4.4 Análisis del gradiente urbano-rural

Este análisis determina el patrón espacial del valor medio de TST, NDVI y VrNIR-BI a lo largo del gradiente urbano-rural de la ciudad de Sevilla en los años analizados (1987, 2002 y 2017). Para el desarrollo de este análisis se han creado varios anillos alrededor del centro de la ciudad a una distancia de 300 m. A continuación, se determinaron los valores medios de la TST, el NDVI y el VrNIR-BI en cada una de las zonas y se obtuvieron los gráficos correspondientes (Figura 9).







Figura 8: Relación entre VrNIR-BI y TST en 1987, 2002 y 2017



Analizando los dos periodos a lo largo del gradiente urbano-rural de la ciudad de Sevilla se observa lo siguiente:

- la TST, ha tenido un mayor incremento durante el periodo 2002 al 2017 que durante el periodo 1987 al 2002. Esto es coincidente con el hecho del rápido crecimiento y expansión urbana de la ciudad hacia la periferia, derivado de los acontecimientos que tuvieron lugar en ésta durante el primer 1987 al 2002.
- el NDVI sigue una evolución muy similar en los dos periodos, produciéndose un mayor incremento en el periodo 2002 al 2017.
- El VrNIR-BI experimenta el máximo crecimiento urbano en el primer periodo 1987 al 2002 coincidiendo con la EXPO 92 y el desarrollo urbanístico de la ciudad.

Analizando cada uno de los años, se observa que:

- la TST, en el año 1987, desciende a medida que nos alejamos del núcleo urbano; este descenso resulta menos evidente en los años 2002 y 2017.
- el NDVI experimenta un descenso a una distancia media del núcleo urbano comprendida entre 3,8 y 5,9 km., debido a la existencia de determinados núcleos urbanos, resultado de la expansión urbana hacia la periferia. A partir de los 6 km aproximadamente, el valor del índice aumenta conforme aumenta la distancia al centro de la ciudad.
- el VrNIR-BI desciende en los tres años conforme nos vamos alejando del centro de la ciudad al reducirse el tejido urbano.

Figura 9: Patrón de TST, NDVI y VrNIR-BI a través del gradiente urbano-rural de la ciudad de Sevilla en 1987, 2002 y 2017



En general, los resultados de esta investigación muestran que la ciudad de Sevilla ha experimentado un proceso de rápida urbanización en las últimas décadas, pero más especialmente durante el período 1987-2002. Esta rápida urbanización ha provocado un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre y por lo tanto un efecto de isla de calor urbana detectado en el periodo siguiente (2002-2017). La expansión de las tierras urbanizadas y la intensificación de los efectos de la ICUs que observamos en este estudio (Figura 4 y Figura 7) han ocasionado que áreas más abiertas y con vegetación hayan sido reemplazadas por superficies impermeables como edificios, carreteras, estacionamientos, aceras y otras construcciones. Se plantea de este modo, la hipótesis de que el aumento observado en el valor medio de la TST en la ciudad de Sevilla puede deberse principalmente a la rápida urbanización del área. Las correlaciones significativas entre la TST y el NDVI (negativa) y entre la TST y el VrNIR-BI (positiva) (Figura 6 y Figura 8) que encontramos en este estudio respaldan esta afirmación y también son consistentes con otros hallazgos previos (Kumar y Shekhar, 2015), (Zhang, Odeh y Han, 2009).

5. Conclusiones

En este estudio, examinamos los patrones espacio-temporales de TST en la ciudad de Sevilla dentro del contexto del fenómeno ICUs usando datos de satélite entre los años 1987 y 2017. Encontramos indicios de la intensificación de los efectos de la ICUs, especialmente durante el período 1987-2002, cuando la urbanización fue más rápida. Las correlaciones significativas, fuertes y positivas entre la TST y el VrNIR-BI en los tres puntos temporales (1987, 2002 y 2017) confirman la fuerte influencia de la urbanización en la formación de la ICUs. Todos los esfuerzos llevados a cabo con el fin de conseguir el reverdecimiento urbano son necesarios ya que los espacios verdes urbanos pueden ayudar a mitigar los efectos del calentamiento debido a la ICUs. En este sentido y en el contexto del fenómeno de ICUs, Sevilla quiere ser la Capital Verde Europea de 2019 y para conseguirlo, ha preparado y presentado su candidatura ante la Comisión Europea, donde competirá con otras 13 ciudades para llevarse el reconocimiento, entre las que se encuentran Lisboa, Tallín, Oslo y Florencia. Las medidas con las que está trabajando la candidatura se articulan en torno a

cuatro ejes principales: aumento de la vegetación del casco urbano, impulso del ahorro y la eficiencia energética, logro de una movilidad sostenible y avance en la educación por el clima. En el caso de que la ciudad de Sevilla fuese reconocida como Capital Verde de 2019, los autores piensan que resultaría interesante ampliar este estudio, analizando el periodo de años a partir de 2017, con el fin de comprobar en qué medida las actuaciones llevadas a cabo para obtener la candidatura han sido eficientes y han conseguido un descenso de TST y en consecuencia mitigar los efectos de la ICUs.

6. Referencias

- Ariza, A. (2013). Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Ladsat data continuaty misión). Versión 1-0. Instituto Geográfico Agustín. Bogotá, Colombia. http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf
- Barrionuevo, A. (2003). Sevilla: Formas de crecimiento y construcción de la ciudad. Sevilla, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Bokaie, M., Zarkesh, M.K., Arasteh, P.D., & Hosseini, A. (2016). Assessment of urban heat island based on the relationship between land surface temperature and land use/land cover in Tehran. *Sustain. Cities Soc, 23*, 94–104. http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.03.009
- Chander, C., & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, *41*(*11*), 2674-2677. doi: 10.1109/TGRS.2003.818464
- Chávez, P.S. (1988). An improved dark-object substraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment, 24*,459-479. <u>https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3</u>
- Estoque, R.C., & Murayama, Y. (2015). Classification and change detection of buit-up lands from Landsat -7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. *Ecological Indicators, 56*, 205–217. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.037
- Estoque, R.C., Murayama, Y., & Myint, S.W. (2017). Effects of landscape composition and pattern on land Surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Sci. Total Environ.*, *577*, 349–359. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.195
- Kikon, N., Singh, P., Singh, S.K., & Vyas, A. (2016). Assessment of urban heat islands (UHI) of Noida City, India using multi-temporal satellite data. Sustain. Cities Soc., 22, 19–28. <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.01.005</u>
- Kumar, D., & Shekhar, S. (2015). Statistical analysis of land surface temperaturevegetation indexes relationship through thermal remote sensing. *Ecotoxicol. Environ. Saf., 121*, 39–44. <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.004</u>
- Liu, H., & Weng, Q. (2012). Enhancing temporal resolution of satellite imagery for public health studies: A case study of West Nile Virus outbreak in Los Angeles in 2007. *Remote Sens. Environ., 117*, 57–71. doi:10.1016/j.rse.2011.06.023

- Liu, L., & Zhang, Y. (2011). Urban heat island analysis using the landsat TM data and ASTER Data: A case study in Hong Kong. *Remote Sens.*, *3*, 1535–1552. doi:10.3390/rs3071535
- Madlener, R., & Sunak, Y. (2011). Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: what can we learn for urban energy planning and urbanization management? *Sustainable Cities and Society, 1,* 45–53. doi:10.1016/j.scs.2010.08.006
- Oficina de turismo de Andalucía. Obtenido el 25 de marzo de 2017, desde <u>http://www.andalucia.org/es/destinos/provincias/sevilla/</u>
- Organización de la Naciones Unidas (2016). *Urbanización y Desarrollo: Futuros Emergentes*. Reporte Ciudades del Mundo, 2016. Nairobi, Kenia. <u>http://nua.unhabitat.org/uploads/Reportedelasciudades2016.pdf</u>
- Orhan, O., Ekercin, S., & Dadaser-Celik, F. (2014). Use of Landsat land surface temperature and vegetation indices for monitoring drought in the Salt Lake Basin Area, Turkey. Sci. World J., 1–11. <u>http://dx.doi.org/10.1155/2014/142939</u>
- Ranagalage, M., Estoque, R.C., & Muruyama, Y. (2017). An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997 2017). International Journal of Geo-Information, 7(6), 189-206. doi: 10.3390/ijgi6070189
- Rodríguez Mateos, J.C. Obtenido el 30 de marzo de 2017, desde <u>http://titulaciongeografia-sevilla.es/contenidos/profesores/materiales/archivos/2017-</u> <u>10-29EVOL URBAN.pdf</u>
- Senanayake, I.P., Welivitiya, W.P.D.P., & Nadeeka, P.M. (2013). Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat -7 ETM+data. *Urban Clim.*, 5, 19–35. <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2013.07.004</u>
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sens. Environ., 90*, 434-440. doi:10.1016/j.rse.2004.02.003
- United Nations (2015). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision: Highlights. New York, NY, USA
- USGS (2018). Landsat 7 (L7) Data Users Handbook. Sección 5. Available online: <u>https://landsat.usgs.gov/landsat-7-data-users-handbook-section-5</u> (accessed on 12 February 2018)
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperaturevegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment, 89,*467-483. doi:10.1016/j.rse.2003.11.005
- Zhang, Y., Odeh, I.O.A., & Han, C. (2009). Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis. *Int. J.Appl. EarthObs. Geoinf.*, *11*, 256–264. doi:10.1016/j.jag.2009.03.001