

# Determinación de la temperatura de la superficie terrestre mediante imágenes Landsat 8: Estudio comparativo de algoritmos sobre la ciudad de Granada

David Hidalgo-García 

<sup>1</sup> *Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Universidad de Granada, ETS. Ingeniería de Edificación, Campus de Fuentenueva, Granada, España.*

---

**Resumen:** El empleo de imágenes satelitales se ha convertido, en las últimas décadas, en una de las formas más habituales para determinar la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST). Una de ellas es mediante el empleo de imágenes Landsat 8 que requiere del uso de algoritmos del tipo monocanal (MC) y bicanal (BC). En este estudio se ha determinado la TST de una ciudad de tamaño medio, Granada (España) a lo largo de un año mediante el empleo de cinco algoritmos Landsat 8 que posteriormente se comparan con las temperaturas ambientales. Pocos estudios comparan la fuente de datos con las variaciones estacio-temporales de una misma metrópolis lo que unido a su situación geográfica, alta contaminación y las importantes variaciones térmicas que experimenta la convierten en un lugar adecuado para el desarrollo de esta investigación. Como resultado del proceso de análisis estadístico se obtuvieron los coeficientes de regresión  $R^2$ , el error medio cuadrático (RMSE), sesgo medio del error (MBE) y la desviación estándar (DE). Los resultados medios obtenidos revelan que las TST derivada de los algoritmos BC (1,0 °C) son las más próximas a las temperaturas ambientales en contraposición con los MC (-5,6 °C) aunque se han verificado importantes variaciones entre las distintas zonas de la urbe según su cobertura y los periodos estacionales. Por todo ello, se concluye que los algoritmos BC son los más adecuados para recuperar la TST de la urbe objeto de estudio.

**Palabras clave:** Landsat 8, temperatura superficie terrestre, datos infrarrojos, teledetección y algoritmos.

## Determination of land surface temperature using Landsat 8 images: Comparative study of algorithms on the city of Granada

**Abstract:** The use of satellite images has become, in recent decades, one of the most common ways to determine the Land Surface Temperature (LST). One of them is through the use of Landsat 8 images that requires the use of single-channel (MC) and two-channel (BC) algorithms. In this study, the LST of a medium-sized city, Granada (Spain) has been determined over a year by using five Landsat 8 algorithms that are subsequently compared with ambient temperatures. Few studies compare the data source with the seasonal variations of the same metropolis, which together with its geographical location, high pollution and the significant thermal variations it experiences make it a suitable place for the development of this research. As a result of the statistical analysis process, the regression coefficients  $R^2$ , mean square error (RMSE), mean error bias (MBE) and standard deviation (SD) were

**To cite this article:** Hidalgo-García, D. 2021. Determination of land surface temperature using Landsat 8 images: Comparative study of algorithms on the city of Granada. *Revista de Teledetección*, 58, 1-21. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.14538>

\* *Corresponding author:* [dhidalgo@ugr.es](mailto:dhidalgo@ugr.es)

obtained. The average results obtained reveal that the LST derived from the BC algorithms (1.0 °C) are the closest to the ambient temperatures in contrast to the MC (-5.6 °C), although important variations have been verified between the different zones of the city according to its coverage and seasonal periods. Therefore, it is concluded that the BC algorithms are the most suitable for recovering the LST of the city under study.

**Key words:** Landsat 8, land surface temperature, thermal infrared data, remote sensing and algorithms.

---

## 1. Introducción

La TST (Temperatura de la Superficie Terrestre) está considerada como uno de los parámetros esenciales en los procesos físicos de la superficie terrestre (Zhan et al., 2013) estando presente en los estudios sobre cambio climático (Srivanit et al., 2012) y en las investigaciones sobre el fenómeno urbano denominado isla de calor urbana (ICU) (Barbieri et al., 2018; Keeratikasikorn y Bonafoni, 2018; Khalaf, 2018; Macarof y Statescu, 2017; Sekertekin, 2019). En este sentido, resulta de gran importancia estimar de manera fiable la TST ya que se ha convertido en un método esencial para evaluar el intercambio de agua y energía superficial con la atmósfera lo que podría repercutir en una mejora de la calidad de vida de las personas (Yu et al., 2014).

Debido al elevado coste económico que necesitan las mediciones *in situ* y la dificultad que conlleva desarrollarlas sobre grandes extensiones de territorio permitió que, a partir de la década de los años 1990, se produjera un auge en el empleo de la detección remota mediante imágenes satelitales con sensores de infrarrojos térmicos (TIRS). Uno de ellos, es el satélite Landsat 8 puesto en órbita en el año 2013 y que cuenta con el sensor TIRS que incluye las bandas 10 y 11. Este proporciona estimaciones de TST a una resolución de 100 metros y su uso en estudios de TST está ampliamente extendido (Kafer et al., 2019; Lemus-Canovas et al., 2020; Li y Meng, 2018). Tras su puesta en funcionamiento se observaron errores radiométricos que superaban el valor máximo permitido del 2%. En concreto, se observaron valores absolutos de entre 4-5% para las mediciones de la banda 10 y del 8-9% para las mediciones de la banda 11 (García-Santos et al., 2018). Al objeto de corregir estas deficiencias los autores Gerace y Montanaro, 2017 (Gerace y Montanaro, 2017) propusieron un algoritmo de corrección de luz parásita

denominado *Stray Light Correction Algorithm* (SLCA). Este fue implantado a partir de febrero de 2017 en las imágenes del Sistema Terrestre del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y numerosos académicos han trabajado en un proceso de validación mediante estudios aplicados sobre el territorio (Barbieri et al., 2018; García-Santos et al., 2018; Meng et al., 2019; Sekertekin, 2019; Sekertekin y Bonafoni, 2020).

Actualmente, el empleo de algoritmos para recuperar la TST presenta dos desafíos importantes: 1) La resolución espacial de los píxeles de los sistemas TST puede variar entre 60 metros para Landsat 7 y ECOSTRESS y 1000 metros para Séntinel 3 o MODIS. Esta circunstancia puede originar que existan píxeles que contengan varios tipos de superficies, lo que dificulta la obtención de la TST (Li et al., 2013). 2) La TST satelital requiere de un proceso de verificación que valide los rendimientos de los algoritmos empleados. Las técnicas habituales de validación de algoritmos TST son las siguientes: mediciones *in situ*, método de la radiancia y referencia cruzada (Li et al., 2013). No obstante, en las últimas décadas, el método de comparación con las temperaturas ambientales cerca del suelo (1-2 metros) está tomando importancia en numerosas investigaciones (Avdan y Jovanovska, 2016; Gallo et al., 2011; Liu y Zhang, 2011; Mukherjee y Singh, 2020; Rongali et al., 2018) como sistema que permite comparar los resultados obtenidos.

El objetivo principal de esta investigación es determinar la adecuación de cinco algoritmos utilizados sobre imágenes Landsat 8 para estimar la TST de la ciudad de Granada a lo largo de un año. Para ello, y tras su determinación, se ha procedido a compararlas con los datos de temperatura ambiental cerca del suelo (0,5 metros) obtenidos mediante sondas de temperatura y humedad de

alta precisión. A continuación, y mediante la ayuda del análisis estadístico, se han obtenido los valores de  $R^2$ , RMSE, MBE y DE que nos ha permitido evaluar la madurez y precisión de los algoritmos empleados. El cálculo de la TST ha permitido localizar los puntos cálidos y fríos de la urbe identificándolas con las zonas urbanas, suburbanas y verdes. Estas circunstancias unidas a las importantes variaciones de temperatura que se producen en la urbe a lo largo del año motivadas por la cercanía a Sierra Nevada (30 km) y a la costa (60 km) junto a su situación geográfica de latitud media y alta contaminación hacen que sea un sitio oportuno para el estudio de la TST mediante algoritmos de recuperación.

## 2. Área de estudio y fuente de datos

El área objeto de estudio es la ciudad de Granada, (Andalucía), al sur de España. Las coordenadas geográficas UTM de la urbe son: latitud  $37,111741^\circ$  N y longitud  $03,362401^\circ$  O y su altitud es de 680 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). Su clima se encuentra fuertemente condicionado por ubicarse en la falda de Sierra Nevada. De acuerdo con la clasificación climática de koppengeiger, cuenta con un clima de transición entre el clima mediterráneo (Csa) y el clima semiárido frío (Bsk) lo que implica inviernos húmedos y suaves y veranos cálidos y secos (De Castro et al., 2007). Es una ciudad de tamaño medio que cuenta con una población de 232462 habitantes, aunque llega

a un total de 540000 habitantes con la inclusión de su área metropolitana.

### 2.1. Imágenes Landsat

La ciudad de Granada se encuentra bajo la ruta del satélite Landsat 8, camino 20, ruta 34. Las imágenes elegidas para el estudio se encuentran temporalmente ubicadas entre los meses de noviembre de 2018 y octubre de 2019. A lo largo de este intervalo de tiempo se han utilizado 11 imágenes con un índice de nubosidad inferior al 15% al objeto de aumentar la exactitud en la obtención de la TST. Las imágenes empleadas se encuentran referenciadas en la Tabla 1.

Tras la descarga de las imágenes, la resolución espacial de las bandas 10 y 11 se reclasificaron a una resolución de 30 metros al objeto de que fueran iguales al resto de bandas y poder obtener píxeles homogéneos de TST y emisividad. Las imágenes procesadas fueron georreferenciadas utilizando el sistema de proyección ETRS89/UTM Zona 30N. Al objeto de proceder a la corrección atmosférica en bandas OLI se utilizó el algoritmo DOS (Sustracción de objetos oscuros) (Chavez, 1988; Li y Meng, 2018; Zhang et al., 2015) mediante el *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) bajo el entorno de software de código abierto QGIS, versión 3.10.5 (Barbieri et al., 2018; Congedo, 2016; Rozenstein et al., 2014).

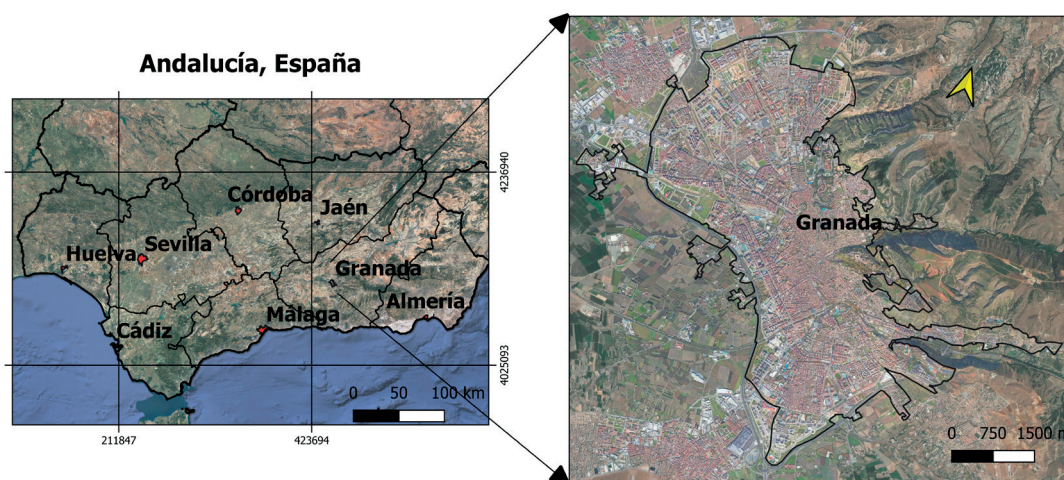


Figura 1. Área de Estudio de Granada, Andalucía, España.

**Tabla 1.** Imágenes Landsat 8 empleadas y adquiridas en el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Número	Fecha (dd/mm/yyyy)	UTC Hora (hhmm)	Nubosidad	Nombre Fichero Landsat 8
1	29/11/2018	10:49	5	LC08_L1TP_200034_20181129_20181211
2	15/12/2018	10:49	1	LC08_L1TP_200034_20181215_20181227
3	31/12/2018	10:55	5	LC08_L1TP_200034_20181231_20190130
4	17/02/2019	10:49	11	LC08_L1TP_200034_20190217_20190222
5	21/03/2019	10:55	6	LC08_L1TP_200034_20190321_20190321
6	25/06/2019	10:49	0	LC08_L1TP_200034_20190625_20190705
7	11/07/2019	10:50	1	LC08_L1TP_200034_20190711_20190719
8	27/07/2019	10:50	13	LC08_L1TP_200034_20190727_20190801
9	28/08/2019	10,55	5	LC08_L1TP_200034_20190828_20190903
10	29/09/2019	10:50	3	LC08_L1TP_200034_20190929_20191017
11	15/10/2019	10:50	1	LC08_L1TP_200034_20191015_20191029

## 2.2. Validación de algoritmos

En la literatura se pueden encontrar tres métodos de validación de la TST mediante imágenes satelitales: mediciones *in situ*, método de la radiancia y referencia cruzada. Estos permiten obtener la fiabilidad y el margen de incertidumbre que presentan en la toma de mediciones. El primer método es difícil y costoso ya que requiere de radiómetros ubicados sobre terrenos de cobertura homogénea (lagos, pastizales, dunas y regiones con vegetación) y dimensión igual al píxel de la imagen satelital. No obstante, existen numerosas investigaciones de validación de la TST mediante este sistema que han reportado diferencias que oscilan entre 1,3 y 1,6°C (Coll et al., 2005), 1 y 3°C (Prata, 1995), 0,8 y 2,7°C (Peres, 2008) y entre 2 y 5°C (Srivastava et al., 2009). El segundo método requiere obtener la emisividad del suelo y los perfiles atmosféricos *in situ* lo que lo convierte en su principal inconveniente. Estos se pueden simular utilizando el software MODTRAN 4.0 y aunque su uso es habitual en la literatura (García-Santos et al., 2018; Jin et al., 2015; Wang et al., 2019) su principal inconveniente radica en verificar que los perfiles simulados se adecuan a la atmósfera real del punto estudiado (Coll et al., 2012). El tercer método implica la validación de valores TST recuperados con valores TST bien documentados o validados por otros satélites (Qin et al., 2001; Trigo et al., 2008). Presenta la ventaja de no requerir mediciones *in situ* o simuladas pero la precisión es muy sensible a los desajustes espaciales y temporales de las mediciones (Li et al., 2013) a la vez de requerir resoluciones espaciales similares para proceder a la validación.

En las últimas décadas, numerosas investigaciones (Avdan y Jovanovska, 2016; Gallo et al., 2011; Li et al., 2013; Rongali et al., 2018; Srivastava et al., 2009) utilizan un método de comparación con las temperaturas ambientales cerca del suelo (1-2 metros) para otorgar validez a los resultados obtenidos de TST. Este consiste en comparar la TST recuperada con la temperatura ambiental obtenida mediante estaciones meteorológicas o sondas de temperatura ubicadas cerca del suelo. Aunque ambas temperaturas son distintas es conocido que se encuentran completamente relacionadas (Avdan y Jovanovska, 2016; Srivastava et al., 2009) por lo que aumenta la importancia de la obtención de los valores  $R^2$ , RMSE, MBE y DE. Se trata de un método rápido, sencillo y de bajo costo aunque su inconveniente principal radica en encontrar píxeles homogéneos dentro de las ciudades que no contengan varias superficies y que permitan obtener valores correctos de TST (Li et al., 2013; Wang et al., 2019). Esta circunstancia es fundamental ya que la TST presenta una alta variabilidad tanto en el espacio como en el tiempo (Prata et al., 1995) permitiendo que pueda variar rápidamente en los píxeles cercanos de una imagen satelital o en poco tiempo sobre algunos tipos de cobertura. Por tanto, se limita la validación de la TST a superficies relativamente homogéneas, como lagos, dunas, desiertos y tierras con vegetación densa o desnuda. Este inconveniente se minimiza mediante el empleo de Landsat 8 ya que la resolución de sus bandas térmicas es de 100 metros, siendo esta una distancia adecuada para localizar en zonas verdes o desnudas dentro o anexas a las urbes. La precisión de este método ha reportado en investigaciones anteriores

unas diferencias entre la TST recuperada y las temperaturas ambientales medidas que oscilan entre los 0,2 y 7,8 °C (Avdan y Jovanovska, 2016; Gallo et al., 2011; Liu y Zhang, 2011; Mukherjee y Singh, 2020; Rongali et al., 2018; Stisen et al., 2007). Estos valores son muy similares a los obtenidos con el resto de métodos de validación.

En nuestra investigación, se ha optado por comparar la TST con la temperatura ambiental cerca del suelo (0,50 metros de altura) obtenida con sondas de temperatura y humedad de alta precisión (marca Testo, modelo 175H1) homologadas y con certificado de calibración. En la Tabla 2 se pueden observar las ubicaciones elegidas.

### 3. Materiales y métodos

La metodología llevada a cabo para el desarrollo de este trabajo de investigación se encuentra descrita en la Figura 2.

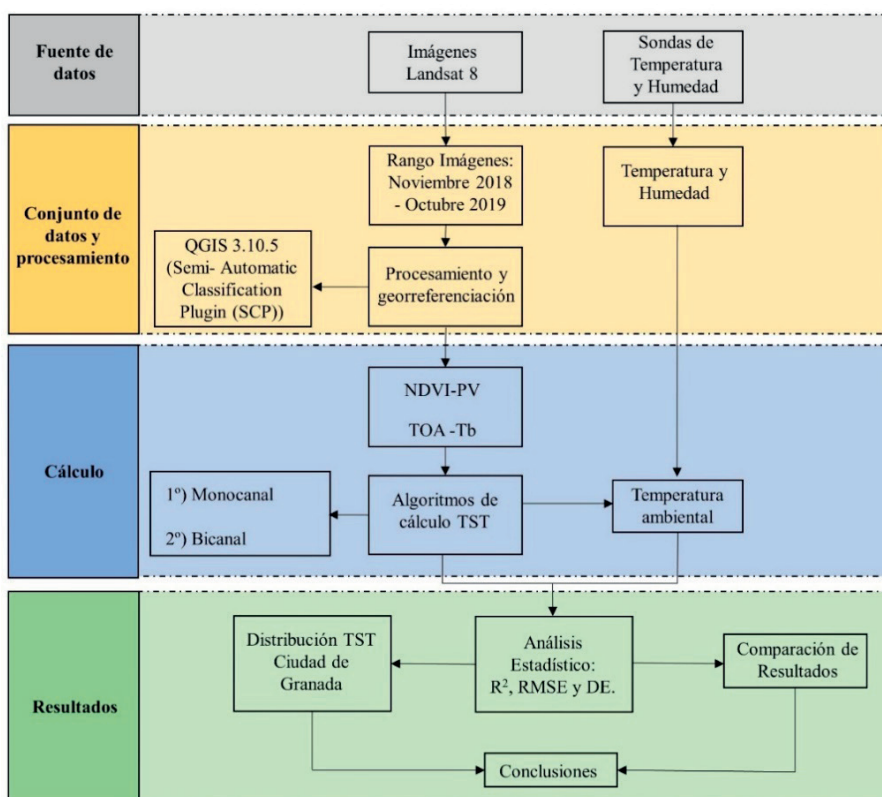
#### 3.1. Método umbral de cálculo NDVI (NDVI<sup>THM</sup>)

El índice de vegetación normalizado (NDVI) se calcula mediante la reflectividad de las bandas 5 ( $\rho_5$ ) y 4 ( $\rho_4$ ). Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (1)$$

**Tabla 2.** Ubicación y características de los puntos de control.

Lugar	Lat/Lon	Elevación (m)	Cobertura	Zona
Parque Almunia	37,19 N/ -3,62 W	656,73	Edificaciones	Periferia
Fuentenueva	37,18 N/ -3,60 W	669,32	Zona verde	Centro ciudad
Albayzin	37,18 N/ -3,59 W	698,44	Edificaciones	Centro ciudad
Camino de Ronda	37,17 N/ -3,60 W	662,46	Edificaciones	Centro ciudad
Zaidín	37,15 N/ -3,38 W	691,53	Edificaciones	Periferia



**Figura 2.** Metodología.

Con los resultados obtenidos en la Ecuación 1 se puede calcular la proporción de cubierta vegetal (Pv) según Ecuación 2 (Carlson y Ripley, 1997):

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (2)$$

donde, NDVI es el índice de vegetación normalizado obtenido mediante la Ecuación 1 y los  $NDVI_{max}$  y  $NDVI_{min}$  son los valores máximos y mínimos del intervalo NDVI. El cálculo de la emisividad se ha realizado mediante el método del umbral NDVI (Carlson y Ripley, 1997; Jiménez-Muñoz et al., 2014; Li y Meng, 2018; Sobrino et al., 2008; Yu et al., 2014).

### 3.2. Emisividad

El análisis térmico requiere de estimaciones precisas de la emisividad de las coberturas de la superficie terrestre. Uno de los métodos habitualmente empleados (Jiménez-Muñoz et al., 2014; Li y Meng, 2018; Sobrino et al., 2008; Yang et al., 2020; Yu et al., 2014) es mediante el índice de vegetación normalizado (Sobrino y Raissouni, 2000) en función de su correlación con las bandas visibles y del infrarrojo cercano. Los autores Becker y Li, (1995) establecen que las distribuciones de TST y emisividad dentro del píxel son medibles desde el espacio y por tanto, este método se recomienda para la determinación de la TST. Este se implementa convencionalmente mediante los umbrales NDVI distinguiendo entre distintos tipos de cobertura y por tanto, permite diferenciar la emisividad de las cubiertas terrestres (Li y Meng, 2018). Es fácil de aplicar y obtiene

unos resultados satisfactorios (Sekertekin, 2019) presentando mayor precisión en longitudes de onda que oscilan entre 10-12  $\mu\text{m}$  (Wang et al., 2019) donde se encuentran las bandas térmicas 10 y 11 de Landsat 8. Con los datos obtenidos mediante las Ecuaciones (1) y (2) se puede calcular la emisividad del suelo mediante la Fórmula (3) para la banda 10 y la Fórmula (4) para la banda 11 (Tabla 3) (Sekertekin y Bonafoni, 2020).

Los subíndices  $\epsilon_v$  y  $\epsilon_s$  indicados se corresponden para Landsat 8 bandas 10 y 11, respectivamente (Yu et al., 2014). El factor  $C_i$  empleado ha sido de  $C_i=0$  para superficies planas (Li y Meng, 2018).

### 3.3. Radiancia espectral (TOA) y temperatura de brillo (TB)

La determinación de la TOA se ha realizado de forma directa mediante el producto de alto nivel de Landsat 8 para la reflectancia de la superficie. Este, en comparación con el método tradicional de números digitales (DN) de las bandas TIRS, presenta la ventaja de contener una banda de garantía de la calidad de píxeles derivada de los algoritmos de máscara de función de nube (CFMask) (USGS, 2017). Esta proporciona información sobre el estado de las nubes produciendo una mejora importante en los valores de cada píxel.

A continuación, se ha procedido a convertir la TOA en temperatura de brillo (Tb) en grados centígrados. Para ello, se han utilizado las constantes de conversión térmicas  $K_1$  y  $K_2$  de las bandas TIRS que aparecen en el archivo de metadatos, (banda 10:  $K_1=774,8553$  y

**Tabla 3.** Estimación de la Emisividad del Suelo NDVI<sup>THM</sup>.

Bandas	Emisividad del Suelo	NDVI	Zona de control
10	$0,973 - 0,074\rho_4$	$NDVI < 0,2$	(3) 100×100 metros
	$\epsilon_v + \epsilon_s(1-P_v) + C_i$	$0,2 \leq NDVI \leq 0,5$	
	$\epsilon_v + C_i$	$NDVI > 0,5$	
$\epsilon_v=0,9863; \epsilon_s=0,9668$			
11	$0,984 - 0,026\rho_4$	$NDVI < 0,2$	(4) 100×100 metros
	$\epsilon_v + \epsilon_s(1-P_v) + C_i$	$0,2 \leq NDVI \leq 0,5$	
	$\epsilon_v + C_i$	$NDVI > 0,5$	
$\epsilon_v=0,9896; \epsilon_s=0,9747$			

Nota:  $\epsilon_v$  y  $\epsilon_s$ : emisividades de vegetación y suelo.  $C_i$ : Coeficiente rugosidad.  $\rho_4$ : Reflectividad banda 4.

$K_2=1321,0789$ ; banda 11:  $K_1=480,8883$  y  $K_2=120,1442$ ) según fórmula (Barbieri et al., 2018; Kafer et al., 2019):

$$T_B = \frac{K_2}{\log\left(\frac{K_1}{L_\lambda} - 1\right)} - 273,15 \quad (5)$$

### 3.4. Descripción de los algoritmos de recuperación de la temperatura (TST)

#### 3.4.1. Algoritmos Monocanal

El primer método empleado dentro del grupo MC para el cálculo de la TST es el algoritmo validado (Qin et al., 2001; Wang et al., 2015a) según las ecuaciones siguientes:

$$TST = \frac{[a_{10}(1-C_{10}-D_{10}) + (b_{10}(1-C_{10}-D_{10}) + C_{10}-D_{10})T_{10} - D_{10}T_a]}{C_{10}} \quad (6)$$

$$C_{10} = \tau_{10}\varepsilon_{10} \quad (7)$$

$$D_{10} = (1-\tau_{10})[1+(1-\varepsilon_{10})\tau_{10}] \quad (8)$$

$$T_{a(Summer)} = 16,0110 + 0,9262 T_o \quad (9)$$

$$T_{a(Winter)} = 19,2704 + 0,9112 T_o \quad (10)$$

$$\tau_{10(Summer)} = 0,9184 - 0,0725 w \quad (11)$$

$$\tau_{10(Winter)} = 0,9228 - 0,0735 w \quad (12)$$

donde, TST es la temperatura de la superficie terrestre,  $a_{10}$  y  $b_{10}$  son las contantes utilizadas para aproximar la derivada de la función de radiancia de Planck para la banda TIRS 10 con valores de -62,7182 y 0,4339 respectivamente,  $T_{10}$  es la temperatura de brillo de Landsat 8 TIRS 10,  $\tau_{10}$  es la transmitancia atmosférica de Landsat 8 TIRS banda 10 para los periodos de verano e invierno,  $\varepsilon_{10}$  es la emisividad del terreno para la banda 10,  $T_o$  es la temperatura del aire cercana a la superficie obtenidas mediante las sondas,  $T_a$  es la temperatura media atmosférica efectiva para los periodos de verano e invierno y  $w$  es el contenido total de vapor de agua de la atmósfera (Wang et al., 2015a; Wang et al., 2019).

El segundo método empleado dentro del grupo MC para el cálculo de la TST es el algoritmo validado (Jiménez-Muñoz et al., 2014) según las ecuaciones siguientes:

$$TST = \gamma \left[ \frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{TOA10} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{T_{b10}^2}{b_\gamma L_{TOA10}} \quad (14)$$

$$\delta = T_{b10} - \frac{T_{b10}^2}{b_\gamma} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,04019 & 0,02916 & 1,01523 \\ -0,38333 & -1,50294 & 0,20324 \\ 0,00918 & 1,36072 & -0,27514 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

donde,  $\varepsilon_{10}$  es la emisividad del terreno para la banda 10,  $L_{TOA10}$  es la radiancia espectral de la banda 10,  $b_\gamma$  es un valor constante de 1324 para la banda 10,  $T_b$  es la temperatura de brillo de Landsat 8 TIRS banda 10 y  $w$  es el vapor de agua atmosférico.

#### 3.4.2. Algoritmos Bicanal

El primer algoritmo empleado se encuentra validado (Jiménez-Muñoz et al., 2014) y su expresión es:

$$TST = T_{b10} + C_1(T_{b10} - T_{b11}) + C_2(T_{b10} - T_{b11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4 w)(1-\varepsilon) + (C_5 + C_6 w)\Delta\varepsilon \quad (17)$$

donde,  $T_{b10}$  y  $T_{b11}$  representan la temperatura de brillo de Landsat 8 TIRS, bandas 10 y 11,  $w$  es el vapor de agua atmosférico,  $\varepsilon$  y  $\Delta\varepsilon$  son los valores de la emisividad media y diferencia de emisividad entre las bandas 10 y 11, respectivamente. Los coeficientes  $C$  utilizados han sido:  $C_0=-0,268$ ,  $C_1=1,378$ ,  $C_2=0,183$ ,  $C_3=54,30$ ,  $C_4=-2,238$ ,  $C_5=129,20$  y  $C_6=16,40$  (Jiménez-Muñoz et al., 2014) según el rango de vapor de agua en la atmósfera marcadas por las sondas.

El segundo algoritmo utilizado en este estudio de investigación se encuentra validado (Du et al., 2015) y basado en el estudio previo validado (Wan y Dozier, 1996). Su expresión es:

$$TST = b_0 + \left( b_1 + b_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{b10} + T_{b11}}{2} + \left( b_4 + b_5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b_6 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{b10} - T_{b11}}{2} + b_7 (T_{b10} - T_{b11})^2 \quad (18)$$

donde,  $T_{b10}$  y  $T_{b11}$  representan la temperatura de brillo de Landsat 8 TIRS, bandas 10 y 11,  $\varepsilon$

y  $\Delta\epsilon$  son los valores de la emisividad media y diferencia de emisividad entre las bandas 10 y 11, respectivamente. Los coeficientes seleccionados están basados en el grado de vapor de agua atmosférico ( $w$ ). En este estudio se han empleado los coeficientes:  $b_0=-2,78009$ ,  $b_1=1,01408$ ,  $b_2=0,15833$ ,  $b_3=-0,34991$ ,  $b_4=4,04487$ ,  $b_5=3,55414$ ,  $b_6=-8,88394$  y  $b_7=0,9152$  incluidos dentro del rango  $w$  de 0 y 2,5 g cm<sup>-2</sup> (Du et al., 2015).

El último algoritmo empleado para el cálculo del TST se encuentra validado (Mao et al., 2005) con coeficientes re-parametrizados y validados (Yu et al., 2014).

$$TST= T_{b10}+B_1(T_{b10}-T_{b11})+B_0] \quad (19)$$

$$B_0= \frac{C_{11}(1-A_{10}-C_{10})L_{10}-C_{10}(1-A_{11}-C_{11})L_{11}}{C_{11}A_{10}-C_{10}A_{11}} \quad (20)$$

$$B_1= \frac{C_{10}}{C_{11}A_{10}-C_{10}A_{11}} \quad (21)$$

$$A_{10}=\epsilon_{10}\tau_{10} \quad (22)$$

$$A_{11}=\epsilon_{11}\tau_{11} \quad (23)$$

$$C_{10}=(1-\tau_{10})[1+(1-\epsilon_{10})\tau_{10}] \quad (24)$$

$$C_{11}=(1-\tau_{11})[1+(1-\epsilon_{11})\tau_{11}] \quad (25)$$

donde,  $T_{b10}$  y  $T_{b11}$  representan la temperatura de brillo de Landsat 8 TIRS, bandas 10 y 11,  $\epsilon_{10}$  y  $\epsilon_{11}$  es la emisividad del terreno para las bandas 10 y 11. Para el cálculo de  $\tau_{10}$  y  $\tau_{11}$  (transmitancia atmosférica para las bandas 10 y 11) se realizó mediante la simulación de las condiciones atmosféricas locales, especialmente con contenido de vapor de agua (Mao et al., 2005; Qin et al., 2001). Se ha empleado el estándar estadounidense de 1976 y el perfil atmosférico de verano de latitud media de MODTRAN para un rango de vapor de agua en la atmósfera de entre 0 y 3 g cm<sup>-2</sup> (Yu et al., 2014).

### 3.4.3. Vapor de agua

Para determinar el contenido del vapor de agua en la atmósfera se han empleado los datos de humedad superficial recuperados de las mediciones realizadas mediante las sondas empleadas. El contenido del vapor de agua en la columna atmosférica hasta la altitud del satélite se puede determinar según la expresión (26) (Qin et al., 2001; Wang et al., 2015b):

$$W= \frac{W(0)}{R_w(0)} \quad (26)$$

$$W(0)= \frac{H \times E \times A}{1000} \quad (27)$$

donde  $W$  es el contenido del vapor de agua en la columna atmosférica hasta el sensor (g cm<sup>-2</sup>). Esta variable, y al contrario de la humedad superficial, es alta en verano y baja en invierno.  $W(0)$  es el contenido del vapor de agua en el suelo de la atmosfera y  $R_w(0)$  es la relación entre el contenido de vapor de agua de la primera capa y el total. La  $R_w(0)$  elegida según la latitud de Granada ha sido de 0,6834 para el verano y de 0,6356 para el invierno (Qin et al., 2001). Para determinar la  $W(0)$  se ha recurrido a la expresión (27), donde  $H$  es la humedad del aire en el suelo (%) obtenida mediante la sonda de medición,  $E$  es la proporción mezcla de saturación (g kg<sup>-1</sup>) de vapor de agua y aire para la temperatura ambiental y  $A$  es la densidad del aire (kg m<sup>-3</sup>) a la temperatura ambiental. Los valores de  $E$  y  $A$  en base a la temperatura ambiental se han obtenido según los valores de la Tabla 4 (Qin et al., 2001; Zhang et al., 2015) procediendo a interpolar los datos in incluidos en la tabla.

El contenido de vapor de agua en la atmósfera obtenido mediante este método ha sido comparado con los valores medidos por la Red Robótica de Aerosoles (AERONET) de la NASA. Estos fueron descargados a través de su web obteniendo diferencias no mayores al 1%.

**Tabla 4.** Ubicación y características de los puntos de control.

T (°C)	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10
$E$ (g kg <sup>-1</sup> )	66,33	49,81	37,25	27,69	20,44	14,95	10,83	7,76	5,50	3,84	2,52	1,63
$A$ (kg m <sup>-3</sup> )	1,11	1,13	1,15	1,17	1,18	1,21	1,23	1,25	1,27	1,29	1,32	1,34



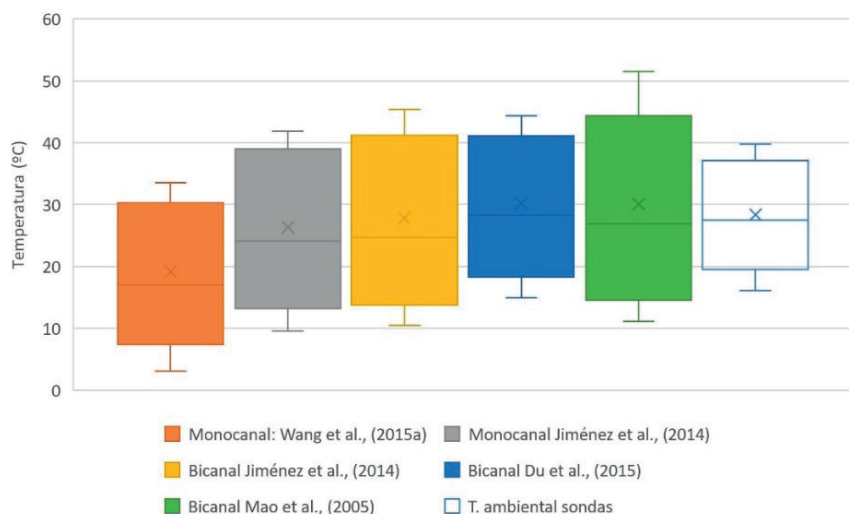


Figura 3. TST Máximas, mínimas y medias de cada algoritmo.

## 4. Resultados

### 4.1. Comparación general TST algoritmos

Los estadísticos resultantes obtenidos mediante el uso de los algoritmos para el cálculo del TST se encuentran reflejados en la Figura 3.

En líneas generales, los algoritmos MC analizados presentan valores medios anuales más bajos que los obtenidos de forma *in situ*. Por el contrario, los algoritmos BC presentan valores medios anuales más altos que los obtenidos de forma *in situ* a excepción del de los autores Jiménez-Muñoz et al. (2014) que presenta valores medios inferiores (-0,6°C). Los valores más altos de TST se obtienen en el grupo BC mientras que los valores más bajos se obtienen en el grupo MC. Esta circunstancia es similar para el caso de las temperaturas medias donde los algoritmos BC obtienen las TST medias más altas con valores por encima de 27°C mientras que los algoritmos MC obtienen medias más bajas con valores por debajo de 27°C. Los algoritmos donde se obtienen las TST medias más altas son el de los autores Du et al., (2015) (30,2°C) seguido por el de los autores Mao et al. (2005) (30,1°C). Por el contrario, la TST media más baja se ha obtenido con los algoritmos MC de los autores Wang et al. (2015a) (19,2°C) y Jiménez-Muñoz et al. (2014) (26,3°C). Por grupos de algoritmos, el MC obtiene un valor medio más bajo (22,4°C) y el BC un valor medio más alto (28,1°C).

En la Figura 4 se encuentra representada la diferencia de temperaturas obtenida entre la TST mediante algoritmos y la temperatura ambiental junto a los valores de desviación estándar. Se aprecia como la mayor diferencia con respecto a los valores medios de temperatura ambiental se produce en el algoritmo de los autores Wang et al. (2015a) con un valor de -9,2°C. Por el contrario, la diferencia menor corresponde al algoritmo BC de los autores Jiménez-Muñoz et al. (2014) con un valor de -0,6°C. Por grupos de algoritmos, los MC presentan una diferencia media de -5,6°C y los BC una diferencia media de 1,0°C.

Con respecto a la desviación estándar de los algoritmos (Figura 4), la TST basada en algoritmos MC presentan menor desviación estándar media con un valor de 11,3°C, mientras que los modelos BC obtiene un valor medio de 12,4°C.

En la Figura 5 se encuentran representadas las diferencias de temperaturas medias entre la TST calculada mediante los algoritmos y la temperatura ambiental diferenciada por periodo de invierno (octubre-marzo) con una humedad superficial alta y periodo de verano (abril-septiembre) con una humedad superficial baja. Se sugiere que durante el periodo de invierno los TST calculados mediante algoritmos obtienen resultados medios que se encuentran por debajo de la temperatura ambiental obtenida mediante

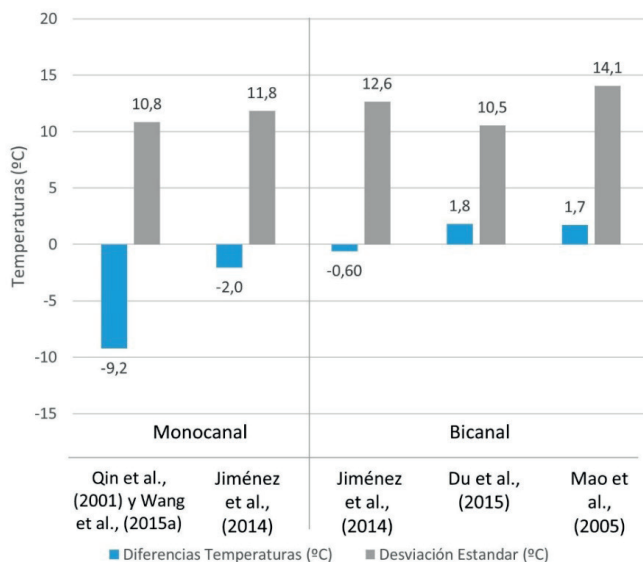


Figura 4. Diferencias de temperatura y desviación estándar por algoritmo.

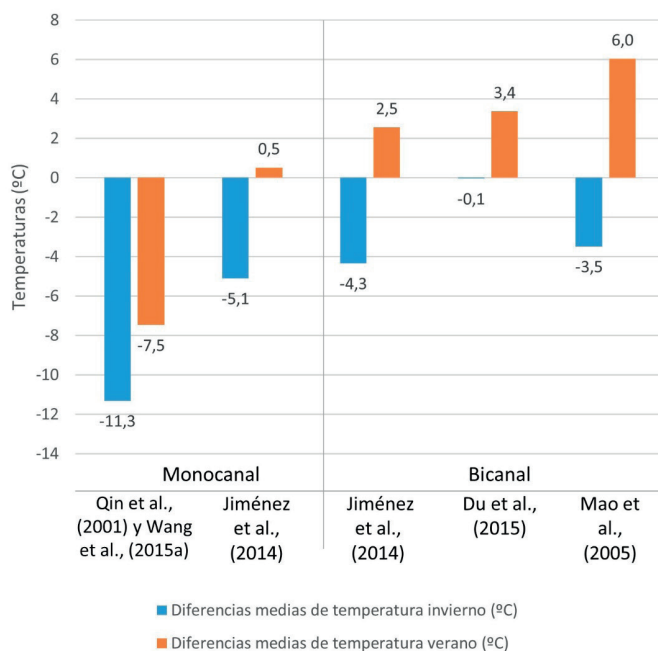


Figura 5. Diferencias de temperatura por algoritmo y periodo del año.

sondas. Por el contrario, y durante el periodo estival, los TST medios basados en algoritmos se ubican por encima de la temperatura ambiental, aunque el algoritmo MC de los autores Wang et al. (2015a) sigue presentando valores por debajo de la media.

#### 4.2. Distribución de TST en la ciudad de Granada

En la Figura 6 se ha representado la TST de la ciudad de Granada obtenida mediante los algoritmos MC y BC analizados para Landsat 8. Se puede observar cómo las temperaturas

Determinación de la temperatura de la superficie terrestre mediante imágenes Landsat 8: Estudio comparativo de algoritmos sobre la ciudad de Granada

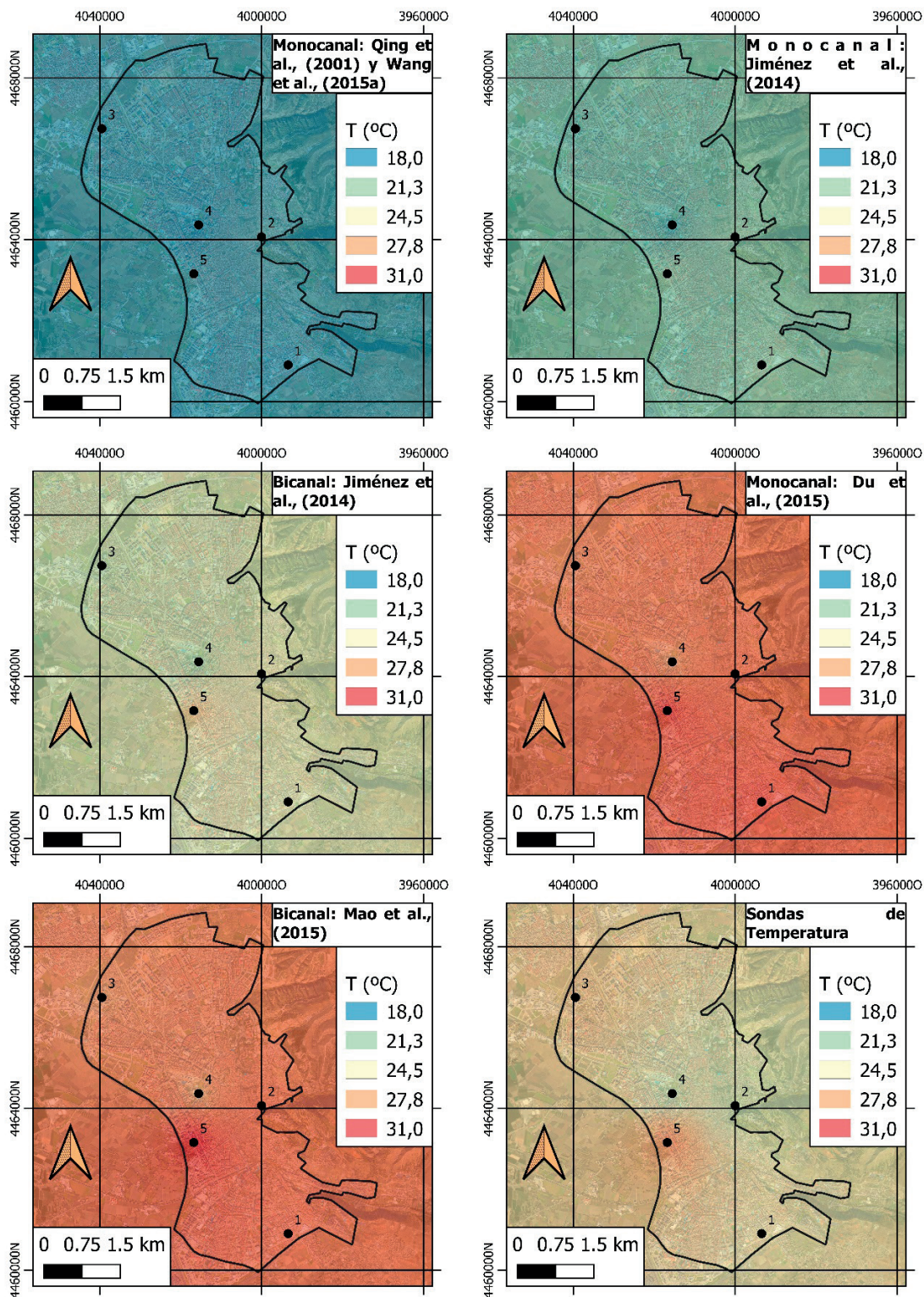


Figura 6. TST medias de cada algoritmo y T. media ambiental. Fechas: 29/11/2018 al 15/10/2019.

más altas se corresponden con las tonalidades rojizas y se ubican en las zonas urbanizadas con mayor densidad. La escasez de zonas verdes, los materiales de construcción empleados y el alto porcentaje de suelos impermeables: asfalto, aceras, adoquinado y baldosas, las convierten en puntos cálidos de la urbe. Las temperaturas intermedias, representadas con una tonalidad amarilla, se ubica en los barrios suburbanos o periféricos ubicados alrededor de la zona urbana. Habitualmente disponen de una densidad más baja y mayores zonas verdes alternadas con menores superficies impermeables. Las temperaturas más bajas se corresponden con la tonalidad azul y se ubican en las grandes zonas verdes del interior de la urbe que actúan como polo frío o isla de enfriamiento urbano (Saaroni et al., 2018; Wu et al., 2019).

En la Figura 7 se puede observar el histograma de la TST media obtenida por cada algoritmo durante todo el periodo de estudio. En líneas generales, se puede indicar que todos ellos presentan una distribución simétrica de los datos y un ajuste adecuado salvo el algoritmo MC de los autores Jiménez-Muñoz et al. (2014) que presenta una asimetría hacia los valores mayores y un ajuste deficiente. Este, presenta a su vez, una mayor dispersión de los datos junto con el algoritmo BC de los autores Du et al. (2015).

En la Tabla 5 se pueden observar los datos estadísticos de la TST calculada por cada algoritmo y por cada punto de medición mediante sondas.

La TST media de las zonas urbanas fue más alta (26,6°C) que la TST de las zonas suburbanas (26,0°C) y que la TST de la zona verde interior (25,2°C). La diferencia térmica máxima detectada entre las zonas urbanas y suburbanas es de 12,8°C y la diferencia entre la primera y la zona verde interior es de 13,2°C. También se ha detectado una variabilidad de TST entre zonas urbanas y suburbanas estacional. Así, la diferencia de TST media entre ambas zonas en invierno ha sido de 0,8°C mientras que este valor se incrementa hasta los 1,6°C en periodo de verano.

En la Figura 8 se pueden observar las diferencias entre la temperatura ambiental y los valores medios de TST por grupos de algoritmos. El grupo de algoritmos MC presentan diferencias medias negativas mientras que el grupo de algoritmos BC presentan valores medios positivos. No obstante, se observa como la distribución de TST sobre la urbe es homogénea tanto para los algoritmos MC como para los BC. Así, en ambos grupos de algoritmos, el punto 2 presenta las diferencias más altas con respecto a las temperaturas ambientales, el punto 4 presenta diferencias intermedias y los puntos 3 y 5 las diferencias más bajas.

En la Figura 9 se puede observar el histograma de la TST media por grupos de algoritmos. Se puede indicar que los valores medios de los algoritmos MC presentan una asimetría hacia los valores altos y un ajuste deficiente. Por el contrario, el grupo de algoritmos BC presentan una distribución simétrica y un ajuste adecuado.

**Tabla 5.** Datos estadísticos por punto de medición y algoritmo.

Nº Sonda	Estadísticas Temperaturas	Sondas	Monocanal		Bicanal		
			Qin et al. (2001); Wang et al. (2015a)	Jiménez-Muñoz et al. (2014)	Jiménez-Muñoz et al. (2014)	Du et al. (2015)	Mao et al. (2005)
1	Media (°C)	29,5	18,8	26,7	27,8	30,7	30,2
	$\Delta T$ (°C)		-10,7	-2,8	-1,7	1,2	0,7
2	Media (°C)	28,7	19,8	26,6	28,0	30,2	30,3
	$\Delta T$ (°C)		-8,9	-2,1	-0,7	1,5	1,6
3	Media (°C)	28,2	19,2	26,0	27,3	29,7	29,4
	$\Delta T$ (°C)		-9,0	-2,1	-0,9	1,6	1,2
4	Media (°C)	27,6	18,5	25,6	26,9	29,3	28,9
	$\Delta T$ (°C)		-9,1	-2,0	-0,6	1,7	1,4
5	Media (°C)	28,0	19,5	26,8	28,9	31,0	31,6
	$\Delta T$ (°C)		-8,5	-1,2	0,9	3,0	3,6

Nota:  $\Delta T$ : Diferencia de temperaturas medias.

Determinación de la temperatura de la superficie terrestre mediante imágenes Landsat 8: Estudio comparativo de algoritmos sobre la ciudad de Granada

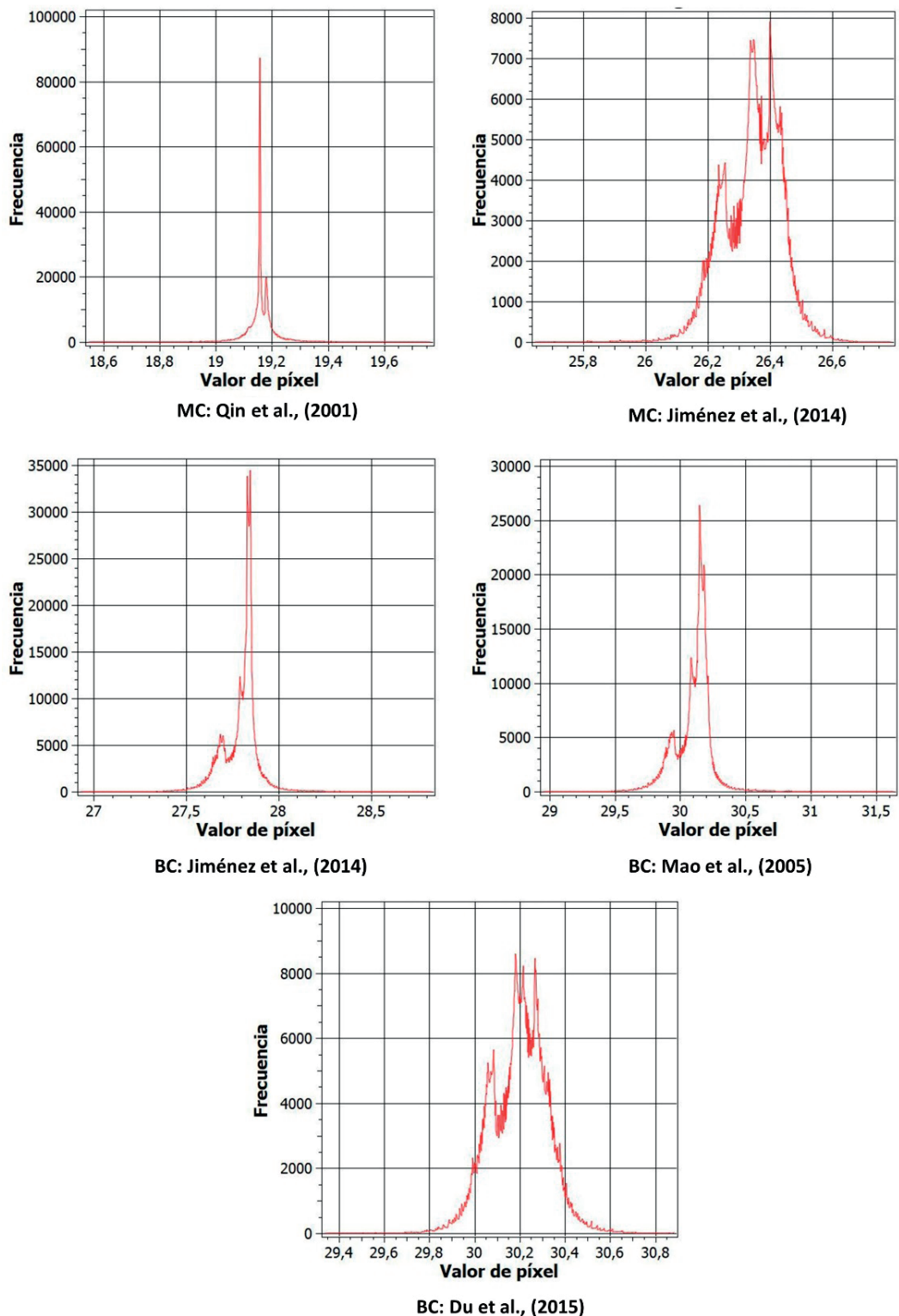
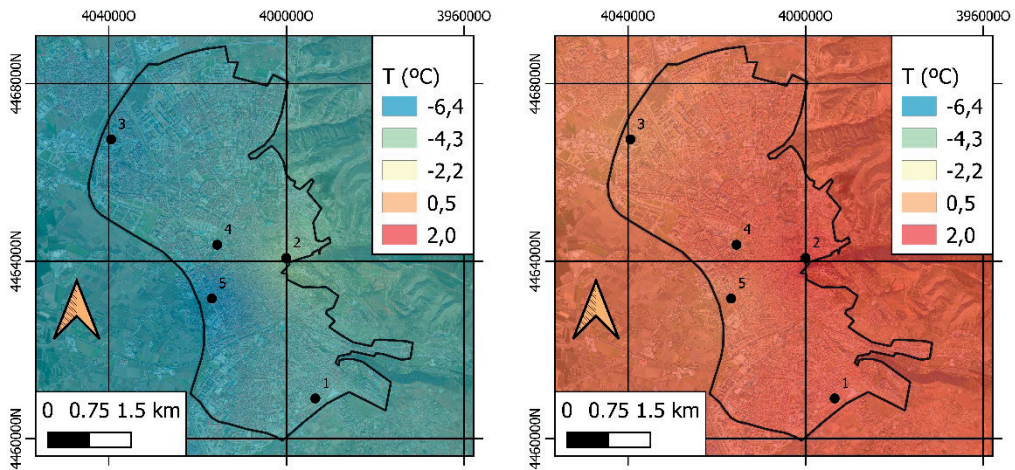


Figura 7. Histogramas TST de cada algoritmo.



**Figura 8.** Diferencias de temperaturas ambientales y TST por grupos de algoritmos. Izquierda: MC. Derecha: BC. Fechas: 29/11/2018 al 15/10/2019.

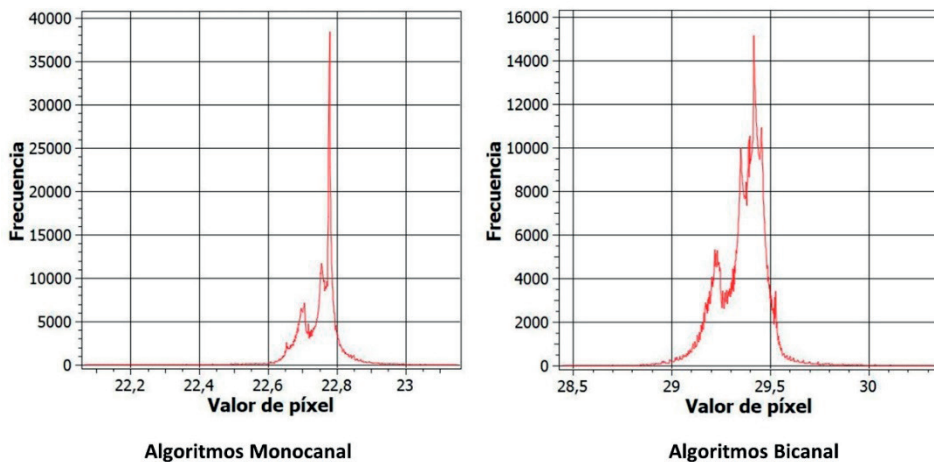
### 4.3. Análisis estadístico de los datos

El análisis de los datos llevado a cabo en este estudio se ha realizado de manera estadística con la ayuda del software especializado para la ciencia de datos, STATA, versión 15. En la Figura 10 se pueden observar los coeficientes de regresión  $R^2$ , el valor RMSE y MBE obtenidos para cada algoritmo. En líneas generales, los algoritmos utilizados presentan unos coeficientes  $R^2$  adecuados con valores por encima de 0,95. Esta circunstancia indica una buena concordancia entre los valores analizados y se consideran

estadísticamente significativos por encima del 95%.

El grupo BC presenta un valor medio mayor de  $R^2=0,9764$  muy similar al valor del grupo MC con  $R^2=0,9677$ . De forma individual, el método de los autores Jiménez-Muñoz et al. (2014) incluido dentro del grupo BC presenta el valor más alto  $R^2=0,9782$ , mientras que el método de los autores Qin et al. (2001) y Wang et al. (2015a) presenta el valor más bajo  $R^2=0,9621$ .

En la Figura 11 aparecen representados los valores de RMSE y MBE de cada algoritmo analizado. La



**Figura 9.** Histogramas TST por grupo de algoritmos.

Determinación de la temperatura de la superficie terrestre mediante imágenes Landsat 8: Estudio comparativo de algoritmos sobre la ciudad de Granada

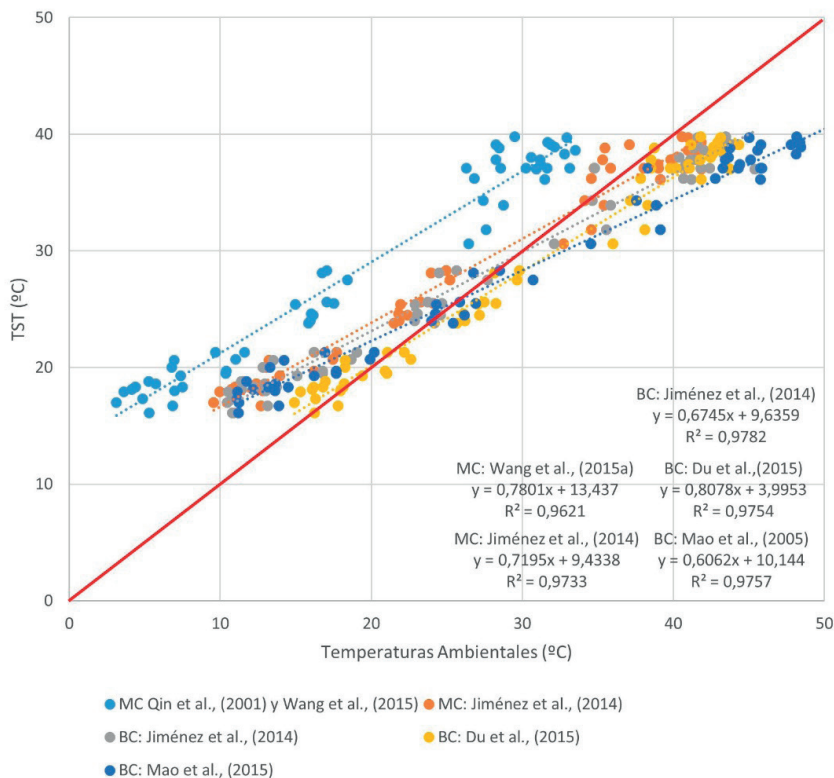


Figura 10. Regresión lineal de los algoritmos estudiados.

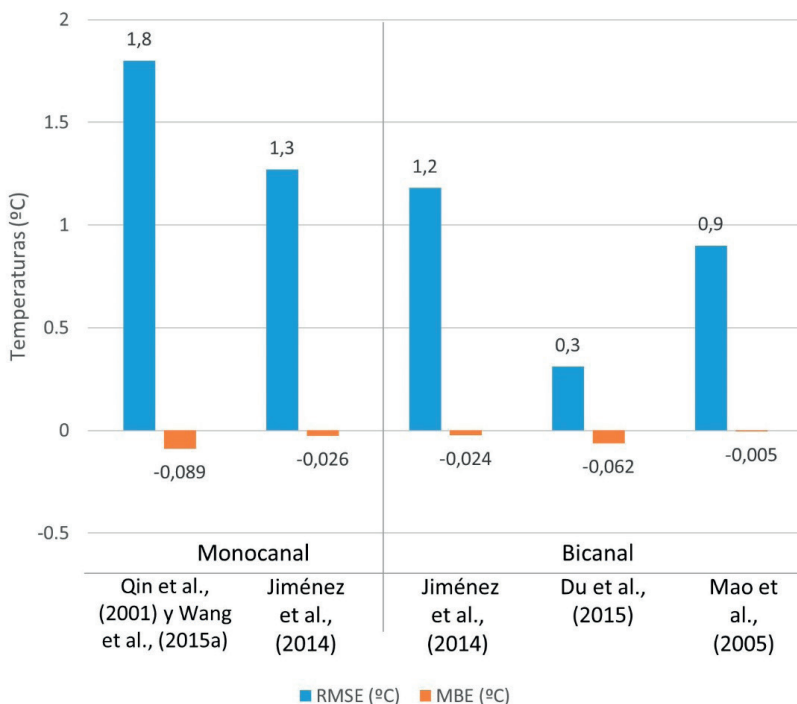


Figura 11. RMSE y MBE de los algoritmos estudiados.

RMSE mide el error existente entre dos conjuntos de datos. El valor más alto se ha obtenido para el grupo de algoritmos MC (RMSE=1,6°C), y el valor más bajo para el grupo de algoritmos BC (RMSE=0,8°C). Con respecto al MBE se obtiene la misma clasificación, así el valor medio más alto se obtiene para el grupo de algoritmos MC (MBE=-0.058 K) y el valor medio más bajo para el grupo BC (MBE=-0.031 K). De esta forma, el grupo de algoritmos con un valor de R<sup>2</sup> más bajo presenta un RMSE y MBE más alto y a la inversa.

## 5. Discusión

En esta investigación se ha obtenido una diferencia media de TST calculada mediante algoritmos y temperatura ambiental de -1,7°C. No obstante, los valores de diferencias de TST mediante el empleo de algoritmos ha sido dispar. Así, los métodos BC presentan valores que se sitúan por encima del valor medio mientras que los MC presentan valores que se ubican muy por debajo de la media. Estos resultados se consideran satisfactorios teniendo en cuenta los errores esperados tanto por las sondas de medición  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  como por el cálculo de la TST y de la emisividad. Algunos estudios (Wang et al., 2015a; Yu et al., 2014) indican que un error del 1% en la estimación de la emisividad otorga un error de la TST que oscila entre 0,3 y 0,7°C. Los valores obtenidos en esta investigación se encuentran en consonancia con los datos obtenidos por otros autores (Li y Meng, 2018; Tan et al., 2017; Wang et al., 2019) en estudios similares sobre otras ciudades o territorios.

Se ha encontrado evidencia de que los valores de TST obtenidos mediante la utilización de algoritmos MC son similares a lo largo del año. Por el contrario, los valores de TST de los algoritmos BC difieren de los anteriores sobre todo en temporada de verano cuando la humedad superficial ( $w$ ) disminuye. Esta situación recibe apoyo de los estudios realizados por otros autores cuyos resultados presentan la misma distribución (García-Santos et al., 2018; Kafer et al., 2019; Lemus-Canovas et al., 2020; Li y Meng, 2018; Meng et al., 2019; Wang et al., 2015b). Esta circunstancia podría estar motivada por el número de bandas TIRS que utiliza cada algoritmo. Así, los algoritmos MC utilizan los datos de un solo canal (banda 10), mientras que los algoritmos BC utilizan las dos bandas térmicas (bandas 10 y

11) (García-Santos et al., 2018; Li y Meng, 2018; Reuter et al., 2015; Wang et al., 2015b). A su vez, las diferencias apreciadas en los valores de TST de los algoritmos BC con respecto al resto durante todo el periodo de estudio puede interpretarse como que los mismos producen una sobreestimación de TST en valores bajos de humedad superficial ( $w$ ) y una subestimación de TST en valores altos. De tal forma que, presentan valores mayores en periodo de baja humedad superficial (verano) y valores menores en periodo de alta humedad superficial (invierno) (Li y Meng, 2018). Esta situación ya fue descrita por el autor García-Santos et al. (2018) indicando que se encuentra justificada en los sesgos de TST para las bandas TIRS.

Los datos obtenidos en la ciudad de Granada han revelado que se produce una distinción importante de TST entre las áreas urbanas y suburbanas e influenciada por el periodo estacional. El valor máximo detectado entre ambas zonas ha sido de 12,8°C siendo muy similar a los datos obtenidos por otros autores (Keramitsoglou et al., 2011; Lemus-Canovas et al., 2020; Li y Meng, 2018; Yang et al., 2020). El sistema heterogéneo de la urbe permite distinguir entre zonas urbanas con altas TST que presentan elevadas densidades y grandes superficies de suelo impermeable y zonas suburbanas con temperaturas más bajas de TST que presentan bajas densidades y menores superficies impermeables alternadas con zonas de cubierta vegetal. Las temperaturas más bajas de TST se han obtenido en las superficies con vegetación de gran extensión. Las diferencias de TST medias entre las zonas urbanas y suburbanas de la ciudad de Granada se incrementan un 50% en el periodo de verano con respecto al invierno. Estos datos también han sido corroborados por los estudios de otros autores (Barbieri et al., 2018; Lemus-Canovas et al., 2020; Sekertekin y Bonafoni, 2020) en investigaciones similares. Son numerosos los estudios mediante imágenes satelitales que han demostrado que la vegetación tiene un efecto de enfriamiento en las áreas urbanas (Du et al., 2020; Lin et al., 2015; Yu et al., 2017) que oscila entre 1 y 3°C (Lin et al., 2015) y de calentamiento en las zonas con escasez de vegetación y/o suelos desnudos. Estos efectos se producen no solo al influir en los procesos de sombra y evapotranspiración sino también en las tasas de enfriamiento y calentamiento por



convección y transpiración que alteraría la TST de las zonas.

Los coeficientes  $R^2$  obtenidos para la comparación de las TST se encuentran por encima de 0,95 lo que denota una buena concordancia entre las temperaturas ambientales y los valores de TST obtenidos mediante algoritmos. Los algoritmos BC presentan los valores más altos y los MC los valores más bajos. Los datos obtenidos para el RMSE y MBE son inversos al coeficiente  $R^2$ , de tal forma que, a mayor RMSE y MBE menor  $R^2$ . Las investigaciones realizadas por los autores García-Santos et al. (2018) y Sekertekin y Bonafoni, (2020) presentan valores similares a los calculados en esta investigación dando soporte a los resultados obtenidos.

En los últimos años, el método de comparación de la TST con las temperaturas ambientales está tomando importancia como sistema de comparación de algoritmos (Avdan y Jovanovska, 2016; Gallo et al., 2011; Liu y Zhang, 2011; Mukherjee y Singh, 2020; Rongali et al., 2018). Se trata de un método rápido, sencillo y de bajo costo que permite no solo realizar estudios de TST actuales sino también, estudios de la evolución de la TST gracias a la posibilidad de recuperar las temperaturas ambientales de las estaciones meteorológicas. Estas disponen de equipos de medición de alta calidad calibrados según patrones internacionales. En investigaciones anteriores, la precisión de este método ha reportado unas diferencias entre la TST recuperada y las temperaturas ambientales que oscilan entre los 0,2 y 7,8°C. No obstante, en estos estudios existen grandes diferencias de temperaturas dependiendo de si el estudio se realiza sobre zonas urbanas delimitadas o sobre grandes zonas que incluyen zonas urbanas y rurales. Por ejemplo, los estudios de los autores Rongali et al. (2018) y Gallo et al. (2011) presentan diferencias de temperatura de entre 4 y 7°C pero se encuentran aplicados a grandes superficies que incluyen tanto zonas urbanas como rurales. Por el contrario, los estudios de los autores Liu et al. (2011), Avdan y Jovanovska, (2016) y Mukherjee y Singh, (2020) presentan diferencias de temperatura de entre 0,7 y 2,7°C pero se encuentran aplicados a zonas urbanas delimitadas. Estos últimos valores se encuentran en consonancia con los obtenidos en nuestro estudio para Landsat 8 (-1,7 K) teniendo en cuenta

que nuestra área de estudio incluye principalmente zonas urbanas. Por tanto, nuestros resultados se encontrarían respaldados por los estudios de los autores Liu et al., (2011), Avdan y Jovanovska, (2016) y Mukherjee y Singh, (2020) que darían soporte a nuestros resultados. No obstante, este método de comparación de temperaturas presenta un inconveniente que es la recomendación de disponer de un número adecuado de puntos de medición de la temperatura ambiental repartidos por el área objeto de estudio dependiendo de las coberturas y tipologías constructivas de cada zona. En ciudades medianas o pequeñas, como la analizada en esta investigación, la agencia estatal de meteorología (AEMET) dispone de una o varias estaciones lo que dificulta el proceso de comparación. No obstante, este inconveniente puede ser resuelto mediante la adquisición de sondas de temperatura de alta calidad como las empleadas en nuestra investigación.

## 6. Conclusiones

Este es uno de los primeros estudios multitemporales de determinación de la TST mediante algoritmos de recuperación con imágenes Landsat 8 aplicado sobre una ciudad española, tras los estudios de las ciudades de Madrid y Barcelona. Aunque estos estudios han sido habituales en urbes de gran tamaño, en los últimos años se están convirtiendo en frecuentes sobre ciudades de tamaño medio. Esta circunstancia, unida a las características morfológicas, geográficas, contaminación y el alto contraste térmico de la urbe, aumentan el interés en los resultados obtenidos en esta investigación.

En este estudio se ha determinado la TST de la ciudad de Granada mediante cinco algoritmos incluidos dentro de las categorías MC y BC que se han comparado con las temperaturas ambientales mediante la medición *in situ* en cinco puntos de la urbe con sondas de temperatura y humedad. Los resultados permiten obtener distribuciones cuantitativamente cercanas y patrones de comportamientos similares con todos los algoritmos empleados y en toda la urbe. Sin embargo, se verifican importantes distinciones por zonas urbanas, suburbanas y verdes y por periodos estacionales influenciados principalmente por la distribución heterogénea de la urbe. No obstante, los resultados determinados se encuentran en consonancia con los obtenidos

por otras investigaciones efectuadas en otros puntos geográficos.

Los algoritmos BC presentan valores de TST más altos en comparación con los algoritmos MC. Los primeros emplean los datos de las dos bandas térmicas en contraposición con el empleo de los datos de una sola banda térmica por parte de los últimos. Las diferencias medias entre TST calculadas y la temperatura ambiental encontradas son menores para los modelos BC (1,0°C) y mayores para los MC (-5,6°C). Los coeficientes de regresión  $R^2$  obtenidos entre TST mediante algoritmos y la temperatura ambiental demuestran una alta correlación, por encima del 95%. No obstante, presentan un valor más alto los algoritmos BC en comparación con los MC que presentan un valor menor. Con respecto a los datos de RMSE y MBE se obtienen valores inversos al  $R^2$  de tal forma que, son menores para los algoritmos BC y mayores para los MC.

Se puede concluir que los modelos BC son los que presentan valores más cercanos a la temperatura ambiental de la ciudad lo que unido a los datos de RMSE, MBE y desviación estándar sugiere que sean los más adecuados para estimar la TST de la ciudad de Granada mediante imágenes Landsat 8. No obstante, es necesario la realización de más investigaciones aplicadas que validen la precisión de estos algoritmos.

## Referencias

- Avdan, U., Jovanovska, G. 2016. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016, 1480307. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Barbieri, T., Despini, F., Teggi, S. 2018. A multi-temporal analyses of Land Surface Temperature using Landsat-8 data and open source software: The case study of Modena, Italy. *Sustainability (Switzerland)*, 10(5), 1678. <https://doi.org/10.3390/su10051678>
- Becker, F., Li, Z. 1995. Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems. *Remote sensing reviews*, 12(3-4), 225-253. <https://doi.org/10.1080/02757259509532286>
- Carlson, T.N., Ripley, D.A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Chavez, P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3), 459-479. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- Coll, C., Caselles, V., Galve, J.M., Valor, E., Niclòs, R., Sánchez, J.M., Rivas, R. 2005. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 97(3), 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.007>
- Coll, C., Valor, E., Galve, J.M., Mira, M., Bisquert, M., García-Santos, V., Caselles, E., Caselles, V. 2012. Long-term accuracy assessment of land surface temperatures derived from the Advanced Along-Track Scanning Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 116, 211-225. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.027>
- Congedo, L. 2016. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Release 4.8.0.1. Release, 4(0.1), 29. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>
- De Castro, M., Gallardo, C., Jylha, K., Tuomenvirta, H. 2007. The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. *Climatic Change*, 81, 329-341. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9224-1>
- Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., Zhao, S. 2015. A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data. *Remote Sensing*, 7(1), 647-665. <https://doi.org/10.3390/rs70100647>
- Du, J., Xiang, X., Zhao, B., y Zhou, H. 2020. Impact of urban expansion on land surface temperature in Fuzhou, China using Landsat imagery. *Sustainable Cities and Society*, 61(June), 102346. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102346>
- Gallo, K., Hale, R., Tarpley, D., Yu, Y. 2011. Evaluation of the relationship between air and land surface temperature under clear- and cloudy-sky conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(3), 767-775. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2460.1>
- García-Santos, V., Cuxart, J., Martínez-Villagrasa, D., Jiménez, M.A., Simó, G. 2018. Comparison of three methods for estimating land surface temperature from Landsat 8-TIRS Sensor data. *Remote Sensing*, 10(9), 1-13. <https://doi.org/10.3390/rs10091450>
- Gerace, A., Montanaro, M. 2017. Derivation and validation of the stray light correction algorithm for the thermal infrared sensor onboard Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 191, 246-257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.029>

- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Skoković, D., Mattar, C., Cristóbal, J. 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
- Jin, M., Li, J., Wang, C., Shang, R. 2015. A practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat-8 data and a case study of an urban area in China. *Remote Sensing*, 7(4), 4371-4390. <https://doi.org/10.3390/rs70404371>
- Kafer, P.S., Rolim, S.B.A., Iglesias, M.L., Da Rocha, N.S., Diaz, L.R. 2019. Land surface temperature retrieval by Landsat 8 thermal band: Applications of laboratory and field measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7), 2332-2341. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2913822>
- Keeratikasikorn, C., Bonafoni, S. 2018. Urban heat island analysis over the land use zoning plan of Bangkok by means of Landsat 8 imagery. *Remote Sensing*, 10(3), 440. <https://doi.org/10.3390/rs10030440>
- Keramitsoglou, I., Kiranoudis, C.T., Ceriola, G., Weng, Q., Rajasekar, U. 2011. Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3080-3090. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.014>
- Khalaf, A. 2018. Utilization of thermal bands of Landsat 8 data and geographic information system for analysis of urban heat island in Baghdad governorate 2016. *MATEC Web of Conferences*, 162, 1-5. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816203026>
- Lemus-Canovas, M., Martin-Vide, J., Moreno-Garcia, M.C., Lopez-Bustins, J.A. 2020. Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature. *Science of the Total Environment*, 699, 134307. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134307>
- Li, T., Meng, Q. 2018. A mixture emissivity analysis method for urban land surface temperature retrieval from Landsat 8 data. *Landscape and Urban Planning*, 179(July), 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.07.010>
- Li, Z.L., Tang, B.H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I.F., Sobrino, J.A. 2013. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14-37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Lin, W., Yu, T., Chang, X., Wu, W., Zhang, Y. 2015. Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: Method and test. *Landscape and Urban Planning*, 134, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.012>
- Liu, L., Zhang, Y. 2011. Urban heat island analysis using the landsat TM data and ASTER Data: A case study in Hong Kong. *Remote Sensing*, 3(7), 1535-1552. <https://doi.org/10.3390/rs3071535>
- Macarof, P., Statescu, F. 2017. Comparasion of NDBI and NDVI as Indicators of Surface Urban Heat Island Effect in Landsat 8 Imagery: A Case Study of Iasi. *Present Environment and Sustainable Development*, 11(2), 141-150. <https://doi.org/10.1515/pesd-2017-0032>
- Mao, K., Qin, Z., Shi, J., Gong, P. 2005. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(15), 3181-3204. <https://doi.org/10.1080/01431160500044713>
- Meng, X., Cheng, J., Zhao, S., Liu, S., y Yao, Y. 2019. Estimating land surface temperature from Landsat-8 data using the NOAA JPSS enterprise algorithm. *Remote Sensing*, 11(2), 155. <https://doi.org/10.3390/rs11020155>
- Mukherjee, F., Singh, D. 2020. Assessing Land Use-Land Cover Change and Its Impact on Land Surface Temperature Using LANDSAT Data: A Comparison of Two Urban Areas in India. *Earth Systems and Environment*, 4(2), 385-407. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00155-9>
- Prata, A., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J.A., Ottlé, C. 1995. Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects. *Remote sensing reviews*, 12(3-4), 175-224. <https://doi.org/10.1080/02757259509532285>
- Peres, L.F., Sobrino, J.A., Libonati, R., Jiménez-Muñoz, J.C., Dacamara, C.C., Romaguera, M. 2008. Validation of a temperature emissivity separation hybrid method from airborne hyperspectral scanner data and ground measurements in the SEN2FLEX field campaign. *International Journal of Remote Sensing*, 29(24), 7251-7268. <https://doi.org/10.1080/01431160802036532>
- Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719-3746. <https://doi.org/10.1080/01431160010006971>

- Reuter, D.C., Richardson, C.M., Pellerano, F.A., Irons, J.R., Allen, R.G., Anderson, M., Jhabvala, M.D., Lunsford, A.W., Montanaro, M., Smith, R.L., Tesfaye, Z., Thome, K.J. 2015. The thermal infrared sensor (tirs) on Landsat 8: Design overview and pre-launch characterization. *Remote Sensing*, 7(1), 1135-1153. <https://doi.org/10.3390/rs70101135>
- Rongali, G., Keshari, A.K., Gosain, A.K., Khosa, R. 2018. A mono-window algorithm for land surface temperature estimation from Landsat 8 thermal infrared sensor data: A case study of the beas river basin, India. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 26(2), 829-840.
- Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., Karnieli, A. 2014. Derivation of land surface temperature for landsat-8 TIRS using a split window algorithm. *Sensors (Switzerland)*, 14(4), 5768-5780. <https://doi.org/10.3390/s140405768>
- Saaroni, H., Amorim, J.H., Hiemstra, J.A., Pearlmutter, D. 2018. Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Climate*, 24(October 2017), 94-110. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001>
- Sabol, D.E., Gillespie, A.R., Abbott, E., Yamada, G. 2009. Field validation of the ASTER Temperature-Emissivity Separation algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 113(11), 2328-2344. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.008>
- Sekertekin, A. 2019. Validation of Physical Radiative Transfer Equation-Based Land Surface Temperature Using Landsat 8 Satellite Imagery and SURFRAD in-situ Measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 196(July), 105161. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105161>
- Sekertekin, A., Bonafoni, S. 2020. Land surface temperature retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over rural areas: Assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation. *Remote Sensing*, 12(2), 294. <https://doi.org/10.3390/rs12020294>
- Sobrino, J.A., Raissouni, N. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 353-366. <https://doi.org/10.1080/014311600210876>
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Sòria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A., Martínez, P. 2008. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316-327. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834>
- Srivanit, M., Hokao, K., Phonekeo, V. 2012. Assessing the Impact of Urbanization on Urban Thermal Environment: A Case Study of Bangkok Metropolitan. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2(7), 243-256. Recuperado de [http://www.ijastnet.com/journals/Vol\\_2\\_No\\_7\\_August\\_2012/26.pdf](http://www.ijastnet.com/journals/Vol_2_No_7_August_2012/26.pdf) (Último acceso octubre 2020).
- Srivastava, P.K., Majumdar, T.J., Bhattacharya, A.K. 2009. Surface temperature estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat-7 ETM+ thermal infrared data. *Advances in Space Research*, 43(10), 1563-1574. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.01.023>
- Stisen, S., Sandholt, I., Nørgaard, A., Fensholt, R., Eklundh, L. 2007. Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 110(2), 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.025>
- Tan, K., Liao, Z., Du, P., Wu, L. 2017. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 data and validation with geosensor network. *Frontiers of Earth Science*, 11(1), 20-34. <https://doi.org/10.1007/s11707-016-0570-7>
- Trigo, I.F., Monteiro, I.T., Olesen, F., Kabsch, E. 2008. An assessment of remotely sensed land surface temperature. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(17), 1-12. <https://doi.org/10.1029/2008JD010035>
- USGS. 2017. Landsat 8 surface reflectance derived spectral indices. Versión 3.6. in: sioux falls, SD.
- Wan, Z., Dozier, J. 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4), 892-905. <https://doi.org/10.1109/36.508406>
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., Zhao, S. 2015a. An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268-4289. <https://doi.org/10.3390/rs70404268>
- Wang, L., Lu, Y., Yao, Y. 2019. Comparison of three algorithms for the retrieval of land surface temperature from landsat 8 images. *Sensors (Switzerland)*, 19(22), 5049. <https://doi.org/10.3390/s19225049>
- Wang, S., He, L., Hu, W. 2015b. A temperature and emissivity separation algorithm for landsat-8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, 7(8), 9904-9927. <https://doi.org/10.3390/rs70809904>

- Wu, C., Li, J., Wang, C., Song, C., Chen, Y., Finka, M., La Rosa, D. 2019. Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 694, 133742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133742>
- Yang, C., Yan, F., Zhang, S. 2020. Comparison of land surface and air temperatures for quantifying summer and winter urban heat island in a snow climate city. *Journal of Environmental Management*, 265(March), 110563. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110563>
- Yu, X., Guo, X., Wu, Z. 2014. Land surface temperature retrieval from landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829-9852. <https://doi.org/10.3390/rs6109829>
- Yu, Y., Liu, Y., Yu, P., Liu, Y., Yu, P. 2017. Land surface temperature product development for JPSS and GOES-R missions. *Comprehensive Remote Sensing*, 1-9, 284-303. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10522-6>
- Zhan, W., Chen, Y., Zhou, J., Wang, J., Liu, W., Voogt, J., Zhu, X., Quan, J., Li, J. 2013. Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: Literature survey, taxonomy, issues, and caveats. *Remote Sensing of Environment*, 131(19), 119-139. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.014>
- Zhang, Y., Chen, L., Wang, Y., Chen, L., Yao, F., Wu, P., Wang, B., Li, Y., Zhou, T., Zhang, T. 2015. Research on the contribution of urban land surface moisture to the alleviation effect of urban land surface heat based on Landsat 8 data. *Remote Sensing*, 7(8), 10737-10762. <https://doi.org/10.3390/rs70810737>