

Utilización de imágenes satelitales para el estudio de la distribución térmica en distintas coberturas del suelo de la ciudad de Bahía Blanca (Argentina)

Ferrelli, F.^{1,2}, Bustos, M. L.^{1,2}, Huamantínco-Cisneros, M. A.^{1,2}, Piccolo, M. C.^{1,2}

¹ Instituto Argentino de Oceanografía. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Florida 4500 Ed. 1, 8000, Bahía Blanca, Argentina.

² Departamento de Geografía y Turismo. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. 12 de octubre y San Juan, cuarto piso. 8000, Bahía Blanca, Argentina.

Resumen: El estudio del clima urbano es relevante para conocer el ambiente donde habita la mayor parte de la población. Las ciudades presentan sectores que incluyen estructuras edilicias, espacios verdes, suelos al descubierto, tránsito vehicular, necesidades calóricas de la ciudad y diferentes coberturas de sombras. Actualmente, el cambio climático y sus efectos sobre las ciudades son temas de gran interés científico. Son escasas las investigaciones que interpretan los cambios térmicos que se producen en el interior de las ciudades debido a la densificación de los edificios y como consecuencia de la variabilidad climática. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue analizar el comportamiento de la Temperatura de Superficie Terrestre (TST) y su relación con las distintas coberturas del suelo en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. Para ello, se analizaron imágenes satelitales Landsat 5 TM y 7 ETM+ con el método monocanal. Además, se realizó un mapa de coberturas del suelo mediante interpretación visual de imágenes satelitales validado por intervención empírica. Posteriormente, se relacionaron los datos de TST con las coberturas del suelo. En el centro de la ciudad, la TST presentó variaciones espaciales heterogéneas según las estaciones del año y las sombras generadas por los edificios. Los mayores valores de TST se localizaron en la periferia (45,1°C) y en urbano muy disperso (46°C) y el menor en el centro de la ciudad (2°C). Las distintas coberturas del suelo generaron menores fluctuaciones de TST en invierno (>5°C) y las mayores en verano (entre 15 y 25°C).

Palabras clave: Teledetección, TST, Bahía Blanca, clima urbano, coberturas del suelo.

Utilization of satellite images to study the thermal distribution in different soil covers in Bahia Blanca city (Argentina)

Abstract: The study of the urban climate is relevant to increase the knowledge about the environment where live most of the world's population. Cities have areas that include buildings, green spaces, un-vegetated soils, transit, among others. Currently, scientists are focusing on the effects of climate change in cities. There is a shortage of studies that analyze the thermal changes that occur in the inner city due to the densification of buildings. For these reasons, the aim of this study was to analyze the spatial distribution of Land Surface Temperature (LST) and its relation with different soil covers in Bahia Blanca city, Argentina. Satellite images from Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ were analyzed with single-channel method. Besides, it was made a soil coverage map through visual interpretation of satellite images and it was validated with field trips. LST data were compared with each soil coverage. In downtown, the LST was heterogeneous and presented spatial variations according to the season and the shadows of the buildings. The maximum values of LST were localized in the periphery (45.1°C) and in urban very sparse (46°C) and the minimum in downtown (2°C). Each soil cover had minor fluctuations in the winter (>5°C) and higher in the summer (15 to 25°C).

Key words: Remote Sensing, LST, Bahía Blanca, Urban Climate, Soil Coverage.

* Autor para la correspondencia: fferrelli@criba.edu.ar

1. Introducción

Las actividades del hombre sobre el medio se manifiestan de manera consciente sobre el espacio, definiendo la morfología de la ciudad y con ello modifica el paisaje urbano, el clima local, la ecología de los paisajes, etc. (Oke, 1998). El clima urbano puede interpretarse como el resultado de la relación sociedad-naturaleza. La misma genera cambios en la cobertura del suelo que modifican las condiciones atmosféricas (Romero *et al.*, 2010). La urbanización y la expansión de las ciudades generan cambios en las coberturas del suelo, la densidad de las edificaciones y la forma de apropiación del espacio. Estos factores determinarán un cambio en la atmósfera local que se relacionará con los materiales utilizados en la construcción. En ciertas ocasiones, en las primeras horas del día, se observa en las imágenes satelitales la ciudad más fría que su periferia. Esto se debe a que, por la mañana, la estructura propia de las calles y de los edificios provoca que el centro de la urbe se mantenga a la sombra mientras que sus alrededores ya están siendo calentados por el sol (Valor *et al.*, 2000, Pérez y García, 2002).

La expansión de las ciudades produce además modificaciones ambientales que pueden afectar a la calidad de vida de sus ciudadanos (Grimm *et al.*, 2008). Una de ellas es la alteración en la absorción de la radiación solar. La misma puede ser almacenada, transformada y emitida a la atmósfera de manera diferente dependiendo de los materiales de construcción utilizados (Kusaka, 2008). Algunos de ellos tienen más inercia térmica y propician una mayor absorción de radiación de onda corta con una menor emisión de radiación de onda larga (Grimmond y Oke, 1998). En este caso, las construcciones densas presentes en el centro de la ciudad modifican la dirección e intensidad de los flujos de viento, intervienen en el paso de la radiación solar incidente y retardan los tiempos en los cuales la radiación de onda larga se libera a la atmósfera durante la noche. Lo anterior define un comportamiento característico de los parámetros meteorológicos que dan origen a un clima urbano, el cual puede ser entendido como una perturbación local del clima regional (Montávez *et al.*, 2000; Papparelli *et al.*, 2011).

A escala internacional, numerosos estudios de zonas urbanizadas han utilizado distintos productos

derivados de satélites como NOAA-AVHRR, Landsat TM y ETM+, MODIS o ASTER (Valor *et al.*, 2000; Voogt y Oke, 2003; Sarricolea *et al.*, 2006; Oltra-Carrió, 2010; Lin y Zhang, 2011). Los enfoques de algunas investigaciones se han relacionado principalmente con la determinación y caracterización del clima e islas de calor urbano (Pérez *et al.*, 2003; Rosenzweig *et al.*, 2005; Wong y Yu, 2005; Chen *et al.*, 2006; Santana, 2007; Yuan y Bauer, 2007; Morris *et al.*, 2015). En Argentina, los estudios urbanos con imágenes satelitales son muy diversos y se orientan principalmente a las condiciones térmicas de los espacios verdes (Ripoll *et al.*, 2010), o a la inferencia de la temperatura del aire a partir del NDVI (Cúnsulo *et al.*, 2012), entre otros.

La Temperatura de Superficie Terrestre (TST) se comporta de manera diferente según el tipo de cobertura urbana y la densidad de edificación. La distribución espacial de la TST tiene un comportamiento diferente en zonas con abundante vegetación, con sombras y depende de las características socio-económicas de la población (Valor y Caselles, 1996; Rivas y Caselles, 2004; Romero *et al.*, 2010). En este contexto, los productos satelitales permiten obtener datos que complementan la comprensión de la dinámica ambiental de las ciudades. Además, la TST puede ser tomada como un estimador del aumento de los edificios en altura, dado que la rugosidad que generan los mismos hace que se produzcan más sombras y con ello se afecten los valores de este parámetro.

Cabe señalar que la discriminación de las coberturas del suelo para el estudio de la distribución térmica fue aplicada eficientemente en otras partes del mundo (e.j. Bello Fuentes, 1994). Asimismo, son escasas las investigaciones que interpreten los cambios térmicos que se dan en el interior de las ciudades producto de la densificación de los edificios y su interrelación con los espacios verdes. Los mismos son relevantes para entender el comportamiento térmico en relación con las coberturas del suelo urbanas.

La ciudad de Bahía Blanca se localiza en la zona costera al sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) (Figura 1). En una escala general, esta urbanización se encuentra en la región de climas templados con veranos e inviernos intensos y primaveras y otoños moderados. La región donde

se localiza la ciudad se caracteriza por presentar temperaturas medias que oscilan entre 20 y 14°C en sentido norte-sur. Las precipitaciones varían desde los 842 mm al este hasta los 364 mm al sudoeste (Díaz y Mormeneo, 2002; Bustos *et al.*, 2015). En lo que respecta a la ciudad, la temperatura media anual del período 1960-2010 es de 15,5°C y las precipitaciones de 654 mm. Los vientos dominantes son del cuadrante norte, noroeste y oeste con velocidades medias máximas de 70 km h⁻¹ (Servicio Meteorológico Nacional, Argentina).

Su proceso de urbanización, junto con las diferentes coberturas del suelo y la variedad de actividades que se desarrollan, ha originado cambios en la superficie y en las propiedades atmosféricas locales. Ejemplos de esta situación son: la menor radiación que recibe la ciudad por la sombra de los edificios; el incremento de radiación solar recibida por reflexión múltiple en las paredes de las construcciones y el aumento de radiación de onda larga (Capelli de Steffens *et al.*, 2005; Bustos y Piccolo, 2011). En este trabajo se realiza un análisis de la relación entre la TST con distintas coberturas del suelo de la ciudad de Bahía Blanca (Argentina) durante el período 2008-2012, mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales Landsat 5 TM y 7 ETM+. El análisis se realizó con el fin de generar información útil que contribuya a

orientar las políticas públicas destinadas a mejorar la calidad ambiental de la ciudad y, por ende, la confortabilidad de sus residentes y turistas.

2. Metodología

La metodología utilizada para obtener el comportamiento estacional de la TST en la ciudad de Bahía Blanca se basó en tres ejes fundamentales: 1) análisis de datos meteorológicos; 2) procesamiento digital de imágenes satelitales y 3) interpretación visual del terreno e imágenes (Figura 2). En la primera etapa se analizaron los datos meteorológicos del período 1960-2012. Los registros meteorológicos de la ciudad se obtuvieron a partir de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina) y el Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS, Argentina).

Se determinaron años secos, normales y húmedos a partir de los métodos de Quintiles (Bolognesi, 1971). Se calcularon los quintiles del período de estudio y se designaron como Q1, Q2, Q3 y Q4. Posteriormente, se admitió un criterio de clasificación considerado adecuado para los totales anuales (Tabla 1) (Bolognesi, 1971). Con la información de los períodos secos y húmedos, más el análisis de la temperatura del aire, se caracterizó climáticamente a la ciudad y al período de estudio.

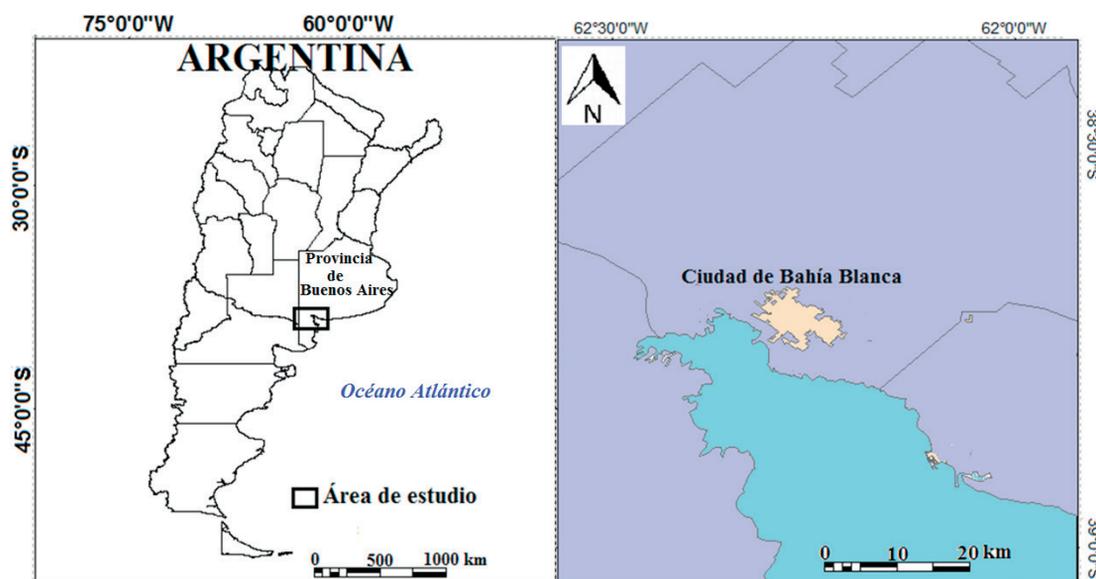


Figura 1. Localización de la ciudad de Bahía Blanca, sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina).

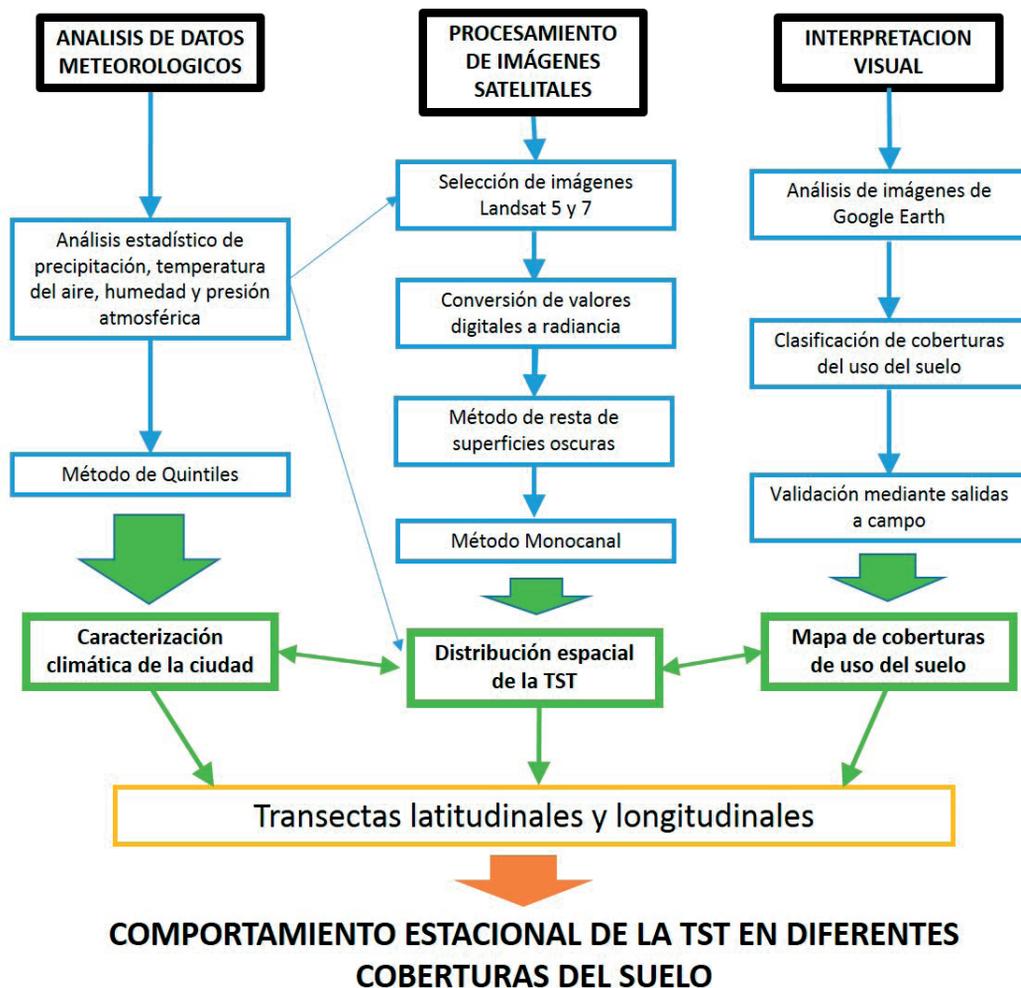


Figura 2. Esquema metodológico.

Ello posibilitó la interpretación de las variaciones temporales de la TST.

Para la segunda etapa del método aplicado, junto con los datos de temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica se seleccionaron

Tabla 1. Clasificación de períodos anuales en relación a las precipitaciones según el Método de Quintiles (Bolognesi, 1971). P = precipitación anual.

Año muy seco	$P < 1Q$
Año seco	$1Q \leq P < 2Q$
Año normal	$2Q \leq P < 3Q$
Año lluvioso	$3Q \leq P < 4Q$
Año muy lluvioso	$P \geq 4Q$

imágenes satelitales Landsat 5 TM y 7 ETM+ sin presencia de nubes correspondientes a los días más representativos de cada estación térmica del año tomadas a las 10:43, hora local. Las mismas se obtuvieron del United States Geological Survey (USGS, Estados Unidos) para el período 2008-2012 (Tabla 2). Además, los parámetros meteorológicos mencionados permitieron ajustar los radiosondeos necesarios para la obtención de la TST (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>). Las imágenes Landsat 7 fueron corregidas debido al error de escaneo de las imágenes ETM+ aplicando la técnica de interpolación multitemporal SLC-Off (*Scan Line Corrector*) (USGS 2003, Scaramuzza 2004, Pringle et al. 2009).

Tabla 2. Imágenes satelitales utilizadas para el estudio de la TST en la ciudad de Bahía Blanca.

Path-Row	Sensor	Fecha de adquisición
226-087	TM	25 de diciembre de 2008
226-087	ETM+	22 de abril de 2008
226-087	ETM+	25 de junio de 2008
226-087	TM	6 de octubre de 2008
226-087	TM	1 de enero de 2009
226-087	ETM+	8 de abril de 2009
226-087	ETM+	11 de junio de 2009
226-087	TM	28 de noviembre de 2009
226-087	ETM+	6 de febrero de 2010
226-087	ETM+	27 de abril de 2010
226-087	ETM+	30 de junio de 2010
226-087	TM	12 de octubre de 2010
226-087	TM	1 de febrero de 2011
226-087	TM	6 de abril de 2011
226-087	TM	17 de junio de 2011
226-087	TM	31 de octubre de 2011
226-087	ETM+	11 de enero de 2012
226-087	ETM+	31 de marzo de 2012
226-087	ETM+	21 de julio de 2012
226-087	ETM+	10 de noviembre de 2012

Se calculó la TST a partir del método Monocanal basado en la Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR). Para ello, se tuvieron en cuenta los aportes de Valor y Caselles (1996), Carlson y Ripley (1997), Jiménez Muñoz *et al.* (2009) y Chander *et al.* (2009). En primer lugar, se realizó una calibración radiométrica para llevar los valores

digitales a radiancia (L_{sat}). Sobre las bandas del visible se realizaron las correcciones en el espectro solar (Carmona *et al.*, 2011) y se aplicó el método de Resta de Superficies Oscuras (Song *et al.*, 2001) (Bandas 1, 2, 3 y 4).

Para calcular la TST, se consideró la ETR (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2009):

$$L_{sen} = [\varepsilon B(T_s + (1 - \varepsilon)L_d)]\tau + L_u \quad [1]$$

donde: L_{sen} : radiancia medida por el sensor ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$), ε : emisividad de la superficie, B : parámetro derivado de la Ley de Planck calculado a partir de la ecuación, T_s : temperatura de la superficie terrestre ($^{\circ}K$), L_d : radiancia atmosférica descendente ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$), τ : transmisividad atmosférica y L_u : radiancia atmosférica ascendente ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$).

En la tercera y última etapa se realizó una clasificación de las coberturas del suelo (Tabla 3). La misma fue el resultado de la interpretación visual de imágenes obtenidas de Google Earth (consultado el día 12 de marzo de 2012). Mediante el SIG ArcGIS 9.3 y con los datos precedentes se elaboró un mapa de coberturas del suelo que se validó recorriendo la ciudad (Figura 3). Dicha validación incluyó una intervención empírica con el objetivo de trazar con mayor precisión los límites entre cada una de las coberturas. La misma consistió en un recorrido de campo en el que se establecieron

Tabla 3. Características y porcentajes de las coberturas del suelo identificadas en la ciudad de Bahía Blanca.

Cobertura del suelo	Abreviatura	% de cobertura	Características
Espacios Verdes	EV	6	Parques y plazas. Zonas con vegetación abundante.
Centro de la Ciudad	C	4	Centro histórico de la ciudad con muy alta densidad de edificaciones. Permanente tránsito vehicular y peatonal. Zona de comercios.
Urbano Concentrado	UC	8	Zonas con alta densidad de edificios y casas. Su uso principal es el residencial.
Urbano Residencial	UR	35	Áreas con edificaciones de baja altura destinadas a residencias familiares en su mayoría.
Urbano con Vegetación	UV	9	Barrios identificados con la denominación de “Barrios Parque”. La presencia de vegetación y parquización de sus predios es un requisito para su establecimiento.
Urbano Disperso	UD	18	Áreas con construcciones aisladas y presencia de suelos al descubierto.
Urbano Muy Disperso	MD	13	Zonas con escasa o nula edificación. Predominan los terrenos baldíos.
Portuario-Industrial	PI	7	Sus edificaciones y tareas están vinculadas con las actividades portuarias (Puerto de Ingeniero White) e industriales.
Periferia	P	-	Área localizada fuera de la ciudad

previamente recorridos urbanos que abarcaron la mayor parte del área de la ciudad y su periferia (Figura 4). Para ello se trazaron 4 transectas: 2 latitudinales y 2 longitudinales (Figura 3). A partir de estas se analizó la variación estacional de la TST durante el período 2008-2012 y su relación con las diferentes coberturas del suelo.

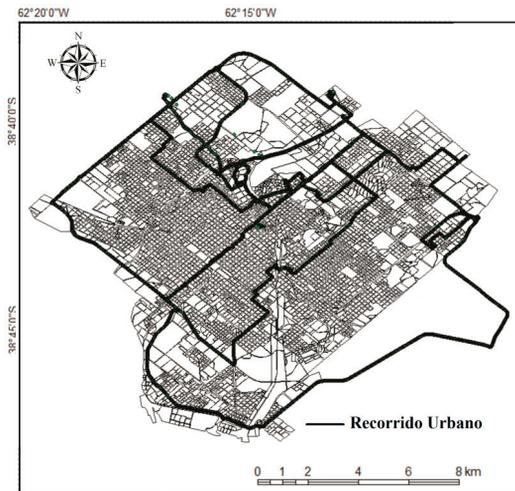


Figura 3. Recorrido urbano realizado durante la salida de campo para validar las coberturas del suelo.

3. Resultados y discusión

La temperatura media del aire de la ciudad durante el período 1960-2012 fue de 15,5°C, con una oscilación entre 14,4 y 16,6°C. Los años 2008 y 2012 fueron más cálidos (1,1 y 0,6°C mayores al valor medio, respectivamente), en cambio, el año 2009 fue más frío (-0,7°C).

La precipitación media anual fue de 654 mm, con un máximo de 1100 mm en 1976 y un mínimo de 328 mm en 2008. Al analizar este parámetro, se observó que el período de estudio correspondió a un período seco. Los años 2008 y 2009 fueron *muy secos*, mientras que 2010, 2011 y 2012 se identificaron como *secos*. Las condiciones de sequía experimentadas en los años mencionados provocaron una reducción en la cobertura vegetal de las zonas periféricas, barrios parques, plazas y plazuelas de la ciudad.

La distribución espacial de la TST presentó un registro homogéneo durante todos los años analizados. El mínimo valor del período correspondió al invierno de 2010 (-10°C), mientras que el máximo se observó en el verano de ese mismo año (46°C) y en la primavera de 2009 y 2011 (45°C). La temperatura del aire presentó una tendencia

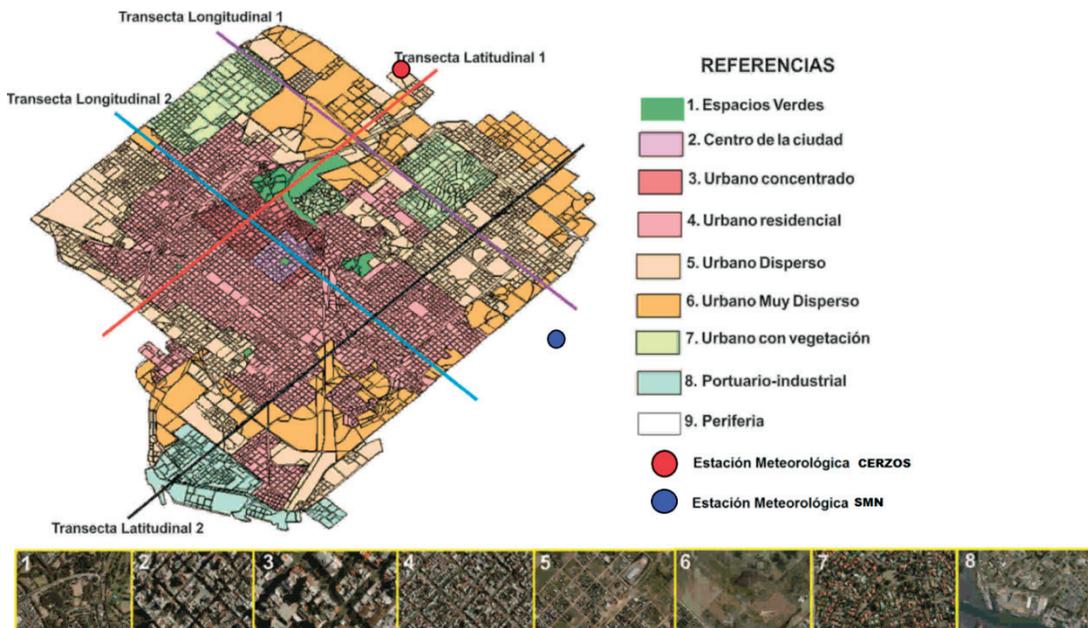


Figura 4. Localización de las estaciones meteorológicas, tipos de coberturas del suelo y transectas utilizadas para analizar la TST en la ciudad de Bahía Blanca. Se considera como Periferia (P) a lo que se encuentra fuera del trazado urbano.

similar, 2010 fue el invierno más frío del período 2008-2012 con una temperatura mínima de 2,2°C. Asimismo los mayores valores correspondieron al verano de ese año con una máxima de 32,3°C. Por otro lado, las primaveras más cálidas fueron las de 2008 y 2011 con valores máximos de 27,4°C y 26°C, respectivamente.

El otoño de 2011 tuvo el mayor valor de TST (44°C). Los menores valores otoñales fueron registrados en 2009 con 3°C. En general, las áreas urbanas construidas (como Urbano Concentrado y Urbano Residencial) presentaron los menores registros. A modo de ejemplo, se muestra el año 2008 en la figura 5. Como se esperaba, las mayores temperaturas fueron en los veranos (TST mayores a 43°C), las invernales fueron menores (-9°C) y las estaciones intermedias fueron similares a invierno o verano dependiendo de las condiciones atmosféricas del día seleccionado (entre 29 y 42°C) (Figura 5). La temperatura del aire del año 2008 fue la más elevada del período 1960-2012, con una media anual de 16,7°C. El verano presentó una media de 23,2°C, con un máximo de 30,1°C.

En invierno este valor fue de 10,4°C, en otoño de 13,4°C y en primavera de 19,8°C.

La situación de sequía durante el período de estudio explica las variaciones de la TST observadas en los períodos estivales. La misma generó una reducción de la cobertura vegetal y con ello se observaron cambios en los flujos de radiación de la ciudad. De esta manera, las coberturas de Urbano Disperso (UD) y Muy Disperso (MD) tuvieron valores más elevados respecto al resto del área urbana dado que, en general, fue en estos espacios en donde se encuentran los terrenos con escasa vegetación.

La amplitud térmica de la TST fue mayor en verano y primavera. Comparando los valores estacionales, la menor amplitud (7,6°C) se presentó en el verano de 2012, con un mínimo en el centro de la ciudad y un máximo en la periferia. Las mayores amplitudes se observaron en el verano de 2008 (17,3°C) y en el invierno de 2009 (14,1°C). Las primaveras de 2010 y 2011 evidenciaron las máximas amplitudes de TST con 15,7 y 20,2°C, respectivamente (Figura 6).

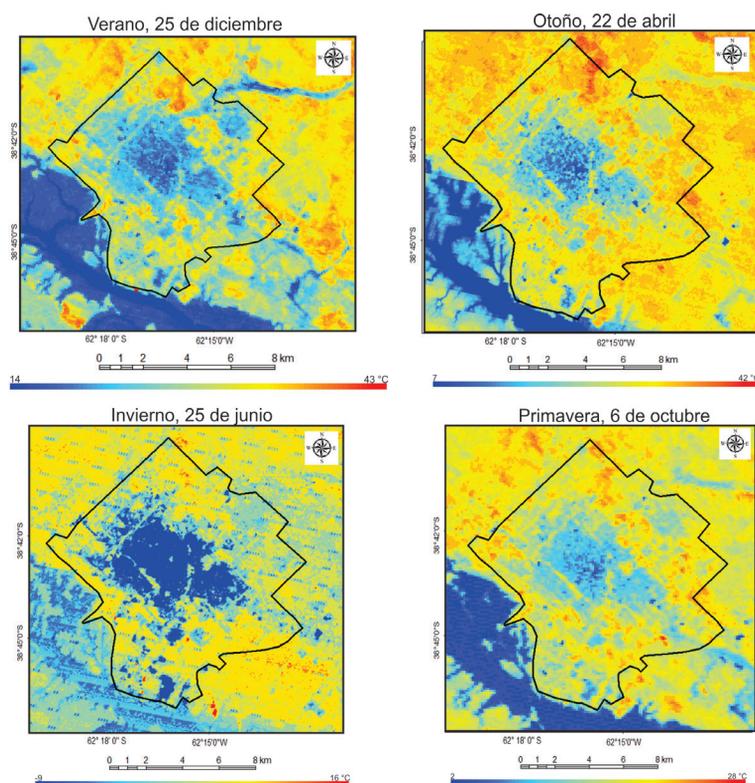


Figura 5. Distribución Espacial de la TST en diferentes días de 2008, basado en el análisis de imágenes satelitales.

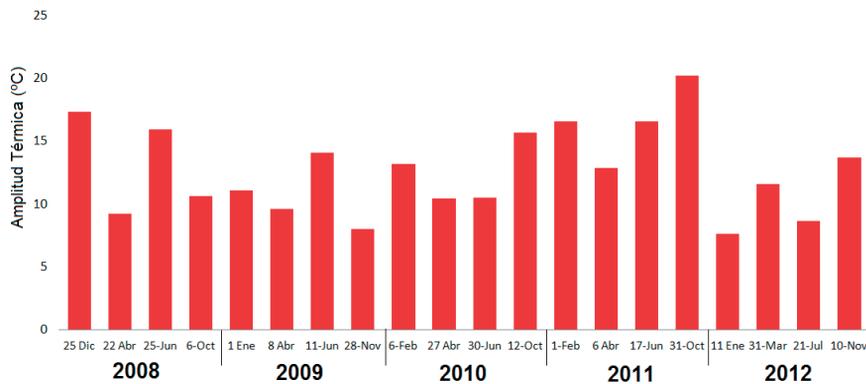


Figura 6. Amplitud Térmica de la TST en Bahía Blanca para el período 2008-2012 calculada a partir del procesamiento digital de imágenes.

3.1. Comportamiento térmico en las distintas coberturas del suelo urbano

Las transectas térmicas permitieron analizar el comportamiento de la TST en las distintas coberturas urbanas. Se observó que la distribución térmica en primavera y otoño coincidió con el comportamiento del verano e invierno respectivamente, dependiendo de las características del día y la información contenida en la imagen satelital. En la figura 7 se presentan ejemplos de transectas térmicas de cada uno de los años analizados.

La cobertura Periferia (P) presentó valores uniformes en el otoño, invierno y primavera. Sin embargo, el verano manifestó variaciones de más de 5°C en relación con el resto de las coberturas. Esto pone de manifiesto la rugosidad de los espacios urbanos originada por los edificios en altura. Estos son los que generan que la ciudad se mantenga a la sombra. Además, en el verano, el ángulo de elevación solar con el que se registra la imagen satelital es mayor que en el resto de las estaciones, haciendo que las sombras generadas sean más grandes. A su vez, los espacios periféricos reciben de forma directa la radiación solar y presentan mayor temperatura que los espacios construidos durante la mañana (Valor *et al.*, 2000). Esta característica se presentó sólo por las mañanas. Numerosos trabajos realizados demostraron que, durante el horario de la máxima temperatura, se generan fenómenos de isla de calor, en los que el centro de la ciudad se presenta más cálido que su periferia (Yuan y Bauer, 2007; Santana, 2007) (Figura 7).

La cobertura Urbano Vegetado (UV) mostró valores homogéneos con oscilaciones inferiores a 2°C. La TST fue similar tanto en otoño como en primavera; mientras que el verano evidenció variaciones que superaron los 8°C entre el mínimo y el máximo valor registrado (Figura 7). En este sentido, concuerda con lo propuesto por Quattrochi y Ridd (1998) en su estudio sobre la ciudad de Salt Lake City. Los autores determinaron que las diferencias térmicas de una ciudad están directamente relacionadas con la vegetación. Las posibles modificaciones en los sectores urbanos, como consecuencia de la construcción, la expansión urbana, el reemplazo de una superficie natural por una artificial, etc. modifican los valores de la TST. A su vez, coincide con lo observado por Sarricolea *et al.* (2006) y Oltra-Carrió *et al.* (2010) quienes demostraron que el crecimiento urbano tiene impacto sobre la distribución espacial de la TST. Estos autores coinciden con Rotem-Mindali *et al.* (2015) al resaltar el rol de la vegetación en la mitigación de la intensidad de la isla de calor urbana cuando observaron la disminución de la TST en esas áreas verdes.

La cobertura Urbano Disperso (UD) no mostró fluctuaciones significativas en el invierno. Sin embargo, la misma presentó valores con grandes variaciones dependiendo de la densidad de los edificios y las sombras. Las mayores variaciones de TST se observaron en el verano y la primavera (Figura 7). Por otro lado, la cobertura Urbano Muy Disperso (MD) manifestó un comportamiento similar al observado en el UD pero con valores menores.

El área Urbano Residencial (UR) fue la cobertura más fluctuante de todas las analizadas (Figura 7). Se observó que, al tratarse de un espacio en el que la altura y densidad de los edificios es heterogénea, generó sombras que registraron valores bajos de TST, mientras que los terrenos al descubierto y aquellos con mayor exposición solar presentaron valores elevados. Una situación similar se distinguió en el uso Urbano Concentrado (UC).

El Centro de la ciudad (C) manifestó los menores valores en todas las estaciones del año. Esto se debió a que la alta concentración de edificios facilitó la formación de sombras que fueron detectadas por el satélite y se registraron valores bajos de TST (Figura 7). El crecimiento de los edificios en altura junto con su forma y orientación produjeron una modificación del flujo del viento de la ciudad generando vórtices y torbellinos en ciertos sectores urbanos. Los datos registrados evidenciaron una disminución de la velocidad máxima del viento de $3,4 \text{ km h}^{-1}$, manifestando valores inferiores a la media ($50,4 \text{ km h}^{-1}$) desde el año 2005. Además, la escasez de suelos vegetados en el centro alteró la distribución espacial de la humedad relativa. La misma se redujo un 6 % durante los últimos 50 años. Asimismo, la energía que se desprende de los edificios durante la noche ocasiona una fuente artificial de calor que da como resultado la formación de islas de calor (Capelli de Steffens

et al., 2005). Esto permite explicar el aumento de la temperatura media anual del aire que registró un incremento de $0,5^\circ\text{C}$ desde 1960 hasta 2012.

Los espacios verdes (EV) se caracterizaron por tener valores bajos de TST relacionados con la presencia de árboles (Figura 7). Los espacios verdes producen áreas con temperaturas frías y reducen la emisividad de onda larga proveniente de las zonas construidas (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003). Según Goetz *et al.* (2000) existe un equilibrio entre el calor retenido por el aire en las zonas con vegetación densa y la temperatura calculada con sensores remotos. Es por eso que estos espacios representan la cobertura urbana más relevante ya que poseen un efecto estabilizador de la temperatura y ayudan a reducir la contaminación del aire. En el caso contrario, la reducción de los espacios verdes cambian el almacenamiento de calor y con ello se puede modificar la temperatura de la ciudad en relación con su entorno (Luber y McGeehin, 2008).

Finalmente, la cobertura Portuario Industrial (PI) presentó grandes oscilaciones de TST en verano. Mientras que en primavera los valores de TST fueron más estables y en otoño e invierno fueron menores y, en general, menos fluctuantes; exceptuando la cobertura UR que durante el invierno de 2011 manifestó una diferencia de 10°C (Figura 7).

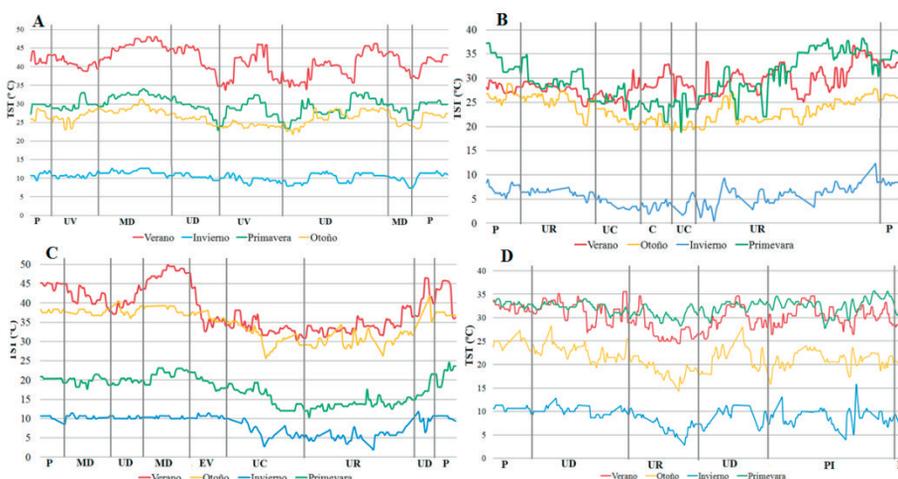


Figura 7. Ejemplos de transectas térmicas de cada año analizado. **A)** Transecta Latitudinal 1 del año 2010, **B)** Transecta Latitudinal 2 del año 2011, **C)** Transecta longitudinal 1 del año 2008 y **D)** Transecta Longitudinal 2 del año 2009. **P:** Periferia, **MD:** Urbano Muy Disperso, **UV:** Urbano Vegetado, **UD:** Urbano Disperso, **UR:** Urbano Residencial, **MD:** Urbano muy disperso, **UC:** Urbano Concentrado, **C:** Centro, **EV:** Espacios Verdes, **PI:** Zona portuaria-industrial.

4. Conclusión

El estudio de los ambientes urbanos puede ser analizado a través de imágenes satelitales. La intervención del hombre sobre el medio da origen a distintas coberturas urbanas que manifiestan patrones térmicos diferentes que pueden afectar a la calidad ambiental y a las condiciones atmosféricas locales. La relevancia de los datos adquiridos fueron útiles para comprender las variaciones térmicas de la ciudad de Bahía Blanca y para inferir los efectos que causa el aumento de la densidad de los edificios sobre ella: las ráfagas de viento, disminución de la cobertura vegetal, disminución de las temperaturas en el centro y cambios de la superficie natural por construcciones.

En este estudio, la relación entre datos meteorológicos e intervenciones empíricas a través de recorridos en la ciudad relacionados con el procesamiento digital de imágenes Landsat fue efectiva para el estudio de la TST y su relación con los diferentes usos del suelo urbano. La TST presentó diferencias según las áreas urbanas discriminadas por lo que puede tomarse como un indicador de la rugosidad de los espacios urbanos. Las fluctuaciones dependieron directamente de las sombras y la densidad de las construcciones urbanas. En este estudio la TST fue un parámetro útil para interpretar los cambios de temperatura que ocurren dentro de las ciudades como consecuencia de espacios modificados por la presencia de edificios, aspectos poco estudiados en la literatura científica. Del análisis de las imágenes satelitales se obtuvo que la ciudad de Bahía Blanca presentó una gran amplitud térmica durante el verano. El análisis de los mapas térmicos realizados manifestó un patrón de distribución espacial de la TST: la periferia y las áreas con escasa construcción fueron más cálidas que el centro de la ciudad. Esto sucedió porque, durante la mañana, el centro de la ciudad se mantiene a la sombra de los edificios mientras que la periferia está siendo calentada por el sol.

El análisis de las transectas térmicas evidenció que el invierno fue la estación con menores fluctuaciones de la TST. En todas las estaciones del año, los mayores valores se localizaron en la Periferia, en Urbano Muy Disperso y en Urbano Disperso. Es importante destacar el rol de las zonas verdes en el interior de la ciudad ya que, en todas las estaciones del año, la TST presentó menores valores en ellas.

En las ciudades, las áreas sin vegetación presentaron valores de TST similares a los de superficies iluminadas por el sol tales como la periferia o áreas completamente pavimentadas. Por lo tanto, la utilidad de este tipo de investigaciones es que constituye una base de datos necesaria para el proceso de planificación urbana y para la toma de decisiones ya sea en el marco público o privado. Toda esta información permitiría analizar la dinámica térmica interna de los ambientes urbanos. Además, la metodología empleada en este trabajo es sencilla y puede replicarse con facilidad en otros espacios urbanos del mundo.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al United States Geological Survey (USGS) por brindar la información satelital. Al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), al Centro de Recursos Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS) por los datos meteorológicos utilizados en esta investigación y al Centro de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina) y a la Universidad Nacional del Sur (UNS) por el financiamiento del presente trabajo.

Referencias

- Bello Fuentes, V. 1994. La isla de calor y los usos del suelo en Guadalajara, *Serie Geográfica*, 4, 83-97.
- Bolognesi, E. 1971. Análisis de criterios para clasificar totales mensuales de precipitación aplicados a series de República Argentina. *Meteorología. Vol. II N° 1, 2 y 3*. Buenos Aires: Ed. Centro Argentino de Meteorólogos.
- Bustos, M.L., Ferrelli, F., Huamantínco-Cisneros, M.A., Piccolo, M.C., Gil, V. 2015. Estudio preliminar del ajuste entre datos meteorológicos *in situ* y del Reanálisis (NCEP/NCAR) en distintos ambientes de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Estudios Geográficos* (en prensa).
- Bustos, M.L., Piccolo, M.C. 2011. Desconfort térmico en verano e invierno para la localidad de Pehuen Co, Argentina. *Nimbus. Revista de meteorología, Climatología y Paisaje*, 27/28, 63-76.
- Capelli de Steffens, A.M., Piccolo, M.C., Campo de Ferreras, A.M. 2005. *Clima urbano de Bahía Blanca*, Argentina: Ed Dunken.

- Carlson, T.N., Ripley, D.A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241-252. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Carmona, F., Rivas, R., Thomas, L., Marino, B. 2011. Caracterización espectral del estuario del río Quequén Grande por medio de imágenes Landsat. En Rivas R., Carmona F. y Ocampo D. (eds). *Teledetección. Recientes aplicaciones en la región pampeana, 2011*. Argentina: Editorial Martín,
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM + and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chen, X., Zhao, H., Li, P., Yin, Z. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104, 133-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>
- Cúnsulo, M., Kurbán, A., Papparelli, A. 2012. Inferencia de la temperatura del aire urbano a partir del NDVI utilizando imágenes satelitales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 11.01-11.07.
- Díaz, R.A., Mormeneo, I. 2002. Zonificación del clima de la región pampeana mediante análisis de conglomerados por consenso. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 2, 125-131.
- Dimoudi, A., Nikolopoulou, M., 2003. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35, 69-76. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)
- Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J.M. 2008. Global change and the ecology of cities. *Science*, 319, 756-760. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1150195>
- Grimmond, S., Oke, T. 1998. Heat storage in urban areas: Local scale observation and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 922-940. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<0922:HSIUAL>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<0922:HSIUAL>2.0.CO;2)
- Goetz, S.J., Prince, S.D. y Small, J. 2000. *Advances in satellite remote sensing of environmental variables for epidemiological applications in Remote sensing and GIS in public health*. Londres: Academic Press Ed. S. I. Hay
- Jimenez-Muñoz, J.C., Jordi, C., Sobrino, J.A., Soria, G., Ninyerola, M., Pons, X. 2009. Revision of the single-channel algorithm for lands surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 339-349. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2008.2007125>
- Kusaka, H. 2008. Recent progress in urban climate study in Japan. *Geographical Review of Japan*, 81, 361-374. <http://dx.doi.org/10.4157/grj.81.361>
- Lin, 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, 1535-1552. <http://dx.doi.org/10.3390/rs3071535>
- Luber, G., McGeehing M., 2008. Climate change and Extreme heat events. *American Journal of Preventive Medicine*, 35, 429-435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021>
- Montávez, J., Rodríguez, A., Jimenez, J. 2000. A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology*, 20, 899-911. [http://dx.doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I](http://dx.doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I)
- Morris, K.I., Salleh, S.A., Chan, A., Ooi, M.C.G., Abdalla Abakr, Y., Oozeer, M.Y., Duda, M. 2015. Computational study of urban heat island of Putrajaya, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 19, 359-372. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.010>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) *Atmospheric Correction Parameter Calculator*, Último acceso: 4 de abril de 2013 de <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>
- Oke, T.R. 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2085-2104. <http://dx.doi.org/10.1080/014311698214884>
- Oltra-Carrio, R., Sobrino, J.A., Gutiérrez-Angonese, J., Gioia, A., Paolini, L., Malizia, A. 2010. Estudio del crecimiento urbano, de la estructura de la vegetación y de la temperatura de la superficie del Gran San Miguel de Tucumán, Argentina. *Revista de Teledetección*, 34, 69-76.
- Papparelli, A., Kurbán, A., Cúnsulo, M. 2011. Isla de calor y ocupación espacial urbana en San Juan: Análisis evolutivo. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 4, 110-120.
- Pérez, M.E., García, M.P. 2002. Cartografía térmica del área metropolitana de Madrid a partir del sensor ETM del Landsat 7. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, Vol. Extraordinario, 377-386.
- Pérez González, M., García Rodríguez, P., Guerra Zaballos, A. 2003. Análisis del clima urbano a partir de imágenes de satélite en el centro peninsular español. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 23, 187-206.

- Pringle, M.J., Schmidt M., Muir, J.S. 2009. Geostatistical interpolation of SLC-off Landsat ETM+ images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 654-664. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.001>
- Quattrochi, D.A., Ridd, M.K. 1998. Analysis of vegetation within a semi-arid urban environment using high spatial resolution airborne thermal infrared remote sensing data. *Atmospheric Environment*, 32, 19-33. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00179-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00179-9)
- Ripoll, M.V., Kurbán, A., Papparelli, A., Cúnsulo, M., Roca, G. 2010. Condiciones térmicas de un espacio verde urbano en clima árido. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 11.09-11.15.
- Rivas, R., Caselles, V.A. 2004. Simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93, 68-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.021>
- Romero, H., Salgado, M., Smith, P. 2010. Cambios climáticos y climas urbanos: relaciones entre zonas terminales y condiciones socio-económicas de la población de Santiago de Chile. *Revista INVI*, 25, 151-179. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582010000300005>
- Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Parshall, L., Chopping, M., Pope, G., Goldberg, R. 2005. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. *Environmental Hazards*, 6, 51-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hazards.2004.12.001>
- Rotem-Mindali, O., Michael, Y., Helman, D., Lensky, I. M. 2015. The role of local land-use on the urban heat island effect of Tel Aviv as assessed from satellite remote sensing. *Applied Geography*, 56, 145-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.023>
- Santana, L. 2007. Landsat ETM+ image applications to extract information for environmental planning in a Colombian city. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 4225-424. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701244856>
- Sarricolea, P., Romero Aravena, H. 2006. Cambios de uso y coberturas en el suelo entre 1998 y 2004 y sus efectos sobre la configuración de la isla de calor de urbana de superficie de Santiago. *Repositorio Académico de la Universidad de Chile*, 1-4.
- Scaramuzza, P., Micijevic, E., Chander, G. 2004. SLC previous term gap next term-filled. *Products Phase One Methodology*.
- Song, C., Woodcock, C., Seto, K.C., Pax-Lenney, M., Macomber, S.A. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75, 230-244. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3)
- United States Geological Survey (USGS). Último acceso: 14 abril de 2013 de <http://glovis.usgs.gov/>.
- USGS 2003. *Preliminary assessment of Landsat 7 ETM+ data following scan line corrector malfunction*. Sioux Falls, South Dakota, 86.
- Valor, E., Caselles, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, Africa and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57, 167-184. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)
- Valor, E., Caselles, V., Coll, C., Sánchez, F., Rubio, E., Sospedra, F. 2000. Análisis comparativo del efecto de la isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR. *Revista de Teledetección*, 14, 1-6.
- Voogt, J.K., Oke, T.R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* 86, 370-384. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wong, N., Yu, C. 2005. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29, 547-558. <http://dx.doi.org/10.1016/j.habitatint.2004.04.008>
- Yuan, F., Bauer, M. 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106, 375-386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>