

Identificación de la variabilidad térmica de superficie entre 1999 y 2018 a través del análisis de imágenes satelitales. Estudio caso: municipio de Zipaquirá, Colombia

Heraldine Preciado-Barragán¹
Universidad de La Salle
hpreciado34@unisalle.edu.co

Mayerling Sanabria-Buitrago²
Universidad de La Salle
msanabria@unisalle.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.21158/23823399.v9.n0.2021.3179>

Fecha de recepción: 01 de febrero de 2021

Fecha de aprobación: 17 de diciembre de 2021

Cómo citar este artículo: Preciado-Barragán, H.; Sanabria-Buitrago, M. (2021). Identificación de la variabilidad térmica de superficie entre 1999 y 2018 a través del análisis de imágenes satelitales. Estudio caso: municipio de Zipaquirá, Colombia. *Revista Ontare*, 9, 57-84.

DOI: <https://doi.org/10.21158/23823399.v9.n0.2021.3179>

¹ Ingeniera Ambiental y Sanitaria - Universidad de La Salle. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-3830>

² Ingeniera Ambiental y Sanitaria - Universidad de La Salle. Especialista en Sistemas de información Geográfica - Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialista en Evaluación de Impacto Ambiental - Universidad Jorge Tadeo Lozano. Magister en Hábitat - Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7696-3247>





RESUMEN

En los procesos de consolidación de áreas pobladas, la transformación de la cobertura natural, en su mayoría vegetal, por suelo desnudo o con revestimientos, modifica la transferencia de energía en dichos espacios; al cambiar la cobertura expuesta a la radiación solar, se genera un cambio en la temperatura que impacta el clima local. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue la identificación de la variabilidad térmica en superficie con el fin de evidenciar si existe una correlación entre dicha variación de la temperatura con factores tales como el crecimiento urbano y la concentración de cobertura vegetal, esto a través de un análisis espacial por medio de imágenes de satélite en el municipio de Zipaquirá. La metodología se basó en la comparación de la información meteorológica y poblacional disponible para Zipaquirá, con los patrones de cambio analizados con el índice de vegetación (NDVI), el índice de diferencia normalizada edificada (NDBI) y la temperatura superficial terrestre (TST), obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8. Finalmente, la información fue recopilada en un visor geográfico para la visualización dinámica de los datos comparados. La investigación permitió comprobar la correlación existente entre el aumento del área construida y el cambio en la temperatura de superficie.

Palabras clave: variabilidad térmica; concentración de cobertura vegetal; temperatura superficial terrestre; isla de calor urbana; análisis geoespacial; cambio climático.





Identification of surface thermal variability between 1999 and 2018 through satellite image analysis. Case study: Municipality of Zipaquirá, Colombia

ABSTRACT

In the processes of consolidation of populated areas, the transformation of the natural land cover, mostly vegetation, by bare soil or with coverings, modifies the transfer of energy by changing the cover exposed to solar radiation, reconditioning temperature and affecting local climate. Therefore, the aim of this research was to identify surface thermal variability in order to show whether there is a correlation between this temperature variation with factors such as urban growth and the concentration of vegetation cover, through a spatial analysis by satellite images in the municipality of Zipaquirá. The methodology was based on the comparison of meteorological and population information available for Zipaquirá, with the patterns of change analyzed with the vegetation index (NDVI), the normalized difference-built index (NDBI), and the land surface temperature (TST), obtained from processing Landsat satellite images 5, 7, and 8. Finally, the information was compiled in a geographic viewer for the dynamic visualization of the compared data. The research made it possible to verify the correlation between the increase in built-up area and the change in surface temperature.

Keywords: Thermal variability; land cover concentration; land surface temperature; urban heat island; geospatial analysis; climate change.



Identificação da variabilidade térmica da superfície entre 1999 e 2018 através da análise de imagens de satélite. Estudo de caso: município de Zipaquirá, Colômbia

RESUMO

Nos processos de consolidação de áreas povoadas, a transformação da cobertura natural, principalmente vegetal, por solo descoberto ou com revestimentos, modifica a transferência de energia nesses espaços. Ao alterar a cobertura exposta à radiação solar, gera-se uma mudança de temperatura que impacta o clima local. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi identificar a variabilidade térmica na superfície a fim de mostrar se existe uma correlação entre a referida variação de temperatura com fatores como o crescimento urbano e a concentração da cobertura vegetal, isso através de uma análise espacial via imagens de satélite no município de Zipaquirá. A metodologia foi baseada na comparação da informação meteorológica e populacional disponível para Zipaquirá, com os padrões de mudança analisados com o índice de vegetação (NDVI), o índice de diferença normalizada construída (NDBI) e a temperatura superficial terrestre (TST), obtidos a partir do processamento das imagens de satélite Landsat 5, 7 e 8. Por fim, as informações foram compiladas em um visualizador geográfico para visualização dinâmica dos dados comparados. A pesquisa permitiu verificar a correlação existente entre o aumento da área construída e a mudança na temperatura da superfície.

Palavras-chave: variabilidade térmica; concentração da cobertura vegetal; temperatura da superficial terrestre; ilha de calor urbana; análise geoespacial; mudança climática.





Identificación de la variation thermique de surface **des sols par l'analyse d'images satellite sur la période 1999 - 2018. Étude de cas: municipalité de Zipaquirá, Colombie**

RÉSUMÉ

Lors des processus de consolidation des zones de peuplement, la transformation de la couverture végétale en sols nus ou recouverts de matières non-organiques modifie le transfert d'énergie de ces espaces en transformant la surface exposée au rayonnement solaire et provoquant un changement de température qui impacte le climat local. L'objectif de cette recherche est d'identifier la variabilité thermique de surface, à travers l'analyse d'images satellites de la municipalité de Zipaquirá, pour vérifier s'il existe une corrélation entre variation de température, croissance urbaine et concentration du couvert végétal. La méthodologie se base sur la comparaison des informations météorologiques et démographiques disponibles pour la ville de Zipaquirá, obtenues à partir du traitement des images satellites Landsat 5, 7 et 8, grâce à des schémas évolutifs analysés avec l'indice de végétation (NDVI), l'indice de différence normalisé construit (NDBI) et la température de surface terrestre (TST). Ces informations seront finalement compilées dans une base données géographique permettant une visualisation dynamique des données comparées. L'enquête a permis de vérifier la corrélation existante entre l'augmentation des surfaces construites et les changements des températures de surface.

Mots clés: variabilité thermique; concentration du couvert végétal; température de surface; îlot de chaleur urbain; analyse géospatiale; changement climatique.



1. Introducción

Los cambios en la temperatura promedio es tal vez uno de los temas ambientales que mayor preocupación suscita en la actualidad. Su aumento genera un deterioro en la calidad de vida humana y afectaciones irreversibles en los ecosistemas, así como en las diversas formas de vida. La constante transformación de los medios naturales hacia la consolidación de centros poblados, por ejemplo, promueve la expansión de áreas construidas, los procesos de deforestación, el incremento de tráfico vehicular o combustión fósil en procesos industriales que impactan directamente en parámetros tales como temperatura, precipitaciones y velocidad de los vientos, lo cual altera de forma directa el clima local. Esto lo evidencia con claridad Fernández-García:

el asfalto, los edificios y el trazado de la red vial modifica los balances de radiación entre el suelo y el aire circundante, reduciendo la evaporación, aumentando la escorrentía superficial y disminuyendo la velocidad del viento a la vez que aumenta la turbulencia. (1996, p. 154)

En este sentido, las coberturas vegetales son claves para mantener la regulación de la temperatura, pues su presencia influye directamente en los procesos de radiación solar sobre superficie:

[en] zonas con predominancia de follaje, aproximadamente el 30 % de la radiación global es absorbida por las hojas, pero más del 70 % es transformada en calor y usada como energía para la transpiración e intercambio convectivo de calor con el aire circundante. Estos procesos determinan la eficiencia del uso del agua y la temperatura de las hojas. (Raffo, 2014, p.41)

Sin embargo, uno de los efectos urbanos generados con el desarrollo del crecimiento de las ciudades es el fenómeno que se conoce como «islas de calor urbana» —UHI, *urban heat island*—. Esta anomalía se produce en las áreas urbanas y suburbanas como consecuencia de la utilización de materiales con una alta capacidad de absorción y retención del calor solar —albedo— muy superiores a las de los materiales naturales o de las áreas rurales menos desarrolladas (Forero y Castañeda-Rodríguez, 2013).





Sin embargo, la diferencia entre temperaturas tiene múltiples razones, algunas de ellas relacionadas con que las ciudades están densamente construidas, el suelo está cubierto de concreto y hay pocas áreas verdes y pocos cuerpos de agua, lo cual favorece que la radiación solar absorbida se disperse más lentamente (García, 2018). También los materiales que se usan en las construcciones urbanas son, por lo general, oscuros, lo que les permite absorber más energía, la cual se va dispersando poco a poco en forma de calor. Este fenómeno puede llegar a tardar varias horas, lo que mantiene el aire caliente en las ciudades (Islas de calor, 6 de septiembre de 2018).

Actualmente, existen diversas plataformas de sensores remotos dedicadas a la captura y obtención de información de la superficie terrestre. El registro de la temperatura superficial terrestre (TST) es una práctica que ya cuenta con bastante información en la literatura; al usar sensores que cuentan con diferentes resoluciones, pueden ser empleados en estudios meteorológicos e hidrológicos, así como en aplicaciones enfocadas en los cambios del uso del suelo y cobertura vegetal.

Estas implementaciones desde las imágenes permiten realizar análisis en diferentes escalas temporales, considerando los cambios de las coberturas según los usos por actividades antrópicas. Una de estas son las imágenes del programa espacial Landsat, las cuales son de uso gratuito y han sido ampliamente empleadas en monitoreos ambientales y en áreas urbanas, ya que estos satélites miden la temperatura superficial del suelo utilizando las bandas térmicas que poseen los sensores como TM, +ETM y OLI, a fin de detectar longitudes de onda larga de la luz emitida por la superficie de la Tierra, que sirven para el estudio del cambio climático e islas de calor urbano (Pérez, 2010).

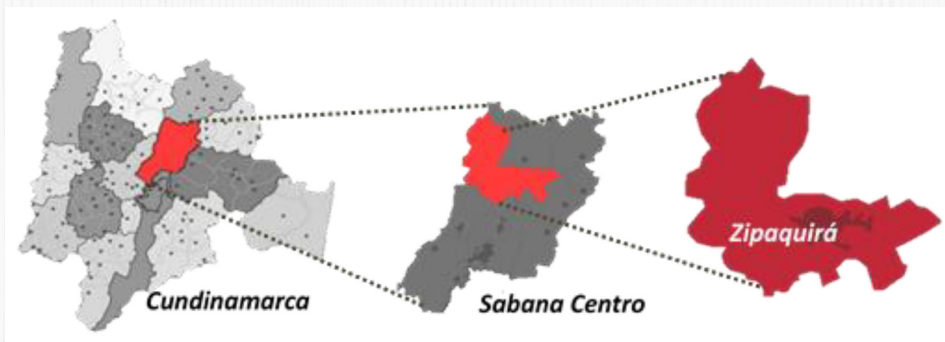
Por tanto, con este artículo, producto del trabajo de grado titulado *Identificación de la variabilidad térmica de superficie a través del análisis geoespacial para ciudades intermedias: estudio de caso ciudad de Zipaquirá*, de la Universidad de La Salle, se pretende enfatizar la relación que puede existir entre la variabilidad térmica en superficie en Zipaquirá, con índices que pueden ser generados a través de geoprocésamiento de las bandas espectrales de una imagen de satélite.



2. Área de estudio

Zipaquirá, también conocida como «Villa de Sal», ocupa una superficie de 197 km², caracterizados por su fertilidad y predominancia agrícola, ganadera y minera. Se ubica a 2650 m. s. n. m., con una temperatura media de 14 °C (Alcaldía de Zipaquirá, 6 de septiembre de 2016). Es la cabecera de la provincia Sabana Centro (véase la Figura 1), limita al norte con el municipio de Cogua, al oriente con Nemocón, Tocancipá y Sopó, al sur con Cajicá, Tocancipá y Tabio, y al occidente con Subachoque y Pacho.

Figura 1. Ubicación espacial municipio de Zipaquirá



Fuente. Elaboración propia.

El relieve que la caracteriza es ligeramente a fuertemente escarpado, con laderas medias y largas, ligeramente convexas, y cimas estrechas y redondeadas. Se observan pendientes que oscilan entre el 12 y el 75 %. Se presentan, principalmente, en las veredas de Río Frío, Alto del Águila, San Isidro, Ventalarga, Portachuelo, Barro Blanco, San Antonio y Páramo de Guerrero (Alcaldía de Zipaquirá, 6 de septiembre 2016, p. 11).



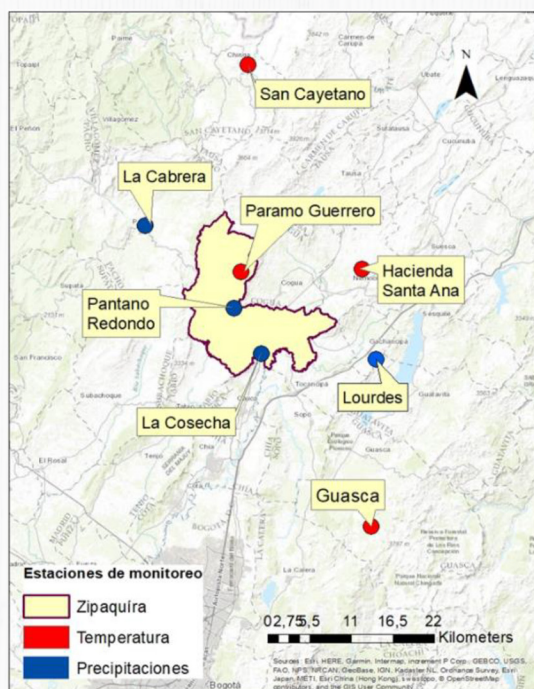
3. Metodología

Desde la perspectiva metodológica, este proyecto implementó el análisis comparativo como estrategia de investigación para relacionar las variaciones espaciales presentadas en a) índice de vegetación (NDVI), b) índice de diferencia normalizada edificada (NDBI), y c) la temperatura superficial terrestre (TST), obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales LANDSAT. Para esto se desarrollaron las fases que se describen a continuación.

3.1 Fase 1. Identificación de los factores que intervienen en la variabilidad térmica para el establecimiento de un modelo geoespacial eficiente

Durante esta fase se realizó el proceso de identificación de la información de las imágenes satelitales y de la información meteorológica suministrada por las estaciones de monitoreo; se escogieron las estaciones para temperatura y precipitaciones más cercanas.

Figura 2. Estaciones meteorológicas de referencia



Fuente. Elaboración propia.



A partir de la revisión de la información reportada por el Ideam para estas estaciones, se procedió de la siguiente manera:

- Inicialmente, se definió un periodo de estudio de veinte años comprendido entre 1999 y el 2018.
- Se realizó la recopilación de la información, que incluyó registros históricos de precipitaciones, temperatura media y velocidad de los vientos para el periodo establecido.
- Se realizó un análisis estadístico de las series históricas de precipitación, temperatura y velocidad de los vientos, empleando estadística descriptiva y análisis de tendencias.
- Se revisó la información poblacional suministrada por las bases de datos del DANE, principalmente los censos generales, realizados en el 2005 y el 2018; con esta información fue posible realizar un análisis espacio-temporal del crecimiento de la ciudad intermedia, gracias a las proyecciones en el tiempo, junto con las estadísticas vitales y la información referente a migraciones.

3.1.1 Tratamiento de las imágenes satelitales

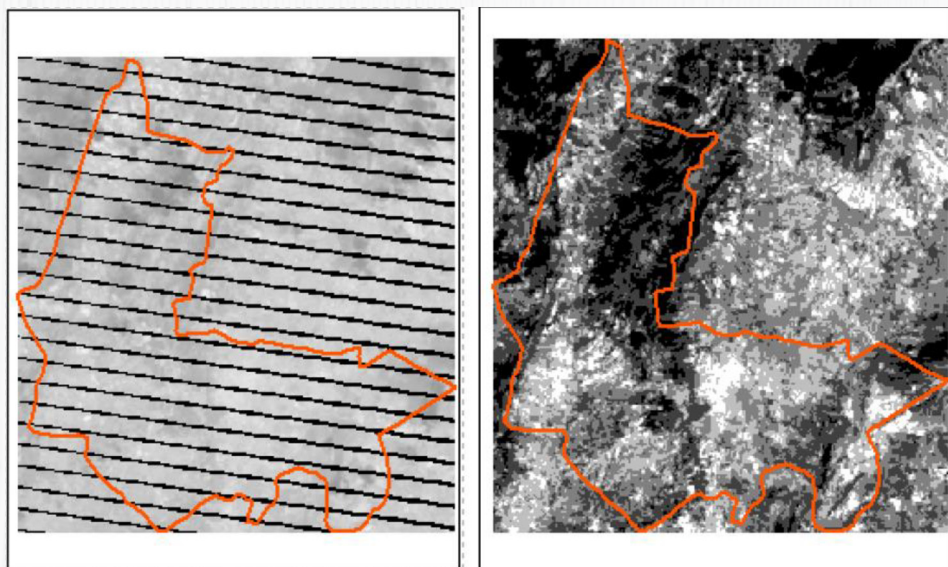
Las imágenes satelitales fueron obtenidas de la base de datos United States Geological Survey (USGS)³, seleccionando solo aquellas que presentaban una nubosidad <20 %, a fin de evitar errores en el procesamiento de datos.

En el momento de escoger las imágenes se observa que las comprendidas en el periodo 2008-2011 presentaban el error de pérdida de línea de escaneo —Scan Line Corrector—, un error común en algunas imágenes del Landsat 7. Por tanto, empleando el Geotool Fix Landsat 7 Scaline Error, que es una herramienta elaborada por el Departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT), se realizó la interpolación de datos que permitió eliminar el bandeo de franjas, tal como se observa en la figura 3.

³ United States Geological Survey (USGS) es una agencia científica del Gobierno federal de Estados Unidos que recopila, estudia, analiza y provee información científica sobre las condiciones de las superficies de la Tierra, sus coberturas y recursos naturales. Véase <https://earthexplorer.usgs.gov/>



Figura 3. Imagen Landsat 2004 antes y después de la corrección



Fuente. Elaboración propia.

3.2 Fase 2. Definición de un modelo de relación geoespacial de los datos de geoprocesamiento para la integración de las variables climáticas y la construcción del modelo espacial

Se implementó el procesamiento de la información de forma secuencial por medio de un Model-Builder. De esta forma, se genera una interrelación entre los datos para ser procesados en serie y obtener los mapas de temperatura.

A las imágenes Landsat seleccionadas se les realizaron las respectivas correcciones radiométricas para la obtención de datos, de modo que se generaron las diferentes imágenes de temperatura de la ciudad intermedia, y se identificaron los cambios en la cobertura vegetal y el aumento de área en las zonas urbanizadas.

3.2.1 Proceso de corrección de imágenes.

La radiancia representa la medición de energía registrada por el sensor del satélite; la corrección de la imagen se obtiene a partir de la siguiente ecuación 1 (Chander, Markham y Helder, 2009):



$$L_{\lambda} = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale} \quad (1)$$

donde:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (2)$$

Donde L_{λ} es la irradiación espectral en la apertura del sensor, $LMAX_{\lambda}$ y $LMIN_{\lambda}$, las radiancias espectrales máximas y mínimas para Q_{calmax} y Q_{calmin} y Q_{cal} , el valor del pixel ND brindado por los datos de la imagen satelital. Q_{calmax} y Q_{calmin} son los valores máximo y mínimo cuantificados de píxeles calibrados correspondientes a $LMAX_{\lambda}$ y $LMIN_{\lambda}$, respectivamente —ND—.

La radiancia asociada a la banda termal se puede tomar como una parte de la energía emitida por cada píxel de la imagen; la transformación de ND a radiancia se realizó con la ecuación 3.

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (3)$$

Donde M_L es la banda específica factor de cambio de escala multiplicativo de los metadatos —Radiance_Mult_Band_x, donde x es el número de la banda—, A_L es el factor de cambio de escala aditivo Band, específica de los metadatos —Radiance_Add_Band_x, donde x es el número de la banda—.

La radiación emitida por la atmósfera no es la misma que llega al sensor. A pesar de encontrarse en la cima de la atmósfera, es afectada por el vapor de agua, de modo que la conversión a reflectancia elimina el efecto coseno de diferentes ángulos de radiación solar debido a la diferencia de tiempo entre las adquisiciones de datos (Chander *et al.*, 2009; Martín, 2015). Los ND de banda reflectante pueden ser convertidos a reflectancia TOA utilizando los coeficientes de reescalado, para lo cual se emplea la ecuación 4.

$$\rho_{\lambda} = M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho} \quad (4)$$

Donde ρ_{λ} es la reflectancia planetaria sin corrección para el ángulo solar.





Dado que los datos de temperatura superficial no se muestran en la banda infrarroja que presenta el espectro electromagnético, para las bandas del infrarrojo térmico de los últimos sensores de Landsat —TM, ETM+ y TIRS— es necesario realizar la transformación en valores de temperatura de brillo (TB), mediante la inversión de la ecuación de Planck (Riaño *et al.*, 2000), tal como se muestra en la ecuación 5.

$$T_B = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right)} \quad (5)$$

Donde T_B es la temperatura de brillo aparente en grados Kelvin —K—, L_λ , la reflectancia en el techo de la atmósfera TOA —Watts/ (m² *srad* μm)— y K_1 y K_2 la constante de conversión específica para cada banda; los valores se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1. Constantes de calibración para satélites Landsat

Satélite	K_1	K_2
Landsat 5-TM	607,76	1260,6
Landsat 7 ETM+	666,09	1282,7
Landsat 8 TIRS Banda 10	774,89	1321,08
Landsat 8 TIRS Banda 11	480,89	1201,14

Fuente. USGS, 2019.

Para el análisis de los datos y el aprovechamiento de la información obtenida por medio de las correcciones radiométricas, al realizar combinaciones de diferentes bandas espectrales es posible la obtención de imágenes que presentan un mayor contraste entre el suelo y la vegetación, o entre el suelo y las zonas edificadas, permitiendo así analizar a lo largo de una línea temporal los cambios significativos que se han presentado por la incidencia antropogénica y las dinámicas de crecimiento urbano.



El índice de vegetación de diferencia normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, la calidad y el desarrollo de la vegetación con base en la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Para el cálculo de los índices de vegetación es necesaria la información que se encuentra en las bandas roja e infrarroja de ese espectro electromagnético. El cálculo del NDVI se realizó mediante la ecuación 6.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6)$$

Donde NIR es la banda del infrarrojo cercano y RED la banda del rojo visible. Por otra parte, el NDBI es el índice de diferencia normalizada edificada. Con este se estiman las zonas con superficies edificadas o en desarrollo de construcción frente a las zonas con vegetación o de suelos desnudos. Dado que las características de reflectividad de las áreas construidas y de suelo son más reflectivas en la banda SWIR que en el NIR, se debe realizar una división de los valores de las bandas para estar en capacidad de discernir con mayor claridad los tipos de suelos que no presentan cubierta vegetal. La determinación se elabora con la ecuación 7.

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (7)$$

Donde SWIR es la banda del infrarrojo de onda corta.

Finalmente, la estimación de la temperatura superficial se obtiene modificando la ecuación de Planck, considerando los valores de radiancia espectral de la banda termal y de la emisividad superficial.

$$Ts = \frac{BT}{1 + [(\lambda * B_{\tau/p})] * Ln\epsilon} \quad (8)$$





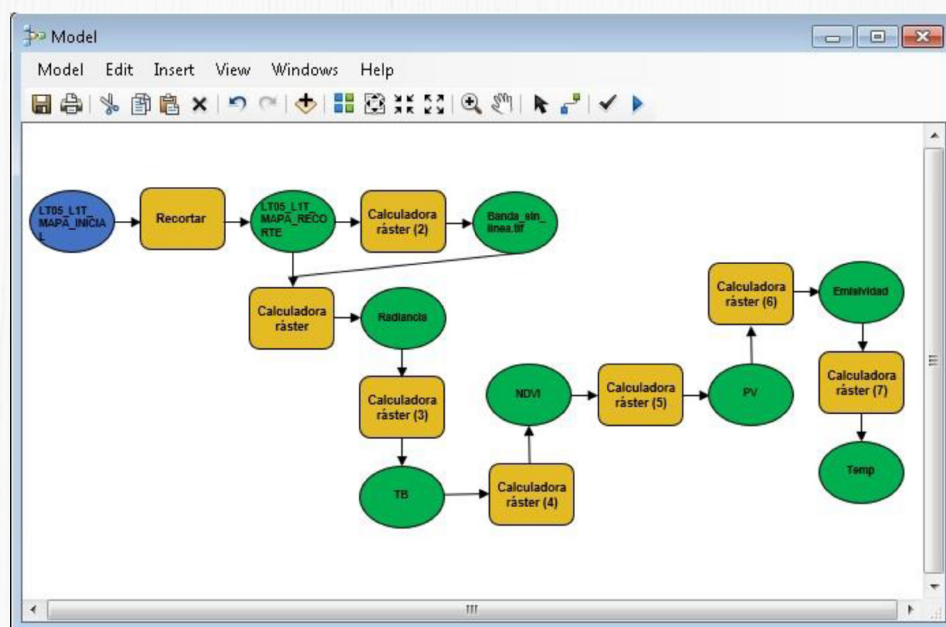
Donde BT es la temperatura de brillo de satélite, λ la longitud de onda media de la banda, ε es la emisividad de la superficie, y ρ : constante de 14 380 calculada a partir de la ecuación 9.

$$\rho = h * \frac{c}{\sigma} \quad (9)$$

Donde h es la constante de Planck — $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ —, c es la velocidad de la luz — $2998 \cdot 10^8$ — y Σ Constante de Boltzmann — $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ — (Jacobson, 2005).

Las ecuaciones fueron generadas de forma secuencial por medio del Model-Builder, tal como se presenta en la figura 4; de esta forma, se optimizaba el procesamiento de imágenes.

Figura 4. Model-Builder en secuencia



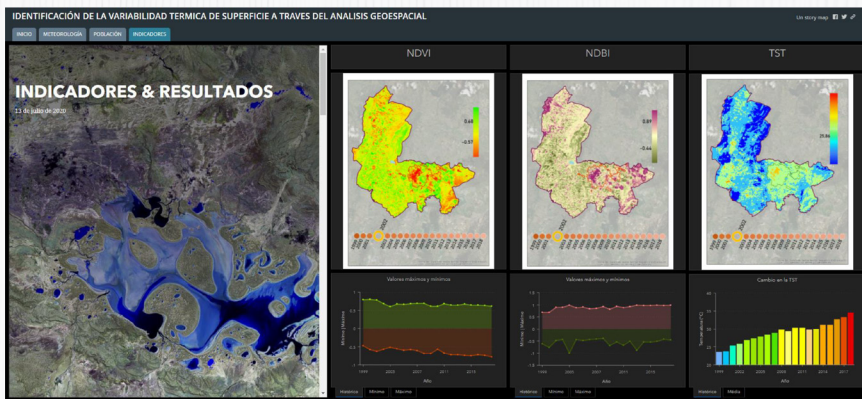
Fuente. Elaboración propia.



3.2 Fase 3. Desarrollo de un visor geográfico para la presentación de la variabilidad térmica en el municipio de Zipaquirá

Se desarrolló un visor geográfico en línea bajo aplicaciones de la plataforma ArcGIS On Line —Story map—, en la cual se puede observar los diferentes mapas de la ciudad a lo largo de veinte años —1999-2018—, con lo cual fue posible realizar un análisis espacio-temporal del crecimiento urbano, en contraste con los cambios de temperatura en superficie⁴.

Figura 5. Interfaz del visor geográfico *online* diseñado



Fuente. Elaboración propia.

4. Discusión y análisis de resultados

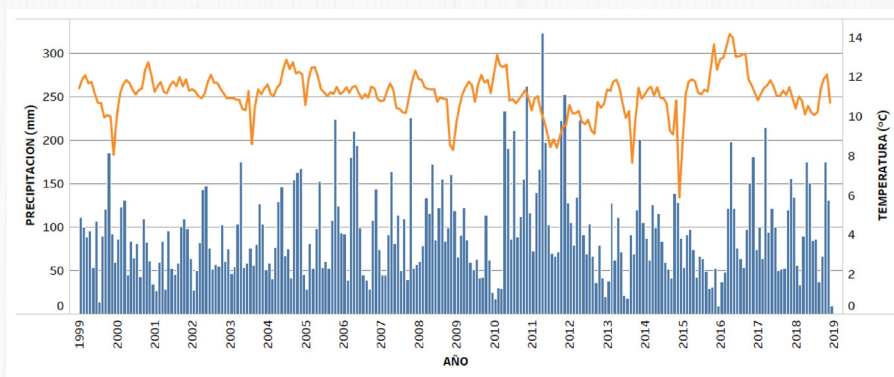
En primer lugar, se presenta el análisis de la temperatura superficial para el municipio de Zipaquirá a partir de la colección de series de las estaciones presentadas en la figura 2 para los últimos veinte años. Esta información es comparada con los datos térmicos obtenidos en el procesamiento de las imágenes Landsat. Posteriormente, se analizó el aumento del área construida percibida desde las imágenes y la densidad de cobertura vegetal presente según los índices de vegetación. Seguido a esto, se presentan los resultados de la aplicación del Model-Builder y el visor geográfico elaborado para la presentación dinámica de la información.

⁴ Para acceder a la aplicación web conéctese al siguiente enlace: <https://arcg.is/jriy5>.



En la figura 6 se puede observar el consolidado de precipitación y temperatura mensual durante los últimos veinte años, en donde se advierte la variación en la precipitación con aumento hacia los mayores picos en la temporada del periodo 2010-2012; durante el inicio de junio del 2010 y a finales de mayo del 2011 se presentó el fenómeno de La Niña, catalogado como el más fuerte según los expertos climáticos del país (Sánchez, 2014), ya que alcanzó con mayor rapidez los registros más altos de precipitaciones y, a su vez, afectó la temperatura, de modo que se presentaron los niveles más bajos de esta.

Figura 6. Consolidado de precipitaciones y temperaturas medias mensuales entre 1999 y el 2019



Fuente. Elaboración propia partir de los registros reportados por el Ideam de las estaciones referidas en la figura 2.

En la figura 6 la línea de tendencia marca los registros de temperatura, en la que se identifica un máximo absoluto entre mediados del 2015 y mediados del 2016, lo que presume una disminución en el fenómeno de convección de las nubes y, por tanto, cielos más despejados y mayor radiación en la zona (García y Dieguez, 2014).

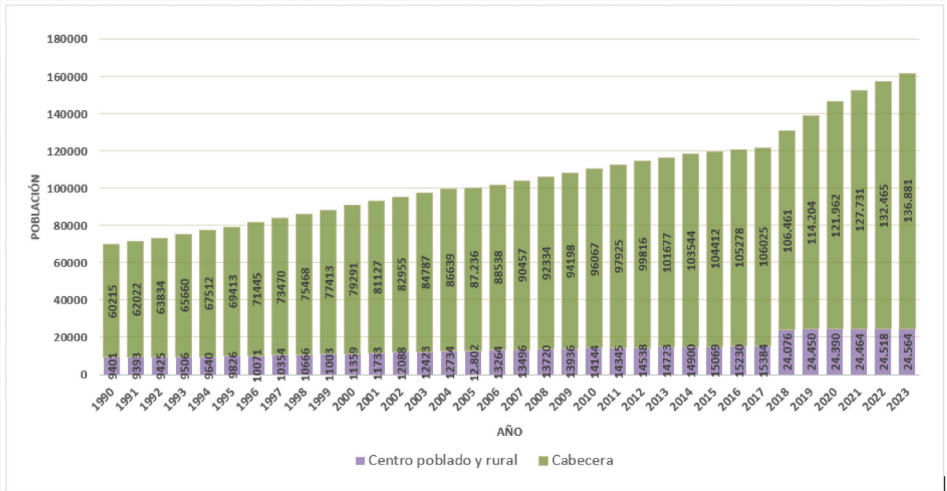
4.1 Proyección de población

En la figura 7 se puede observar el aumento de la población del municipio de Zipaquirá y la proyección generada teniendo en cuenta los reportes del DANE. Es importante aclarar que los datos de los años 1993, 2005 y 2018 son los oficiales, obtenidos en años de censos, por lo cual la información de los demás años fue calculada a partir de los análisis demográficos, de salud, educación, seguridad, etc., de la población colombiana, sin tener en cuenta los conflictos



internacionales presentes que generan la migración masiva de extranjeros. En este sentido, en la transición del año 2017 al 2018 se presenta una diferencia de 8692 habitantes en los centros poblados-rurales. Así mismo, se visualiza que, a lo largo del tiempo, el 13 % de la población se localiza en zonas rurales, de modo que deja un 87 % de habitantes en la urbe.

Figura 7. Aumento de la población rural y cabecera municipal del municipio de Zipaquirá según los reportes del DANE para el municipio

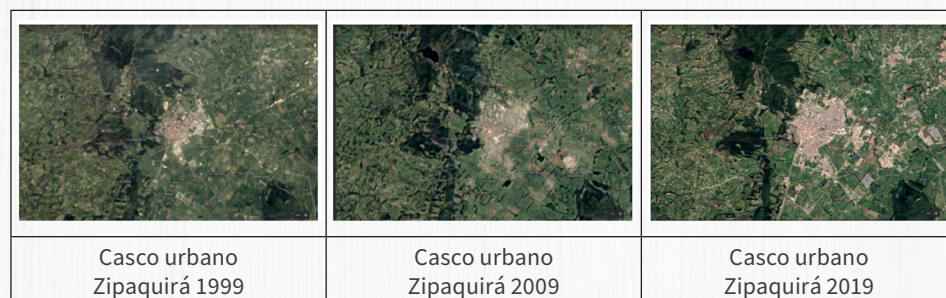


Fuente. Elaboración propia.

Es importante indicar que el crecimiento de la población no presume explícitamente expansión del área urbanizada o cambio en los usos del suelo de un municipio, pues este crecimiento también está asociado a otras pautas, como, por ejemplo, el costo de la tierra, la norma urbana y sus políticas de expansión (Urriza, 2018); sin embargo, al analizar estas gráficas de tendencia de población y corroborarlas con el registro de áreas urbanas en los históricos disponibles de imágenes de satélite (Figura 8), se evidencia una influencia directa de dicho crecimiento frente a la expansión de las zonas urbanizadas.



Figura 8. Ciudad de Zipaquirá: registro histórico imágenes Landsat



Fuente. Elaboración propia. Tomado de secuencia acelerada en Google Earth Pro.

4.2 Índices obtenidos bajo el procesamiento de imágenes de satélite

El índice diferencial de la vegetación normalizado (NDVI) es obtenido de la integración de las bandas del infrarrojo cercano y los del infrarrojo de onda corta que, por sus propiedades, puede ser usado para estimar la humedad de la cobertura de estudio (Gaitán y Donaldo-Bran y Azcona, 2015). Por otra parte, este índice está relacionado con diferentes factores, tales como el contenido de clorofila en la vegetación y la radiación fotosintética absorbida por la planta, por lo que en ausencia de cualquier cobertura vegetal la temperatura ambiente será más alta (Novillo, Pellegrini, Chamorro, Bezus y Golik, 2016).

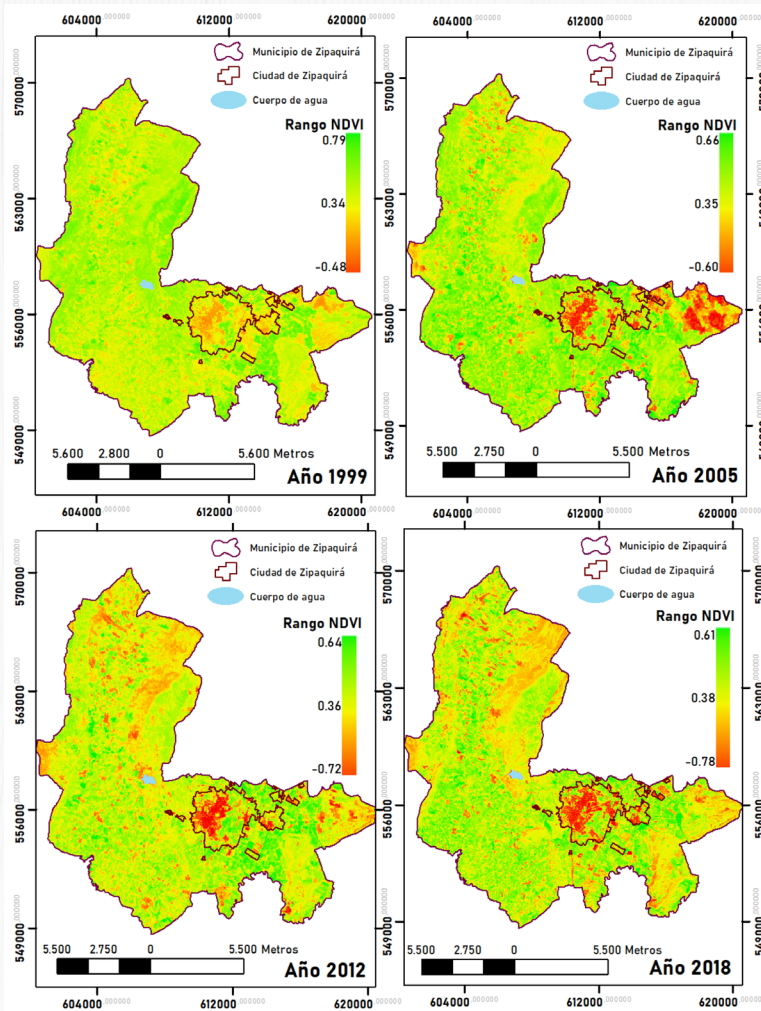
Los valores de este índice varían entre un rango de -1 hasta +1, donde los valores más cercanos a +1 son los que reflejan mayor vigor vegetal, por lo cual, el proceso de obtención del índice permite separar con facilidad áreas que no posean cobertura vegetal y así relacionarlas con el índice de diferencia normalizada edificada (NDBI).

Las gráficas de la figura 9 representan el registro del NDVI de las imágenes que mostraban menor nubosidad sobre su territorio en los veinte años de análisis —1999, 2005, 2012 y 2018—. Cabe aclarar que el rango del NDVI no corresponde a la misma escala en los años presentados en la figura 9. Esto obedece a que para cada uno de dichos años la variabilidad en la banda del infrarrojo para el registro de vegetación es diferente —por esta razón, el análisis de este tipo de índices siempre oscilará entre -1 a +1, según las condiciones que registren las bandas del infrarrojo en cada imagen analizada—.



Durante el 2005 se visualiza cómo la intensidad de vegetación disminuye y aumenta el área construida en la cabecera municipal, dado que las áreas más bajas y cercanas al casco urbano que se utilizaban para el cultivo se han consolidado como áreas construidas, convirtiéndose en lo que hoy se conoce como «Barandillas» dentro del municipio —la zona con mayor población de viviendas en la ciudad—. Para el 2012, el valor de $-0,72$ —mínimo valor para este año— demuestra el aumento de área de suelo.

Figura 9. Índices de vegetación NDVI

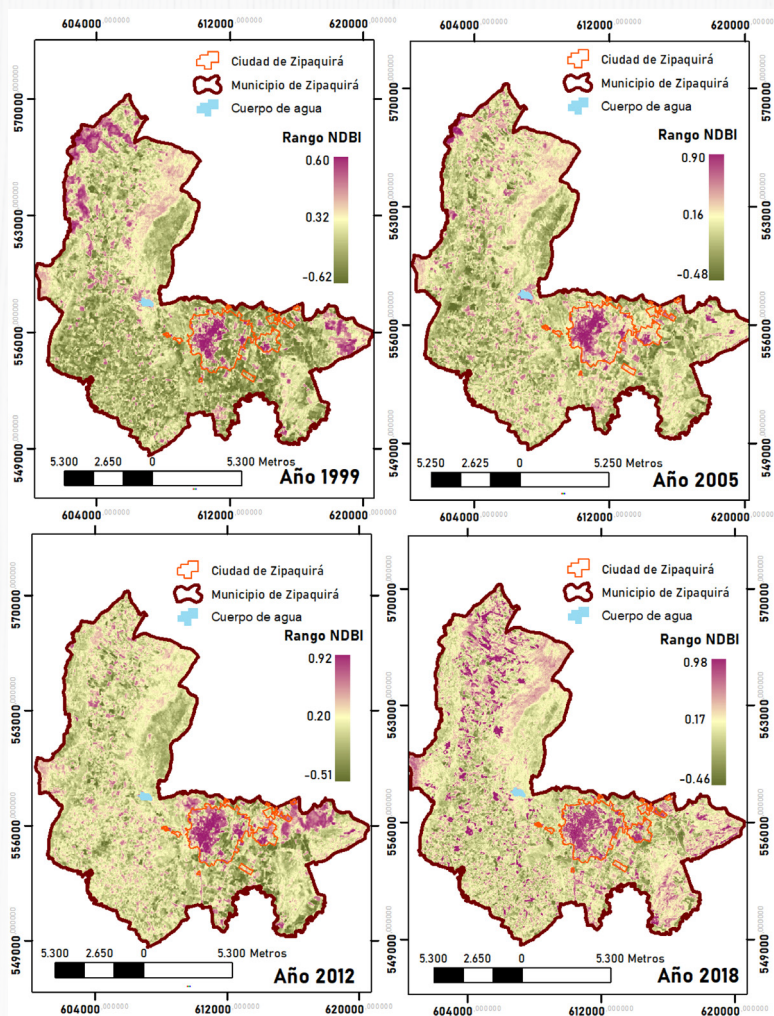


Fuente. Elaboración propia a partir del procesamiento del indicador.



En el 2018, el NDVI tuvo un valor de 0,61, sin embargo, durante estos años se presentó el fenómeno de El Niño, con una intensidad débil, pero que de igual forma pudo generar efectos de estrés en la vegetación, lo que causó disminución de humedad, cambios en la clorofila y, en consecuencia, diferentes valores en la reflectividad con respecto a la banda del infrarrojo de la imagen.

Figura 10. Índices de área construida NDBI



Fuente. Elaboración propia obtenida a partir del procesamiento del indicador.



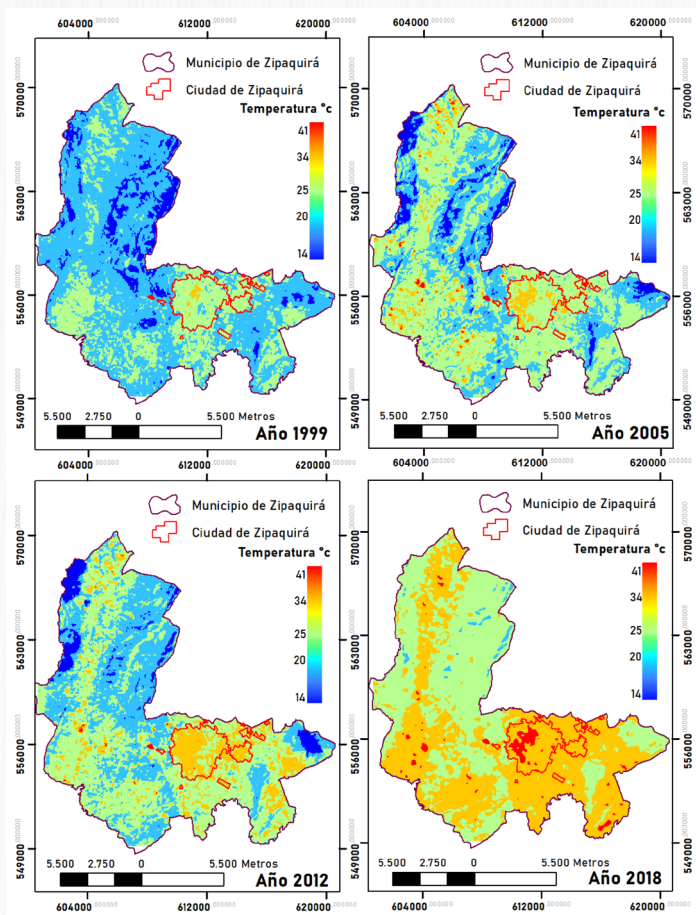
Respecto a la figura 10, se observa el aumento gradual en los valores del índice de diferencia normalizada edificada (NDBI), pues tal como el índice anterior, los rangos varían entre -1 y +1, siendo 1 las zonas que presentan mayores áreas edificadas, es decir, sin cobertura vegetal aparente, por lo que se aprecia con mayor claridad la expansión de las zonas urbanas.

Es posible visualizar una mayor coloración morada en el casco urbano, representando así el inicio del crecimiento significativo del área urbana, pues, según lo reportado en el plan de desarrollo presentado en el periodo 2016-2019 para el municipio, se tenían 10 000 viviendas licenciadas en el año 2006, que no se habían construido, y otras 4000 que ya estaban en proceso de construcción (Alcaldía Municipal de Zipaquirá, 6 de septiembre de 2016). En este sentido, se prevé que el NDBI siga aumentando.

Finalmente, en la figura 11 se presenta el resultado de la estimación de la temperatura superficial terrestre (TST), mediante el uso de las bandas térmicas reportadas por el satélite Landsat. Si bien se observa el incremento de la TST a lo largo del municipio, el mayor registro de temperatura se presenta en el 2018, en la zona que representa el casco urbano de Zipaquirá, y se evidencia en el rango de temperatura que acompaña el mapa con registros aproximados menores a los 34 °C, según el rango de valores de temperatura indicados en la escala de color.

En este sentido, es posible que la presencia de actividades de comercio e industria sobre las áreas urbanas del municipio aporten al aumento de la temperatura por la influencia que tienen las emisiones de la combustión fósil —gas natural, petróleo, *diesel oil*, *fuel oil* y gasolina—. Según el anuario estadístico para Cundinamarca, la actividad empresarial se concentra, principalmente, en los sectores comercio y reparación de vehículos automotores, con una participación del 50 % del total municipal (Gobernación de Cundinamarca, 2010). Al aumentar la concentración de CO₂ en el aire circundante, este actúa como una capa que retiene la energía radiante de los objetos; si a esto se le suma el efecto albedo que producen los materiales urbanos, es razonable ese aumento de la TST en las zonas urbanas del municipio y sus periferias.



Figura 11. Temperatura superficial terrestre

Fuente. Elaboración propia obtenida a partir del procesamiento del indicador.

Conocer la temperatura de la superficie terrestre a partir de datos obtenidos mediante teledetección es clave para el análisis de aspectos tales como el balance energético e hídrico en la superficie terrestre. Así mismo, la estimación de la TST a partir de imágenes de satélite comprende varias etapas de preprocesamiento que incluyen la corrección de los efectos atmosféricos y la estimación de la emisividad térmica de la superficie, pues dicha emisividad, que es la relación entre la emisión de la superficie y la emisión de un cuerpo negro a la misma temperatura termodinámica —o cinética— (Norman y Becker, 1995), podría inferir en el registro real de la temperatura ambiente. Por esta razón es necesario generar dicha corrección sobre la información



detectada en las bandas térmicas del sensor. Estos ajustes realizados ratifican que dicha variabilidad térmica se hace más evidente en las zonas urbanizadas con baja cobertura vegetal.

5. Conclusiones

Con el análisis de la información meteorológica como factor que aporta en la variabilidad térmica se evidenciaron considerables vacíos en la información de las redes de monitoreo del Ideam para el área de estudio. De esta forma, y a pesar de los avances que se han presentado en nuestro país con respecto a las redes de monitoreo, es compleja la generación de estudios académicos con información mayor a diez años que tengan datos confiables de las estaciones. Sin embargo, los repositorios históricos de las imágenes de satélite y sus rangos espectrales especializados para el monitoreo de temperatura —por ejemplo— apoyan mucho el complemento de estos vacíos de información.

En el análisis de los factores que intervienen en la variabilidad térmica fue posible identificar la relación entre el aumento del área urbanizada que se percibe en las imágenes de satélite y el aumento de la temperatura superficial, no solo porque reporta una menor cobertura vegetal en el índice NDVI, sino también porque puede estar ligado al crecimiento de las actividades urbanas y empresariales que, en su mayoría, se generan bajo procesos de combustión fósil.

El registro de coberturas antrópicas, especialmente las que representan áreas urbanizadas, ha sido otro factor identificado como influyente en la variabilidad térmica de superficie, ya que al presentar un albedo bajo —véase el índice NDBI— influye directamente en el registro de temperatura. Esto se manifiesta en las zonas con uso de suelo para actividades residenciales, industriales y de comercio, así como en el mapa térmico para el año 2018 se observó un registro elevado en la temperatura de las zonas específicas con alta concentración de edificaciones; además, se pudo identificar el aumento de la temperatura en zonas aledañas al perímetro urbano, donde se generaron proyectos de construcción.





Fue posible también identificar que la distribución espacial de la TST está estrechamente relacionada con la disminución de la cobertura vegetal —determinado como otro factor de variabilidad térmica—, mientras la cobertura disminuye, tal como se muestra en los valores del NDVI, de modo que se presenta una correlación en el aumento de la TST. Esto no solo se evidenció en el casco urbano del municipio, sino también en otras zonas del municipio que por los usos intensos de uso del suelo no poseen cobertura vegetal aparente —existencia de suelo desnudo visible desde la imagen de satélite, posiblemente asociado tanto a procesos erosivos como a la expansión de la frontera agrícola—.

Para el desarrollo del geoproceso metodológico planteado, se diseñó un proceso semiautomatizado en Model Builder presentado en el numeral 4.2, lo cual permitió una optimización de tiempo de, aproximadamente, 10 minutos por imagen. Tan solo en el proceso de cálculo de la temperatura para un año específico se obtuvieron ocho imágenes de parámetros previos necesarios para la creación de la imagen final; en este caso transcurrieron, aproximadamente, 20 minutos de análisis manual, mientras con el Model Builder hubo una optimización del 50 % del tiempo por año de estudio.

Referencias

Alcaldía Municipal de Zipaquirá. (06 de septiembre de 2016). *Plan de Desarrollo Zipaquirá Nuestra*. Recuperado de <https://bit.ly/3q45n49>

Chander, G.; Markham, B. L.; Helder, D. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE. (2010). Censo General 2005. *Proyecciones de población municipal por área. Perfil, Zipaquirá*. Recuperado de http://biblioteca.dane.gov.co/biblioteca/PERFIL_PDF_2005

Fernández-García, F. (1996). *Manual de climatología aplicada. clima, medio ambiente y planificación*. Madrid: Síntesis.



- Forero, L. V.; Castañeda-Rodríguez, C. C. (2013). *Estudio del crecimiento urbano con respecto al efecto isla de calor para establecer Lineamientos de Gestión Energético Ambiental en Bogotá*. Ponencia presentada en Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013). Cancún, México, 13-14 de agosto.
- Gaitán, J.; Donaldo-Bran, D.; Azcona, C. (2015). Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y limitaciones. *AgriScientia*, 32(2), 83-93. DOI: <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v32.n2.16559>
- García, L. (06 de septiembre de 2018). Islas de calor, un fenómeno de las ciudades. *Ciencia UNAM*. Recuperado de <https://bit.ly/34KqMle>
- García, P. E.; Dieguez, M. C. (2014). Vulnerability of Patagonian planktonic copepods to fluctuations in temperature and UV radiation. *Crustaceana*, 87(3), 291-304. DOI: <https://doi.org/10.1163/15685403-00003288>
- Gobernación de Cundinamarca. (2010). *Anuarios Estadísticos Cundinamarca*. Recuperado de <https://bit.ly/35Qkszy>
- Islas de calor, un fenómeno de las ciudades. (06 de septiembre de 2018). *Ciencia UNAM*. Recuperado de <https://bit.ly/3MSqjoA>
- Jacobson, M. Z. (2005). *Fundamentals of atmospheric modeling* (2a ed.). Nueva York: Cambridge University. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139165389>
- Martín, G. M. (2015). *Protocolo para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre a partir de los datos Landsat y MODIS*. La Habana: Instituto de geografía Tropical. Recuperado de <https://bit.ly/3ugjODF>
- Norman, J.; Becker, F. (1995). Agricultural and forest meteorology. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Remote Sensing Reviews*, 77(3-4), 153-166. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02259-Z](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02259-Z)
- Novillo, B. V.; Pellegrini, A.; Chamorro, A. M.; Bezus, R.; Golik, S. I. (2016). *Efecto de la cobertura vegetal sobre la temperatura del suelo*. En XVI Reunión Argentina y VIII Latinoamericana de Agrometeorología de Agrometeorología. Puerto Madryn, Argentina, 20-23 de septiembre. Recuperado de <https://bit.ly/3t7kxYi>





- Pérez, P. A. (2010). *Sensoramiento remoto de imágenes satelitales* (Tesis de grado). Universidad de Magallanes. Punta Arenas, Chile. Recuperado de <https://bit.ly/3q5Fv7P>
- Raffo, D. (2014). La radiación solar y las plantas: un delicado equilibrio. *Revista Fruticultura & Diversificación*, (74), 40-44. Recuperado de <https://bit.ly/3t7ktl2>
- Riaño, D.; Salas, J.; Chuvieco, E. (septiembre de 2000). Corrección atmosférica y topográfica, información multi-temporal y auxiliar aplicadas a la cartografía de modelos de combustibles con imágenes Landsat-TM. 2020. En I. Aguado y M. Gómez (eds.) *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*. (222-239). Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá.
- Sánchez, J. A. (2014). Análisis de la respuesta del Estado colombiano frente al Fenómeno de La Niña 2010-2011: el caso de Santa Lucía. *Documentos de Trabajo sobre Economía Regional*, (106). Recuperado de <https://bit.ly/3u0TIV3>
- Urriza, G. (2018). *Expansión urbana en ciudades intermedias de crecimiento demográfico bajo: el caso de Bahía Blanca, Argentina*. X Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo. Barcelona, España, junio. DOI: <https://doi.org/10.5821/siiu.9151>
- USGS. (2019). *Using the USGS Landsat Level-1 Data Product*. Recuperado de <https://on.doi.gov/3waUMrU>