

Análisis espacio-temporal de indicadores de temperatura superficial como forma de evaluar áreas con preservación forestal

Spatio-temporal analysis of surface temperature indicators as a way of evaluating areas with forest preservation

Análise espaço-temporal de indicadores de temperatura superficial como forma de avaliar áreas com preservação florestal

Arthur Pereira dos Santos¹
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil

Henzo Henrique Simionatto²
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil

Mayra Vannessa Lizcano Toledo³
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil

Liliane Moreira Nery⁴
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil

Darllan Collins da Cunha e Silva⁵
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil

- 1 Doctorando en Ciencias Ambientales – Universidad Estatal Paulista (UNESP), Instituto de Ciencia y Tecnología, Sorocaba, São Paulo, Brasil.  arthur.p.santos@unesp.br. ORCID:  <https://orcid.org/0000-0002-1913-3562>
- 2 Doctorando en Ciencias Ambientales – Universidad Estatal Paulista (UNESP), Instituto de Ciencia y Tecnología, Sorocaba, São Paulo, Brasil.  henzo.h.simionatto@unesp.br. ORCID:  <https://orcid.org/0000-0002-3936-7905>
- 3 Doctorando en Ciencias Ambientales – Universidad Estatal Paulista (UNESP), Instituto de Ciencia y Tecnología, Sorocaba, São Paulo, Brasil.  mayra.lizcano@unesp.br. ORCID:  <https://orcid.org/0000-0002-4092-183>
- 4 Doctorando en Ciencias Ambientales – Universidad Estatal Paulista (UNESP), Instituto de Ciencia y Tecnología, Sorocaba, São Paulo, Brasil.  liliane.nery@unesp.br. ORCID:  <https://orcid.org/0000-0002-5352-5316>
- 5 Profesor del Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales – Universidad Estatal Paulista (UNESP), Instituto de Ciencia y Tecnología, Sorocaba, São Paulo, Brasil.  darllan.collins@unesp.br. ORCID:  <https://orcid.org/0000-0003-3280-0478>



Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la variación de la Temperatura Superficial Terrestre (LST) y del Índice de Sequedad Térmica (TVDI) en la sub-cuenca hidrográfica que abastece al municipio de Paracatu, Brasil, y al Parque Estatal de Paracatu, ubicado en el interior de la cuenca y creado para preservar el bioma cerrado, restringido actividades agrícolas y garantizando los recursos hídricos para el abastecimiento público local. Fueron utilizadas imágenes de los satélites Landsat 5 y 8, cuyos resultados indican que los cambios en el uso del suelo están contribuyendo al estrés hídrico de la vegetación allí presente, y el comportamiento espacial de la LST y TVDI indica que la creación del Parque fue una práctica eficiente en la preservación del bioma, concluyendo que son indicadores oportunos para el monitoreo y gestión de organismos públicos para monitorear actividades humanas.

Palabras clave: Cambios en el uso del suelo, TVDI, LST, estrés hídrico, preservación del bioma.



Abstract

This article aims to analyze the variation of the Soil Surface Temperature (LST) and the Thermal Dryness Index (TVDI) in the hydrographic sub-basin that supplies the municipality of Paracatu, Brazil, and the Paracatu State Park, located in the interior of the basin and created to preserve the cerrado biome, restrict agricultural activities and guarantee water resources for local public supply. Images from the Landsat 5 and 8 satellites were used, whose results indicate that changes in land use are contributing to the water stress of the vegetation present there, and the spatial behavior of LST and TVDI indicates that the creation of the Park was an efficient practice in the preservation of the biome, concluding that they are timely indicators for the monitoring and management of public agencies to monitor human activities.

Keywords: Changes in the use of soil, TVDI, LST, water stress, bioma preservation.



Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar a variação da Temperatura da Superfície Terrestre (TST) e do Índice de Seca Térmica (TVDI) na sub-bacia hidrográfica que abastece o município de Paracatu, Brasil, e o Parque Estadual de Paracatu, localizado no interior da bacia e criado para preservar o bioma fechado, restringindo as atividades agrícolas e garantindo recursos hídricos para abastecimento público local. Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 e 8, cujos resultados indicam que as mudanças no uso do solo estão contribuindo para o estresse hídrico da vegetação ali presente, e o comportamento espacial do LST e TVDI indica que a criação do Parque foi uma prática eficiente na preservação do bioma, concluindo que são indicadores oportunos para o monitoramento e gestão dos órgãos públicos de monitoramento das atividades humanas.

Palavras-chave: Mudanças no uso da terra, TVDI, LST, estresse hídrico, preservação de biomas.

Introducción

Según [Bôas y Lima \(2022\)](#) y [Souza \(2024\)](#), el contexto histórico que implica la formación de áreas protegidas en Brasil está marcado con el objetivo de conservar áreas que preserven la biodiversidad, los recursos naturales y los ecosistemas, garantizando la preservación de la flora y fauna, además de proteger áreas de relevancia ambiental, cultural y científica, ya que desempeñan un papel crucial en la sustentabilidad del equilibrio ecológico, promoción del desarrollo sostenible y mitigación de los impactos negativos, producto de actividades antrópicas, en el ambiente.

Dicha preservación, exponen [Parra-Sanchez y Banks-Leite \(2020\)](#), se extiende para los diferentes biomas brasileños, ya que, considerando el desarrollo agropecuario del país, existe la necesidad de implementar diversas prácticas de preservación ambiental en área estratégicas, con el fin de proteger los recursos naturales, considerando que las áreas destinadas para cultivos agrícolas en el país aumentaron 41,9 millones de ha en los últimos 37 años, pasando de una extensión de 19,1 millones en 1985 a 61 millones en 2022, esto según [Da Silva \(2023\)](#) y [MAPBIOMAS \(2023\)](#).

En este sentido, [Hunke et al. \(2015\)](#) señalan que el Cerrado brasileño ha presenciado una expansión significativa de la frontera agrícola, acompañada por una acelerada degradación, incluido la conversión de áreas naturales en tierras de cultivos, deforestación, pérdida de diversidad biológica y degradación del suelo, puesto que es el bioma de mayor extensión agrícola del país, concentrando la mitad de los cultivos nacionales de soja de acuerdo con [MAPBIOMAS \(2023\)](#).

[Klink et al. \(2020\)](#) y [Cunha y Bravo \(2022\)](#) señalan que, en consecuencia a lo mencionado, el Cerrado es uno de los biomas con mayor pérdida de áreas conservadas de Brasil. Así mismo, [Latrubesse et al. \(2019\)](#), [Souza Jr. et al. \(2020\)](#) y [Cunha y Bravo \(2022\)](#) explican que, aunque la biodiversidad del país componga el 5% del total mundial y que el bioma represente el 19% del potencial hídrico de Brasil, menos del 10% de sus áreas se encuentran protegidas por Unidades de Conservación (UCs), lo cual representa un valor menor al 2% del total de áreas protegidas de país.

En adición, esta situación se ve agravada cuando se trata de áreas que son responsables por el abastecimiento de una ciudad, como es el caso de la sub-cuenca hidrográfica de captación de agua del Ribeirão Santa Isabel, manantial responsable del abastecimiento público del municipio de Paracatu,

Minas Gerais, que cuenta con aproximadamente 94 mil habitantes según el IBGE (2024). En este contexto fue creada una Unidad de Preservación Integral (UCI), denominada Parque Estatal de Paracatu, con el objetivo de proteger el bioma cerrado y restringir la actividad agropecuaria, garantizando así la sostenibilidad de los recursos hídricos necesarios para el abastecimiento público, esto estipulado por el IEF (2011) y Malav (2022).

De igual forma, existen otros factores que causan conflicto sobre el uso del agua en el área, en donde la mayoría no están relacionados con la escasez, sino con la ineficacia e insuficiencia de la gestión de conflictos de recursos hídricos; el Instituto Minero de Gestión de Aguas (IGAM) declaró la sub-cuenca hidrográfica del Ribeirão Santa Isabel y sus sub-cuencas como Área de Conflicto (DAC) en cumplimiento a la solicitud del Ministerio Público de Minas Gerais (MPMG) según el ZAP (2018). Además, Costa *et al.* (2021) señalan que en el municipio las licencias concedidas para consumo humano, abrevaderos de animales y otros usos se consideran insignificantes en comparación con las concedidas para irrigación.

En consideración a lo mencionado, y tomando en cuenta lo estipulado por Martins y Galvani (2020), Saha *et al.* (2021) y Ullah *et al.* (2023), el presente trabajo se justifica en el hecho de que el uso y la cobertura del suelo son fundamentales en la regulación del ciclo del agua, y los cambios en su uso influyen directamente en el balance de radiación y en la alteración de los parámetros biofísicos: albedo, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) y *Land Surface Temperature* (LST).

Por otro lado, Yuan *et al.* (2020), Zhao *et al.* (2021) y Martins *et al.* (2022) afirman que se desconoce el efecto real que la creación del Parque Estatal de Paracatu generó en la condición hídrica de la vegetación presente en la sub-cuenca hidrográfica, pudiendo esta ser obtenida por medio del uso de técnicas del Sistema de Información Geográfica (SIG) y geoprocetamiento, la cual es representada en la literatura por el parámetro *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI), que está estrechamente relacionado con las variaciones del uso del suelo y, consecuentemente, con la LST.

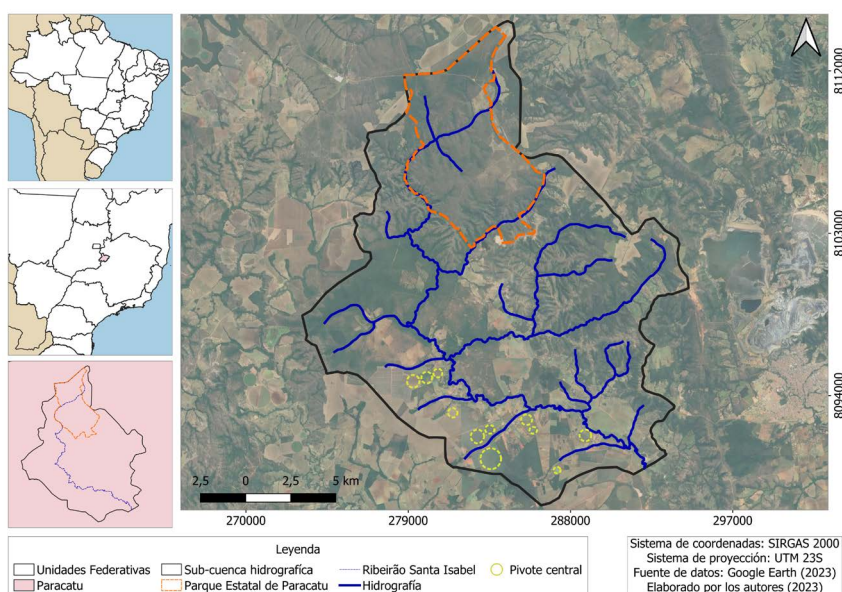
Ante lo expuesto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la variación de la LST e del TVDI, para los años 2005 y 2020, en la cuenca hidrográfica del Ribeirão Santa Isabel, responsable por el abastecimiento público de agua para la ciudad de Paracatu, en Brasil; así como evaluar las

alteraciones espacio-temporales de los indicadores tras la implementación del Parque Estatal de Paracatu, localizado en la sub-cuenca hidrográfica.

Área de estudio

La sub-cuenca hidrográfica del Ribeirão Santa Isabel (Figura 1) se encuentra en la Unidad de Planeamiento y Gestión de Recursos Hídricos del Rio Paracatu (UPGRH SF7), la cual está localizada, en su totalidad, en el municipio de Paracatu, Minas Gerais, Brasil.

Figura 1. Área de estudio



Elaboración propia

Actualmente, existe una alta demanda hídrica en la sub-cuenca para el riego de extensas áreas con pivotes centrales de irrigación, de forma que, la [Zonificación Ambiental Productiva \(ZAP\) \(2018\)](#), documento que analiza el territorio de forma detallada, considerando los aspectos productivos, económicos y ambientales, que busca orientar o planeamiento del uso conservacionista de los recursos naturales en una determinada sub-cuenca hidrográfica; identifico que aproximadamente el 2% de los pivotes de irrigación están ubicados en una área específica.

Vale resaltar que esta situación representa una visión incompatible con la realidad de área de estudio, ya que, existen captaciones observadas en visitas de campo que no se encuentran en la base del Sistema Integrado de Información Ambiental (SIAM) según la [ZAP \(2018\)](#). En respuesta a esto, el [IEF \(2011\)](#) indica que fue creado el Parque Estatal de Paracatu, siendo considerado una técnica de preservación ambiental que busca garantizar los recursos hídricos necesarios para el abastecimiento del agua en la ciudad de Paracatu, así como la biodiversidad del área; proporcionando corredores ecológicos y refugio para la fauna local.

Según [Álvares et al. \(2014\)](#), el clima que predomina en la sub-cuenca hidrográfica del Ribeirão Santa Isabel es el tropical del tipo Aw, de acuerdo con la clasificación de [Köppen \(1931\)](#), contando con invierno seco (mayo – octubre) y verano lluvioso (noviembre – abril), con una temperatura media de 23,1°C y precipitación media de 1305 mm/año, en donde los meses de mayor y menor precipitación son julio y diciembre, respectivamente.

Ya en cuestión a los tipos de suelo presente en el área, [Santos et al. \(2018\)](#) señalan que el Sistema Brasileño de Clasificación de Suelos (SiBCS) identificó la presencia de las clases Cambisoles mixtos, Latosoles rojos, Latosoles rojo-amarillos, Neosoles fluidos y Neosoles litólicos.

Elección del período analizado y obtención de los datos

La elección del período de las imágenes fue basada en la disponibilidad de los datos y ocurrencias de los fenómenos climáticos El Niño y La Niña, anomalías que según [Duarte y Ribeira \(2023\)](#), modifican la interacción entre el océano y la atmosfera afectando a diferentes regiones en Brasil, modificando el sistema climático, de acuerdo con lo establecido por [Correia-Filho et al. \(2022\)](#) y [Santos et al. \(2022\)](#).

También se optó por dos fechas distintas, siendo una de ellas anterior a la implementación decreto estatal de la implementación del parque ([Decreto nº 45.567/2011 de 22/03/2011](#)) y una fecha posterior, de tal forma que fuese posible verificar, temporalmente, la posible efectividad de la práctica de preservación, así como los efectos en el área de Brasil (2011).

Debido a la resolución temporal del satélite Landsat, en conjunto a la posible presencia de nubes en periodos de lluvia, varios estudios similares, como los de [Govind y Ramesh \(2019\)](#) y [Carrasco et al. \(2020\)](#), utilizaron análisis temporales de datos, principalmente la determinación de la LST, en donde

generalmente, fue utilizada solo una imagen para representar un determinado periodo. En el presente estudio se optó por utilizar 2 imágenes satelitales para cada año (2005 y 2020), con el objetivo de representar, con mayor efectividad, el comportamiento espectral de los parámetros analizados.

El estudio realizado [Xu et al. \(2023\)](#) enfatiza como las imágenes Landsat son ampliamente utilizadas para la estimación de evaluaciones de la LST, por lo que, para mitigar las variaciones temporales, el presente estudio, utilizó la media entre las imágenes escogidas de la base de datos de la *United States Geological Survey* (USGS) (Tabla 1), para representar, con mayor efectividad, el comportamiento de la LST e del TVDI para los años 2005 y 2020.

Tabla 1. Fechas de las imágenes utilizadas

Año	Imagen 1	Imagen 2	Imagen representativa del año
2005 (Landsat-5)	30/06	01/08	Média de la imagen 1 e imagen 2
2020 (Landsat-8)	05/09	12/09	Média de la imagen 1 e imagen 2

Elaboración propia

Una vez seleccionadas, fueron seleccionadas aquellas imágenes con menor presencia de nubes en el área de estudio y que pertenecieran a la misma estación del año, esto con el fin de estandarizar el comportamiento de los parámetros analizados. Posteriormente, fue utilizado el proceso de *Resampling* y *Reducing Resolution*, con la técnica de vecino más próximo, utilizando el software QGIS 3.2.12, estandarizando los pixeles, buscando la uniformidad de la resolución espacial de los satélites (30m), puesto que presentan discrepancias en la misma para la banda termal, siendo esta de 120 metros en el caso de satélite Landsat 5 y 100 metros para Landsat 8.

Obtención, extracción y análisis de la LST y del TVDI

Para el cálculo de la LST (Ecuación 1), los números digitales de la imagen se convirtieron a unidades de radiancia, tal y como es recomendado en la metodología propuesta por el [USGS \(2023\)](#).

Ecuación 1.

$$T = \left(\frac{K2}{\ln \left(\left(\frac{K1}{ML * Q_{cal} + AL} \right) + 1 \right)} \right) - 273.15 \quad (1)$$

Leyenda: ML= Factor multiplicativo de redimensionamiento de la banda termal*, AL= Factor de redimensionamiento adictivo específico de la banda termal*, Qcal = Valor calibrado cuantificado por el píxel en DN, T= temperatura en Celsius, K2 = constante de calibración 2* y K1 = constante de calibración 1*. *Valores empleados en el procesamiento de las imágenes (extraído del archivo de metadatos).

Para la imagen Landsat-8, se adicionó el valor de -0,29 a los valores de radiancia de cada píxel de la imagen, conforme a la recomendación del [USGS \(2016\)](#). Este ajuste corrige el error de luz dispersa, estimado en 0,29 W/m²/sr/μm. Además, el [USGS \(2016\)](#) recomienda el uso de la banda 10 durante la estimativa de la temperatura para minimizar la interferencia, la cual ocurre con mayor intensidad en la banda 11 (0,51 W/m²/sr/ μm).

Posteriormente, fue utilizada una máscara a escala 1:50.000 que representase la cuenca hidrográfica analizada, la cual fue obtenida de la secretaria del Medio Ambiente del municipio de Paracatu y una máscara para el Parque Estatal de Paracatu, obtenida en la plataforma de Registro Nacional de Unidades de Conservación del Ministerio de Medio Ambiente.

Para el monitoreo de las condiciones hídricas de la vegetación, se utilizó el TVDI propuesto por [Sandholt et al. \(2002\)](#), en donde fueron aplicados los ajustes propuestos por [Zare et al. \(2019\)](#), visualizados en la Ecuación 2.

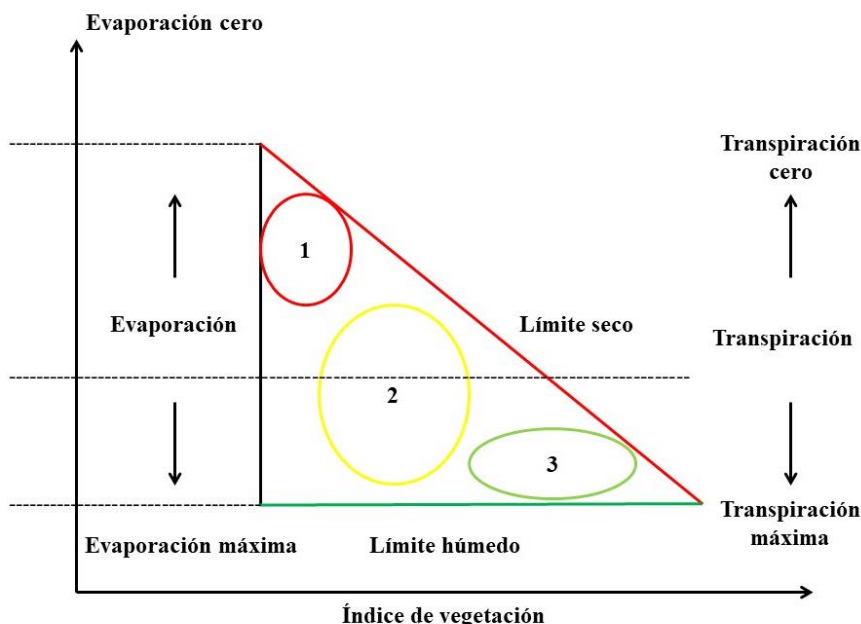
Ecuación 2.

$$TVDI = TS - TSMIN \ a + bNDVI - TSmin \quad (2)$$

Leyenda: TS corresponde a la LST del píxel, TSMIN es la LST mínima del triángulo, definiendo el límite húmedo, NDVI es el índice de vegetación estimado; a y b son parámetros que definen el límite seco modelado como

ajuste linear de los datos ($TSMAX=a+bNDVI$), en donde: TSMAX es la observación máxima de la LST para un determinado NDVI. Los parámetros a y b son estimados con base en píxeles de un área lo suficientemente extensa como para representar la condición hídrica de la vegetación que se encuentra en el área, tal y como es expuesto por [Sandholt et al. \(2002\)](#).

Figura 2. Diagrama Triangular Evaporativo del TVDI



De los cuales: 1 (suelo expuesto); 2 (cobertura parcial); y 3 (suelo con vegetación)

Elaboración propia con base al [Martins et al. \(2022\)](#); [Sandholt et al. \(2002\)](#).

Una vez realizados los cálculos, los datos pasaron por un proceso de validación, siendo esta realizada por medio del conocimiento previo del área de estudio; en donde se resalta que, ante los dos años analizados en el presente estudio (2005 y 2020), no fue posible realizar la validación *in situ*. Sin embargo, la validación fue de manera visual con ayuda de profesionales que trabajan en el Parque Estatal y, también con colaboradores de la secretaria de medio ambiente del Ayuntamiento Municipal de Paracatu.

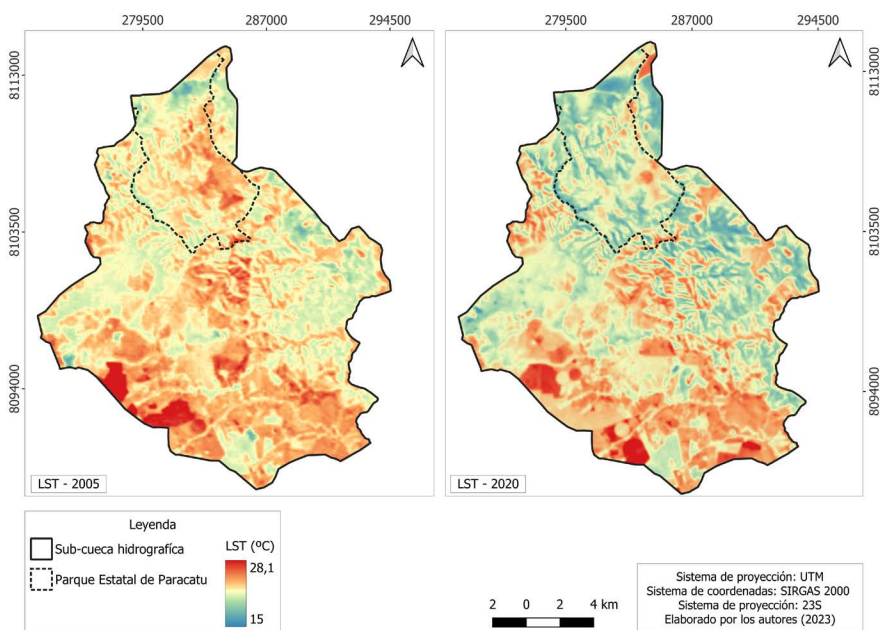
Para esto, fueron utilizadas imágenes históricas del software Google Earth v. 7.3.6 e imágenes satelitales a color Landsat 5 y Landsat 8, para los

respectivos años analizados, esto posibilitó que los colaboradores pudiesen verificar la realidad actual del área de estudio del periodo analizado y los resultados obtenidos a través de los parámetros utilizados.

Resultados y Discusión

Los resultados de la variación temporal de la LST en el área de estudio son presentados en la Figura 3, en donde es posible verificar la variación de la LST en °C para la sub-cuenca de captación del Ribeirão Santa Isabel y del Parque Estatal de Paracatu.

Figura 3. Variación espacial (2005 y 2020) de la LST en el área de estudio

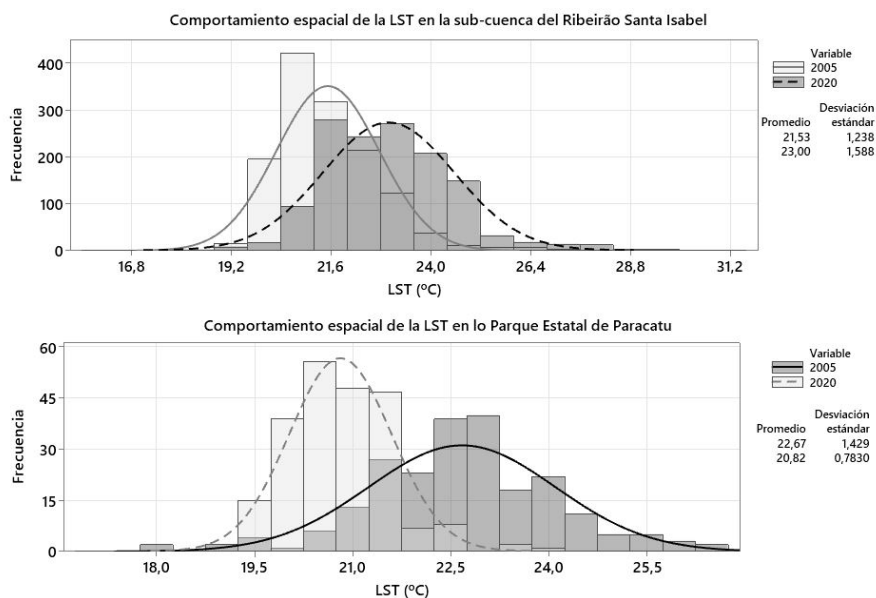


Elaboración propia.

El comportamiento de la variación espacio-temporal de la LST para los años de 2005 y 2020, son presentados en la Figura 4, en donde es posible verificar los resultados para la sub-cuenca de captación de Ribeirão Santa Isabel y en el Parque Estatal de Paracatu, demostrando la importancia de esta UCI para el control del microclima y, consecuentemente,

colaborando para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos para abastecimiento público de agua en el área de estudio.

Figura 4. Comportamiento espacial (2005 y 2020) de la LST



Elaboración propia.

No obstante, al comparar el comportamiento de la LST en el área de estudio, es identificado que la media de este parámetro tuvo un incremento de $1,47^{\circ}\text{C}$ en el interior de la sub-cuenca hidrográfica, mientras que, en el Parque Estatal presento un comportamiento opuesto, con una disminución de $1,85^{\circ}\text{C}$, evidenciando que la vegetación, independientemente del tamaño del área, es un factor determinante de las condiciones climáticas locales, así como es demostrado por [Chen et al. \(2022\)](#), [Kaiser et al. \(2022\)](#), [Yao et al. \(2022\)](#), [Algretawee \(2022\)](#), [Santos et al. \(2024\)](#).

El mismo patrón fue observado al analizar la LST máxima de las áreas, como se muestra en la Tabla 2. Sin embargo, en relación con la LST mínima, esta tendencia no se mantuvo, lo cual puede estar relacionado con la presencia de nuevas áreas verdes en las proximidades de la UCI. Esto se contempla en el estudio de [Santos et al. \(2023\)](#) que analiza las variaciones del uso y ocupación del suelo para esta sub-cuenca

hidrográfica entre 1990 y 2020, lo que también es un efecto positivo de la práctica de preservación, dado el aumento de las inspecciones de los órganos ambientales en las inmediaciones.

Tabla 2. Variación de la LST máxima y mínima em el área de estudio

Variación de la LST máxima del área de estudio			
	2005 (°C)	2020 (°C)	Variación (°C)
sub-cuenca hidrográfica	27,78	30,20	+ 2,42
Parque Estatal de Paracatu	26,46	24,08	- 2,38
Variación de la LST mínima del área de estudio			
	2005 (°C)	2020 (°C)	Variación (°C)
Cuenca hidrográfica	19,27	18,83	- 0,44
Parque Estatal de Paracatu	18,86	19,26	+ 0,4

Elaboración propia.

En lo que respecta al incremento de la LST media en la sub-cuenca de captación, se encuentra el valor de 0,098°C por año analizado, bajo un presunto cambio gradual durante los 15 años analizados. Un resultado similar fue encontrado también por [Alemu \(2019\)](#), el cual verificó un incremento de 0,081°C en la serie temporal en la cuenca hidrográfica de Andassa, que forma parte de la cuenca del Nilo Azul de Etiopía, evidenciando la validez del método.

Contrariamente a lo anterior, el área UCI presentó una disminución de aproximadamente 0,16°C por año. Este escenario indica que la implementación del Parque Estatal de Paracatu, considerado como una práctica de preservación por el [Instituto Estatal de Florestas \(2011\)](#), obtuvo resultados positivos en el confort térmico del área, actuando como agente reductor de las altas temperaturas y presentando condiciones micro climáticas favorables, conforme observado por [Paixão et al. \(2020\)](#), al encontrarse aguas arriba de la sub-cuenca hidrográfica.

El aumento temporal de la LST media, mínima y máxima en el área externa del Parque Estatal de Paracatu indica que se presentó, durante el intervalo de 15 años, una intensificación en la degradación de la vegetación del área, con un incremento de áreas de pastoreo y diferentes tipos de cultivos como soja y café, los cuales provocaron cambios en su LST. Vale la pena destacar que, por más que el presente estudio no haya analizado los cambios en el uso y ocupación del suelo en el área de estudio, la LST es un

parámetro que se encuentra correlacionado con dichas alteraciones, esto es demostrado en estudios como el de Wang *et al.* (2018), Alemu (2019), Kaiser *et al.* (2022) y por Njoku y Tenenbaum (2022), en donde fue encontrado que la LST aumenta de acuerdo con la intensificación de la supresión de la vegetación natural para la implementación de actividades antrópicas.

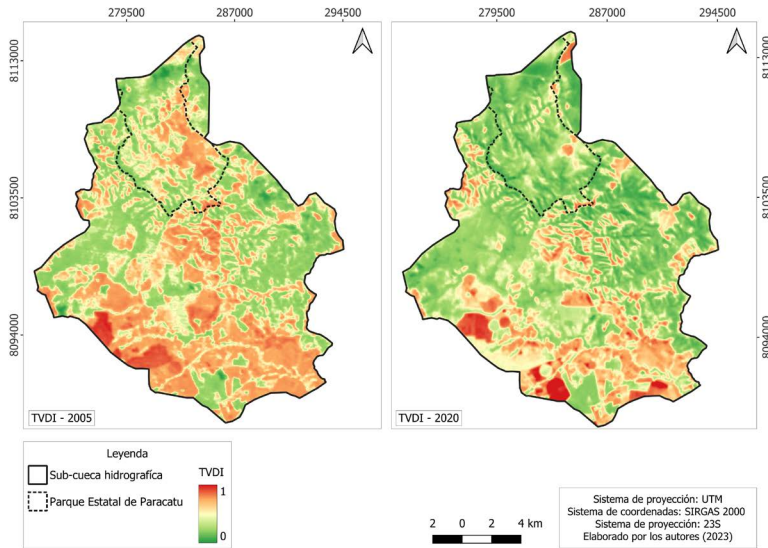
Además, Santos *et al.* (2023) verifican la interferencia de los cambios del uso del suelo en la variación de la LST de la sub-cuenca, siendo estos cambios, correlacionados con las variaciones de la LST. Sin embargo, los autores no analizaron la interferencia de la práctica de preservación ambiental (Parque Estatal de Paracatu) en el área; de esta forma, el estudio es complementado a los resultados obtenidos por los autores.

Según Wang *et al.* (2018) y Dissanayake *et al.* (2019), diversos estudios han demostrado que el mapeo de la LST es un parámetro clave para comprender los impactos del cambio de uso del suelo en el medio ambiente, proporcionando información útil sobre las condiciones de la superficie, tal como lo estipulan Govind y Ramesh (2019) y Santos y Simionatto (2023), y ayudando a comprender los parámetros correlacionados con las condiciones ambientales. En el presente estudio, por más que no haya sido realizado ningún tipo de análisis temporal del cambio y ocupación del suelo, se cree que es posible vincular esa variación a través de parámetros indirectos y que sean influenciados por este manejo, como la LST y el TVDI.

De esta manera, el escenario presentado en el área de estudio puede convertirse en un parámetro importante a ser evaluado e investigado en las evaluaciones de impacto ambiental de las actividades antrópicas en la región, considerando que, dada la potencial supresión de la vegetación natural para la implantación de estas actividades, sería posible, en el área de estudio, conciliar el desarrollo económico con el bienestar climático, considerando el comportamiento de la LST, para los años 2005 y 2020, en el interior del Parque Estatal y en toda la sub-cuenca hidrográfica.

En este sentido, el uso de índices es extremadamente importante para la evaluación del comportamiento del cambio climático, como el TVDI utilizado para evaluar la variación temporal en el área de estudio, mostrado en la Figura 5.

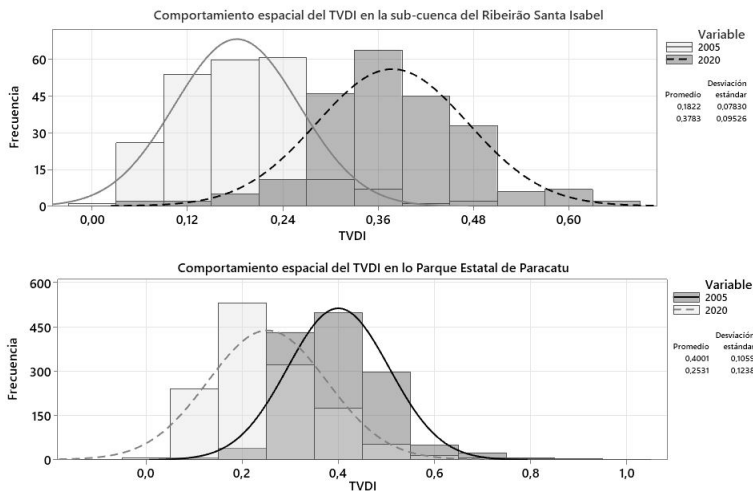
Figura 5. Variación espacial (2005 y 2020) del TVDI en el área de estudio



Elaboración propia.

El comportamiento de la variación espacio-temporal del TVDI para los años 2005 e 2020, son presentados en la Figura 6.

Figura 6. Comportamiento espacial (2005 y 2020) del TVDI



Elaboración propia.

Con respecto al resultado del comportamiento espacio-temporal del TDVI, es posible analizar la situación hídrica de la vegetación presente en el sub-cuenca hidrográfica del Ribeirão Santa Isabel para los años 2005 y 2020, verificándose un desplazamiento de los píxeles a valores próximos a 1 en el último año analizado, lo que representa una tendencia de las condiciones de estrés hídrico del suelo y, que muy probablemente está relacionado con la posible supresión de la vegetación natural por la implantación de actividades antrópicas comunes en la zona, el pastoreo.

Por otro lado, cuando se verifica el comportamiento espacio-temporal de este parámetro en el Parque Estatal de Paracatu, se observa que su comportamiento fue opuesto al presentado por los píxeles de la sub-cuenca, ya que los valores se aproximan de 0, indicando una mejora temporal en las condiciones hídricas del suelo, señalando que la práctica de preservación – implementación del Parque Estatal (IEF, 2011) – ha influido, de forma positiva, en la región analizada.

Con relación al comportamiento espectral del TVDI para los años 2005 y 2020, se observó un aumento de la media del parámetro, durante el intervalo de 15 años, en la sub-cuenca hidrográfica, mientras que, en el Parque Estatal de Paracatu, este valor disminuyó.

Tal situación, analizada con el comportamiento de la variación de la LST en las respectivas áreas, atestigua que la práctica de preservación ambiental está causando un efecto positivo en los aspectos ambientales de la sub-cuenca hidrográfica del Ribeirão Santa Isabel.

Finalmente, cabe destacar que, dados los resultados presentados anteriormente, los Gestores Públicos pueden estudiar acciones para certificar la creación de una nueva UCI, con el fin de garantizar una mayor preservación del área estudiada y la seguridad hídrica de la ciudad de Paracatu, a través del incremento de la vegetación.

Conclusiones

Ante la variación espacio-temporal de la LST y del TVDI, es posible concluir que la implementación del Parque Estatal de Paracatu, creado para conservar las características del bioma cerrado y garantizar los recursos hídricos necesarios para el abastecimiento de agua de la ciudad de Paracatu, está teniendo un efecto positivo en el área, ya que, mientras que la sub-cuenca hidrográfica presento un incremento general en la LST máxima (2,4 °C) durante

el periodo analizado, dentro del Parque Estatal de Paracatu el comportamiento fue opuesto, con una disminución de 2,38°C, presentándose una situación similar en la evaluación del comportamiento de la LST mínima en ambas áreas.

En relación con el TDVI, analizando el comportamiento del índice para los años 2005 y 2020 en la sub-cuenca hidrográfica, se identificó que su distribución espacial permite concluir que existe una tendencia de estrés hídrico en el área, mientras que para el Parque Estatal de Paracatu, los valores son próximos a 0 para el 2020, lo cual indica una mejoría temporal en la condición hídrica dentro del área de conservación ambiental.

Frente a esta perspectiva, se considera que los indicadores analizados en el presente estudio representan instrumentos efectivos de gestión ambiental, cuyos resultados pueden ser base para una mejor toma de decisiones por los organismos públicos y fiscalizadores, al igual que el uso de herramientas de SIG y técnicas de geoprocésamiento utilizadas.

Finalmente, se recomienda la creación de puntos, aquí denominados estratégicos, distribuidos por el perímetro de la sub-cuenca hidrográfica para que, a lo largo de los años, pueda existir una armonía entre las actividades antrópicas presentes en la región y el medio ambiente, teniendo como objetivos la preservación del bioma cerrado, el aumento de la vegetación y, consecuentemente, la disponibilidad hídrica en el área de estudio.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)* - Código de Financiamento 001.

Referencias bibliográficas

- Alemu, M. (2019). Analysis of spatio-temporal land surface temperature and normalized difference vegetation index changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Resources and Ecology*, 10(1), 77-85. <http://dx.doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2019.01.010>
- Algretawee, H. (2022). The effect of graduated urban park size on park cooling island and distance relative to land surface temperature (LST). *Urban Climate*, 45(8), s.p. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101255>.

- Álvares, C.; Stape, J.; Sentelhas, P.; Gonçalves, J.; Sparovek, G. (2014). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(1), 711-728. http://www.dca.iag.usp.br/material/mftandra2/ACA0225/Alvares_etal_Koppen_climate_classBrazil_MeteoZei_2014.pdf
- Bôas, S.; Lima, L. (2022). Áreas protegidas e conflitos socioambientais: desafios às políticas públicas de desenvolvimento na faixa de fronteira do Acre (BR). *Tempo da Ciência*, 29(58), 114-128. <https://e-revista.unioeste.br/index.php/tempodaciencia/article/view/30437/21411>
- Carrasco, R.; Pinheiro, M.; Marcato J.; Cicerelli, R.; Silva, P.; Osco, L.; Ramos, A. (2020). Land use/land cover change dynamics and their effects on land surface temperature in the western region of the state of São Paulo, Brazil. *Regional Environmental Change*, 20(3), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01664-z>.
- Chen, D.; Zhang, F.; Zhang, M.; Meng, Q.; Jim, C.; Shi, J.; Tan, M.; Ma, X. (2022). Landscape and vegetation traits of urban green space can predict local surface temperature. *Science of The Total Environment*, 825(8), s.p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154006>
- Correia-Filho, W.; Oliveira-Júnior, J.; Silva-Júnior, C.; Santiago, D. (2022). Influence of the El Niño–Southern Oscillation and the synoptic systems on the rainfall variability over the Brazilian Cerrado via Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data. *International Journal of Climatology*, 42(6), 3308-3322. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.7417>
- Costa, M.; Vilarinho, C.; Muller, M.; Monte-Mor, R.; Gonçalves, J. (2021). A Geração de Conflitos pelo Uso da Água na Bacia do Rio Paracatu, Noroeste de Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(1): 834-846. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p834-846>.
- Cunha, J.; Bravo, J. (2022). Effects of environmental protection policies on fragile areas of a watershed occupied by agriculture in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Management*, 319(8), s.p. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115695>.
- Da Silva, L.; Rocha, A.; De Souza, C.; Leite, M. (2023). Análise da temperatura de superfície terrestre e variáveis biofísicas em domínios de vegetação do Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, 43(8), s.p. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.181068>

- Decreto n.º 45.567, de 22 de março de 2011. (2011). *Cria o Parque Estadual de. Paracatu, localizado no Município de Paracatu, e dá outras providências*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 22 mar. 2011. <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/45567/2011/>
- Dissanayake, D.; Morimoto, T.; Murayama, Y.; Ranagalage, M. (2019). Impact of landscape structure on the variation of land surface temperature in sub-Saharan region: a case study of Addis Ababa using Landsat data (1986–2016). *Remote Sensing of Environment*, 12(8), 313–329. <https://doi.org/10.3390/su11082257>.
- Dos Santos, A.; Simionatto, H. (2023). Methodological proposal for evaluating the transformation of urban microclimate in medium-sized cities: a case study in the urban mesh of the municipality of Paracatu, Minas Gerais. *RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise*, 57(1), 46–65. <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/88156>
- Dos Santos, A.; Simionatto, H.; Arantes, L.; Simonetti, V.; Oliveira, R.; de Sales, J.; Silva, D. (2023). The Influence of Land Use and Land Cover on Surface Temperature in a Water Catchment Sub-Basin. *Sociedade & Natureza*, 35(1), s.p. <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/69161>
- Dos Santos, A.; Simionatto H.; Tondato, A.; Santacruz, S.; Silva, D. (2024). Relación espacio-temporal de la temperatura superficial con el tipo de cobertura y uso del suelo, en los barrios del municipio de Paracatu, Mina Gerais, Brasil. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 44(1), 235–249. <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/94211>
- Dos Santos, A.; Santil, F.; Carbone, S.; Silva, C. (2022). The influence of urban and mineral expansion on surface temperature variation. *Acta Scientiarum. Technology*, 45(1), s.p. <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/60117>
- Dos Santos, H.; Jacomine, P.; Anjos, L.; Oliveira, V.; Lunbreras, J.; Coelho, M.; Almeida, J.; Araujo filho, J.; Oliveira, J.; Cunha T. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. DF: Embrapa. Brasília.
- Duarte, M.; Ribeiro, A. (2023). Influência do El Niño e La Niña na produtividade de plantios de Eucalipto em distintas regiões no Brasil. *Ciência Florestal*, 33(1), s.p. <https://doi.org/10.5902/1980509861334>.

- Govind, N.; Ramesh, H. (2019). The impact of spatiotemporal patterns of land use land cover and land surface temperature on an urban cool island: a case study of Bengaluru. *Remote Sensing of Environment*, 12(5), 313–329. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7440-1>.
- Hunke, P.; Roller, R.; Zeilhofer, P.; Schroder, B.; Muller, E. (2015). Soil changes under land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. *Geoderma Regional*, 4(8), 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.12.001>.
- Instituto Estadual de Florestas. (2011). Parque Estadual de Paracatu. *IEF*. <http://www.ief.mg.gov.br/Parque-estadual/1412>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). Paracatu. *IBGE*. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/paracatu/panorama>
- Kaiser, E.; Rolim, S.; Grondona, A.; Hackmann, C.; Linn, R.; Kafer, P.; da Rocha, N.; Diaz, L. (2022). Spatiotemporal influences of lulc changes on land surface temperature in rapid urbanization area by using Landsat-TM and TIRS images. *Atmosphere*, 13(3), 460. <https://doi.org/10.3390/atmos13030460>.
- Klink, C.; Sato, M.; Cordeiro, G.; Ramos, M. (2020). The role of vegetation on the dynamics of water and fire in the Cerrado ecosystems: Implications for management and conservation. *Plants*, 9(12), s.p. <https://doi.org/10.3390/plants9121803>.
- Köppen, W. (1931). *Grundriss der Klimakunde*. Germany.
- Latrubesse, E.; Arima, E.; Ferreira, M.; Nogueira, S.; Wittmann, F.; Dias, M.; Dagosta, F.; Bayer, M. (2019). Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. *Conservation Science and Practice*, 1(9), s.p. <https://doi.org/10.1111/csp2.77>.
- Malav, L.; Yadav, B.; Tailor, B.; Pattanayak, S.; Singh, S.; Kumar, N.; Reddy, G.; Mina, B.; Dwivedi, B.; Jha, P. (2022). Mapping of Land Degradation Vulnerability in the Semi-Arid Watershed of Rajasthan, India. *Sustainability*. 14(16), 1-16. <https://doi.org/10.3390/su141610198>.
- MAPBIOMAS. (2023). Área de agropecuária no Brasil cresceu 50% nos últimos 38 anos. <https://brasil.mapbiomas.org/2023/10/06/area-de-agropecuaria-no-brasil-cresceu-50-nos-ultimos-38-anos/>
- Martins, A.; Galvani, E. (2020). Relação entre uso e cobertura da terra e parâmetros biofísicos no Cerrado Brasileiro. *Revista do Departamento de Geografia*, 40(1), 148-162. <https://doi.org/10.11606/rdg.v40i0.167739>.

- Martins, C.; Lopes, P.; Martins, A. (2022). Estimativa do TVDI para avaliação das condições hídricas em áreas de produção de cana-de-açúcar no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(5), 2301-2312. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2301-2312>.
- Njoku, E.; Tenenbaum, D. (2022). Quantitative assessment of the relationship between land use/land cover (LULC), topographic elevation and land surface temperature (LST) in Ilorin, Nigeria. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27(1), s.p. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100780>.
- Paixão, B.; Costa, H.; Sacramento, B.; Sousa, J.; Lourenço, R. (2020). Análise das alterações de temperatura superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Paíol, Ibiúna (SP). *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 9(1), 108-124. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020108-124>.
- Parra-Sanchez, E.; Banks-Leite, C. (2020). The magnitude and extent of edge effects on vascular epiphytes across the Brazilian Atlantic Forest. *Scientific Reports*, 10(1), s.p. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-75970-1>
- Schirmbeck, L.; Fontana, D.; Schirmbeck, J.; Bremm, C. (2019). TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34, 573-583. <https://doi.org/10.1590/0102-7786344070>
- Saha, S.; Saha, A.; Das, M.; Saha, A.; Sarkar, R.; Das, A. (2021). Analyzing spatial relationship between land use/land cover (LULC) and land surface temperature (LST) of three urban agglomerations (UAs) of Eastern India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22(1), s.p. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100507>.
- Sandholt, I.; Rasmusen, K.; Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213-224. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7).
- Souza Jr, C.; Shimbo, J.; Rosa, M.; Parente, L.; Alencar, A.; Rudorff, B.; Hasenack, H.; Matsumoto, M.; Ferreira, L.; Souza-Filho, P.; de Oliveira, S.; Rocha, W.; Fonseca, A.; Marques, C.; Diniz, C.; Costa, D.; Monteiro, D.; Rosa, E.; Vélez-Martin, E.; Weber, E.; Lenti, F.; Paternost, F.; Pareyn, F.; Siqueira, J.; Viera, J.; Ferreira, L.; Saraiva, M.; Sales, M.; Salgado, M.; Vasconcelos, R.; Galano, S.; Mesquita, V.; Azevedo, T. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover

- changes in Brazilian Biomes with Landsat archive and Earth engine. *Remote Sensing*, 12, 1-24. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Souza, J.; Mendes, T.; Bignotto, R.; Alcântara, E.; Massi, K. (2024). Land use dynamics in a tropical protected area buffer zone: is the management plan helping?. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13412-024-00905-5>.
- Ullah, W.; Ahmad, K.; Ullah, S.; Tahir, A.; Javed, M.; Nazir, A.; Abbasi, A.; Aziz, M.; Mohamed, A. (2023). Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC), and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region. *Heliyon*, 9(1), s.p. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13322>.
- United States Geological Service. (2016). Landsat 8 (L8) data users handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey. EROS Sioux Falls, South Dakota. (LSDS-1574. V. 2.0). USGS. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- United States Geological Survey. (2023). Earth Explorer. USGS. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Wang, Y.; Hu, B.; Myint, S.; Feng, C.; Chow, W.; Passy, P. (2018). Patterns of land change and their potential impacts on land surface temperature change in Yangon, Myanmar. *Sci Total Environ*, 643(1), 738–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.209>.
- Xu, X.; Pei, H.; Wang, C.; Xu, Q.; Xei, H.; Jin, Y.; Feng, Y.; Tong, X.; Xiao, C. (2023). Long-term analysis of the urban heat island effect using multisource Landsat images considering inter-class differences in land surface temperature products. *Science of The Total Environment*, 858(1), 159777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159777>.
- Yao, X.; Yu, K.; Zeng, X.; Lin, Y.; Ye, B.; Shen, X.; Liu, L. (2022). How can urban parks be planned to mitigate urban heat island effect in “Furnace cities”? An accumulation perspective. *Journal of Cleaner Production*, 330(1), 129852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129852>.
- Yuan, L.; Li, L.; Zhang, T.; Chen, L.; Zhao, J.; Hu, S.; Cheng, L.; Liu, W. (2020). Soil Moisture Estimation for the Chinese Loess Plateau Using MODIS-derived ATI and TVDI. *Remote Sensing*, 12, 1-35. <https://doi.org/10.3390/rs12183040>.

- Zare, M.; Drastig, K.; Zude-Sasse, M. (2019). Tree water status in apple orchards measured by means of land surface temperature and vegetation index (LST–NDVI) trapezoidal space derived from Landsat 8 satellite images. *Sustainability*, 12(1), 70. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/70>
- Zhao, H.; Li, Y.; Chen, X.; Wang, H.; Yao, N.; Liu F. (2021). Monitoring monthly soil moisture conditions in China with temperature vegetation dryness indexes based on an enhanced vegetation index and normalized difference vegetation index. *Theoretical and Applied Climatology*, 143, 159-176. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-020-03422-x>
- Zoneamento Ambiental Produtivo. (2018). ZAP da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Isabel. ZAP. <https://www.paracaturural.com/zoneamento-ambiental-produtivo-no-santa-isabel/>