



Volumen

13

Número

4

*Autor(a) correspondiente
ayrtongeo@gmail.com

Envío 10 nov 2025

Aceptación 05 ene 2026

Publicación 30 ene 2026

¿Cómo citar?

MANSO, A. D. et al. *Evaluación de cambios en la cobertura urbana de la AEIU de Porto Maravilha (RJ) a partir de índices espectrales*. Coleção Estudos Cariocas, v. 13, n. 4, 2026. DOI 10.71256/19847203.13.4.189.2025.

El artículo fue originalmente enviado en PORTUGUÉS. Las traducciones a otros idiomas fueron revisadas y validadas por los autores y el equipo editorial. Sin embargo, para una representación más precisa del tema tratado, se recomienda que los lectores consulten el artículo en su idioma original.



Evaluación de cambios en la cobertura urbana de la AEIU de Porto Maravilha (RJ) a partir de índices espectrales

Assessment of urban cover changes in the AEIU of Porto Maravilha (RJ) using spectral indices

Avaliação de mudanças na cobertura urbana da AEIU do Porto Maravilha (RJ) a partir de índices espectrais

Ayrton Durães Manso¹, Caio Gabriel Santa Bacelar²; Alexandra de Souza Rodrigues³; Hugo Portocarrero⁴; Pablo Ritto Koehler⁵

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, Bloco A Maracanã – Rio de Janeiro - RJ, ORCID: 0000-0002-2002-3328, ayrtongeo@gmail.com

²Universidade Federal Fluminense, Av. Gal. Milton Tavares de Souza s/nº - Gragoatá - Niterói, Rio de Janeiro - RJ, ORCID: 0009-0009-5820-9302, bacelar.caiogabriel@gmail.com

³Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Avenida Pasteur nº 296, Urca, Rio de Janeiro - RJ, ORCID: 0009-0001-4253-5869, ale.his.rodrigues@gmail.com

⁴Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, Bloco A Maracanã – Rio de Janeiro - RJ, ORCID: 0000-0001-7733-6352, hportocarrero@gmail.com

⁵Companhia Carioca de Parcerias e Investimentos, R. Sacadura Cabral, 133 - Saúde, Rio de Janeiro – RJ, ORCID: 0009-0008-7796-2140, pablokoehler@ccpar.com.br

Resumen

El presente estudio cuantificó el cambio en la cobertura del suelo en el Área de Especial Interés Urbanístico (AEIU) de Porto Maravilha (2009-2024), mediante instrumentación geotecnológica de teledetección. La geoinformación, derivada de los índices espectrales NDVI y NDBI (Landsat), reveló dos períodos distintos. El primero (2009-2016) se caracteriza por el incremento del NDBI y el decremento del NDVI, indicando densificación constructiva y supresión de vegetación. El segundo período (2017-2024) presentó la estabilización de las superficies antrópicas. La correlación negativa entre los índices validó el aumento de áreas construidas en detrimento de áreas verdes.

Palabras clave: teledetección, cobertura del suelo, Porto Maravilha

Abstract

This study quantified land cover change in the Porto Maravilha Urban Special Interest Area (AEIU) (2009-2024), utilizing remote sensing geotechnological instrumentation. Geoinformation derived from spectral indices NDVI and NDBI (Landsat) revealed two distinct periods. The first (2009-2016) is characterized by an increment in NDBI and a decrement in NDVI, indicating construction densification and vegetation suppression. The second period (2017-2024) exhibited the stabilization of anthropic surfaces. The negative correlation between the indices validated the increase in built-up areas at the expense of green areas.

Keywords: remote sensing, land cover, Porto Maravilha

Resumo

O presente estudo quantificou a alteração na cobertura do solo na Área de Especial Interesse Urbanístico (AEIU) do Porto Maravilha (2009-2024), mediante instrumentação geotecnológica de sensoriamento remoto. A geoinformação, derivada dos índices espectrais NDVI e NDBI (Landsat), revelou dois períodos distintos. O primeiro (2009-2016) é caracterizado pelo incremento do NDBI e decréscimo do NDVI, indicando adensamento construtivo e supressão vegetal. O segundo período (2017-2024) apresentou a estabilização das superfícies antrópicas. A correlação negativa entre os índices validou o aumento de áreas construídas em detrimento de áreas verdes.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, cobertura do solo, Porto Maravilha

1 Introducción

El uso de la Teledetección para la adquisición de información detallada y precisa de la superficie terrestre ha aumentado considerablemente con el avance de sus tecnologías, siendo considerado una herramienta indispensable para la gestión y la planificación de las regiones urbanas (Herold; Scepan; Clarke, 2002). El uso de imágenes satelitales y de Sistemas de Información Geográfica (SIG) mejora la capacidad de detectar cambios complejos en los paisajes terrestres, ofreciendo una metodología de bajo costo y alta eficacia en comparación con los métodos tradicionales de monitoreo (Roy; Bari, 2022; Liu, 2023). La relevancia de esta tecnología se amplifica en un contexto en el que datos como la cobertura y el uso del suelo, el consumo de suelo, la temperatura de la superficie y la contaminación del aire pueden obtenerse gratuitamente en repositorios en línea (Shumilo *et al.*, 2021).

Históricamente, el uso de fotografías aéreas fue una de las primeras fuentes de datos para el mapeo de áreas verdes urbanas. La aplicación de índices espectrales como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), derivados de imágenes Landsat entre las décadas de 1970 y 1990, permitió la cuantificación del “verdor” de la vegetación (Liu, 2023). Por su parte, las áreas construidas han sido cuantificadas mediante el Índice de Construcción de Diferencia Normalizada o Normalized Difference Built-up Index (NDBI). Estudios recientes han señalado el potencial de este índice para identificar la expansión urbana, la conversión de áreas verdes y su correlación con la temperatura de la superficie terrestre (Roy; Bari, 2022; Arif; Toersilowati, 2024; Cetin *et al.*, 2024; Drešković; Dug; Osmanovic, 2024).

En el ámbito de los estudios urbanos basados en series temporales extensas, la elección del satélite implica necesariamente un equilibrio entre la resolución espacial, la cobertura temporal y la consistencia radiométrica. En este estudio, el uso integrado de imágenes de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 permitió el análisis de los cambios en la cobertura del suelo en el Área de Especial Interés Urbanístico (AEIU) de Porto Maravilha, ocurridos como resultado de las obras de infraestructura iniciadas en 2009, promovidas para atender los grandes eventos deportivos celebrados en la ciudad de Río de Janeiro, como la Copa Mundial de 2014 y los Juegos Olímpicos de 2016.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue analizar el cambio de la cobertura del suelo en la AEIU de Porto Maravilha en el período comprendido entre 2009 y 2024, utilizando datos de SR. Para ello, se adoptaron los índices NDVI y NDBI con el fin de comprender la variación de la correlación entre ambos a lo largo del recorte temporal, señalando posibles escenarios de densificación de las superficies antrópicas y de supresión de la vegetación urbana como consecuencia de las intensas intervenciones estructurales en el paisaje.

2 Transformaciones urbanas y paisajísticas en la región portuaria de Río de Janeiro: Un breve enfoque histórico

La región portuaria de Río de Janeiro constituye un espacio emblemático de la historia urbana y social de la ciudad. Desde el período colonial, esta área, compuesta principalmente por los barrios de Saúde, Gamboa y Santo Cristo, ha sido central en la formación del núcleo urbano carioca y en el desarrollo económico de la capital, al albergar muelles, el mercado de Valongo y una significativa población de trabajadores esclavizados y libertos, quienes moldearon sus prácticas culturales e identitarias (Silva; Silva, 2014). Esta herencia afrobrasileña y obrera marcó profundamente el territorio, otorgándole un papel fundamental en la constitución de la “Pequena África” (Pequeña África), cuna de manifestaciones como el samba y el candomblé.

A lo largo del siglo XIX, con la expansión de la caficultura y la modernización de los puertos brasileños, Río de Janeiro se consolidó como el principal centro comercial del país. Las reformas urbanas emprendidas durante la gestión de Pereira Passos

(1902–1906) introdujeron un nuevo ordenamiento espacial, abriendo avenidas, demoliendo conventillos y rediseñando el frente marítimo en nombre de la modernidad y de la “higienización” de la ciudad (Monié; Silva, 2015; Colchete Filho; Costa; Jesus, 2019). Sin embargo, estas intervenciones resultaron en una fuerte segregación social, desplazando a las clases populares hacia las periferias urbanas y los cerros adyacentes a la zona portuaria.

A partir de la segunda mitad del siglo XX, la región entró en un proceso de decadencia. La modernización de los sistemas de transporte marítimo, el uso de contenedores y la desindustrialización provocaron el vaciamiento económico del área, agravado por la construcción del Viaducto de la Perimetral, que aisló físicamente el puerto del resto de la ciudad (Silva; Silva, 2014; Colchete Filho; Costa; Jesus, 2019). El resultado fue la obsolescencia de grandes espacios y el abandono de inmuebles históricos, incluso en áreas protegidas por el Proyecto SAGAS y por la legislación de conservación urbana.

El inicio del siglo XXI marcó el retorno del interés público y privado por la región. El lanzamiento del proyecto Porto Maravilha en 2009 insertó a Río de Janeiro en la lógica global de los grandes proyectos urbanos (Sarue, 2018) y de los waterfronts (Monié; Silva, 2015), que articulan al Estado y al capital financiero-inmobiliario mediante asociaciones público-privadas. Inspirado en las reformas de Barcelona y Buenos Aires, el proyecto propuso la recalificación de la zona portuaria a través de la Operación Urbana Consorciada (Ley Complementaria n.º 101/2009), con inversiones significativas en infraestructura, movilidad y equipamientos culturales, como el Museo del Mañana y el Museo de Arte de Río, además de la demolición del Viaducto de la Perimetral y la implantación del Vehículo Ligero sobre Rieles (VLT) (Ferreira; Pizzolante; Viriato, 2024).

Estas transformaciones alteraron profundamente el paisaje urbano y el imaginario de la ciudad. La región, antes marginada, se convirtió en un escaparate de la planificación estratégica y del turismo, marcada por nuevos símbolos arquitectónicos y por el tratamiento paisajístico del Boulevard Olímpico (Carlos, 2020). No obstante, el proceso reveló contradicciones: la gentrificación y el aumento del valor del suelo urbano restringieron el acceso de las poblaciones tradicionales, amenazando la permanencia de las comunidades históricas de los barrios de Saúde y Gamboa (Carlos, 2020). La revitalización urbana, en lugar de promover una “conservación integrada” que articulara patrimonio, vivienda e inclusión, terminó reforzando el carácter mercantil de la ciudad, subordinada a la lógica neoliberal del espectáculo y de la valorización inmobiliaria (Harvey, 2005; Jacques, 2003 apud Carlos, 2020).

Como señalan Ferreira, Pizzolante y Viriato (2024), Porto Maravilha debe entenderse como parte de una dinámica metropolitana más amplia, en la que el espacio urbano se produce como mercancía y se orienta por estrategias financieras y políticas de control. Desde esta perspectiva, el paisaje portuario actual expresa tanto continuidades, como la centralidad económica y simbólica del puerto, como rupturas, al representar una nueva forma de urbanización marcada por desigualdades, espectacularización y selectividad espacial.

Así, la historia de la región portuaria de Río de Janeiro revela un recorrido de constantes reconfiguraciones urbanas y paisajísticas, en las que la modernización ha significado frecuentemente exclusión. Del antiguo muelle colonial al “Porto Maravilha” contemporáneo, este territorio permanece como un espejo de las tensiones entre memoria y mercado, entre patrimonio y capital. Reconocer estas capas históricas es fundamental para pensar futuros más inclusivos y sostenibles para un área que, más que ser recalificada, necesita ser verdaderamente reintegrada a la ciudad y a su población.

3 Materiales y métodos

El presente trabajo se configura como un estudio de caso de naturaleza cuantitativa, con un enfoque de análisis espacio-temporal. La metodología se basó fundamentalmente en técnicas de sensoriamento remoto, geoprocесamiento y análisis estadístico exploratorio para el monitoreo del cambio de la cobertura del suelo en la AEIU de Porto Maravilha.

3.1 Área de estudio

El área de estudio abordada en esta investigación corresponde al Área de Especial Interés Urbanístico (AEIU) de Porto Maravilha (Figura 1), cuyo perímetro fue formalmente establecido por la Ley Complementaria n.º 101/2009. Dicha ley instituyó la Operación Urbana Consorciada (OUC) de la región del Puerto de Río de Janeiro y áreas adyacentes en la AEIU, comprendiendo un conjunto de intervenciones coordinadas por el Municipio y otras entidades de la Administración Pública Municipal, con la participación de propietarios, residentes, usuarios e inversores, con el objetivo de alcanzar transformaciones urbanísticas estructurales, mejoras sociales y valorización ambiental en la región.

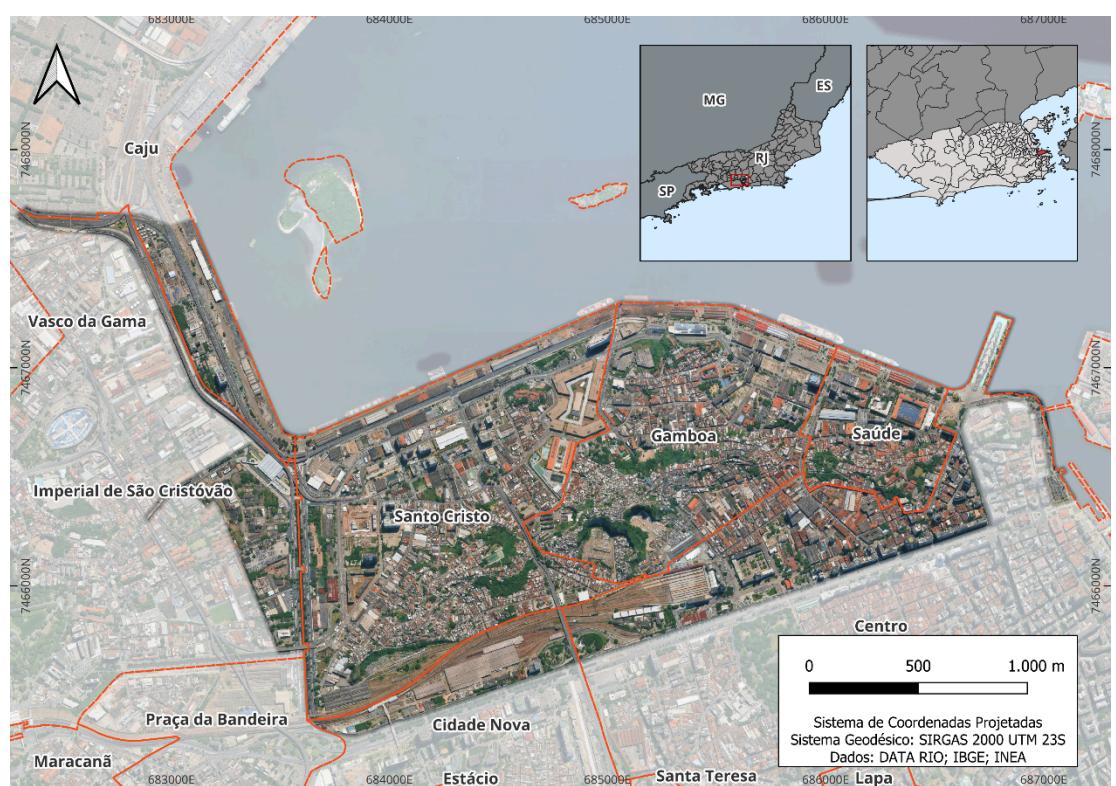


Figura 1: Localización de la AEIU Porto Maravilha en el municipio de Río de Janeiro.
Fuente: Los autores.

De acuerdo con el Plan Director municipal, una AEIU es el área “destinada a proyectos específicos de estructuración o reestructuración, renovación y revitalización urbana”. La finalidad de la OUC, conforme al Artículo 2 de la citada ley, es “promover la reestructuración urbana de la AEIU, mediante la ampliación, articulación y recalificación de los espacios libres de uso público, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de sus residentes actuales y futuros”.

El área total de la operación abarcó casi 500 hectáreas cuadradas, incluyendo íntegramente los barrios históricos de Gamboa, Santo Cristo y Saúde, además de sectores de Caju, Centro, Cidade Nova, São Cristóvão y Vasco da Gama. Antes del proyecto, el área era percibida como un espacio degradado, donde la principal barrera física era el Viaducto de la Perimetral, cuya demolición fue una de las intervenciones previstas en el Anexo II de la ley.

Recientemente, la AEIU de Porto Maravilha fue ampliada mediante la Ley Complementaria n.º 267/2023, abarcando localidades no contempladas en este estudio. Los límites adoptados en la investigación fueron obtenidos a través del portal de datos abiertos del Ayuntamiento de la Ciudad de Río de Janeiro, DATA Rio.

3.2 Obtención de imágenes orbitales y procesamiento digital

La etapa de obtención de imágenes orbitales se llevó a cabo con el fin de garantizar una cobertura temporal continua del período de interés, correspondiente a los años 2009 a 2024, intervalo que comprende desde el inicio de las obras en la AEIU de Porto Maravilha hasta la actualidad. Para ello, se seleccionaron los satélites Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI/TIRS), que en conjunto permitieron la construcción de una serie histórica de datos multiespectrales con una resolución espacial de 30 metros.

Las imágenes se accedieron a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando la colección LANDSAT/LT05/C02/T1_L2 para Landsat 5, la colección LANDSAT/LE07/C02/T1_L2 para Landsat 7 y la colección LANDSAT/LC08/C02/T1_L2 para Landsat 8.

Con el fin de garantizar la comparabilidad entre años y sensores, se adoptó un procedimiento estandarizado de preprocesamiento en GEE. Dicho procedimiento incluyó: (i) filtrado de imágenes por cobertura nubosa (< 75 % en los años críticos), (ii) aplicación de una función de máscara para nubes y sombras utilizando QA_PIXEL, (iii) corrección mediante factores oficiales de escala del USGS y (iv) generación de composiciones anuales a partir de la mediana de los píxeles a lo largo del año. El resultado consistió en un conjunto de imágenes anuales representativas de toda la serie temporal, recortadas según la geometría de la AEIU y exportadas en formato GeoTIFF.

3.3 Álgebra de bandas espectrales

Aunque es posible realizar operaciones algebraicas entre bandas espectrales directamente en GEE, se optó por llevar a cabo los cálculos en el software QGIS 3.40 LT, utilizando la herramienta Calculadora Raster. Esta elección se debió a la flexibilidad en la manipulación de las imágenes exportadas y a la posibilidad de mantener un entorno integrado con otras etapas del procesamiento cartográfico.

Se seleccionaron dos índices para el análisis temporal: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Construcción de Diferencia Normalizada (NDBI). Ambos son ampliamente utilizados en estudios de dinámica urbana y ocupación del suelo (Roy; Bari, 2022; Cetin *et al.*, 2024), ya que permiten discriminar áreas vegetadas y superficies antrópicas, respectivamente.

El NDVI se obtuvo a partir de la razón entre la diferencia y la suma de las reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (RED), según la Ecuación 1:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

El NDBI se calculó a partir de la razón entre la diferencia y la suma de las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR) y del infrarrojo cercano (NIR), según la Ecuación 2:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (2)$$

La Tabla 1 a continuación discrimina la banda de cada satélite utilizada en las operaciones algebraicas.

Tabla 1: Combinación de bandas de los índices espectrales.

Índice	Landsat 5 y 7		Landsat 8	
	1 ^a Banda	2 ^a Banda	1 ^a Banda	2 ^a Banda
NDVI	4	3 ¹	5	4
NDBI	5	4	6	5

Fuente: Adaptada de Roy; Bari (2022).

3.4 Análisis estadísticos

Para comprender la relación entre los índices NDVI y NDBI, se realizaron análisis de estadística descriptiva y de correlación utilizando el software R, con el apoyo del paquete raster para la manipulación de datos geoespaciales y ggplot2 para la visualización. La correlación se calculó año a año, comparando los valores de píxel de la imagen ráster del NDBI con los valores correspondientes de la imagen ráster del NDVI. Para ello, se empleó el Análisis de Correlación de Pearson con el fin de examinar la interdependencia y la interrelación en la distribución de dichos valores. El coeficiente de correlación de Pearson (r) se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

Donde:

r = Coeficiente de correlación de Pearson;

n = Número total de píxeles muestreados;

x_i = Valor del píxel i en la imagen NDBI;

y_i = Valor del píxel i en la imagen NDVI;

\bar{x} = Media de los valores de píxel de la imagen NDBI;

\bar{y} = Media de los valores de píxel de la imagen NDVI.

4 Resultados

El análisis de la serie temporal de los índices espectrales (2009–2024) permitió identificar patrones diferenciados de transformación de la cobertura del suelo en la AEIU de Porto Maravilha, expresados por las variaciones inversas entre el NDBI y el NDVI. Los datos revelan dos períodos claramente distintos en el comportamiento espectral del paisaje urbano, como se muestra en la Figura 2.

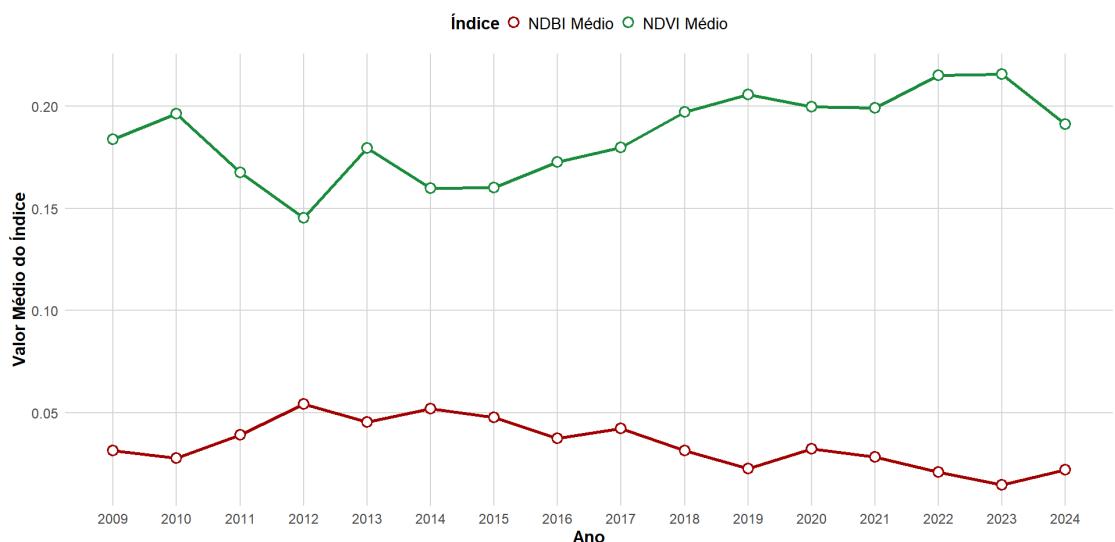


Figura 2: Evolución temporal del promedio de los índices NDBI y NDVI.
Fuente: Los autores.

4.1 Período I – Transformación intensiva (2009–2016)

El primer intervalo caracteriza la fase más dinámica de las obras de la Operación Urbana Consorciada, coincidiendo con la implementación de las intervenciones estructurales y la demolición del Viaducto de la Perimetral. Los valores medios del NDBI presentan una tendencia creciente entre 2009 (0,03) y 2014–2016 (0,04–0,05), mientras que el NDVI muestra una disminución progresiva en el mismo intervalo, pasando de 0,18 (2009) a 0,14 (2012) y 0,15 (2014). Este comportamiento evidencia la sustitución de superficies vegetadas por materiales constructivos y pavimentación, lo que resulta en una mayor reflectancia en el infrarrojo de onda corta y una reducción de la respuesta en el infrarrojo cercano.

El pico máximo del NDBI en 2016 (0,61) refuerza el auge de las transformaciones físicas del paisaje y la densificación de las superficies antrópicas, mientras que el mínimo expresivo del NDVI en el mismo año refleja el punto de mayor supresión vegetal, como se muestra en las Tablas 2 y 3. La correlación negativa más intensa entre ambos índices observada en este período indica el proceso de conversión directa de la cobertura vegetal en áreas urbanizadas, como también señalan Roy y Bari (2022) y Yasin *et al.* (2022).

Tabla 2: Estadísticas descriptivas del NDBI.

Año	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desviación Típica
2009	-0,63	0,30	0,03	0,05	0,12
2010	-0,68	0,32	0,02	0,04	0,13
2011	-0,63	0,32	0,03	0,05	0,12
2012	-0,76	0,33	0,05	0,07	0,12
2013	-0,43	0,42	0,04	0,06	0,10
2014	-0,46	0,35	0,05	0,06	0,11
2015	-0,46	0,30	0,04	0,06	0,09
2016	-0,49	0,61	0,03	0,04	0,10
2017	-0,52	0,56	0,04	0,04	0,10
2018	-0,53	0,30	0,03	0,04	0,11
2019	-0,51	0,34	0,02	0,03	0,11
2020	-0,53	0,63	0,03	0,04	0,12
2021	-0,56	0,64	0,02	0,03	0,11
2022	-0,53	0,30	0,02	0,03	0,12
2023	-0,48	0,39	0,01	0,02	0,11
2024	-0,49	0,32	0,02	0,03	0,11

Fuente: Los autores.

4.2 Período II – Estabilización y recuperación relativa (2017–2024)

A partir de 2017, se observa un cambio en el patrón de variación de los índices. El NDBI se estabiliza con valores medios entre 0,02 y 0,04, lo que sugiere la consolidación de las áreas edificadas y la reducción de nuevas expansiones urbanas. Paralelamente, el NDVI muestra señales de recuperación gradual, especialmente después de 2018, con medias que alcanzan valores de 0,20–0,21 en 2022–2023. Esta tendencia positiva puede estar asociada a la recualificación paisajística y a la creación de espacios verdes públicos, como plazas y corredores arbolados, previstos en el plan de reurbanización.

Tabla 3: Estadísticas descriptivas del NDVI.

Año	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desviación Típica
2009	-0,29	0,75	0,18	0,15	0,14
2010	-0,30	0,78	0,19	0,16	0,15
2011	-0,29	0,72	0,16	0,14	0,12
2012	-0,27	0,73	0,14	0,12	0,12
2013	-0,60	0,81	0,17	0,15	0,15
2014	-0,65	0,80	0,15	0,14	0,15
2015	-0,53	0,79	0,16	0,13	0,14
2016	-0,70	0,81	0,17	0,14	0,15
2017	-0,52	0,82	0,17	0,15	0,15
2018	-0,43	0,88	0,19	0,16	0,16
2019	-0,38	0,85	0,20	0,17	0,15
2020	-0,79	0,88	0,19	0,17	0,18
2021	-0,80	0,89	0,19	0,17	0,18
2022	-0,45	0,86	0,21	0,18	0,17
2023	-0,53	0,84	0,21	0,18	0,17
2024	-0,51	0,82	0,19	0,16	0,16

Fuente: Los autores.

Los mapas de distribución espacial de los índices (Figuras 3 y 4) permiten visualizar la sustitución progresiva de áreas vegetadas por superficies antrópicas. En general, los valores elevados de NDVI se concentraron en la porción central de la AEIU.

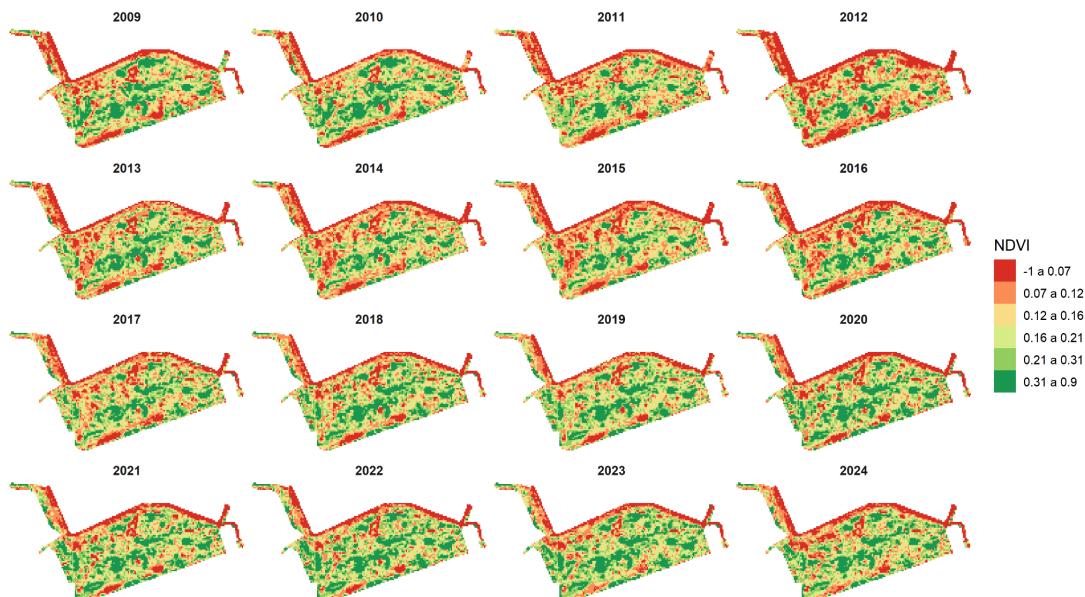


Figura 3: Distribución espacial del índice NDVI en la AEIU Porto Maravilha (2009–2024).

Fuente: Los autores.

En 2012 se observa una posible reducción de las áreas verdes en las proximidades de la Avenida Rodrigues Alves y del eje portuario por donde atraviesan los túneles Marcelo Alencar y Río 450 Años, expresada por la concentración de valores negativos del índice en este sector.

En el mismo año, la distribución espacial del NDBI también revela un avance de las superficies construidas hacia el interior de la AEIU. Después de 2017, la homogeneización de los valores del índice indica una estabilización del tejido urbano, con reducción de la dispersión de valores extremos. De manera puntual, las manchas de NDVI vuelven a intensificarse en 2021 y 2023.

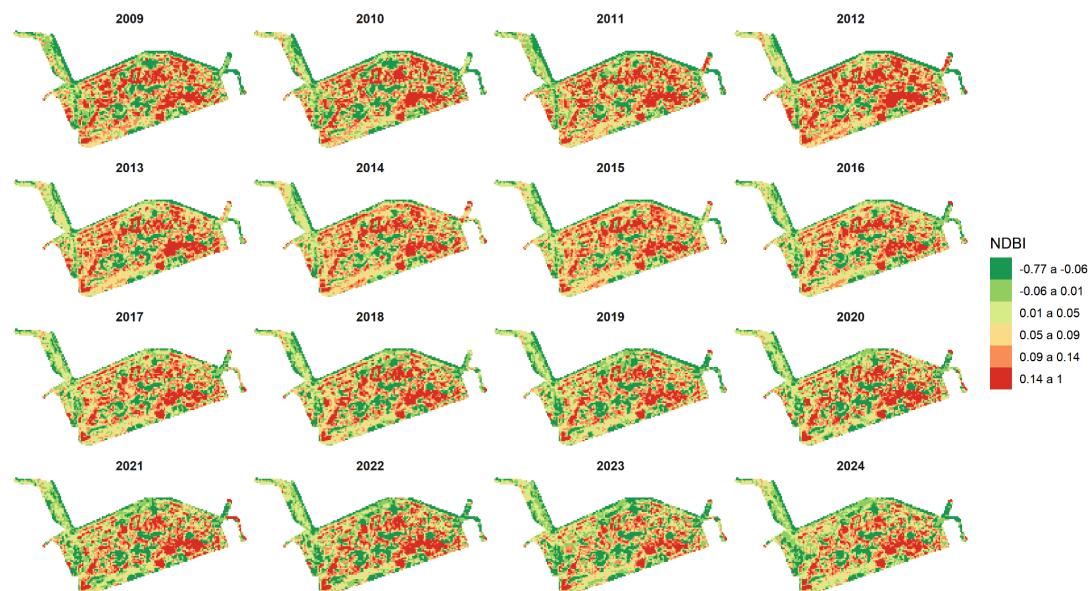


Figura 4: Distribución espacial del índice NDBI en la AEIU Porto Maravilha (2009–2024).

Fuente: Los autores.

La Figura 5 presenta el histograma de la distribución de píxeles para el índice NDBI. La mayor concentración de valores ocurrió cerca de cero, en el intervalo entre 0 y 0,20. Se observó un desplazamiento y aumento de las barras hacia valores más positivos a lo largo de los años, hasta un punto en el que también se registra un nuevo aumento de valores entre -0,20 y 0, lo que sugiere la estabilización de la cobertura del suelo en estas áreas.

La Figura 6, correspondiente al NDVI, indicó una concentración de píxeles en el intervalo de valores entre 0 y 0,25. Sin embargo, los picos del histograma se atribuyen a valores aproximadamente entre 0,10 y 0,15, lo que, según el trabajo de França, Pereira y Galvínio (2012), corresponde a una cobertura vegetal baja y en condición de estrés, de carácter relativamente disperso.

Como se observa en la Figura 3, los valores más elevados de NDVI tienden a distribuirse espacialmente en la zona central de la AEIU. En esta región existen fragmentos relevantes de vegetación ubicados en el Morro da Providência, el Parque Machado de Assis, el Cementerio de los Ingleses, en el entorno del Observatorio del Valongo (UFRJ) y en el tramo comprendido entre las calles Pinto y Nabuco de Freitas.

Fuera de esta parte central, se observa vegetación ligeramente más densa sobre el Túnel Nina Rabha, a lo largo del Morro da Saúde y en el Monasterio de São Bento. La arborización urbana ocurre de forma puntual, con la presencia de pocos individuos.

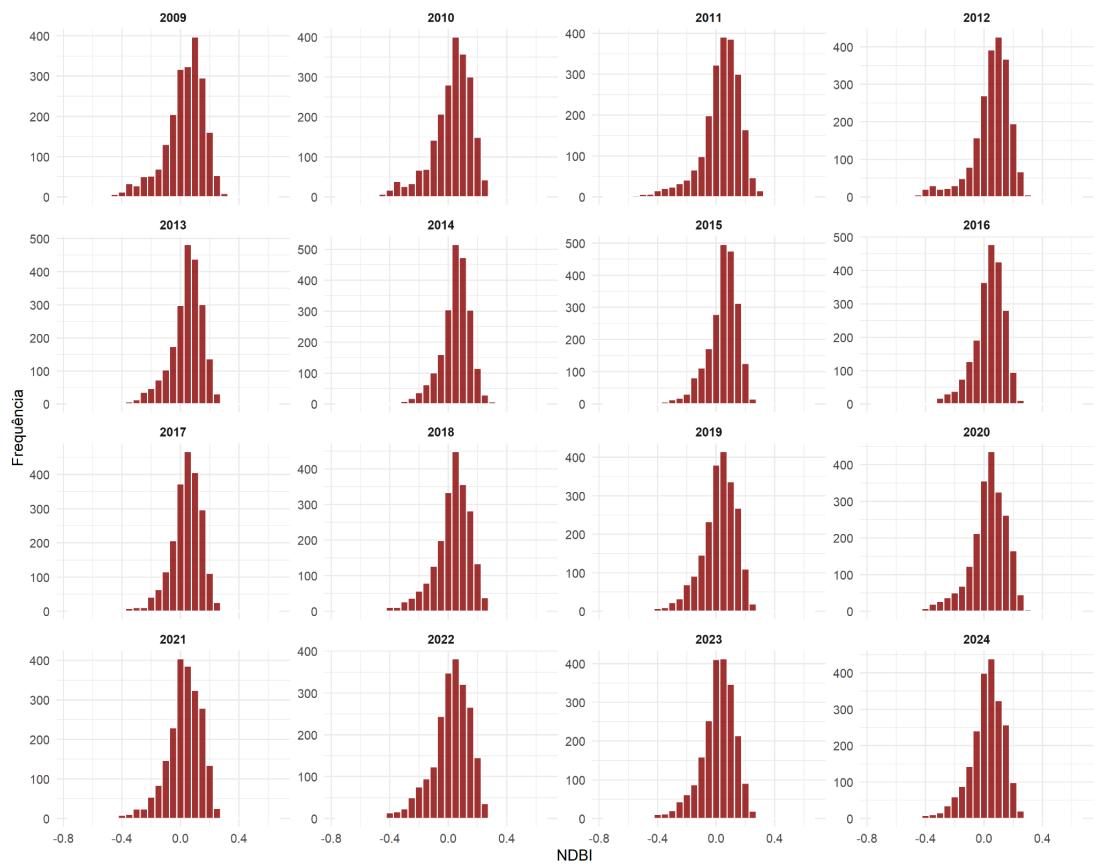


Figura 5: Histograma de la distribución de píxeles para el índice NDBI.
Fuente: Los autores.

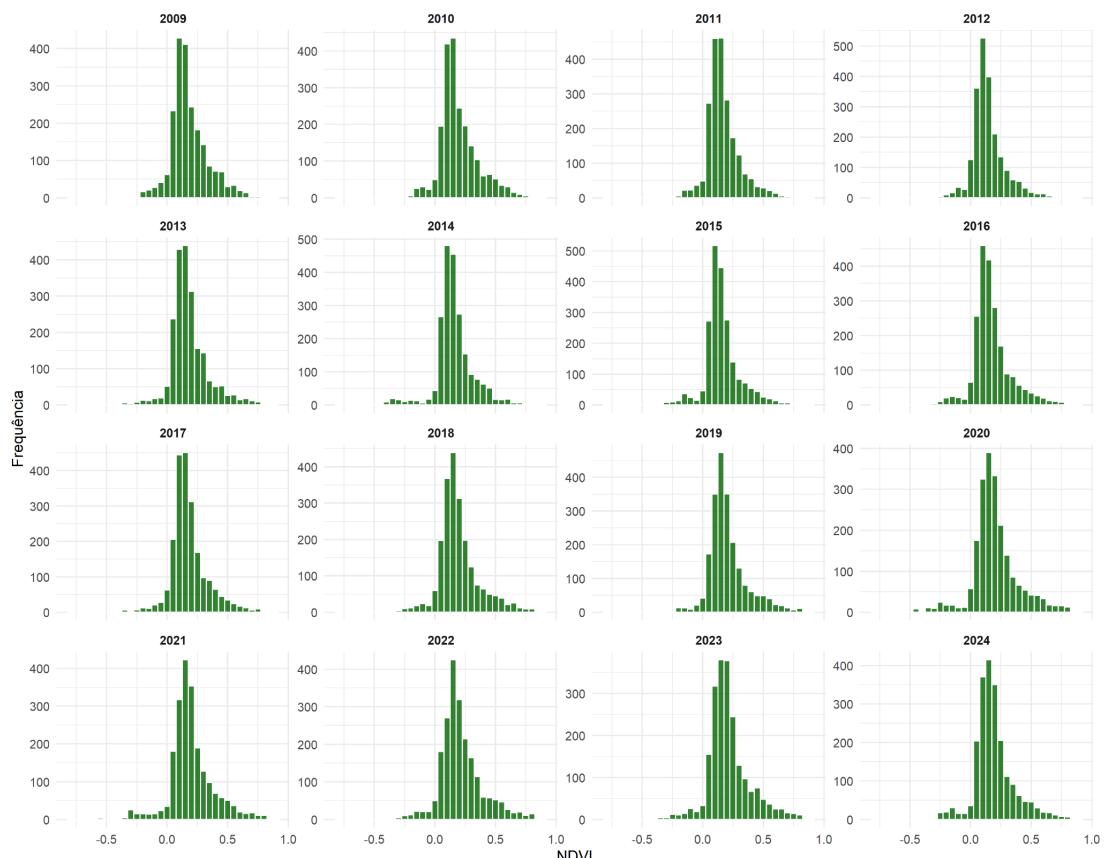


Figura 6: Histograma de la distribución de píxeles para el índice NDVI.
Fuente: Los autores.

La relación inversa entre ambos índices es confirmada por el análisis de correlación de Pearson, el cual mostró una correlación negativa. Esta asociación negativa entre el NDBI y el NDVI se aborda como un indicador del proceso de urbanización y de sustitución de la cobertura del suelo (Roy; Bari, 2022; Yasin *et al.*, 2022).

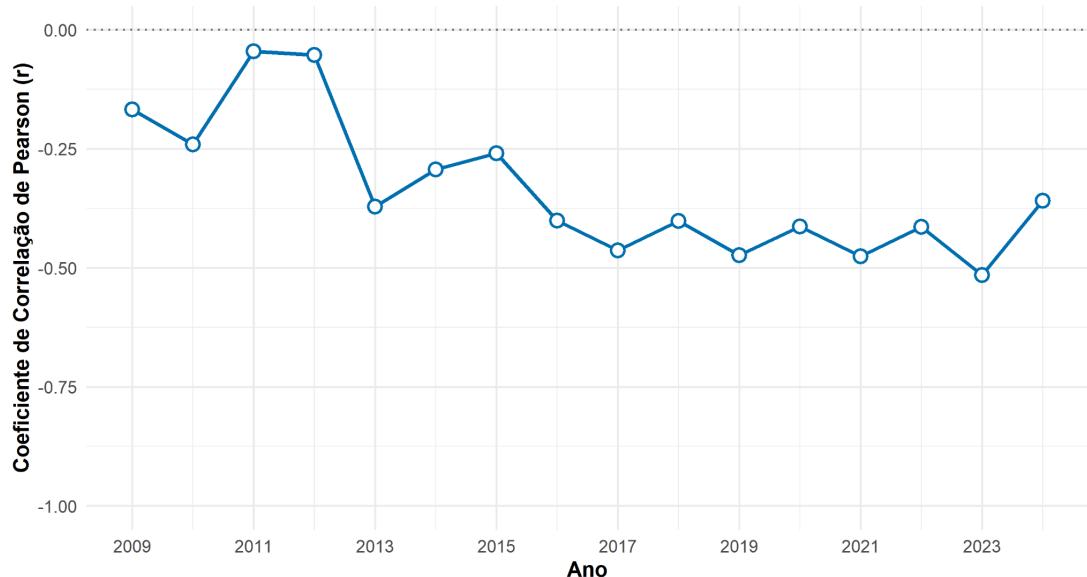


Figura 7: Evolución de la correlación anual entre el NDBI y el NDVI (2009–2024).
Fuente: Los autores.

Las fluctuaciones anuales en la intensidad de esta correlación (que varían de débil a moderada) sugieren que el proceso de sustitución no fue lineal, sino que ocurrió en episodios, correspondientes a las diferentes fases del proyecto. Estos cambios documentados en la cobertura del suelo tienen implicaciones ambientales directas. Estudios demuestran que la reducción del NDVI y el aumento del NDBI están fuertemente correlacionados con el incremento de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST), contribuyendo a la intensificación de las islas de calor urbano (Luo, 2023; Drešković; Đug; Osmanović, 2024).

5 Conclusión

Este trabajo demostró la eficacia del uso del sensoriamento remoto para monitorear y evaluar cuantitativamente los cambios en la cobertura del suelo resultantes de una gran intervención urbana. Los resultados confirmaron la hipótesis de que la implementación del proyecto Porto Maravilha promovió una densificación de las superficies antrópicas en detrimento de las áreas verdes, principalmente durante el período comprendido entre 2009 y 2016, el cual corresponde a la fase más intensa de las obras.

El análisis espacio-temporal de este período proporcionó evidencias objetivas de la densificación de las superficies construidas en el área de estudio, reflejada en el aumento de los valores del NDBI y en la correspondiente disminución de los valores del NDVI.

La metodología empleada, alineada con estudios de referencia, demostró ser una herramienta dinámica y eficiente para trazar un diagnóstico preliminar de las transformaciones del paisaje, ofreciendo datos valiosos que no solo documentan el impacto físico del proyecto, sino que también permiten inferir sus consecuencias ambientales, como las alteraciones en el microclima local, tal como se ha observado en otros estudios.

Para investigaciones futuras, matices más detallados de la variación de los índices espectrales en respuesta a los cambios en la cobertura del suelo en la AEIU podrían ser analizados mediante un aumento de la frecuencia de muestreo,

obteniendo, por ejemplo, composiciones mensuales basadas en la mediana de los valores de los píxeles, en lugar de la composición anual adoptada en este estudio.

Este procedimiento, sin embargo, incrementaría significativamente el volumen de datos generados, de 32 a 384 imágenes ráster, requiriendo mayor capacidad de procesamiento y de análisis por parte de los investigadores. La automatización de rutinas por lotes, utilizando herramientas como PyQGIS en el terminal de Python para realizar el álgebra entre las bandas espectrales, sería una estrategia viable para superar el desafío del procesamiento de este gran volumen de datos, facilitando consecuentemente el acceso a la información.

Referencias

- ARIF, N.; TOERSILOWATI, L. Monitoring and predicting development of built-up area in sub-urban areas: A case study of Sleman, Yogyakarta, Indonesia. **Heliyon**, v. 10, n. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34466>
- CARLOS, C. L. A outra face do Projeto Porto Maravilha: Área Portuária do Rio de Janeiro. **Revista Latino-americana de Ambiente Construído & Sustentabilidade**, v. 1, n. 2, 2020.
- CETIN, M. et al. Determination of land surface temperature and urban heat island effects with remote sensing capabilities: the case of Kayseri, Türkiye. **Natural Hazards**, v. 120, [S.n.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06431-5>
- COLCHETE FILHO, A. F. ; COSTA, L. M. S. A. ; JESUS, K. D. de . Porto Maravilha-RJ: comércio, espetáculo e cidade. **Tríades em Revista: Transversalidades, Design e Linguagens**, [S. I.], v. 8, n. 1, p. 79–93, 2019.
- DREŠKOVIĆ, N.; ĐUG, S.; OSMANOVIĆ, M. NDVI and NDBI Indexes as Indicators of the Creation of Urban Heat Islands in the Sarajevo Basin. **Geographica Pannonica**, v. 28, n. 1, p. 34-43, mar. 2024. DOI: 10.5937/gp28-48216
- FERREIRA, A.; PIZZOLANTE, H.; VIRIATO, M. O projeto “Porto Maravilha” no Rio de Janeiro: inspiração em Barcelona, representações e produção a serviço do capital. **GEO UERJ**, n. 46, p. 2-5, 2024. DOI: 10.12957/geouerj.2024.86553
- HARVEY, D. **A produção capitalista do espaço**. São Paulo: Annablume, 2005.
- HEROLD, M.; SCEPAN, J.; CLARKE, K. C. The Use of Remote Sensing and Landscape Metrics to Describe Structures and Changes in Urban Land Uses. **Environment and Planning A: Economy and Space**, v. 34, n. 8, p. 1443-1458, 2002. DOI: 10.1068/a3496
- LIU, Y. Application of remote sensing technology in smart city construction and planning. **Journal of Physics: Conference Series**. v, 2608, 2023. DOI 10.1088/1742-6596/2608/1/012052
- LUO, J. Study on the Impact of MODIS-derived NDVI and NDBI on Land Surface Temperature. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, [S. I.], v. 69, p. 249–258, 2023. DOI: 10.54097/hset.v69i.11911.
- MONIÉ, F.; SANTOS DA SILVA, V. O projeto Porto Maravilha de revitalização da área portuária do Rio de Janeiro entre inovações e retrocessos na produção do espaço urbano. **Revista Transporte y Territorio**, Buenos Aires, n. 12, p. 110-126, 2015.
- RIO DE JANEIRO (Cidade). Lei Complementar nº 101, de 23 de novembro de 2009. Modifica o Plano Diretor, autoriza o Poder Executivo a instituir a Operação Urbana Consorciada da Região do Porto do Rio e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, Rio de Janeiro, RJ, 24 nov. 2009. Disponible en: <http://leis.org/cmisp>. Acceso en: 15 ago. 2025.
- RIO DE JANEIRO (Cidade). Lei Complementar nº 267, de 20 de dezembro de 2023. Altera a Lei Complementar nº 101, de 23 de novembro de 2009, para expandir a Operação Urbana Consorciada da Região do Porto do Rio de Janeiro e

a Lei nº 5.780, de 22 de julho de 2014, e dá outras providências, 2023. Disponível en: <http://leis.org/10gd3>. Acceso en: 15 out. 2025.

RIO DE JANEIRO (Cidade). **AEIU - Porto Maravilha**: Área de Especial Interesse Urbanístico do Porto Maravilha. Rio de Janeiro: Data.Rio, [S.d.]. Disponible en: <https://www.data.rio/datasets/aeiu-porto-maravilha/explore>. Acceso en: 15 oct. 2025.

ROY, B.; BARI, E. Examining the relationship between land surface temperature and landscape features using spectral indices with Google Earth Engine. **Heliyon**, v. 8, e10668, 2022. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10668

SARUE, B. Quando grandes projetos urbanos acontecem? Uma análise a partir do Porto Maravilha no Rio de Janeiro. **Revista Dados**, v. 61, n. 3, p. 581-616, 2018. DOI: 10.1590/001152582018168

SHUMILO, L. *et al.* Remote Sensing Data usage for Smart City Greening Strategy Planning. IEEE EUROCON 2021 - 19th International Conference on Smart Technologies. Lviv, Ukraine, 2021, p. 92-97, doi: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535595

SILVA, M. R.; SILVA, M. L. A transformação espacial da Zona Portuária do Rio de Janeiro: o projeto Porto Maravilha como instrumento de segregação espacial. In: Congresso Brasileiro de Geógrafos, 7., 2014, Vitória. Anais [...]. Vitória: AGB, 2014.

YASIN, M. Y. *et al.*. Landsat observation of urban growth and land use change using NDVI and NDBI analysis. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 1067, 012037, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/1067/1/012037

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583-594, 2003. DOI: 10.1080/01431160304987

Sobre los Autores

Ayrton Durães Manso es Geógrafo por la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), especialista en Gestión Ambiental por el Instituto Federal de Río de Janeiro (IFRJ), magíster en Geografía por la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ) y actualmente doctorando en el Programa de Posgrado en Geociencias (UERJ). Desarrolla investigaciones en las áreas de teledetección, geoprocесamiento y modelación hidrológica, con énfasis en la escorrentía superficial y la erosión en laderas urbanas. También participa en proyectos de monitoreo ambiental y gestión territorial vinculados al Comité Piabanga.

Caio Gabriel Santana Bacelar es Geógrafo por la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), con énfasis en Pedología. Actualmente es estudiante de grado en Geofísica en la Universidad Federal Fluminense (UFF).

Alexandra de Souza Rodrigues es Licenciada en Historia por la Universidad Federal del Estado de Río de Janeiro (UNIRIO). Desarrolla investigaciones en el área de la Historia de Brasil, con énfasis en la esclavitud, las experiencias de mujeres y niños esclavizados y las dinámicas de libertad en los siglos XVIII y XIX.

Hugo Portocarrero es Geógrafo por la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), posee una maestría en Geografía Física por la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), un doctorado en Ingeniería Civil/Geotecnia por la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (PUC-Rio) y un posdoctorado en Ingeniería Civil/Geotecnia por la misma institución. Es Profesor Adjunto del Departamento de Geología Aplicada de la Facultad de Geología de la UERJ y profesor del plantel permanente de la Maestría Profesional en Red Nacional de Gestión y Regulación de Recursos Hídricos – ProfAgua.

Pablo Ritto Koehler es Geógrafo por la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) y posee una maestría en Ingeniería Ambiental por la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC). Es Director de Operaciones de la Compañía Carioca de Asociaciones e Inversiones (CCPar).

Contribuciones de los Autores

Conceptualización, [A.D.M., C.G.S.B.]; metodología, [A.D.M.]; software, [A.D.M.]; validación, [A.D.M., H.P.]; análisis formal, [A.D.M.]; investigación, [A.D.M., C.G.S.B.]; curaduría de datos, [A.D.M.]; redacción—preparación del borrador original, [A.D.M., A.S.R.]; redacción—revisión y edición, [A.D.M., C.G.S.B., A.S.R., H.P.]; supervisión, [H.P., P.R.K.]. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de Interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Sobre la Colección *Estudos Cariocas*

La *Coleção Estudos Cariocas* (ISSN 1984-7203) es una publicación dedicada a estudios e investigaciones sobre el Municipio de Río de Janeiro, vinculada al Instituto Pereira Passos (IPP) de la Secretaría Municipal de la Casa Civil de la Alcaldía de Río de Janeiro.

Su objetivo es divulgar la producción técnico-científica sobre temas relacionados con la ciudad de Río de Janeiro, incluyendo sus conexiones metropolitanas y su inserción en contextos regionales, nacionales e internacionales. La publicación está abierta a todos los investigadores (sean empleados municipales o no), abarcando áreas diversas — siempre que aborden, parcial o totalmente, el enfoque espacial de la ciudad de Río de Janeiro.

Los artículos también deben alinearse con los objetivos del Instituto, a saber:

1. promover y coordinar la intervención pública en el espacio urbano del Municipio;
2. proveer e integrar las actividades del sistema de información geográfica, cartográfica, monográfica y de datos estadísticos de la Ciudad;
3. apoyar el establecimiento de las directrices básicas para el desarrollo socioeconómico del Municipio.

Se dará especial énfasis a la articulación de los artículos con la propuesta de desarrollo económico de la ciudad. De este modo, se espera que los artículos multidisciplinarios enviados a la revista respondan a las necesidades de desarrollo urbano de Río de Janeiro.