



EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL Y ÁREA CONSTRUIDA EN LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA (ARGENTINA), EN EL PERIODO 2018-2022

Juan Pablo CELEMÍN

Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales (CONICET-UNCPBA). Argentina
jpcelemin@conicet.gov.ar

María Eugenia ARIAS

Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales (CONICET-UNCPBA). Argentina
me.arias@conicet.gov.ar

Recibido: 22 de marzo del 2023

Enviado a evaluar: 23 de marzo del 2023

Aceptado: 22 de junio del 2023

RESUMEN

El crecimiento y densificación de las ciudades tiene un impacto tangible sobre el ambiente local. En este marco se analizó la evolución de la cobertura vegetal (NDVI) y de área construida (NDBI) en la ciudad de Mar del Plata (Argentina) utilizando imágenes del satélite Sentinel 2 procesadas a través de la plataforma online de Google Earth Engine. Los resultados muestran una tendencia decreciente en el NDVI y un aumento del NDBI, existiendo una alta correlación entre ambas variables. Aunque el análisis temporal es acotado debido a que las imágenes del satélite utilizado solo están disponibles desde fines de 2018, estos resultados muestran como el impacto de la urbanización afecta a la vegetación local, constituyendo, de esta manera en una valiosa herramienta para la gestión del ambiente urbana.

Palabras clave: Análisis temporal, Sentinel 2, NDVI, NDBI, Google Earth Engine, Mar del Plata s.

EVOLUTION OF VEGETATION COVER AND BUILT-UP AREA IN THE CITY OF MAR DEL PLATA (ARGENTINA) IN THE PERIOD 2018-2022

ABSTRACT

The growth and densification of cities have an impact on the local environment. In this context, the evolution of vegetation coverage (NDVI) and built-up area (NDBI) in the city of Mar del Plata (Argentina) was analyzed using Sentinel 2 satellite images processed through the online platform of Google Earth Engine. The results show a decreasing trend in NDVI and an increasing trend in NDBI, with a high correlation between both variables. Although the temporal analysis is limited

because the satellite images used are only available since late 2018, these results show how the impact of urbanization affects the local vegetation, constituting, in this way, a valuable tool for the management of the urban environment.

Keywords: Temporal analysis, Sentinel 2, NDVI, NDBI, Google Earth Engine. Mar del Plata.

ÉVOLUTION DU COUVERT VÉGÉTAL ET DE LA ZONE HABITÉE DANS LA VILLE DE MAR DEL PLATA (ARGENTINE) PENDANT LA PÉRIODE 2018-2022

RÉSUMÉ

La croissance et la densification des villes ont un impact sur l'environnement local. Dans ce contexte, l'évolution de la couverture végétale (NDVI) et de la zone construite (NDBI) dans la ville de Mar del Plata (Argentine) a été analysée à l'aide d'images satellites Sentinel 2 traitées via la plateforme en ligne Google Earth Engine. Les résultats montrent une tendance à la baisse du NDVI et une tendance à la hausse du NDBI, avec une forte corrélation entre les deux variables. Bien que l'analyse temporelle soit limitée en raison du fait que les images satellites utilisées ne sont disponibles que depuis la fin de 2018, ces résultats montrent comment l'impact de l'urbanisation affecte la végétation locale, constituant ainsi un outil précieux pour la gestion de l'environnement urbain.

Mots-clés: Analyse temporelle, Sentinel 2, NDVI, NDBI, Google Earth Engine, Mar del Plata.

1. INTRODUCCIÓN

Las ciudades de América Latina concentran el poder económico, político y administrativo y se estima que más del 80 % de la población de la región reside en metrópolis. Esta urbanización ha ocurrido de forma más bien espontánea, regida por mecanismos de mercado, y produciendo territorios urbanos sin planificación o visión de largo plazo que ha ocasionado desequilibrios regionales en la mayoría de los países de la región. Este proceso propició la generación de nuevas periferias urbanas, generalmente sin planificación con su consecuente impacto ambiental, deseconomías y disminución en la calidad de vida (Montero et al., 2017). Actualmente la inercia del crecimiento urbano se ha desacelerado, dando lugar a un modelo híbrido en el que conviven la densificación urbana (principalmente en las zonas centrales de las ciudades) y la expansión en superficie a partir de la creación de nuevos suburbios, más lejanos, donde predomina la construcción progresiva de viviendas y que se encuentra generalmente asociado a los sectores de menos recursos. En este contexto, mientras las zonas centrales de las ciudades han adquirido fuerza territorial, atrayendo al sector terciario, y generando al mismo tiempo, una zona de actividad comercial y de servicios, además de la construcción de edificios de viviendas, también crecen los barrios unifamiliares en su periferia en un proceso que no necesariamente ocurre de manera planificada (Ferro, 2001). Por tanto, en el proceso de urbanización de la región coexisten una densificación y expansión simultáneas de la cobertura urbana (Gaw & Richards, 2021). Aunque el crecimiento urbano es entendido como necesario para una economía sostenible, el crecimiento urbano descontrolado o en expansión puede causar varios problemas, como pérdida de espacios abiertos, alteración del paisaje, contaminación ambiental,

congestión del tráfico, presión de la infraestructura y otros problemas sociales y económicos (Nolè et al., 2013). De esta manera, en la región, la urbanización es uno de los principales factores antropogénicos que ha causado la reducción de la superficie vegetal en zonas urbanas y la sustitución de los hábitats preexistentes en las ciudades (Berkowitz et al., 2003).

La densificación es un enfoque común para hacer frente al rápido crecimiento que tiene como objetivo limitar la expansión del área edificada en tierras agrícolas y paisajes naturales en las afueras mediante la creación de espacio habitable adicional dentro de áreas ya construidas (Sorensen et al., 2016) y puede entenderse como una oportunidad para el desarrollo urbano sostenible, ya que promueve la eficiencia de los recursos y el transporte, mientras que las tierras no desarrolladas fuera de la ciudad se pueden preservar como entorno natural (Emilsson & Sang, 2017). Las ciudades densas son una opción racional para un mundo cada vez más urbano, donde las preocupaciones sobre la sostenibilidad ambiental y la expansión urbana son primordiales (UN-Habitat, 2012). Entre sus muchas ventajas, las ciudades densas además de ayudar a preservar tierras rurales fértiles como se mencionó con anterioridad, también disminuyen la duración general de los desplazamientos y contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero Libertun de Duren & Campeán (2016). No obstante, no deja de tener efectos negativos ya que este proceso suele implicar la pérdida de espacios verdes con impactos ambientales negativos como la alteración de los patrones del viento y de temperatura (Pauleit et al., 2005; Fontenelle et al., 2015; Lemonsu et al., 2015).

La relación entre la dinámica urbana y la dinámica de las comunidades vegetales implica procesos con características complejas en la cual el crecimiento demográfico está asociado al descenso de la cobertura vegetal, particularmente en zonas urbanas. Un trabajo a escala global enfocado en la cobertura vegetal urbana (Richards & Belcher, 2019) demuestra como disminuyó en la mayoría de las áreas urbanas entre 2000 y 2015, principalmente en los países menos desarrollados mientras que, por el contrario, la cobertura vegetal proporcional aumentó en algunas áreas urbanas en el este de América del Norte y partes de Europa. Las ciudades de América Latina exponen altas tasas de urbanización y procesos de creación de nuevas periferias urbanas, con pérdida de cobertura vegetal que impacta negativamente en la sostenibilidad urbana. Por eso, la planificación urbana debe desempeñar un papel no solo para facilitar la creación de espacios verdes u otros espacios públicos capaces de albergar vegetación, pero también de formar una estructura urbana apoyado por normativas que faciliten la plantación y mantenimiento de vegetación en espacios privados (De la Barrera & Henríquez, 2017).

Medir los cambios de uso de suelo es un indicador útil y para determinar la magnitud del impacto de las actividades humanas en el territorio, además de ser un factor destacable en la de pérdida de biodiversidad y degradación de la tierra, aunque registra variaciones según la región y ubicación geográfica (Zurqani et al., 2019). En los países desarrollados suele haber una planificación territorial más eficiente, mientras que, en América Latina es más caótica, al encontrarse zonas con algún grado de planificación y otras con crecimiento sin control alguno. Una de las maneras de medir estos cambios es por medio del uso de imágenes satelitales que permiten realizar un seguimiento temporal de los usos de un espacio determinado. Uno de los indicadores más habituales para estudiar en el contexto de la expansión y densificación urbana es el estado de la vegetación a partir del Índice Normal

Diferencial Normalizado, más conocido como NDVI, por sus siglas en inglés. La vegetación urbana brinda cuantiosos beneficios que mejoran tanto la calidad del ambiente como las condiciones de vida de la población residente que se observan en cuatro ámbitos distintos: en la parte social, al mejorar la calidad de vida de las personas, creando entornos más confortables para la convivencia, el desarrollo de actividades deportivas y la generación de identidad y comunidad. En relación al ambiente urbano, se incluyen múltiples servicios ambientales como la reducción de la temperatura y del ruido, además de disminuir las inundaciones, entre otros. Asimismo, se produce un acrecentamiento de la salud física y mental de las personas, así como la reducción del estrés. Por último, en el aspecto económico, al mejorar la calidad ambiental de las ciudades se genera un incremento en el valor de las propiedades (Nowak et al., 2018).

Hay otros indicadores que también pueden ser obtenidos a partir de imágenes satelitales y que permiten conocer la evolución de la superficie construida de una localidad. Se los suele conocer como *built-up* índices y se pueden encontrar varios en la literatura científica. Entre ellos el más utilizado es conocido como NDBI (Índice de Diferencia Normalizada Construida) que posee una estructura simple y similar en su implementación a la del NDVI. El mismo normaliza las bandas NIR (infrarrojo cercano) y SWIR (infrarrojos de onda corta) aprovechando la correlación inversa entre ambas bandas en áreas construidas. Este procedimiento se basa en el hecho de que las áreas urbanas y de suelo desnudo tienen una reflectividad baja en la banda NIR, pero una reflectividad relativamente alta en las bandas SWIR. A partir de la aparición de imágenes de satélites de mayor resolución espacial varios trabajos han comenzado a aplicarlo para estudios urbanos, conjuntamente con el NDVI.

El análisis de base de datos de imágenes satelitales basado en series temporales constituye una base sólida e importante para la detección de tendencias y cambios a largo plazo en el uso y la cobertura de la tierra (Sidhu et al., 2018). En la actualidad existen numerosas plataformas satelitales que registran información terrestre, diseminadas en diferentes repositorios. Esto da lugar no solo a una amplia variedad de datos, sino que también hace imperativo manejar estos grandes volúmenes de datos de manera eficiente. Por lo tanto, ahora los cambios en el uso de la tierra se pueden medir no solo en dos o tres instantáneas de tiempo, sino de manera continua a lo largo de grandes intervalos de tiempo.

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de procesamiento geoespacial basada en la nube para el monitoreo y análisis ambiental a gran escala. La plataforma GEE de uso gratuito proporciona acceso a: (1) petabytes de imágenes disponibles públicamente y otros productos listos para usar con una aplicación web de exploración; (2) procesamiento paralelo de alta velocidad y algoritmos de aprendizaje automático que utilizan la infraestructura informática de *Google*; y (3) una biblioteca de interfaces de programación de aplicaciones (API) con entornos de desarrollo que admiten lenguajes de codificación populares, como JavaScript y Python (Tamiminia et al., 2020). Consiguientemente, la aparición de esta plataforma de procesamiento de datos, sumado a la existencia de catálogos de imágenes satelitales de mayor resolución espacial, numerosos trabajos han comenzado a aplicarlo para estudios urbanos, algunos de ellos vinculados directamente con el NDVI local (Huang et al., 2017; Duan et al., 2019; Aryal et al., 2022).

El propósito inicial de este trabajo es utilizar el *Google Earth Engine* (GEE) para procesar el enorme Big Data satelital gratuito de Observación de la Tierra que dispone para el monitoreo temporal del NDVI y NDBI en un estudio de caso aplicado a la ciudad de Mar del Plata a partir de imágenes de alta resolución provistas por Sentinel 2 desde su puesta en funcionamiento y hasta la actualidad. Dado que su entrada en servicio es relativamente reciente, el período temporal es de pocos años por lo que el presente trabajo tiene un carácter más bien exploratorio y descriptivo dado que no abarca un período suficientemente grande. Además, el artículo enfatiza sobre las potencialidades y limitaciones de esta herramienta relativamente novedosa y con pocas aplicaciones en los estudios urbanos latinoamericanos. Aunque existen métodos de armonización para compatibilizar satélites de diferentes plataformas (Sentinel con Landsat, por ejemplo) para abarcar una escala temporal mayor, los resultados no siempre son satisfactorios, al producirse fluctuaciones en los indicadores en las mediciones al momento del empalme.

2. ÁREA DE ESTUDIO

Definir los límites de una ciudad es siempre difícil dado que existe una zona difusa entre lo urbano y lo rural.

Figura 1. Localización de la ciudad de Mar del Plata



Fuente: Elaboración propia.

Para este caso se toma la zona urbana consolidada de la ciudad de Mar del Plata (Figura 1) excluyendo las áreas periurbanas, tal como las definen Zulaica & Ferraro (2016). Mar del Plata es una ciudad localizada en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, sobre la costa del

Océano Atlántico. Es la cabecera del partido de General Pueyrredón, posee un destacado puerto y balneario y es uno de los principales destinos turísticos del país. El clima de Mar del Plata es templado oceánico, con precipitaciones abundantes durante todo el año y posee una población de más de 600.000 habitantes.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Sentinel 2 es una misión de observación terrestre desarrollada por la Agencia Espacial Europea dentro del programa Copérnico para desarrollar observaciones del planeta Tierra para proveer servicios tales como el seguimiento de la evolución de los bosques, los cambios en la corteza terrestre y la gestión de los desastres naturales. El satélite Sentinel 2 B puesto en órbita en el año 2017 como parte del Programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, con una órbita que se desfasa 180° en relación a su antecesor, el Sentinel 2A puesto en órbita en 2015. El satélite lleva un generador de imágenes multispectrales de alta resolución de franja ancha con 13 bandas espectrales. Este mismo posee una resolución espacial mayor que la del Landsat 8 (Tabla 1), y sus datos en el repositorio de GEE poseen la reflectancia superficial corregida atmosféricamente (Level 2A). La frecuencia temporal de cada satélite Sentinel 2 es de 10 días y la revisión de la constelación combinada es de 5 días (European Space Agency, 2022). Esto permite obtener un volumen importante de imágenes a pesar de los pocos años que lleva en órbita. En este estudio, la primera imagen disponible de este satélite corresponde a diciembre de 2018.

La forma en que se puede establecer la cantidad y estado de la vegetación es a través del uso de imágenes satelitales que permiten obtener diferentes índices, entre los que se destaca el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI) que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde NIR es la reflectividad en el infrarrojo cercano (banda 8 del Sentinel 2) y R es la reflectividad en el rojo (banda 4 del Sentinel 2). El rango de valores del índice está delimitado por el rango -1 y 1 y cuánto más cercano está a 1 mayor es la presencia de vegetación saludable en un lugar.

Por su parte, el NDBI se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

Donde SWIR es la reflectividad en el infrarrojo de onda corta (banda 11 del Sentinel 2) y el NIR es la reflectividad en el infrarrojo cercano (banda 8 del Sentinel 2). Como se puede observar con el índice anterior, ambos son fáciles de implementar y se encuentran normalizados.

Tabla 1. Características de las bandas del satélite Sentinel 2

| Sentinel-2 Bandas | Longitud central de onda (μm) | Resolución (m) |
|-------------------------------|--|----------------|
| Band 1 - Coastal aerosol | 0.443 | 60 |
| Band 2 - Blue | 0.49 | 10 |
| Band 3 - Green | 0.56 | 10 |
| Band 4 - Red | 0.665 | 10 |
| Band 5 - Vegetation Red Edge | 0.705 | 20 |
| Band 6 - Vegetation Red Edge | 0.74 | 20 |
| Band 7 - Vegetation Red Edge | 0.783 | 20 |
| Band 8 - NIR | 0.842 | 10 |
| Band 8A - Vegetation Red Edge | 0.865 | 20 |
| Band 9 - Water vapour | 0.945 | 60 |
| Band 10 - SWIR - Cirrus | 1.375 | 60 |
| Band 11 - SWIR | 1.610 | 20 |

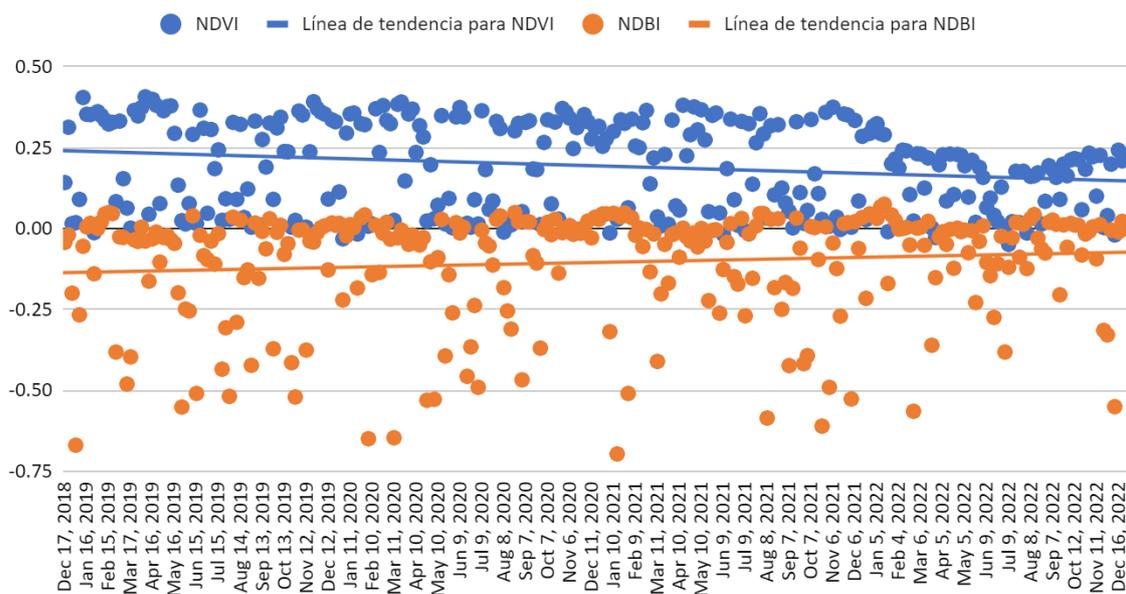
Fuente: European Space Agency. Sentinel 2 *Online*.

Todo el procesamiento de datos se realizó utilizando la tecnología de computación en la nube en la plataforma GEE (<https://earthengine.google.org/>). Para ello se diseñaron dos *scripts*: uno para la obtención del NDVI y otro para el NDBI. En ambos casos las imágenes seleccionadas fueron filtradas para solo utilizar aquellas sin presencia de nubes. Finalmente, se obtuvo la media de ambos índices para cada una de las fechas disponibles en la zona de estudio por medio del comando *ReduceMean*. El período de estudio comprende desde fines de 2018 hasta fines del año 2022.

4. RESULTADOS

El procesamiento de las imágenes a partir de la plataforma de GEE permitió obtener el NDVI y NDBI para un total de 292 imágenes, de las cuales la primera corresponde al 17 de diciembre de 2018 y la última al 26 de diciembre de 2022 (Figura 2).

Figura 2. Evolución del NDVI y NDBI en el período diciembre 2018 - diciembre 2022 para la ciudad de Mar del Plata



Fuente: Elaboración personal en base a datos del satélite Sentinel 2 obtenidos con Google Earth Engine.

En ese período se observa una tendencia decreciente de NDVI para la zona de estudio con una media global de 0.194. Por su parte, el NDBI registra una tendencia opuesta, con un valor global promedio de -0.105. Asimismo, se observa una correlación alta entre ambas variables $R^2 = 0.73$.

5. DISCUSIÓN

Los procesos de urbanización que descuida los ambientes naturales representan una amenaza para la calidad del ambiente urbano y, por lo tanto, la calidad de vida de los habitantes (Rincón et al, 2018) y los resultados del presente estudio, aunque iniciales, se enmarca en este contexto de pérdida de cobertura vegetal urbana y que no difiere de lo que ocurre en otras localidades del país. En varias ciudades de la región de Cuyo (Argentina) el trabajo realizado por Arboit & Maglione (2018) muestra cómo el crecimiento demográfico se relaciona con la disminución del NDVI, mientras que para la ciudad de Bahía Blanca se muestra la disminución del NDVI en una serie temporal de 26 años (Ferrelli et al. 2016). Por su parte, un estudio enfocado en doce ciudades del norte de la Argentina (Paolini et al., 2016) muestra que la dinámica de crecimiento en esta zona del país está dominada por patrones de expansión más que por una densificación homogénea (aunque ambos procesos coexisten en mayor o menor medida). Para América Latina se puede mencionar el trabajo de Vega et al. (2019) que registra una pérdida considerable de cobertura vegetal mediante la estimación de NDVI para áreas urbanas de la ciudad de Iquitos (Perú) entre los años 1999-2009. Otro caso reciente es en la ciudad de Medellín, analizada en el período 1986-2016 en el que se registra mayor pérdida de vegetación en la zona más densa de la localidad (Soto-Estrada, 2019). Similares resultados son los presentados por De Carvalho y Szlafsztein (2018) en un estudio de caso de la ciudad de Belém (Brasil) para el período 1986-2009 utilizando imágenes Landsat 5 TM.

Aunque la aplicación de índices de construcción como el NDBI tiene la limitación de mezclar, hasta cierto punto las zonas edificadas y las de suelo desnudo en zonas áridas y semi-áridas, pero, por otro lado, son fáciles de implementar (Sinha et al., 2016). Además, estudios recientes han demostrado que el uso de índices de construcción y que recurren a las bandas SWIR es más efectivo para detectar áreas construidas ya que les permite distinguirse de otros usos de la tierra. En nuestro relevamiento bibliográfico encontramos muy poca producción que aplique NDBI en la Argentina, con las salvedades de los trabajos referidos a ciudades de la provincia de Santa Fe para las ciudades de Santa Fe y Rosario, (Chiarito et al., 2018) que vinculan diferentes índices de construcción con la escorrentía en dichas ciudades y con la temperatura (Chiarito y Chiarito, 2018). Por su parte, Celemin y Arais (2022) realizan utilizan otro indicador de superficie construida similar al NDBI conocido como *Urban Index* (UI) para un barrio de la ciudad de Santiago del Estero. En América Latina hay más trabajos sobre el tema tales como como los de De Oliveira et al 2021 para un municipio en Brasil y el de Preciado-Barragán et al. (2021) para un municipio de Colombia. Es de esperar que con el satélite Sentinel 2 y su mayor resolución espacial aumente la cantidad de estudios netamente urbanos ya sea para estudios de vegetación y/o de superficie construida. Lo mismo es de esperar con el uso de GEE dado que aún predominan estudios temporales basados en la clasificación de imágenes en dos o tres fechas, en lugar de los datos continuos que puede aportar la plataforma.

El creciente uso del NDBI se ha constituido un indicador relevante para los estudios urbanos, ya que brinda información precisa sobre el cambio de la tierra a lo largo del tiempo y se puede calcular rápidamente a partir de datos satelitales (Xi et al., 2019) y, a diferencia de NDVI que depende y varía con las condiciones climáticas, los índices de áreas construidas permanecen más constantes durante todo el año (Kumari et al., 2020). Su aplicación es sencilla, ya sea con Sentinel o con satélites de la serie Landsat y, aunque éstos últimos permiten hacer un seguimiento temporal más largo, el Sentinel 2, al ser puesto en órbita con posterioridad, puede realizar un estudio temporal de menos años, pero con una resolución espacial mayor. Una limitación particular de este satélite es que carece de una banda térmica, lo que dificulta su aplicación en estudios vinculados con la isla de calor urbana, por ejemplo. Es por ello, que varios de los trabajos que utilizan NDBI en relación a la temperatura en el interior de las ciudades deben recurrir a satélites Landsat para llevar a cabo la relación entre ambas variables, con la consiguiente pérdida de resolución temporal y espacial que posee el satélite Sentinel 2.

Por otra parte, cabe destacar que los pocos años que lleva en órbita el satélite permite un estudio temporal acotado, por lo que los resultados hay que considerarlos inicialmente de manera exploratoria y descriptiva. Sin embargo, la aplicación de la metodología para este satélite es promisoriosa y podrá ser ampliada en el futuro a medida que se sumen nuevas imágenes a su catálogo en el GEE. Los resultados iniciales muestran con claridad que la pendiente la disminución del NDVI a la vez que el NDBI registra un comportamiento ascendente en el mismo lapso temporal lo que permite establecer un vínculo directo en el comportamiento entre ambas variables.

La limitación temporal del uso de datos del satélite Sentinel 2 puede ser superada al combinar sus datos con otros obtenidos del satélite Landsat con la finalidad de obtener series temporales más largas, tal como lo demuestran trabajos recientes (Bolton et al., 2020; Shao et al., 2020, entre otros). Pocas publicaciones hacen referencia a la necesidad de adaptar los

conjuntos de datos obtenidos con diferentes satélites para poder realizar una "armonización" eficiente. No obstante, dicho proceso no siempre resulta de forma satisfactoria, dando lugar a varias discusiones y propuestas complejas para combinar los datos de diferentes satélites (Roy et al., 2016; Vogeler et al., 2018; Nguyen et al., 2020). Por otra parte, el rango espectral del Sentinel 2 y el Landsat 8 no es igual para sus bandas, lo que implica un cuidado aún mayor al momento de combinar ambas series de datos. Por ejemplo, el NIR del Landsat 8 OLI/TIRS está en el rango de 0,851–0,879 μm de longitud de onda, mientras que la misma banda en el Sentinel 2 se encuentra en el rango 0,785–0,899 μm de longitud de onda (Cerasoli et al., 2018). Por lo tanto, es necesario enfatizar las limitaciones de los procedimientos de armonización los datos entre satélites (o trabajar con uno sólo, como en este caso) y tomar recaudos con las conclusiones obtenidas en aquellos que no la realizan.

6. CONCLUSIONES

Las ciudades latinoamericanas se caracterizan por contar con las mayores tasas de urbanización de todo el mundo, generando un proceso en el territorio que se presenta de dos maneras: la densificación y la expansión de las ciudades, con su consiguiente impacto ambiental, principalmente observado en la pérdida de la vegetación. Los estudios urbanos que realizan un seguimiento de la vegetación y de la superficie construida se ven favorecidos por dos herramientas recientes: el satélite Sentinel 2 que posee una resolución espacial mayor a la de otros satélites y la plataforma GEE que permite acceder a datos de este satélite de manera continua desde su puesta en órbita. Así, se pueden generar dos índices, el NDVI para medir la vegetación y el NDBI para las áreas construidas. Los resultados aplicados a la ciudad de Mar del Plata muestran una tendencia decreciente para el primero, y una tendencia en aumento para el segundo. No obstante, el breve periodo en consideración -cinco años- hace que el estudio sea más bien de carácter exploratorio, necesitando más años para poder establecer un vínculo más robusto entre los dos índices para el área de estudio.

Por último, se destaca la potencialidad de las nuevas herramientas para la obtención y análisis de datos de cómo el GEE que abren nuevas oportunidades de procesamiento y análisis de gran volumen de información, siendo de gran utilidad tanto para la actividad académica como para la gestión del territorio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ARBOIT, M.E. & MAGLIONE, D.S. Análisis multitemporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas seco. *Boletín de Estudios geográficos*, 2018, N° 109. Disponible en Internet: <http://bdigital.uncu.edu.ar/app/navegador/?idobjeto=11458>
- ARYAL, J.; SITAULA, C. & ARYAL, S. NDVI Threshold-Based Urban Green Space Mapping from Sentinel-2A at the Local Governmental Area (LGA) Level of Victoria, Australia. *Land*, 2022, Vol. 11, N° 3. doi: <https://doi.org/10.3390/land11030351>
- BERKOWITZ, A.R.; NILON, C.H. & HOLLWEG, K.S. The importance of understanding urban ecosystems: Themes. En: BERKOWITZ A.R., NILON C.H. y HOLLWEG, K.S. (Eds.). *Understanding urban ecosystems - A new*

- frontier for science and education. New York, USA: Springer-Verlag, 2003, p.15-17.
- BOLTON, D.K.; GRAY, J.M.; MELAAS, E.K.; MOON, M.; EKLUNDH, L. & FRIEDL, M.A. Continental-scale land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 240. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111685>
- CELEMÍN, J.P. & ARIAS, M.E. Relationship between densification and NDVI loss. A study using the Google Earth Engine at local scale. *Environmental & Socio-economic Studies*, 2022, Vol. 10, N° 3. doi: <https://doi.org/10.2478/environ-2022-0015>
- CERASOLI, S.; CAMPAGNOLO, M.; FARIA, J.; NOGUEIRA, C. & CALDEIRA, M.D.C. On estimating the gross primary productivity of Mediterranean grasslands under different fertilization regimes using vegetation indices and hyperspectral reflectance. *Biogeosciences*, 2018, Vol. 15, N° 17. doi: <https://doi.org/10.5194/bg-15-5455-2018>
- CHIARITO, E.; ZIMMERMANN, E. & ZACARÍAS, S.M. Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección. *CUADERNOS DEL CURIHAM*, 2018, Vol. 24. doi: <https://doi.org/10.35305/curiham.v24i0.126>
- CHIARITO, G.L. & CHIARITO, E. Estudio satelital de isla de calor/frío en Rosario según temperaturas superficiales urbanas e indicadores temáticos de suelo. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2019, Vol. 43. Disponible en Internet: <http://portalderevistas.unsa.edu.ar/ojs/index.php/erma/article/view/987>
- DE CARVALHO, R.M. & SZLAFSZTEIN, C.F. Urban vegetation loss and ecosystem services: The influence on climate regulation and noise and air pollution. *Environmental Pollution*, 2019, Vol. 245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.114>
- DE LA BARRERA, F. & HENRÍQUEZ, C. Vegetation cover change in growing urban agglomerations in Chile. *Ecological Indicators*, 2017, Vol. 81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.067>
- DE OLIVEIRA, J.L.M.; de CERQUEIRA NETO, S.P.G. & da SILVA, J.B.L. Avaliação das mudanças no uso e ocupação do solo do Município de Eunápolis-BA através da análise da eficiência dos índices espectrais de NDVI, NDBI e Built-Up. *Brazilian Journal of Development*, 2021, Vol. 7, N° 9. doi: [10.34117/bjdv7n9-084](https://doi.org/10.34117/bjdv7n9-084)
- DUAN, Q.; TAN, M.; GUO, Y.; WANG, X. & XIN, L. Understanding the spatial distribution of urban forests in China using Sentinel-2 images with Google Earth Engine. *Forests*, 2019, Vol. 10, N° 9. doi: <https://doi.org/10.3390/f10090729>
- EMILSSON, T. & SANG, Á.O. Impacts of Climate Change on Urban Areas and Nature-Based Solutions for Adaptation. En: KABISCH, N., KORN, H. y STADLER, A.B. (Eds.), *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*. Cham, Switzerland: Springer Nature International Publishing. 2017, p. 15-27.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. Sentinel 2 Online. Disponible en Internet: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home> [Consultado 3 de diciembre de 2022].
- FERRELLI, F., HUAMANTINCO-CISNEROS, M.A., DELGADO, A.L. & PICCOLO, M.C. Spatial and temporal analysis of the LST-NDVI relationship for the study of land cover changes and their contribution to urban planning in Monte Hermoso, Argentina. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 2018, Vol. 64, N° 1. doi: <http://dx.doi.org/10.5565/rev/dag.355>
- FERRO, J.S. ¿Expansión o Densificación?: Reflexiones en Torno al caso Bogotá. *Revista Bitácora Urbano Territorial*, 2001, N° 5. Disponible en Internet: <https://www.redalyc.org/pdf/748/74800505.pdf>

- FONTENELLE, M.R.; LORENTE, S. & GONÇALVES BASTOS, L.E. The impact of urbanization on air flow pattern: the case of Rio de Janeiro. *International Journal of Green Energy*, 2015, Vol. 12, N° 9. doi: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.892005>
- GAW, L.Y.F. & RICHARDS, D.R. Development of spontaneous vegetation on reclaimed land in Singapore measured by NDVI. *Plos one*, 2021, Vol. 16, N° 1. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245220>
- HUANG, H.; CHEN, Y.; CLINTON, N.; WANG, J.; WANG, X.; LIU, C., ... & ZHU, Z. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.021>
- KUMARI, B.; TAYYAB, M.; AHMED, I.A.; BAIG, M.R.I.; KHAN, M.F. & RAHMAN, A. Longitudinal study of land surface temperature (LST) using mono-and split-window algorithms and its relationship with NDVI and NDBI over selected metro cities of India. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, Vol. 13, N° 1040. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06068-1>
- LEMONSU, A.; VIGUIE, V.; DANIEL, M. & MASSON, V. Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate*, 2015, Vol. 14, Parte 4. doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.007>
- LIBERTUN DE DUREN, N. & GUERRERO COMPEÁN, R. Growing resources for growing cities: Density and the cost of municipal public services in Latin America. *Urban Studies*, 2016, Vol. 53, N° 14. doi: <https://doi.org/10.1177/0042098015601579>
- MONTERO, L.; GARCÍA, J. & COOPERACIÓN REGIONAL FRANCESA. Panorama multidimensional del desarrollo urbano en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: CEPAL, 2017. Disponible en Internet: <https://hdl.handle.net/11362/41974>
- NGUYEN, M.D.; BAEZ-VILLANUEVA, O.M.; BUI, D.D.; NGUYEN, P.T. & RIBBE, L. Harmonization of landsat and sentinel 2 for crop monitoring in drought prone areas: Case studies of Ninh Thuan (Vietnam) and Bekaa (Lebanon). *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, N° 2. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12020281>
- NOLÉ, G.; LASAPONARA, R. & MURGANTE, B. Applying spatial autocorrelation techniques to multi-temporal satellite data for measuring urban sprawl. *International Journal of Environmental Protection*, 2013, Vol. 3, N° 7. Disponible en Internet: <https://iris.unibas.it/bitstream/11563/56840/1/IJEP10317-20130731-175641-5409-26545.pdf>
- NOWAK, D.J.; HIRABAYASHI, S.; DOYLE, M.; MCGOVERN, M. & PASHER, J. Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, Vol. 29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.019>
- PAOLINI, L.; ARÁOZ, E.; GIOIA, A. & POWELL, P.A. Vegetation productivity trends in response to urban dynamics. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, Vol. 17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.04.005>
- PAULEIT, S.; ENNOS, R. & GOLDING, Y. (2005). Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change - a study in Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2005, Vol. 71, N° 2-4. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.03.009>
- PRECIADO-BARRAGÁN, H. & SANABRIA-BUITRAGO, M. 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*, 2021, Vol. 9. doi: <https://doi.org/10.21158/23823399.v9.n0.2021.3179>

- RICHARDS, D.R. & BELCHER, R.N. Global changes in urban vegetation cover. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 12, N° 1. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12010023>
- ROY, D.P.; KOVALSKYY, V.; ZHANG, H.K.; VERMOTE, E.F.; YAN, L.; KUMAR, S.S. & EGOROV, A. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote sensing of Environment*, 2016, Vol. 185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024>
- SHAO, Z.; CAI, J.; FU, P.; HU, L. & LIU, T. Deep learning-based fusion of Landsat-8 and Sentinel-2 images for a harmonized surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111425>
- SIDHU, N.; PEBESMA, E. & CÂMARA, G. Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case. *European Journal of Remote Sensing*, 2018, Vol. 51, N° 1. Doi: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1451782>
- SINHA, P.; VERMA, N.K. & AYELE, E. Urban built-up area extraction and change detection of Adama municipal area using time-series Landsat images. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2016, Vol. 5, N° 8. Disponible en Internet: <http://technical.cloud-journals.com/index.php/IJARSG/article/view/Tech-649>
- SÖRENSEN, J.; PERSSON, A.; STERNUDD, C.; ASPEGREN, H.; NILSSON, J., NORDSTRÖM, J., ... & MOBINI, S. Re-thinking urban flood management—Time for a regime shift. *Water*, 2016, Vol. 8, N° 8. doi: <https://doi.org/10.3390/w8080332>
- SOTO-ESTRADA, E. Estimation of the urban heat island in Medellín, Colombia. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 2019, Vol. 35, N° 2. doi: <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.13>
- TAMIMINIA, H.; SALEHI, B.; MAHDIANPARI, M.; QUACKENBUSH, L.; ADELI, S. & BRISCO, B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, Vol. 164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- UN - HABITAT (United Nations Human Settlements Programme). *Leveraging Density: Urban Patterns for a Green Economy*. Nairobi: UN Habitat, 2012.
- VEGA, J.J.P.; ZÁRATE-GÓMEZ, R.; VELA, R.J.M.; BRAÑAS, M.M. & RIOS, J.E.B. Predicción de la pérdida de la cobertura vegetal por aumento de áreas urbanas en Iquitos, Perú. *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, 2019, Vol. 7, N° 1. doi: <http://dx.doi.org/10.22386/ca.v7i1.263>
- VOGELER, J.C.; BRAATEN, J.D.; SLESACK, R.A. & FALKOWSKI, M.J. Extracting the full value of the Landsat archive: Inter-sensor harmonization for the mapping of Minnesota forest canopy cover (1973–2015). *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.046>
- XI, Y.; THINH, N.X. & LI, C. Preliminary comparative assessment of various spectral indices for built-up land derived from Landsat-8 OLI and Sentinel-2A MSI imageries. *European Journal of Remote Sensing*, 2019, Vol. 52, N° 1. doi: <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1584737>
- ZULAICA, L. & FERRARO, R. (2016). Evolution of habitability conditions in mar del Plata Peri-urban area (1991, 2001, 2011). En: TONON, G. (Eds.). *Indicators of Quality of Life in Latin America*. Social Indicators Research Series. Switzerland: Springer, Cham, 2016, p. 219-233.
- ZURQANI, H.A.; POST, C.J.; MIKHAILOVA, E.A. & ALLEN, J.S. Mapping Urbanization Trends in a Forested Landscape Using Google Earth Engine. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 2019, Vol. 2. doi: <https://doi.org/10.1007/s41976-019-00020-y9>