

Análisis de la variación temporal entre áreas verdes y construidas usando imágenes satelitales. Caso de estudio: crecimiento urbano de Otavalo (Ecuador)

Guzmán Chávez Guillermo Geovanny¹, Ortiz Almeida Alexandra Patricia¹, Sánchez García Juan Andrés²

¹Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra

²Universidad Veracruzana, México

Autor para correspondencia: ggguzman@pucesi.edu.ec

Recibido: 2024/10/11

Aprobado: 2024/11/30

DOI: <https://doi.org/10.26621/ra.v1i31.977>

RESUMEN

Este estudio examina el impacto del crecimiento urbano en las áreas verdes de Otavalo, Ecuador, a través de un análisis multitemporal utilizando imágenes satelitales y técnicas de teledetección. Los índices espectrales, como el Normalized Difference Vegetation Index y el Normalized Difference Built-up Index, se aplicaron a imágenes Landsat 8 para detectar cambios en la cobertura vegetal y las áreas edificadas en los años analizados. Los resultados muestran una expansión significativa de las áreas construidas, acompañada de una drástica disminución de las áreas verdes, lo que subraya la necesidad de políticas urbanas sostenibles. Se concluye que la planificación territorial debe priorizar la protección de los espacios verdes para mitigar los impactos negativos del crecimiento urbano no planificado en Otavalo.

Palabras clave: crecimiento urbano, teledetección, imágenes satelitales, Otavalo, área verde, área construida

ABSTRACT

This study examines the impact of urban growth on green areas in Otavalo, Ecuador, through a multitemporal analysis using satellite imagery and remote sensing techniques. Spectral indices, such as the Normalized Difference Vegetation Index and the Normalized Difference Built-up Index, were applied to Landsat 8 images to detect changes in vegetation cover and built-up areas over the year analyzed. The results show a significant expansion of built-up areas, accompanied by a sharp decline in green spaces, highlighting the need for sustainable urban policies. It is concluded that territorial planning must prioritize the protection of green spaces to mitigate the negative impacts of unplanned urban growth in Otavalo.

Keywords: urban growth, remote sensing, satellite images, Otavalo, green area, built area

Guzmán Chávez, Guillermo Geovanny  orcid.org/0009-0000-7848-949X

Ortiz Almeida Alexandra Patricia  orcid.org/0009-0008-0154-8605

Sánchez García Juan Andrés  orcid.org/0000-0003-2217-2711



INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano conlleva una de las principales transformaciones del paisaje natural, implicando una alteración y destrucción significativa del medio ambiente (León, 2016). A medida que las ciudades se expanden, las áreas naturales son reemplazadas por infraestructuras; en consecuencia, se genera una transformación de los ecosistemas naturales en entornos urbanos. El paisaje rural preexistente se modifica drásticamente; deja de ser analizado en términos botánicos, edafológicos y geomorfológicos, para ser interpretado desde una perspectiva urbano-territorial. Esta dinámica conduce a que la ciudad sea percibida como una negociación de la naturaleza por la sociedad (Jensen, 2019).

El objetivo de esta investigación es analizar los cambios espaciales en la configuración territorial entre áreas verdes y construidas en Otavalo, utilizando imágenes satelitales Landsat 8, herramientas de teledetección y análisis geoespacial para identificar las tendencias de expansión urbana entre 2013 y 2023. Se espera que los resultados proporcionen un entendimiento claro de cómo ha evolucionado el paisaje urbano de Otavalo, revelando la magnitud de la pérdida de áreas verdes y su impacto en el ambiente natural. Estos datos son necesarios para formular estrategias de conservación y reurbanización sostenible que permitan mitigar los efectos del crecimiento urbano descontrolado.

De igual manera, el ritmo de crecimiento de las ciudades se ha acelerado desde la década de 1950 y actualmente el 55 % de la población mundial vive en ellas. La tendencia para el año 2050 es que este porcentaje se incremente y que 7 de cada 10 habitantes se establezcan en las ciudades (Duval y Ramos, 2023). Por tanto, con este incremento del porcentaje de población que vive en las ciudades, se estimulará la expansión urbana desmedida, cuyo crecimiento se ha dado a partir de una ciudad central hacia las periferias. De esta forma, se establecen nuevos patrones de crecimiento con las siguientes características: dispersión urbana, ocupación discontinua, baja densidad, bordes urbanos difusos y carencia de límites, que han originado una expansión de forma espontánea y desorganizada en el territorio (Usach y Freddo, 2015), ocasionando cambios extremos en la pérdida de cobertura vegetal.

Por otro lado, la gestión de las áreas urbanas y la formación de ciudades más sostenibles son algunos de los retos más importantes para la humanidad (Pelorosso, 2020). Con esta premisa, el Ecuador ha desarrollado instrumentos que tratan de mitigar estos retos. Así, el marco normativo que define la creación del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) se encuentra establecido en la Constitución de la República del Ecuador de 2008 y en la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo (LOOTUGS), que fue aprobada en 2010 y entró en vigencia en 2011; en este marco se establecen principios, objetivos, estrategias y mecanismos para el ordenamiento del territorio, la gestión y el uso sostenible del suelo.

Es destacable el desarrollo de estudios y análisis usando imágenes satelitales, que permiten analizar cambios en el uso del suelo, especialmente en áreas de rápida expansión urbana (Abu Hatab et al., 2019). Sin embargo, ante la falta de datos fidedignos y oficiales, así como de una política institucional sobre datos abiertos, en Ecuador ha estado limitado el desarrollo de este tipo de estudios, lo que resalta la importancia de aplicar estas tecnologías para entender de manera consciente y analítica los desafíos de ciudades como Otavalo.

Características del área de estudio

Geográficamente, el cantón Otavalo está localizado en el sector sureste de la provincia de Imbabura, Ecuador, ubicado en un valle andino a una altitud de 2565 m s.n.m y a una distancia de 20 km de la capital provincial. La demarcación territorial del cantón comprende la ciudad de Otavalo, dos parroquias urbanas (San Luis y el Jordán) y nueve parroquias rurales (González Suárez, San Pablo del Lago, San Juan de Ilumán, Eugenio Espejo, San José de Quichinche, San Rafael, San Pedro de Pataquí, Dr. Miguel Egas Cabezas y Selva Alegre). En cuanto a su limitación territorial, al norte linda con los cantones de Antonio Ante, Cotacachi e Ibarra; al sur, con el cantón Quito; al este, con los cantones de Ibarra y Cayambe, y al oeste, con los cantones de Quito y Cotacachi (Espinoza y Goyes, 2022).

Áreas verdes como parte de la ciudad

Los factores ambientales, que incluyen las condiciones biofísicas, geomorfológicas, hidrogeológicas y ecológicas, constituyen la matriz biofísica de un espacio en particular. La importancia de considerar dichas características del suelo durante la etapa de planificación de los proyectos de diseño urbano radica en la capacidad de reconocer potencialidades y limitaciones entre las actividades atípicas que coexisten e interactúan entre sí para producir efectos tales como adición-yuxtaposición, fragmentación, inversión, interconexión, etc. De esta forma, se pueden prevenir disfunciones ambientales, tales como las inundaciones imprevistas, la pérdida de recursos hídricos, la erosión de tierras agrícolas y la dificultad para mantener la conectividad biótica (Folch y Bru, 2017).

Por otro lado, la expansión urbana se ha transformado en la primordial dificultad en términos de planificación, debido a su impacto en los recursos ambientales y el agotamiento de estos, lo que afecta significativamente a la vida en las zonas urbanas y rurales. Así, la consunción de los recursos naturales es uno de los problemas más relevantes relacionados con la expansión urbana. Además, la mancha urbana ha crecido en dirección a los núcleos rurales, fusionándose en una sola área urbana; esto ha afectado a los hitos geográficos y culturales de las distintas zonas, degradando áreas agrícolas y ecológicas. En consecuencia, se ha abusado de los recursos naturales y ha crecido la contaminación del ambiente natural; en este sentido, Otavalo está sufriendo los impactos negativos del crecimiento urbano, ya que la permutación en el uso del suelo ha llevado a la degradación de los recursos naturales (Flores y Chica, 2016).

Crecimiento urbano en Otavalo

El crecimiento urbano de Otavalo surge por el desarrollo económico, que tiene su origen en los "mindalaes", establecidos desde los años cincuenta (Atupaña et al., 2017); estos comerciantes fueron quienes se encargaron de realizar viajes a nivel nacional e internacional, ofreciendo sus productos y logrando posicionar el cantón. Paralelamente a este crecimiento, la acumulación de capital generado por la producción artesanal y agrícola impulsó un proceso de urbanización, sustentado por la comercialización y la demanda de terrenos urbanos (Bernal et al., 2022). Se generó así una dispersión en el territorio, expresado en el incremento de edificaciones, que implicó una reducción de las áreas verdes.

De esta manera, el crecimiento no planificado de Otavalo provocó que la ciudad pasara de ser compacta (desde sus inicios hasta aproximadamente 1970) a ser una ciudad dispersa, debido al

fraccionamiento y a la división del latifundio y minifundio en lotes para la repartición de tierras dentro de la familia. Como resultado, se produjo una segregación del territorio, acompañada de la degeneración del espacio urbanizado y la creación de rupturas. Este modelo se ha mantenido en el tiempo, promoviendo que las tierras continúen su proceso de fraccionamiento y que la ciudad crezca longitudinalmente y no en altitud (Espinoza y Goyes, 2022).



Figura 1. Crecimiento histórico de la ciudad de Otavalo
Fuente. Crecimiento urbano de Otavalo de 1883 a 2014, por X. Espinoza, 2022. <https://dspace.palermo.edu/ojs/index.php/cdc/article/view/6671/10490>

MÉTODOS

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, basado en el análisis de imágenes satelitales para medir cambios en la cobertura de áreas verdes y edificadas a lo largo del tiempo, con un diseño no experimental longitudinal. Para realizar el análisis del crecimiento urbano en Otavalo y la valoración de los cambios en los periodos de tiempo establecidos, se usaron técnicas de teledetección que permiten monitorear la superficie terrestre, especificando los cambios del suelo en un periodo de tiempo (Salas et al., 2019). Como elementos necesarios para el procesamiento se emplearon los siguientes:

- Imágenes satelitales
- Software QGIS
- Correcciones atmosféricas
- Índices espectrales

Imágenes satelitales Landsat 8

Se descargaron las imágenes satelitales Landsat 8 del sistema del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) —www.earthexplorer.usgs.gov— de los años 2013 y 2023. La selección del año 2013 se debió a que el sistema no dispone de información anterior relacionada con el área de estudio; por otro lado, se escogió el año 2023 para generar una valoración y comparativa de diez años. Finalmente, para la elección de las imágenes se valoraron aquellas que tenían menor cobertura de nubes; se seleccionaron las siguientes:

- LC08_L1TP_010060_20130504_20200913_02_T1
- LC08_L1TP_010060_20230225_20230301_02_T1

Software QGIS

Se utilizó el software QGIS 3.18.2 para realizar el procesamiento de las imágenes satelitales; este es un programa de información geográfica (SIG) que además tiene una característica particular, pues es de código abierto licenciado bajo GNU - General Public License, lo que permite que cualquier persona pueda inspeccionar, modificar y mejorar. Por último, su versatilidad permitió que el trabajo fuese desarrollado en dos sistemas operativos diferentes, Windows y Mac OSX.

Correcciones atmosféricas

Mediante la utilización del complemento sobre el módulo SCP v 7.10.11 (Semi-Automatic Classification Pluggin) en el software QGIS 3.18.2, se realizó la corrección atmosférica de todas las bandas de manera automática a través del método de corrección atmosférica DOS1.

Tabla 1. Bandas Landsat 8 procesadas

| L8 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B10 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|

Fuente. Elaboración propia

Para llevar a cabo una comparación de parámetros físicos obtenidos en distintas imágenes, es necesario realizar una conversión de radiancia a reflectancia, la cual depende de variables cruciales de corrección, el ángulo de incidencia solar y la fecha en que se tomó la imagen (Chuvieco, 2010).

Después de obtener las reflectancias de superficie de cada una de las bandas, se procedió a incorporar cada una de ellas en QGIS 3.18.2, proyectándolas en WGS84/UTM17S zona Ecuador. Por último, se recortó la imagen con un polígono que representa el área urbana de Otavalo (zona de estudio). A partir de estas imágenes, se ejecutó el cálculo de los índices espectrales dentro del mismo módulo; en la Tabla 2 se muestran las fórmulas aplicadas para cada índice.

| Índice | | Landsat 8 | Referencia |
|-------------------------|---|--|-----------------------|
| Índices de vegetación | NDVI Índice diferencial de vegetación normalizado | $NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$ | (Shukla et al., 2020) |
| | SAVI Índice de vegetación ajustado al suelo | $SAVI = \frac{(B5 - B4)}{B5 + B4 + 1} * (1 + 1)$ | (Huete, 1988) |
| Índices de construcción | NDBI Índice de áreas construidas de diferencia normalizada | $NDBI = \frac{B6 - B5}{B6 + B5}$ | (Zha et al., 2003) |
| | BU Índice urbanizado | $BU = NDBI - NDVI$ | (He et al., 2010) |

Fuente. Elaboración propia

Índices espectrales

Para apreciar el crecimiento urbano de Otavalo, se generaron mapas de índices NDBI y BU, debido a que están estructurados bajo un índice que se aplica al crecimiento urbano; así, se compara la cartografía de los años definidos analizando tanto el crecimiento como la densificación. La realización del análisis de áreas verdes se procesó mediante los índices NDVI y SAVI, por la necesidad de contar con indicadores para la vegetación; de esta manera, se puede realizar la comparativa entre área construida y área verde.

Teniendo en cuenta la resolución de las imágenes Landsat 8 y el área de estudio de la zona urbana de Otavalo, se utilizó un mapa vectorial

en formato shapefile, el cual permite generar una mejor visualización del tejido urbano, así como de su delimitación (Rosell y Vicente, 2016). Dicho mapa se encuentra disponible en Internet (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Otavalo).

NDVI

Es un índice usado para trabajar la identificación y el desarrollo de la vegetación gracias a la medición (por medio de sensores remotos instalados en los satélites) de la intensidad de la radiación de la banda del infrarrojo del espectro electromagnético, en la que la vegetación emite o refleja según su estado de salud (Geo Innova, 2021).

El NDVI está ligado a diversos factores. Uno de los más interesantes es la fenología de las masas vegetales o su estado de salud; se puede reconocer vegetación en crecimiento, vegetación sana o vegetación dañada por un incendio (Geo Innova, 2021).

SAVI

El método índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI, por sus siglas en inglés) es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección de brillo del suelo. Con frecuencia se utiliza en regiones áridas, donde la cubierta de vegetación es baja y genera valores entre -1.0 y 1.0 (ArcGIS, 2020).

NDBI

El índice de áreas construidas de diferencia normalizada (NDBI) utiliza las bandas NIR y SWIR para resaltar las áreas construidas por el hombre. Se basa en una relación para mitigar los efectos de las diferencias de iluminación del terreno, así como los efectos atmosféricos (ArcGIS, 2020).

BU

Es un índice para mapear áreas edificadas de manera efectiva a través de la manipulación aritmética de imágenes NDVI y NDBI codificadas derivadas de las imágenes (He et al., 2010).

A continuación, se muestra el procesamiento de los índices espectrales antes mencionados, demostrando que durante los diez años analizados se evidencia la reducción de la capa de cobertura vegetal y el incremento de área construida. Estos resultados se procesaron y se publican de manera detallada para brindar una comprensión completa de cada aspecto de la investigación. Se abordará esta etapa específicamente a través del análisis de los indicadores mencionados.

En la Figura 2 y Figura 3 se observan las imágenes en color verdadero en Landsat 8; así, se puede observar una diferenciación visual entre los años seleccionados, evidente en las áreas verdes que se presentan en la urbe y, especialmente, en la disposición de la densidad de edificación.

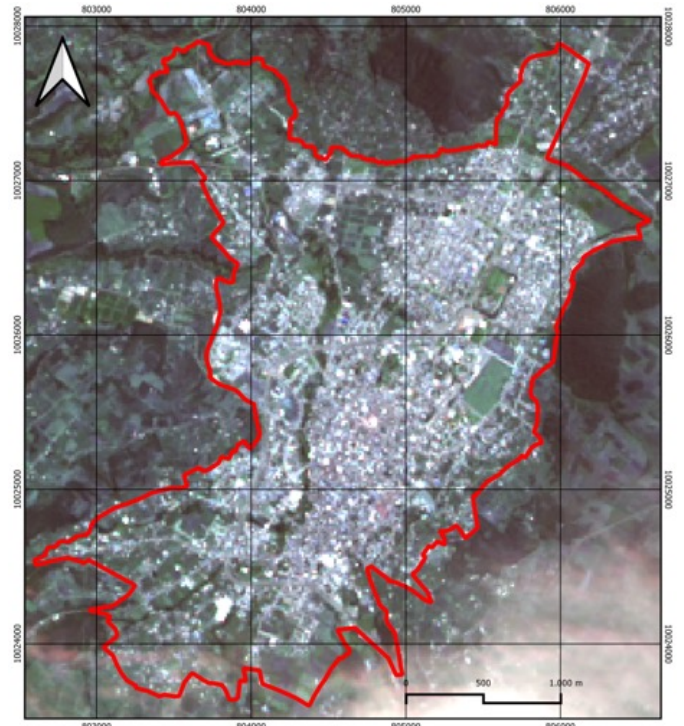


Figura 2. Color verdadero de Otavalo año 2013
Fuente. Elaboración propia



Figura 3. Color verdadero de Otavalo año 2023
Fuente. Elaboración propia

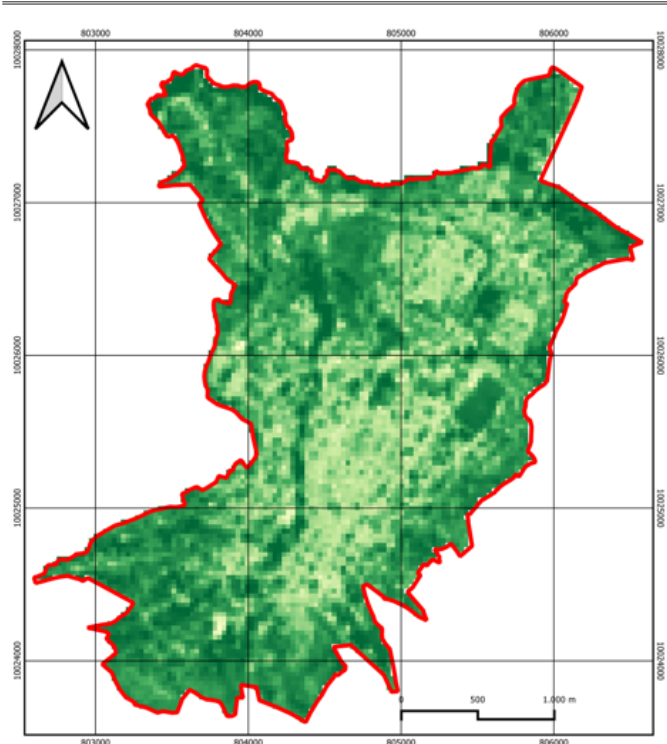


Figura 4. Índice NDVI año 2013
Fuente. Elaboración propia

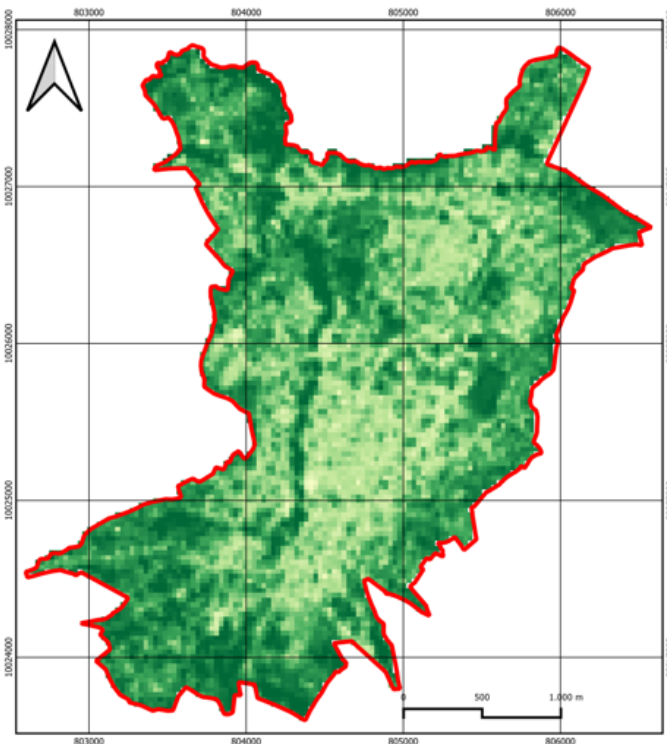


Figura 5. Índice NDVI año 2023
Fuente. Elaboración propia

LIMITE URBANO
 -1 - -0,6
 -0,6 - -0,2
 -0,2 - 0,2
 0,2 - 0,6
 0,6 - 1

En la Figura 4 y Figura 5 se aplica el índice NDVI, correspondiendo valores cercanos a -1, como vegetación enferma o seca, y los cercanos a 1, como vegetación sana. Así, se puede observar que en el año 2023 en la zona noroeste la vegetación ha ido perdiéndose. Además, se puede apreciar que, en la zona central del mapa, la poca vegetación del año 2013 desaparece completamente. Se pueden conectar estos hallazgos con el estudio de Fuentes y Martínez (2018), quienes determinaron que,

ante el incremento de la superficie urbana, es decir, el área construida, el área verde sufre un decrecimiento en un proceso de pérdida de cobertura vegetal con efectos secundarios que afectan a la población, como la alteración de la calidad del aire, el abasto de agua y la erosión.

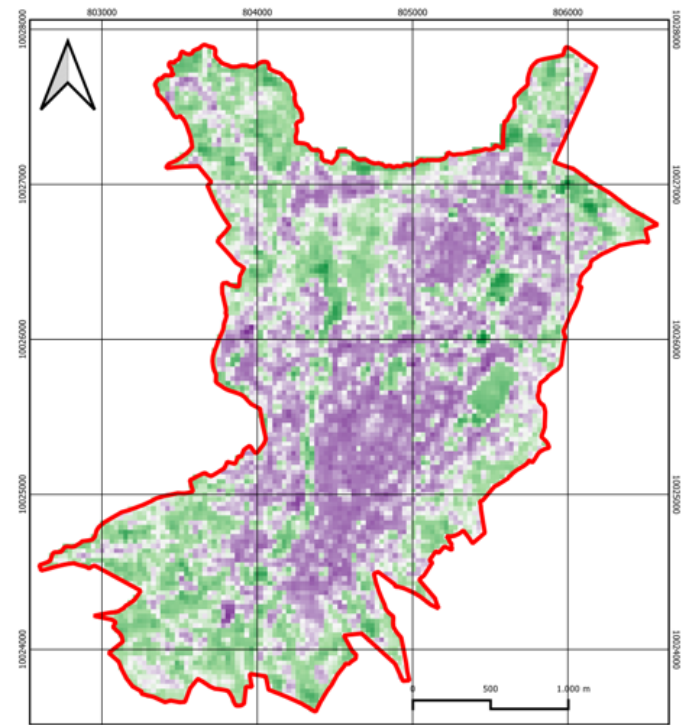


Figura 6. Índice SAVI año 2013
Fuente. Elaboración propia

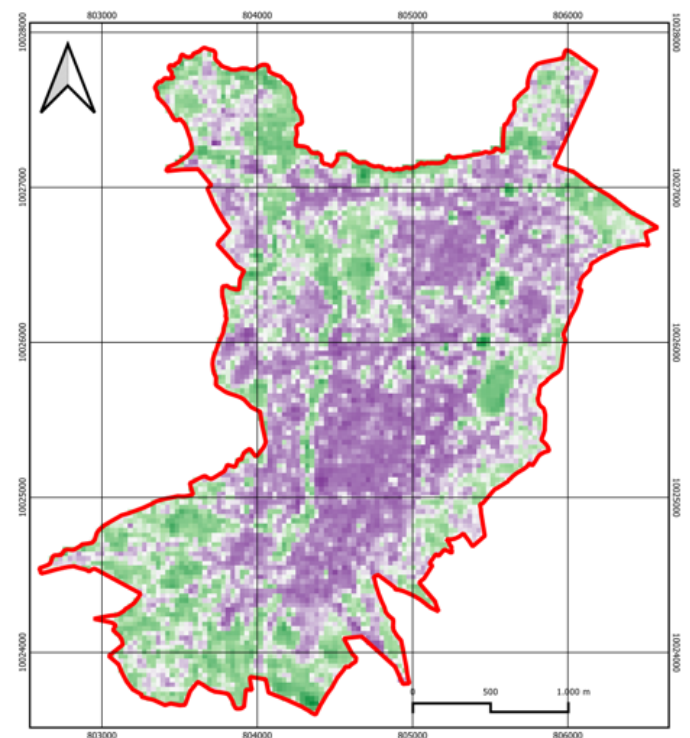


Figura 7. Índice SAVI año 2023
Fuente. Elaboración propia

LIMITE URBANO
 -1 - -0,6
 -0,6 - -0,2
 -0,2 - 0,2
 0,2 - 0,6
 0,6 - 1

El índice SAVI, que tiene una mejor determinación de vegetación en las zonas edificadas, se ha aplicado en la Figura 6 y Figura 7; se puede observar que en 2013 los valores mínimos son uniformes en el casco urbano, es decir, menor presencia de vegetación y valores máximos en las zonas periurbanas. En el año 2023, se evidencia que la vegetación existente en el sur de la cartografía comienza a perderse; hay una menor cantidad de color verde debido a las nuevas construcciones.

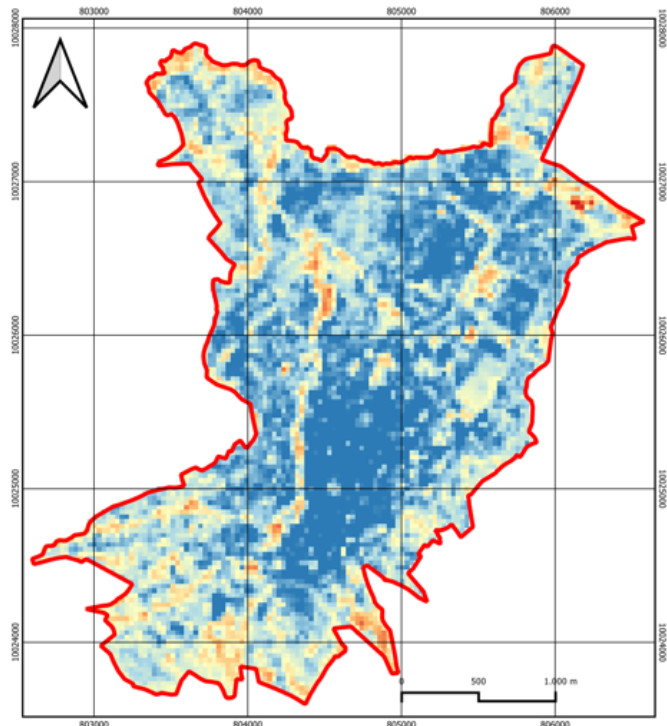


Figura 8. Índice NDBI año 2013
 Fuente. Elaboración propia

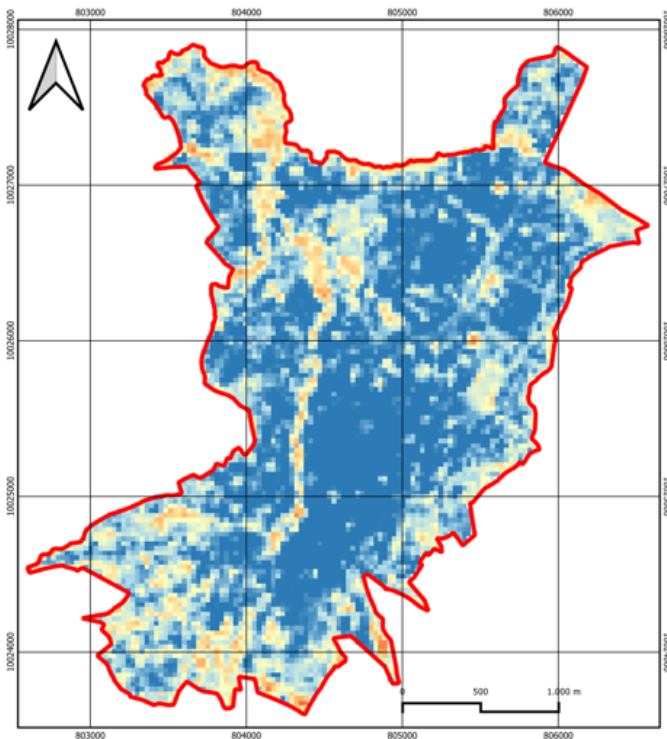


Figura 9. Índice NDBI año 2023
 Fuente. Elaboración propia

LIMITE URBANO
 -1 - -0,6
 -0,6 - -0,2
 -0,2 - 0,2
 0,2 - 0,6
 0,6 - 1

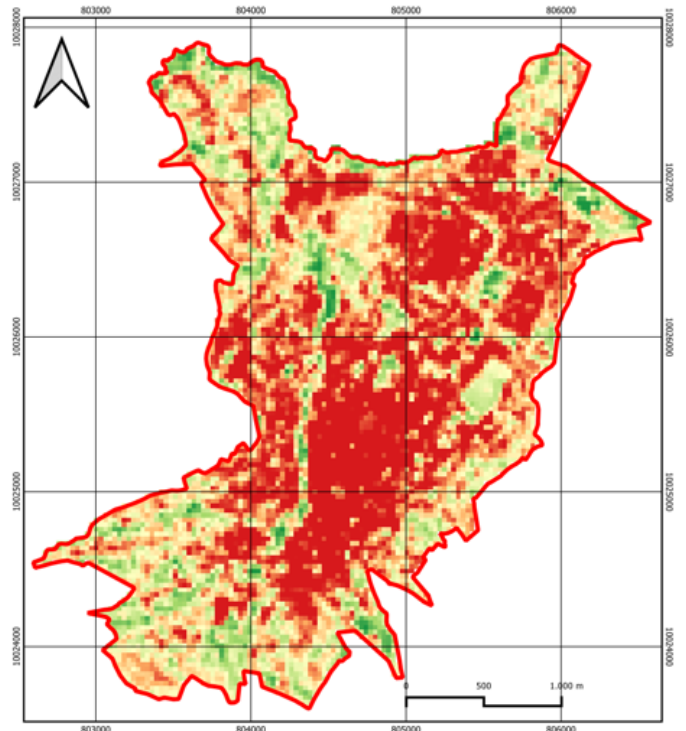


Figura 10. Índice BU año 2013
 Fuente. Elaboración propia

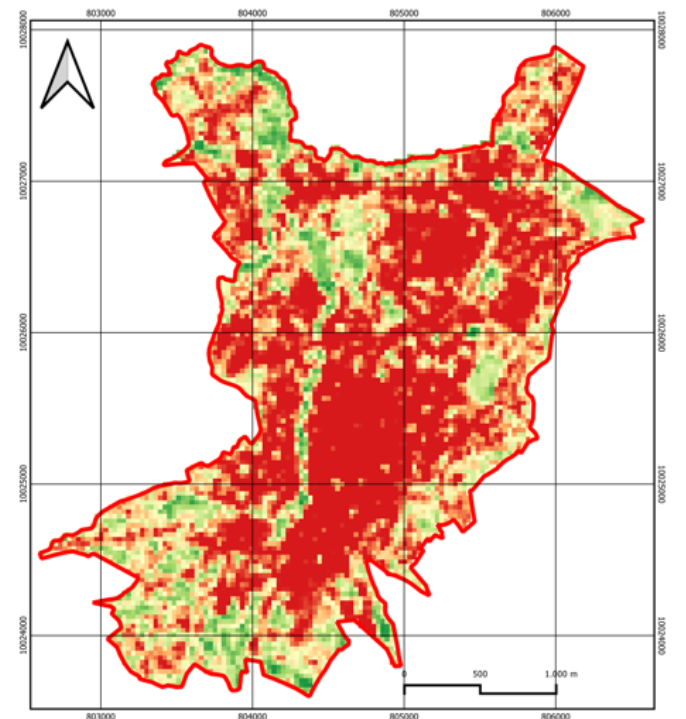


Figura 11. Índice BU año 2023
 Fuente. Elaboración propia

LIMITE URBANO
 -1 - -0,6
 -0,6 - -0,2
 -0,2 - 0,2
 0,2 - 0,6
 0,6 - 1

Los índices NDBI Y BU se complementan; así, se puede mencionar que el BU representa distintas proporciones entre vegetación y construcción. En la Figura 8 se puede analizar que en la parte suroeste del mapa existen valores medios; esto corrobora la información de la Figura 10, es decir, las extensiones de área verde aún estaban presentes en el territorio, frente a lo que se observa en el año 2023. Un hallazgo similar se puede encontrar en el análisis desarrollado por Rosell y Vicente (2016), en el que mencionan

que entre los años 1986 y 2015 la densificación de la edificación provocó la reducción de áreas verdes. Por otra parte, en la Figura 9, que se complementa con la Figura 11, se evidencia que en la misma zona el área verde ha ido eliminándose paulatinamente, todo ello por las construcciones formales e informales que se han desarrollado en el sector.

Adicionalmente, en la zona noreste, en la Figura 8 del año 2013, se evidencia la baja cantidad de construcciones existentes, al contrario de lo que se muestra en la Figura 9, en la cual se puede observar que las edificaciones nuevas han ido tomando parte del territorio, degradando el área verde y estableciéndose definitivamente. En consecuencia, se ha disminuido la calidad de vida de la población, ya que estos lugares son adecuados para la interacción social, tal y como se explica en el estudio realizado por Anzoátegui et al. (2006).

En las comparativas que se pueden realizar entre la Figura 8 y la Figura 9, existe una clara determinación entre la consolidación del centro urbano; se observa que el color azul, es decir, los valores cercanos a 1, se tornan más fuertes, lo que evidencia el incremento de edificaciones.

Asimismo, se encuentra otra evidencia importante tanto en el área norte como sur de las Figuras 8,9,10 y 11, pues se constata que la zona urbana del cantón Otavalo se alarga para extenderse hacia las áreas rurales, atravesando un proceso de conurbación característico de las ciudades del Ecuador. Por otro lado, en el área noroeste, se puede observar que la consolidación urbana es intensa, caracterizada por el incremento de barrios y ciudadelas, que, en muchos de los casos, se conformaron de manera informal.

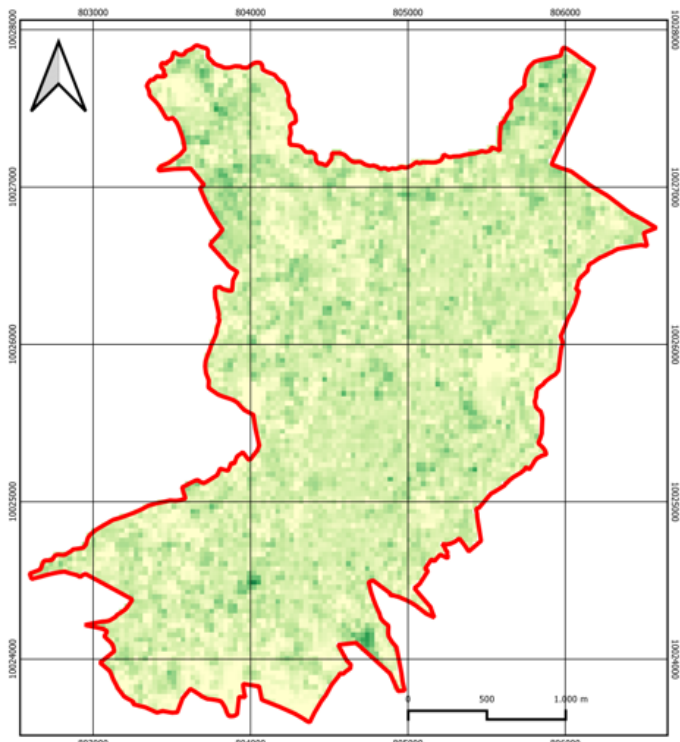
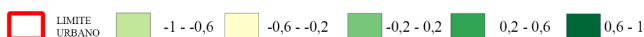


Figura 12. Índice NDVI2013 – NDVI2023

Fuente. Elaboración propia



En la Figura 12 se realizó la diferencia de los índices NDVI2013-NDVI2023, con resultados como la baja intensidad de áreas verdes para el cantón Otavalo, todo ello caracterizado por los procesos de crecimiento demográfico y, por ende, por la acumulación de áreas construidas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis multitemporal realizado en Otavalo utilizando imágenes satelitales y técnicas de teledetección revela un patrón preocupante de expansión urbana y pérdida de áreas verdes. Los resultados muestran una expansión significativa de las áreas construidas, con un aumento del 37 % durante los 10 años analizados. Este crecimiento no planificado ha tenido impactos visibles en la estructura del paisaje, con una disminución drástica de la cobertura vegetal, especialmente en las zonas periurbanas. Este aspecto no es diferente de lo que pasa en otras ubicaciones geográficas del Ecuador, como Machala, tal y como mencionan Pulla y Rodríguez (2021). Esta tendencia refleja un fenómeno que ha sido observado en otras ciudades latinoamericanas, en las que el crecimiento urbano ha invadido áreas agrícolas y naturales, comprometiendo los ecosistemas locales.

La reducción de áreas verdes en Otavalo no solo tiene implicaciones ecológicas, sino que también afecta negativamente a la calidad de vida de sus habitantes. La vegetación urbana cumple funciones vitales, como la regulación de la temperatura y la mejora de la calidad del aire, aspectos que se han visto gravemente afectados por la expansión urbana. El análisis del NDBI mostró un aumento constante en la impermeabilización del suelo, que ha contribuido a la formación de islas de calor urbanas. Este fenómeno ha generado un aumento de hasta 2 °C en la temperatura del suelo en las áreas más densamente urbanizadas, un hallazgo que coincide con estudios previos realizados en ciudades como Bogotá y Quito. Estos resultados evidencian la necesidad urgente de implementar políticas públicas que mitiguen estos efectos mediante la conservación y expansión de áreas verdes.

Además de los impactos ambientales, la fragmentación del paisaje causada por la expansión urbana ha incrementado la desigualdad socioespacial. Las áreas urbanizadas más densas, particularmente en las zonas económicamente más vulnerables, carecen de accesos adecuados a áreas verdes; en consecuencia, se intensifica la segregación social y se limitan las oportunidades de recreación y esparcimiento de la población. Este fenómeno, observado también en estudios realizados en otras ciudades latinoamericanas, subraya la necesidad de una distribución más equitativa de los espacios verdes como parte de una planificación urbana inclusiva. La falta de acceso a áreas verdes también tiene efectos negativos en la salud pública, ya que la presencia de vegetación en las ciudades está directamente relacionada con la reducción del estrés y la mejora del bienestar físico y mental.

En términos metodológicos, el uso de imágenes satelitales Landsat 8 y la aplicación de índices espectrales, como el NDVI y el NDBI, proporcionaron resultados fiables para la detección respecto a los cambios en la cobertura del suelo, tal y como señalan Picone y Linares (2014). Estos índices han sido ampliamente utilizados en estudios similares y su aplicación en Otavalo resultó ser adecuada para capturar la magnitud de la urbanización y la pérdida de vegetación. Sin embargo, dado que las imágenes Landsat tienen una resolución espacial de 30 metros, algunas áreas urbanas pequeñas o muy fragmentadas pueden no haber sido detectadas con la precisión deseada. Estudios futuros podrían beneficiarse del uso de imágenes satelitales de mayor resolución, como las proporcionadas por Sentinel-2, para mejorar la exactitud de los resultados.

Otro aspecto importante por considerar es el impacto a largo plazo de la expansión urbana sobre los recursos hídricos locales. La impermeabilización del suelo, que fue claramente detectada a través del análisis del NDBI, no

solo aumenta el riesgo de inundaciones, sino que también disminuye la capacidad de recarga de los acuíferos. Esto puede tener efectos graves en la disponibilidad de agua para la población local, especialmente en áreas rurales que dependen del agua subterránea para la agricultura y el consumo. En este contexto, es fundamental que las políticas de planificación territorial incluyan la protección de las áreas verdes como parte integral de la estrategia para preservar los recursos naturales.

Finalmente, los hallazgos de este estudio reafirman la importancia de incorporar herramientas de teledetección y análisis geoespacial en la toma de decisiones urbanas. La capacidad de monitorear de manera continua y precisa los cambios en el uso del suelo proporciona a los planificadores urbanos una herramienta valiosa para gestionar el crecimiento de manera más sostenible. En el caso de Otavalo, los datos obtenidos pueden utilizarse para desarrollar un plan de acción orientado a la protección de las áreas verdes restantes, que no solo mejore la conectividad, sino que también proporcione beneficios sociales y ambientales significativos.

CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado que la expansión urbana en Otavalo ha tenido un impacto severo en la cobertura de áreas verdes, lo que subraya la necesidad urgente de políticas de planificación territorial que prioricen la conservación de estos espacios. La integración de modelos basados en el rendimiento, como el sugerido por Pelorosso (2019), podría mejorar la gestión del crecimiento urbano y garantizar un desarrollo más equilibrado.

Por otro lado, la creación de corredores ecológicos y la protección de áreas verdes privadas pueden ser estrategias para enfrentar estos desafíos, pues su implementación podría mejorar la calidad de vida de los habitantes de Otavalo y proteger su riqueza natural para las generaciones futuras.

Adicionalmente, el análisis mediante el procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 y el estudio del proceso urbano que ha atravesado el cantón Otavalo permiten observar que en el área urbana disminuyó el nivel de vegetación y se acrecentó la densificación de edificación. Se comprobó el alto crecimiento de edificaciones por la presencia de nuevos barrios y de la instauración de viviendas informales, que evidencian una gran ocupación.

Se puede deducir que la precisión de las imágenes satelitales proporcionadas por el sensor Landsat 8 es fundamental para mejorar la capacidad de análisis a gran escala en zonas urbanas. Las imágenes son de gran importancia debido a su prolongada historia y a la gran cantidad de investigaciones existentes que permiten comparar los resultados obtenidos con distintos sensores de esta misión.

En términos de planificación urbana, la investigación también sugiere estrategias proactivas para mitigar los impactos negativos del crecimiento urbano. La recomendación de fortalecer las regulaciones para la protección de áreas verdes privadas y públicas se torna de gran importancia, al proporcionar ejemplos concretos de medidas aplicables. Así, la investigación ofrece no solo un diagnóstico de la situación, sino también soluciones viables que pueden ser adoptadas por los tomadores de decisiones locales. De esta forma, se fortalece la relación entre la investigación académica y la práctica de la gestión urbana sostenible.

En conclusión, el crecimiento urbano en Otavalo ha tenido un impacto negativo considerable en las áreas verdes y en la sostenibilidad

ambiental de la ciudad. El estudio evidencia la necesidad de adoptar políticas públicas estrictas que limiten la expansión urbana descontrolada y promuevan la conservación de espacios verdes. Por otro lado, la aplicación de tecnologías, como la teledetección y el análisis SIG en el monitoreo continuo del crecimiento urbano, son claves para mitigar los efectos negativos a largo plazo y garantizar un desarrollo más equilibrado y sostenible.

Contribución de la investigación

Esta investigación proporciona una contribución significativa en el ámbito de la planificación urbana sostenible y la gestión de recursos naturales mediante el uso de tecnologías de teledetección y análisis geoespacial. Al centrarse en Otavalo, una ciudad intermedia en Ecuador, el estudio llena un vacío importante en la literatura sobre los impactos del crecimiento urbano en áreas no metropolitanas, en las que el fenómeno de la expansión urbana no planificada ha sido menos estudiado. Los resultados obtenidos permiten un análisis local, pero también son aplicables a otras ciudades en rápido crecimiento de América Latina, donde las dinámicas de urbanización tienden a seguir patrones similares.

Una de las principales contribuciones del estudio es la aplicación de índices espectrales, como el NDVI y el NDBI, para monitorear y cuantificar la pérdida de áreas verdes en relación con la expansión de áreas edificadas, tal y como mencionan Dutta y Das (2019). Este enfoque metodológico no solo proporciona una medida precisa de los cambios en el uso del suelo, sino que también ofrece una herramienta replicable que puede ser utilizada por otros investigadores y planificadores urbanos en diversas geografías. La integración de estos índices espectrales y la clasificación supervisada con el software QGIS permite destacar cómo el uso de herramientas accesibles y gratuitas puede democratizar el acceso a tecnologías avanzadas para la planificación territorial.

Además, este trabajo refuerza la importancia de las áreas verdes como componentes esenciales para la sostenibilidad de las ciudades, particularmente en términos de su capacidad para mitigar los efectos del cambio climático y las islas de calor urbanas. La investigación cuantifica cómo la disminución de áreas verdes en Otavalo ha contribuido al aumento de la temperatura local; un hallazgo que subraya la necesidad de priorizar la conservación de espacios naturales en los planes de desarrollo urbano. En este sentido, el estudio aporta un enfoque basado en datos para apoyar la formulación de políticas públicas que promuevan el desarrollo sostenible de ciudades intermedias, evitando los errores cometidos en centros urbanos más grandes y consolidados.

Otra contribución clave es la dimensión socioespacial abordada en el estudio. Al resaltar la desigualdad en el acceso a las áreas verdes, el trabajo no solo presenta un análisis ambiental, sino que también pone de relieve los efectos sociales de la expansión urbana. Esto ofrece una perspectiva integral que conecta la sostenibilidad ambiental con el bienestar social, sugiriendo que los espacios verdes son elementos clave para la cohesión social y el bienestar general de la población. Esta visión inclusiva es particularmente relevante para ciudades en crecimiento, en las que la urbanización no planificada tiende a afectar desproporcionadamente a las comunidades más vulnerables.

Finalmente, este estudio contribuye al creciente cuerpo de conocimiento sobre el uso de tecnologías de teledetección para la planificación urbana basada en datos. Los hallazgos de la investigación pueden ser utilizados como base para futuros estudios que busquen mejorar los modelos predictivos sobre la expansión urbana y la pérdida de áreas

verdes en ciudades intermedias de América Latina. En particular, la combinación del análisis de teledetección con datos socioeconómicos podría proporcionar una comprensión más completa de los impulsores de la expansión urbana y permitir la creación de modelos predictivos más precisos.

Contribución de los autores: Conceptualización: Guzmán; metodología: Guzmán; software: Guzmán, Ortiz; validación: Guzmán, Sánchez; análisis formal: Guzmán, Ortiz, Sánchez; investigación: Guzmán; recursos: Guzmán; curación de datos: Guzmán, Ortiz, Sánchez; redacción y preparación del borrador original: Guzmán; redacción, revisión y edición: Guzmán, Ortiz, Sánchez; visualización: Guzmán. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del documento.

Fuente de financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Abu Hatab, A., Cavinato, M. E. R., Lindemer, A. y Lagerkvist, C. J. (2019). Urban sprawl, food security and agricultural systems in developing countries: A systematic review of the literature. *Cities*, 94, 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.001>
- Anzoátegui, B., Argumedo, J., Pérez, E. y Serrano, L. (2006). *Estudio sobre la expansión urbana de la ciudad de Montería, utilizando imágenes de satélite. De los años 1991 y 2001*. <http://www.observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal11/Geografiasocioeconomica/Geografiaurbana/28.pdf>
- ArcGIS. (2020). *Galería de índices*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>
- Atupaña, N., Burbano, H. y Chiriboga, P. (2017). Guía para la prevención de la trata de personas con fines de explotación laboral de niños niñas y adolescentes de los pueblos Kichwa Otavalo y Cotacachi. *MINDALAE: Tradición Con Responsabilidad*. <https://repositorio.dpe.gob.ec/handle/39000/3212>
- Bernal, Á., Hernández, Y. y Beltrán, J. (2022). Reflexiones en torno a los factores que influyen en la expansión urbana: revisión de metodologías e instrumentos de investigación. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 31 (2), 434–449. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.89742>
- Dutta, I. y Das, A. (2019). Application of geo-spatial indices for detection of growth dynamics and forms of expansion in English Bazar Urban Agglomeration, West Bengal. *Journal of Urban Management*, 8 (2), 288–302. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.03.007>
- Duval, V. S. y Ramos, M. B. (2023). Expansión urbana y espacios verdes en Bahía Blanca. *Proyección. Estudios Geográficos y de Ordenamiento Territorial*, 17 (33), 96–119. <https://doi.org/10.48162/rev.55.038>
- Espinoza, X. y Goyes, A. (2022). Oportunidad en el vacío: proyecto urbano arquitectónico como catalizador de relaciones sociales en el casco central de Otavalo. *Cuaderno 151*. <https://dspace.palermo.edu/ojs/index.php/cdc/article/view/6671/10490>
- Flores, G. y Chica, J. (2016). La pérdida de áreas verdes privadas como consecuencia de la construcción irregular. El caso de Cuenca-Ecuador. *ESTUDIOS SOBRE ARTE ACTUAL*, 4. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/37831/1/documento.pdf>
- Folch, R. y Bru, J. (2017). *Ambiente, territorio y paisaje Valores y valoraciones*. <https://www.fundacionaquae.org/wp-content/uploads/2017/12/AMBIENTE-TERRITORIO-Y-PAISAJE.pdf>
- Fuentes, B. y Martínez, Y. (2018). *Crecimiento urbano y su impacto en el paisaje natural*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/sitios/rdebeta/rde_26/RDE25_art06.pdf
- Geo Innova. (2021). *Los 9 principales índices de vegetación más usados en teledetección*. <https://geoinnova.org/blog-territorio/analisis-de-indices-de-vegetacion-en-teledeteccion/>
- He, C., Shi, P., Xie, D. y Zhao, Y. (2010). Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. *Remote Sensing Letters*, 1 (4), 213–221. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.481681>
- Huete, A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). En *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* (Vol. 25). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442578890106X>
- Jensen, K. (2019). La expansión urbana y el derecho a los espacios verdes de uso público como elemento esencial en el derecho a la ciudad. *Revista de Direito Da Cidade*, 11. <https://doi.org/10.12957/rdc.2019.40604>
- León, F. (2016). Aplicación de imágenes satelitales en procesos físico-urbanos. Caso de estudio: Crecimiento Urbanístico de Quito (Ecuador) año 1991 a 2000. *REVISTA GEOCIENCIAS & GEODATOS*. https://www.researchgate.net/publication/303820364_Aplicacion_de_imagenes_satelitales_en_procesos_fisico-urbanos_Caso_de_estudio_Crecimiento_Urbanistico_de_Quito_Ecuador_ano_1991_a_2000
- Pelorusso, R. (2020). Modeling and urban planning: A systematic review of performance-based approaches. En *Sustainable Cities and Society* (Vol. 52). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101867>
- Picone, N. y Linares, S. (2014). Propuesta metodológica para la extracción y análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina. En *Revista Universitaria de Geografía* (Vol. 23, Issue 2). <https://www.redalyc.org/pdf/3832/383239105002.pdf>
- Pulla, E. y Rodríguez, B. (2021). *ANÁLISIS DEL ÍNDICE VERDE URBANO Y CRECIMIENTO DE LA CIUDAD DE MACHALA EN LOS PERIODOS 2000-2018*. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/468/445>
- Rosell, P. y Vicente, M. (2016). *Análisis del crecimiento demográfico y la relación entre espacios verdes y edificados en Darregueira con QGIS*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2863.7687>
- Salas, C., Coy, D., Acuña, K., Páez, L. y Upegui, E. (2019). Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, en la ciudad de Bogotá. *Ambiente y Desarrollo*, 23 (44). <https://doi.org/10.11144/javeriana.ayd23-44.cuis>
- Shukla, G., Tiwari, P., Dugesar, V. y Srivastava, P. K. (2020). Estimation of evapotranspiration using surface energy balance system and satellite datasets. In *Agricultural Water Management: Theories and Practices* (pp. 157–183). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812362-1.00009-6>
- Usach, N. y Freddo, B. (2015). Crecimiento de una ciudad dispersa: análisis y reflexiones del caso de la ciudad de Comodoro Rivadavia. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 7 (1), 219–243. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v7i1.122>
- Zha, Y., Gao, J. y Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>