



Análisis de firmas espectrales para la gestión del territorio y control de la expansión urbana

Analysis of spectral signatures for territorial management and control of urban expansion

Análise de assinaturas espectrais para gestão territorial e controle da expansão urbana

Mauro Rosas Lara ^I

mrosas@uce.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2796-4275>

Karla Alexandra Ávila-Hidalgo ^{II}

kaavila@uce.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0784-0411>

Diego Rubén Tana-Verdezoto ^{III}

diegotanav@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-5430-821X>

Correspondencia: mrosas@uce.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 10 de enero de 2024 * **Aceptado:** 09 de febrero de 2024 * **Publicado:** 21 de marzo de 2024

- I. Universidad Central del Ecuador, Ecuador.
- II. Universidad Central del Ecuador, Ecuador.
- III. Universidad Central del Ecuador, Ecuador.

Resumen

El análisis de firmas espectrales permite la identificación de diferentes objetos presentes en imágenes digitales, los cuales poseen características particulares que contienen información sobre la materia con la que interactúan, de manera similar a una huella digital. Esto posibilita la cuantificación de la evolución de la expansión urbana y la gestión territorial, aspectos fundamentales para optimizar los patrones de uso del suelo y fomentar el desarrollo urbano sostenible. En consecuencia, la investigación puede proporcionar conjuntos de datos valiosos y referencias para la toma de decisiones, con el fin de ajustar y optimizar los patrones de desarrollo urbano y diseñar estrategias para el desarrollo urbano sostenible.

Para demostrar la eficacia de las firmas espectrales en este contexto, se aplicó una metodología de análisis espectral a imágenes satelitales Landsat del valle de los Chillos en el cantón Quito, que ofrecen una amplia cobertura territorial y temporal, asegurando la posibilidad de replicación. En primer lugar, se llevó a cabo una calibración radiométrica; luego se realizó una clasificación no supervisada utilizando el algoritmo Maximum Likelihood. Posteriormente, se procedió a la reconstrucción utilizando firmas reales de cada categoría, mediante una mezcla espectral de firmas teóricas. Se obtuvieron las firmas de cada clase, a partir de las cuales se pueden realizar diversos estudios urbanos.

Palabras claves: firmas espectrales; gestión territorial; expansión urbana; clasificación.

Abstract

The analysis of spectral signatures allows the identification of different objects present in digital images, which have particular characteristics that contain information about the matter with which they interact, in a similar way to a fingerprint. This makes it possible to quantify the evolution of urban expansion and territorial management, fundamental aspects to optimize land use patterns and promote sustainable urban development. Consequently, research can provide valuable data sets and references for decision-making, in order to adjust and optimize urban development patterns and design strategies for sustainable urban development.

To demonstrate the effectiveness of spectral signatures in this context, a spectral analysis methodology was applied to Landsat satellite images of the Chillos Valley in the Quito canton, which offer extensive territorial and temporal coverage, ensuring the possibility of replication.

First, a radiometric calibration was carried out; then unsupervised classification was performed using the Maximum Likelihood algorithm. Subsequently, the reconstruction was carried out using real signatures from each category, through a spectral mixture of theoretical signatures. The signatures of each class were obtained, from which various urban studies can be carried out.

Keywords: spectral signatures; territorial management; Urban sprawl; classification.

Resumo

A análise de assinaturas espectrais permite a identificação de diferentes objetos presentes em imagens digitais, que possuem características particulares que contêm informações sobre a matéria com a qual interagem, de forma semelhante a uma impressão digital. Isto permite quantificar a evolução da expansão urbana e da gestão territorial, aspectos fundamentais para otimizar os padrões de uso do solo e promover o desenvolvimento urbano sustentável. Consequentemente, a investigação pode fornecer conjuntos de dados e referências valiosos para a tomada de decisões, a fim de ajustar e otimizar os padrões de desenvolvimento urbano e conceber estratégias para o desenvolvimento urbano sustentável.

Para demonstrar a eficácia das assinaturas espectrais neste contexto, foi aplicada uma metodologia de análise espectral às imagens do satélite Landsat do Vale de Chillos, no cantão de Quito, que oferecem ampla cobertura territorial e temporal, garantindo a possibilidade de replicação. Primeiramente foi realizada uma calibração radiométrica; em seguida, a classificação não supervisionada foi realizada usando o algoritmo de Máxima Verossimilhança. Posteriormente, a reconstrução foi realizada utilizando assinaturas reais de cada categoria, através de uma mistura espectral de assinaturas teóricas. Foram obtidas as assinaturas de cada turma, a partir das quais poderão ser realizados diversos estudos urbanos.

Palavras-chave: assinaturas espectrais; gestão territorial; Expansão urbana; classificação.

Introducción

La urbanización es un proceso espaciotemporal físico y socioeconómico que transforma el paisaje rural en forma urbana e implica la conversión de cubiertas superficiales naturales y seminaturales en superficies impermeables. Se manifiesta en la expansión del área construida en términos de viviendas, industrias o infraestructura dentro o en conexión directa con un área urbana (Kantakumar, Kumar, & Schneider, 2016).

Hoy en día, las zonas urbanas ocupan sólo el cinco por ciento de la superficie terrestre, pero albergan a casi la mitad de la población mundial, que consume el setenta y cinco por ciento de los recursos naturales del mundo y genera una proporción equivalente de contaminación y residuos (UN-Habitat, 2022).

El crecimiento urbano acelerado, descontrolado e ilegal es una de las principales problemáticas ambientales y sociales del siglo XXI, y plantean una serie de dificultades a menos que se maneje adecuadamente; que van desde la fragmentación del hábitat natural hasta la presión sobre los recursos naturales y la calidad de vida de los habitantes. Es por ello, que, en la era moderna, la gestión eficiente del territorio y el control de la expansión urbana se han convertido en desafíos cruciales para las autoridades gubernamentales, urbanistas, ecologistas y científicos ambientales; teniendo en cuenta como foco que las políticas deben estar enfocadas a la prevención de la urbanización insostenible en lugar de intentar frenarla o revertirla.

La urbanización ha sido una tendencia fundamental en los últimos dos siglos y ha sido una fuerza importante en la configuración del patrón de desarrollo del mundo moderno (Peverga, Terseer, Kwanga, & Terngu, 2021). Entre 1980 y 2023, la proporción de la población mundial que vive en ciudades aumentó del 33% al 56%, y se espera que la población urbana mundial aumente a más del doble para 2050, en que alrededor de siete de cada diez personas vivirán en ciudades (UN-Habitat, 2022).

Por otro lado, en 2023, el 64.8% de la población de Ecuador vive en zonas urbanas. Este es el valor más alto de los últimos 60 años, ya que en 1960 solo el 33.88% de la población vivía en zonas urbanas (INEC, 2024). La urbanización en Ecuador se debe a la incorporación del país a un sistema de comercio internacional basado en productos primarios como el cacao, el banano y el petróleo. Este proceso se ha caracterizado por migraciones campo-ciudad y sierra-costa.

Las herramientas para medir, monitorear y comprender el proceso de expansión urbana son clave para los planificadores urbanos. A menudo no se dispone de información precisa sobre el estado de la urbanización, la tasa de expansión urbana y los patrones y el alcance de la expansión urbana en forma oportuna. Los métodos tradicionales para obtener información urbana utilizan estadísticas sociales y económicas de unidades administrativas (Abdullahi, Barde, & Iliyas, 2021).

Sin embargo, no hay suficiente información espacial en las estadísticas socioeconómicas para analizar con precisión la expansión urbana. Además, dado que los datos de teledetección de resolución media y alta tienen una cobertura geográfica restringida, existe un alto costo de

adquisición de imágenes y se requiere una gran cantidad de tiempo y mano de obra para el procesamiento previo y la interpretación, lo que significa que dichos datos no son adecuados para invertir la información de la expansión urbana y construir modelos de evolución espacio-temporal de aglomeraciones urbanas a gran escala (Bhatta, 2010).

En este sentido, Zheng, He, Zhou, & Wang (2022), realizaron un análisis cuantitativo de los patrones de cambio urbano en diferentes regiones de China mediante datos de teledetección multitemporal del cambio de uso del suelo, utilizando índices como la tasa de expansión urbana y la intensidad de la expansión. Por otro lado, Sun, y otros, (2020) extrajeron mapas regionales de alta calidad de edificios urbanos a lo largo del tiempo y el espacio mediante imágenes Landsat. De igual forma, Viana, Oliveira, Oliveira, & Rocha (2019), extrajeron características multitemporales del suelo urbano y las utilizaron para determinar para realizar una gestión territorial.

En este contexto, el análisis de firmas espectrales emerge como una herramienta tecnológica poderosa y versátil para comprender y abordar estos desafíos de manera efectiva, con un gran potencial para la gestión del territorio y control de la expansión urbana. Las firmas espectrales, que representan la respuesta espectral única de los objetos y superficies terrestres a diferentes longitudes de onda de la luz, proporcionan información detallada sobre la composición y las características de la superficie terrestre.

Las firmas espectrales son la expresión única de la reflectancia o emisión de energía electromagnética por un material o superficie a lo largo del espectro electromagnético. Representan propiedades físicas, químicas y biológicas, a través de su interacción con la radiación emite determinadas longitudes de onda del espectro electromagnético, los elementos que en ella se encuentran presentan un comportamiento diferente, el cual es captado por sensores. A esta característica particular de cada elemento, se le conoce como firma espectral. Esta "huella digital" espectral es la base para procesos de identificación, caracterización de diferentes materiales, como vegetación, suelo, agua, y estructuras urbanas, con gran precisión (Saleem & Mahmood, 2023).

Dentro del análisis, un método que implementan los investigadores para realizar la clasificación de espectros es utilizando el sentido de la vista, mediante su visión y experiencia pueden determinar los tipos de espectros que aparecen en una imagen. La ventaja de este método es la exactitud con la que se realiza la clasificación y la desventaja es que toma bastante tiempo realizarlo (Dadhich & Hanaoka, 2011). Es por ello, que otro método para el análisis de firmas espectrales, es realizarlo de forma automática con técnicas de *machine learning*; utilizando características propias de la

imagen. La ventaja de este método es que se realiza de manera automática y el tiempo invertido es mínimo. Una desventaja, es que depende del aprendizaje adquirido para realizar una clasificación exacta. Esto quiere decir que, al ser un método automático, se requieren de suficientes datos para realizar un buen entrenamiento. No obstante, las técnicas de aprendizaje automático reportan resultados con altos índices de clasificación, como los métodos perceptrón multicapa (MPL), vecino más cercano (K-NN), máquina de soporte vectorial (SVL) y redes neuronales (RN) (Abdelkader El Garouani a, 2017).

Este artículo tiene como objetivo explorar el potencial del análisis de firmas espectrales como una herramienta fundamental para abordar los desafíos asociados con la gestión del territorio y la expansión urbana, y para avanzar hacia un desarrollo urbano más sostenible y equitativo. Se examinará cómo estas técnicas pueden utilizarse para la detección y monitorización de cambios en el uso del suelo, la evaluación de la calidad ambiental, la planificación urbana sostenible y la toma de decisiones basada en evidencia.

Metodología

A continuación, se describe la metodología seguida en la realización del análisis de firmas espectrales para la zona del valle de los Chillos en el cantón Quito; en el contexto de la gestión del territorio y el control de la expansión urbana, permitiendo obtener información detallada sobre la dinámica del paisaje y facilitando la toma de decisiones informadas para una planificación urbana más sostenible y eficiente.

Adquisición y selección de la información

Se recopilaron datos espaciales y espectrales de la zona de estudio, seleccionando cuatro imágenes LANDSAT en diferentes periodos de tiempo a lo largo del tiempo priorizando aquellas que tenían una menor cantidad de nubes y afectaciones varias; las mismas que fueron sometidas a corrección. Todas las imágenes fueron obtenidas directamente desde el Geoportal del Servicio Geológico de los Estados Unidos y fueron georreferenciadas en el sistema de coordenadas local para Quito SIRES-DMQ (Transversal de Mercator para Quito).

Bajo estas condiciones, se seleccionaron los sensores LANDSAT 5 TM para la imagen del año 2000, LANDSAT 7 ETM+ (2005), LANDSAT 7 ETM+ (2015) y LANDSAT 8 OLI/TIRS (2023); todas con una resolución espacial de 30x30m.

Preprocesamiento de imágenes

Las imágenes captadas por satélites pueden presentar diversas interferencias, originadas por errores en los sensores, distorsiones debido a movimientos en los mecanismos de captura, así como interferencias atmosféricas. Estas irregularidades fueron corregidas mediante los siguientes procedimientos.

1) Corrección geométrica

Las imágenes satelitales empleadas en el proyecto fueron procesadas a un nivel de tratamiento L1T, lo que significa que son productos que han sido ortorrectificados. Esto implica que se les han aplicado correcciones geométricas sistemáticas mediante puntos de control terrestre (GCP) y modelos de elevación digital (DEM), logrando así imágenes registradas en una proyección cartográfica referenciada al sistema WGS84. Además, se ha corregido la distorsión topográfica causada por el relieve y el desplazamiento del terreno.

2) Calibración radiométrica

Las imágenes adquiridas fueron sometidas a una corrección radiométrica para considerar las variaciones en la iluminación y la sensibilidad del sensor. La radiancia capturada por el sensor a bordo del satélite se presenta en valores en formato de nivel digital (ND), los cuales deben ser convertidos en unidades de energía reflejada, también conocida como calibración radiométrica.

La corrección radiométrica se aplicó tanto a las bandas multiespectrales como a la banda pancromática de cada imagen satelital, con el propósito de facilitar la posterior fusión de imágenes. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando la herramienta de Calibración Radiométrica dentro del software ENVI 5.6, donde se realizó un recorte espacial a la imagen (Subconjunto espacial).

La fusión de imágenes se efectuó mediante el método de Gram-Schmidt para mejorar la resolución espacial de los datos multiespectrales utilizando datos pancromáticos de alta resolución.

3) Corrección atmosférica

El siguiente paso implica la corrección atmosférica de las imágenes satelitales con el fin de eliminar los efectos atmosféricos y de iluminación que podrían afectar la calidad de las firmas espectrales. Para ello, se emplearon técnicas de corrección radiométrica y atmosférica.

Se utilizó el método QUAC (Corrección Atmosférica Rápida por sus siglas en inglés), el cual determina parámetros de compensación atmosférica directamente de la información de cada escena, asumiendo una ecuación lineal de transporte de radiación. Este proceso se llevó a cabo mediante el módulo QUAC dentro del software ENVI 5.6, donde se seleccionó el tipo de sensor Landsat TM/ETM/OLI para las imágenes.

Análisis de firmas espectrales

1) Extracción de firmas espectrales

Una vez que se realizaron las correcciones pertinentes a las imágenes satelitales, se llevó a cabo la extracción de información de cada una de ellas. Para este propósito, se emplearon diversas metodologías para la identificación de la cobertura urbana. Se utilizaron combinaciones específicas de bandas con el objetivo de detectar las áreas de expansión urbana a través de la reflectancia emitida. En particular, se empleó la combinación de las bandas SWIR 2, SWIR 1 y RED para generar un falso color que facilitara la identificación de dichas áreas.

2) Clasificación de firmas espectrales

El procedimiento de clasificación, también conocido como fase de asignación, se realizó utilizando los niveles digitales asociados a cada píxel en todas las bandas seleccionadas para el proceso. Esto resulta en una nueva imagen en la que los valores digitales determinan la clase a la que pertenece cada píxel.

Para la clasificación, se empleó la metodología de clasificación supervisada utilizando el algoritmo de agrupación de máxima probabilidad. Este método es ampliamente utilizado en percepción remota debido a su precisión y eficiencia. Es especialmente adecuado cuando los datos presentan una distribución normal, ya que se ajusta rigurosamente a la disposición original de los datos. Cada píxel se asigna a una clase en función de la media y la varianza de las firmas espectrales, lo que facilita la interpretación de los resultados.

Las imágenes fueron clasificadas de forma individual, siguiendo un proceso compuesto por dos etapas: en la primera, se *seleccionaron áreas de entrenamiento* dentro de la imagen, las cuales se utilizaron para definir las clases de cobertura. Luego, en la segunda etapa, se *calculó la probabilidad de que cada píxel* pertenezca a cada una de las categorías, basándose en su respuesta espectral. De esta manera, se determinó la clase a la que más probablemente pertenece cada píxel.

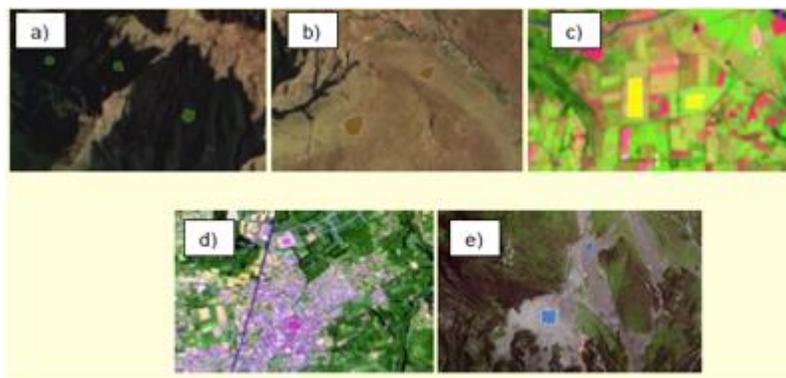
Selección de áreas de entrenamiento

La elección de áreas de entrenamiento tiene como objetivo recopilar un conjunto de datos estadísticos que describan el patrón de respuesta espectral para cada categoría o tipo de cobertura presente en la imagen. Por lo tanto, es crucial que las regiones de interés (ROI) seleccionadas sean representativas y abarquen toda la extensión de las clases.

Para determinar el tamaño mínimo de la muestra en píxeles, se aplicó el criterio que establece que el tamaño del ROI debe ser mayor que el número de bandas + 1, garantizando así su representatividad estadística. Se optó por seleccionar aproximadamente 10 muestras por cada clase, y se utilizó la combinación en falso color de las imágenes satelitales para la selección de áreas de entrenamiento.

Este proceso se llevó a cabo utilizando la herramienta ROI Tools disponible en el software ENVI 5.6, la cual permite controlar la calidad de las zonas de entrenamiento mediante opciones como la separabilidad espectral, los planos adimensionales, entre otros.

Figura 1. Muestra de selección de ROIs para cada cobertura



Análisis de separabilidad

Una vez que se adquirieron las regiones de interés, se llevó a cabo un análisis de separabilidad espectral entre las muestras con el fin de verificar estadísticamente su diferencia. A través de la herramienta ROI Tools se generó un informe que presenta el promedio de separabilidad obtenido mediante los métodos de divergencia transformada y Jeffries-Matusita, los cuales calculan la distancia normalizada entre las dos categorías.

Los resultados del proceso proporcionaron valores que indican la separabilidad de cada par de clases, los cuales están en un rango de 0 a 2. Valores superiores a 1.9 indican una buena

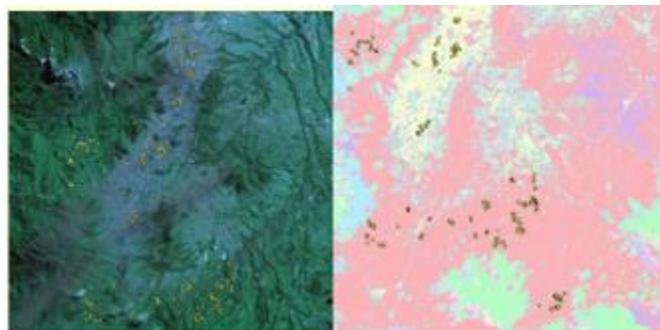
separabilidad, mientras que valores inferiores sugieren una baja separabilidad, lo que requiere una revisión de las muestras para su reubicación o eliminación.

Clasificación supervisada

Una vez que se evaluó la separabilidad espectral de las regiones de interés, se procedió con la clasificación supervisada. Este proceso se llevó a cabo utilizando el software ENVI y su herramienta automatizada para clasificación de imágenes, Classification Workflow. En primer lugar, se introdujo la imagen junto con las regiones de interés previamente definidas. Luego, se seleccionó el algoritmo Maximum Likelihood, definiendo el factor de escala como 1, dado que los valores de reflectancia están normalizados en un rango de 0 a 1.

Por último, esta herramienta permitió mejorar la clasificación mediante un proceso de suavizado para eliminar el ruido de moteado. Para ello, se utilizó un tamaño de kernel de 3 (3x3 píxeles), donde el píxel central de la matriz cuadrada se reemplazó con el valor de clase más frecuente dentro de la matriz, es decir, se asignó a la clase predominante en los píxeles vecinos.

Figura 2. Clasificación supervisada

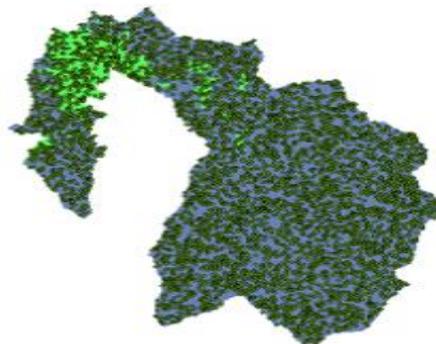


3) Validación del modelo de clasificación

La validación, también conocida como post-clasificación, permite evaluar la confiabilidad de la clasificación realizada y la precisión de los datos obtenidos. En este contexto, una vez aplicado el modelo de clasificación, se validó el modelo de extracción de cobertura urbana utilizando el índice de kappa. Este índice calcula la discrepancia entre la precisión lograda y la probabilidad de una clasificación correcta, generando matrices de confusión para cada imagen.

Para llevar a cabo la validación, se utilizó la cobertura oficial del municipio para distinguir el área urbana, generando 6000 puntos de control. Se obtuvo un índice de kappa de 0.9148, lo que indica una alta concordancia con la cobertura del GAD.

Figura 3. Puntos de control para el índice kappa

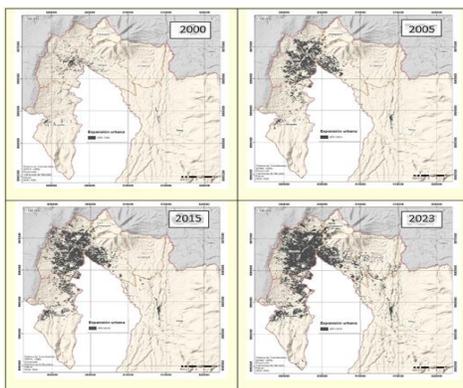


Análisis de los resultados

Evolución de la Urbanización

La Figura 4 muestra los resultados del análisis de los patrones espaciales utilizando el análisis de firmas espectrales de la cobertura urbana de las imágenes satelitales en la administración zonal. Se presenta la evolución de la urbanización durante diferentes períodos de tiempo: 2000, 2005, 2015 y 2023. Se observa una expansión del 361.31% para el año 2005 en comparación con el año 2000, un aumento del 168.43% para el año 2015 con respecto al año 2005, y un incremento del 159.35% para el año 2023 en comparación con el año 2015. Aunque se nota una reducción en el porcentaje de crecimiento, se evidencia un crecimiento continuo y rápido.

Figura 4. Evolución de urbanización por años



Evolución de la urbanización por parroquias

De igual manera, se procedió a segmentar la información, y se presentan los resultados de la evolución de la urbanización por cada una de las parroquias que conforman la zona de estudio, como se detalla a continuación:

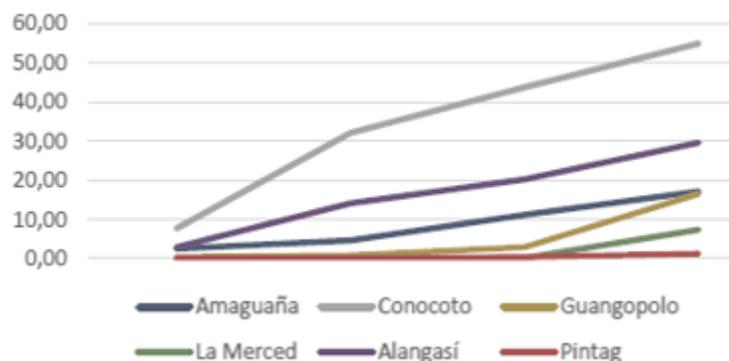
- En la Parroquia de Conocoto, se observa un mayor incremento durante el período entre 2000 y 2005, seguido de un crecimiento continuo y acelerado en años posteriores.
- En la Parroquia de Amaguaña, se registra un mayor crecimiento entre 2005 y 2015, seguido también de un crecimiento constante y acelerado.
- La Parroquia de Guangopolo exhibe un crecimiento limitado entre 2000 y 2015; no obstante, desde ese año hasta 2023, muestra un aumento significativo y rápido.
- En cuanto a la Parroquia de La Merced, se nota un crecimiento mínimo entre 2000 y 2015, con un área urbana casi inexistente, pero a partir de entonces y hasta 2023, experimenta un crecimiento sumamente acelerado.
- La Parroquia de Alangasí presenta su mayor crecimiento entre 2000 y 2005, seguido de una ligera disminución entre 2005 y 2015; no obstante, desde entonces hasta 2023, el crecimiento vuelve a ser considerable.
- Por último, la Parroquia de Pintag, siendo la más grande de la administración zonal, registra un crecimiento bajo entre 2000 y 2015, pero experimenta un aumento considerable en el último período.

Por otra parte, se encontró que la parroquia de Conocoto ha experimentado la mayor expansión en términos de kilómetros cuadrados (km²), representando un 48.21% de las áreas urbanas de toda la administración zonal para el año 2023. Le siguen las parroquias de Amaguaña con el 17.32%, Alangasí con el 15.96% y Pintag con el 8.03%. En contraste, las parroquias de La Merced y Guangopolo han acumulado la menor área urbana hasta el año 2023, con solo el 6.63% y 3.85%, respectivamente.

Al analizar las tasas de urbanización de cada una de las parroquias, se observa que, a pesar de la gran expansión en kilómetros cuadrados (km²), la parroquia de Pintag tiene la tasa más baja, casi completamente plana, alcanzando un máximo de solo el 1.28%. Por otro lado, las parroquias de Guangopolo y La Merced han experimentado un aumento significativo en la tasa durante el período

entre 2015 y 2023. Amaguaña muestra un aumento considerable en la tasa a partir de 2005, mientras que Alangasí exhibe una tasa de urbanización casi constante. En el caso de Conocoto, se observa una tasa mayor durante el período de 2000 a 2005, y continúa creciendo de manera exponencial en adelante.

Figura 5. Tasas de urbanización por parroquias



Patrones espaciales identificados

Tras el análisis de firmas espectrales de las imágenes satelitales se han identificado una serie de patrones espaciales, que se recogen a continuación:

- **Proximidad a los principales núcleos poblacionales.** Se observa un crecimiento concéntrico en áreas cercanas a los principales centros urbanos, especialmente en la zona urbana de la parroquia de Conocoto. Esto evidencia una influencia que se extiende sobre las parroquias contiguas como Amaguaña, Alangasí y Guangopolo. La zona urbana de Conocoto concentra la mayoría de los servicios y equipamientos de la administración zonal, como iglesias, escuelas, parques, centros financieros y el mercado más grande de la administración, que ofrece una amplia variedad de productos agrícolas y ganaderos para consumo. Además, cuenta con redes de transporte interno e intercantonal, y está conectada directamente con el centro de Sangolquí, el centro urbano del cantón Rumiñahui, y Quito. Estas características hacen de Conocoto un lugar geográfico idóneo para el desarrollo urbano.
- **Proximidad a las vías de comunicación.** Otro patrón identificado es que los asentamientos urbanos se han desarrollado en las cercanías de las vías de transporte que conectan las diferentes parroquias. Los asentamientos humanos han seguido la misma

distribución que las vías, siendo escasas las áreas donde se ha producido un crecimiento aleatorio o alejado de las principales vías. Se ha observado una expansión urbana considerable en la administración zonal, destacando la parroquia de Conocoto como la que ha experimentado la mayor expansión.

- **Topografía.** La topografía también desempeña un papel importante, ya que se ha observado que las personas prefieren establecer sus asentamientos principalmente en áreas con pendientes bajas, seguidas en menor medida por áreas con pendientes medias, y en muy pocas ocasiones en áreas con pendientes altas.

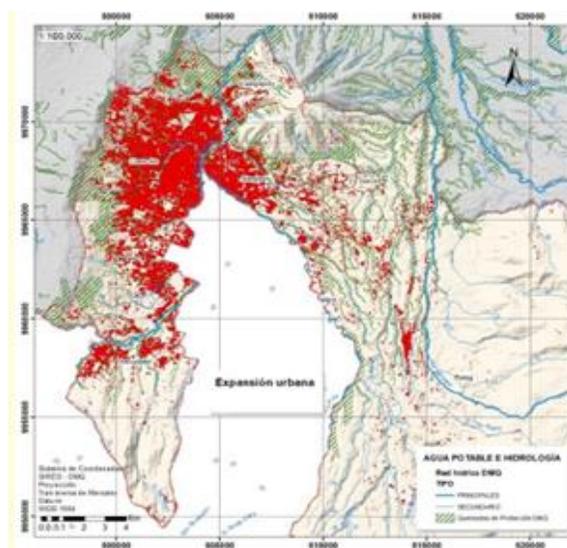
Crecimiento urbano y sostenibilidad

Luego de los análisis espectrales respectivos se pudo identificar los patrones de crecimiento urbano y sostenibilidad, los cuales se resumen a continuación:

- **Expansión urbana en quebradas de protección**

La figura ilustra la expansión urbana hasta el año 2023, donde se destacan las áreas de quebradas protegidas, espacios que, debido a sus características, son considerados riesgosos para la construcción. Teniendo en cuenta un área urbana total de 45.56 km² para la zona en el año 2023, solo el 5.02% se ve afectado por zonas de protección de quebradas, lo que indica una expansión adecuada.

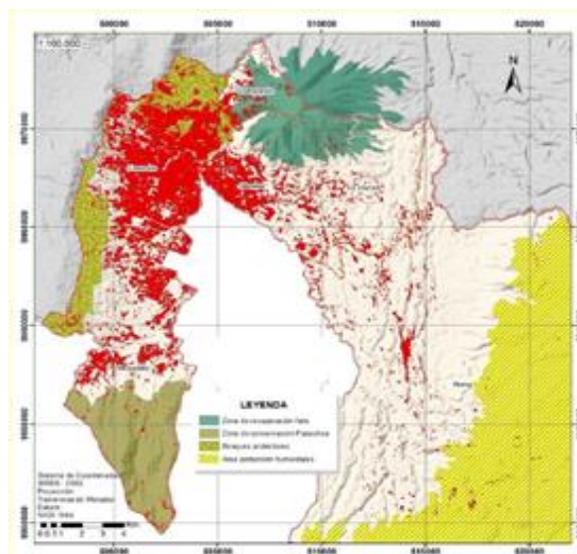
Figura 6. Urbanización para el año 2023 (rojo) y quebradas de protección



- **Expansión en zonas de conservación ecológica**

La región cuenta con numerosas áreas de conservación ecológica, en parte debido a su proximidad al Pasochoa y al Ilaló. En el caso del Ilaló, se ha propuesto su recuperación debido a la erosión excesiva causada por prácticas agrícolas inadecuadas, la pendiente pronunciada, las técnicas de cultivo erróneas y la composición del suelo. Por otro lado, el Pasochoa ha sido designado como refugio de vida silvestre. Después de analizar los datos, se determinó que el bosque protector se ve afectado en un 12.56%, mientras que la protección de humedales se ve afectada en un 0.49%, la conservación del Pasochoa en un 2.42% y la recuperación del Ilaló en un 5.83%.

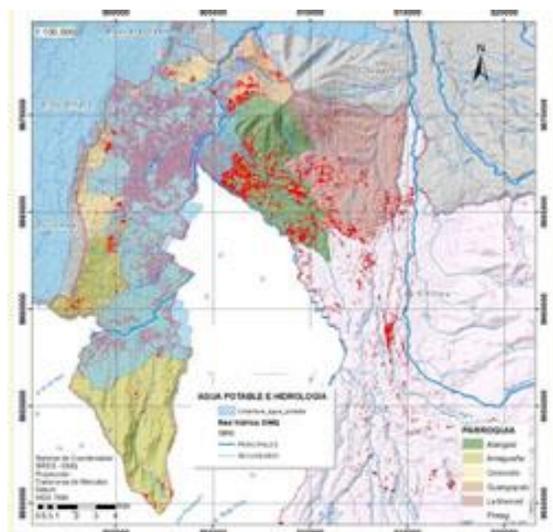
Figura 7. Expansión urbana (rojo) en zonas de conservación ecológica



- **Acceso al servicio básico de agua potable**

A continuación, la figura presenta la red hídrica que se extiende por la zona, así como también la cobertura oficial de agua potable del DMQ. Considerando un área urbana total de 44.05 km² para el año 2023, se determinó que 27.7 km² tienen acceso al agua potable según el análisis de firmas espectrales, lo que equivale al 62.88% de las áreas urbanizadas. Por lo tanto, el 37.12% restante no cuenta con acceso al agua potable y generalmente dependen de tanques de reserva de agua potable, entre otras soluciones.

Figura 8. Acceso al agua potable e hídrica



▪ **Variaciones en la cobertura del suelo**

Para examinar los cambios en la cobertura del suelo, se ha categorizado el uso del suelo en cuatro grandes grupos: el área urbana, las zonas con potencial edificable, industrial o árido, las áreas de protección y conservación. Después de analizar los datos, se observa que el crecimiento de la urbanización en la zona ha ocurrido principalmente en áreas designadas para edificación, industria o en terrenos áridos o sin cobertura vegetal; áreas que, debido a sus condiciones naturales, son adecuadas para la urbanización. Sin embargo, también se nota una reducción en las áreas de protección y conservación, lo que indica que existen asentamientos que se han establecido en el territorio de manera descontrolada y que están afectando áreas de importancia ecológica.

Conclusiones

- A través del análisis de firmas espectrales en imágenes se identificaron patrones de expansión urbana, cambios en la cobertura terrestre y tendencias a lo largo del tiempo, lo cual demuestra el potencial y la efectividad de este tipo de análisis para abordar los desafíos asociados con la gestión del territorio y la expansión urbana, y para avanzar hacia un desarrollo urbano más sostenible y equitativo.
- Se desarrolla una metodología que pasa por las fases de adquisición, preprocesamiento y análisis de las firmas espectrales, a través del estudio de un caso específico.

Referencias

1. Abdelkader El Garouani a, fl. D. (2017). Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data: Case of Fez, Morocco. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 160-169.
2. Abdullahi, M. A., Barde, u., & Iliyas, I. (2021). Assessment of Urban Growth Using Geographic Information System (Gis) and Remote Sensing In Potiskum Town. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 3(7), 1154-1163.
3. Bhatta, B. (2010). *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data*. New York: Springer.
4. Dadhich, P. N., & Hanaoka, S. (2011). Spatio-temporal Urban Growth Modeling of Jaipur, India. *Journal of Urban Technology*, 18(3), 45-65. doi:<https://doi.org/10.1080/10630732.2011.615567>
5. INEC. (17 de marzo de 2024). *ecuadorencifras*. Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/ecuador-crecio-en-2-5-millones-de-personas-entre-2010-y-2022/>
6. Kantakumar, L. N., Kumar, S., & Schneider, K. (2016). Spatiotemporal urban expansion in Pune metropolis, India using remote sensing. *Habitat International*, 51, 11-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.10.007>
7. Peverga, D., Terseer, W., Kwanga, G. M., & Terngu, P. (2021). Spatio-Temporal Analysis of Urban Expansion and Land Use, Land Cover Change in Katsina-Ala Town, Benue State-Nigeria. *International Journal of Arts Humanities and Social Sciences Studies*, 6(7), 93-102.
8. Saleem, A., & Mahmood, S. (2023). Spatio-temporal assessment of urban growth using multi-stage satellite imageries in Faisalabad, Pakistan. *Advanced Remote Sensing*, 3(1), 10-18.
9. Sun, W., Shan, J., Wang, Z., Wang, L., Lu, D., Jin, Z., & Yu, K. (2020). Geospatial Analysis of Urban Expansion Using Remote Sensing Methods and Data: A Case Study of Yangtze River Delta, China. *Hindawi Complexity*, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1155/2020/3239471>

10. UN-Habitat. (2022). World Cities Report 2022. Envisaging the Future of Cities. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat).
11. Viana, C. M., Oliveira, S., Oliveira, S. C., & Rocha, J. (2019). 29 - Land Use/Land Cover Change Detection and Urban Sprawl Analysis. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, 621-651. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00029-6>
12. Zheng, Y., He, Y., Zhou, Q., & Wang, H. (2022). Quantitative Evaluation of Urban Expansion using NPP-VIIRS Nighttime Light and Landsat Spectral Data. *Sustainable Cities and Society*, 76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103338>

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).