

ARTÍCULOS

Análisis y estimación de la cobertura forestal de un área urbana mediante el índice NDVI del portal Sentinelhub

Analysis and estimation of the forest cover of an urban area using the NDVI index of the Sentinelhub portal



Carlos Dueñas-Valcarcel¹, Manuel Fernández-Atho², María Delgado-Laime³, Yudith Choque-Quispe⁴



ceduenas@unajma.edu.pe

¹ Universidad Nacional José María Arguedas. Facultad de Ingeniería. Andahuaylas, Perú.



mfernandez@unajma.edu.pe

² Universidad Nacional José María Arguedas. Facultad de Ingeniería. Andahuaylas, Perú.



mcdelgado@unajma.edu.pe

³ Universidad Nacional José María Arguedas. Facultad de Ingeniería. Andahuaylas, Perú.



ychoque@unajma.edu.pe

⁴ Universidad Nacional José María Arguedas. Facultad de Ingeniería. Andahuaylas, Perú.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 18, núm. 2, 2024

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 02 enero 2024

Aprobación: 27 junio 2024

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6283>

Autor de correspondencia:

ceduenas@unajma.edu.pe



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar: Dueñas-Valcarcel, D., Fernández-Atho, M., Delgado Laime, M., & Choque-Quispe, Y. (2024). Análisis y estimación de la cobertura forestal de un área urbana mediante el índice NDVI del portal Sentinelhub. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 18(2), 14-24.
<https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6283>

RESUMEN

Este estudio, se centra en la cobertura forestal de tres distritos en el ámbito urbano de la provincia de Andahuaylas, región Apurímac en Perú, la cual afronta problemas de deforestación. El objetivo fue determinar la cobertura forestal en el área urbana de la provincia de Andahuaylas hasta el 2030, para la revelación de los escenarios futuros de la cobertura forestal, contribuyendo al desarrollo de la planificación urbana y a la creación de ciudades sostenibles. Para el área de estudio, se utilizaron datos registrados entre los años 2017-2023, a partir de las imágenes NDVI del portal Sentinelhub. Permitiendo disponer de información de bosques tropicales y templados; arbustos y pastizales; zonas áridas de roca; áreas urbanas o artificiales que han cambiado como consecuencia del proceso de urbanización. Se determinaron las superficies de bosque en el área de estudio. Posteriormente se utilizó la regresión lineal con un p valor = 0,046, alcanzando un R² de 0,583 en un rango medio, logrando estimar los escenarios futuros del bosque al 2030. Se concluye que la tendencia es decreciente en la cobertura forestal en 26,50% al año 2030.

Palabras claves: cobertura forestal; imágenes satelitales; índice NDVI

ABSTRACT

This study focuses on the forest cover of three districts in the urban area of the province of Andahuaylas, Apurímac region, Peru, which is facing deforestation problems. The objective was to determine the forest cover in the urban area of the province of Andahuaylas until 2030, to reveal future scenarios of forest cover, contributing to the development of urban planning and the creation of sustainable cities. For the study area, data recorded between the years 2017-2023 were used, based on NDVI images from the Sentinelhub portal. This allowed for the availability of information on tropical and temperate forests, shrubs and grasslands, arid rock zones, and urban or artificial areas that have changed due to the urbanization process. The forest surfaces in the study area were determined. Subsequently, linear regression was used with a p-value = 0,046, reaching an R² of 0,583 in a medium range, managing to estimate future forest scenarios by 2030. It is concluded that the trend is decreasing in forest cover by 26,50% by the year 2030.

KEYWORDS: forest cover; NDVI index; satellite images

INTRODUCCIÓN

Las ciudades tienen una estructura dinámica, se desarrolla y tiende a crecer, influenciada por factores económicos, tecnológicos, políticos y sociopsicológicos que originan que estas ciudades se expandan. Algunas ciudades se forman en el entorno de bosques tropicales andinos, las cuales modifican la cobertura vegetal del área mientras se van incrementando las actividades económicas, sin embargo, no se tiene en cuenta los efectos de estos cambios en el mediano y largo plazo, y en algunos casos estos cambios se realizan sin ninguna planificación.

Según Pérez *et al.* (2007) muchos bienes y servicios ecosistémicos son provistos por los bosques tropicales, y estos son aprovechados por la sociedad. Sin embargo, no se ha considerado la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales al cambio climático, y se han desarrollado pocos planes de respuesta, de manera desconectada del resto de la sociedad. Teniendo en cuenta que importantes sectores socioeconómicos dependen de los servicios ecosistémicos de los bosques, estos deben participar en la toma de decisiones sobre políticas y estrategias que incidan sobre la adaptación de los bosques, por lo que es necesario desarrollar un monitoreo constante del estado de los mismos, a través de técnicas remotas o *in situ*.

Según Martínez y Solís (2018), la teledetección obtiene información a distancia de un determinado objeto situado sobre la superficie terrestre, mediante la interacción de los principales elementos: sensor, objeto de estudio y flujo energético (Espectro Electromagnético). Para el caso de la vegetación y la cobertura forestal, se observa que la reflectividad se ve afectada por factores como la geometría y posición de las hojas, ángulo de observación, lignina y el tipo de suelo. En ese sentido, se ha utilizado la teledetección para poder estudiar diferentes temáticas en un área determinada, con la finalidad de analizar el cambio de la cobertura de suelo, en periodos determinados de tiempo.

Girimonte y García (2018, p. 42) señalan que el uso de datos espectrales para evaluar parámetros de vegetación está basado en la reflectancia diferencial de los tejidos fotosintéticos. Asimismo, los diferentes tipos de vegetación responderán de una manera distinta, debido a la absorción de la clorofila, por ejemplo, las hojas verdes reflejan muy poca luz correspondiente al rojo, sin embargo, muestran una alta reflectancia en la zona del infrarrojo cercano.

Dinç y Gül (2021, p.177) realizaron una estimación cuantitativamente de la futura cubierta terrestre de tres ciudades diferentes de Turquía: Ankara, Estambul e Izmir, en base a la clasificación Corine Land Cover entre los años 2000 - 2018, las cuales se obtuvieron individualmente a partir de imágenes de satélite para supervisar los cambios en la cobertura del suelo para Turquía.

Los índices de Vegetación y Cobertura, consisten en imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. El resultado permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales (Juzga, 2016), entre ellos destaca el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI).

El índice NDVI permite generar una imagen que muestra el verdor (la biomasa relativa). Este índice aprovecha el contraste de las características de dos bandas de un dataset ráster multiespectral, las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad de los materiales de las plantas en la banda cercana al infrarrojo (Caicedo y Peña, 2019).

El NDVI se utiliza para hacer un seguimiento de las sequías, supervisar y predecir la producción agrícola, ayudar en la predicción de las zonas con riesgo de incendio y cartografiar la desertización, asimismo, en el seguimiento de la vegetación global porque ayuda a compensar los cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie, la orientación y otros factores extraños (Gavilanes Jaen, 2020).

Estudiar la cobertura forestal mediante el índice NDVI, resulta de gran importancia en las zonas de nuestro planeta que cuenten con bosques y que estén propensas a una disminución de su área, por diversos factores.

En este estudio se analizó un área urbana del Perú que se encuentra rodeada de un bosque tropical en la sierra andina. El Perú se encuentra ubicado en la zona intertropical de Sudamérica comprendida entre la línea del Ecuador y el Trópico de Capricornio, cubriendo un área de 1`285.215 km², que lo convierte en el vigésimo país más grande en tamaño de la Tierra y el tercero de América del Sur y posee la mayoría de microclimas del mundo lo que le da gran diversidad de recursos naturales (Cavero, 2016).

Según el Gobierno Regional de Apurímac (2016), la región posee un 96% del territorio con capacidad de uso mayor para tierras de protección, forestal y pastos. Asimismo, el 60% del territorio sufre la desertificación de la tierra (pérdida

de productividad a causa del sobrepastoreo, deforestación, entre otros), en la región se consume más de 5000 TJ de energía producto del recurso leña, es decir, 81% del consumo regional de energía.

Por lo que la presente investigación brinda datos relevantes a futuro, que permitirán implementar acciones para la conservación de los bosques en el área urbana de la provincia de Andahuaylas de la región Apurímac.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona elegida

El área de estudio se encuentra en el Perú, en la región de Apurímac, provincia de Andahuaylas, en la cordillera de los Andes (ver Figura 1).



FIGURA 1
Ubicación de la región Apurímac

La zona urbana de la provincia de Andahuaylas, incluye los distritos de Talavera, Andahuaylas y San Jerónimo, en las Coordenadas UTM WGS84 Zona 19L, de acuerdo a la tabla 1 y figura 2.

TABLA 1
Características generales de las muestras de gas natural (% molar)

Coordenadas UTM WGS84 Zona 19L		
Puntos de Control	Este (m)	Norte (m)
P1	666514	8492793
P2	680611	8492700
P3	666475	8486209
P4	680565	8486112



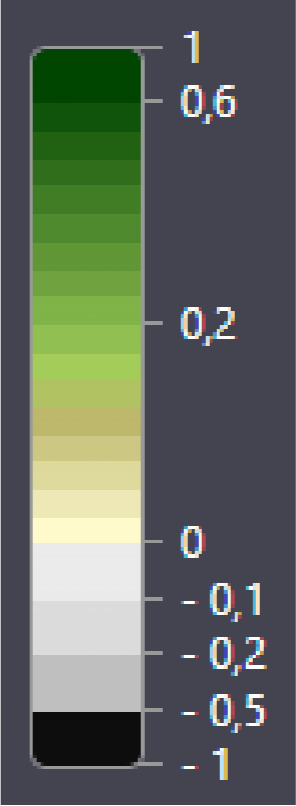
FIGURA 2
Ubicación geográfica del área de estudio y de los puntos de control descritos en la tabla 1

Obtención de datos

Las imágenes satelitales con el índice NDVI se obtienen directamente de la información de los servicios de seguimiento del suelo del portal Sentinelhub, a partir de imágenes satelitales Sentinel 2, a las cuales el mismo portal Sentinelhub le realiza la corrección atmosférica (EO Browser, 2014), por lo que al ser descargadas ya cuentan con la corrección atmosférica incluida.

El índice NDVI ha sido calculado a través del portal Sentinelhub EO Browser en el que se presenta una descripción de los rangos desde -1 a +1 y su relación con las diferentes tonalidades y colores, de acuerdo con la tabla 2, por lo tanto estas imágenes al ser descargadas del portal Sentinelhub ya cuentan con el índice NDVI .

TABLA 2
Descripción del índice NDVI del portal Sentinelhub EO Browser

Descripción	Rangos de números y colores
<p>El índice de vegetación de diferencia normalizada es un índice simple pero eficaz para cuantificar la vegetación verde.</p> <p>Es una medida del estado de salud de la vegetación basada en cómo las plantas reflejan la luz en determinadas longitudes de onda.</p> <p>El rango de valores del NDVI es de -1 a 1.</p> <p>Los valores negativos del NDVI (valores cercanos a -1) corresponden al agua.</p> <p>Los valores cercanos a cero (-0,1 a 0,1) generalmente corresponden a zonas áridas de roca, arena o nieve.</p> <p>Los valores bajos y positivos representan arbustos y pastizales (aproximadamente 0,2 a 0,4)</p> <p>mientras que los valores altos indican selvas tropicales y templadas (valores cercanos a 1).</p>	

Metodología

Las imágenes satelitales Sentinel 2 con el índice NDVI descargadas del portal Sentinelhub deben ser solo georreferenciadas en el software ArcGis, usando las coordenadas de los puntos de control descritos en la tabla 1, debido a que estas imágenes ya cuentan con la corrección atmosférica.

En esta investigación se utilizó la técnica de la clasificación no supervisada para la vectorización de las imágenes del análisis NDVI. La clasificación no supervisada permite vectorizar una imagen, ésta trabaja con los píxeles y es esencialmente una clasificación automatizada basándose en sus características comunes sin la necesidad de conocimiento previo sobre esas áreas, mediante la utilización de algoritmos como el K-means; para su ejecución se debe especificar el número de clases que se busca obtener. Ha sido utilizada en diversos estudios como los de Du (2007), Shah et al. (2004), Liao et al. (2001) y Chen y Fang (2008).

Se procedió a realizar la vectorización mediante la clasificación no supervisada de las imágenes con el análisis NDVI del periodo 2017 – 2023, para obtener archivos en formato shapefile, mediante el software ArcGIS 10.5, considerando 4 rangos: de -0,5 a -0,1 (áreas urbanas); de -0,1 a 0,2 (zonas áridas o desprovistas de vegetación); de 0,2 a 0,6 (arbustos y pastizales) y de 0,6 a 1 (bosques o selvas tropicales), además se excluirán los valores de -0,5 a -1 de color negro, dado que en el área de estudio no se analizaron cuerpos de agua por no presentar lagos, lagunas, o ríos con un ancho superior de 10 m que permita ser detectado por la resolución de las imágenes satelitales Sentinel, acorde a lo indicado por la ESA (2022).

Las imágenes satelitales obtenidas del portal Sentinelhub EO Browser fueron determinadas dentro del periodo hidrológico de transición entre los meses de agosto y septiembre de los siete años en estudio, con la finalidad de que los resultados no se vean afectados por el cambio estacional de las precipitaciones.

Una vez obtenida la vectorización en formato shapefile, se calcularon las áreas en 4 rangos en las imágenes satelitales de los años 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023. Posteriormente se analizó la regresión lineal de los valores de las áreas del bosque mediante el uso del software SPSS, para hallar la ecuación que permita la estimación de la superficie del bosque al año 2030.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3 se presenta el análisis del índice NDVI en el periodo 2017-2023, obtenidos del portal Sentinelhub EO Browser, en el que se diferencia las tonalidades y colores descritos en la tabla 2.

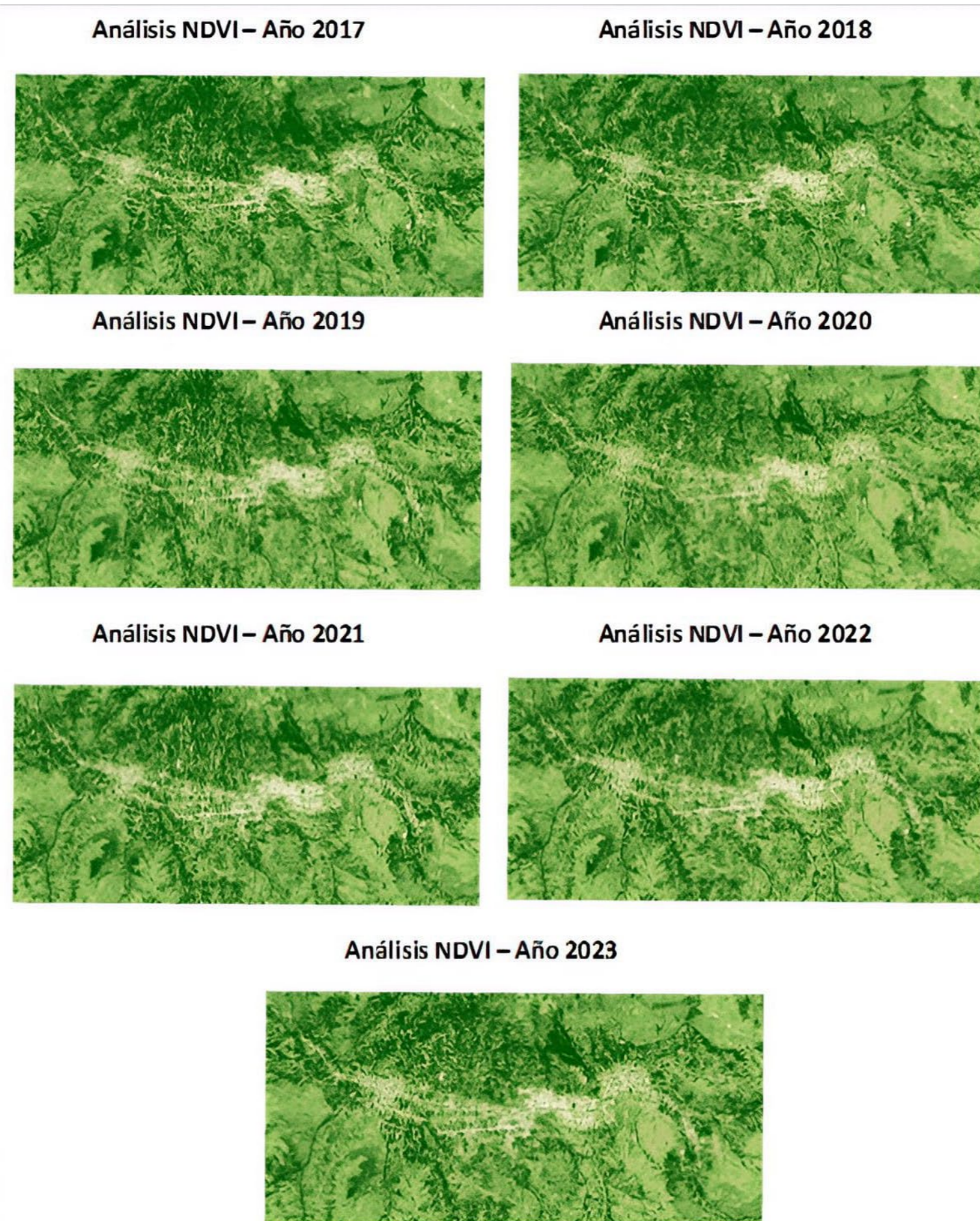


FIGURA 3
Análisis NDVI en el periodo 2017-2023

En la tabla 3, se presentan las áreas de los cuatro rangos de los años del 2017 al 2023, obtenidas a partir de las imágenes NDVI. En la figura 4, se muestra un comparativo de la superficie de zonas.

TABLA 3
Superficies de las zonas obtenidas del análisis NDVI (ha)

Año	Bosques o selvas tropicales	Arbustos y pastizales	Zonas áridas o desprovistas de vegetación	Áreas urbanas
2017	2790,86	2342,61	3168,19	980,88
2018	2380,89	2340,14	3261,65	1299,86
2019	2186,36	2270,17	3376,71	1449,30
2020	2118,30	2359,78	3204,62	1599,84
2021	2296,96	2540,53	3082,18	1362,88
2022	2126,27	2337,92	2980,27	1838,08
2023	2121,75	2525,43	3079,75	1555,62

Cambio de la cobertura del suelo en ha

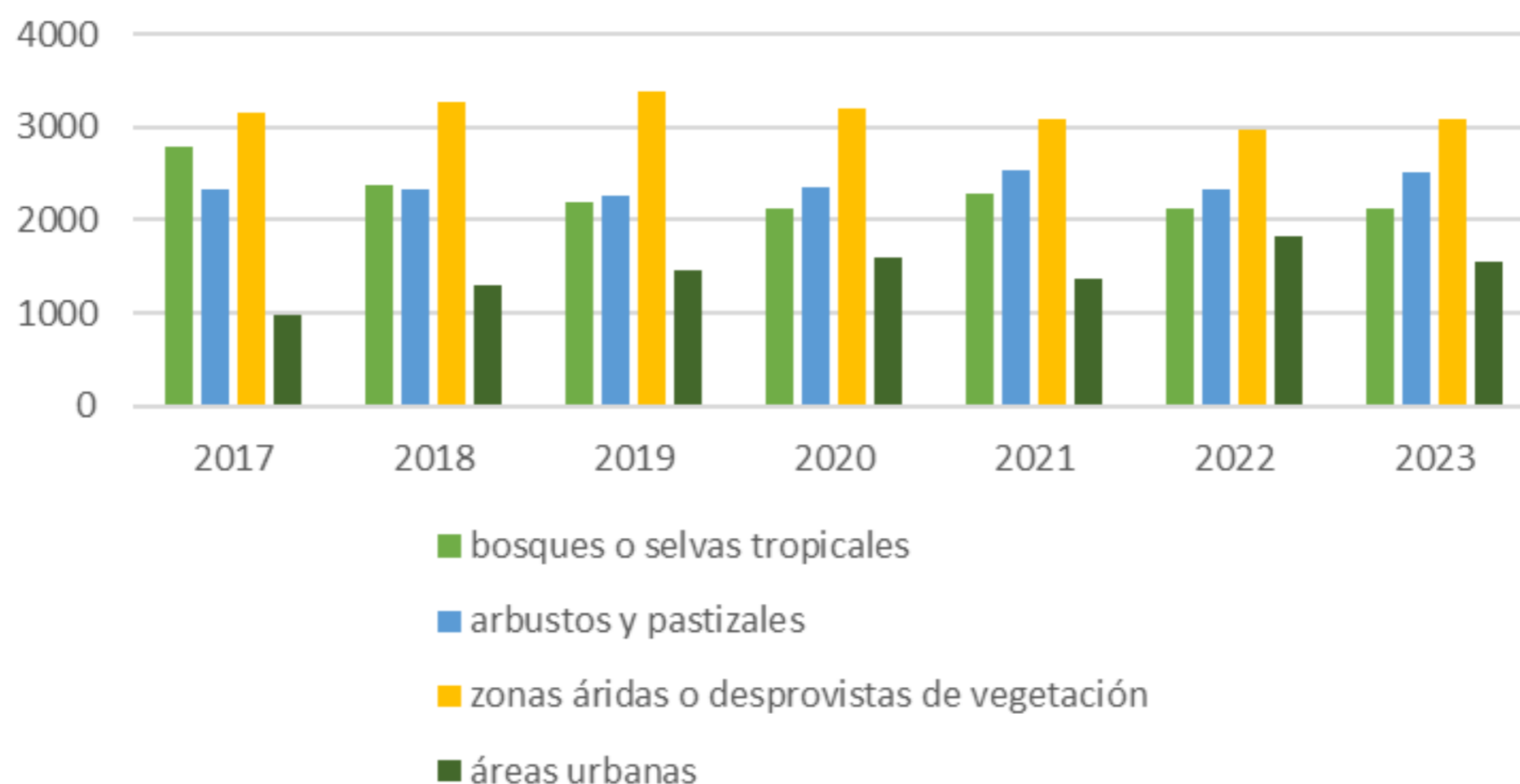


FIGURA 4
Comparativo de superficie de zonas

La aplicación de la regresión lineal a las superficies del bosque entre los años 2017 y 2023, obtuvo un p valor de 0,046, sin embargo, se presenta un R² de 0,583 que indica un valor medio, es decir, el 58,3% de la cobertura forestal va a depender del año de estudio, y un 41,7 % va a depender de otros factores (Ver tablas: 4, 5, 6 y figura 5).

TABLA 4
Análisis ANOVA

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
¹ Regresión	206737,958	1	206737,958	6,996	0,046 ^b
Residuo	147753,791	5	29550,758		
Total	354491,749	6			

a. Variable dependiente: Área
b. Predictores: (Constante), Año

TABLA 5
Resumen del modelo

Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,764 ^a	0,583	0,500	171,90334

a. Predictores: (Constante), Año
b. Variable dependiente: Área

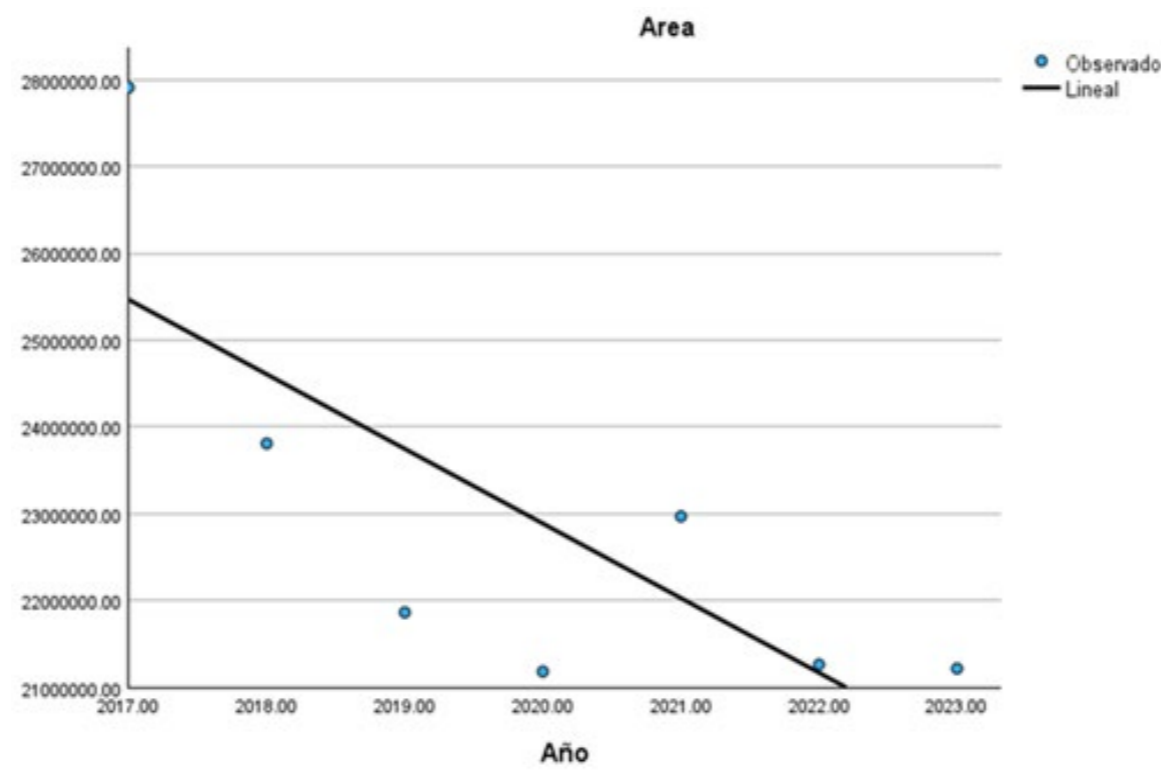


FIGURA 5
Modelo lineal de los datos de cobertura de bosque

TABLA 6
Coeficientes para determinar la ecuación de la regresión lineal

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
¹ (Constante)	175861,893	65623,121		2,680	0,044
Año	-85,927	32,487	-0,764	-2,645	0,046

a. Variable dependiente: Área

La ecuación 1 permite estimar la superficie del bosque hasta el año 2030:

$$Y = 175861.893 - 85.927X \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

Y = Área (ha)

X= Año

En la tabla 7 se muestran las estimaciones de la cobertura forestal del periodo 2024 – 2030; utilizando la ecuación se obtiene $Y = 175861.893 - 85.927X$, donde Y se refiere a la cobertura forestal en ha y X se refiere al año de estudio que comprende desde el año 2024 al 2030.

TABLA 7
Estimación de las superficies boscosas del año 2024 al 2030

Estimación del área en ha	
Año	Bosques o selvas tropicales
2024	1945,06
2025	1859,13
2026	1773,21
2027	1687,28
2028	1601,35
2029	1515,42
2030	1429,50

En el periodo 2017 – 2020 se presentó un comportamiento descendente de la cobertura forestal, mostrando un cambio al año 2021 con un aumento en 8,43%, sin embargo, al año 2022 ocurre una disminución de un 7,43% y en el año 2023 de 0,21%, tal cual se observa en la tabla 8.

TABLA 8
Porcentaje de cambio en la cobertura forestal obtenidas del índice NDVI

Bosques o selvas tropicales		
Año	Área	% Variación respecto al año anterior
2017	2790,86	
2018	2380,89	-14,68
2019	2186,36	-8,17
2020	2118,30	-3,11
2021	2296,96	+8,43
2022	2126,27	-7,43
2023	2121,75	-0,21

Con la finalidad de contrastar los datos obtenidos en la regresión lineal, se aplicó el suavizado exponencial de Holt en el SPSS, obteniendo la predicción de las superficies en ha del área de la zona boscosa entre los años 2024 y 2030 (Ver tabla 9).

TABLA 9
Predicción de las superficies boscosas en ha del año 2024 al 2030

Modelo	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Area-Modelo_1 Predicción	1960,85	1874,92	1789,00	1703,07	1617,14	1531,22	1455,29

Para cada modelo, las predicciones empiezan después del último valor no perdido en el rango del período de estimación solicitado, y finaliza en el último período para el cual los valores perdidos de todos los predictores están disponibles o al final del período de predicción solicitado, lo que suceda antes.

En la tabla 10 se indica la comparación entre la regresión lineal y el suavizado exponencial de Holt. La variación entre los resultados de superficie entre ambos métodos estadísticos se encuentra en el promedio del 1%.

TABLA 10
Comparación de las superficies boscosas con ambos métodos estadístico

Estimación del área en ha		
Año	Bosques o selvas tropicales	
	Regresión Lineal	Suavizado exponencial de Holt
2024	1945,06	1960,85
2025	1859,13	1874,92
2026	1773,21	1789,00
2027	1687,28	1703,07
2028	1601,35	1617,14
2029	1515,42	1531,22
2030	1429,50	1445,29

Es importante mencionar que la investigación solo abarcó datos desde 2017 hasta 2023, ya que el satélite Sentinel-2A fue lanzado el 23 de junio de 2015, y el Sentinel-2B, el 7 de marzo de 2017, proporcionando imágenes de la zona de estudio a partir de 2017. En consecuencia, dado que el periodo de datos históricos es de siete años (2017-2023), este artículo presenta una predicción que no excede los siete años de datos históricos, es decir, hasta 2030.

No se incluyeron imágenes satelitales Landsat de años anteriores a 2017 debido a que requieren un proceso obligatorio de corrección atmosférica. En cambio, las imágenes satelitales Sentinel-2 se descargan con la corrección atmosférica ya realizada por el portal Sentinelhub, lo que permite obtener datos más precisos y evita manipulaciones del usuario que podrían llevar a imprecisiones en el cálculo de superficies.

CONCLUSIONES

Siendo un área urbana, el análisis muestra una tendencia general de disminución de la cobertura forestal. Sin embargo, en 2021 se observa un aumento de la misma, posiblemente relacionado con las restricciones impuestas en la provincia de Andahuaylas durante la pandemia de COVID-19, las cuales afectaron el desarrollo normal de las actividades socioeconómicas y la expansión urbana.

Asimismo, el análisis estadístico muestra un R^2 de 0,583, lo cual indica una relación moderada; es decir, el 58,3% de la variabilidad en las estimaciones de la cobertura forestal puede explicarse por el año de estudio. Esto podría deberse a los efectos de la pandemia de COVID-19, que no permitieron obtener un R^2 más alto.

La tendencia de la cobertura forestal estudiada desde 2017 hasta 2023 es decreciente, con una disminución del 23,97%.

La estimación del área para el periodo 2024-2030 presenta un valor p de 0,046. Sin embargo, la correlación entre el año y el área de la cobertura forestal estimada es del 58,3%, lo cual también podría estar influenciado por la pandemia de COVID-19.

Para el periodo estimado 2024-2030, se observa una tendencia decreciente del 26,50%.

El área urbana mostró una tendencia creciente durante el periodo estudiado de 2017 a 2023, con un aumento del 58,59%.

REFERENCIAS

- Caicedo, E. y Peña, R. (2019) *Análisis del índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI) en la zona oriente del departamento del Tolima*. Tesis de Grado. Universidad de Ibagué. Disponible en: <https://repositorio.unibague.edu.co/server/api/core/bitstreams/665c7bcf-1297-4f2d-9f2e-65bb1a929b85/content>
- Cavero Villanueva, V. E. (2016) *Gestión de responsabilidad social en el Ejército y su contribución al Desarrollo Nacional y la mitigación de los efectos ante los Desastres Naturales en la costa-Chosica 2017*. Tesis de Grado. Instituto Científico y Tecnológico del Ejército, Escuela de Posgrado. Disponible en: <https://repositorio-icte.ejercito.mil.pe/bitstream/handle/ICTE/167/Tesis%20Bach%20Cavero%20Villanueva%20Victor%20Enrique.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chen, W., y Fang, K. (2008) "Multilevel thresholding algorithm based on particle swarm optimization for image segmentation" *27th Chinese Control Conference*. Kunming, China, 16-18 Julio 2008. China: IEEE, pp. 348-351. Doi: 10.1109/CHICC.2008.4605745
- Dinç, G., y Gül, A. (2021) "Estimation of the future land cover using Corine Land Cover data", *TeMA-Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 14 (2), pp. 177-188. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.6092/1970-9870/7671>
- Du, Q. (2007) "Unsupervised real-time constrained linear discriminant analysis to hyperspectral image classification", *Pattern Recognition*, 40 (5), pp. 1510-1519. Disponible en: <https://my.ece.msstate.edu/faculty/du/PR4.pdf>
- EO Browser (2014) Sentinelhub. Discover Copernicus Browser, Disponible en: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=9&lat=41.43027&lng=12.07484&themeld=DEFAULT-THEME&toTime=2024-01-13T15%3A18%3A47.171Z>

- ESA (2022) *Datos de Sentinel*. The European Space Agency. Disponible en: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Datos_de_Sentinel
- Gavilanes Jaen, S. E. (2020) *Índice de vegetación normalizada (NDVI) y su influencia en la agricultura de precisión*. Tesis de Grado. Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias. UTB. Disponible en: <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/8402/E-UTB-FACIAG-ING%20AGRON-000263.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Girimonte, P., y García, J. (2020) "El índice NDVI y la clasificación de áreas sembradas aprendizaje automático no Supervisado `k-means`", *Revista de investigación en modelos matemáticos aplicados a la gestión y la economía*, 7 (1), pp. 39-52. Disponible en: <https://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2016/04/Girimonte-Garcia-Fronti.pdf>
- Gobierno Regional de Apurímac (2016) "Incremento de la Cobertura Forestal para Mejorar los Servicios Ambientales en la Región Apurímac", *SIAR Apurímac*. Disponible en: <https://www.cooperacionsuiza.pe/wp-content/uploads/2017/09/gore-apurimac-sacha-tarpuy-mesa-tematica-forestal-sepia.pdf>
- Juzga, M. A. (2016) *Comparación de índices de vegetación en el cerro de la conejera de la ciudad de Bogotá*. Tesis de Grado. Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10654/15663>.
- Liao, P.S., Chen, T.S., y Chung, P.C. (2001) "A fast algorithm for multilevel thresholding", *Journal of Information Science and Engineering*, 17, pp. 713-727. Disponible en: <http://smile.ee.ncku.edu.tw/old/Links/MTable/ResearchPaper/papers/2001/A%20fast%20algorithm%20for%20multilevel%20%20thresholding.pdf>
- Martínez, R., y Solís, G.A. (2018) "Caracterización espectral y detección de flecha seca en palma africana en Puntarenas, Costa Rica", *Revista Geográfica de América Central*, 61(2), pp. 349-377. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.61-2.13>
- Pérez, C. J., Locatelli, B., Vignola, R., y Imbach, P. (2007) "Importancia de los bosques tropicales en las políticas de adaptación al cambio climático", *Recursos Naturales y Ambiente*, 51(52), pp. 4-11. Disponible en: https://www.cifor.org/publications/pdf_files/articles/ALocatelli0801.pdf
- Shah, C., Arora, M., y Varshney, P. (2004) "Unsupervised classification of hyperspectral data: an ICA mixture model based approach", *International Journal of Remote Sensing*, 25(2), 481-487. DOI: 10.1080/01431160310001618040