

Kenyi Lope Sunchulli

Evaluación multitemporal de la deforestación en la ecorregión de yungas bolivianas del Parque nacional Bahuaja Sonene y s...



Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:507505599

Fecha de entrega

3 oct 2025, 12:56 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

3 oct 2025, 12:58 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Kenyi Lope Sunchulli.pdf

Tamaño del archivo

1.1 MB

25 páginas

8714 palabras

46.671 caracteres

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 9%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 12% Fuentes de Internet
- 5% Publicaciones
- 9% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.continental.edu.pe	2%
2	Internet	repositorio.unap.edu.pe	<1%
3	Internet	wwflac.awsassets.panda.org	<1%
4	Internet	dspace.ups.edu.ec	<1%
5	Internet	www.coursehero.com	<1%
6	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
7	Trabajos entregados	Sim University on 2025-04-13	<1%
8	Internet	repositorio.uct.edu.pe	<1%
9	Internet	chapingo-cori.mx	<1%
10	Trabajos entregados	upeu on 2024-12-08	<1%
11	Internet	www.cambridge.org	<1%

12	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
13	Internet	repositorio.undac.edu.pe	<1%
14	Internet	www-emerald-com-443.webvpn.sxu.edu.cn	<1%
15	Trabajos entregados	Universidad Andrés Bello on 2024-12-01	<1%
16	Internet	discovery.researcher.life	<1%
17	Internet	hdl.handle.net	<1%
18	Internet	ijurm.imo.org.ir	<1%
19	Internet	patents.google.com	<1%
20	Internet	dergipark.org.tr	<1%
21	Internet	repositorio.unasam.edu.pe	<1%
22	Trabajos entregados	Infile on 2021-12-06	<1%
23	Internet	www.iicanet.org	<1%
24	Internet	mextesol.net	<1%
25	Internet	www.grem.uha.fr	<1%

26	Internet	www.atrapalo.com.co	<1%
27	Internet	www.researchgate.net	<1%
28	Internet	es.mongabay.com	<1%
29	Internet	www.tandfonline.com	<1%
30	Trabajos entregados	Universidad Nacional Mayor de San Marcos on 2024-08-20	<1%
31	Internet	repositorio.utn.edu.ec	<1%
32	Internet	repositoriobe.espe.edu.ec	<1%
33	Publicación	"Análisis y modelación de patrones y procesos de cambio", Universidad Nacional ...	<1%
34	Trabajos entregados	Universidad Ricardo Palma on 2021-06-06	<1%
35	Internet	armoniabolivia.org	<1%
36	Internet	congresosuelo.inifap.gob.mx	<1%
37	Internet	mdpi-res.com	<1%
38	Internet	uladech.edu.pe	<1%
39	Publicación	Caulfield, Mark E.. "Piecing Together Complexity: the Co-Evolution of Agroecosyst...	<1%

40	Trabajos entregados	Universidad Nacional de Jaen on 2025-09-26	<1%
41	Trabajos entregados	Universidad Privada Antenor Orrego on 2023-07-11	<1%
42	Trabajos entregados	Unviersidad de Granada on 2023-06-04	<1%
43	Internet	editora.iabs.org.br	<1%
44	Internet	es.scribd.com	<1%
45	Internet	issuu.com	<1%
46	Internet	papelesdepoblacion.uaemex.mx	<1%
47	Internet	repositorio.catie.ac.cr	<1%
48	Internet	repositorio.espe.edu.ec	<1%
49	Internet	www.alrc.tottori-u.ac.jp	<1%
50	Internet	www.redpav-fpolar.info.ve	<1%
51	Internet	www.slideshare.net	<1%
52	Internet	www.storytellersvault.com	<1%

Evaluación multitemporal de la deforestación en la ecorregión de yungas bolivianas del Parque nacional Bahuaja Sonene y su zona de amortiguamiento

KENYI M. LOPE-SUNCHULLI¹ LOAYDA A. CONDORI-TURPO² PEDRO V. QUISPE-APAIZA³ JUAN E. VIGO-RIVERA⁴ EDWIN R. GUTIERREZ TITO⁵

¹ Universidad Peruana Unión, Perú. ² Universidad Peruana Unión, Perú ³ Universidad Peruana Unión, Perú ⁴ Universidad Peruana Unión, Perú ⁵ parque Nacional Bahuaja Sonene, Servicio nacional de áreas naturales protegidas, Perú.

Kenyi M. Lope: kenyilope@upeu.edu; Loayda A. Condori: loayda.ct@upeu.edu.pe; Pedro V. Quispe: pedro.qa@upeu.edu; Juan E. Vigo: eduardo.vigo@upeu.edu.pe; Edwin R. Gutierrez: gutierreztitoedwinrufo@gmail.com

RESUMEN. La investigación se centra en el análisis multitemporal de la deforestación en las Yungas bolivianas dentro del Parque Nacional Bahuaja Sonene y su zona de amortiguamiento en los años 2000 y 2024. Utilizando imágenes satelitales de Landsat así mismo se aplicaron métodos con un enfoque basado en el Sistema de Información Geográfica (SIG) para generar mapas temáticos y aplicar modelos estadísticos que nos puedan indicar el nivel de deforestación en la zona de estudio estandarizados de procesamiento digital como una clasificación supervisada de imágenes y análisis geoespacial para cuantificar la pérdida de cobertura forestal y evaluar los impactos de las actividades humanas, como la agricultura y la minería, en el ecosistema como los Bosques Montanos y Yungas Bolivianas. Los resultados muestran que la deforestación en la zona de amortiguamiento ha aumentado considerablemente desde 2017, con un máximo de 3135,28 hectáreas deforestadas, atribuible principalmente a la expansión agrícola. En contraste, las Yungas bolivianas dentro del parque presentaron una deforestación más controlada, aunque también afectada por factores naturales como cambio climático.

El análisis multitemporal nos ha permitido visualizar las diferencias en las tasas de deforestación que van desde el 15.5% entre las zonas de estudio y subraya la necesidad urgente de adoptar estrategias de conservación diferenciadas. Así mismo los resultados son fundamentales para la toma de decisiones en la gestión sostenible de los recursos naturales y la protección de la biodiversidad en la región, contribuyendo a la planificación territorial y la mitigación de los efectos adversos de la deforestación.

Palabras clave: deforestación, análisis multitemporal, imágenes satelitales, sistema de información geográfica, actividades antropogénicas.

ABSTRACT. The research focuses on the multitemporal analysis of deforestation in the Bolivian Yungas within the Bahuaja Sonene National Park and its buffer zone between the years 2000 and 2024. Using Landsat satellite images, methods based on a Geographic Information System (GIS) were also applied to generate thematic maps and apply statistical models that can indicate the level of deforestation in the study area. Standardized digital processing, such as supervised image classification and geospatial analysis, were used to quantify forest cover loss and assess the impacts of human activities, such as agriculture and mining, on the ecosystem of the Bolivian Montane Forests and Yungas. The results show that deforestation in the buffer zone has increased significantly since 2017, with a maximum of 3,135.28 hectares deforested, mainly attributable to agricultural expansion. In contrast, the Bolivian Yungas within the park showed more controlled deforestation, although it was also affected by natural factors such as climate change. The multi-temporal analysis allowed us to visualize the differences in deforestation rates, ranging from 15.5% between the study areas, and underscores the urgent need to adopt differentiated conservation strategies. The results are also essential for decision-making in the sustainable management of natural resources and the protection of biodiversity in the region, contributing to territorial planning and mitigating the adverse effects of deforestation.

Keywords: deforestation, multitemporal analysis, satellite imagery, geographic information system, anthropogenic activities.

INTRODUCCIÓN

La deforestación es un desafío ambiental global que provoca inundaciones, sequías, erosión, contaminación atmosférica y pérdida de biodiversidad, afectando al 70% de las especies terrestres que habitan en los bosques, además de contribuir significativamente al cambio climático (Kessler y Schmidt-Lebuhn, 2006; Mendoza y Cano, 2012). Este fenómeno incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero y privado a las comunidades de servicios ecosistémicos esenciales, impactando especialmente a poblaciones dependientes de los bosques, como las comunidades amazónicas (FAO, 2018). Sin efectivas, se estima que la deforestación podría superar las 350 mil hectáreas anuales para 2030 (World Resources Institute, 2020).

La problemática ambiental en esta región ha adquirido una relevancia creciente debido a la acelerada pérdida de cobertura vegetal, la fragmentación de hábitats y las amenazas a la

biodiversidad, lo que exige una gestión sustentable fundamentada en herramientas tecnológicas de alta resolución y en análisis rigurosos (Programa Bosques 2016; Smith y Schwartz 2015).

El escenario se encuentra contextualizado por una biodiversidad única, endémica y en peligro, que alberga especies de flora y fauna en riesgo de extinción, muchas de las cuales se concentran en los ecosistemas de las Yungas, considerados uno de los sistemas ecológicos más ricos y vulnerables de Sudamérica (Diana & Noa, n.d.) así mismo la expansión de actividades humanas, como la agricultura en monocultivo, la ganadería extensiva, la minería ilegal, la apertura de caminos y la migración poblacional hacia áreas rurales, ha incrementado la presión sobre estos ecosistemas naturales (Municipalidad de Pangoa 2018; Butler 2021) la deforestación no solo afecta la integridad de los bosques, sino que también perturba los ciclos hidrológicos, causa pérdida de biodiversidad y altera los servicios ecosistémicos fundamentales, como la regulación del clima, la conservación del suelo y el mantenimiento de la fertilidad (Cordero 2011; Backman 2020; Programa Bosques 2016).

A esta problemática se suman las variaciones climáticas, eventos de sequía, inundaciones, incendios forestales y fenómenos extremos asociados al cambio climático, que, en combinación con las actividades humanas, aceleran la degradación ecológica en la región (MINAM y PNCBMCC 2020; Mamani 2021; Gonzales 2019) también se tiene dificultad de realizar monitoreos en campo de manera extensa y periódica, dada la extensión territorial del parque y las condiciones topográficas y climáticas adversas, refuerza la necesidad de emplear sistemas de percepción remota, los cuales permiten obtener datos multiespectrales y multitemporales en alta resolución espacial.

Solo el 0.83% es apto para cultivos en limpio, el 8.82% para cultivos permanentes, el 1.36% para pastos, el 10.79% para producción forestal y el 77.54% para protección (MINAM, 2020; SERFOR, 2019). Sin embargo, en 2006, más del 25% de la zona de amortiguamiento se destinó a agricultura sin planificación adecuada, ocupando el 68% de áreas protegidas y forestales, lo que acelera la deforestación y amenaza la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (CONAM, 2018).

La investigación buscó cuantificar la deforestación en las Yungas Bolivianas dentro del Parque Nacional Bahuaja Sonene y su zona de amortiguamiento entre 2000 y 2024, evaluando el impacto de la expansión agrícola (de forma antrópica) y forma natural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación política.

La zona de amortiguamiento del Parque Nacional Bahuaja Sonene, ubicada en la región de Puno, Perú, abarca un área de aproximadamente 1,2 millones de hectáreas que rodea el parque protegido, sirviendo como un buffer ecológico para la conservación de su biodiversidad y ecosistemas frágiles como muestra la figura 1. Esta zona presenta una diversidad de ecosistemas, incluyendo selvas tropicales, bosques de phreatophytes, ríos de gran caudal y áreas de vegetación secundaria, siendo hogar de numerosas especies en peligro de extinción y endémicas de interés medicinal y ecológico (SERFOR, 2019).

Clima: El clima es tropical húmedo, con temperaturas cálidas durante todo el año y una alta humedad. Las precipitaciones son abundantes, con una estación lluviosa de noviembre a abril y una estación seca de mayo a octubre la temperatura promedio varía entre 25°C y 30°C, con picos de calor en la época seca. La vegetación es exuberante y diversa, con una gran cantidad de especies de plantas tropicales

Metodología.

El enfoque metodológico que se emplea es de teledetección, apoyado en la integración de tecnologías de percepción remota mediante imágenes satelitales proporcionas por USGS EROS

Registration System (Sistema de Registro de EROS del USGS) así mismo se aplicó estadística espacial, que no solo nos permitió detectar y caracterizar la deforestación y alteración en los bosques de las Yungas, esto no ayudo a evaluar riesgos y formular recomendaciones para la gestión ambiental. Esta incorporación de estos elementos en nuestra investigación rigurosa, sustentada en antecedentes científicos, garantiza que los resultados sean útiles para la toma de decisiones en políticas de conservación, planificación territorial y manejo sostenible de los recursos, así como lo aplico (Diana & Noa, n.d.)

Obtención y selección de imágenes satelitales

Como primer paso se realizó la selección de 4 escenas de los satélites Landsat ya que el tamaño del área de estudio es extenso, para la correcta selección se configuro el apartado de búsqueda a una nubosidad menor a 30% ya que si hay mayor cobertura hay mayor riesgo de tener resultados poco certeros y a su vez añadiendo a proceso la selección de las bandas espectrales como RGB y con la adición de la banda pancromática a partir de las escenas del 2018 una diferencia clara se observa en la figura 2.

Combinación de bandas.

Para la combinación de bandas se siguió el siguiente proceso, en el menú Capa > Añadir capa > Añadir capa raster o simplemente arrastrando los archivos ráster al lienzo de QGIS, luego abrimos la herramienta composición de bandas, esto abrirá el Combinador de bandas (Band Composite), que te permite combinar las bandas que selecciones en nuestro caso las bandas para lograr una composición de RGB (Red): Banda Roja (Green): Banda Verde (Blue) Banda Azul y NDVI nir (Banda del infrarrojo)cercano (normalmente la banda 4 de Landsat o la banda 8) red Banda roja (normalmente la banda 3)

La combinación de bandas nos sirve para mostrar imágenes del satélite en colores. Para visualizar una imagen en color, se debe combinar tres bandas (Potapov et al., 2008).

Corrección geométrica.

Las imágenes satelitales obtenidas por diferentes sensores presentan una serie de distorsiones que son originadas por la rotación de la tierra, el sensor, etc. sobre las imágenes reales (Prishchepov et al., 2013). Por ello se aplicó la calibración geométrica que elimino la distorsión al recopilar píxeles y llenar los espacios existentes además a ellos se le puso un sistema de coordenadas siendo el sistema Projected Coordinate Systems WGS_1984_UTM_Zone_18S.

Clasificación supervisada.

Para la detección de vegetación y no vegetación se utilizó la combinación de bandas 5,6,2 en Landsat, en esta fase, se seleccionaron áreas representativas de las clases de deforestación, que servirán como ejemplos para entrenar el modelo de clasificación supervisada en Qgis se utiliza SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) luego se empezó con la clasificación de las zonas representativas de bosque y no bosque, para luego continuar con la definir conjunto de Bandas despues de ello se procede con el Dibujo Regiones de Interés (ROIs) para ello creamos muestras representativas en la opción de crear roi y dibujamos polígonos sobre las áreas mas represntativas de bosque y no bosque Guardar ROI para almacenarlas en el shapefile (Hansen & DeFries, 2004). Por consecuente se continua con el entrenamiento del Clasificador, abrimos la pestaña entrenamiento seleccionamos nuestro roi en formato shp y revisar que las firmas espectrales sean adecuadas.

Validación del mapa de cobertura.

La evaluación de la precisión del clasificado se realizó mediante la matriz de confusión

generada en el software Qgis, para ello seleccionaron puntos de referencia (ground truth) luego se procedió a seleccionar puntos de referencia que representen de manera precisa las clases de la imagen (se usó mapas de uso de la tierra existentes de alta resolución, se utilizó el Google Earth)(Drummond & Loveland, 2010; Sparovek et al., 2012)

Los puntos de referencia están distribuidos uniformemente por la imagen y representativos de cada clase así mismo se usó la herramienta Raster/Vector - Confusion Matrix (disponible mediante plugins como Raster Calibration Tool o en la caja de herramientas de QGIS) para conseguir una salida que nos dio una matriz de confusión, donde las filas representan las clases de referencia (ground truth) y las columnas las clases predichas por el modelo.

Identificación del tipo de deforestación.

Para la identificación de deforestación se recurrieron a reportes del parque nacional Bahuja Sonene ya que las metodologías para poder identificar si es una deforestación de tipo antrópica y natural son muy inexactas por ello con una clasificación de año a año y comparación visual y la concordancia con los reportes registrados por el Servicio de Áreas Naturales protegidas (SERNANP) por ello se le añadió un campo a cada área deforestada obtenida en formato shp, añadiendo un atributo de tipo de deforestación la tabla de atributos de la Figura 3 (Hansen & DeFries, 2004; Sparovek et al., 2012)

Codificación en Google Engine con la base de datos de Hansen.

Delimitación el área de estudio con un polígono vectorial (Geometry) que delimite el Parque Nacional Bahuja Sonene y su zona de amortiguamiento, cargándolo en un formato shapefile en el AOI en el mapa para requerimos la importación la colección de datos recopilados (UMD/hansen/global_forest_change_2020_v1_8) así mismo la extracción las bandas relevantes, treecover2000; porcentaje de cobertura de árboles en el año 2000 así hasta el año 2024 en las zonas que se detectó pérdida forestal (codificado como año - 2000) gain: ganancia forestal detectada desde 2000 (Potapov et al., 2008).

Generar bucles o secuencia para evaluar la pérdida forestal año por año, para cada año, se creó máscaras con la pérdida detectada así mismo la función que para un año dado genere la máscara de pérdida y la recorte al AOI el cálculo el área afectada para cada año usando la resolución espacial y sumar píxeles la visualización la cobertura inicial, pérdida por año y ganancia con paletas de color en el mapa de GEE por ultimo exportar diagrama de barras y tablas de pérdidas anuales para posterior análisis estadístico externo.

Aplicación de Forest Foresight en el área de estudio.

Recolecta imágenes históricas de satélite (Radar, Sentinel 1), las analiza y etiqueta los cambios en la cobertura forestal además recopila conjuntos de datos adicionales que puedan prever la pérdida de bosques, como datos topológicos y densidad de población.

A partir de todos los datos recopilados, un modelo avanzado de aprendizaje automático estudia cómo ocurrió la pérdida de bosques en el pasado este modelo de aprendizaje automático, por ejemplo, los bosques cercanos a nuevas carreteras o a una mayor actividad humana están en riesgo.

Con el presidente de dicha aplicación se adjunta un formato shp con las delimitaciones, con todos sus componentes shp, sbn, sbx, prj, dbf y cpg se precede a juntar en un formato tupo zip para poder añadir a mapbuilder que es un web de código abierto donde se obtendrán datos procesados por aplicación creada por WWF como de expresa en la figura 5.

Estadística espacial

La estadística espacial se realizó empleando la segmentación de datos de estadística espacial se sementaron los datos de deforestación por delimitación, la primera fue la Zona de amortiguamiento (donde se pueden realizar todo tipo de actividades antrópicas) y la segunda fue la Yungas bolivianas (donde se tiene una prohibición de realizar cual tipo de actividad antrópica si no es consultado primeramente con el SERNANP).

Test de normalidad shapiro wilk

Este test nos ayudara a comprender como debemos trabajar los datos indicándonos si sigue o no una distribución normal que para nuestros datos en temporalidades es muy útil para nuestros datos en temporalidades ya al ser en distintos tiempos los datos siempre deben de variar.

Para la acción del test de shapiro wilk en R studio, primero se importamos el data mask luego se hace el llamado a la acción de Shapiro test en este caso de la celda de área deforestada, si el p-valor es mayor que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que los datos podrían seguir una distribución normal.

RESULTADOS

Resultados Validación del mapa cobertura

Teniendo en cuenta la interpretación más citada es la de Landis y Koch, que establece rangos para valorar la fuerza de la concordancia, siendo un índice Kappa promedio anual de 0.75, según indica la tabla 2, indica una concordancia buena o considerable entre los mapas de cobertura vegetal generados y la realidad observada estos resultados se, muestran en la tabla 1. Esta valoración se basa en escalas estandarizadas ampliamente aceptadas en teledetección y análisis ambiental.

Identificación del tipo de deforestación.

Los resultados nos indican que siendo la deforestación ha sido provocada en mayor magnitud de manera antrópica teniendo un total de 18909.92 a comparación de 8368.20 hectáreas en la deforestación natural se muestra en la tabla 2.

Estadística espacial

En cuanto a la estadística espacial segmentada por zonas como se muestra en la tabla 3, los resultados nos indican que hay una mayor deforestación en la zona de amortiguamiento, de 25328 con hectáreas siendo la región segmentada más afectada por la deforestación, con una clara tendencia hacia la deforestación antropogénica, especialmente desde 2017. Durante los primeros años, la deforestación fue moderada, pero en la segunda mitad de la década de 2010, los valores de deforestación aumentaron considerablemente, alcanzando hasta 4493.53 Ha en 2018. A partir de ahí, la deforestación comienza a mantener estos picos elevados, pero teniendo un cese en año 2020 en adelante, con áreas que oscilan 909.63 ha y 608.76 Ha.

Este patrón refleja una mayor presión de actividades humanas, como la agricultura y la ganadería, que son las principales causantes de la deforestación en esta zona.

En cuanto a la zona de las yungas bolivianas unas hectáreas en la zona de yungas bolivianas. Zona de Yungas Bolivianas que están dentro del Parque Nacional Bahuaja Sonene, muestra un comportamiento distinto, con un patrón de deforestación menor. Aunque también se reportan fluctuaciones, teniendo el pico más alto de deforestación en el año 2017 con 2011.5 ha, los valores en esta área han sido generalmente menores en comparación con la zona de amortiguamiento.

La deforestación natural, sobre todo en las primeras décadas, muestra una tendencia baja con 255.49 hectáreas en el año 2017. A lo largo de los años, se observa que la deforestación en esta zona está relacionada en gran parte con factores naturales, como cambio climático o fenómenos

naturales que afectan la vegetación derrumbes eh incendios forestales.

Resultados de la codificación en Google Engine con la base de datos de Hansen.

Los datos obtenidos por la metodología de Hansen que la deforestación llevo a su pico mas alto en año 2018 con 4248.1 hectáreas así mismo tuvo una media de 362.98 hectáreas los 12 primeros años y los 12 últimos años 1633.99 hectáreas.

Resultados de la aplicación de Forest Foresight en el área de estudio.

Para la zona de amortiguamiento, donde entre 2018 y principios de 2017 se deforestaron más de 3500 hectáreas anuales, con un pico máximo de 3645 ha en 2017 como se expresa en la figura 5.

Yungas Bolivianas, con aproximadamente 1950 ha según el software FF deforestadas dentro del Parque se observa un notable aumento de la deforestación desde el 2019, con máxima pérdida en 2020 llegando a 329 ha.

Test de normalidad shapiro wilk

Los resultados nos muestran dado que el p-valor es mucho menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula y concluimos que los datos de area deforestada no siguen una distribución normal. Y a que nos da un valor de 2.758e-06 es una forma científica de expresar el número 0.000002758, que es un número muy pequeño como se aprecia en la figura 6.

DISCUSIÓN

La validación del mapa de cobertura vegetal con un índice Kappa promedio anual de 0.75, según la interpretación de (Mendoza, 2018), indica una concordancia buena o considerable entre los mapas generados y la realidad observada. Este nivel de precisión es fundamental para asegurar la fiabilidad de los análisis de deforestación, ya que una alta concordancia valida que las clasificaciones de cobertura forestal reflejan adecuadamente las condiciones reales del terreno. (Congalton y Green 2009) destacan que índices Kappa superiores a 0.75 son indicativos de clasificaciones robustas en teledetección, lo que fortalece la confianza en los resultados y permite una mejor toma de decisiones en la gestión ambiental.

En cuanto a la identificación del tipo de deforestación, los resultados muestran que la deforestación antropogénica es predominante, con 18,909.92 hectáreas afectadas, frente a 8,368.20 hectáreas de deforestación natural. Este hallazgo es consistente con múltiples estudios como el que realizado por (Mendoza, 2018) que señalan que la presión humana, a través de actividades como la agricultura, ganadería y explotación forestal, es la principal causa de la pérdida de bosques en la amazonia andina y otras regiones tropicales. La deforestación natural, aunque menos significativa en términos de superficie, está relacionada con eventos climáticos y fenómenos naturales como incendios o derrumbes, que también afectan la dinámica forestal, pero con patrones y escalas diferentes.

Teniendo en cuenta que, durante los primeros años del siglo XXI, la deforestación se mantuvo en niveles relativamente bajos, con incrementos moderados hasta 2013. Sin embargo, a partir de 2014 y especialmente entre 2017 y 2018, se observa un notable aumento en las tasas de deforestación, alcanzando picos significativos, como los registrados en 2014 (1908.99 ha), 2017

(3501.27 ha) y 2018 (4687.38 ha). Este patrón coincide con estudios con GEE y FF que identifican la expansión agrícola, la minería y la apertura de nuevas vías de comunicación como los principales motores de la deforestación delimitados (Geist & Lambin, 2002; Hansen et al., 2013).

La fuerte variabilidad interanual, con años de descensos abruptos (por ejemplo, 2006, 2009, 2011, 2015, 2016, 2019, 2021-2023), sugiere la influencia de factores coyunturales, como políticas de conservación, fluctuaciones en los precios de los productos agrícolas, presencia de proyectos extractivos y eventos climáticos extremos (Malhi et al., 2014; DeFries et al., 2010) así mismo La disminución de la deforestación a partir de 2019 y la estabilización en valores más bajos en los últimos años pueden estar relacionadas con mayores esfuerzos de control y vigilancia, así como con la implementación de programas de conservación y restauración forestal promovidos por instituciones estatales y organizaciones no gubernamentales (Soria-Díaz et al., 2024).

El análisis espacial segmentado por zonas, resalta que la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Bahuaja Sonene es la región más afectada, con un aumento marcado de la deforestación desde 2017, alcanzando un pico de 4,493.53 hectáreas en 2018 lo que esta tendencia refleja la creciente presión de actividades humanas, principalmente la expansión agrícola y minera pluvial, que son reconocidas como los motores principales de la deforestación en áreas protegidas y sus zonas de influencia (Velásquez & Ivanova, 2024; Soria-Díaz et al., 2024) asimismo la disminución observada a partir de 2020 podría estar vinculada a políticas de control, restricciones legales o cambios socioeconómicos, aunque es necesario un análisis detallado para confirmar estas hipótesis. Por otro lado, la zona de las Yungas Bolivianas dentro del parque presenta un patrón diferente, con deforestación menor y mayor influencia de causas naturales, lo que coincide con estudios que realizó la organización no gubernamental World Wildlife Fund (WWF), que muestran que en áreas montañosas o con menor presión humana, la deforestación natural puede predominar.

El test de normalidad Shapiro-Wilk, con un p-valor extremadamente bajo ($2.758e-06$), indica que los datos de área deforestada no siguen una distribución normal estos rangos dados por el investigador (SHAPIRO & WILK, 1965), lo que sugiere una alta variabilidad y episodios de cambios abruptos en la deforestación. Este comportamiento no lineal es característico de procesos complejos donde múltiples factores socioeconómicos, políticos y ambientales interactúan, generando patrones irregulares y picos de deforestación. Esta variabilidad implica que las estrategias de monitoreo y gestión deben ser flexibles y adaptativas, considerando las fluctuaciones y las causas subyacentes de la deforestación.

La aplicación de Forest Foresight y GEE con Hansen permitió detectar no sólo el área neta de pérdida forestal, sino también la identificación de anual de cambio de cobertura forestal cambiantes teniendo una coincidencia muy alta en las 2 formas de identificación de deforestación teniendo una diferencia máxima de 2 hectáreas en el año 2017 y un mínimo de 0.1 hectáreas en el 2001. En contraste, los procesos netos en QGIS que son de una confiabilidad alta ya que cada proceso es supervisado, teniendo una diferencia máxima de 437 hectáreas menos en el 2018 en comparación a FF y GEE, este resultando se debe a el proceso que llevan tanto Forest Foresight y GEE ambos se centran en la codificación y alineación de bandas sin ni algún tipo de corrección atmosférica, seleccionan bandas y las superponen a otras así van creando una capa de deforestación con bandas infrarrojas de cada año, por ello los resultados son similares de las aplicaciones de código abierto, aun así la diferencia no es muy alta representando el 0.25 % según (Diana & Noa, n.d.) es más que aceptable la comparación.

Diversos estudios como la de (Mendoza, 2018) que respaldan la superioridad de procesos supervisados como la de Qgis para el monitoreo y análisis espacial multitemporal en contextos complejos como la Amazonía, permitiendo reproducibilidad, transparencia y comparaciones entre regiones y períodos. Forest Foresight añade valor predictivo, mejorando la prevención y planificación forestal proactiva.

Sin embargo, el uso conjunto de los tres procesos resulta más robusto la suma de GEE, Forest Foresight aportan desde el monitoreo avanzado, mientras que QGIS permite una validación local y adaptación metodológica a las necesidades específicas en nuestra zona de estudio.

Si bien las tecnologías de SIG ofrecen muchas ventajas, también existen desafíos importantes, como la limitada disponibilidad de datos en tiempo real o las dificultades en áreas remotas (Backman 2020; Munive Salas 2015). Esto recuerda la necesidad de fortalecer las capacidades técnicas y la infraestructura en regiones como Bahuaja Sonene para mantener y mejorar la efectividad del monitoreo y la gestión ambiental (Minam 2019; Minagri y Minam 2016). Además, la incorporación de tecnologías complementarias, como drones o sensores láser (LiDAR), puede potenciar aún más las capacidades de detección y análisis a nivel de estructura forestal (López et al. 2017; Minam & PNCBMCC 2020).

Por otro lado, los factores naturales también inciden en la dinámica del ecosistema, aunque en menor medida respecto a los humanos en el contexto actual (Vargas y Escobedo 2010; Minam & PNCBMCC 2020). Cambios climáticos, alteraciones en patrones de precipitación, eventos meteorológicos extremos y procesos naturales como incendios ocasionados por relámpagos o sequías prolongadas contribuyen a la pérdida de cobertura vegetal (Mamani 2021; Gonzales 2019; Minam 2019). Algunos estudios indican que los eventos climáticos extremos pueden favorecer incendios forestales y la degradación natural, afectando la biodiversidad y la estructura del bosque (Vargas 2018; Aceituno Melgar 2018). En particular, en las zonas de yungas, donde la topografía y la humedad favorecen la acumulación de biomasa, estos procesos naturales pueden actuar como catalizadores en la fragmentación del bosque (SERFOR 2017; Minam & PNCBMCC 2020).

Así mismo durante los primeros meses de la pandemia según el Ministerio de salud (MINSA), en el Perú se implementaron cuarentenas estrictas, cierre de fronteras y reducción de desplazamientos, lo que generó la paralización del alto crecimiento de deforestación en el parque en el año 2020 tal como se muestra en los resultados obtenidos.

En conclusión, el estudio de análisis multitemporal de la deforestación en la ecorregión de Yungas bolivianas del Parque Nacional Bahuaja Sonene y su zona de amortiguamiento, utilizando datos satelitales desde el año 2000 hasta 2024, es fundamental para comprender la dinámica y los patrones de pérdida de cobertura forestal en esta área de alto valor ecológico.

La serie de datos evidencia que la deforestación no es un proceso lineal, sino que presenta años con incrementos significativos en los años (2014, 2017 y 2018) y otros con descensos notables, lo que refleja la influencia de factores sociales, económicos, políticos y ambientales. Esta variabilidad subraya la necesidad de un monitoreo continuo y detallado, que permita identificar no solo las tendencias generales, sino también los eventos críticos y las zonas más vulnerables.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Peruana Unión por el apoyo brindado, así mismo al Parque Nacional Bahuaja Sonene, Servicio nacional de áreas naturales protegidas del Perú, de igual forma al fondo de becas otorgadas por la Asociación para la investigación y desarrollo integral (AIDER).

REFERENCIAS (O REFERENCES)

- Aceituno Melgar, V. (2018). Importancia de la aplicación de modelos de regresión lineal en proyecciones de la cobertura boscosa y de captura de CO₂, para la venta de certificados de carbono en Guatemala, periodo 2017-2030. Guatemala: s.n.
- Achard, F., Eva, H. D., Stibig, H. J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., & Malingreau, J. P. (2002). Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science*, 297, 999–1002. <https://doi.org/10.1126/science.1070656>
- Alonso, D. (2019). MappingGIS. Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel.
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Bogotá: s.n.
- Backman, A. (2020). Bosques de América Latina y el Caribe en la década de 2020: tendencias, desafíos y oportunidades.

- Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Bosques-de-america-latina-y-el-caribe-en-la-decada-de-2020-tendencias-desafios-y-oportunidades.pdf>
- Baccini, A., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P. S. A., Dubayah, R., Friedl, M. A., Samanta, S., & Houghton, R. A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2, 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>
- Bravo Suarez, L. (2018). Evaluación de la deforestación utilizando imágenes de satélite Landsat en las comunidades nativas de Pitocuna y Huantashiri – Satipo. Huancayo: s.n.
- Breiman, L., Friedman, J., Olsen, R., & Stone, C. (1984). *Classification and Regression Trees*. Wadsworth and Brooks/Cole.
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., da Fonseca, G. A., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J. F., Mittermeier, C. G., Pilgrim, J. D., & Rodrigues, A. S. (2006). Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313, 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.1127609>
- Chambers, C., Raniwala, A., Perry, F., Adams, S., Henry, R. R., Bradshaw, R. R., & Weizenbaum, N. (2010). FlumeJava: Easy, efficient data-parallel pipelines. *ACM SIGPLAN Notices*, 45, 363–375. <https://doi.org/10.1145/1809028.1806638>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420055139>
- DeFries, R., Rudel, T., Uriarte, M., & Hansen, M. (2010). Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 3, 178–181. <https://doi.org/10.1038/ngeo756>
- Diana & Noa. (s.f.). [Referencia a comparación metodológica].
- Edwards, D. P., & Laurance, W. F. (2011). Carbon emissions: Loophole in forest plan for Indonesia. *Nature*, 477, 33. <https://doi.org/10.1038/477033a>
- Food and Agricultural Organization of the United Nations. (2010). *Global Forest Resources Assessment*. FAO.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations. (2012). *Global Forest Land-Use Change 1990-2005*. FAO Forestry Paper No. 169.
- Gardiner, B., et al. (2010). *Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts*. European Forest Institute.
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, 52, 143–150. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2)
- Gong, P., Wang, J., Yu, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, L., ... Chen, J. (2013). Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 2607–2654. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.748992>
- Goetz, S., & Dubayah, R. (2011). Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change. *Carbon Management*, 2, 231–244. <https://doi.org/10.4155/cmt.11.18>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gutman, G., Huang, C., Chander, G., Noojipady, P., & Masek, J. (2013). Assessment of the NASA-USGS Global Land Survey (GLS) datasets. *Remote Sensing of Environment*, 134, 249–265. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.026>
- Hansen, M. (2004). Detecting long-term global forest change using continuous fields of tree-cover maps from 8-km AVHRR data for 1982–1999. *Ecosystems*, 7, 695–716. <https://doi.org/10.1007/s10021-004-0243-3>
- Hansen, M., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... Townshend, J. R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342, 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J. R. G., Carroll, M., Dimiceli, C., & Sohlberg, R. A. (2003). Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. *Earth Interactions*, 7(1), 1–15. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2003\)007<0001:GPTCAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:GPTCAA>2.0.CO;2)
- Hansen, M. C., Stehman, S. V., & Potapov, P. V. (2010). Quantification of global gross forest cover loss. *PNAS*, 107, 8650–8655. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912668107>
- Hansen, M., Egorov, A., Roy, D. P., Potapov, P., Ju, J., Turubanova, S., Kommareddy, I., & Loveland, T. R. (2011). Continuous fields of land cover for the conterminous United States using Landsat data: First results from the Web-Enabled Landsat Data (WELD) project. *Remote Sensing Letters*, 2, 279–288. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.519002>
- Kurz, W. A., Dymond, C. C., Stinson, G., Rampley, G. J., Neilson, E. T., Carroll, A. L., & Ebata, T. (2008). Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, 452, 987–990. <https://doi.org/10.1038/nature06777>
- Laurance, W. F., Sayer, J., & Cassman, K. G. (2014). Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in Ecology and Evolution*, 29(2), 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.12.001>
- Loza Murguía, M., et al. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014. Bolivia: s.n.
- Mamani, F. (2021). *Conservación Amazónica*. Recuperado de <https://maaproject.org/2021/amazon2020/>
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- Medina López, M. (2015). Análisis multitemporal del cambio de la cobertura vegetal y uso de la tierra en El Cantón Gualaquiza, 1987 – 2015. Quito: s.n.
- Miyakawa Solís, V., Alvarez Alonso, J., & Encarnación Cajañahupa, F. (s.f.). *Manual para la elaboración de mosaicos de imágenes de satélite Landsat TM para la selva baja peruana*. Perú: s.n.

- 1
 - 17
 - 1
 - 1
 - 29
- Minagri; Minam. (2016). Marco metodológico del inventario nacional forestal y fauna silvestre. Lima: s.n.
- Minam. (2019). Apuntes del bosque N.º 1. Cobertura y deforestación en los bosques húmedos amazónicos. Lima: s.n.
- Minam & PNCBMCC. (2020). Monitoreo de la pérdida de Bosques Húmedos Amazónicos en el año 2019. Lima: s.n.
- Monterroso Tobar, M. (s.f.). Guía práctica: Clasificación de imágenes satelitales.
- Musno Salas. (2015). Producción del cultivo de Piña cv. Golden en la Selva Central Mazamari - Satipo (Junín).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). El estado de los bosques del mundo: las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Roma: s.n.
- Osorio Guarín, J. (2009). Caracterización molecular del banco de germoplasma de cacao (*Theobroma cacao*, L.) del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi mediante marcadores moleculares tipo microsatélites. Bogotá: s.n.
- Potapov, P., Hansen, M., Stehman, S., Loveland, T., & Pittman, K. (2008). Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3708–3719. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.006>
- Potapov, P., Turubanova, S. A., Hansen, M. C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L., & Justice, C. O. (2012). Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000–2010. *Remote Sensing of Environment*, 122, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.027>
- Prishchepov, A., Muller, D., Dubinin, M., Baumann, M., & Radeloff, V. (2013). Determinants of agricultural land abandonment in post-Soviet European Russia. *Land Use Policy*, 30, 873–884. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.06.011>
- Rodríguez Lloret, J., & Olivella, R. (2003). Introducción a los sistemas de información geográfica.
- Rodrigues, A. S., Andelman, S. J., Bakarr, M. I., Boitani, L., Brooks, T. M., Cowling, R. M., Fishpool, L. D., Da Fonseca, G. A., Gaston, K. J., Hoffmann, M., Long, J. S., Marquet, P. A., Pilgrim, J. D., Pressey, R. L., Schipper, J., Sechrest, W., Stuart, S. N., Underhill, L. G., Waller, R. W., Watts, M. E., & Yan, X. (2004). Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. *Nature*, 428, 640–643. <https://doi.org/10.1038/nature02422>
- Rudel, T. (1998). Is there a forest transition? Deforestation, reforestation and development. *Rural Sociology*, 63, 533–552. <https://doi.org/10.1111/j.1549-0831.1998.tb00691.x>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *PNAS*, 108, 9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Salgado Garciglia, R. (2014). Deforestación. Lima: s.n.
- Sanchez Muñoz, J. (2016). Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la matriz de confusión. Madrid: s.n.
- Sexton, J., et al. (2013). Global 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS Vegetation Continuous Fields with lidar estimates of error. *International Journal of Digital Earth*, 6, 427–448.
- Serfor. (2017). Cobertura y deforestación en los bosques húmedos amazónicos 2017. Lima: s.n.
- Sparovek, G., Berndes, G., Barretto, A. G. O. P., & Klug, I. L. F. (2012). The revision of the Brazilian Forest Act: Increased deforestation or a historic leap towards balancing agricultural development and nature conservation. *Environmental Science & Policy*, 16, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.10.008>
- Subia Tito, Y. (2020). Análisis multitemporal de cambio de cobertura vegetal y uso de suelos en el parque nacional Bahuaja Sonene y su zona de amortiguamiento. Puno: s.n.
- Teresa Boca, G. (2009). Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos.
- Torre Pillpa, P., & Rivas Aquino, M. (2019). Análisis temporal de la pérdida de cobertura vegetal mediante teledetección en el distrito de Satipo-Satipo-Junín, durante los años 2015 – 2018. Lima: s.n.
- Tucker, C., Grant, D., & Dykstra, J. (2004). NASA's orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, 313–322.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2005). Reducing Emissions from Deforestation in Developing Countries: Approaches to Stimulate Action – Draft Conclusions Proposed by the President. Bonn, Germany.
- Vargas, J., & Escobedo, R. (2010). Mesozonificación ecológica económica para el desarrollo sostenible de la provincia de Satipo. Iquitos: s.n.
- Villalobos Ramírez, L. (s.f.). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa y uso de la tierra en el distrito de Pomahuaca, Provincia de Jaén, periodo 2000.
- Waterworth, R., Richards, G., Brack, C., & Evans, D. (2007). A generalized hybrid process-empirical model for predicting plantation forest growth. *Forest Ecology and Management*, 238, 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.10.014>
- Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., Gao, F., Goward, S. N., Helder, D., Helmer, E., Nemani, R., Oreopoulos, L., Schott, J., Thenkabail, P. S., Vermote, E. F., Vogelmann, J., Wulder, M. A., & Wynne, R. (2008). Free access to Landsat imagery. *Science*, 320, 1011. <https://doi.org/10.1126/science.320.5879.1011a>

ANEXOS

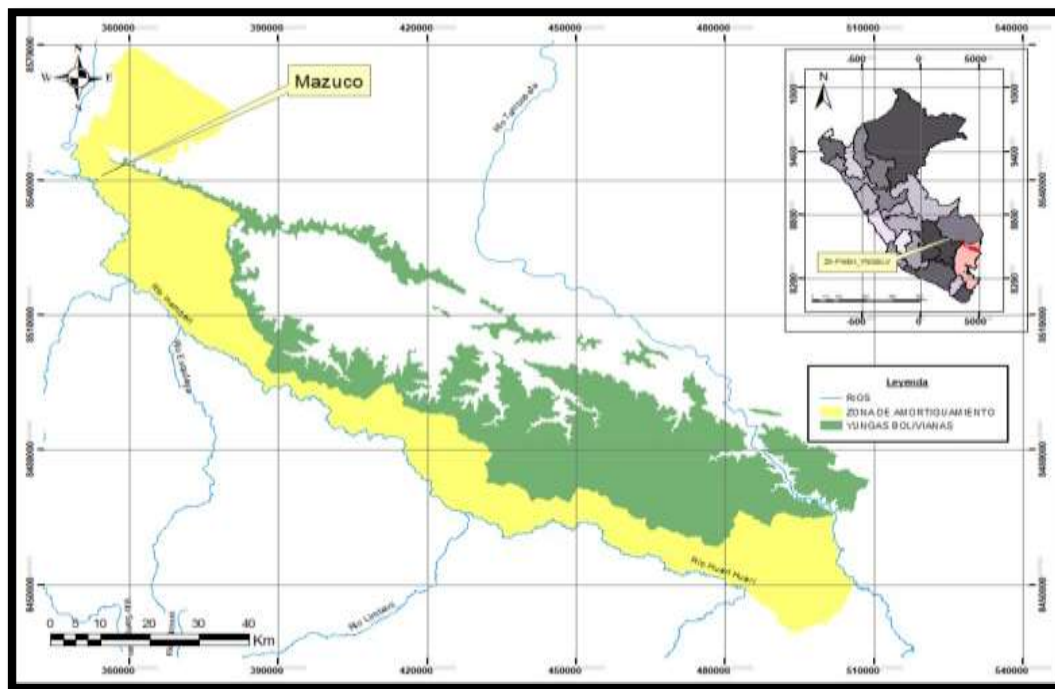


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del área

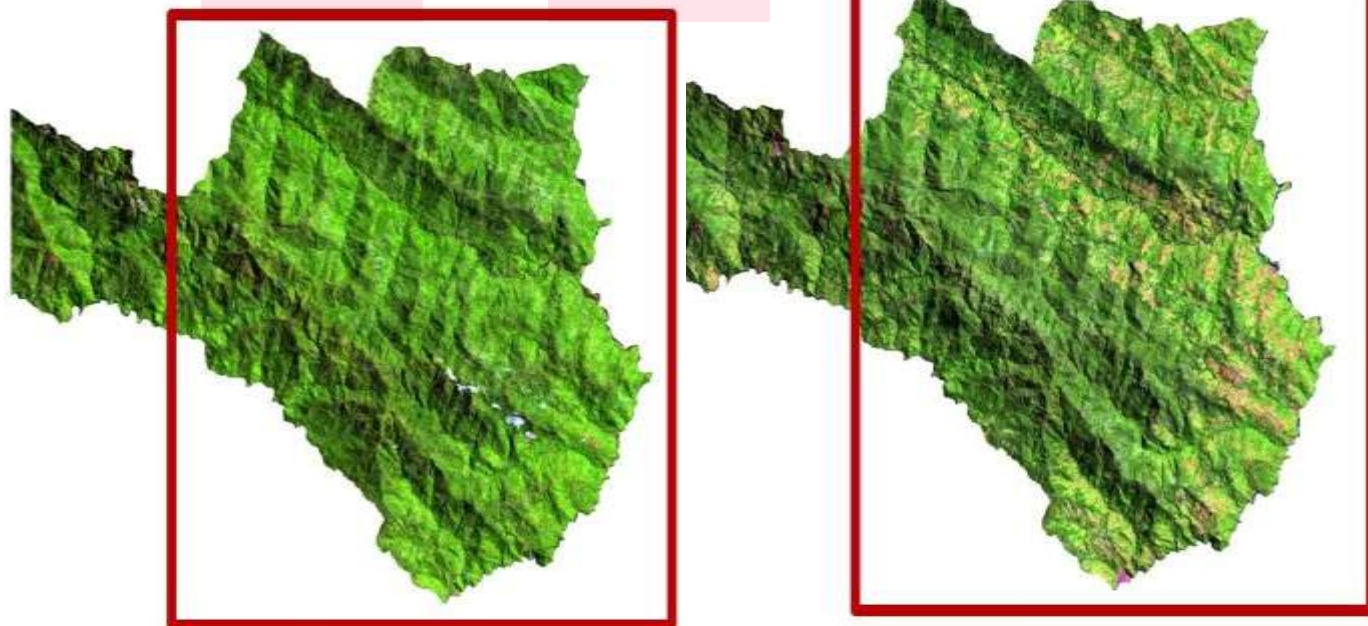


Figura 2. Corrección atmosférica de imágenes del 2000 y 2024.
Figure 2. Atmospheric correction of images from 2000 and 2024.

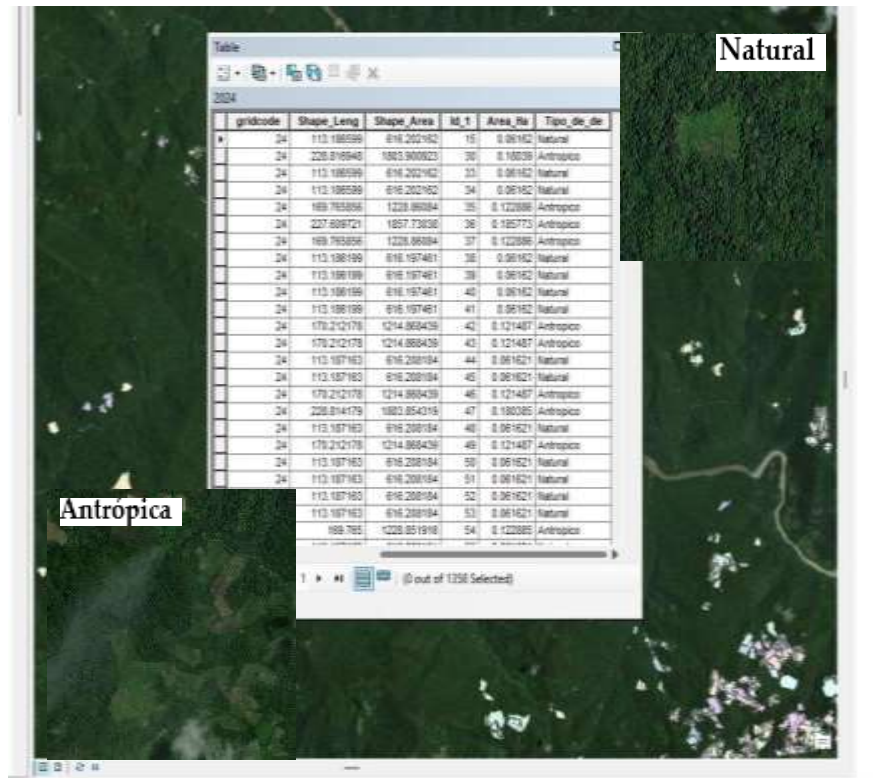


Figura 3. Clasificación por tipo de deforestación.

Figure 3. Classification by type of deforestation.

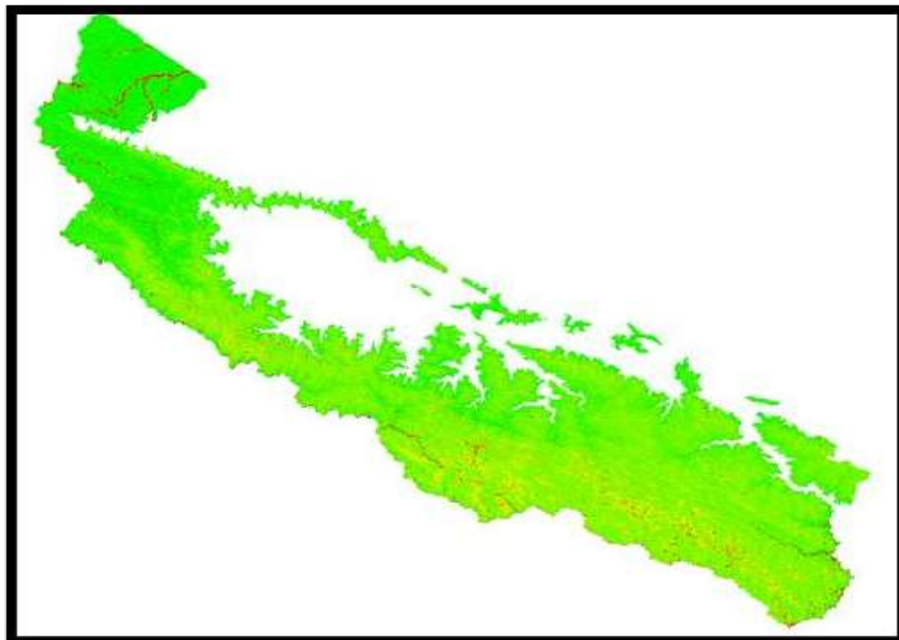


Figura 4. Clasificación supervisada este proceso se realizó en todas las escenas satelitales desde el año 2000 hasta el año 2024.

Figure 4. Supervised classification: This process was performed on all satellite scenes from the year 2000 to the year 2024.



Figura 5. Aplicación de Forest Foresight en el área de estudio.
Figure 5. Application of Forest Foresight in the study area.

Año	Po	pe	Kappa	Interpretación
2000	0.83	0.2	0.78	Buena
2001	0.81	0.2	0.76	Buena
2002	0.81	0.3	0.74	Buena
2003	0.79	0.3	0.71	Buena
2004	0.81	0.3	0.73	Buena
2005	0.82	0.2	0.78	Buena
2006	0.80	0.3	0.71	Buena
2007	0.80	0.2	0.75	Buena
2008	0.82	0.2	0.78	Buena
2009	0.81	0.2	0.76	Buena
2010	0.81	0.3	0.73	Buena
2011	0.82	0.2	0.78	Buena
2012	0.8	0.2	0.75	Buena
2013	0.81	0.2	0.76	Buena
2014	0.83	0.2	0.79	Buena
2015	0.84	0.2	0.80	Buena
2016	0.84	0.2	0.80	Buena
2017	0.8	0.2	0.75	Buena
2018	0.79	0.2	0.74	Buena
2019	0.81	0.3	0.73	Buena
2020	0.82	0.3	0.74	Buena
2021	0.81	0.3	0.73	Buena
2022	0.83	0.2	0.79	Buena
2023	0.81	0.3	0.73	Buena
2024	0.8	0.2	0.75	Buena

Tabla 1. Índice kappa.
Table 1. Kappa index.

Clases	Bosque	Cuerpos de agua	carreteras	Deforestacion Natural	Deforestacion antropica	Total
Bosque	4	0	0	1	0	5
Cuerpos de agua	0	4	0	0	1	5
carreteras	0	0	4	0	0	4
Deforestacion Natural	1	0	1	4	0	6
Deforestacion antropica	0	1	0	0	4	5
Total	5	5	5	5	5	25

Tabla 2. Clasificación Supervisada.

Table 2. Supervised Classification.

Año	Área deforestada Ha total	Zona de deforestación	Tipo de deforestación	Deforestación por tipo Ha
2000	192.87	Yungas Bolivianas	Antrópica	12.35
			Natural	3.32
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	135.15
			Natural	42.05
2001	214.38	Yungas Bolivianas	Antrópica	14.02
			Natural	4.23
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	148.65
			Natural	47.48
2002	268.72	Yungas Bolivianas	Antrópica	29.48
			Natural	1.66
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	182.43
			Natural	55.14
2003	369.98	Yungas Bolivianas	Antrópica	17.24
			Natural	1.83
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	269.64
			Natural	81.28
2004	324.97	Yungas Bolivianas	Antrópica	11.98
			Natural	1.95
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	42.33
			Natural	268.71
2005	281.03	Yungas Bolivianas	Antrópica	83.15
			Natural	4.20
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	139.12
			Natural	54.55
2006	290.72	Yungas Bolivianas	Antrópica	28.91
			Natural	2.39
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	210.83
			Natural	48.59
		Yungas	Antrópica	17.61

2007	330.24	Bolivianas	Natural	6.33
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	259.33
			Natural	46.97
2008	325.57	Yungas Bolivianas	Antrópica	75.34
			Natural	8.16
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	196.08
			Natural	45.99
2009	243.72	Yungas Bolivianas	Antrópica	31.02
			Natural	5.71
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	167.45
			Natural	39.54
2010	421.76	Yungas Bolivianas	Antrópica	76.63
			Natural	14.01
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	291.59
			Natural	39.53
2011	595.44	Yungas Bolivianas	Antrópica	31.60
			Natural	3.17
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	519.06
			Natural	41.61
2012	496.44	Yungas Bolivianas	Antrópica	28.60
			Natural	3.46
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	409.78
			Natural	54.60
2013	804.49	Yungas Bolivianas	Antrópica	42.70
			Natural	5.01
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	719.18
			Natural	37.60
2014	953.04	Yungas Bolivianas	Antrópica	113.10
			Natural	13.15
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	692.85
			Natural	133.94
2015	1091.11	Yungas Bolivianas	Antrópica	39.70
			Natural	8.83
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	996.72
			Natural	45.86
2016	959.97	Yungas Bolivianas	Antrópica	117.50
			Natural	3.20
		Zona de	Antrópica	797.72

		amortiguamiento	Natural	41.55
2017	3135.28	Yungas Bolivianas	Antrópica	168.30
			Natural	6.14
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	2705.35
			Natural	255.49
2018	4248.10	Yungas Bolivianas	Antrópica	151.70
			Natural	10.18
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	3792.44
			Natural	293.78
2019	1643.82	Yungas Bolivianas	Antrópica	83.90
			Natural	9.43
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	1443.37
			Natural	107.13
2020	2277	Yungas Bolivianas	Antrópica	83.90
			Natural	42.88
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	2012.54
			Natural	137.86
2021	874.12	Yungas Bolivianas	Antrópica	104.00
			Natural	3.37
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	636.92
			Natural	129.83
2022	608.75	Yungas Bolivianas	Antrópica	79.40
			Natural	2.80
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	422.43
			Natural	104.12
2023	360.63	Yungas Bolivianas	Antrópica	35.90
			Natural	0.33
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	257.03
			Natural	67.36
2024	238.32	Yungas Bolivianas	Antrópica	21.70
			Natural	1.69
		Zona de amortiguamiento	Antrópica	164.75
			Natural	50.17

Tabla 3. Los datos muestran una diferencia importante entre ambas zonas, siendo las Zona de Amortiguamiento las más afectadas por la actividad antropogénica, mientras que las Yungas Bolivianas presenta una deforestación más controlada, aunque no exenta de cambios significativos a lo largo del tiempo.

Table 3. The data show a significant difference between the two areas, with the Buffer Zones being the most affected by anthropogenic activity, while the Bolivian Yungas show more controlled deforestation, although not without significant changes over time.

Año	Total de deforestacion	Za	Y
2000	248.49	233.37	15.12
2001	269.91	246.69	23.22
2002	332.55	293.76	38.79
2003	459.80	435.77	24.03
2004	387.21	373.32	13.89
2005	809.55	679.14	130.41
2006	355.32	315.72	39.6
2007	454.32	424.44	29.88
2008	530.01	432.81	97.2
2009	300.42	255.87	44.55
2010	1049.58	941.13	108.45
2011	667.71	626.04	41.67
2012	615.51	576.27	39.24
2013	894.51	835.74	58.77
2014	1908.99	1752.84	156.15
2015	1580.04	1517.58	62.46
2016	1229.13	1175.04	54.09
2017	3501.27	3290.22	211.05
2018	4687.38	4492.53	194.85
2019	1835.19	1731.78	103.41
2020	2540.88	2398.23	142.65
2021	1031.49	909.63	121.86
2022	724.32	615.33	108.99
2023	424.17	382.05	42.12
2024	440.37	392.76	47.61

Figura 5. Resultados según Forest Foresight.

Figure 5. Results according to Forest Foresig

```

3 summary(chf)
4
5
6 #test de shapiro-wilk para area deforestada
7 shapiro_test_Areadeforestada <- shapiro.test(chf$Area deforestada)
8
9 # Crear un boxplot para comparar las distribuciones de 'yungas' y 'Zona de amortiguamiento'
10 boxplot(data$yungas, data$zona_de_amortiguamiento,
11         names = c("yungas", "Zona de amortiguamiento"),
12         main = "Comparación de las distribuciones de yungas y Zona de Amortiguamiento",
13         ylab = "Valor de deforestación",
14         col = c("skyblue", "lightcoral"),
15         border = "black")
16
17 # Realizar la prueba de Mann-whitney
18 resultado <- wilcox.test(data$yungas, data$zona_de_amortiguamiento)
19
20 # Mostrar el resultado de la prueba
21 print(resultado)
22 # Cargar el archivo Excel
23 library(readxl)
24 data <- read_excel("ruta/del/archivo/Mann whitney.xlsx")
25
26 # Verificar las primeras filas de los datos
27 head(data)
28

```

Figura 6. El test arrojó un p-valor de 0.00000000142, que es significativamente menor que 0.05, lo que indica que rechazamos la hipótesis nula y coincidimos con el test de Shapiro Wilk que hay una diferencia significativa entre las distribuciones de las dos variables.

Figure 6. The test yielded a p-value of 0.00000000142, which is significantly less than 0.05, indicating that we reject the null hypothesis and agree with the Shapiro Wilk test that there is a significant difference between the distributions of the two variable

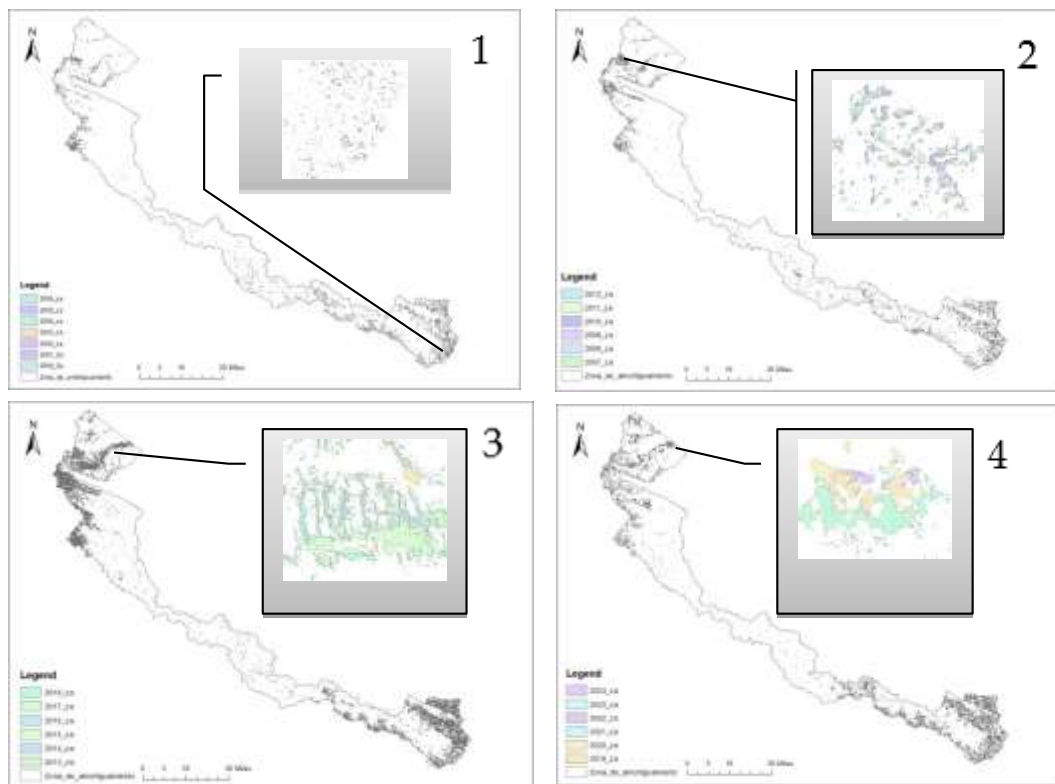


Figura 7. Deforestación por temporalidades Zona de Amortiguamiento (1-2000-2006) (2-2007-2012) (3-2013-2018) (4-2019-2024)

Figure 7. Deforestation by Seasons Buffer Zone (1-2000-2006) (2-2007-2012) (3-2013-2018) (4-2019-2024)

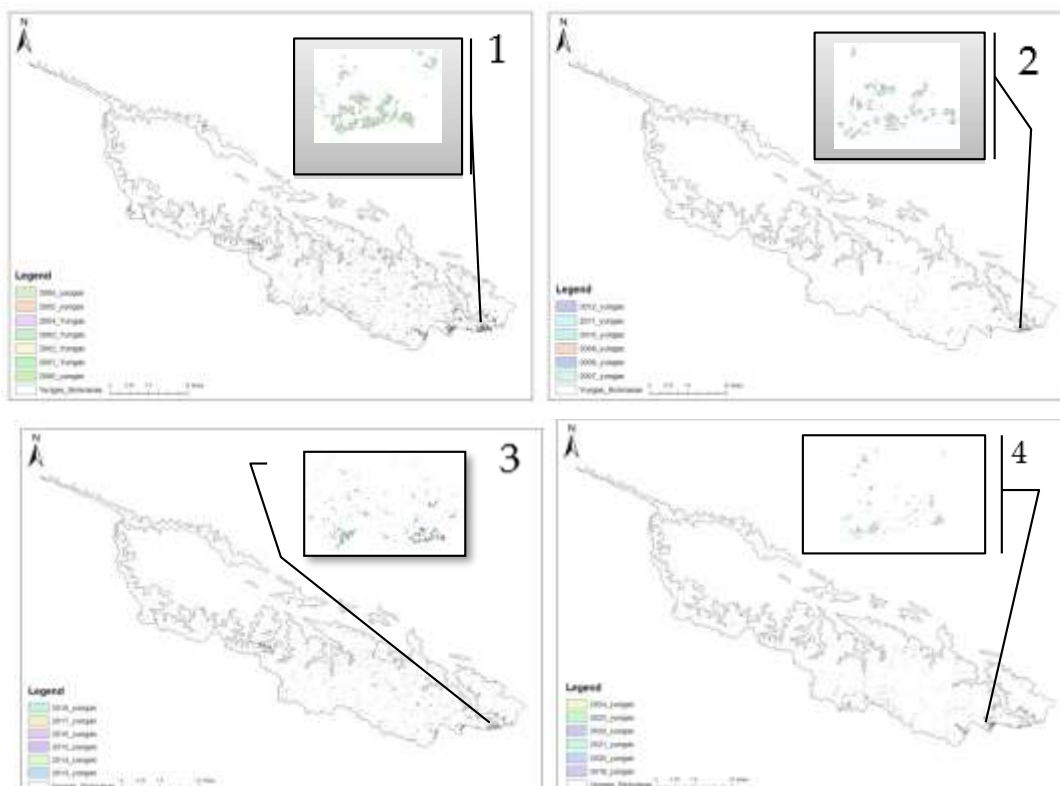


Figura 8. Deforestación por temporalidades Yungas Bolivianas (1-2000-2006) (2-2007-2012) (3-2013-2018) (4-2019-2024)

Figure 8. Deforestation by seasonality in the Bolivian Yungas (1-2000-2006) (2-2007-2012) (3-2013-2018) (4-2019-2024)

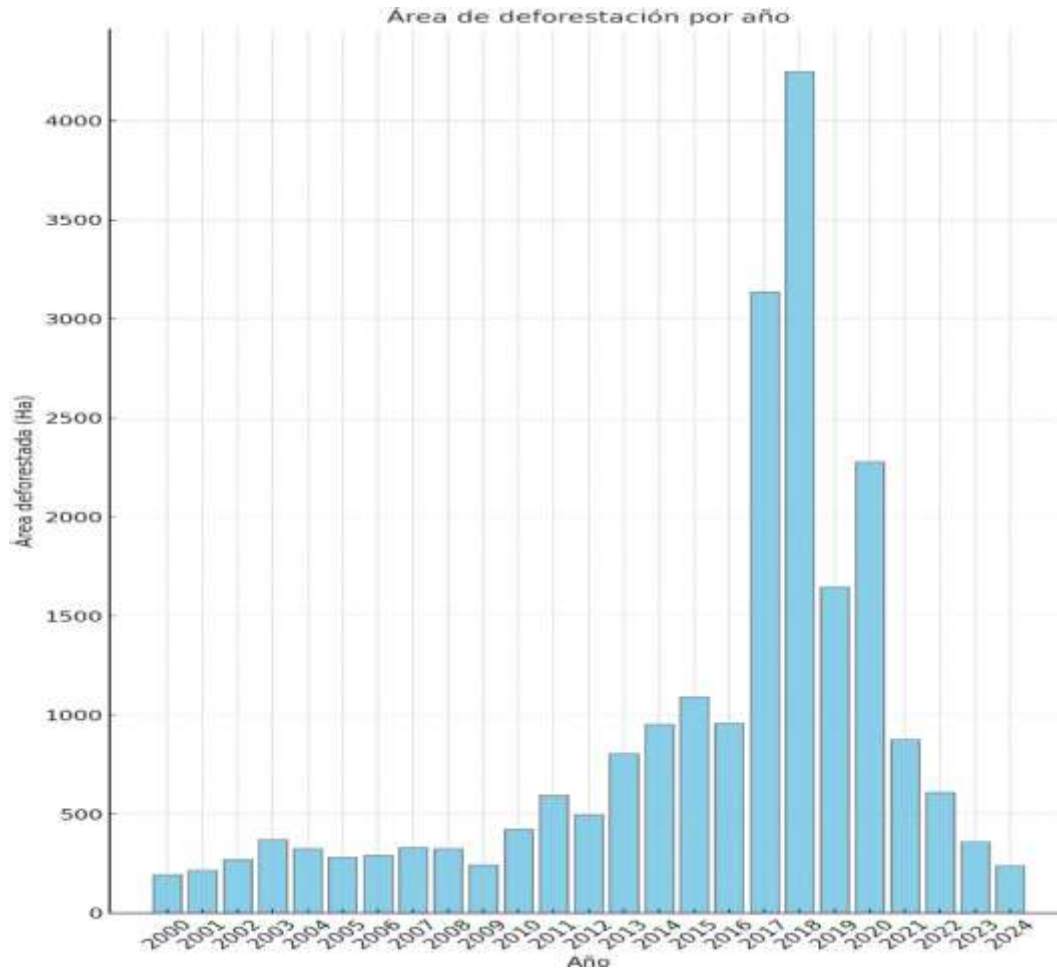


Figura 9. El diagrama de barras nos muestra el crecimiento elevado en el año 2017 y un bajo en el año 2020 el bajo quizás se deba al paro de actividades antrópicas por la pandemia del COVID. **Figure 10.** The bar chart shows the high growth in 2017 and a decline in 2020. The decline may be due to the halt in human activities due to the

Figure 9. The bar chart shows high growth in 2017 and a decline in 2020. This decline could be due to the disruption of human activities due to the COVID-19 pandemic. **Figure 10.** The bar chart shows high growth in 2017 and a decline in 2020. This decline could be due to the disruption of human activities due to the COVID-19 pandemic.

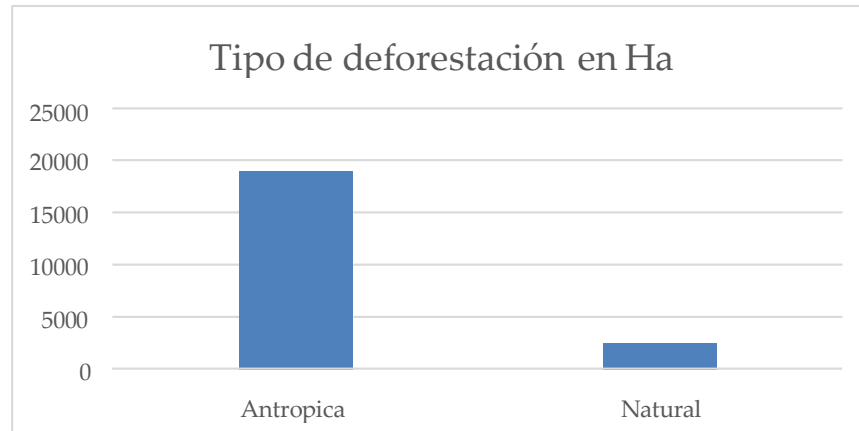
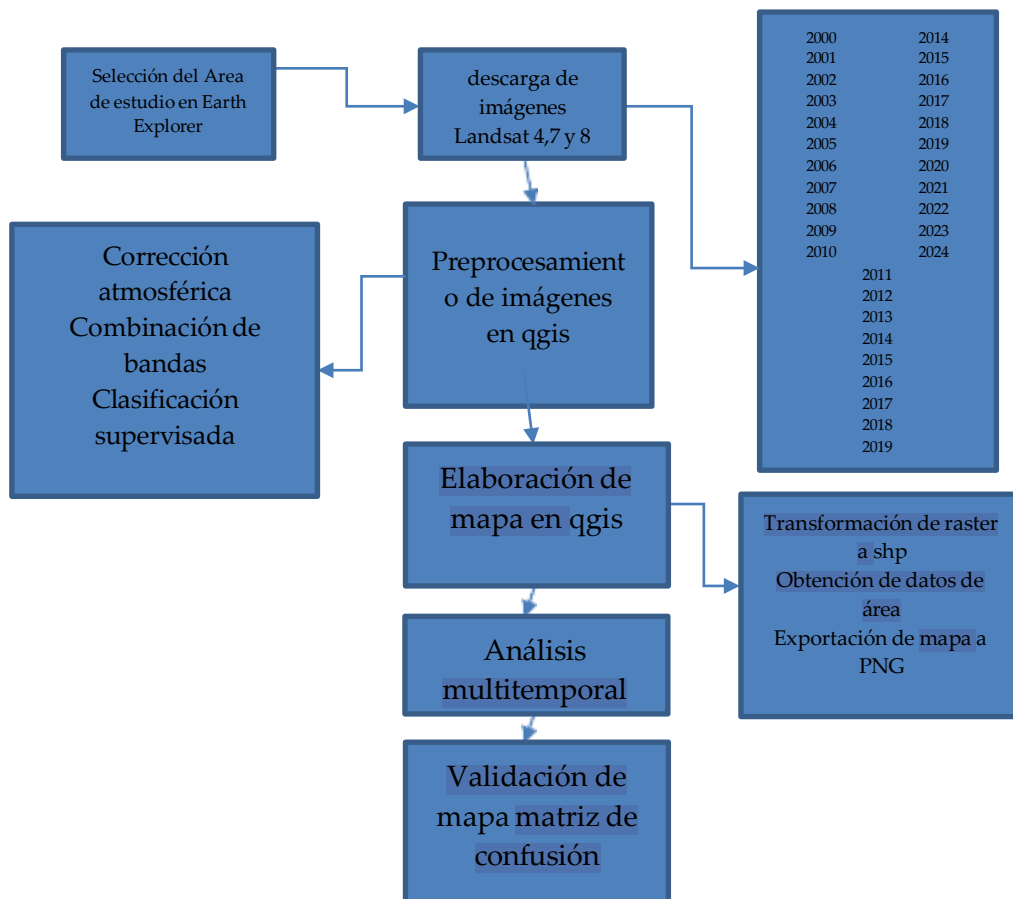


Figura 10. El diagrama nos muestra la suma de esta división de deforestación tanto de forma antrópica natural que muestra un nivel alto de influencia en la deforestación en ambas zonas.
Figure 10. The diagram shows the sum of this division of deforestation, both natural and anthropogenic, which shows a high level of influence on deforestation in both areas.

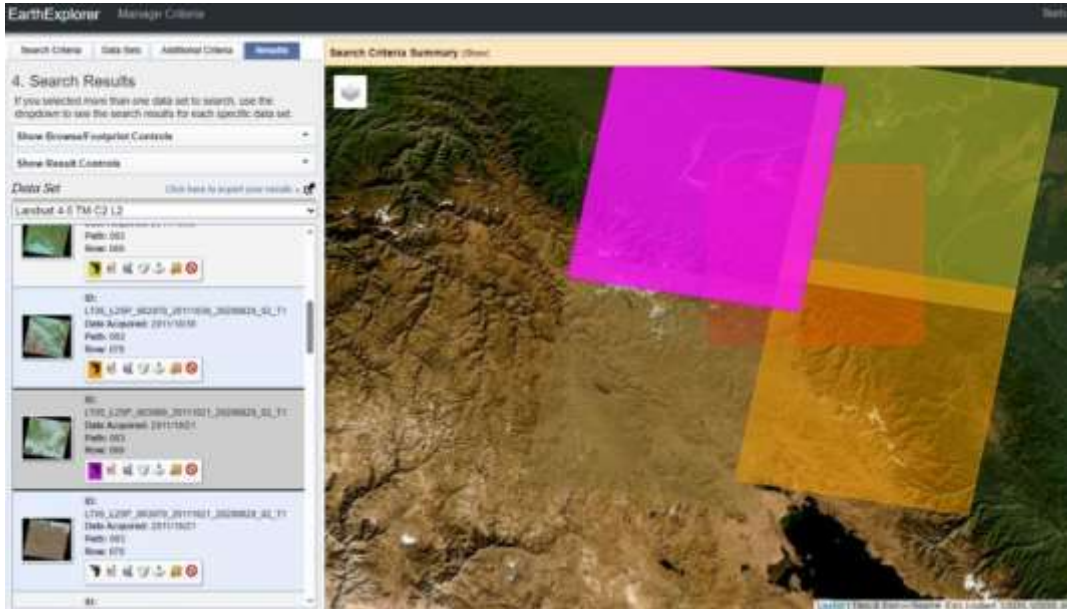
MATERIAL SUPLEMENTARIO



MAT-SUP-Figura 1. El proceso de recolección de datos implica el registro de manera sistemática, válida y confiable de comportamientos y situaciones observables, utilizando un conjunto de

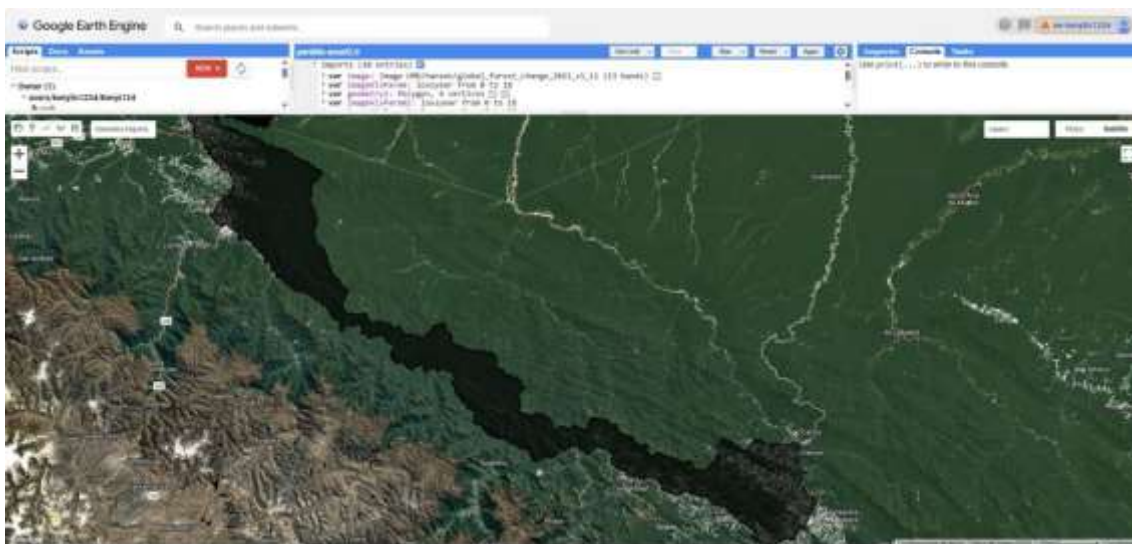
categorías y subcategorías, con el fin de recopilar información que luego será analizada.

MAT-SUP-Figure 1. The data collection process involves systematically, validly, and reliably recording observable behaviors and situations, using a set of categories and subcategories, in order to gather information that will then be.



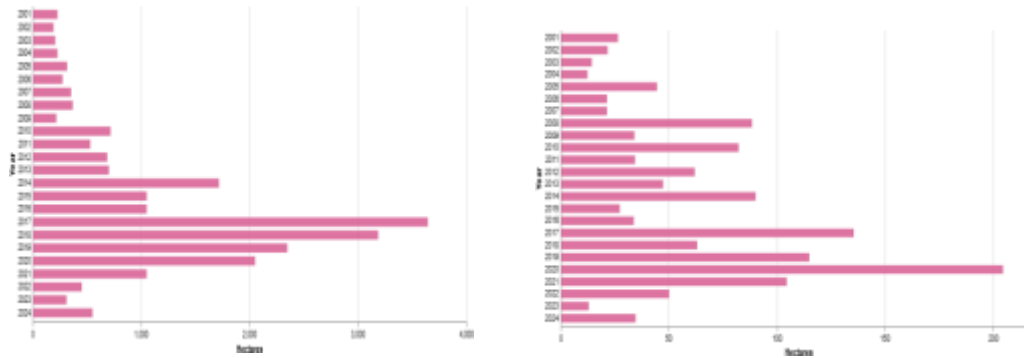
MAT-SUP-Figura 2. Descarga de imágenes Landsat en USGS.

MAT-SUP-Figure 2. Download Landsat images from USGS.



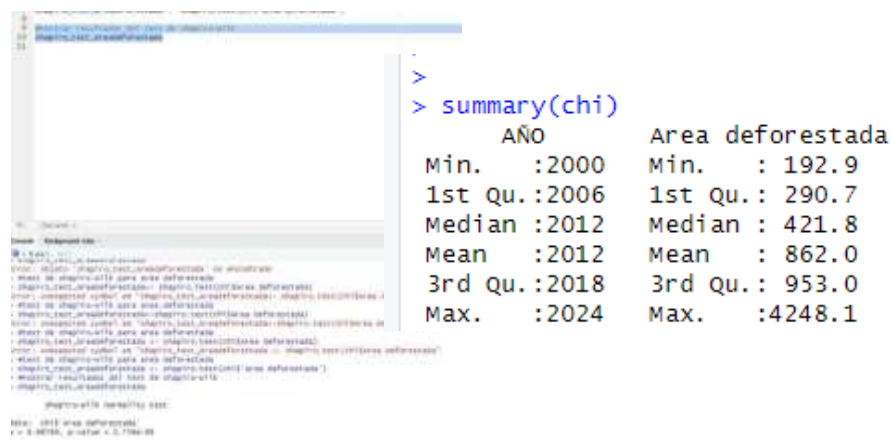
MAT-SUP-Figura 3. Codificación en Google engine

MAT-SUP-Figure 3. Coding in Google engine



MAT-SUP-Figura 4. Resultados según FF En diagrama de barras (1 Zona de amortiguamiento) (2 Yungas Bolivianas)

MAT-SUP-Figure 4. Results according to FF In bar chart (1 Buffer zone) (2 Bolivian Yungas)



MAT-SUP-Figura 5. Adecuación para la acción del test de shapiro wilk en R studio, primero se importa el data mask luego se hace el llamado a la acción de Shapiro test en este caso de las celda de área deforestada, si el p-valor es mayor que 0.05, no se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que los datos podrían seguir una distribución normal.

MAT-SUP-Figure 5. Suitability for the action of the Shapiro Wilk test in R studio, first the data mask is imported and then the Shapiro test action is called in this case of the deforested area cells, if the p-value is greater than 0.05, the null hypothesis is not rejected, which suggests that the data could follow a normal distribution.

Name	Type	Value
shapiro_test_Areadeforest...	list [4] (S3: htest)	List of length 4
statistic	double [1]	0.6676866
p.value	double [1]	2.758301e-06
method	character [1]	'Shapiro-Wilk normality test'
data.name	character [1]	'chi\$Area deforestada'

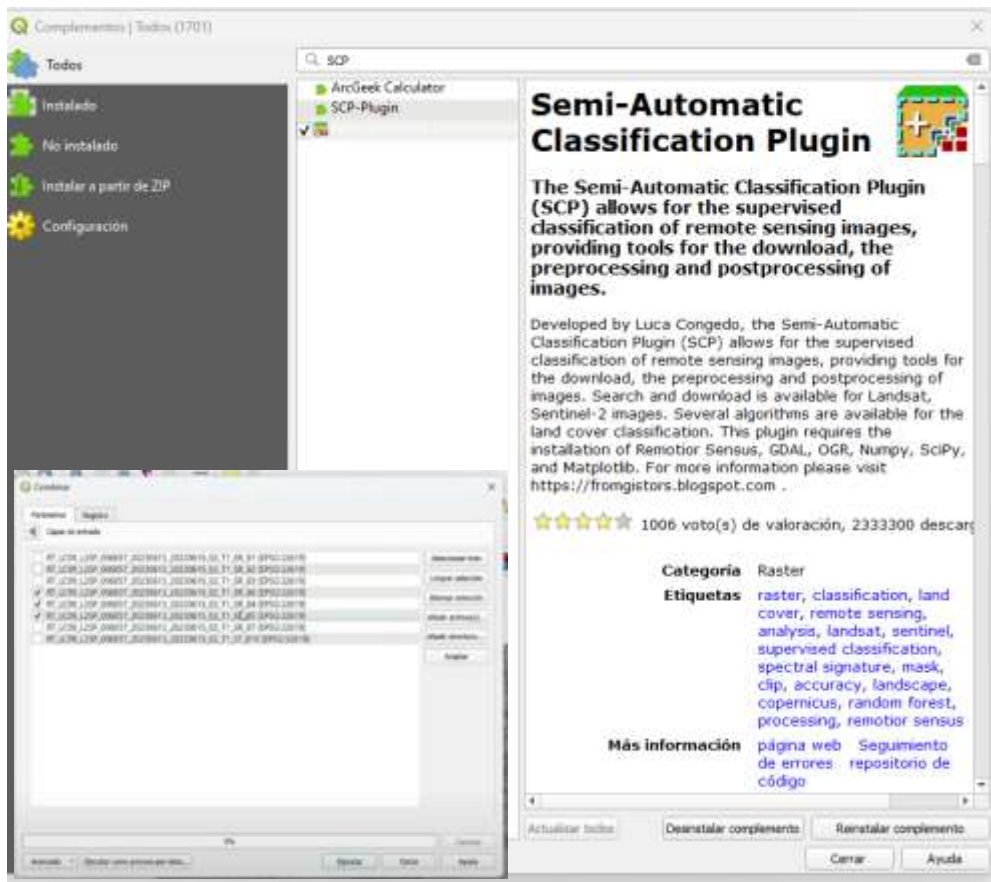
MAT-SUP-Figura 6. Los resultados nos muestran dado que el p-valor es mucho menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula y concluimos que los datos de "Área deforestada" no siguen una distribución normal. El valor 2.758e-06 es una forma científica de expresar el número 0.000002758, que es un número muy pequeño. En este caso, "e-06" indica que el número debe multiplicarse por 10 elevado a la potencia de -6, es decir, por 0.000001 en su forma de expresión 2.758e-06 es equivalente a 2.758×10^{-6} , lo cual es igual a 0.000002758. En términos prácticos, un p-valor de 2.758e-06 es extremadamente pequeño y mucho menor que el umbral comúnmente utilizado de 0.05. Esto significa que hay una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula, lo que lleva a la conclusión de que los datos no siguen una distribución normal en este caso.

MAT-SUP-Figure 6. The results show us that since the p-value is much less than 0.05, the null hypothesis is rejected and we conclude that the data for "Deforested Area" does not follow a normal distribution. The value 2.758e-06 is a scientific way of expressing the number 0.000002758, which is a very small number. In this case, "e-06" indicates that the number should be multiplied by 10 raised to the power of -6, that is, by 0.000001 in its expressed form 2.758e-06 is equivalent to 2.758×10^{-6} , which is equal to 0.000002758. In practical terms, a p-value of 2.758e-06 is extremely small and much smaller than the commonly used threshold of 0.05. This means that there is strong evidence against the null hypothesis, leading to the conclusion that the data do not follow a normal distribution in this case.

```
1 summary(chi)
2
3
4 #test de shapiro-wilk para area deforestada
5 shapiro_test_Areadeforestada <- shapiro.test(chi$'Area deforestada')
6
7 # Crear un boxplot para comparar las distribuciones de 'Yungas' y 'Zona de amortiguamiento'
8 boxplot(data$Yungas, data$Zona_de_amortiguamiento,
9         names = c("Yungas", "Zona de amortiguamiento"),
10         main = "Comparación de las Distribuciones de Yungas y Zona de Amortiguamiento",
11         ylab = "Valor de deforestación",
12         col = c("skyblue", "lightgreen"),
13         border = "black")
14
15 # Realizar la prueba de Mann-Whitney
16 resultado <- wilcox.test(data$Yungas, data$Zona_de_amortiguamiento)
17
18 # Mostrar el resultado de la prueba
19 print(resultado)
20 # Cargar el archivo Excel
21 library(readxl)
22 data <- read_excel("ruta/del/archivo/Mann-Whitney.xlsx")
23
24 # Verificar las primeras filas de los datos
25 head(data)
26
27
28
```

MAT-SUP-Figura 7. El test arrojó un p-valor de 0.00000000142, que es significativamente menor que 0.05, lo que indica que rechazamos la hipótesis nula y coincidimos con el test de Shapiro Wilk que hay una diferencia significativa entre las distribuciones de las dos variables.

MAT-SUP-Figure 7. The test yielded a p-value of 0.00000000142, which is significantly less than 0.05, indicating that we reject the null hypothesis and agree with the Shapiro Wilk test that there is a significant difference between the distributions of the two variables.



MAT-SUP-Figura 8. Ampliación de SCP en Qgis para la corrección atmosférica.

MAT-SUP-Figura 8. SCP extension in Qgis for atmospheric correction.



MAT-SUP-Figura 9. Aprobación del proyecto por parte de SERNANP.

MAT-SUP-Figura 9. Project approval by SERNANP.



MAT-SUP-Figura 10. Patrullajes rutinarios y reconocimiento de Zonas.

MAT-SUP-Figure 10. Routine patrols and zone reconnaissance.



MAT-SUP-Figura 11. Creación de mapas.

MAT-SUP-Figure 11. Map creation.